

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TUBO VÓRTICE CONTRACORRIENTE
PARA ESTUDIOS EXPERIMENTALES DEL FENÓMENO DE RANQUE-HILSCH**

GABY CECILIA ALVAREZ ALTAMIRANDA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TUBO VÓRTICE CONTRACORRIENTE
PARA ESTUDIOS EXPERIMENTALES DEL FENÓMENO DE RANQUE-HILSCH**

GABY CECILIA ALVAREZ ALTAMIRANDA

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniera Mecánica**

Director

NESTOR RAUL D´CROZ TORRES

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios;

*A mi madre Liney Enith Altamiranda
Martínez, por ser mi ángel guía desde
el cielo;*

*A mi padre Augusto Gabriel Alvarez
Martínez por su amor incondicional y
confianza;*

*A mis hermanas Bielca, Yury y Liney
por su apoyo permanente y a mi
sobrino Gabriel Santiago por su
enorme ternura;*

*A mi familia y amigos por confiar y
creer en mi.*

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Nestor Raúl D´Croz,Torres por sus indicaciones, consejos y apoyo brindado durante la realización del proyecto.

A mi familia por ser parte esencial en el proceso.

Contenido

INTRODUCCIÓN	17
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
OBJETIVOS.....	20
OBJETIVO GENERAL	20
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	20
1. MARCO TEORICO	21
1.1 ESTADO DEL ARTE	21
1.2 DESCRIPCION GENERAL DEL TUBO VORTICE	22
1.3 PARTES DEL TUBO VORTICE	25
1.3.1 Tubo principal	25
1.3.2 Boquillas	29
1.3.3 Pantalla fría u orificio frio (diafragma)	32
1.3.4 Válvula de control	33
1.4 TIPOS DE TUBOS VORTICE	34
1.4.1 Tubo vórtice contraflujo.....	35
1.4.2 Tubo vórtice de flujo paralelo	36
1.4.3 Tubo vórtice no refrigerado	36
1.3.4 Tubo vórtice refrigerado	36
1.5 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO	37
1.5.1 Efecto de enfriamiento en un tubo vórtice.....	39
1.5.2 Efecto de calentamiento en un tubo vórtice	39
1.5.3 Principio de funcionamiento del tubo vórtice en relación al flujo	39
1.5.4 Transporte de energía mecánica	46
1.5.5 Viscosidad y turbulencia	47
1.5.6 Circulación secundaria.....	51
1.5.7 Discusión de la separación de temperatura	56
1.5.8 Límites de la separación de temperatura (según Ahlborn).....	58

1.5.9 Termodinámica del tubo vórtice	59
1.5.10 Dinámica de Fluidos del tubo vórtice	62
1.5.11 Eficiencia del tubo vórtice	65
1.6 ESTUDIOS TEÓRICOS Y ANALÍTICOS	66
1.6.1 Teoría de GEORGE RANQUE.....	67
1.6.2 Teoría de HILSH	67
1.6.3 Teoría de VAN DEEMTER.....	68
1.6.4 Teoría de SCHEPER	68
1.6.5 Teoría de HARDEBOL.....	68
1.6.6 Teoría de PARULEKAR – HAHNWALKAR – HINGE	69
1.6.7 Teoría de SCHULTZ – GRUNOW	70
1.6.8 Teoría de STEPHAN.....	71
1.6.9 Teoría de KASSNER – KNOERNSCHIL D.	73
1.6.10 Teoría de DORNBRAND.....	74
1.6.11 Teoría de MERWIN SIBULKIN	74
1.6.12 Teoría de C.U. LINDERSTROM – LANG.....	74
1.6.13 Teoría de DEISSLER – PERLMUTTER.....	75
1.7 APLICACIONES	75
1.7.1 Soldadura.....	75
1.7.2 Trajes alimentados con aire	77
1.7.3 Ajuste en Caliente.....	77
1.7.4 Herramientas de Corte.....	78
1.7.5 Control de Temperatura.....	79
1.7.6 Otras aplicaciones	79
2. PARÁMETROS DE DISEÑO	80
2.1 TUBO PRINCIPAL.....	80
2.2 BOQUILLAS E INYECTORES DE AIRE.....	82
2.3 PANTALLA FRÍA	83
2.4 VÁLVULA REGULADORA.....	85
2.5 RESULTADOS COMUNES IMPORTANTES SOBRE LOS CRITERIOS DE DISEÑO DEL TUBO VÓRTICE	85

3. DISEÑO DEL TUBO VORTICE	89
3.1 TUBO PRINCIPAL	89
3.2 BOQUILLA DE ENTRADA	89
3.3 PANTALLA FRÍA	90
3.4 VÁLVULA REGULADORA.....	90
4. CONSTRUCCIÓN E INSTALACION	92
4.1 MATERIALES	92
4.2 CONSTRUCCION.....	93
4.3 INSTALACION	94
4.2.1 Compresor	94
4.2.2 Tubo vórtice y soporte	95
4.2.3 Instrumentos de medición	95
4.2.4 Accesorios y conexiones.....	97
4.4 COSTOS.....	98
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	99
5.1 BOQUILLA 1	100
5.1.1 Prueba 1	100
5.1.2 Prueba 2	101
5.1.3 Prueba 3	103
5.2 BOQUILLA 2.....	104
5.2.1 Prueba 4	104
5.2.2 Prueba 5	105
5.2.3 Prueba 6	107
6. CONCLUSIONES	109
BIBLIOGRAFIA.....	112
ANEXOS.....	114

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1. Esquema de un tubo vórtice	23
FIGURA 2 Esquema del tubo vórtice con sus principales partes.....	25
FIGURA 3. Sección transversal con freno de vórtice	26
FIGURA 4. Tres secciones transversales diferentes	27
FIGURA 5. Sección cónica	28
FIGURA 6. Sección rectangular.....	29
FIGURA 7.Boquilla cilíndrica.....	30
FIGURA 8. Boquilla de álabes fijos.....	30
FIGURA 9. Boquilla rectangular.....	31
FIGURA 10. Boquilla espiral convergente	32
FIGURA 11. Válvula de aguja.....	33
FIGURA 12. Válvula de estrangulamiento con difusor periférico	34
FIGURA 13. Tubo vórtice contraflujo	35
FIGURA 14. Tubo vórtice de flujo paralelo	36
FIGURA 15. Tubo vórtice refrigerado	37
FIGURA 16. Patrón de flujo dentro del tubo vórtice	40
FIGURA 17. Estructura de flujo cuando la salida de calor es grande	42
FIGURA 18 Estructura de flujo cuando la salida de calor esta semi ajustada	43
FIGURA 19. Estructura de flujo cuando la salida de calor está ajustada	44
FIGURA 20. Estructura de flujo cuando la salida de calor está cerrada	45
FIGURA 21. Representación esquemática de los flujos de energía radiales en el tubo vórtice	46
FIGURA 22. Simulación del flujo dentro del tubo vórtice	49
FIGURA 23. Simulación de una circulación secundaria en un tubo vórtice	51
FIGURA 24. Proceso de funcionamiento de una circulación secundaria	52
FIGURA 25. Patrón de flujo cerca de la boquilla en el tubo vórtice	53
FIGURA 26.Distribución de la temperatura estática en dirección radial (experimentación 1)	54
FIGURA 27. Distribución de la temperatura estática en dirección radial (experimentación 2)	55
FIGURA 28. Predicción de la temperatura estática en Large Eddy simulation	55
FIGURA 29. Distribución de temperatura a lo largo del tubo vórtice.....	57
FIGURA 30. Límites del sistema aplicados al tubo vórtice	60
FIGURA 31. Variación de $\Delta T_{o,c}$ respecto a μ para un tubo vórtice específico.	63
FIGURA 32. Aerodinámica de la velocidad axial y gráficas de velocidad tangencial y axial y su distribución a lo largo del eje central del tubo vórtice.	64

FIGURA 33. Separación y distribución del flujo dentro del tubo y transferencia de energía capa a capa, según Schultz-Grunow	71
FIGURA 34. Separación y distribución del flujo, punto de estancamiento, S, y dirección radial de la energía.	72
FIGURA 35. Diferencia de la salida fría y caliente en función de la fracción fría y la presión de entrada como parámetro según Stephan	73
FIGURA 36. Soldadura de carrocerías con el tubo vórtice	76
FIGURA 37. Soldadura por puntos con el tubo vórtice	76
FIGURA 38. Trajes alimentados con aire	77
FIGURA 39. Enfriamiento de herramientas de corte.....	78
FIGURA 40. Material del tubo principal.....	92
FIGURA 41. Material de los componentes.....	93
FIGURA 42. Compresor.....	94
FIGURA 43. Tubo vórtice y soporte	95
FIGURA 44. Termocupla y Compac Rio	96
FIGURA 45. Manómetros	96
FIGURA 46. Anemómetro.....	97
FIGURA 47. Conexiones	97

CONTENIDO DE TABLAS

TABLA 1. Clasificación del tubo vórtice	34
TABLA 2. Tabla de relación longitud/diámetro según autores	81
TABLA 3. Tabla de diámetros nominales de acuerdo a autores	82
TABLA 4. Tabla de relación d_i/D según autores	83
TABLA 5. Relación óptima d_c/D según autores	84
TABLA 6. Resultados comunes importantes sobre los criterios de diseño del tubo vórtice	85
TABLA 7. Costos	98

CONTENIDO DE GRAFICAS

GRAFICA 1. Temperaturas para prueba 1	101
GRAFICA 2. Temperaturas para prueba 2	102
GRAFICA 3. Temperaturas para prueba 3	103
GRAFICA 4. Temperaturas para prueba 4	105
GRAFICA 5. Temperaturas para prueba 5	106
GRAFICA 6. Temperaturas para prueba 6	107

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Plano del tubo principal.....	115
ANEXO B. Plano de la pantalla fría	116
ANEXO C. Plano del distribuidor	117
ANEXO D. Plano del distribuidor inclinado	118
ANEXO E. Plano del adaptador	119
ANEXO F. Plano del capuchón.....	120
ANEXO G. Plano del cono	121

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TUBO VÓRTICE CONTRACORRIENTE PARA ESTUDIOS EXPERIMENTALES DEL FENÓMENO DE RANQUE-HILSCH*

AUTOR: GABY CECILIA ALVAREZ ALTAMIRANDA**

PALABRAS CLAVES: Tubo vórtice, fenómeno de Ranque-Hilsh, flujo de vórtice, gradiente de temperatura.

DESCRIPCIÓN:

El tubo vórtice es un dispositivo que en ausencia de partes móviles, experimenta el fenómeno de Ranque-Hilsh. Este fenómeno se define como la separación de un fluido de trabajo a temperatura ambiente (en este caso aire) en dos corrientes: una corriente fría y la otra caliente de manera simultánea. Para lograr éste efecto, el tubo vórtice requiere de ciertas condiciones y parámetros geométricos (algunos como la longitud, el diámetro del inyector, el diámetro de la pantalla fría, todos estos en función del diámetro principal del tubo; entre otros), los cuales fueron establecidos en gran medida por estudios experimentales hechos desde el descubrimiento de este fenómeno por diversos autores; quienes hasta el momento no logran un consenso sobre el mecanismo de operación del tubo vórtice. Realizar una selección sobre estos parámetros es uno de los objetivos principales del presente trabajo junto con su construcción.

En los resultados experimentales obtenidos se pueden observar los gradientes de temperaturas que se logran en el tubo vórtice contracorriente diseñado, tanto para la temperatura de la salida fría, como para la salida caliente con respecto a la temperatura de entrada. Además se muestra como estas temperaturas pueden variar y controlarse al igual que el caudal expulsado en cada salida, mediante la válvula que se sitúa en el extremo caliente.

* Tesis de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Nestor Raúl D'cruz, Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COUNTERFLOW VORTEX TUBE FOR EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PHENOMENON RANQUE-HILSCH*

AUTHOR: GABY CECILIA ALVAREZ ALTAMIRANDA**

KEYWORDS: Vortex Tube, Phenomenon Ranque-Hilsch , Vortex flow , Temperature gradient

DESCRIPTION:

The vortex tube is a device that in the absence of mobile parts, experiment the Ranque-Hilsch phenomenon. This phenomenon is defined as the separation of working fluids in ambient temperature (in this case air) in two streams: one cold and the other simultaneously hot. To achieve this effect, the vortex tube requires certain conditions and geometrical parameters (some like the length, the injector diameter, diameter of the cold plate. All of them in function of the main diameter of the tube, among others, of which were established mainly by experimental studies. Done from the discovery of this phenomenon by several authors; who until now haven't agreed about the vortex tube operation mechanism. Make a selection about these parameters is one of the main aims of this project together with its construction.

In the obtained experimental results, it can be observed the gradient temperature that are reached in the designed upstream vortex tube, either the temperature at the cold end, as with the hot end in relation with the entrance temperature. Also it is shown how these temperatures can vary and control themselves as well as the flow ejected at each end, through the valve that is situated at the hot end.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Nestor Raúl D'croz, Ingeniero Mecánico.

INTRODUCCIÓN

Las alternativas que se tienen en la industria a la hora de seleccionar un sistema de refrigeración son cada vez más amplias, esto se debe a investigaciones constantes que pretenden desarrollar y mejorar estos sistemas. Una de las alternativas que se está llevando a cabo en diferentes procesos industriales es el tubo vórtice; aunque el efecto de éste es bastante conocido en círculos de ingeniería no es abiertamente referenciado en la termodinámica, solo se conoce en artículos investigativos, revistas y libros especializados.

En la actualidad se han realizado miles de estudios sobre el fenómeno de Ranque-Hilsch, en los que el tubo vórtice sufre de diversas modificaciones, ya sea de la geometría (por ejemplo tubos de longitudes menores de 0.05 metros hasta mayores de 2 metros), del material empleado (acrílico, teflón, pvc, acero inoxidable, entre otros), o de su diseño como tal (número de boquillas, tipo de válvula, etc.) y cuyos resultados confirman la separación de energía, y por consiguiente el gradiente de temperatura.

