



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA
Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO Y MECATRÓNICO

TEMA: ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INCIDENCIA DEL CAMBIO DE
GEOMETRÍA DEL ORIFICIO DE UN DISPOSITIVO SYNTHETIC SOBRE
UNA SUPERFICIE TÉRMICA

AUTORES: CÓRDOVA CÁRDENAS, GUSTAVO DAVID
CANO CAMPUZANO, JUAN SEBASTIAN

DIRECTOR: MSc. NARVÁEZ, CHRISTIAN PATRICIO

SANGOLQUÍ

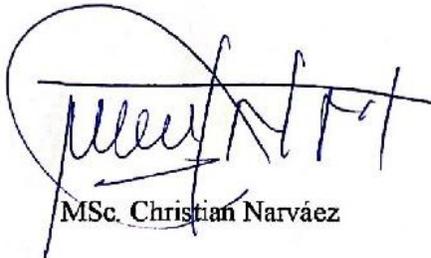
2018



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA Y MECÁNICA
CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación: **“ESTUDIO EXPERIMENTAL EN LA INCIDENCIA DEL CAMBIO DE GEOMETRÍA EN EL ORIFICIO DE UN DISPOSITIVO SYNTHETIC JET EN UNA PLACA TÉRMICA”**, realizado por los señores **GUSTAVO DAVID CÓRDOVA CÁRDENAS** y **JUAN SEBASTIAN CANO CAMPUZANO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **GUSTAVO DAVID CÓRDOVA CÁRDENAS** y **JUAN SEBASTIAN CANO CAMPUZANO** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 27 de febrero de 2018



MSc. Christian Narváez

Director



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA Y MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **GUSTAVO DAVID CÓRDOVA CÁRDENAS**, con cédula de identidad N° 172210958-2 y **JUAN SEBASTIAN CANO CAMPUZANO**, con cédula de identidad N° 171321601-6, declaramos que el trabajo de titulación: “**ESTUDIO EXPERIMENTAL EN LA INCIDENCIA DEL CAMBIO DE GEOMETRIA DE UN ORIFICIO DE UN DISPOSITIVO SYNTHETIC JET EN UNA PLACA TÉRMICA**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 27 de febrero del 2018

Gustavo David Córdova Cárdenas

C.I.: 172210958-2

Juan Sebastián Cano Campuzano

C.I.: 171321601-6



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA Y MECÁNICA

AUTORIZACIÓN (PUBLICACIÓN REPOSITORIO)

Nosotros, **GUSTAVO DAVID CÓRDOVA CÁRDENAS**, con cédula de identidad N° 172210958-2 y **JUAN SEBASTIAN CANO CAMPUZANO**, con cédula de identidad N° 171321601-6, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la Institución el presente trabajo de titulación: “**ESTUDIO EXPERIMENTAL EN LA INCIDENCIA DEL CAMBIO DE GEOMETRIA DE UN ORIFICIO DE UN DISPOSITIVO SYNTHETIC JET EN UNA PLACA TÉRMICA**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 27 de febrero del 2018

Gustavo David Córdova Cárdenas

C.I.: 172210958-2

Juan Sebastián Cano Campuzano

C.I.: 171321601-6

Dedicatorias

“Esfuézate y se valiente” Josué 1:6

Dedico el siguiente trabajo primeramente a Dios, quien siempre ha sido mi fuente de perseverancia y fortaleza en toda mi vida. A mis padres, Edison y Eulalia quienes los amo mucho, los cuales han sido un apoyo incondicional en los momentos difíciles. A mis hermanos, Felipe y Pablo quienes me han apoyado y dado su afecto. A mi abuelita Elsy, la cual ha sido como una segunda madre. A toda mi familia la cual siempre me ha brindado su ayuda. Finalmente, a mis amigos que he conocido en la vida académica, con los cuales nos hemos podido ayudar mutuamente.

Juan Sebastián Cano Campuzano

Lleno de satisfacción, de amor y esperanza, dedico este proyecto a Dios, quien me ha sabido guiar en las decisiones que he tomado durante toda mi formación profesional.

A cada uno de mis seres queridos, quienes han sido pilares para seguir adelante.

A mis padres Gustavo Córdova y Susana Cárdenas, porque ellos son la motivación de mi vida de ser lo que seré.

A mis hermanas Fernanda y Amalia y a mis sobrinos Israel y Amalia, gracias a ellas por confiar en mí.

Gustavo David Córdova Cárdenas

Agradecimientos

A Dios por ser mi roca y fortaleza durante toda mi vida, el cual me ha sabido guiar en su propósito. Deseo agradecer a los ingenieros Christian Narváez y Luis Segura quienes considero son unas grandes personas, profesionales y amigos, los cuales apoyaron de gran manera al proyecto con su experiencia y consejo. Finalmente agradezco a Edison y Eulalia mis padres, quienes han sido un apoyo incondicional durante toda mi vida, los amo mucho.

Juan Sebastián Cano Campuzano

A Dios por demostrarme lo hermoso que es la vida y lo justa que puede llegar a ser, por permitirme conocer gente maravillosa y por acompañarme durante toda esta etapa de formación.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas E.S.P.E, por brindarme las herramientas que se requiere para mi vida profesional

A Christian Narváez, tutor de este trabajo y Luis Segura, director de la carrera de mecánica, quienes han sabido guiarme conforme a su conocimiento y experiencia.

A mis padres que siempre me apoyaron incondicionalmente y por haberme enseñado ser siempre perseverante y que cumpla con mis ideales.

A mis grandes amigos por sus consejos y enseñanzas.

Gustavo David Córdova Cárdenas

Índice general

Certificado del Director	ii
Oficio de autoría de responsabilidad.....	iii
Oficio de autorización (Publicación Repositorio Institucional).....	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Índice de figuras	ix
Índice de tablas.....	xi
Resumen.....	xii
Abstract.....	xiii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. Alcance	5
1.5. Estructura del documento.....	5
2. Estado del arte.....	6
2.1. Estudios anteriores	6
2.1. Flujo sintético (Synthetic Jet).....	8
2.2. Tipo de actuadores.....	10
2.2.1. Actuador piezoeléctrico	11
2.2.2. Actuador pistón electromagnético.....	11
2.2.3. Actuador pistón mecánico.....	12
2.2.4. Actuador acústico.....	13
2.3. Modelos matemáticos.....	14
2.3.1. Modelo matemático correspondiente al flujo.....	14
2.3.2. Modelo matemático del actuador.....	18

2.3.3.	Modelo matemático del sistema	20
2.3.3.1.	Lumped Element Modeling (LEM).....	20
2.3.3.2.	Aplicación de LEM en un synthetic jet	22
3.	Metodología	27
3.1.	Procedimiento experimental	27
3.1.1.	Medición de la velocidad de flujo	29
3.1.2.	Aplicación a una placa calentada	31
4.	Análisis de resultados.....	36
4.1.	Análisis de medición de velocidad	36
4.1.1.	Efecto de la frecuencia en la velocidad.....	36
4.1.2.	Efecto de la distancia en la velocidad	37
4.1.3.	Efecto del tipo de orificio en la velocidad.....	38
4.2.	Análisis de transferencia de calor	42
4.2.1.	Diseño de Taguchi	42
4.2.2.	Efecto del tipo de orificio y la distancia en la transferencia de calor	46
5.	Conclusiones y trabajos futuros.....	50
5.1.	Conclusiones	50
5.2.	Recomendaciones y trabajos futuros	52
Bibliografía		55

Índice de figuras

Figura. 1 Esquema de configuración diafragma vibratorio-cavidad con orificio para generar un synthetic jet	9
Figura. 2 Carreras de succión y expulsión	9
Figura. 3 Anillos de vortices generados por el synthetic jet	10
Figura. 4 Unión empernada de un diafragma piezoeléctrico	11
Figura. 5 Elementos que conforman un actuador magnético.....	12
Figura. 6 Esquema de pistón mecánico para generación de un flujo sintético	12
Figura. 7 Esquema de actuador acústico para generación de un flujo sintético.....	13
Figura. 8 Esquema de modelo matemático para un flujo sintético	14
Figura. 9 Esquema de un jet axisimetrico creado por una fuente de momentum en la direccion x en un medio infinito.	15
Figura. 10 Esquema del modelo del actuador en el cual el volumen del fluido desplazado por la membrana es expulsado a través de un orificio de forma de un jet.	18
Figura. 11 Esquema de longitud de onda acústica y tamaño característico de la cavidad	21
Figura. 12 Esquema de dispositivo synthetic jet con su representación de circuito equivalente.....	22
Figura. 13 Esquema de dispositivo synthetic jet y el actuador piezoeléctrico.....	28
Figura. 14 Esquema de orificios. a) Orificio Circular b) Orificio Rectangular c) Orificio Triangular d) Orificio Cuadrado	28
Figura. 15 Fotografía de banco de pruebas para medición de velocidad de flujo.....	30
Figura. 16 Esquema de toma de datos de velocidad de flujo 1) Adquisición de datos vía Bluetooth 2) .Anemómetro de Hilo Caliente 3) Dispositivo Synthetic Jet 4)Generador de Funciones(Onda Sinusoidal 7.25 Vrms)	30
Figura. 17 Esquema de medición de temperaturas	31
Figura. 18 Ubicación de sensores la placa	31
Figura. 19 Esquema de diseño experimental de Taguchi	33

Figura. 20 Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la frecuencia para el orificio circular	39
Figura. 21 Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la frecuencia para el orificio rectangular.....	40
Figura. 22 Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la frecuencia para el orificio cuadrado	40
Figura. 23 Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la frecuencia para el orificio circular orificio triangular	41
Figura. 24 Comparación entre orificios con respecto a la velocidad y frecuencia a una distancia de 5 mm	41
Figura. 25 Respuestas en el tiempo de enfriamiento de acuerdo al tipo de Orificio y Distancia	44
Figura. 26 Interacción del tiempo de enfriamiento tanto con la distancia y el tipo de orificio	45
Figura. 27 Coeficiente de transferencia de calor promedio vs distancia axial (z) para cada tipo de orificio. Frecuencia excitación (Circular =2200 Hz Rectangular= 2000 Hz Triangular=2400 Hz Cuadrada=1700 Hz).....	48
Figura. 28 Coeficiente de Operación vs distancia axial (z) para cada tipo de orificio. Frecuencia excitación (Circular =2200 Hz Rectangular= 2000 Hz Triangular=2400 Hz Cuadrada=1700 Hz).....	49
Figura. 29 Perfil de enfriamiento en el tipo para cada tipo de orificio. (Velocidad para cada orificio 1m/s a z=10 mm)	49

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Relaciones de variables para cada tipo de dominio energético</i>	22
Tabla 2 <i>Parámetros de los orificios</i>	29
Tabla 3 <i>Frecuencias de resonancia para cada tipo de orificio</i>	36
Tabla 4 <i>Velocidades de flujo a diferentes distancias, en la frecuencia de resonancia del diafragma para cada orificio.....</i>	37
Tabla 5 <i>Detalles de los factores y niveles para el experimento.....</i>	42
Tabla 6 <i>Arreglo ortogonal utilizado en el Diseño de Taguchi.....</i>	42
Tabla 7 <i>Resultados experimentales con su correspondiente valor de S/N.....</i>	42
Tabla 8 <i>Resultados del análisis ANOVA.....</i>	43

Resumen

La aplicación de un flujo sintético (synthetic jet) es un enfoque razonablemente nuevo para el enfriamiento de componentes electrónicos. Un “synthetic jet” es un flujo de aire expulsado a través de un orificio creado por la vibración de un diafragma dentro de una cavidad. Se estudió experimentalmente la mejora en la transferencia de calor usando diferentes tipos de orificios. Se seleccionó un diagrama piezoeléctrico como un actuador vibratorio, el cual fue excitado con un generador de funciones usando onda sinusoidal. Se estudiaron cuatro tipos de orificios: Circular, Rectangular, Triangular y Cuadrado. La primera parte del estudio consiste en reconocer la frecuencia de excitación en la que cada orificio produce la mayor velocidad de flujo. Las mediciones de velocidad se hicieron usando un anemómetro de hilo caliente. En la segunda parte, se calentó una placa de acero y luego se enfrió usando el “synthetic jet”. El propósito de esta etapa es reconocer la mejor combinación de parámetros para obtener el menor tiempo de enfriamiento. Para hacer esto, se utilizó un diseño experimental de Taguchi. Las variables de estudio de entrada fueron la distancia y el tipo de orificio. La variable de salida fue el tiempo de enfriamiento. La frecuencia de excitación se estableció en la cual la velocidad de flujo era mayor para cada orificio. La combinación de parámetros con el menor tiempo de enfriamiento fue: orificio rectangular, 20 mm de distancia con respecto al orificio y una frecuencia de excitación de 2000 Hz. Utilizando estos parámetros, se obtuvo un coeficiente de transferencia de calor promedio de $11.05 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ con un coeficiente de rendimiento (COP) de 49.21.

PALABRAS CLAVE:

- **SYNTHETIC JET**
- **MEJORA DE TRASNFERENCIA DE CALOR**
- **MEDICIÓN POR ANEMÓMETRO DE HILO CALIENTE**
- **ORIFICIO**

Abstract

Application of a synthetic jet is reasonably a novel approach for cooling of electronic components. A synthetic jet is an airflow ejected through an orifice created by the vibration of a diaphragm inside of a cavity. The heat transfer enhancement using different kinds of orifices were studied experimentally. A piezoelectric diaphragm was selected as vibrating actuator, which was excited using a wave function generator with a sinusoidal wave form. Four kinds of orifices were studied: Circular, Rectangular, Triangular and Square. The first part of the study consisted on recognizing the excitation frequency in which each orifice produces the highest flow velocity. The velocity measurements were done using a hotwire anemometer. In the second part, a steel plate was heated and then cooled using the synthetic jet. The purpose of this stage was to recognize the best combination of parameters in order to obtain the lowest cooling time. In order to do this a Taguchi experimental design was used. The input study variables were distance and kind of orifice. The output variable was the cooling time. The excitation frequency was established in which the flow velocity was larger for each orifice. The combination of parameters with the lowest cooling time were: Rectangle orifice, 20 mm of distance from the orifice and an excitation frequency of 2000 Hz. Using these parameters a mean heat transfer coefficient of $11.05 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ with a coefficient of performance (COP) of 49.21 were obtained.

KEYWORDS:

- **SYNTHETIC JET**
- **HEAT TRANSFER ENHANCEMENT**
- **HOT-WIRE ANEMOMETRY**
- **ORIFICE**

Capítulo 1

Introducción

En el presente capítulo se dan a conocer las razones por las cuales se estudiará la aplicación de un “synthetic jet” para disipación de calor. En los antecedentes se hace una breve revisión de estudios previos relacionados al uso de “synthetic jets” en aplicaciones de transferencia de calor. Se justifica las razones por las cuales se realiza el presente trabajo de investigación y se da a conocer la importancia del mismo. Además, se definen los objetivos generales y secundarios del trabajo. Finalmente, se describe la estructura del presente documento.

1.1. Antecedentes

La industria electrónica ha sido testigo de un gran crecimiento en los últimos años. El avance en la industria ha llevado a un gran incremento en la velocidad de las computadoras y la complejidad en los circuitos electrónicos (Mangate & Chaudhari, 2016). Debido a la miniaturización de los dispositivos electrónicos existe la necesidad de crear nuevas soluciones para lidiar con el calentamiento de los mismos. Un flujo sintético (synthetic jet) es una alternativa para la solución de esta problemática. Un synthetic jet es un flujo de aire no estacionario que puede ser periódico. Este se origina por la excitación de un actuador vibratorio el cual permite que un volumen de aire alojado en una cavidad sea expulsado hacia al ambiente a través de un orificio para su posterior succión. De acuerdo a investigaciones anteriores los actuadores utilizados para producir un synthetic jet han sido diafragmas piezoeléctricos, pistones electromagnéticos, mecánicos y altavoces (Mohsemi & Mittal, 2015). A diferencia de un jet continuo un synthetic jet posee (zero-net mass flux) ya que utiliza el aire de sus alrededores para su formación y puede transferir momento lineal sin la inyección de una masa de aire (Liu, Tsai, & Wang, 2014). El flujo de aire se separa en los bordes del orificio induciendo un anillo de vórtice que se

traslada al ambiente debido a su cantidad de movimiento. Si este anillo se encuentra lo suficientemente lejos del orificio no se ve afectado por el efecto de succión cuando el actuador se mueve hacia abajo. De esta manera un nuevo anillo de vórtice es creado dando lugar a un tren de vórtices, los cuales interactúan entre sí formando un jet turbulento (Ming & Zhou, 2013). Esta generación de vórtices influye de manera muy importante en aplicaciones de refrigeración ya que el calor disipado en una pared caliente depende de la interacción entre estos trenes de vórtices (Mahalingam, Rumigny, & Glezer, 2004).

Los primeros estudios referentes a calor disipado mediante un synthetic jet se realizaron en 1986 por Yassour donde se pudo observar el comportamiento de un jet producido por un altavoz. Un calentador se alineó delante del orificio, y se registró la tasa de transferencia de calor en la superficie. El efecto del flujo resultante de la vibración del altavoz produjo una mejora en 4 veces la tasa de transferencia de calor comparado al enfriamiento por convección natural (Yassour, Stricker, & Wolfshtein, 1986).

Actualmente el uso de un flujo sintético en aplicaciones de transferencia de calor ha atraído el interés de muchos investigadores (Mahalingam, Rumigny, & Glezer, 2004). Mahalingam investigó la disipación de calor que genera un synthetic jet que se mueve a través de un canal rectangular. Zhang y Tan investigaron experimentalmente el flujo y transferencia de calor de un synthetic jet generado a partir de la vibración de un diafragma piezoeléctrico en una cavidad para enfriar una placa calentada de constantan. La forma del orificio utilizado fue un rectángulo de 0.5 x 10 mm. Para medir la velocidad del flujo se utilizó un anemómetro de hilo caliente y se varió la distancia de medición con respecto al centro del orificio. Para observar la distribución de temperaturas a diferentes distancias de utilizó una cámara infrarroja. Al final de la investigación registraron dos frecuencias de resonancias ($f=340$ y 1000 Hz) con un pico máximo de velocidad promedio de aproximadamente 5.5 m/s. Los resultados de los coeficientes locales de transferencia de calor obtenidos se pueden observar en la referencia (Zhang & Tan, 2007). Yao-Hsien, Shu-Yao y Chi-Chuan realizaron un estudio similar usando una placa calentada e investigaron el efecto del cambio de la frecuencia de excitación en la transferencia de calor usando un synthetic jet. El actuador utilizado fue de igual manera un diafragma

piezoeléctrico. La frecuencia de excitación varió de 200 a 800 Hz y la distancia de medición de la velocidad promedio se varió en ($Z/d=0-25$). La frecuencia de excitación óptima en la cual se produjo el mayor número de Reynolds fue 600 Hz, mientras que el menor número de Reynolds se registró en 200 Hz. Cuando la placa se acercaba demasiado al orificio por donde el jet es expulsado se registró una caída en la transferencia de calor debido a circulación de aire caliente en la placa. La distancia optima registrada para enfriar fue de $Z/d=15$. A esta distancia se dio incremento de 2-8 veces de la transferencia de calor con respecto a la convección natural (Liu, Tsai, & Wang, 2014).

En el presente estudio se identificará la mejor combinación de parámetros (tipos de orificio, distancia y frecuencia) para enfriar una placa de acero calentada y se registrará el cambio de temperatura. Se utilizarán 4 tipos de orificios, circular, rectangular, cuadrada y triangular. Para cada tipo de orificio se identificará la frecuencia en la cual se da la mayor velocidad de flujo, el cual se medirá utilizando un anemómetro de hilo caliente. Para dictaminar que tipo de combinación de parámetros es la mejor se hará un diseño experimental de Taguchi.

1.2. Justificación

Ya que en la industria electrónica ha generado un gran desarrollo de dispositivos electrónicos en los últimos años, los ingenieros especializados en el área de disipación de calor han tenido un gran desafío en lidiar con el calentamiento de esta nueva generación de dispositivos por lo que han presentado innovaciones para solucionar este problema (Mohsemi & Mittal, 2015) (Zhang & Tan, 2007), tales como aletas, sistemas de enfriamiento por líquido y ventiladores siendo este último el más utilizado por su gran capacidad para disipar el calor (Jaffe, Cook, & Jaffe, 1971). El ventilador convencional ha alcanzado su tamaño mínimo y consume gran cantidad de energía lo que imposibilita su futura instalación en la nueva generación dispositivos electrónicos que tienden cada vez más a reducir su tamaño. Una alternativa de solución es el uso de dispositivos synthetic jet. Un synthetic jet es un flujo pulsante de aire que es generado por la vibración de un elemento actuador en una cavidad y es expulsado al exterior a través de un orificio

(Rizzetta, Visbal , & Stanek, 1999). Debido a que el flujo pulsante presenta una gran velocidad con respecto al tamaño del dispositivo, es de gran importancia saber la incidencia del cambio de forma del orificio con respecto las características del flujo de aire producido y su capacidad para disipar calor. El presente estudio se centrará en determinar el efecto de este cambio de geometría. Por las razones presentadas, se realizará el presente estudio el cual contribuirá al desarrollo de la tecnología en el área de transferencia calor en el Ecuador y en la comunidad científica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Identificar la incidencia del cambio de geometría del orificio de un dispositivo synthetic jet que permita enfriar una placa térmica mediante la aplicación de un diseño experimental.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Construcción de dispositivo actuador a base de un diafragma piezoeléctrico que permita la generación del flujo sintético
- Construcción de un banco de pruebas que permita la toma de datos en cada experimento.
- Determinar la frecuencia donde la velocidad es mayor para cada tipo de orificio.
- Realizar un diseño experimental que indique la mejor combinación (distancia, frecuencia y tipo de orificio) y permita el menor tiempo de enfriamiento de una placa calentada.

1.4. Alcance

El estudio se restringirá a la identificación de la mejor combinación de parámetros (distancia, frecuencia y tipo de orificio) los cuales permitan enfriar una placa térmica de manera más rápida. Para esto se diseñará y construirá un dispositivo actuador a base de estudios preliminares para generar un flujo sintético que enfríe una superficie en un tiempo donde la temperatura descienda en un rango establecido. Mediante un banco de pruebas se realizará la toma de datos variando la distancia entre el instrumento de medición de flujo aire y el actuador. Se medirán y analizarán las variables que intervienen en el comportamiento en un actuador piezoeléctrico energizado a distintas frecuencias que permitirá obtener un flujo de aire por medio de una carcasa que tendrá orificios de distinta geometría. El proyecto a desarrollarse seguirá un protocolo de montaje para medir la velocidad por cada tipo de orificio para restringir distintas variables que afectan al estudio, y así encontrar los valores de los parámetros para el correcto funcionamiento del dispositivo.

1.5. Estructura del documento

El documento se estructura de cinco capítulos. En el primer capítulo se describe los antecedentes del estudio, en el cual se dan a conocer previos estudios relacionados a la línea de investigación, también define la justificación, los objetivos y el alcance que se plantea en el presente trabajo. El segundo capítulo describe la base teórica necesaria para la comprensión del estudio. En este se explica el trasfondo teórico inmerso en el fenómeno de turbulencia, transferencia de calor por convección y la teoría referida exclusivamente al flujo sintético, actuador y el sistema físico. El tercer capítulo describe la metodología y diseño experimental necesario para reconocer la mejor combinación de parámetros (frecuencia, distancia y tipo de orificio) que permiten enfriar de forma más rápida una placa calentada. En el cuarto capítulo se analizan los resultados referentes al diseño experimental y del estudio por medio del software Minitab. Finalmente, el quinto capítulo

presenta las conclusiones y recomendaciones que se han observado durante el desarrollo del trabajo de investigación.

Capítulo 2

Estado del arte

En el presente capítulo se una revisión de estudios anteriores relacionados al campo de de transferencia de calor utilizando synthetic jets además presenta el concepto un flujo sintético (synthetic jet), los tipos de actuadores utilizados en estos dispositivos y la teoría que describe al flujo, el actuador vibratorio y el sistema físico en conjunto.

2.1. Estudios anteriores

El uso de un synthetic jet en aplicaciones de transferencia de calor ha atraído a un gran número de investigadores durante la última década. Se demostrado que este mecanismo mejora la transferencia de calor debido a las siguientes propiedades. En primer lugar, un synthetic jet genera una calle de vórtices los cuales cuando impactan en una superficie caliente influyen en el campo de velocidades induciendo un flujo turbulento en la pared, lo cual incrementa dramáticamente la tasa de transferencia de calor. En segundo lugar, un synthetic jet maneja una mayor cantidad de fluido en comparación con un jet continuo, lo cual aumenta el volumen de fluido que incide sobre una superficie que aumentando su capacidad de disipar calor. (Zhang & Tan, 2007). A continuación, se muestran algunas de las investigaciones realizadas en el campo de transferencia de calor usando synthetic jet.

Zhang y Tan investigaron experimentalmente el flujo y transferencia de calor de un synthetic jet generado a partir de la vibración de un diafragma piezoeléctrico en una cavidad para enfriar una placa calentada de constantan. Se estudió un orificio circular y rectangular en diferentes configuraciones. El diafragma piezoeléctrico fue excitado con una onda cuadrada utilizando un generador de funciones (YDS966A) con una etapa de amplificación mediante el uso de un Power Amplifier (SA-750A). El voltaje de excitación

establecido fue 175 voltios. Para medir la velocidad del flujo se utilizó un anemómetro de hilo caliente y se varió la distancia de medición con respecto al centro del orificio junto con la frecuencia de excitación. Para observar la distribución de temperaturas a diferentes distancias se utilizó una cámara infrarroja y además se instalaron una serie de termocuplas en la placa para determinar una temperatura promedio. El estudio reveló que mientras la distancia incrementa con respecto al orificio el coeficiente de calor incrementa hasta cierta distancia en la cual decrece. (Zhang & Tan, 2007)

Mangesh B. Chaudhari estudió el comportamiento de diferentes configuraciones de orificios en forma de ovalo y diamante con el mismo diámetro hidráulico. De igual manera se utilizó un diafragma piezoeléctrico como elemento vibratorio y en este caso se enfrió un bloque de cobre. Se varió la distancia axial con respecto al orificio y se estudió el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor promedio. De acuerdo al estudio se evidenció que los orificios en forma de diamante y oval tienen un mejor desempeño que un orificio circular en términos de transferencia de calor. (Mangate & Chaudhari, 2016).

Otro estudio realizado por Mangesh B. Chaudhari se enfocó que utilizar una configuración planetaria utilizando orificios circulares. En este caso se utilizó el synthetic jet para enfriar un disipador de calor para computadoras. El disipador de calor se montó en una fuente de calor para su calentamiento. Se evidenció un incremento del coeficiente de transferencia de calor en un 12% comparado con el uso de un solo orificio circular. De acuerdo al estudio se evidenció que la eficiencia de una configuración tipo satélite es marginalmente menor en comparación de un ventilador convencional.

Shu-Yao y Chi-Chuan realizaron un estudio similar usando una placa calentada e investigaron el efecto del cambio de la frecuencia de excitación en la transferencia de calor usando un synthetic jet. El actuador utilizado fue de igual manera un diafragma piezoeléctrico. La frecuencia de excitación varió de 200 a 800 Hz y la distancia de medición de la velocidad promedio se varió en ($d=0-25$). La frecuencia de excitación óptima en la cual se produjo el mayor número de Reynolds fue 600 Hz, mientras que el

menor número de Reynolds se registró en 200 Hz. Cuando la placa se acercaba demasiado al orificio por donde el jet es expulsado se registró una caída en la transferencia de calor debido a circulación de aire caliente en la placa. La distancia optima registrada para enfriar fue de $d=15$. A esta distancia se dio incremento de 2-8 veces de la transferencia de calor con respecto a la convección natural (Liu, Tsai, & Wang, 2014).

De acuerdo a la revisión bibliográfica no se ha comparado el comportamiento de un orificio triangular, cuadrado, rectangular y circular en la incidencia de la transferencia de calor. En el presente estudio se identificará la mejor combinación de parámetros (tipos de orificio, distancia y frecuencia) para enfriar una placa de acero calentada y se registrará el cambio de temperatura. Para cada tipo de orificio se identificará la frecuencia en la cual se da la mayor velocidad de flujo, el cual se medirá utilizando un anemómetro de hilo caliente. Se enfriará una placa de acero y se tomará el tiempo de enfriamiento para cada tipo de orificio. Para dictaminar que tipo de combinación de parámetros es la mejor se hará un diseño experimental de Taguchi.

2.1. Flujo sintético (Synthetic Jet)

Un synthetic jet o también llamado “flujo de masa neto cero (zero net mass flux)” es un flujo periódico que resulta de la formación e interacción de anillos de vórtice. Es importante mencionar que el término “flujo de masa neto” se refiere a que la cantidad de aire que ingresa a la cavidad es la misma que se expulsa y utiliza el aire de sus alrededores para su formación transfiriendo momento lineal sin la inyección de una masa de aire

Un método común para la generación de un synthetic jet es el empleo de una configuración diafragma vibratorio – cavidad como se muestra en la Figura 1. Para generar el flujo de aire se necesita una cavidad sellada con un diafragma vibratorio flexible en un extremo y en el otro un orificio (Krishnan & Mohseni, 2009).

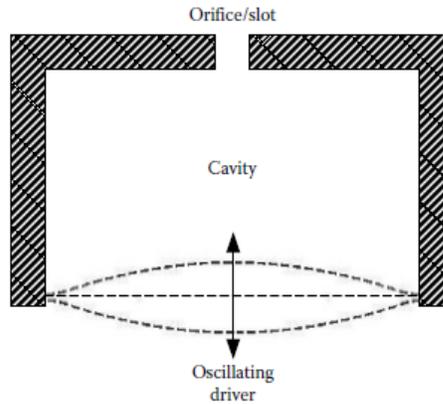


Figura. 1 Esquema de configuración diafragma vibratorio-cavidad con orificio para generar un synthetic jet

Fuente (Mohsemi & Mittal, 2015)

El proceso de formación del flujo está compuesto de un ciclo con dos carreras llamadas succión y expulsión como se muestra en la Figura 2.

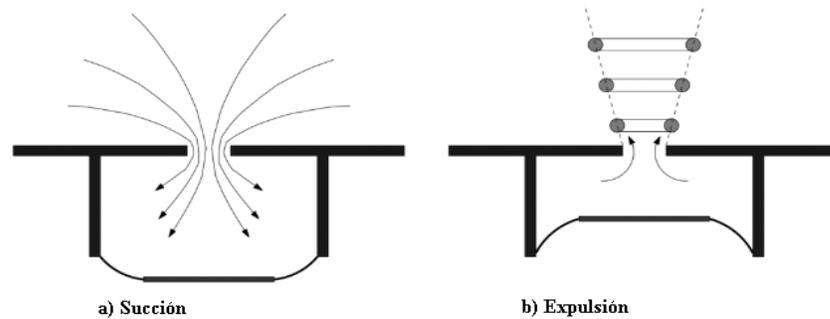


Figura. 2 Carreras de succión y expulsión

Fuente (Mohsemi & Mittal, 2015)

Durante la carrera de succión, el diafragma se mueve lejos del orificio, incrementando el volumen de la cavidad y subsecuentemente disminuyendo la presión interna, lo cual provoca el ingreso de aire en la cavidad. Durante la carrera de expulsión, el diafragma se mueve hacia el orificio provocando la expulsión del fluido a través del mismo. El flujo de aire se separa en los bordes del orificio induciendo un anillo de vórtice que se traslada al ambiente debido a su cantidad de movimiento. De esta manera, una serie de carreras de succión y expulsión resulta en la formación de un tren de anillos de vórtice moviéndose lejos del orificio. Estas estructuras luego interactúan, se juntan y se rompen generando un flujo turbulento que se dirige en la dirección del flujo, este principio operacional permite

que el synthetic jet esté relacionado completamente por el medio que le rodea como se ilustra en la Figura 3. (Krishnan & Mohseni, 2009)

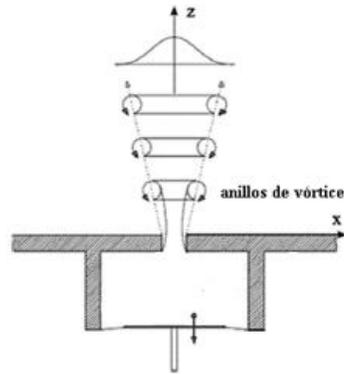


Figura. 3 Anillos de vortices generados por el synthetic jet
Fuente (Mohsemi & Mittal, 2015)

Existen dos variables no dimensionales que influyen a un synthetic jet (la relación de carrera L/d y el número de Reynolds.). La relación de carrera L/d es un parámetro representativo de la longitud del volumen de fluido resultante de la carrera de expulsión. En la sección de modelo matemático del actuador se explican más a detalle estos parámetros (Krishnan & Mohseni, 2009).