Para el siguiente trabajo se quiere lograr un estudio experimental para observar y analizar el cambio de temperatura que se logra mediante este dispositivo, en donde la principal base del diseño se tomó de investigaciones y estudios pasados, en los cuales cada autor plantea su modelo de fórmulas empíricas complejas y teorías sobre la separación de energía que ocurre dentro del tubo vórtice.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los fenómenos físicos ocurren cuando se sufren transformaciones transitorias sin alterar la estructura molecular de la sustancia, y la representación esquemática y simplificada del fenómeno es lo que lo hace comprensible.

Realizar un estudio experimental del fenómeno de Ranque-Hilsch para conocer y explicar sus procesos causales es el principal interés, además de aprovechar su utilidad para dar solución a múltiples problemas en la industria. En la actualidad son de gran importancia los sistemas de refrigeración, en los que generalmente se trabaja con refrigerante para extraer el calor, sin embargo este sistema posee algunas desventajas comparado con el tubo vórtice.

Por mencionar algunos procedimientos industriales en los que un sistema de refrigeración convencional tiene poca utilidad son:

- Cuando se requiere mecanizar piezas sin lubricación alguna, donde el calentamiento progresivo de las herramientas de corte producto del contacto y el movimiento relativo entre esta y la pieza a mecanizar genera un deterioro en su vida útil, disminuyendo en gran medida la calidad del acabado e incrementando costos.
- Equipos, controles e instrumentos electrónicos, los cuales son situados en temperaturas controladas requieren un fluido seco para evitar que la humedad afecte su funcionamiento.
- En soldadura, para obtener mejores superficies terminadas se aplica flujos de aire frío en el punto de unión y así evitar distorsiones; entre otros.

Actualmente en la industria se requieren de operaciones que demandan procesos por cortos periodos de tiempo, y la utilización de un dispositivo simple que tenga aplicaciones en diferentes campos, para prevenir daños que se presenten en los diferentes procesos, puede convertirse en una buena opción.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Contribuir a la misión de la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería Mecánica a través de la generación y adecuación de conocimiento mediante los estudios experimentales específicamente en la demostración del fenómeno de Ranque-Hilsch.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar un tubo vórtice teniendo en cuenta los parámetros y recomendaciones establecidas en estudios experimentales anteriores.
- Construir un tubo vórtice de tamaño medio, utilizando teflón y/o pvc como material, de acuerdo a los parámetros de diseño para realizar los estudios correspondientes.
- Experimentar el fenómeno de Ranque-Hilsh en el modelo construido mediante pruebas que muestren los cambios de temperatura y presión que se generan en la salida con relación a la entrada.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos en el proceso de experimentación

1. MARCO TEORICO

1.1 ESTADO DEL ARTE ¹

Fluido (aire) que gira alrededor de un eje (en forma de tornado) se llama un vórtice. Un tubo de vórtice, que es también llamado tubo Ranque-Hilsch o tubo de enfriamiento, este crea aire frío y aire caliente al forzar el aire comprimido a través de una cámara de generación que hace girar el aire de forma centrífuga a lo largo de las paredes internas del tubo a una alta tasa de velocidad, hacia la válvula de control. Un porcentaje del aire caliente, de alta velocidad está permitido para salir por la válvula de control; el resto de la (ahora más lento) corriente de aire se ve obligado a contracorriente a través del centro de la corriente de aire de alta velocidad, dando el calor, a través del centro de la cámara de generación saliendo finalmente a través el extremo opuesto como el aire extremadamente frío. Tubos vórtice generan temperaturas de hasta 100 ° F por debajo de la temperatura del aire de entrada.

El tubo vórtice o efecto Ranque fue descubierto alrededor de 1930 por GEORGE RANQUE. GEORGE RANQUE, estudiante de la física francesa, estaba experimentando con una bomba de tipo vórtice que había desarrollado cuando notó la expulsión de aire cálido de un lado, y de aire frío por el otro. Ranque pronto se olvidó de su bomba y comenzó una pequeña empresa para explotar el potencial comercial de este extraño aparato que produce aire caliente y frío, sin partes móviles. Sin embargo, pronto fracasó y el tubo de vórtice se deslizó en la oscuridad hasta 1945-1947 cuando RUDOLPH HILSCH, un físico alemán, publicó un trabajo científico muy leído del dispositivo al que llamó un Wirbelrohr.

¹ GAO, C. Experimental study on the Ranque-Hilsch vortex.

La separación de mezclas de gases, oxígeno y nitrógeno, dióxido de carbono y helio, dióxido de carbono y aire con el tubo de vórtice se informó en 1967 por LINDERSTRÓM-LANG y en 1977 por J. Marshall. En 1979 se utilizó el vapor como medio de trabajo por TAKAHAMA. En 1979, el propano de dos fases se utiliza como medio de trabajo por Collins.

En 1988 BALMER aplica agua líquida como medio de trabajo. Se encontró que cuando la presión de entrada es alta, por ejemplo 20-50 bar, todavía existe el efecto de separación de energía. Así se demuestra que existe el proceso de separación de energía en incompresibles (líquidos) de flujo de vórtice también. En 2004, el gas natural se utiliza como medio de trabajo por NIKOLAY POSHERNEV.

1.2 DESCRIPCION GENERAL DEL TUBO VORTICE²

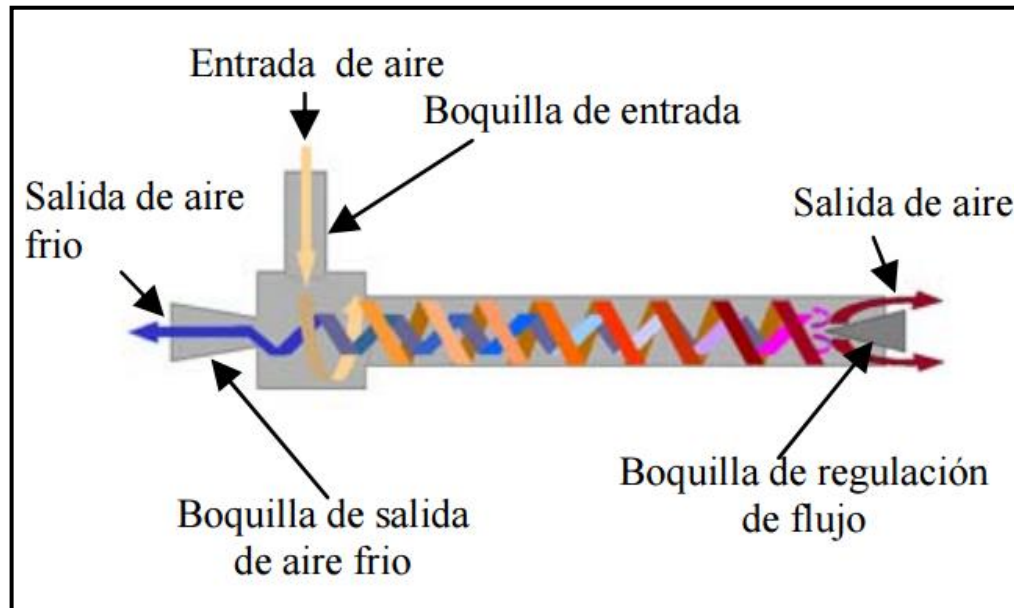
El tubo vórtice es un dispositivo mecánico simple que opera sin ninguna parte móvil, como ejes o pistones de compresores. El dispositivo consiste de un tubo principal por el cual entra tangencialmente un gas a presiones mayores a la atmosférica, el cual se divide en dos zonas de presión: una de alta y una de baja, generando de manera simultánea flujos de aire frío y aire caliente. Se logra controlar las temperaturas y a su vez se consigue variar la cantidad y calidad del aire frío a través de la válvula cónica posicionada en la salida de la corriente caliente.

El flujo de aire frío abandona el tubo mediante un orificio ubicado cerca de la boquilla de entrada de aire, al tiempo que el flujo de aire caliente fluye hacia la válvula cónica que permite la salida del flujo de manera regulada por la boquilla opuesta como se muestra en la figura 1. La operación es bastante sencilla, limpia y sin necesidad de grandes recursos físicos. Las diferencias de temperaturas,

² CERVANTES G., VELAZQUEZ A. Estudio experimental del fenómeno Ranque-Hilsch en un tubo vórtice

tanto fría como caliente, con respecto a la temperatura de entrada puede ser sustancial, al igual que las presiones.

FIGURA 1. Esquema de un tubo vórtice



Fuente: Memorias: "Estudio experimental del fenómeno Ranque-Hilsch en un tubo vórtice"

La geometría del tubo es sencilla y puede variar dependiendo del caudal de aire a refrigerar. Los materiales con que se puede construir son variados, se restringen por su capacidad para soportar rangos de temperatura moderada, y buena maquinabilidad para un buen acabado superficial. Por mencionar algunos están, aceros inoxidables, latón, acrílicos, etc.

Se puede describir el movimiento del aire dentro del tubo vórtice de la siguiente manera: Aire a alta presión entra a la cámara anular, luego pasa a través de las boquillas, en donde se pierde parte de la presión y se expande. Las boquillas están dispuestas para que el aire sea inyectado tangencialmente a la circunferencia de la cámara de generación de vórtices y entra al tubo caliente dado que el diámetro del tubo caliente es siempre mayor que el del tubo frío,

ofreciendo el primero menos resistencia al aire. En la cámara de rotación las fuerzas centrífugas guían el aire a formar una zona anular alrededor de la pared interior del tubo caliente, en su movimiento a la válvula la cual se encuentra en el extremo del tubo.

Con el tiempo el aire alcanza la válvula, teniendo en este punto una presión menor que la presión en la salida de las boquillas, pero mayor que la presión atmosférica; esto es cierto cuando la presión inmediatamente detrás de la válvula de control es mayor que la de la salida fría.

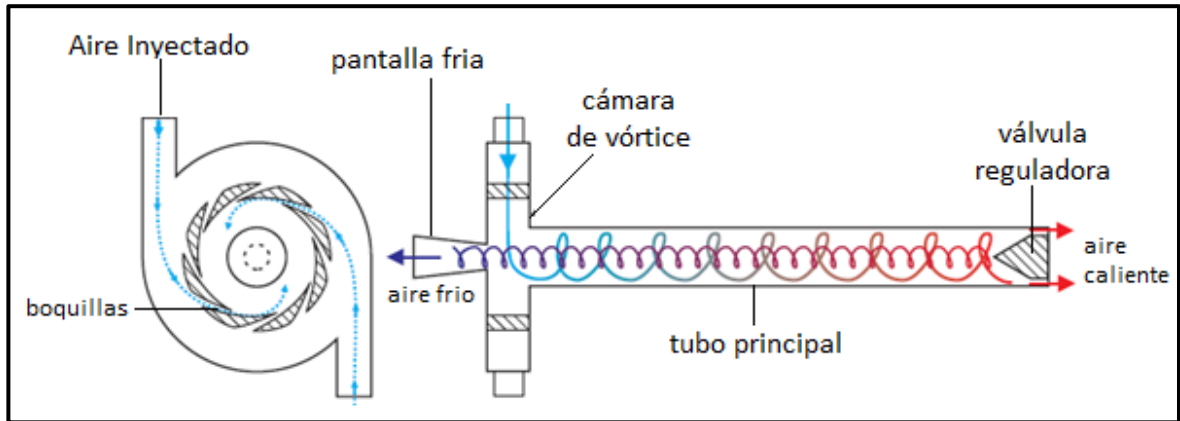
La posición de la válvula determina la cantidad de aire que sale por el terminal caliente. Para la separación del aire caliente y frío, ésta debe permitir escapar parte del aire. El aire remanente es forzado al centro del tubo caliente en donde rotando se mueve hacia atrás, buscando la salida fría. El aire regresa a través del tubo caliente, por el centro del vórtice generado alrededor de la pared interna de la cámara de rotación y atraviesa el diafragma hacia la salida fría.

Recordando que la corriente de aire de entrada en el tubo no ocupa el centro del tubo debido a la fuerza centrífuga, este será el camino de menor resistencia, el cual sigue la corriente interna (corriente fría); esto combinado con la diferencia de presión entre un punto frente a la válvula caliente y el terminal frío es la razón para que haya dos corrientes distintas rotando, una alrededor de la pared interna de la cámara de rotación y la otra en dirección opuesta y con el mismo sentido de rotación en la región central de la cámara de rotación.

Diferentes explicaciones, que describen el proceso principal de la separación del flujo en corrientes calientes y frías separadas en un tubo de vórtice se han proporcionado desde las primeras etapas del desarrollo del tubo.

1.3 PARTES DEL TUBO VORTICE ³

FIGURA 2 Esquema del tubo vórtice con sus principales partes



Fuente: Droplet behaviour and thermal separation in ranque-hilsch vortex tubes

1.3.1 Tubo principal

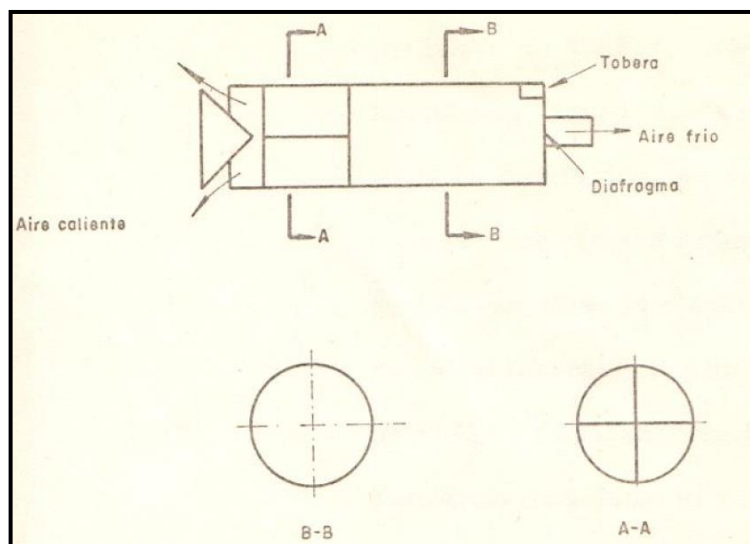
También llamado tubo caliente por algunos investigadores. El tubo vórtice original inventado por Ranque, es una cámara de rotación cilíndrica y larga de longitud 50 veces su diámetro, de tipo de flujo contrario. En el estudio pionero hecho por Hilsch, sugirió que la válvula deberá estar lo suficientemente alejada del plano de las boquillas, para que el aire que llegue a ella haya perdido parte de su movimiento en forma de tornillo, debido a la fricción interna; sin embargo otros investigadores, han acertado considerablemente la longitud del tubo sin ningún cambio apreciable en su funcionamiento. Existen tubos vórtice de alto rendimiento que pueden ser construidos con una longitud de solo tres veces su diámetro.

Algunas modificaciones consisten en cambiar la forma de la sección transversal del tubo, como se muestra a continuación:

³ ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vortex (Ranque's). Trabajo de grado ingeniería mecánica.

- **Sección transversal con freno de vórtice:** la válvula en el extremo caliente debe estar lo suficientemente alejada del plano de las boquillas, para garantizar el movimiento del aire. Esto se puede lograr al dividir en cuadrantes la sección transversal del tubo, mediante la disposición de dos láminas conocido como freno de vórtice. Este freno debe estar localizado justamente frente a la válvula en el terminal caliente, para permitir el movimiento del aire y frenar al final del vórtice. Con este sistema, la longitud del tubo puede ser reducido a 9 diámetros sin cambio en el funcionamiento.

FIGURA 3. Sección transversal con freno de vórtice

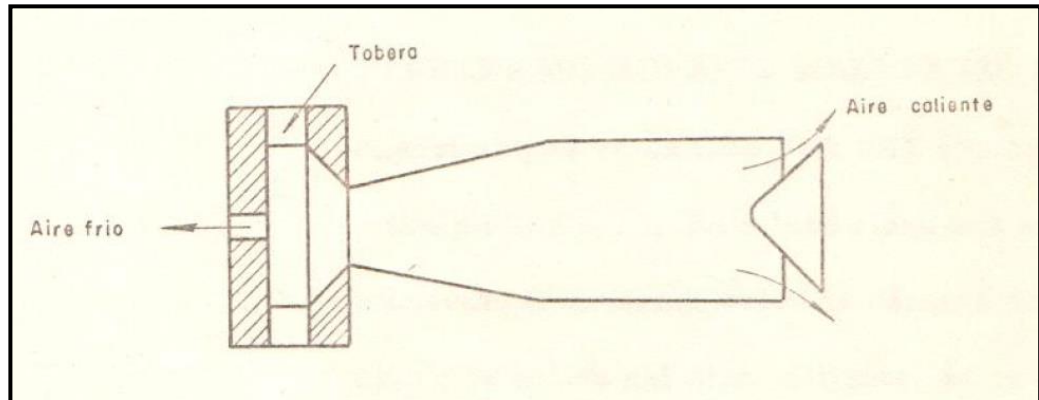


Fuente: ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vortex (Ranque's).

- **Tres secciones transversales diferentes:** PARULEKAR, desarrolló un modelo en el cual modificó la sección transversal del tubo, el cual tuvo una longitud menos de tres veces su diámetro, y comprendió tres piezas: un tubo convergente, uno divergente y uno cilíndrico. El funcionamiento de este modelo fue satisfactorio comparado con otros, con los que se pudo

obtener un funcionamiento igual sólo con el uso de intercambiadores y/o segunda separación.

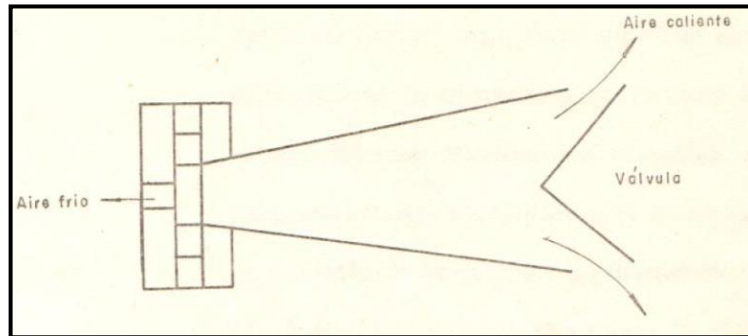
FIGURA 4. Tres secciones transversales diferentes



Fuente: ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vórtice (Ranque's).

- **Sección cónica:** METENNIN, llevó a cabo una investigación con un tubo vórtice contracorriente con una cámara de rotación cónica. Más tarde ensayando varios ángulos de inclinación, encontró un resultado óptimo con una longitud igual a tres veces el diámetro medido en el plano de las boquillas y con un ángulo de inclinación de $3^{\circ} 40'$. El diseño también incluyó un difusor periférico de paletas en el terminal caliente, un diseño de boquillas especial, y un freno de vórtices. Con este diseño el rendimiento obtenido fue del 30%.

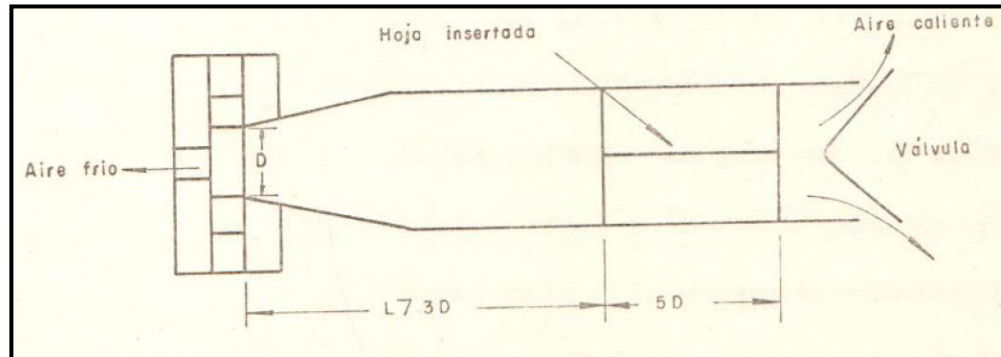
FIGURA 5. Sección cónica



Fuente: ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vórtice (Ranque's).

- **Rectangular:** PARULEKAR, ADVANI Y MALLAN, hicieron experimentos en un tubo vórtice de sección transversal cuadrada entre la cámara de rotación y la salida caliente, en la cual se colocó una lámina con un doblez. Esta sección cuadrada debe destruir la rotación del aire eficientemente. Se hicieron pruebas aumentando la longitud de la lámina insertada y no se encontraron cambios en el funcionamiento general del tubo, hasta cuando ésta entró en la parte cilíndrica de la cámara. En este caso el rendimiento del tubo disminuyó al alcanzar la hoja un punto situado a una distancia de la cámara de rotación de tres veces su diámetro. Se concluyó que la longitud óptima para este diseño es tres veces su diámetro; la rotación del aire no es necesaria en una longitud mayor a la óptima para para el modelo probado, y con esta longitud mínima se obtiene una mayor caída de temperatura.

FIGURA 6. Sección rectangular.



Fuente: ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vórtice (Ranque's).

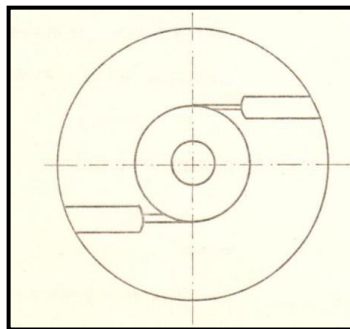
También se concluyó que el lado caliente del tubo vórtice consiste de dos regiones; la primera, que está cercana a las boquillas, en la cual la rotación es esencial. Esta región debe ser pulida de sección transversal circular. Las pérdidas por fricción deben ser mínimas, y con un buen acabado superficial se puede mejorar el rendimiento del tubo vórtice en un 10%. La segunda región, es aquella en donde la rotación no es necesaria, y por esta razón, no necesita ser de sección transversal circular; por tanto es posible amortiguar la rotación del aire, sin producir ningún cambio en el flujo o en el rendimiento del tubo vórtice. Esta región es llamada por muchos investigadores como región de estancamiento.

1.3.2 Boquillas

ECKERT Y HARNETT, demostraron que la caída de presión en un tubo vórtice es proporcional al cuadrado de la velocidad periférica en la sección de las boquillas, y por lo tanto es importante tener una velocidad periférica alta en la parte del tubo inmediatamente después de las boquillas. Dado lo anterior, muchos investigadores han desarrollado muchos tipos de boquillas, a fin de obtener una velocidad periférica alta del aire.

- **Boquillas de dos secciones cilíndricas:** TAKAHAMA, obtuvo buenos resultados en un tubo vórtice largo, con una cámara de rotación cilíndrica de longitud igual a 150 veces su diámetro. Se encontró una alta eficiencia con una relación del diámetro de la tobera al diámetro principal de 0.2. el diseño de esta boquilla no permite que el aire sobrepase la velocidad del sonido.

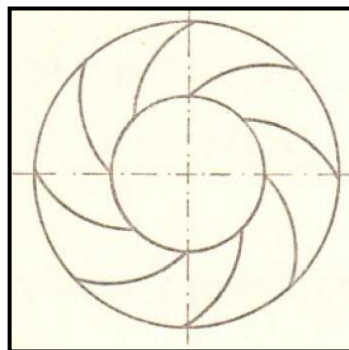
FIGURA 7.Boquilla cilíndrica



Fuente: ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vortex (Ranque's).

- **Boquillas de alabes fijos:** desarrollada por H. TAKAHAMA Y K. TANIMOTO, tuvo 12 hojas en forma de álabe para conducir la entrada del aire, lo que dificulta la elaboración. Pero consigue buenos resultados.

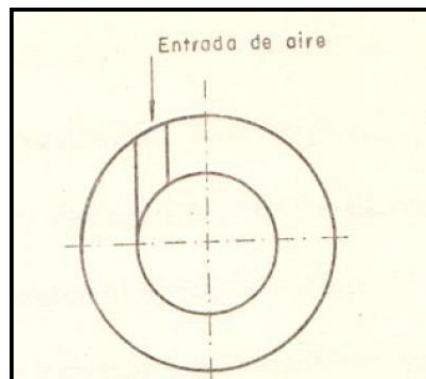
FIGURA 8. Boquilla de álaves fijos



Fuente: ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vortex (Ranque's).

- **Boquilla rectangular:** PARULEKAR, encontró que con este tipo de boquilla se obtiene el mejor resultado cuando el área de salida es el 9% del tubo principal. El número de boquillas depende del diseño, y deben estar distribuidas de manera adecuada.

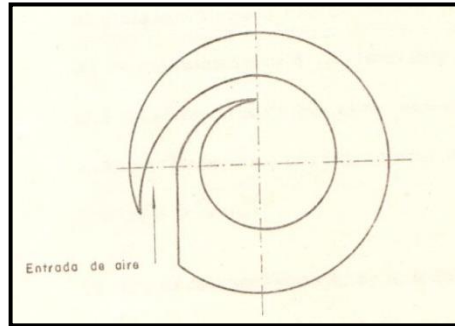
FIGURA 9. Boquilla rectangular



Fuente: ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vortex (Ranque's).

- **Boquilla espiral convergente:** Metenin, recomienda este tipo, en la cual la velocidad del aire va aumentando a medida que pasa a través de la boquilla debido a su forma convergente, de donde resultan grandes velocidades en el tubo principal.

FIGURA 10. Boquilla espiral convergente



Fuente: ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vórtice (Ranque's).

1.3.3 Pantalla fría u orificio frío (diafragma)

La pantalla fría, a través de la cual el aire frío es descargado, es la parte del tubo vórtice de más fácil manufactura. El diámetro correcto del orificio puede ser hallado por prueba y error. Se puede comenzar con un orificio de diámetro igual a la mitad del diámetro de la cámara de rotación, y luego se desciende hasta encontrar el diámetro adecuado.

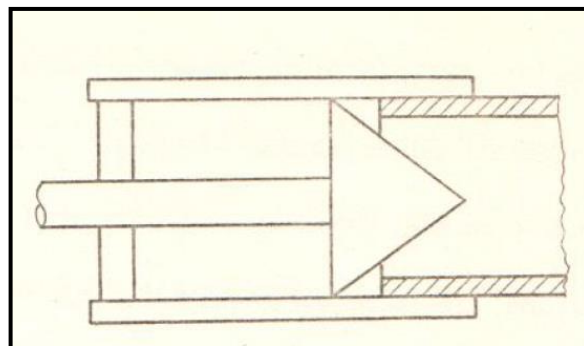
Cuando la posición de la válvula se varia, la proporción del aire caliente y frío cambia, permaneciendo constante el flujo total, entonces, la cantidad de aire que pasa por el diafragma puede variar dentro de un gran rango. El grado de calentamiento o enfriamiento depende de la cantidad relativa de aire que abandone cada extremo del tubo. Como puede comprenderse, uno de los secretos de un buen diseño de tubo vórtice es evitar la mezcla de la corriente fría con la corriente caliente, en la región de la cámara generadora de vórtice. Si un tubo vórtice es operado a una alta fracción fría, el orificio debe tener un diámetro suficiente para guiar el flujo frío, de lo contrario desviaría la corriente de aire frío, mezclando parte de ella con el aire de la corriente caliente, disminuyendo así la refrigeración.

Un diafragma con un orificio de diámetro muy grande arrastraría parte del aire caliente cercano a él, aumentando así la temperatura del aire frío en la salida. Por tanto un tubo vórtice con una capacidad de flujo total dado, se puede operar en una de los dos formas siguientes: Máxima refrigeración o la temperatura más baja posible, dependiendo estas dos formas del diámetro del orificio y de la fracción fría.