2.2. Tipo de actuadores.

En general un actuador synthetic es aquel elemento vibratorio que permite la expulsión y succión de un flujo de aire a través de un orificio. Hasta el momento se han utilizado diferentes tipos de actuadores, los cuales son diafragmas piezoeléctricos, pistones electromagnéticos, mecánicos y actuadores acústicos (Mohsemi & Mittal, 2015).

2.2.1. Actuador piezoeléctrico

El actuador piezoeléctrico es un diafragma impulsor que consta de una cuña metálica que generalmente es de latón y de un parche piezocerámico pegado a su superficie que tiene electrodos delgados recubiertos en la superficie que permiten conexiones eléctricas. La cuña metálica se sujeta mediante abrazaderas o uniones emperradas con la cavidad que contiene el orificio o ranura. Cuando se aplica una tensión sinusoidal de corriente alterna a través del parche piezoeléctrico, se crea un campo eléctrico y a través del efecto piezoeléctrico, el material experimenta tensiones mecánicas que generan un momento flexionante en el diafragma, produciendo un desplazamiento de volumen a una cierta velocidad (Mohsemi & Mittal, 2015).

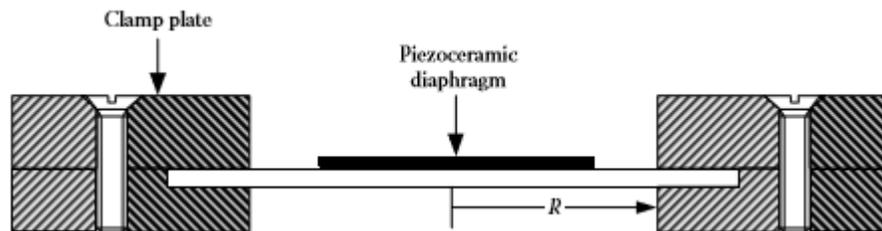


Figura. 4 Unión emperrada de un diafragma piezoeléctrico
Fuente (Mohsemi & Mittal, 2015)

2.2.2. Actuador pistón electromagnético

También conocido como impulsor de pistón electrodinámico, consiste de un pistón, una bobina y un conjunto magnético. El ensamble magnético es responsable de crear un campo magnético estático con una densidad de flujo magnético. Cuando una corriente alterna pasa a través de la bobina, la interacción produce una fuerza electromagnética o fuerza de Lorentz, lo que hace que el pistón oscile llevando un desplazamiento de volumen de aire. El desplazamiento y velocidad del volumen dependen de las propiedades magnéticas y propiedades de la bobina. La cavidad del actuador juega un papel importante

en el rendimiento general del dispositivo y es donde el fluido se comprime y expande periódicamente (Mohsemi & Mittal, 2015).

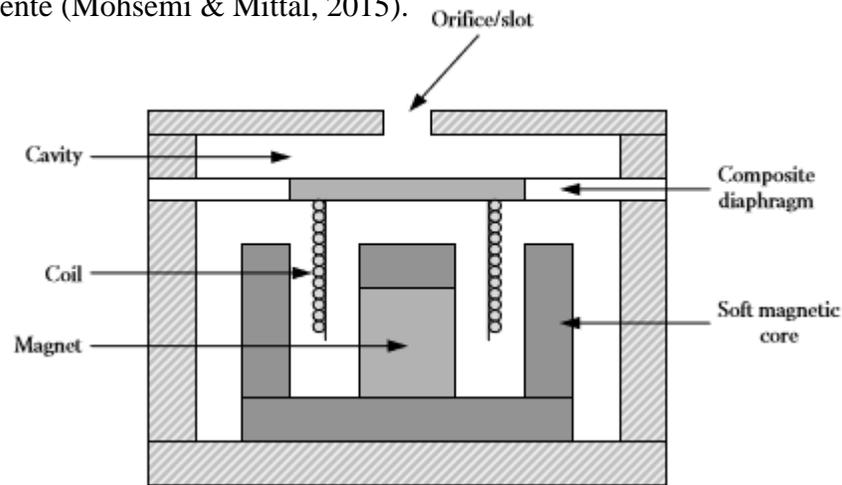


Figura. 5 Elementos que conforman un actuador magnético
Fuente (Mohsemi & Mittal, 2015)

2.2.3. Actuador pistón mecánico.

El actuador consta de una cavidad cilíndrica con un orificio y un pistón mecánico en su interior. Cuando el pistón se mueve hacia abajo, alejándose del orificio, el fluido ingresa al volumen del cilindro que el pistón desplaza. Cuando el pistón se desplaza hacia arriba, expulsa el fluido al exterior en un flujo sintético (Ramos, Vargas, Gorrostieta, & Pedraza, 2006).

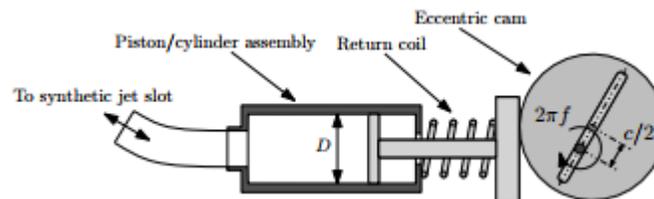


Figura. 6 Esquema de pistón mecánico para generación
de un flujo sintético
Fuente (Lasagne, Orazi, & Luso, 2013)

2.2.4. Actuador acústico

Los actuadores de sonido son los encargados de propagar ondas a través de un medio que puede ser sólido, líquido o gaseoso. Es muy común utilizar un altavoz que consta de un electroimán y una bobina móvil que mueve un diafragma. El actuador se alimenta con una corriente de amplitud y frecuencia modulada y crea un campo magnético variable mediante el electroimán, generando una fuerza que lo mueve, y a su vez a la membrana a la que está unido. Finalmente, la membrana produce compresiones y descompresiones en el aire produciendo el sonido y el flujo de aire (Alvarado , Urbina, Vega, Alcaraz , & Rodriguez, 2015).

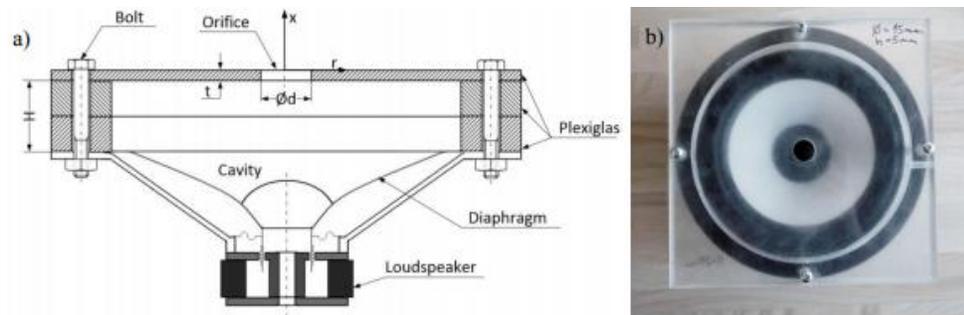


Figura. 7 Esquema de actuador acústico para generación de un flujo sintético Fuente (Gil & Strzelczyk, 2016)

2.3. Modelos matemáticos

2.3.1. Modelo matemático correspondiente al flujo

El modelo matemático está resumido en la Figura 8, donde partiendo de la solución analítica propuesta por Schlichting para un jet continuo sea laminar o turbulento, se puede modelar un synthetic jet reemplazando la (eddy viscosity) de un jet turbulento continuo con la (eddy viscosity) de un synthetic jet obtenida experimentalmente a partir de la tasa de propagación del flujo (Krishnan & Mohseni, 2009).

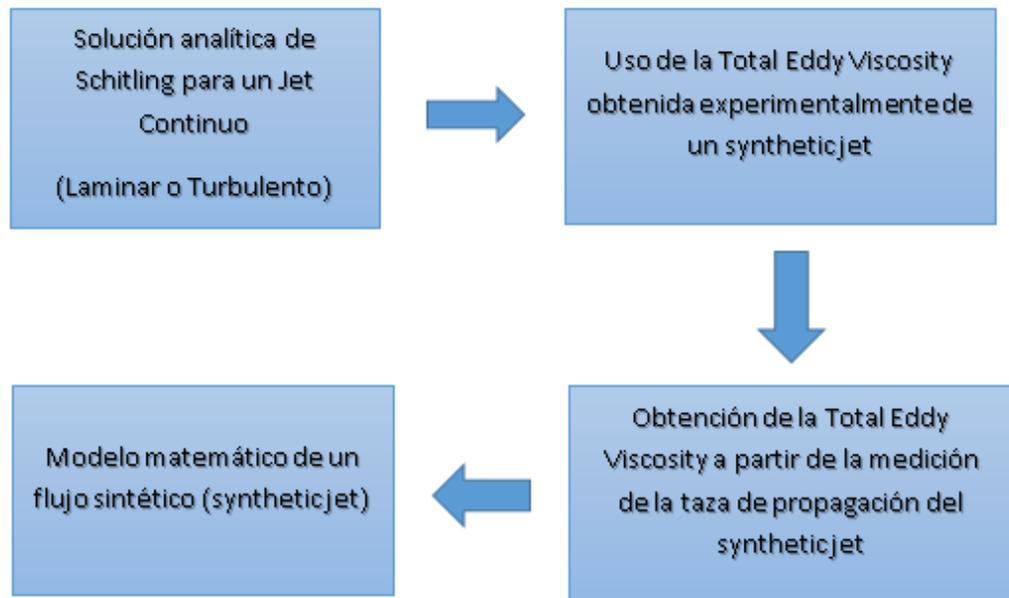


Figura. 8 Esquema de modelo matemático para un flujo sintético

A partir de la solución expuesta por Schlichting (1933) para un jet continuo incompresible, este es el caso para un jet axisimétrico que es emanado a partir de un orificio hacia un fluido similar en reposo como se muestra en la Figura 9.

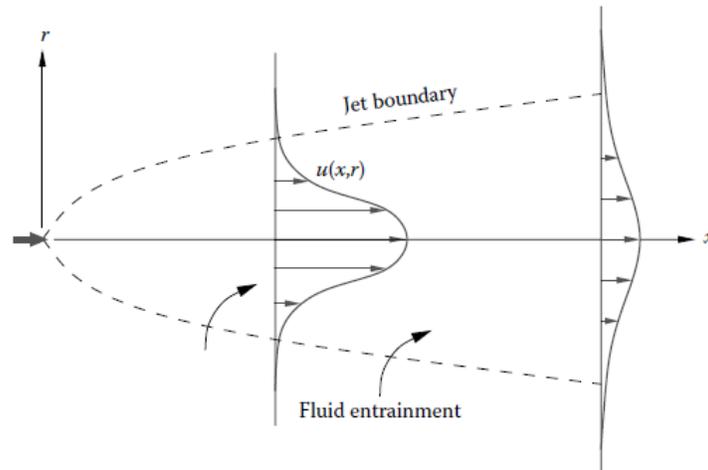


Figura. 9 Esquema de un jet axisimétrico creado por una fuente de momento en la dirección x en un medio infinito.

Fuente (Mohsemi & Mittal, 2015)

Schlichting desarrolló un modelo analítico a base de las ecuaciones axisimétricas de la capa límite aplicadas a un jet continuo. Para la obtención de dicha solución se asume un gradiente de presión en la dirección del flujo igual a 0 y se asume la hipótesis de que el campo de velocidades promedio de un synthetic jet puede ser modelado como un jet laminar continuo con el uso de un coeficiente de viscosidad virtual que puede ser obtenido empíricamente para un synthetic jet a partir de la tasa de propagación del flujo. (Krishnan & Mohseni, 2009).

A partir de la ecuación de cantidad movimiento y continuidad para la capa límite sin gradiente de presión.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{\rho r} \frac{\partial(r\tau)}{\partial r} \quad (2)$$

$$\frac{u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \quad (1)$$

Donde

u y v son la velocidades en la dirección de la corriente y radial respetivamente

τ es el esfuerzo cortante total

ρ es la densidad

El esfuerzo cortante total puede ser relacionado a la velocidad promedio usando una aproximación de la viscosidad de remolino (eddy viscosity)

$$\tau = \rho(\nu + \varepsilon_\tau) \frac{\partial u}{\partial r} = \rho \varepsilon \frac{\partial u}{\partial r} \quad (3)$$

Donde

- ν es la viscosidad molecular cinemática laminar
- ε_τ es la viscosidad turbulenta de remolino (turbulent eddy viscosity)
- ε es la viscosidad total efectiva de remolino (Total Eddy Viscosity) que toma en cuenta los efectos laminares y turbulentos del flujo y su influencia en el esfuerzo cortante

La Eddy Viscosity plantea que el momento transferido en un flujo turbulento es dominado por grandes escalas de remolinos. Esta caracteriza el flujo debido a las fluctuaciones turbulentas lo cual es un indicativo de la tasa de propagación del jet.

La obtención de la solución analítica para el flujo se presenta a continuación:

- Asumiendo que la evolución del jet solo depende de la longitud local y las escalas de velocidades más no de las dimensiones del orificio, los perfiles de velocidades promedio en la dirección del flujo pueden ser considerados similares. A través de una solución por similitud donde se tiene la variable de similaridad $n = \sigma(r/x)$ en la cual σ es una constante las ecuaciones diferencias parciales de la capa limite se reducen a un tipo de ecuación ordinaria de la forma $ff' = f' - nf''$.

Resolviendo esta ecuación se obtiene la siguiente expresión para la velocidad en la dirección del flujo.

$$u = \frac{3K}{8\pi\varepsilon x} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4}n^2\right)^2} \quad (4)$$

- Con la variable de similitud expresada de la siguiente forma:

$$n = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3\sqrt{K}y}{\pi \varepsilon r}} \quad (5)$$

- Donde K es el momentum cinemático del jet, el cual es una medida de la intensidad del jet, la cual se obtiene de la siguiente forma:

$$K = 2\pi \int_0^{\infty} u^2 r dr \quad (6)$$

- Finalmente se determina la total eddy viscosity experimentalmente mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{1}{8(\sqrt{2} - 1)} \frac{S_b^2}{S_u} \quad (7)$$

- Donde (S_b) es la tasa de propagación del jet y (S_u) es la tasa de atenuación del jet, los cuales se obtienen experimentalmente.

En resumen, las ecuaciones (4) y (7) modelan el campo de flujo de un jet sintético en coordenadas cilíndricas, mediante el uso de la eddy viscosity determinada experimentalmente a través de la tasa de atenuación y propagación del jet. El modelo

matemático presentado se explica de manera más profunda en el trabajo de (Krishnan & Mohseni, 2009), donde aparte de la solución expuesta se detalla otra solución similar, que combina el comportamiento de un jet continuo con un synthetic jet, mediante el teorema de Pi Buckingham.

2.3.2. Modelo matemático del actuador.

Los parámetros de operación que influyen a un flujo sintético son el número de Reynolds y la carrera adimensional L/d antes mencionada. Estos parámetros se obtienen a través de un modelo de flujo incompresible donde se asume que el volumen desplazado por la membrana es igual al volumen expulsado por el orificio como se muestra en la Figura 10. (Smith & Glezer, 1998)

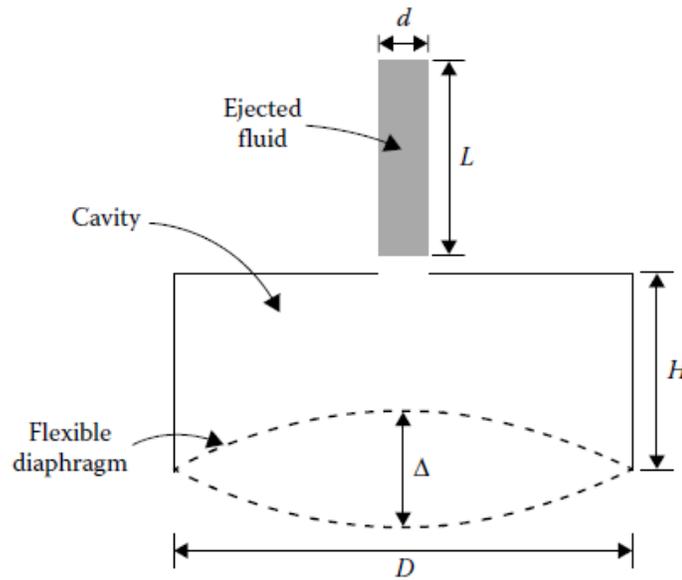


Figura. 10 Esquema del modelo del actuador en el cual el volumen del fluido desplazado por la membrana es expulsado a través de un orificio de forma de un jet.