1.3.4 Válvula de control

La válvula de aguja es probablemente el tipo de más fácil manufactura, puesto que solo se necesita una pequeña apertura; la aguja debe estar bien soportada y hacer un sello total cuando esté cerrada la válvula; además es necesario un filete fino en el tornillo para el control exacto de la fracción fría. Este tipo de válvula se puede usar con un tipo de tubo vórtice largo, sin el uso de freno vórtice.

FIGURA 11. Válvula de aguja

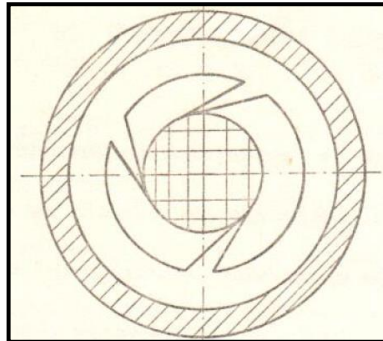


Fuente: ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vortex (Ranque's).

El uso de la válvula de globo para tubos vórtice cortos es mucho mejor, ya que una válvula de aguja puede reducir la caída de temperatura hasta en dos grados centígrados.

METENIN, uso una válvula de estrangulamiento de difusor periférico, para descargar solamente el aire caliente que se encuentra en la periferia del tubo, en donde está a temperaturas y presiones mayores.

FIGURA 12. Válvula de estrangulamiento con difusor periférico



Fuente: ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vortex (Ranque's).

1.4 TIPOS DE TUBOS VORTICE ⁴

Los Tubos vórtices se clasifican principalmente por sus características tecnológicas y de diseño: configuración de flujo y método de suministro de calefacción.

TABLA 1. Clasificación del tubo vórtice

METODO	CLASIFICACIÓN
Característica del flujo	<ul style="list-style-type: none"> • Tubo vórtice de flujo paralelo • Tubo vórtice contraflujo
Suministro de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Tubo vórtice no refrigerado • Tubo vórtice refrigerado

FUENTE: A review on design criteria for Vortex Tube

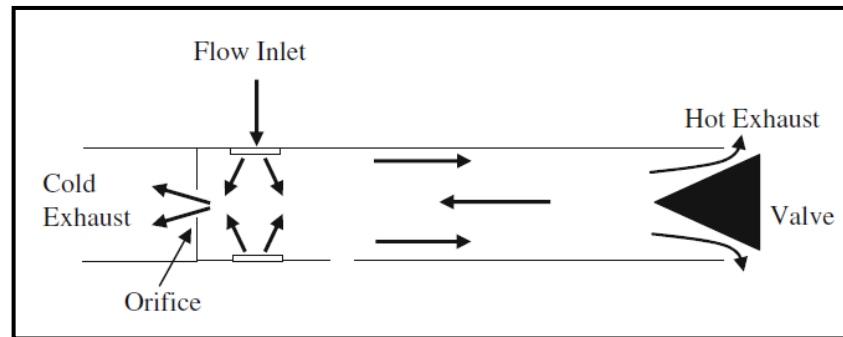
⁴ YILMAZ, M., KAYA, M. A review on desing criteria for Vortex Tube

Para el posicionamiento de los gases de escape frío, hay dos tipos diferentes: los tubos de vórtice contracorriente y tubos de flujo paralelo. Tubos vórtices se clasifican como no refrigerado y refrigerado de acuerdo con el método de suministro de calor.

1.4.1 Tubo vórtice contraflujo

En el tubo vórtice contraflujo los gases de escape en frío se colocan en el otro lado del tubo de escape caliente, como se muestra en la Figura 13.

FIGURA 13. Tubo vórtice contraflujo



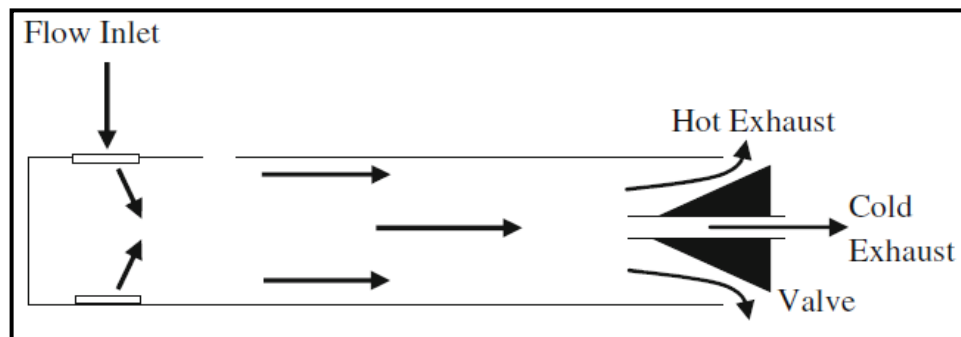
FUENTE: A review on design criteria for Vortex Tube

El gas de trabajo se inyecta tangencialmente en el tubo vórtice a través de boquillas de entrada situados junto a los gases de escape frío. Se crea un flujo fuerte de remolinos a lo largo del tubo. Parte del gas en el tubo vórtice invierte en la componente axial de la velocidad, y se mueve desde el extremo caliente al extremo frío. Un orificio situado justo detrás del flujo de entrada separa el gas central fresco, que luego sale del tubo en el lado izquierdo. El flujo periférico caliente sale en el lado derecho del tubo, donde se coloca una válvula para permitir la regulación de las cantidades relativas de gas caliente y frío.

1.4.2 Tubo vórtice de flujo paralelo

Los aspectos fundamentales de esta configuración son los mismos que para el tubo de contracorriente. Sus características distintivas son que el orificio y la válvula se combinan en un extremo del tubo, mientras que otro extremo del tubo, adyacente a las boquillas de entrada está sellado como se ve en la figura 14. Muchos investigadores han sugerido que los tubos de flujo paralelo rinden menos que los diseños de contraflujo equivalentemente proporcionales. Así, la mayor parte del tiempo, se ha elegido la geometría contracorriente.

FIGURA 14. Tubo vórtice de flujo paralelo



FUENTE: A review on design criteria for Vortex Tube

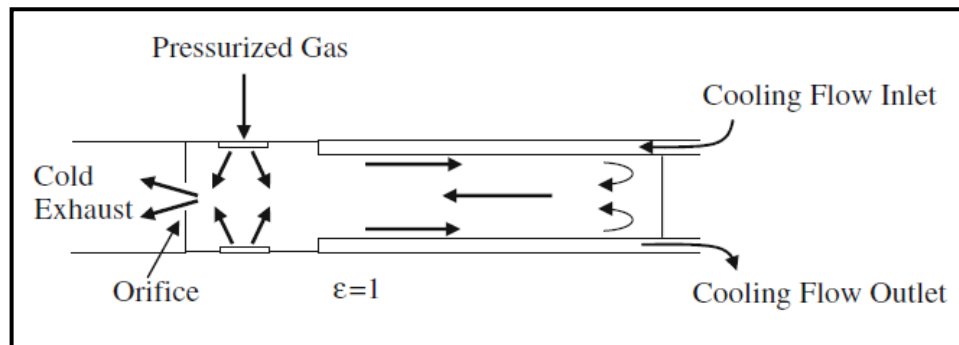
1.4.3 Tubo vórtice no refrigerado

Los tubos de vórtice no refrigerados son los que hacen transferencia de calor con el medio ambiente

1.3.4 Tubo vórtice refrigerado

En los tubos de vórtice refrigerados se produce transferencia de calor desde el fluido caliente a un fluido de enfriamiento. En la Figura 15 se muestra un tubo vórtice refrigerado esquemáticamente. El tubo de vórtice refrigerado está equipado con una camisa exterior que se alimenta de un fluido de refrigeración, y todo el gas que está en la entrada de la boquilla sufre enfriamiento (20-30 K) a través del diafragma de apertura, es decir, en el caso dado $\epsilon = 1$. El tubo vórtice no produce fuertes efectos de enfriamiento. Este modelo se distingue de los demás tubos; sin embargo, es por el poder de enfriamiento máximo, lo que permite que sea utilizado de manera más eficiente a nivel de temperatura más alta en un ciclo combinado de estrangulamiento regenerativo.

FIGURA 15. Tubo vórtice refrigerado



FUENTE: A review on design criteria for Vortex Tube

1.5 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

Para estudiar el funcionamiento de tubo vórtice, es necesario tener claro algunas definiciones:

- **Relación de la tasa de flujo frío (fracción fría):** La relación de la tasa de flujo frío (fracción fría) es el parámetro más importante que indica el rendimiento tubo de vórtice y la separación de temperatura y energía dentro del tubo vórtice. La fracción fría es el porcentaje de aire comprimido de

entrada que se libera a través del extremo frío del tubo. Es la tasa de flujo de gas frío dividido por la tasa de flujo másico del gas de entrada:

$$\mu = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{in}}$$

Donde \dot{m}_c representa la tasa de la corriente fría liberada y \dot{m}_{in} representa la tasa de flujo total de entrada. Por lo tanto, $0 \leq \mu \leq 1$.

- **diferencia de temperatura fría y caliente:** La diferencia de temperatura fría o reducción de temperatura se define como la diferencia de temperatura entre la temperatura del flujo de entrada y la temperatura de flujo en frío:

$$\Delta T_c = T_{in} - T_c$$

Donde T_{in} es la temperatura de flujo de entrada y T_c es la temperatura de flujo en frío. Del mismo modo la diferencia de temperatura caliente se define como:

$$\Delta T_h = T_{in} - T_h$$

- **Temperatura normalizada descenso / ascenso:** La caída de temperatura fría se define como la relación entre la diferencia de temperatura de frío a la entrada de temperatura:

$$\frac{\Delta T_c}{T_{in}} = \frac{(T_c - T_{in})}{T_{in}}$$

Del mismo modo el aumento de la temperatura caliente se define como:

$$\frac{\Delta T_h}{T_{in}} = \frac{(T_h - T_{in})}{T_{in}}$$

1.5.1 Efecto de enfriamiento en un tubo vórtice

El efecto de enfriamiento de un tubo de vórtice se identifica en esta investigación como el resultado de la expansión repentina del fluido de trabajo cerca del puerto de inyección. Cuando se inyecta en el tubo de vórtice, la parte principal de los fluidos gira y se mueve a lo largo de la periferia hacia el extremo caliente del fluido. Cerca del punto de inyección, la parte interior del flujo periférico se vuelve y se mueve hacia la salida fría. Un núcleo frío se forma cerca de la inyección debido al gradiente de presión del vórtice forzado, y la temperatura cae debido a la disminución de la presión del fluido de trabajo en este núcleo frío.

1.5.2 Efecto de calentamiento en un tubo vórtice

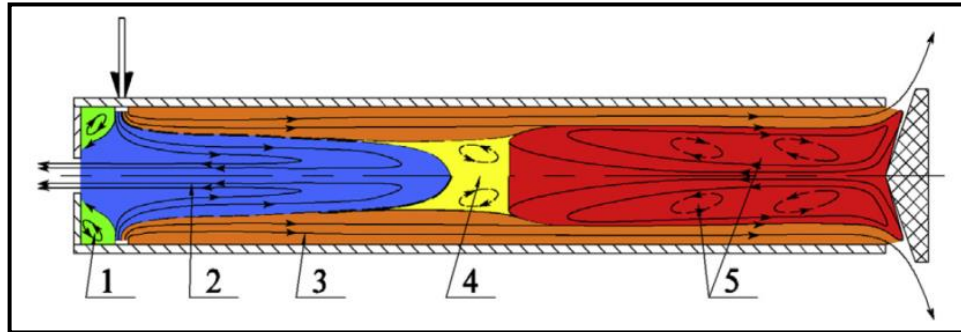
El efecto de calentamiento de un tubo de vórtice podría ser inducido por la transferencia de energía hacia el exterior, incluyendo tanto la energía térmica y cinética, y el estancamiento parcial del flujo de turbulencia. El estancamiento parcial y mezcla debido a la estructura de flujo situado cerca del extremo caliente, contribuye significativamente a la elevación de la temperatura en un tubo de vórtice.

1.5.3 Principio de funcionamiento del tubo vórtice en relación al flujo⁵

El principio de funcionamiento de un tubo de vórtice en relación de flujo de masa fría variable, que se controla generalmente mediante el ajuste de la válvula del extremo caliente, se discute a continuación. Para realizar un análisis preciso del proceso de trabajo dentro de un tubo de vórtice, el patrón de flujo se divide en varias regiones.

⁵ YUNPENG X. The working principle of a vortex tube.

FIGURA 16. Patrón de flujo dentro del tubo vórtice



Fuente: The working principle of a vortex tube

Como se muestra en la figura 16, se divide en los vórtices en la esquina del tubo (1), el núcleo frío (2), el flujo periférico (3), la mezcla y separación (4), y la región caliente o región multi-circulación (5).

Los vórtices (1) en la esquina del tubo son inducidas por el fluido inyectado y se pueden notar como la circulación secundaria cuando la salida del lado frío es pequeña (Ahlborn y Groves, 1997). Cuando la salida de frío del tubo de vórtice es mayor que un valor crítico (es decir, $d_c / D = 0,58$) todo el flujo que se mueve al extremo frío se agotará en esa salida y no habrá flujo obligado nuevo para formar los vórtices en la esquina.

La región de núcleo frío (2), se localiza cerca del punto de inyección, y es la región donde se produce la expansión y la temperatura cae debido al gradiente de presión del vórtice forzado. La temperatura mínima dentro de un tubo vórtice se encuentra siempre en la parte central del núcleo frío frente al puerto de inyección. El tamaño del núcleo frío varía en el tubo vórtice con diferentes parámetros experimentales.

El flujo periférico (3), es el flujo que se mueve en la capa periférica y escapa de la salida de calor. Se mezcla con las múltiples circulaciones y abandona el tubo a

una temperatura superior debido a la transformación de la energía cinética del flujo periférico.

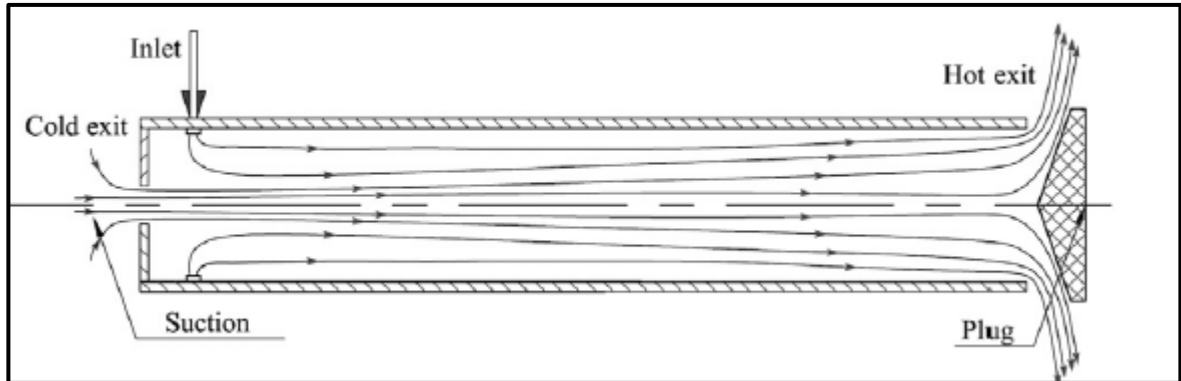
La región de mezclado y de separación (4) se puede encontrar entre el flujo que regresa por el núcleo frío, y el flujo que regresa de la multi-circulación. Esta región asegura el mejor rendimiento de un tubo vórtice ideal al impedir la mezcla de regiones de flujo en frío y en caliente. En un tubo vórtice, que no está diseñado correctamente, la mezcla y la región de separación del flujo respectivo no están bien delineados, y por lo tanto, esto conduce a una reducción en el rendimiento de separación. Debido a la complejidad de la condición de flujo, no ha habido ningún análisis teórico del patrón de flujo en esta región.

La multi-circulación (5) se localiza cerca del extremo caliente y hace un aumento de la temperatura del fluido de trabajo en el proceso de estancamiento y la mezcla con el flujo periférico. Para un tubo de vórtice con pequeña salida caliente, la parte central de la región de multi-circulación puede avanzar hacia el extremo frío a través de la región de mezcla (4) y mezclar con el flujo en frío en la región de núcleo frío (2). Por lo tanto, la caída de temperatura del flujo en frío se reduce en esta mezcla.

Cuando la salida de calor de un tubo de vórtice es relativamente grande, no habrá ningún flujo forzado de nuevo. En su lugar, todo el flujo inyectado escapa de la salida caliente. Debido al fuerte flujo de turbulencia, se formará una región de baja presión en la parte central del tubo cerca de la salida fría, y una reducción de la extensión de la caída de temperatura. Por lo tanto, la entrada de aire ambiente en el tubo de vórtice a través de la salida de frío por succión, puede ocurrir y puede conducir a más fluido desde el extremo caliente que se agota de la inyección como se observa en la figura 17. La temperatura del gas agotado mostrará un pequeño aumento debido a la mezcla y al efecto de la fricción, se debilitó tanto por la caída

de temperatura cerca del punto de inyección y la entrada de aire ambiente por succión. El flujo dentro del tubo actuará como un vórtice forzado y la decadencia hacia al extremo caliente.

FIGURA 17. Estructura de flujo cuando la salida de calor es grande



Fuente: The working principle of a vortex tube

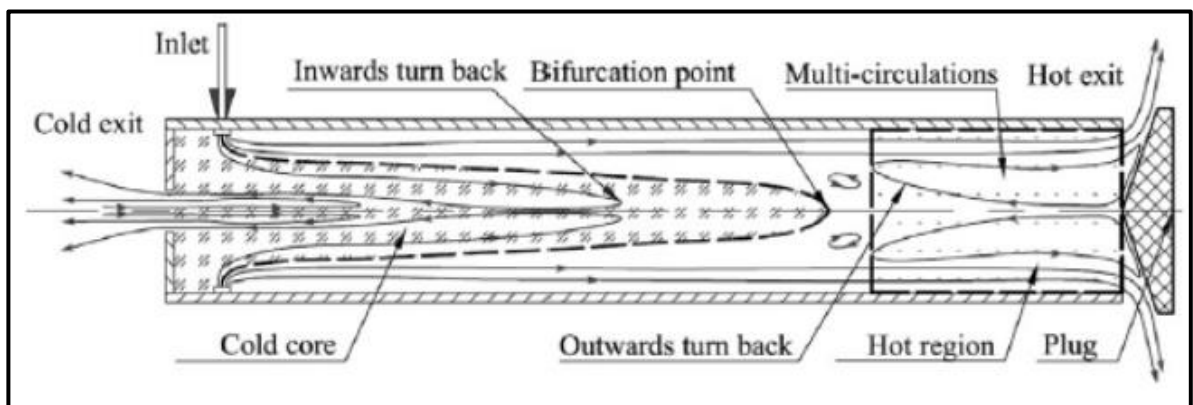
Como se muestra en la Figura 17, el comportamiento del flujo en un tubo de vórtice con una gran salida caliente, muestra que sólo el flujo periférico (3) en el tubo vórtice, así como el aire ambiente aspirado que se mueve a lo largo del centro existen bajo esta condición.

Cuando se reduce el área de la salida caliente, habrá algo de gas que se escapa de la salida de frío y, como resultado, menos hojas de gas desde el extremo caliente. Parte del flujo periférico será forzado hacia atrás por la multi-circulación (5) con la pequeña escala será formado.

Se observó una transformación de vórtice forzado en el extremo frío al vórtice rotacional en el extremo caliente y un estancamiento parcial y mezcla debido a esta pequeña escala de múltiple circulación, provocando un aumento de la temperatura de este flujo, aunque la temperatura en esta región es más baja que la temperatura máxima generada por el tubo de vórtice.

El flujo interno comienza a girar de nuevo a causa de la obstrucción por la multi-circulación. Temperaturas bajas en el núcleo frío (2) son causadas por el gradiente de presión en el tubo, aunque puede haber algunos flujos de aire ambiente de aspiración, lo que reduce la caída de temperatura a la salida fría, dependiendo de las dimensiones de las salidas frías y calientes (ver figura 18). El tubo de vórtice bajo esta condición podría generar corrientes frías y calientes.

FIGURA 18 Estructura de flujo cuando la salida de calor esta semi ajustada



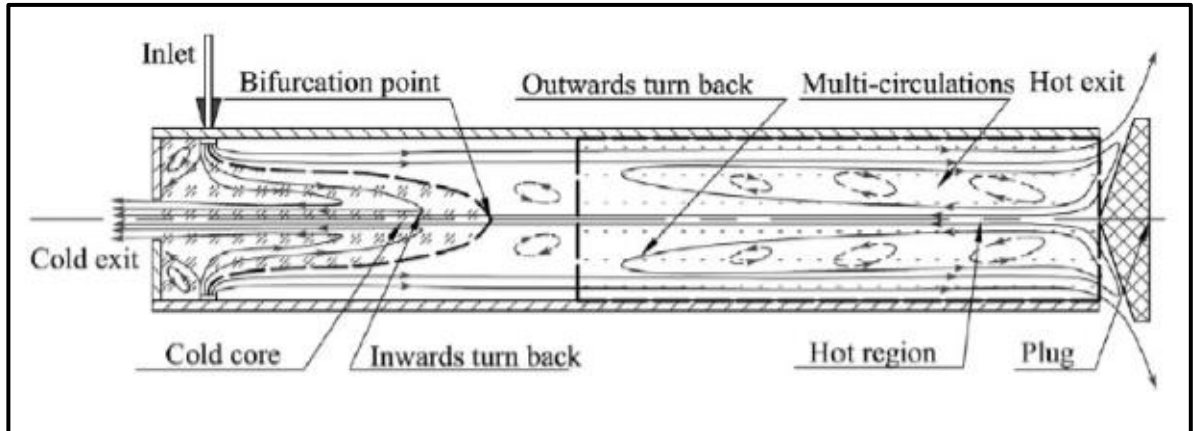
Fuente: The working principle of a vortex tube

Una vez que la salida de calor se reduce aún más, la corriente fría será mayor y que la corriente caliente las que abanarán el tubo de vórtice. En cierta proporción de flujo de masa fría, la presión en la salida de frío se hace mayor que la presión ambiente; por lo tanto, ya no se observó succión en la salida de frío. La temperatura del flujo de interior se reduce debido al gradiente de presión, además representa la temperatura mínima dentro del tubo de vórtice, y es el resultado del volumen máximo del núcleo frío, sin mezclar el aire ambiente o la corriente caliente.

Al mismo tiempo, la temperatura del flujo caliente aumenta debido a la mayor escala de la multi-circulación, lo que refuerza el efecto de estancamiento y la

mezcla parcial. Si la relación de flujo de masa fría sigue aumentando, produce un aumento asociado a la circulación múltiple (5) y se esperaría una disminución de la región del núcleo fría (2) (figura 19).

FIGURA 19. Estructura de flujo cuando la salida de calor está ajustada

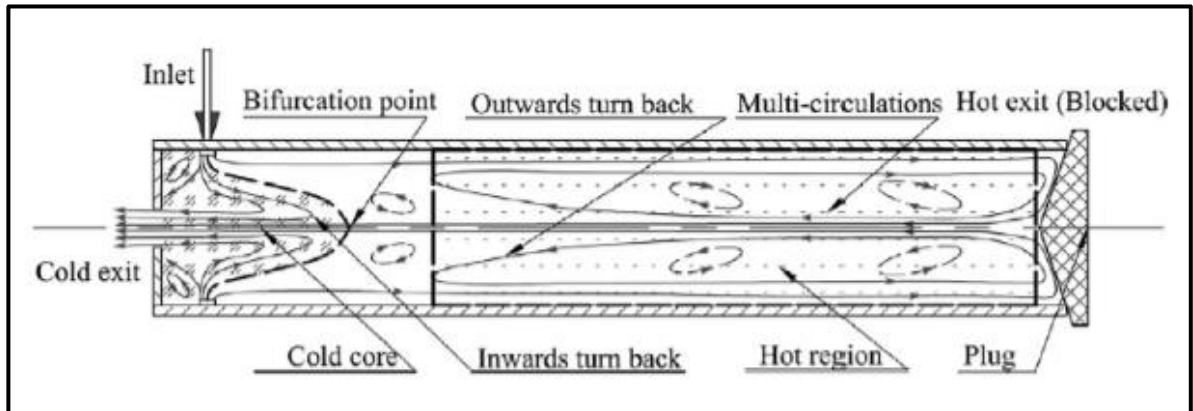


Fuente: The working principle of a vortex tube

Por lo tanto, debido a la región más pequeña para la expansión y más gas en la región fría, se reduciría la caída de temperatura de la corriente fría. Como resultado, el efecto de estancamiento y la mezcla parcial, es reforzada por el aumento de la escala de la multi-circulación, lo que conduce al aumento de la temperatura de la corriente caliente. Además, debido a que la zona de salida caliente ha disminuido, más gas será forzado hacia atrás por la válvula y, posteriormente, se mueve al extremo frío a lo largo de la parte central del tubo.

Cuando la salida caliente de un tubo de vórtice está bloqueada, deja que todo el gas inyectado salga por la boquilla de frío, es decir, la relación de flujo de masa fría es igual a 1, y la estructura del flujo en el tubo de vórtice está representado en la Figura 20.

FIGURA 20. Estructura de flujo cuando la salida de calor está cerrada



Fuente: The working principle of a vortex tube

Se ve que la parte principal del gas inyectado se expandió en el núcleo frío y abandona por la salida de frío. En tal condición, parte del flujo periférico entonces se mueve al extremo caliente y forma la estructura de multi-circulación en la parte posterior del tubo.

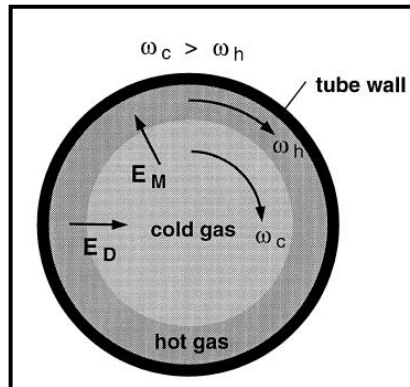
Por lo tanto, la temperatura del flujo en la parte posterior del tubo todavía aumenta debido al estancamiento parcial y mezcla en la región de multi-circulación, que se indica por la temperatura medida de la pared del tubo en el extremo caliente. Arjomandi y Yunpeng (2007) informaron, que la temperatura de la pared del tubo en el extremo caliente tuvo un ascenso de 14 centígrados cuando la salida caliente estaba bloqueada. Como la región del núcleo en frío disminuyó y la cantidad de la corriente de expansión aumenta, la caída de temperatura cerca de la inyección no era obvia como en el tubo de vórtice con otros ajustes.

La mezcla de la corriente de alta temperatura procedente de la región multi-circulación reduce aún más la caída de temperatura, que fue reportado como una disminución de 3,2 grado centígrado en la salida de frío.

1.5.4 Transporte de energía mecánica⁶

Para la formación de las diferencias de temperatura sustanciales en el tubo de vórtice es responsable un intercambio de energía entre el gas frío y caliente. La disminución de la temperatura debido a la expansión es comparable a los de una turbina. Aunque en el tubo de vórtice no hay paredes giratorias, hay rotación de capas de fluido en intercambio de energía mecánica por fricción. Un modelo de este mecanismo está representado en la figura 21. El gas frío expansión radial aumenta su velocidad angular ω_c , las capas interiores giran más rápido que los exteriores. Los esfuerzos de corte producen un flujo de energía mecánica dirigida hacia el exterior E_M . El gas caliente recibe esta energía, que disipa predominantemente alrededor de la capa límite de la pared del tubo. El flujo de energía difusa E_D sin embargo se dirige hacia el interior.