Fuente (Krishnan & Mohseni, 2009)

Si se considera que el volumen de aire expulsado tiene una forma aproximada prismática con sección transversal constante, con la misma sección que el orificio, la conservación del volumen se expresa de la siguiente forma.

$$\alpha \frac{\pi D^2}{4} \Delta = \frac{\pi d^2}{4} L \quad (8)$$

Donde α es la fracción del volumen desplazado por un pistón imaginario (diafragma circular) cuando presenta una deflexión Δ de pico a pico expresado por:

$$\alpha = \frac{2\pi \int_0^{D/2} y(r) r dr}{(\pi D^2/4)\Delta} \quad (9)$$

Donde $y(r)$ es el perfil de deflexión del diafragma, asumiendo que la forma de la membrana es modelada por la deflexión estática de una membrana circular empotrada en sus bordes sometida a una carga uniforme. De acuerdo a la teoría de platos propuesta por Timoshenko (Timoshenko & Krieger, 1999)

$$y(r) = \frac{\Delta}{2} \left[1 - \frac{r^2}{R^2} + \frac{2r^2}{R^2} \ln\left(\frac{r}{R}\right) \right] \quad (10)$$

Donde r es la coordenada radial y R es el radio del diafragma. Evaluando la expresión (9) usando el perfil de deflexión mencionada genera un α igual a 0.25 para cualquier diámetro de cavidad. Entonces la carrera adimensional L/d se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{L}{d} = \frac{\alpha \Delta D^2}{d^3} \quad (11)$$

Smith, B., and Glezer plantearon las siguientes expresiones para el cálculo del número de Reynolds de un synthetic jet basándose en que la velocidad del flujo y la cantidad de movimiento del mismo dependen de la frecuencia de excitación en el diafragma (Smith & Glezer, 1998). Para un synthetic jet el número de Reynolds se puede expresar de la siguiente forma:

$$Re = \frac{U_o d}{\nu} = \frac{\sqrt{2} f L d}{\nu} = \frac{\sqrt{2} f \alpha \Delta D^2}{\nu d} \quad (12)$$

Donde

- f es la frecuencia de excitación
- T el periodo de vibración,
- U_o velocidad media medida en el orificio
- d es el diámetro del orificio
- ν viscosidad cinemática

En resumen, las expresiones (11) y (12) expresan la dependencia de los parámetros críticos del actuador con la frecuencia de excitación y la deflexión del diafragma vibratorio.

2.3.3. Modelo matemático del sistema

Para modelar completamente el sistema flujo - actuador se requiere de un modelo de bajo orden de suficiente fidelidad, capaz de predecir la respuesta dinámica del fenómeno. LEM (Lumped Element Modeling) es modelo de bajo orden utilizado para este propósito el cual se ajusta de manera aproximada a la respuesta dinámica del dispositivo.

2.3.3.1. Lumped Element Modeling (LEM)

Lumped Element Modeling (LEM) es una herramienta de diseño que ha sido utilizada en más de una mitad de ciclo para modelar sistemas electromecánicos- acústicos (Mohsemi & Mittal, 2015). Este puede ser usado para desacoplar las variaciones temporales y espaciales de sistemas acoplados no lineales. La principal asunción de este

modelo es que la escala de longitud característica de un fenómeno físico en consideración es mucho mayor que el tamaño característico de un dispositivo en cuestión. Para el caso de un synthetic jet esta asunción se esquematiza de manera gráfica en la Figura 11.

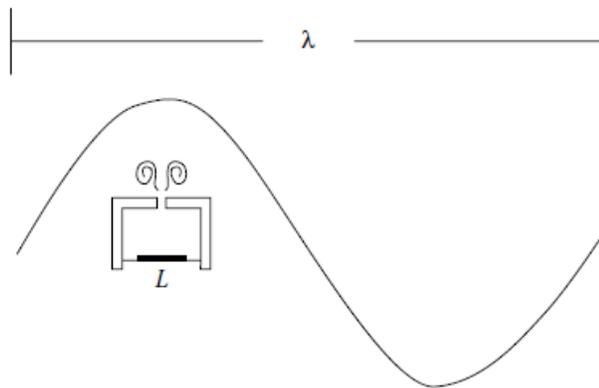


Figura. 11 Esquema de longitud de onda acústica y tamaño característico de la cavidad
Fuente (Mohsemi & Mittal, 2015)

Donde la longitud característica del fenómeno es la longitud de onda acústica (λ) generada por ondas de presión. El tamaño característico corresponde al tamaño de la cavidad (L). Si el tamaño de la cavidad es pequeño comparado con la longitud de onda acústica de las fluctuaciones de presión interna en la cavidad, la distribución espacial de presión dentro de la cavidad es esencialmente uniforme, esta solo varía en el tiempo sin embargo los cambios de presión se dan simultáneamente a lo largo de la cavidad (Mohsemi & Mittal, 2015). Si la asunción de que $\lambda \gg L$, el sistema se puede discretizar en un sistema equivalente mucho más simple en diferentes dominios de energía a base de los siguientes tipos de conversión según el tipo de variable (Livermore & Voldman, 2007).

Tabla 1

Relaciones de variables para cada tipo de dominio energético

Dominio energético	Esfuerzo	Flujo	Desplazamiento	Resistencia	Capacitancia	Inertancia
Eléctrico	Voltaje (V)	Corriente (I)	Carga(q)	Resistencia(R)	Capacitor(C)	Inductor(L)
Mecánico	Fuerza(F)	Velocidad (V)	Desplazamiento (x)	Amortiguador (b)	Resorte (K)	Masa (m)
Fluidico/Acústico	Presión(P)	Caudal(Q)	Volumen (V)	Resistencia fluidica(R)	Capacitancia Fluidica(C)	Inertancia (M)
Térmico	Dif. Tempe(ΔT)	Flujo de calor	Calor(Q)	Resistencia térmica(k)	Capacidad térmica(mcp)	-

Fuente (Livermore & Voldman, 2007)

2.3.3.2. Aplicación de LEM en un synthetic jet

El esquema de un dispositivo synthetic jet tradicional se muestra en la Figura 12. Este consiste en un diafragma piezoeléctrico, una cavidad cilíndrica y un orificio. Además, se muestra el circuito equivalente del mismo después de aplicar (LEM) para cada uno de los elementos del dispositivo. Los detalles de las técnicas de estimación, limitaciones y asunciones están en (Gallas, y otros, 2003). La estructura del circuito es la siguiente.

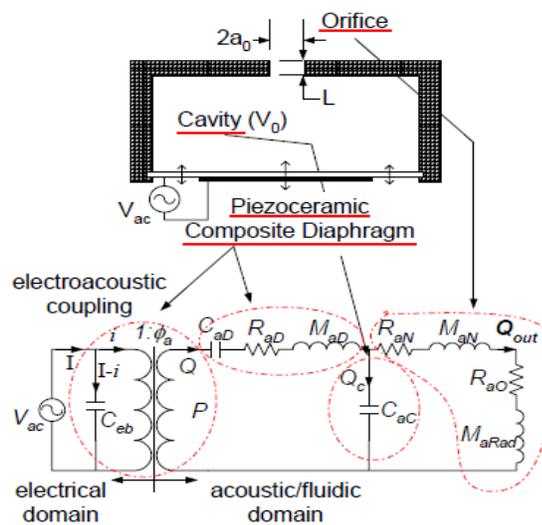


Figura. 12 Esquema de dispositivo synthetic jet con su representación de circuito equivalente.

Fuente (Gallas, y otros, 2003)

Un voltaje armónico (V_{ac}) es aplicado en el diafragma piezoeléctrico para crear una presión acústica efectiva que hace que este se mueva. Esto representa una conversión de energía a partir del dominio eléctrico al dominio acústico/fluídico. En LEM la conversión de energía para un dispositivo synthetic jet a partir de un diafragma piezoeléctrico se lo hace a través de un transformador ideal, con un coeficiente de transducción electroacústico ϕ_a (Gallas, Lumped Element Modeling of Piezoelectric-Driven Synthetic Jet Actuators for Active Flow Control, 2002).

$$\phi_a = \frac{-d_a}{C_{aD}} \quad (13)$$

Donde

d_a es el coeficiente piezoeléctrico acústico efectivo

C_{aD} es la conformidad acústica del diafragma piezoeléctrico

Al mismo tiempo se tiene que:

$$d_a = \frac{\Delta Vol}{V}_{P=0} \quad (14)$$

$$C_{aD} = \frac{\Delta Vol}{V}_{V=0} \quad (15)$$

Donde

ΔVol es el volumen desplazado por el diafragma

P es la presión diferencial alrededor del diafragma

V es el voltaje a aplicado

A partir de circuito de la Figura 12, la función de transferencia que relaciona la velocidad a través del orificio Q_{out} con el voltaje de entrada V_{ac} se la puede obtener a través de un análisis tradicional de circuitos y corresponde a la siguiente expresión de cuarto orden:

$$\frac{Q_{out}(s)}{V_{ac}(s)} = \frac{d_a s}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s^1 + 1} \quad (16)$$

Donde

$$a_1 = C_{aD}(R_{aO} + R_{aN} + R_{aD}) + C_{aC}(R_{aO} + R_{aN}) \quad (17)$$

$$a_2 = C_{aD}(M_{aRad} + M_{aN} + M_{aD}) + C_{aC}(M_{aO} + R_{aN}) + C_{aC}C_{aD}R_{aD}(R_{aO} + R_{aN}) \quad (18)$$

$$a_2 = C_{aD}(M_{aRad} + M_{aN} + M_{aD}) + C_{aC}(M_{aO} + R_{aN}) + C_{aC}C_{aD}R_{aD}(R_{aO} + R_{aN}) \quad (19)$$

$$a_3 = C_{aC}C_{aD}[M_{aD}(R_{aO} + R_{aN}) + R_{aD}(M_{aRad} + M_{aN})] \quad (20)$$

$$a_4 = C_{aC}C_{aD}M_{aD}(M_{aRad} + M_{aN}) \quad (21)$$

La función de transferencia correspondiente a la ecuación 16 posee dos frecuencias de resonancia f_1, f_2 ($f_2 > f_1$) donde se dan picos de la velocidad del flujo. Estas están relacionadas con la frecuencia natural del diafragma vibratorio, f_D y la frecuencia de resonador de Helmholtz, f_H correspondiente a forma y volumen de la cavidad. Dichas frecuencias se relacionan mediante la siguiente expresión: $f_1 f_2 = f_D f_H$. Por lo general la frecuencia natural de vibración del diafragma es mayor a la frecuencia de resonador. Existen ocasiones en que estas frecuencias tienden a coincidir, esto depende de la manera como este acoplado el diafragma vibratorio con la cavidad. (Gallas, et al, 2003)

La frecuencia natural del diafragma, f_D , y la de resonador de Helmholtz f_H se calculan con las siguientes expresiones:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_{aD} C_{aD}}} \quad (22)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(M_{aN} + M_{aRad}) C_{aC}}} \quad (23)$$

Los coeficientes de las ecuaciones (17 a 23) son constantes que se determinan a través de expresiones algebraicas simples en función de la geometría y propiedades del material. Este modelo incluye una constante empírica, R_{aD} , que representa la vibración estructural del diafragma piezoeléctrico. En general, algunos coeficientes presentan una dependencia de la frecuencia y amplitud (debido a efectos no lineales). Especialmente, R_{aD} , es una resistencia no lineal del correspondiente al orificio. Los coeficientes mencionados representan y se calculan de a siguiente forma (Gallas, et al, 2003) (Gallas, Lumped Element Modeling of Piezoelectric-Driven Synthetic Jet Actuators for Active Flow Control, 2002):

- Conformidad acústica de la cavidad

$$C_{ac} = \frac{V_0}{\rho_0 c_0^2}$$

- Conformidad acústica de cortocircuito del diafragma

$$C_{aD} = \frac{\Delta V}{P} |_{v_{ac}=0}$$

- Masa acústica del diafragma

$$M_{aD} = \frac{2\pi}{\Delta V^2} \int_0^{R^2} \rho_A [w(r)]^2 r dr, \quad \Delta V = \int_0^{R^2} 2\pi r w(r) dr$$

- Masa acústica del orificio

$$M_{aN} = \frac{4\rho_0 L}{3\pi a_0^2}$$

- Masa de radiacion acustica del orificio

$$M_{aN} = \frac{8\rho_0}{3\pi^2 a_0}$$

- Resistencia acustica del diafragma

$$R_{aD} = 2\varepsilon\sqrt{M_{aD}/C_{aD}}$$

- Resistencia acústica viscosa del orificio

$$R_{aN} = \frac{8\nu\rho_0 L}{\pi a_0^4}$$

- Resistencia acustica no lineal del orificio

$$R_{aO} = 0.5K_D\rho_0 Q_{out}/\pi^2 a_0^4$$

Donde

a_0 Radio del orificio

c_0 Velocidad del sonido en el aire

K_D Coeficiente de descarga del jet en el orificio

P Presión diferencial en el diafragma

Q_{out} Flujo volumétrico de aire a través del orificio

R_2 Radio del diafragma piezoeléctrico

V_{ac} Voltaje AC de excitación

V_0 Volumen de la cavidad

$w(r)$ Desplazamiento transversal del diafragma

ΔV Volumen desplazado por el diafragma

ν Viscosidad cinemática del aire

ρ_A Densidad de área del diafragma ($\frac{kg}{m^2}$)

ρ_0 Densidad del aire

ε Coeficiente empírico de amortiguación del diafragma

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se da a conocer la metodología utilizada en el presente estudio, en la cual se detalla el procedimiento experimental. El estudio consta de dos partes. En la primera parte se da a conocer el comportamiento de la velocidad del flujo a diferentes distancias y frecuencias para cada tipo de orificio. En esta parte se identifica la frecuencia en la cual se da la mayor velocidad de flujo para cada orificio. En la segunda parte se procede a enfriar la placa variando la distancia y tipo de orificio utilizando las frecuencias anteriormente reconocidas en la primera etapa. Finalmente, en esta parte se utiliza un diseño de Taguchi para identificar la mejor combinación (frecuencia, distancia y tipo de orificio) para enfriar una placa a una temperatura establecida.

3.1. Procedimiento experimental

El dispositivo synthetic jet utilizado en los experimentos está compuesto de una cavidad cilíndrica de aluminio (diámetro interno $D=34$ mm, altura $H=0.5$ mm), la cual es cubierta en el fondo con un diafragma flexible empotrado (1 mm) en sus extremos mediante pernos como se muestra en la Figura 13. En el estudio se analizan 4 tipos de orificios, circular, rectangular, cuadrado y triangular. Las especificaciones de cada tipo de orificio junto con el diafragma flexible se muestran en la Figura 14 y la Tabla 2. El diafragma actuador es un piezoeléctrico Murata(7BB-35-3) el cual está compuesto de un disco de latón con un núcleo piezocerámico en el centro. El diámetro de la parte de latón es 35mm con un espesor de 0.3 mm. El diámetro del piezocerámico es 25 mm. El diafragma actuador es excitado con un generador de ondas (GW INSTEK). Para el estudio se utilizó una onda sinusoidal($V_{rms}:7.25V$).