FIGURA 21. Representación esquemática de los flujos de energía radiales en el tubo vórtice



Fuente: Numerical investigations of the compressible flow and the energy separation in the Ranque_Hilsch vortex tube

El esfuerzo de corte esencial

⁶ FRÖHLINGSDORF W. Y UNGER H. Numerical investigations of the compressible flow and the energy separation in the Ranque_Hilsch vortex tube.

$$\tau_{r\theta} = -\mu r \frac{\partial \omega}{\partial r} = -\mu \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right)$$

En el flujo de vórtice está dirigida tangencialmente y es producido por capas de fluido que giran con diferentes velocidades angulares. Si se supone que el flujo en el tubo de vórtice para ser simétrico al eje, la $\tau_{r\theta}$ tensión de cizallamiento provoca que el diferencial de flujo de trabajo mecánico sea:

$$dE_M = v_\theta \tau_{r\theta} dA_r = -\mu \left(\omega r^2 \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) dA_r$$

Se transfiere a través de la superficie diferencial dA_r del cilindro con el radio r y la longitud dz . El flujo de trabajo mecánico E_M , dirigido radialmente hacia el exterior, está parcialmente compensado por el flujo difusivo E_D , energía dirigida radialmente hacia el interior.

1.5.5 Viscosidad y turbulencia⁷

El proceso físico del flujo de aire en el interior del tubo de vórtice puede ser descrito mediante el uso de distribución de la velocidad, que ha sido estudiado por muchos investigadores. Explicaciones de la separación de temperatura en el tubo de vórtice se han formado sobre la base de la descripción de la estructura de flujo. La viscosidad y la turbulencia que participan en estas hipótesis se consideraron como las razones de la separación de temperatura.

Una investigación realizada por Fulton, mostró que la velocidad tangencial de la capa periférica fue menor que la de la capa interior a la entrada del tubo, lo que

⁷ YUNPENG X. A critical review of temperature separation in a vortex tube.

significa que se estaba formando un vórtice libre. Debido a la tensión de cizalladura entre las diferentes capas, el flujo periférico lento fue acelerado por el flujo interior, mientras que el flujo interno se desaceleró. En este proceso, la energía cinética se transfiere desde la capa interna a la capa externa por la fricción interna. El aumento de temperatura se produjo porque la energía transferida al flujo periférico, y la energía adicional transportada por la turbulencia entre las dos capas ayudaron a la formación de gradiente de temperatura en el tubo de vórtice. Se indica en una explicación similar que en la conversión " a un vórtice forzado ", el momento angular se transfiere hacia el exterior por la fricción interna entre las capas interior y exterior y el transporte de la energía cinética que se considera como la razón de la separación de energía.

El concepto del efecto de fricción y la turbulencia interior está apoyado por numerosos estudios experimentales, teóricos y numéricos realizados por otros investigadores. Algunas de las explicaciones se basan en la fricción viscosa entre el fluido de trabajo y la pared del tubo.

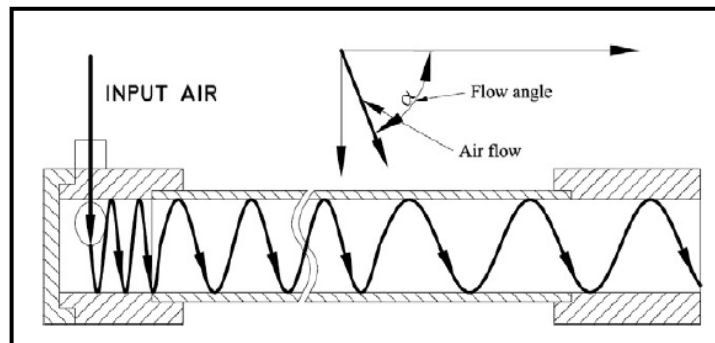
Se ha sugerido que el calor generado por la fricción entre la pared del tubo y el flujo de aire convierte la energía cinética en energía térmica, lo que hace que el aumento de la temperatura. Sin embargo, la influencia de la fricción entre el flujo de aire y la pared del tubo puede calcularse aproximadamente por las siguientes ecuaciones. El flujo de vórtice dentro del tubo se puede simular como el flujo sobre una superficie helicoidal o un tubo de flujo turbulento (Figura 22). Por lo tanto, en caso de flujo libre sobre la superficie helicoidal, la fuerza de arrastre a lo largo de la superficie cuando $5 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^7$ se puede calcular por:

$$F_D = C_{Df} \frac{\rho U^2}{2} BL$$

Donde, C_{Df} es total el coeficiente de rozamiento, L y B representan la longitud y la anchura de la superficie respectivamente.

$$C_{Df} = \frac{0.074}{Re^{1/5}}$$

FIGURA 22. Simulación del flujo dentro del tubo vórtice



Fuente: A critical review of temperature separation in a vortex tube

En el caso de la tubería de flujo turbulento, cuando $5 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^7$, la tensión de cizallamiento en la tubería se puede calcular utilizando diferentes métodos:

- (i) El esfuerzo cortante en una placa plana en un flujo turbulento ,

$$\tau_0 = C_f \frac{\rho U^2}{2}$$

Donde el C_f es el coeficiente de esfuerzo de corte local

$$C_f = \frac{0.059}{Re^{1/5}}$$

(ii) El esfuerzo cortante en el flujo de la tubería turbulento en tuberías lisas

$$\tau_0 = \frac{f \rho U^2}{4} \frac{1}{2}$$

Donde f es el factor de fricción. $f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}$

El cambio de temperatura debido a la fricción entre el flujo de aire y la pared, se puede calcular como:

$$\dot{Q} = F_D * V = \dot{m} * c_p * \Delta T$$

Donde F es la fricción viscosa, V es la velocidad, c_p es el calor específico del aire y ΔT es el cambio de temperatura del flujo de aire.

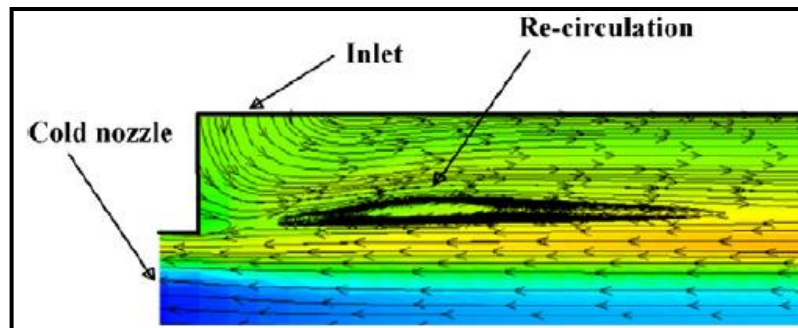
Cálculos basados en las figuras geométricas de los dispositivos experimentales pueden ser considerados como una predicción precisa del cambio de temperatura debido a la fricción viscosa entre el flujo de aire y la pared. Se muestra que el aumento de temperatura en caso de flujo turbulento sobre una superficie helicoidal es 1,4 o 1,7 K. La suposición de flujo turbulento tubería dar un 1,8 K de aumento de la temperatura. Todos los cálculos muestran que el aumento de temperatura debido a la fricción entre el flujo de aire y la pared no es suficiente para formar el gradiente de temperatura en un tubo de vórtice que tiene típicamente un aumento de temperatura de alrededor de 30-100 K. Cuando el ángulo de vórtice se cambia de 2° a 20°, aumento de la temperatura calculada del aire caliente es de aproximadamente 5-8 K. Sin embargo, el cambio de temperatura basado en la hipótesis de fricción solamente, da un cambio de temperatura de 0,2 K, que no se puede utilizar para explicar la influencia del ángulo de vórtice.

La operación exitosa de los diferentes tubos de vórtices (longitud de 20 mm a 2586 mm) y pequeñas diferencias entre las temperaturas de aire caliente (menos de 10 K) también muestran que la fricción entre el aire y la pared no es un contribuyente importante a el aumento de temperatura.

1.5.6 Circulación secundaria⁸

En la investigación del tubo de vórtice contra-flujo, era evidente que la proporción de aire frío forzado a volver por el tapón de extremo caliente era mayor que la proporción de aire frío agotado de la boquilla frío. Por lo tanto, parte del aire frío que es forzado hacia atrás por el enchufe debe volver al extremo caliente, formando de este modo la circulación secundaria (o re-circulación) como se ve en la figura 23.

FIGURA 23. Simulación de una circulación secundaria en un tubo vórtice



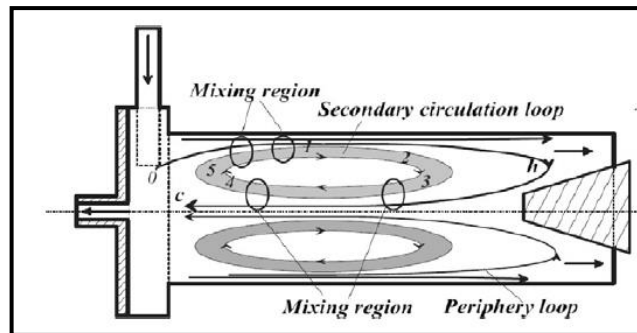
Fuente: A critical review of temperature separation in a vortex tube

El efecto de la circulación secundaria en la separación de temperatura en un tubo vórtice fue investigado experimentalmente y teóricamente por muchos investigadores. Se sugirió que la circulación secundaria en el tubo forma un ciclo de refrigeración clásico que transfiere la energía térmica del flujo interior para el flujo exterior. La energía térmica fue absorbida por la circulación secundaria a lo

⁸ YUNPENG X. A critical review of temperature separation in a vortex tube.

largo de la línea central en el camino de regreso al extremo frío y se transfiere al flujo periférico cuando pasó con el flujo primario al extremo caliente. De esta manera, la temperatura de la capa exterior aumenta y la temperatura del flujo del núcleo se redujo.

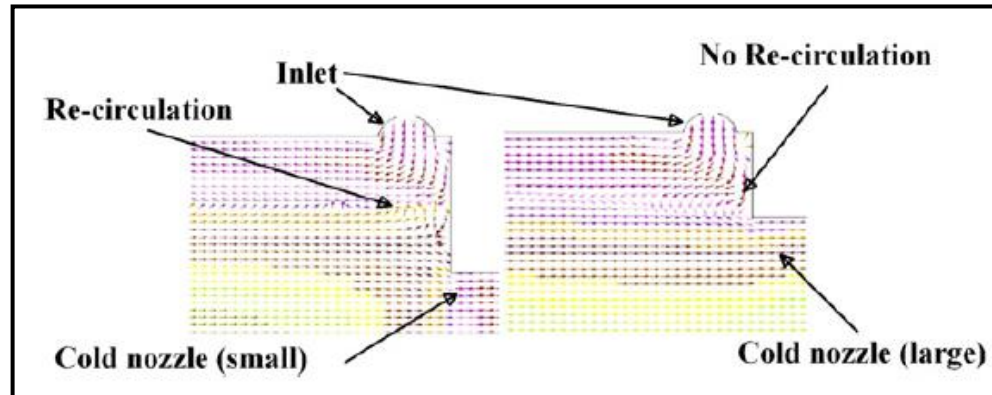
FIGURA 24. Proceso de funcionamiento de una circulación secundaria



Fuente: A critical review of temperature separation in a vortex tube

Sin embargo, la existencia del flujo secundario en tubos de vórtice no ha sido apoyada por todos los investigadores. Una investigación numérica del tubo de vórtice indicó que el flujo secundario podría formarse cuando el tamaño de la boquilla frío era lo suficientemente pequeño. Cuando se aumenta el diámetro de la pantalla fría, la circulación secundaria vuelve más débil y desaparece completamente cuando la relación del diámetro de extremo frío y el diámetro del tubo es de 0,58 (es decir, $d_c / d_t = 0,58$, donde d_c es el diámetro de la boquilla frío y D es el diámetro del tubo de principal). Dado que el modelo de flujo secundario se desarrolló sobre la base de un único tubo de vórtice, que tenía una boquilla pequeña fría ($d_c / d_t = 0,323$), se limita a esta geometría específica del tubo. Los patrones de flujo que demuestran la relación entre el tamaño de la boquilla frío y el flujo secundario se muestran en la Figura 25.

FIGURA 25. Patrón de flujo cerca de la boquilla en el tubo vórtice



Fuente: A critical review of temperature separation in a vortex tube

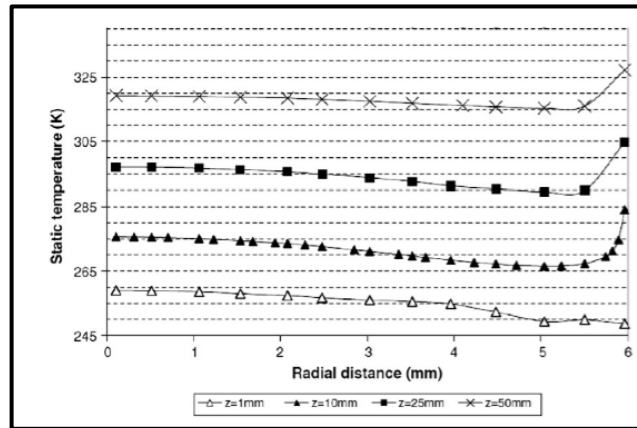
La circulación secundaria en un tubo de vórtice de flujo paralelo no se ha investigado todavía, así que la existencia y la influencia del flujo secundario en un tubo vórtice como tal todavía no está claro.

1.5.3 Gradiente de temperatura estática⁹

En la exploración de la separación total de la temperatura, el gradiente de temperatura estática también se investigó y se expresa como una de las razones para la separación de temperatura. La transferencia de calor por convección forzada desde el núcleo a la capa exterior en el tubo de vórtice fue simulado como la transferencia de calor en un sistema de doble tubo. El "conductor" de la transferencia de calor desde el núcleo a la capa exterior se informó como el gradiente de temperatura estática, que era pequeña y no uniforme a través de estaciones axiales.

⁹ YUNPENG X. A critical review of temperature separation in a vortex tube.

FIGURA 26.Distribución de la temperatura estática en dirección radial (experimentación 1)

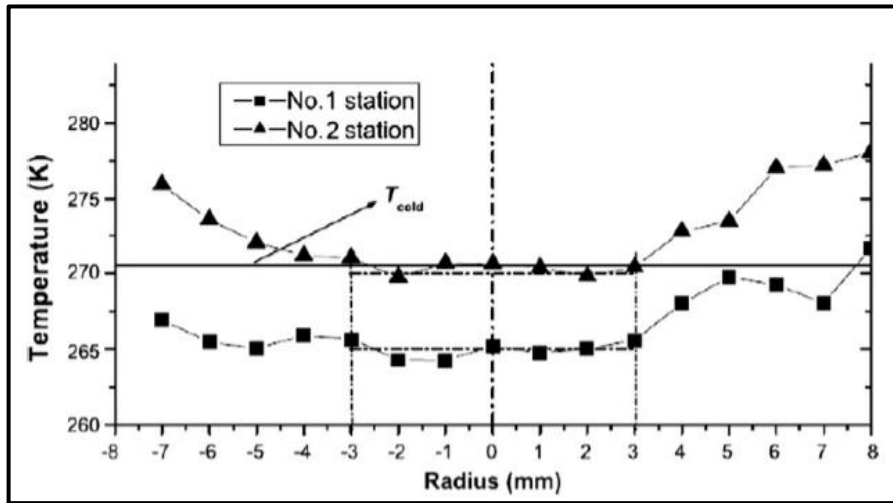


Fuente: A critical review of temperature separation in a vortex tube

La figura 26, muestra la distribución de temperatura estática como una función del radio a lo largo del tubo, y $z = 1, 10, 20, 50$ mm presentes, las ubicaciones axiales en 1, 10, 20, y 50 mm desde la inyección de un tubo vórtice de 350 mm. Se puede observar que la temperatura estática disminuye radialmente cerca de la entrada, lo que significa que el flujo interior tiene una temperatura mayor que el flujo periférico, excepto en la capa de la pared límite. Se propone que este gradiente de temperatura estática aumenta la transferencia de calor desde el núcleo al flujo exterior y resulta en la separación total de la temperatura.

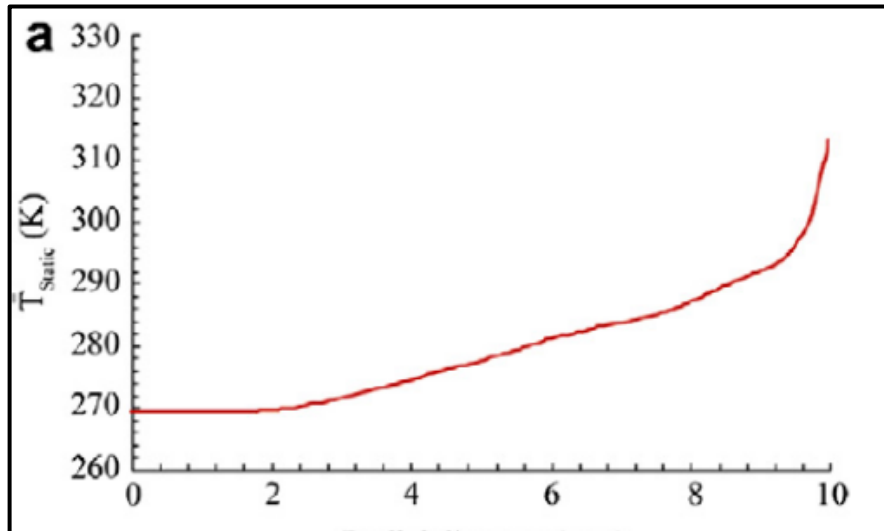
La distribución de la temperatura estática también fue estudiado por otros investigadores que ofrecieron diferentes dictámenes, mostrados en la figura 27; donde se observa una distribución de la temperatura estática diferente de una investigación experimental, lo que indica aumentos de la temperatura estática hacia la pared (estación No. 1 y la estación No. 2 presente las ubicaciones axiales de la medición son 24 mm y 48 mm de la inyección de un tubo de vórtice 205 mm).

FIGURA 27. Distribución de la temperatura estática en dirección radial (experimentación 2)



Fuente: A critical review of temperature separation in a vortex tube

FIGURA 28. Predicción de la temperatura estática en Large Eddy simulation



Fuente: A critical review of temperature separation in a vortex tube

La figura 28, muestra la predicción de la temperatura estática cerca de la entrada en Large Eddy simulation, en el que se encontró una distribución de la temperatura estática similar. Por lo tanto, la transferencia de calor desde la capa exterior a la capa interior tiene influencia negativa sobre el efecto Ranque. La

Complejidad del flujo en el interior es evidente, y se requiere de ideas contradictorias sobre la distribución de la temperatura estática y aclaración del gradiente de temperatura estática para futuras investigaciones.

1.5.7 Discusión de la separación de temperatura¹⁰

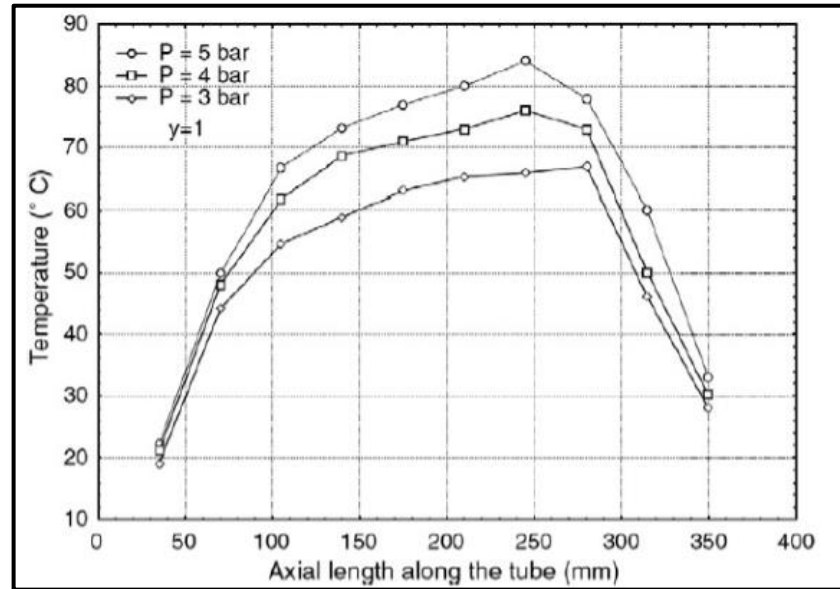
La separación de temperatura en un tubo vórtice puede ser estudiada teniendo en cuenta dos factores: el descenso de la temperatura y de aumento de temperatura. La caída de temperatura en un tubo de vórtice puede ser considerado como los efectos de la combinación de la expansión repentina cerca de la entrada, la energía transferida hacia el exterior debido a la fricción interna y la turbulencia, el flujo secundario y el gradiente de temperatura estática. El aumento de temperatura puede ser considerado como el resultado de la compresión en la periferia, gradiente de temperatura estática, energía transferida debido a la fricción entre las capas turbulentas, la fricción entre el flujo de aire y la pared y la circulación secundaria. De acuerdo con los resultados experimentales, la caída de temperatura para un tubo conocido debido a la expansión tiene una gran contribución a la caída total de temperatura en un tubo de vórtice.

Discusión del flujo secundario indica que la mejora del rendimiento del tubo debido al flujo secundario se puede esperar cuando la boquilla frío es pequeña. La diferencia de temperatura se indica en el gradiente de temperatura estática, que es de alrededor de 5-10 k, también sugiere que el gradiente de temperatura estática no puede ser considerada como el factor determinante en la caída de temperatura. Influencia de la fricción interna y la turbulencia no puede ser evaluada directamente debido a la complejidad de la estructura de flujo y los parámetros geométricos. Por lo tanto, la expansión súbita puede esperarse que

¹⁰ YUNPENG X. A critical review of temperature separation in a vortex tube.

sea el papel más importante en el descenso de la temperatura, y se requiere más investigación para aclaraciones de estos factores.

FIGURA 29. Distribución de temperatura a lo largo del tubo vórtice



Fuente: A critical review of temperature separation in a vortex tube

La compresión en la periferia no se puede considerar como la fuente de la elevación de temperatura. La evaluación aproximada de la fricción también demuestra que el aumento de la temperatura no es el resultado de la fricción entre el flujo de aire y la pared del tubo. Los papeles de la fricción interna y la turbulencia entre las diferentes capas dentro del tubo no se entienden claramente y se requieren más mediciones de aclaración. La hipótesis es que la multicirculación puede formarse cerca de la salida y ayuda a la subida de la temperatura cerca de la salida a través de una mayor fricción del fluido. Y esto puede ser apoyado por la distribución de temperatura de la pared que se observa en la Figura 29, que tiene un valor de pico cerca de la salida de calor.

1.5.8 Límites de la separación de temperatura (según Ahlborn)¹¹

Se crea la hipótesis de que el calentamiento y enfriamiento se unen en la disminución y aumento de la energía cinética en el fluido de trabajo. En las investigaciones mostraron esto mediante el cálculo de los límites de las temperaturas extremas calientes y frías con respecto a las presiones de entrada y de salida. Esto se hizo simplemente a través de los balances energéticos del extremo caliente y el extremo frío del tubo.

La ecuación de la energía para el componente caliente está dada por:

$$h_h = h_{in} + \frac{1}{2}u_{in}^2 + q_h$$

Donde h_h es la entalpía del componente caliente en la salida, h_{in} y u_{in} representan la entalpía y la velocidad en la entrada respectivamente. El límite superior de la temperatura caliente como una función de los parámetros libres p_{in} y p_c (presión de entrada y presión de salida en frío) se encuentra que es

$$\frac{T_h - T_{in}}{T_{in}} \leq \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{p_{in} - p_c}{p_{in}}$$

Este límite de temperatura se reduce por las pérdidas de calor q_h , así como por la disipación insuficiente de la velocidad de remolino.

Para el componente frío, el balance energético es

$$h_c + \frac{1}{2}(u_{c\phi}^2 + u_{cz}^2) = h_o + \frac{1}{2}u_{in}^2 - q_c$$

¹¹ VERA, Giorgio. The Ranque-Hilsch Vortex Tube. 2010

Dónde $u_{c\phi}$ y u_{cz} son los componentes azimutales y axiales de la velocidad en la salida de frío. Al asumir que la pérdida de calor $q_c = 0$ y $u_{c\phi}^2 \approx u_{in}^2$. El balance de energía se reduce a:

$$h_c + \frac{1}{2}u_{cz}^2 \approx h_{in}$$

En consecuencia, la caída de temperatura en el componente frío puede estar vinculada a los parámetros libres p_h y p_c .

$$\frac{T_{in} - T_c}{T_c} \approx \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \frac{p_h - p_c}{p_c}$$

En la ecuación anterior se muestra la relación entre la energía y la dinámica del tubo de vórtice. La caída de presión axial provoca la aceleración en el componente frío, por lo que la energía cinética crece. Sin embargo, este aumento en energía cinética implica que entalpía se disminuye, lo que implica el enfriamiento.

1.5.9 Termodinámica del tubo vórtice¹²

Cuando se inicia en la tecnología de tubo de vórtice, pareciera que ha habido una violación de las leyes de la termodinámica. Parecería que hay un flujo de calor interno sin ninguna entrada de trabajo. Como en cualquier proceso de refrigeración, el trabajo de entrada es de suma importancia para su funcionamiento. En esto radica el fondo de la cuestión, y la búsqueda de casi un siglo para entender completamente el funcionamiento del tubo.

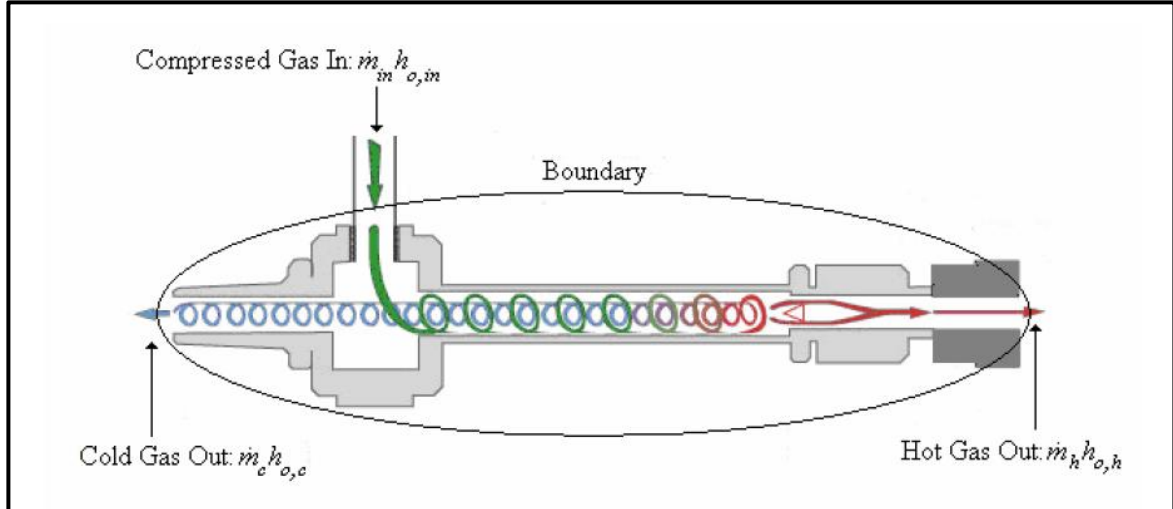
¹² OLIVER, Ronan. Numerical prediction of primary and secondary flows in a Ranque-Hilsch vortex tube.