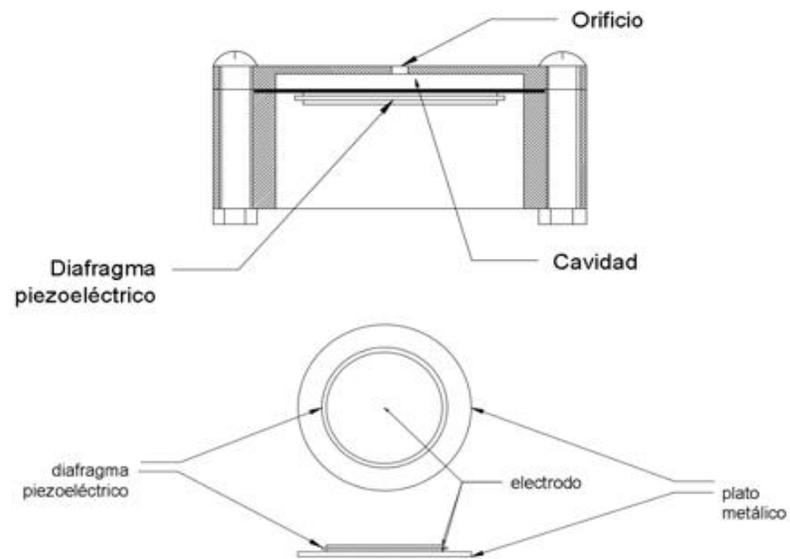


Figura. 13 Esquema de dispositivo synthetic jet y el actuador piezoeléctrico

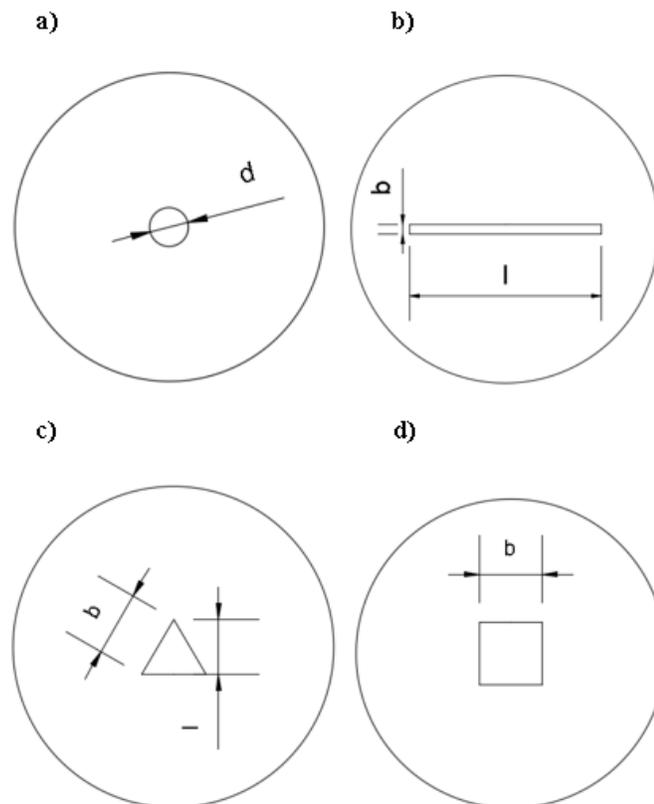


Figura. 14 Esquema de orificios. a) Orificio Circular b) Orificio Rectangular c) Orificio Triangular d) Orificio Cuadrado

Tabla 2.*Parámetros de los orificios*

Parámetros de orificio	Orificio	b o d (mm)	l (mm)
Caso 1	Circular	1	
Caso 2	Rectangular	0.5	10
Caso 3	Triangular	2	1.732
Caso 4	Cuadrado	2	

3.1.1. Medición de la velocidad de flujo

Para la medición de la velocidad de flujo se construyó un banco de pruebas como se muestra en la Figura 15. Este consta de un sujetador para el dispositivo synthetic jet, una plataforma deslizable para modificar la distancia y un soporte donde se ubica el instrumento de medición. El esquema de experimentación se muestra en la Figura 16, donde se observa un generador de ondas seteado con una onda sinusoidal la cual energiza al diafragma piezoeléctrico que al vibrar genera un flujo de aire a través del orificio. Se varió la distancia de medición en (5, 10, 15,20 mm) con respecto al orificio y la frecuencia de excitación de (0-3000Hz cada 100 Hz). La medición del flujo de aire se realizó a través de un anemómetro de hilo caliente marca Testo 405i con una resolución de 0.01 m/s y un rango de 0 a 30.48 m/s, la adquisición de datos se realizó vía Bluetooth. Para cada medición se tomaron 10 muestras y se promedió la velocidad para cada punto. En total se tomaron 120 datos.



Figura. 15 Fotografía de banco de pruebas para medición de velocidad de flujo

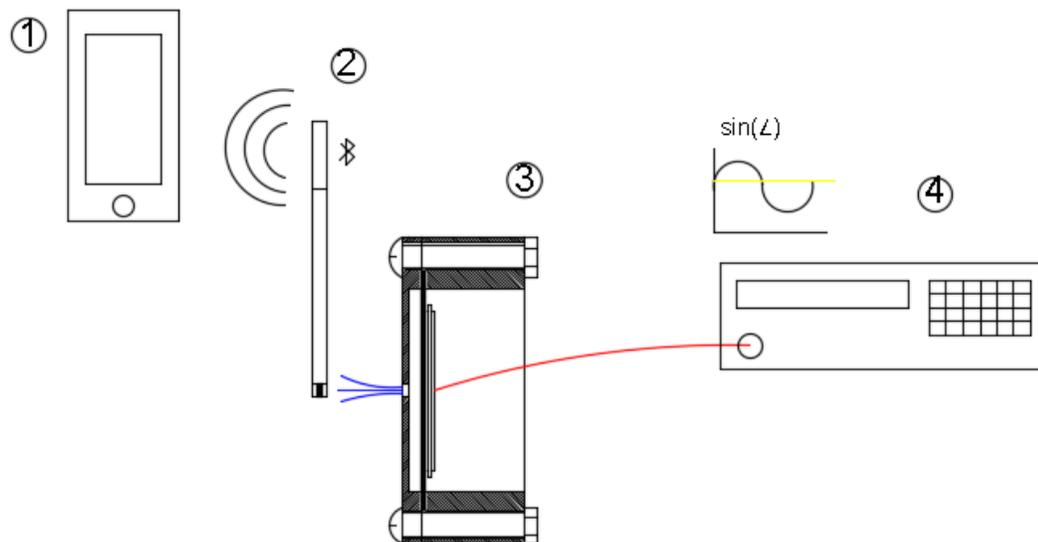


Figura. 16 Esquema de toma de datos de velocidad de flujo 1) Adquisición de datos vía Bluetooth 2) .Anemómetro de Hilo Caliente 3) Dispositivo Synthetic Jet 4)Generador de Funciones(Onda Sinusoidal 7.25 Vrms)

3.1.2. Aplicación a una placa calentada

En la Figura 17 se muestra el esquema de experimentación para esta fase. Se calentó una placa de acero de 41mm x 45 mm mediante una niquelina unida a la placa mediante un perno en su parte posterior. Se registró la temperatura de la placa instalando 6 sensores de temperatura LM35 mediante masilla epoxica en la superficie posterior. Para comprobar las lecturas de los sensores se compararon las mediciones con una serie de termocuplas tipo K. La adquisición de datos se realizó mediante una tarjeta Arduino UNO la cual tomó las temperaturas cada 100 milisegundos. Las medidas de las 6 temperaturas registradas se promediaron y se usó una temperatura promedio de la placa como parámetro referencial.

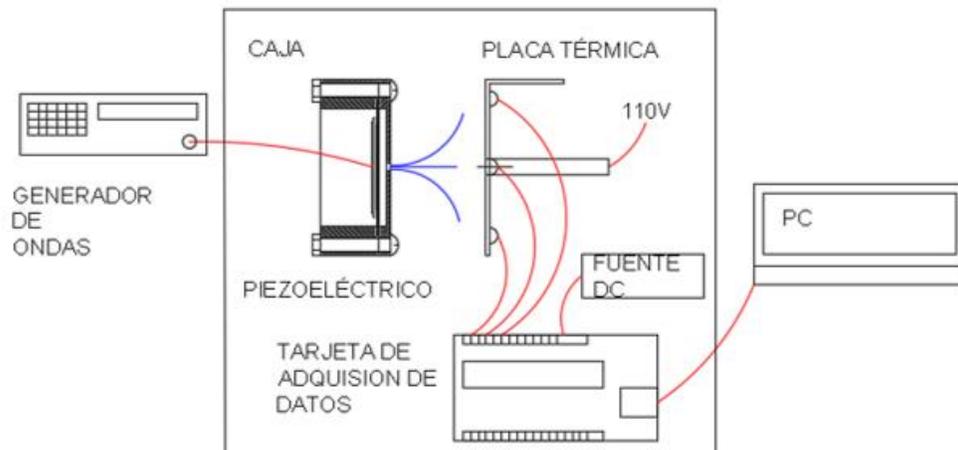


Figura. 17 Esquema de medición de temperaturas

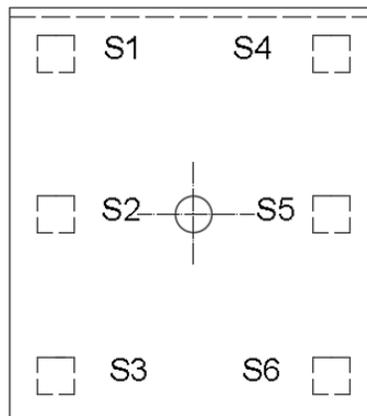


Figura. 18 Ubicación de sensores la placa

Como el objetivo del estudio era obtener la mejor combinación de parámetros (frecuencia, distancia, tipo de orificio) para enfriar la placa se realizó un diseño experimental de Taguchi. Dentro del diseño de Taguchi se utilizó la frecuencia en la cual se genera la mayor velocidad de flujo para cada tipo de orificio. Este parámetro se reconoce en la etapa de medición de flujo. Se calentó la placa una temperatura promedio de 60 °C y se registró el tiempo de enfriamiento en que la temperatura baje a 50°C variando la distancia del orificio a la placa y el tipo de orificio. Para un correcto enfriamiento, después de calentar la placa hasta una temperatura promedio de 60°C se desconectó el flujo de calor proveniente de la niquelina. Para evitar la influencia de corrientes de aire externas se aisló el banco de pruebas dentro de una caja.

Los parámetros del diseño de Taguchi son los siguientes:

- Taguchi L16
- Dos factores: Tipo de Orificio y distancia
- Cuatro niveles: Tipo de Orificio (Circular, Rectangular, Cuadrado, Triangular) y Distancia (5mm, 10mm ,15mm,20mm)
- Tres repeticiones
- Nivel de significancia 0.05
- Menor es Mejor

En la Figura 19 se muestra el esquema del método experimental de Taguchi

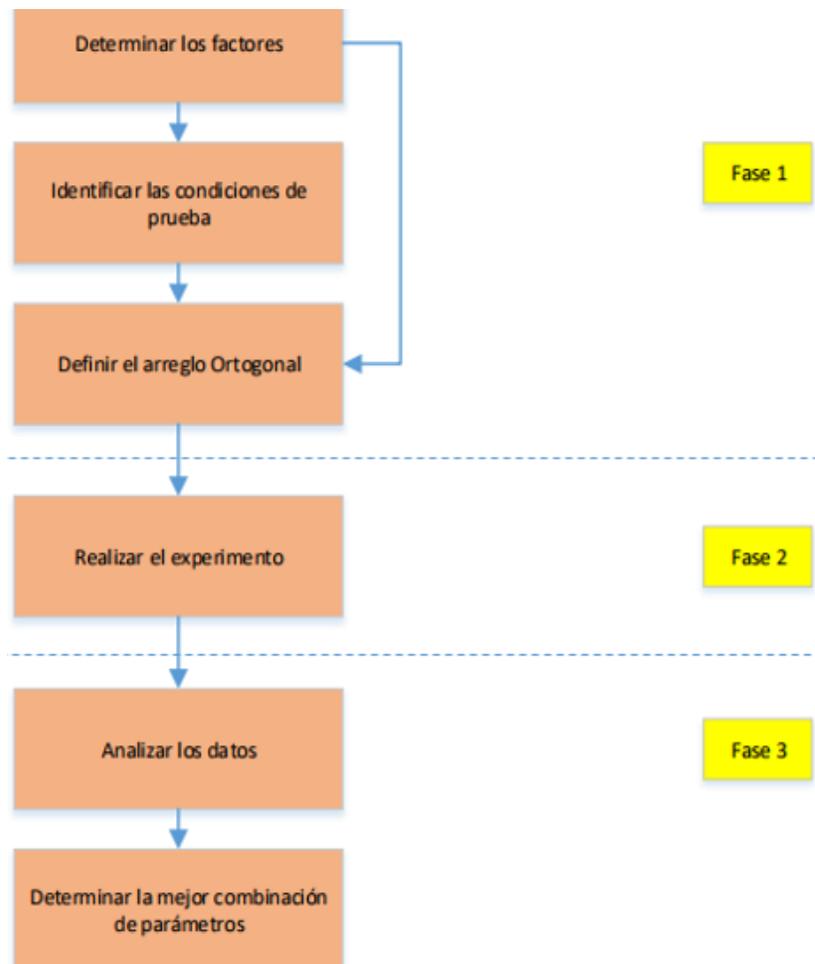


Figura. 19 Esquema de diseño experimental de Taguchi

Finalmente, para estudiar el enfriamiento en el tiempo con cada tipo de orificio, se calentó la placa a una temperatura promedio de 90°C y se la enfrió por un tiempo de 300 s. Para poder comparar los resultados entre orificios se utilizó una distancia de 10 mm (entre orificio y placa) y se estableció una velocidad de enfriamiento de 1 m/s para cada tipo de orificio, modificando la frecuencia para cada caso. El calor desprendido por convección forzada mediante el synthetic jet, coeficiente de transferencia de calor

promedio y coeficiente de operación se calcularon de la siguiente forma (Utturkar , Mehmet, & Icoz, 2009):

$$Q_{synthetic\ jet} = Q_{jet} - Q_{freecond} \quad (24)$$

$$Q_{synthetic\ jet} = \bar{h}A(T_s - T_j) \quad (25)$$

$$Q_{jet} = \frac{m * cp * (T_i - T_f)}{t_{jet}} \quad (26)$$

$$Q_{freecond} = \frac{m * cp * (T_i - T_f)}{t_{freecond}} \quad (27)$$

$$\bar{h} = \frac{Q_{jet} - Q_{freecond}}{A(T_s - T_j)} \quad (28)$$

$$COP = \frac{Q_{synthetic\ jet}}{P_{synthetic\ jet}} \quad (29)$$

Donde:

Q_{synthetic jet}: Es calor desprendido por convección forzada atribuido únicamente al synthetic jet

Q_{jet}: Es el calor desprendido en un intervalo de tiempo utilizando el dispositivo synthetic jet, donde están involucrados otras formas de pérdida de calor por convección natural y radiación.

Q_{freecond}: Es el calor desprendido en un intervalo de tiempo en condiciones libres sin el uso del dispositivo synthetic jet, aquí el mecanismo de pérdida de calor se da únicamente por convección natural y radiación.

m: Masa de la placa (22 g)

cp: Calor específico del acero (0.46 J/ (g °C))

T_s : Temperatura promedio superficial de la placa (60°C)

T_j : Temperatura del flujo de aire producido por el dispositivo synthetic jet, se puede considerar la temperatura del ambiente (25°C)

T_i : Temperatura inicial de enfriamiento (60°C)

T_f : Temperatura final de enfriamiento (30°C)

t_{jet} : Tiempo de enfriamiento de ($60-30^\circ\text{C}$) utilizando el synthetic jet

$t_{freecond}$: Tiempo de enfriamiento de ($60-30^\circ\text{C}$) en condiciones libres sin el uso del synthetic jet.

$P_{synthetic\ jet}$: Energía consumida por el dispositivo Synthetic Jet ($I=2\text{ mA}$, $V =7.225$ voltios)

COP : Coeficiente de operación

\bar{h} : Coeficiente de transferencia de calor promedio por convección atribuido al synthetic jet

A : Área convectiva de transferencia de calor por convección forzada.

Capítulo 4

Análisis de resultados

En este capítulo se analizan los resultados de la etapa de medición de flujo y el enfriamiento de la placa calentada. Además, se analiza el diseño experimental de Taguchi en el cual se reconoce la mejor combinación de parámetros con los cuales el tiempo de enfriamiento es el menor. Finalmente, los resultados correspondientes a la etapa de transferencia de calor se cuantifican mediante el coeficiente de transferencia de calor y el coeficiente de operación.

4.1. Análisis de medición de velocidad

4.1.1. Efecto de la frecuencia en la velocidad

En las Figuras de la 20 a la 23 se muestran los resultados de las mediciones de la velocidad con respecto a la frecuencia de excitación para cada tipo de orificio a diferentes distancias. En todos los casos se pueden apreciar dos frecuencias de resonancias, este comportamiento ya fue comprobado por Cattafesta (Gallas, y otros, 2003), donde se estableció la existencia de una frecuencia de resonancia f_1 y f_2 . Las cuales están relacionadas respectivamente a la frecuencia natural del diafragma piezoeléctrico y la frecuencia de resonador de Helmholtz asociada con la cavidad. Las frecuencias de resonancia para cada tipo de orificio se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3

Frecuencias de resonancia para cada tipo de orificio

Orificio	F1	F2
Circular	2200	1300
Rectangular	2000	2800
Triangular	2400	1500
Cuadrada	1700	2600

Cuando el Synthetic jet está operando en la frecuencia de resonancia del diafragma, la vibración de este es mucho mayor obteniendo mayor energía para forzar al aire del ambiente a entrar dentro de la cavidad generándose una mayor velocidad de flujo. Como se puede observar en la Tabla 3 la frecuencia de resonancia correspondiente al diafragma y Helmholtz varían de acuerdo a cada carcasa, este problema se detalla en (Mohsemi & Mittal, 2015) donde se manifiesta que la frecuencia puede variar dependiendo del acoplamiento entre el diafragma y la cavidad, así como el tipo del orificio.

4.1.2. Efecto de la distancia en la velocidad

De acuerdo a la Figura 20 a la 23, se puede evidenciar que tanto para el orificio, circular, rectangular, cuadrada y triangular la máxima velocidad de flujo se da en la distancia de 5mm con respecto al orificio, mientras que la menor velocidad se da cuanto el flujo a esta a una distancia axial de 20 mm. La Tabla 4 muestra las velocidades con respecto a la distancia para cada tipo de orificio en la frecuencia de resonancia del diafragma. Según las mediciones registradas, mientras el flujo se aleja del orificio este pierde velocidad a medida que se disipa en el ambiente. Este comportamiento fue previamente comprobado por Smith and Glezer, donde se identificó que el jet alcanza una velocidad máxima cerca del orificio y después empieza a decrecer a medida que se aleja. Esto se da debido a la presencia de anillos vórtices que se forman en el orificio debido a los bordes del mismo. Estas estructuras interactúan generando una calle de vórtices la cual pierden energía a medida que se disipan en el ambiente creando un flujo turbulento. Es evidente que sin importar el tipo de orificio este comportamiento se cumple.

Tabla 4

Velocidades de flujo a diferentes distancias, en la frecuencia de resonancia del diafragma para cada orificio.

Tipo de orificio	Velocidad (m/s)			
	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
Circular	3.225	3	1.97	1.504
Rectangular	1.345	1.185	1.075	0.955
Triangular	2.23	2.115	1.858	1.532
Cuadrado	1.54	1.22	0.95	0.78

4.1.3. Efecto del tipo de orificio en la velocidad

De la Figura 20 a la Figura 23 se muestra la respuesta de la velocidad con respecto a la frecuencia para cada tipo de orificio. El comportamiento de la velocidad con respecto a la frecuencia es inversamente proporcional a la distancia para todos los orificios como ya se explicó anteriormente. Para empezar, la Figura 20 muestra el comportamiento del orificio circular, en la frecuencia de 1300 Hz se registró el primer pico en la velocidad y el segundo pico se registró a 2200 Hz. La frecuencia de resonancia relacionada al diafragma piezoeléctrico corresponde a 2200 Hz y la frecuencia de resonancia relacionada a la de Helmholtz corresponde a 1300Hz.

Con respecto al orificio rectangular en la Figura 21 se muestran los resultados. Como se puede observar se registró que la velocidad de flujo es 0 hasta que la frecuencia de excitación sea 1500 Hz. A una frecuencia de 2000 Hz se registró el primer pico en la velocidad y el segundo pico se registró a 2800 Hz. En este caso la frecuencia de resonancia relacionada al diafragma piezoeléctrico corresponde a 2000 Hz y la frecuencia de resonancia relacionada a la de Helmholtz corresponde a 2800 Hz.

Adicionalmente, la Figura 22 muestra el comportamiento del orificio triangular. A una frecuencia de 1500 Hz se registró el primer pico en la velocidad y el segundo pico se registró a 2400 Hz. Para este orificio la frecuencia de resonancia relacionada al diafragma piezoeléctrico fue a 2400 Hz y la frecuencia de resonancia relacionada a la de Helmholtz corresponde a 1500Hz. Este tipo de orificio registró un comportamiento similar al orificio circular.

Finalmente, la Figura 23 muestra el comportamiento del orificio cuadrado. Como en el caso del orificio rectangular la velocidad de flujo fue cero hasta una cierta frecuencia, en este caso fue 1300 Hz. A una frecuencia de 1700 Hz se registró el primer pico en la velocidad y el segundo pico se registró a 2600 Hz. Para este orificio la frecuencia de resonancia relacionada al diafragma piezoeléctrico fue a 1700 Hz y la frecuencia de resonancia relacionada a la de Helmholtz corresponde a 2600 Hz.

El comportamiento similar del orificio cuadrado con el rectangular se puede atribuir a la similitud en el patrón geométrico entre orificios. Además, la máxima velocidad de flujo para cada tipo de orificio se da cuando el synthetic jet está operando en la frecuencia de resonancia relacionada con el diafragma.

Como se mencionó anteriormente la distancia en la cual se dio una mayor velocidad de flujo para cada tipo de orificio fue de 5 mm con respecto al orificio. En la Figura 24 se puede observar la comparación del comportamiento entre orificios para esta distancia. De acuerdo a la gráfica las máximas velocidades que se registraron para el orificio circular, triangular, cuadrado y rectangular respectivamente fueron 3.225 m/s, 2.24 m/s, 1.54 m/s y 1.345 m/s. Se calculó el área del orificio circular, triangular, cuadrado y rectangular respectivamente siendo (0.785 ,1.73, 4, 5) mm^2 . De acuerdo a las mediciones de la velocidad de flujo se evidencia que mientras mayor es el área del orificio menor la velocidad resultante.

Resultados de mediciones de velocidad de flujo con respecto a la frecuencia

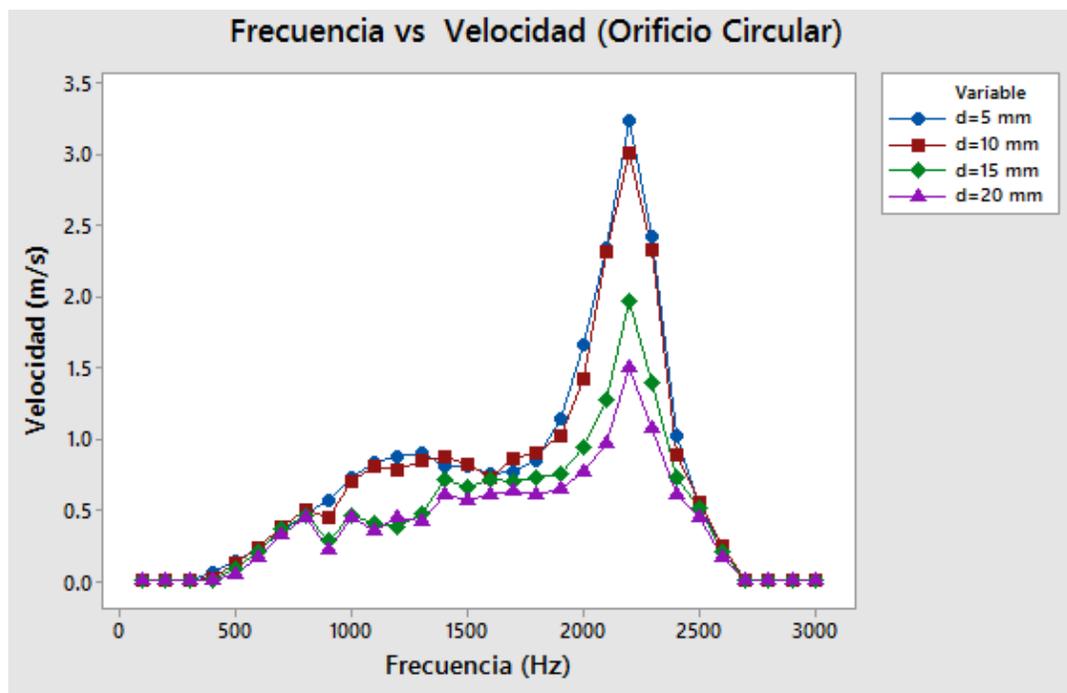


Figura. 20 Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la frecuencia para el orificio circular

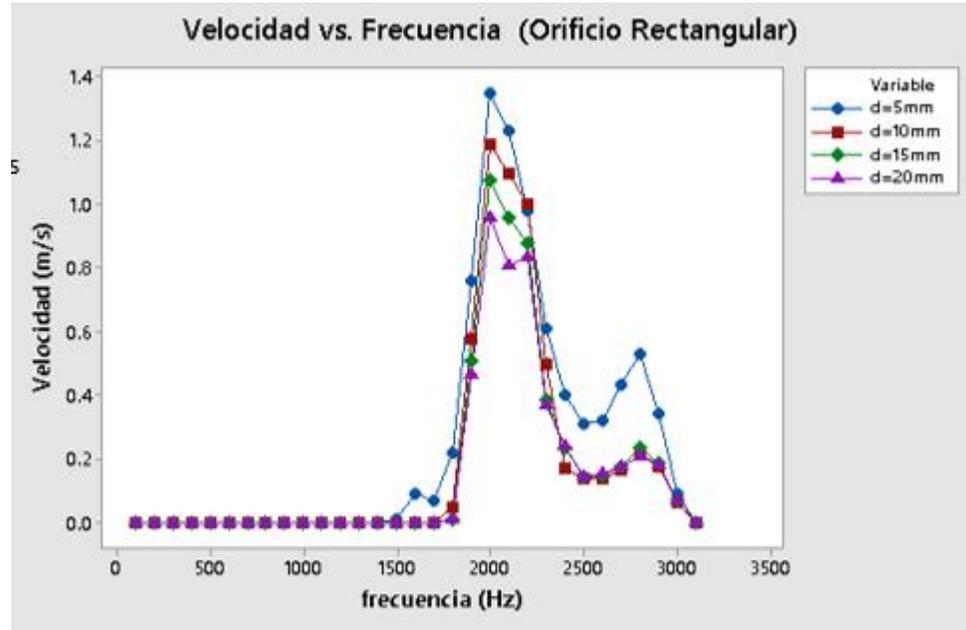


Figura. 21 Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la frecuencia para el orificio rectangular

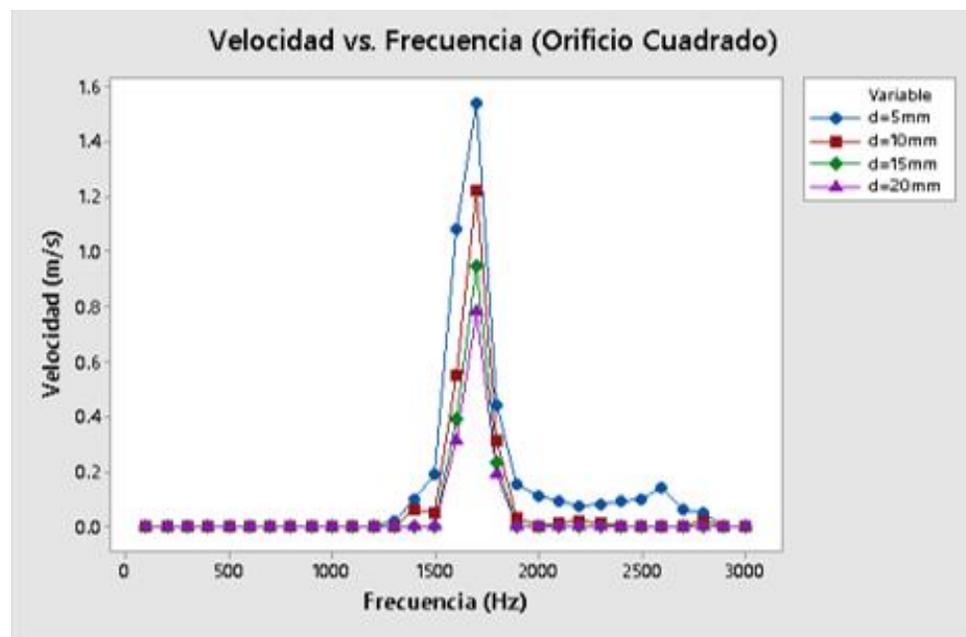


Figura. 22 Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la frecuencia para el orificio cuadrado

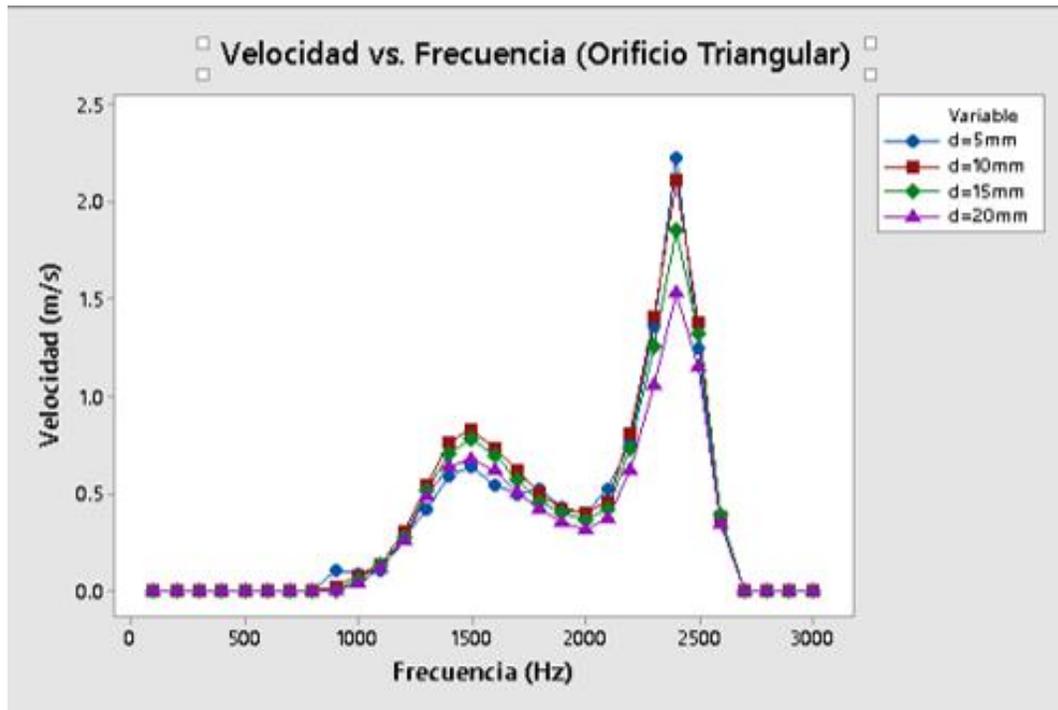


Figura. 23 Comportamiento de la velocidad de flujo con respecto a la frecuencia para el orificio circular orificio triangular

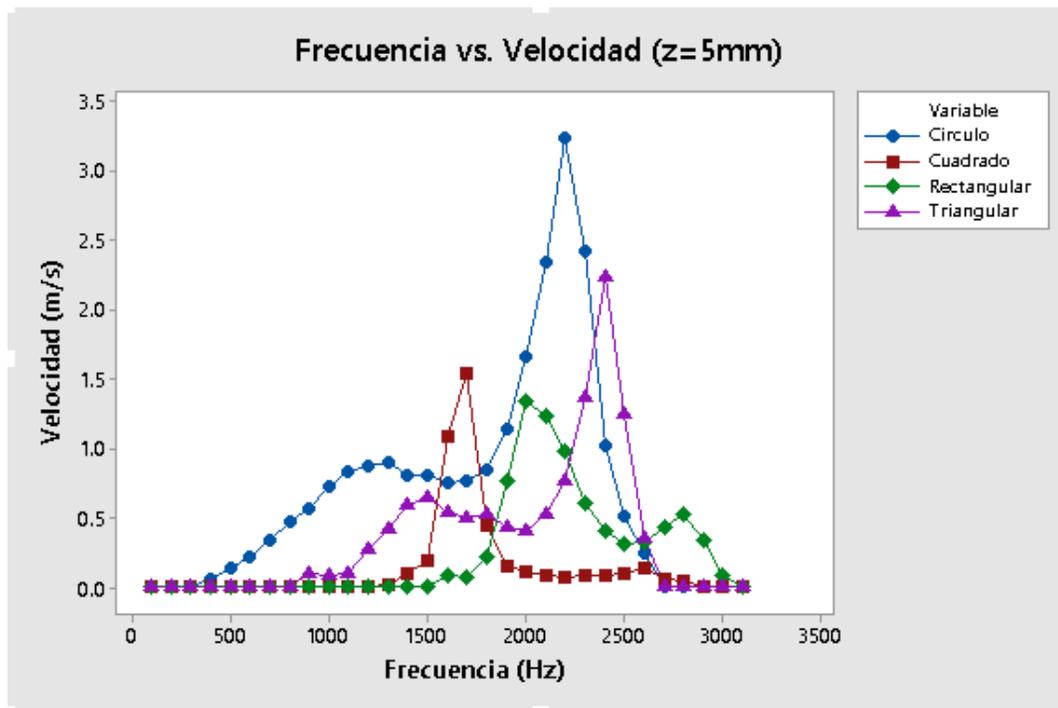


Figura. 24 Comparación entre orificios con respecto a la velocidad y frecuencia a una distancia de 5 mm

4.2. Análisis de transferencia de calor

4.2.1. Diseño de Taguchi

Los factores que se tomaron en cuenta junto con sus niveles se muestran en la Tabla 5. Para el presente estudio se utilizó un arreglo ortogonal L16 (Tabla 6) donde A representa el tipo de orificio y B la distancia de medición con respecto al orificio.

Tabla 5

Detalles de los factores y niveles para el experimento

Factores	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Tipo de orificio (A)	Circular	Rectangular	Cuadrado	Triangular
Distancia (B) (mm)	5	10	15	20

Tabla 6

Arreglo ortogonal utilizado en el Diseño de Taguchi

No	A	B
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	2	1
6	2	2
7	2	3
8	2	4
9	3	1
10	3	2
11	3	3
12	3	4
13	4	1
14	4	2
15	4	3
16	4	4

Los resultados de los experimentos se muestran en la Tabla 7. Se registró el tiempo en que la temperatura promedio de la placa de acero baje de 60-50°C para cada tipo de orificio a diferentes distancias. Se calculó la relación de ruido S/N. Hay muchas expresiones para calcular la relación (S/N), y esta depende del objetivo del estudio, ya que se requiere reconocer la mejor combinación parámetros en que el tiempo de enfriamiento sea menor, se utilizó una relación “Menor es Mejor” la cual está gobernada por la siguiente ecuación:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

Donde n es el número de mediciones y y_i el valor de respuesta, la cual en este caso es el tiempo de enfriamiento. En la Figura 25 se muestran los resultados del diseño de Taguchi.

Tabla 7

Resultados experimentales con su correspondiente valor de S/N

No	Tipo de orificio	Distancia	t1(min)	t2(min)	t3 (min)	t medio	S/N
1	Circular	5	1.58	1.52	1.60	1.57	-3.90
2	Circular	10	1.40	1.42	1.35	1.39	-2.86
3	Circular	15	1.57	1.65	1.55	1.59	-4.03
4	Circular	20	1.33	1.43	1.45	1.41	-2.96
5	Rectangular	5	1.42	1.30	1.38	1.37	-2.72
6	Rectangular	10	1.30	1.25	1.25	1.27	-2.05
7	Rectangular	15	1.07	1.13	1.17	1.12	-1.01
8	Rectangular	20	1.03	1.12	1.10	1.08	-0.70
9	Triangular	5	1.50	1.48	1.53	1.51	-3.55
10	Triangular	10	1.27	1.22	1.28	1.26	-1.98
11	Triangular	15	1.18	1.20	1.18	1.19	-1.50
12	Triangular	20	1.13	1.10	1.20	1.14	-1.18
13	Cuadrado	5	1.58	1.67	1.67	1.64	-4.29
14	Cuadrado	10	1.67	1.67	1.68	1.67	-4.47
15	Cuadrado	15	1.58	1.55	1.58	1.57	-3.93
16	Cuadrado	20	1.45	1.52	1.52	1.49	-3.49

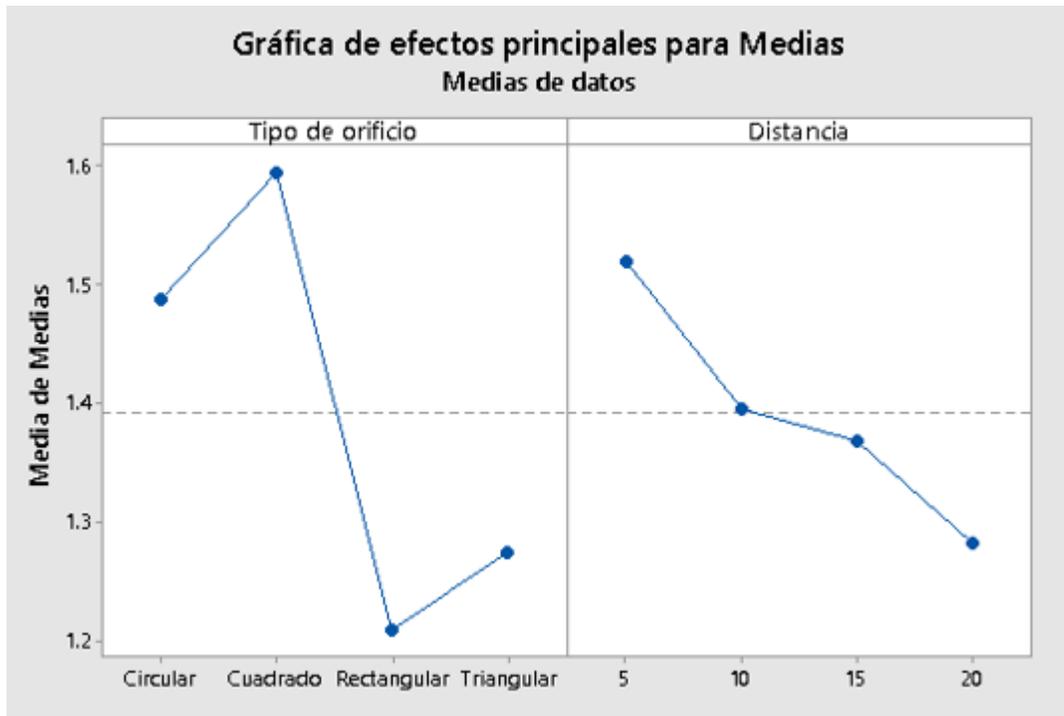


Figura. 25 Respuestas en el tiempo de enfriamiento de acuerdo al tipo de Orificio y Distancia

Para la validación de los resultados es necesario calcular un intervalo de confianza (CI).

$$CI = \sqrt{F_{(1,DFe)}Ve \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (30)$$

Donde $F(1, DFe)$ se saca de la tabla de Fisher con un confiabilidad de 95%, en este caso $F(1,8)=5.318$. R es el número de repeticiones donde en este caso es 3. El parámetro n_{eff} es el número de repeticiones efectivas y se calcula de la siguiente manera:

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} = \frac{16}{1 + 6} = 2.286 \quad (31)$$

Donde N es el número experimentos realizados, para el estudio fueron 16 y V_t es el número total de grados de libertad relacionados a los factores que influyen

significativamente en el resultado. Finalmente Ve corresponde al error de la varianza, el cual se obtiene al realizar un análisis de la varianza ANOVA, para este se utilizó el software Minitab y el resultado se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados del análisis ANOVA

Fuente	GL	SC Ajuste	MC Ajuste	Valor F	Valor p
Tipo de orificio	3	0.38937	0.129791	17.91	0
Distancia	3	0.11576	0.038587	5.32	0.022
Error	9	0.06523	0.007248		
Total	15	0.57037			

Como información adicional se presenta la interacción entre las variables del estudio en la Figura 26, como se puede observar existe interacción del entre el tiempo de enfriamiento tanto con la distancia y el tipo de orificio. Lo cual significa que la reducción en tiempo de enfriamiento depende tanto de una buena combinación entre tipo de orificio y distancia.

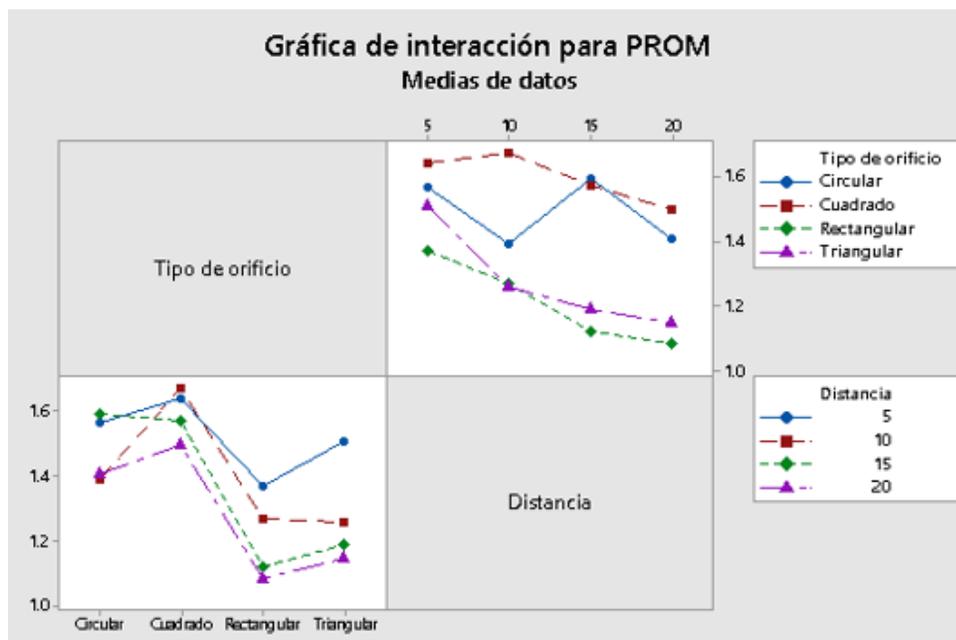


Figura. 26 Interacción del tiempo de enfriamiento tanto con la distancia y el tipo de orificio

Finalmente, el intervalo de confiabilidad se calcula reemplazando los valores en la expresión (30).

$$CI = \sqrt{5.318 * 0.007248 \left[\frac{1}{2.286} + \frac{1}{3} \right]} = \pm 0.172 [min]$$

De acuerdo al resultado del diseño Taguchi la mejor combinación de parámetros para obtener el menor tiempo de enfriamiento en un delta de temperatura de 10°C, fue la combinación del orificio rectangular a una distancia de 20 mm operando a una frecuencia de 2000 Hz. Utilizando esta combinación se registró un tiempo de enfriamiento (1 min 3 seg). Comparando con la convección natural la cual registro un tiempo de (2min) el tiempo de enfriamiento se redujo en un 46%. Se obtuvo un intervalo de confiabilidad de $\pm 0.172 [min]$. Según el análisis de la varianza ANOVA el parámetro de tipo de orificio obtuvo un Fvalue de 17.91 mucho mayor a la distancia (Fvalue=5.32) lo cual indica que el tipo de orificio afecta de mayor manera al tiempo de enfriamiento, sin embargo su valor también depende de la interacción entre el tipo de orificio y distancia.

4.2.2. Efecto del tipo de orificio y la distancia en la transferencia de calor

En la Figura 27 se muestran los resultados del coeficiente de transferencia de calor promedio por convección relacionado únicamente al synthetic jet. Para los cálculos de transferencia de calor se utilizaron las expresiones (24 a la 29) y se estableció un delta de temperatura en el tiempo de (60-50°C). Se utilizó la máxima frecuencia de resonancia en la cual se generó la mayor velocidad de flujo para cada tipo de orificio. Estas frecuencias se identificaron previamente en el análisis de la medición de la velocidad. Se puede ver claramente que el tipo de orificio y la distancia influyen de manera importante en la transferencia de calor. Tomando como referencia al tipo de orificio se identifica que el orificio rectangular genera un máximo $\bar{h} = 11.05 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, mucho mayor a los demás orificios, mientras que el orificio cuadrado produce un menor coeficiente de transferencia

de calor ($\bar{h} = 2.61 \frac{W}{m^2 \cdot K}$). Este resultado concuerda con el análisis de Taguchi, donde para el presente estudio el orificio rectangular enfrió a la placa en un menor tiempo para un ΔT de 10 °C. Los resultados muestran que el orificio circular y cuadrado no fueron tan eficientes, mientras que con los orificios rectangulares y triangulares se obtuvieron los mejores resultados.

En cuanto al papel de la distancia, se puede evidenciar que, a 20 mm con respecto al orificio y la placa, se genera un mayor coeficiente de transferencia de calor para los 4 orificios. Cuando la distancia es 5 mm la transferencia de calor disminuye. Este comportamiento se da debido a que el dispositivo synthetic jet utiliza el aire de sus alrededores y cuando la placa está muy cerca interrumpe el ingreso de aire en la cavidad, lo cual afecta la formación de vórtices alrededor del orificio. Además, una vez que el flujo es expulsado se da un fenómeno de recirculación de aire caliente debido a la cercanía de la placa caliente con el orificio. Lo cual afecta dramáticamente la disipación de calor por medio de la convección. Esto se debe a que la diferencia de temperaturas entre el flujo y la placa cae sustancialmente. Es importante mencionar que a pesar de que la velocidad de flujo es mucho mayor a una distancia de 5 mm, la transferencia de calor no fue beneficiada por el aumento de dicha velocidad. Por otro lado, en la fase de medición de flujo se registró que la menor velocidad se dio a 20 mm para los 4 tipos de orificios. A pesar que la velocidad fue menor a esta distancia, se registró un aumento en el coeficiente de transferencia de calor. Este comportamiento fue comprobado por Tan, X. M., & Zhang (Zhang & Tan, 2007). Para distancias mayores a 20 mm de acuerdo a estudios anteriores se espera que la intensidad del synthetic jet se reduzca, resultando en una pobre acción de disipación de calor.

En la Figura 28 se pueden ver los resultados relacionados al comportamiento del coeficiente de operación (COP). Es evidente que el COP se ve afectando de la misma forma que el coeficiente de transferencia de calor con respecto a la distancia y el tipo de orificio. A pesar de que el coeficiente de calor máximo calculado fue de $\bar{h} = 11.05 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

se registraron valores de COP muy altos .Siendo el mayor de 49.21 y el menor 13.05 relacionados al orificio rectangular y cuadrado respectivamente. Esto se debe a que la energía necesaria para que el diafragma piezoeléctrico empiece a vibrar es muy pequeño (0.01445 watts) a que pesar de que el calor disipado no sea mucho.

Finalmente, en la Figura 29 se muestra el comportamiento del enfriamiento en el tiempo para cada tipo de orificio. En este caso se estableció una velocidad de 1 m/s modificando la frecuencia para todos los orificios a una distancia de 10 mm. Se estableció un tiempo de enfriamiento de 300 segundos a partir de una temperatura promedio de 90°C. Después del intervalo de tiempo con el orificio rectangular se llegó a una temperatura promedio de 49.32°C, con el orificio triangular 52.08°C y finalmente con los orificios circular y cuadrado 53.30°C y 53.14 °C respectivamente. Se compararon estos resultados con la convección natural en la cual la temperatura promedio final fue 56 °C. Evidentemente se comprueba que el orificio rectangular disipa mayor calor en el tiempo, lo cual concuerda con los resultados del diseño experimental de Taguchi.

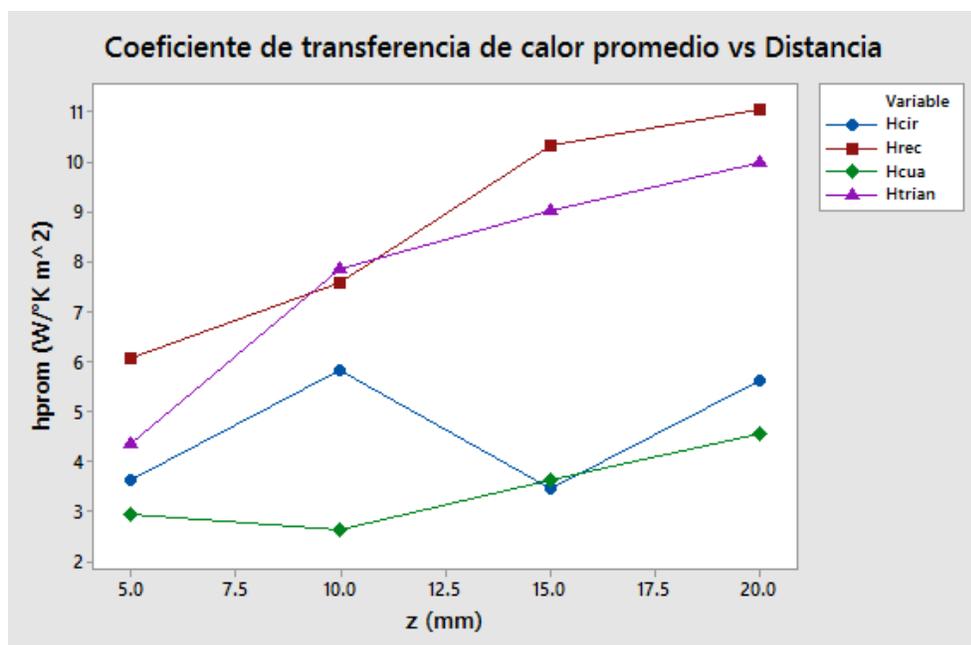


Figura. 27 Coeficiente de transferencia de calor promedio vs distancia axial (z) para cada tipo de orificio. Frecuencia excitación (Circular =2200 Hz Rectangular= 2000 Hz Triangular=2400 Hz Cuadrada=1700 Hz)

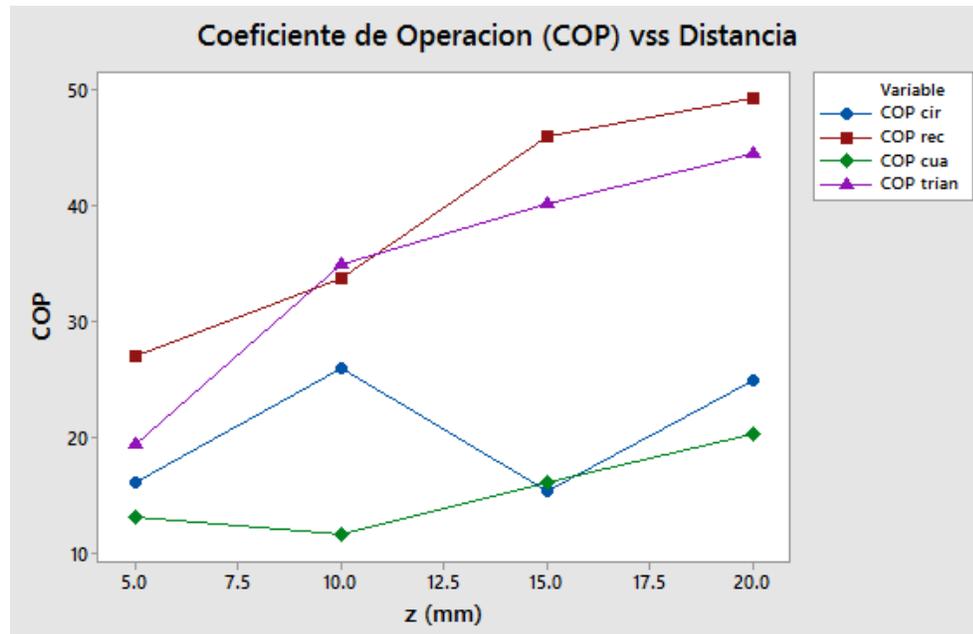


Figura. 28 Coeficiente de Operación vs distancia axial (z) para cada tipo de orificio. Frecuencia excitación (Circular =2200 Hz Rectangular= 2000 Hz Triangular=2400 Hz Cuadrada=1700 Hz)

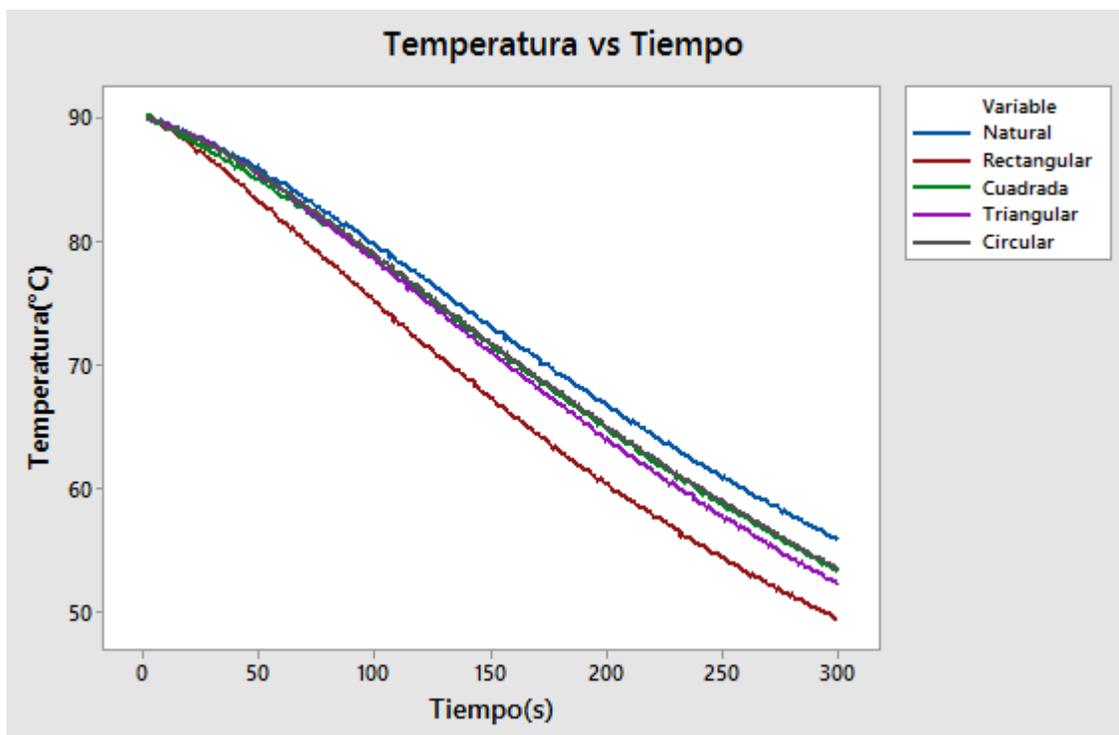


Figura. 29 Perfil de enfriamiento en el tipo para cada tipo de orificio. (Velocidad para cada orificio 1m/s a $z=10$ mm)

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

En el presente trabajo se estudió la incidencia del cambio de geometría del orificio de un dispositivo synthetic en la transferencia de calor. El estudio se dividió en dos etapas. La primera relacionada a la medición de la velocidad de flujo para cada tipo orificio y la segunda asociada la transferencia de calor. En esta última etapa se realizó un diseño experimental de Taguchi ya que el objetivo principal del estudio era identificar la mejor combinación de parámetros (frecuencia, distancia y tipo de orificio), que permita enfriar una placa térmica en un menor tiempo establecido. Las conclusiones que resumen el estudio se presentan a continuación:

- De acuerdo al diseño experimental realizado se reconoció que la mejor combinación de parámetros para enfriar la placa fueron el orificio rectangular a una distancia de 20 mm y una frecuencia de 2000 Hz. Utilizando estos parámetros se registró el menor tiempo de enfriamiento promedio (1 min 3 seg) para un delta de temperatura de (60-50)°C con un $\bar{h} = 11.05 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ y un COP= 49.21. Además, según análisis de la varianza de acuerdo al F-value de cada parámetro el tipo de orificio afecta de mayor manera al tiempo de enfriamiento, sin embargo, su valor también depende de la interacción entre el tipo de orificio y distancia.
- Para todos los tipos de orificios se pudieron identificar dos frecuencias de resonancia. Las cuales están relacionadas con la frecuencia de resonancia del diafragma piezoeléctrico y la frecuencia de resonador de Helmholtz asociada con la cavidad. Cada tipo de orificio presenta diferentes frecuencias de resonancia en

las cuales se dieron incrementos notables en la velocidad de flujo. Se pudo identificar que en la frecuencia de resonancia relacionada al diafragma se da la mayor velocidad de flujo para cada tipo de orificio. Además, cada tipo de orificio presenta un diferente comportamiento con respecto a la frecuencia de excitación. Razón por la cual cada grafica de velocidad de flujo vs frecuencia es independiente para el orificio circular, rectangular, triangular y cuadrado. Sin embargo, en todos los casos al llegar a 3000 Hz la velocidad de flujo era cero Comparando a una misma distancia utilizando el orificio circular se registró las velocidades más altas mientras que usando el orificio rectangular la velocidad de flujo fue menor. Se comprobó que la velocidad de flujo es inversamente proporcional al área del orificio.

- En etapas preliminares del estudio se pudo evidenciar que el uso de una onda cuadrada generaba una mayor velocidad de flujo, sin embargo, los niveles de decibeles emitidos eran demasiado altos, razón por la cual se optó por el uso de una onda sinusoidal. Además, el jet alcanza una velocidad máxima cerca del orificio y decrece mientras se aleja. Esto se da debido a que los vórtices generados por los bordes del orificio pierden energía a medida que se disipan en el ambiente.
- Se pudo evidenciar que mientras la distancia de la placa con respecto al orificio el coeficiente de transferencia de calor y coeficiente de operación (COP) aumenta para todos los orificios. Mientras que cuando la placa se encontraba a una menor distancia la disipación de calor cayó sustancialmente. Esto se debe a que el synthetic jet utiliza el aire del ambiente para su formación. Cuando la placa está muy cerca del orificio se da recirculación de aire caliente lo cual afecta la transferencia de calor. De acuerdo a (Liu, Tsai, & Wang, 2014) a medida que se incrementa la distancia aumenta la disipación de calor sin embargo cuando la distancia es demasiado grande existe una caída en el coeficiente de transferencia

de calor. En términos de transferencia de calor se puede ordenar el tipo de orificio de mejor a menos eficiente de la siguiente forma: Rectangular, Triangular, Circular y Cuadrado. A la mejor distancia de 20mm el máximo coeficiente de transferencia de calor promedio registrado correspondiente al orificio rectangular fue $\bar{h} = 11.05 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, le sigue el orificio triangular con $\bar{h} = 9.98 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, posteriormente el orificio circular con $\bar{h} = 5.59 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ y finalmente el orificio cuadrado $\bar{h} = 4.54 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Si se compara el tiempo en que la placa paso de 60 a 50 °C utilizando la convección natural (2 minutos) con el tiempo correspondiente al orificio rectangular siendo el mejor del estudio (1m 5 s). Se dio una mejora del 46% en cuanto al tiempo de enfriamiento para un delta de temperatura de 10°C.

5.2. Recomendaciones y trabajos futuros

- Si se requiere obtener una mayor velocidad de flujo es necesario amplificar la onda de excitación. Para esto se puede utilizar una etapa de amplificación mediante un “Power Amplifier” para aumentar el voltaje y con esto la deformación del diafragma piezoeléctrico.
- Medir la deformación del piezoeléctrico cuando vibra es un parámetro importante que se requiere para aplicar el modelo matemático LEM, el cual predice la velocidad de flujo con respecto al voltaje aplicado. Al aplicar este modelo se puede realizar un estudio enfocado a mejorar el diseño de un synthetic jet. Para medir la deflexión del diafragma se puede utilizar un sensor laser de desplazamiento.
- Incorporar un sistema de visualización del flujo mediante el uso de un velocímetro de imagen por partículas (PIV) o una cámara de humo. Con esto pudiera visualizar

los vórtices generados por la interacción del flujo con los bordes del orificio. Además, al tener esta información de pudiera validar una simulación numérica.

- Enfocarse en el nivel de apriete en la carcasa es un parámetro importante que afecta el desempeño del dispositivo. Se requiere mucha más investigación para conocer la incidencia de este parámetro en la velocidad de flujo y la disipación de calor.
- Si se requiere que el calor disipado aumente, se tendría que aumentar el voltaje de excitación ya que un aumento en este parámetro permite una mayor deformación en el diafragma aumentando la velocidad de flujo, sin embargo, esto haría que el COP disminuya ya que la energía consumida sería mucho mayor.
- Para futuros proyectos es importante tomar en cuenta que el nivel de ruido emitido por el synthetic jet durante su funcionamiento puede ser molesto. Razón por la cual es necesario el uso de una cámara acústica para la mitigación del ruido durante la toma de datos. También sería importante orientar futuras investigaciones solo a la mitigación del ruido de este tipo de dispositivo mediante el rediseño de la carcasa.
- En etapas preliminares del estudio se utilizó una onda de excitación tipo cuadrada y se comparó con una sinusoidal. La onda cuadrada generó velocidades de flujo muchos mayores con respecto al uso de una sinusoidal, sin embargo, el nivel de ruido incremento de manera dramática. Estas pequeñas observaciones requieren mayor investigación por lo que se sugiere orientar futuras investigaciones a reconocer la incidencia de la onda de excitación en la velocidad de flujo y niveles de decibeles generados.

- Debido a que se obtuvo mejores resultados en cuanto a transferencia de calor utilizando el orificio rectangular. Se incentiva a estudiar la incidencia en la modificación del área de este tipo orificio.
- Finalmente, sería importante modificar la cavidad y estudiar su influencia en los parámetros de salida de un synthetic jet.

Bibliografía

- Alvarado , C., Urbina, S., Vega, S., Alcaraz , L., & Rodriguez, R. (Octubre de 2015). Diseño de un sistema para control de un piezo-actuador vibratorio. *Pistas Educativas*, 55.
- Antonia, R. A., & Bilger, R. W. (1973). An experimental investigation of an axisymmetric jet in a co-flowing air stream. *Journal of Fluids Mechanics*, 18.
- Capp, S. P. (1983). Experimental investigation of the turbulent axisymmetric jet. PhD thesis University at Buffalo.
- Castro, K., Segura, L., Castellanos, S., & Lino, J. (2017). Optimization of Geometric Quality in a 5 Axis Machining of Curved Surfaces in a EN-AW-7075 Alloy by Taguchi Method. En L. Da Silva, *Materials Design and Applications* (pág. 347). Quito: Springer.
- Cummings , R. M., Mason, W. H., Morton, S. A., & Mcdaniel, D. R. (2015). *Applied Computational Aerodynamics*. United States of America: Cambridge University Press.
- Davidson, P. A. (2004). *Turbulence: an introduction for scientists and engineers*. New York: Oxford University Press.
- DeWitt, D., & Incropera, F. (1999). Transferencia por conveccion. En *Fundamentos de transferencia de calor*. Mexico: Pearson.
- DeWitt, D., & Incropera, F. (1999). *Transferencia por conveccion*. Mexico: Pearson.
- Gallas, Q. (2002). *Lumped Element Modeling of Piezoelectric-Driven Synthetic Jet Actuators for Active Flow Control*. Florida.

- Gallas, Q., Holman, R., Nishida, T., Carroll, B., Sheplak, M., & Catafesta, L. (2003). Lumped Element Modeling of Piezoelectric Driven Synthetic Jet Actuators. *AIAA Journal*, 8.
- Gil, P., & Strzelczyk, P. (2016). Performance and efficiency of loudspeaker driven synthetic jet actuator. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 16.
- Jaffe, N., Cook, W., & Jaffe, H. (1971). *Piezoelectric ceramics (Non Metallic Solids)*. (A. P. York, Ed.) Bedford, Ohio, U.S.A.
- Krishnan, G., & Mohseni, K. (10 de Octubre de 2009). Axisymmetric Synthetic Jets: An Experimental and Theoretical Examination. *Elsevier*, 10.
- Lasagne, D., Orazi, M., & Luso, G. (2013). Streamwise vortices originating from synthetic jet-turbulent boundary layer interaction. *IOP Science*, 27.
- Liu, Y., Tsai, S., & Wang, C. (6 de Marzo de 2014). Effect of driven frequency on flow and heat transfer of an impinging synthetic air jet. *Applied Thermal Engineering*, 9.
- Livermore, C., & Voldman, J. (Spring de 2007). *MIT OpenCourseWare*. Obtenido de Design and Fabrication of Microelectromechanical Devices: <https://ocw.mit.edu>
- Mahalingam, R., Rumigny, N., & Glezer, A. (3 de Septiembre de 2004). Thermal management with synthetic jet ejectors. *IEEE Transactions on components and packaging technologies*.
- Mangate, L. D., & Chaudhari, M. B. (23 de Marzo de 2016). Experimental study on heat transfer characteristics of a heat sink with multiple orifice synthetic jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10.
- Ming, T., & Zhou, Z. (14 de Enero de 2013). Flow and heat transfer characteristics under synthetic jets impingement driven by piezoelectric actuator. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 13.

- Mohsemi, K., & Mittal, R. (2015). *Synthetic Jets Fundamental and Applications*. Northwest: Taylor & Francis Group.
- Ramos, J., Vargas, J., Gorrostieta, E., & Pedraza, J. (2006). New Polynomial Model of the behavior of a Pneumatic cylinder. *SciELO*, 12.
- Rizzetta, D. P., Visbal, M. R., & Stanek, M. J. (8 de Agosto de 1999). Numerical Investigation of synthetic jet flowfields. *AIAA*, 9.
- Smith, B., & Glezer, A. (1998). The formation and evolution of synthetic jets. *AIP Physics of Fluids*, 18.
- Timoshenko, S., & Krieger, S. W. (1999). *Theory of plates and shells*. New York: McGraw Hill.
- Utturkar, Y., Mehmet, A., & Icoz, T. (2009). Thermal characteristics of a synthetic jet integrated heat sink design for air-cooled electronics. *ASME*, 12.
- Yassour, Y., Stricker, J., & Wolfshtein, M. (22 de Agosto de 1986). Heat transfer from a small pulsating jet. *Proceedings of the 8th International Conference*.
- Zhang, J., & Tan, X. (Abril de 2007). Experimental study on flow and heat transfer characteristics of synthetic jet driven by piezoelectric actuator. *Science in China Press*, 9.