La primera ley de la termodinámica se puede escribir de la siguiente manera, “Cuando un sistema experimenta un ciclo termodinámico, entonces el calor neto suministrado a los alrededores, además de la entrada de trabajo al sistema es igual a cero”. Matemáticamente esta declaración se escribe como:

$$\sum Q + \sum W = 0$$

Donde Q y W denotan el calor suministrado y trabajos de entrada al sistema, respectivamente. A partir de esta primera ley la ecuación de energía de flujo constante se puede aplicar a los límites del tubo vórtice como se muestra en la Figura 30.

FIGURA 30. Límites del sistema aplicados al tubo vórtice



Fuente: Numerical prediction of primary and secondary flows in a Ranque-Hilsch vortex tube. Resultando en una ecuación de la siguiente forma:

$$\dot{m}_{in} \left(h_{s,in} + \frac{U_{in}^2}{2} + Z_{in} \right) + \dot{Q} + \dot{W} = \dot{m}_c \left(h_{s,c} + \frac{U_c^2}{2} + Z_c \right) + \dot{m}_h \left(h_{s,h} + \frac{U_h^2}{2} + Z_h \right)$$

Donde \dot{m} , h_o , h_s , U , Z , \dot{Q} y \dot{W} denotan la tasa de flujo de masa, la entalpía total, la entalpía estática, el vector de velocidad, la altura sobre referencia, el índice de entradas de calor y trabajo suministrados respectivamente, y los subíndices en, c y h denotan la entrada, salidas frías y calientes respectivamente.

Mediante el uso de la eliminación simple de algunos términos iguales e insignificantes, la ecuación de energía de flujo se reduce a una ecuación de mezcla adiabática inversa con el uso de los siguientes pasos:

1. Combinar entalpías estáticas y energías cinéticas en entalpía total.
2. Reconociendo que las energías potenciales en cada punto son aproximadamente los mismos.
3. No hay calor o trabajo de entrada.

La ecuación de mezcla adiabática es la siguiente, y muestra que el tubo vórtice en efecto, satisface la primera ley, como la energía se conserva:

$$\dot{m}_{in}h_{o,in} = \dot{m}_c h_{o,c} + \dot{m}_h h_{o,h}$$

Esto se puede reducir aún más mediante la introducción de la relación utilizada para describir las relaciones de flujos de gas frío y caliente, en comparación con el flujo de gas suministrado

$$\mu = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{in}}$$

Al dividir por \dot{m}_{in}

$$h_{o,in} = \mu h_{o,c} + (1 - \mu)h_{o,h}$$

Si el gas que fluye a través del tubo vórtice se trata aproximadamente como un gas ideal y los cambios en la energía cinética se descuidan, se puede escribir la ecuación de conservación anterior de la siguiente manera.

$$c_p T_{o,in} = \mu_c c_p T_{o,c} + (1 - \mu_c) c_p T_{o,h}$$

Donde c_p y T_o son la capacidad de calor específico a presión constante y la temperatura total, respectivamente. Dividiendo a través de c_p , se obtiene:

$$T_{o,in} = \mu_c T_{o,c} + (1 - \mu_c) T_{o,h}$$

Resulta en una ecuación de balance de energía bastante simplista, se ilustra claramente que cuando se considera como un sistema con límites del tubo vórtice, en efecto satisface las reglas termodinámicas básicas.

1.5.10 Dinámica de Fluidos del tubo vórtice¹³

En un tubo vórtice, un fluido a alta presión, aire comprimido, principalmente, entra en el tubo y pasa a través de boquillas que logran una velocidad angular alta, causando un flujo de tipo vórtice. Hay dos salidas hacia el tubo: la salida de flujo caliente se coloca en el extremo lejos de las boquillas de entrada y la salida de frío se coloca en el extremo cerca de las boquillas de la entrada de aire.

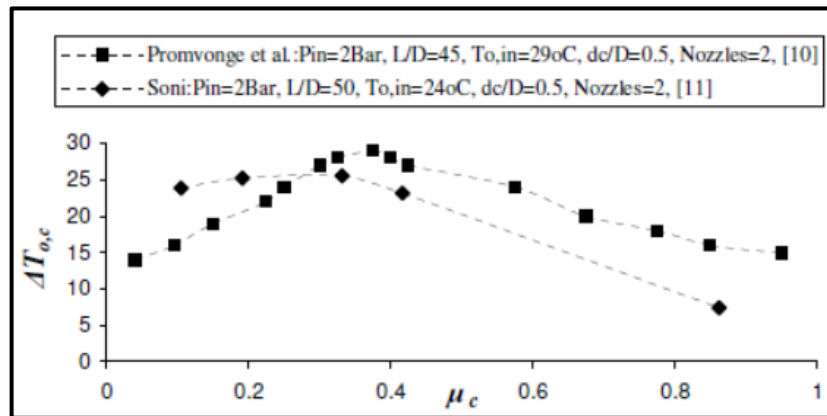
Mediante el ajuste de la válvula de control, es posible variar la fracción del flujo entrante que sale a través de la salida de caliente en la periferia del tubo. Mediante la variación de la fracción fría, la caída total de temperatura de salida fría

¹³ OLIVER, Ronan. Numerical prediction of primary and secondary flows in a Ranque-Hilsch vortex tube.

se puede ajustar en consecuencia, como puede verse por ejemplo en los resultados experimentales en la Figura 31.

$$\Delta T_{o,c} = T_{o,in} - T_{o,c}$$

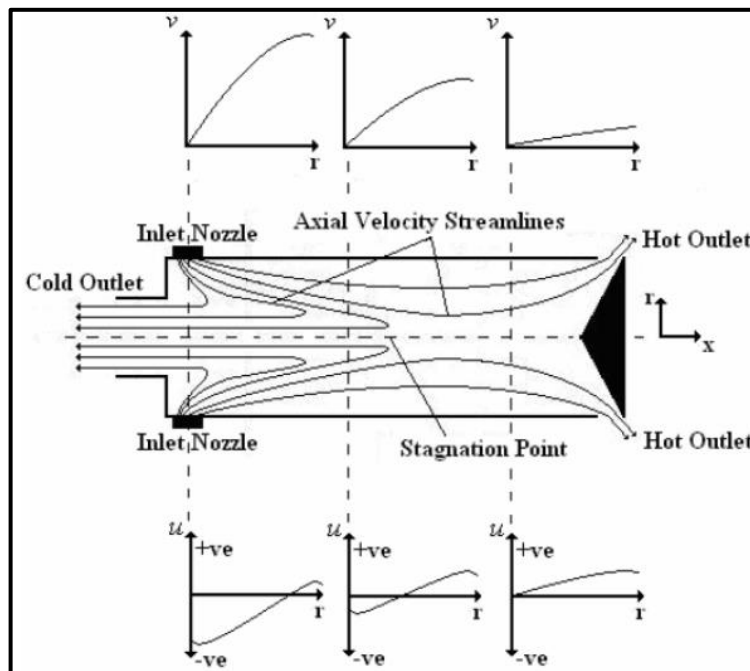
FIGURA 31. Variación de $\Delta T_{o,c}$ respecto a μ_c para un tubo vórtice específico.



Fuente: Numerical prediction of primary and secondary flows in a Ranque-Hilsch vortex tube.

Donde los términos p_{in} , $T_{o,in}$, L , d_c , y D , denotan medidor de presión estática, la temperatura total en el de entrada, la longitud del tubo vórtice, diámetro de la salida fría y el diámetro del tubo respectivamente.

FIGURA 32. Aerodinámica de la velocidad axial y gráficas de velocidad tangencial y axial y su distribución a lo largo del eje central del tubo vórtice.



Fuente: Numerical prediction of primary and secondary flows in a Ranque-Hilsch vortex tube.

Un análisis aerodinámico de la velocidad axial da una comprensión más clara de la varianza tanto de la velocidad axial como tangencial en todo el tubo vórtice. Las gráficas de las velocidades axiales y tangenciales (figura 32) indican la dirección axial y la fuerza de rotación del vórtice, en varios lugares axiales y radiales a lo largo del tubo.

Además de las líneas de la corriente, gráficas de las velocidades tangenciales y axiales (denotado por V y U , respectivamente) y su varianza a lo largo de la dirección axial x del tubo vórtice. Estas gráficas son representaciones visuales de los resultados experimentales. Se puede observar fácilmente a partir de las gráficas que la velocidad tangencial que el remolino o componente rotatorio del flujo de vórtice es más fuerte en la región de entrada (es decir, cerca de las boquillas de entrada) del tubo y decae significativamente en magnitud hacia la

salida caliente. En los gráficos inferiores se puede observar que en la región de entrada de la velocidad axial del flujo de vórtice es positivo (es decir, en una dirección hacia la salida caliente) en ubicaciones radiales exteriores en el tubo, y se mueve en una dirección negativa en ubicaciones radiales interiores del flujo de vórtice. Lo que esto significa es que hay dos vórtices que se mueven en direcciones axiales opuestas dentro de esta región.

Esta reversión en el flujo hacia la salida de frío se produce en la dirección positiva x , de las toberas de entrada hasta un punto definido como el punto de estancamiento, como se destaca en la Figura 32. El punto de estancamiento también marca el punto límite en que nuevos aumentos de la longitud del tubo de vórtice más allá de este punto no mejora la separación de la energía, según lo observado por Aljuwayhel. Este aspecto importante se ha utilizado más adelante en la reducción de la longitud del dominio computacional del tubo de vórtice a la utilizada por los investigadores en sus experimentos. Hacia la salida caliente el movimiento ya no es puramente de rotación debido a la fricción de las paredes, disminuyendo los componentes tangenciales del flujo sustancialmente.

1.5.11 Eficiencia del tubo vórtice¹⁴

“El término eficiencia aún no se define uniformemente”. Primero se debe aclarar la perspectiva con que se ve al tubo vórtice, ya sea exclusivamente como refrigerador o como una “máquina simultánea de frío y calor”, como asegura Erdélyi.

En el primer caso, se define la eficiencia como la relación de la cantidad de frío obtenido del trabajo adiabático gastado por la compresión del gas.

¹⁴ MEDINA, Robert Patricio. Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPOL.

$$\eta_1 = \frac{c_p(T_{in} - T_c)}{c_p T_{in} \left[\left(\frac{p_{atm}}{p_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}$$

Donde p_{in} , p_{atm} y γ son la presión del aire de entrada, la presión atmosférica y la relación de calor específico, respectivamente.

En el segundo caso, la eficiencia resulta de las energías de los gases calientes y fríos en relación a la energía del gas provisto.

$$\eta_2 = \frac{c_p \mu (T_{in} - T_c) + c_p (1 - \mu) (T_h - T_{in})}{c_p T_{in} \left[\left(\frac{p_{atm}}{p_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}$$

Además, Soni y Thomson definen la eficiencia como la relación de la máxima cantidad de frío obtenido en el tubo, por la expansión adiabática de la presión de entrada en la presión ambiente bajo la cual realiza el trabajo de expansión para logra la cantidad de frío.

$$\eta_3 = \frac{\Delta T_c \mu (c_p)}{T_{adiab} (c_p)}$$

1.6 ESTUDIOS TEÓRICOS Y ANALÍTICOS ¹⁵

Desde que el tubo vórtice fue descubierto por GEORGE RANQUE, despertó el interés de muchos investigadores para analizar el fenómeno de la separación de

¹⁵ ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vortex (Ranque's). Trabajo de grado ingeniería mecánica.

energía, y así proponer diferentes teorías para asociar este fenómeno a modelos matemáticos que darían explicación a esta separación.

A continuación se muestran diferentes teorías de acuerdo al autor:

1.6.1 Teoría de GEORGE RANQUE

Consideró que la rotación se extiende contra la pared interior del tubo; el aire está formado de láminas delgadas de presión y por acción de la fuerza centrífuga, las láminas más cercanas a la a la superficie interna del tubo son comprimidas por las láminas más alejadas de la pared produciendo así el calentamiento de las primeras. Al tiempo las capas alejadas de la pared se expanden y logran su enfriamiento. La fricción entre las capas debe ser la mínima posible.

Además consideró que hay un límite entre las láminas en el cual existe corte, siendo así el centro del tubo ocupado por el aire de menos presión.

1.6.2 Teoría de HILSH

En la teoría sobre el fenómeno de la separación de energía, HILSH postuló que debido a la fricción interna se produce un flujo de energía cinética dirigido radialmente hacia fuera en la corriente de aire. Sugiere así que la válvula en el extremo del lado caliente debe estar lo suficientemente alejada de las toberas, para que el aire que llegue a ellas haya perdido mucho de su movimiento en forma de tornillo, debido a la fricción interna entre capas de deslizamiento de aire. Esta recomendación no es tenida en cuenta por muchos otros autores.

1.6.3 Teoría de VAN DEEMTER

Aplicando la ecuación de Bernoulli al tubo vórtice, VAN DEEMTER demostró que el efecto del enfriamiento no puede causarse por el efecto del calentamiento de la periferia del tubo; y agregó que existe un flujo de energía cinética desde el centro el tubo hacia las capas exteriores.

1.6.4 Teoría de SCHEPER

Este autor propone su teoría considerando el tubo vórtice como un intercambiador de calor de contra flujo, afirmando que gran parte de la transferencia de energía desde la corriente central hacia los extremos se debe a la presencia de una temperatura estática alta en los límites de la corriente central.

Esta es una de las teorías más aceptada en los estudios hechos al tubo vórtice, donde coincide que existe un bombeo de energía desde el centro hasta la periferia gracias a la turbulencia en el campo centrífugo y a un incremento en la temperatura estática desde el centro hacia afuera del tubo.

1.6.5 Teoría de HARDEBOL

HANDERBOL, su teoría explica que para obtener una idea del origen de la zona fría en el centro del tubo y en el extremo la caliente, es suficiente comenzar únicamente con la velocidad angular, ya que en la velocidad la componente radial es pequeña.

El aire que entra al tubo tangencialmente, crea una distribución de velocidad tal que el momento angular se conserva; asumiendo que la velocidad sobre la sección es constante, entonces el producto de la velocidad periférica por la distancia desde la línea central de la cámara de rotación es constante y

permanecerá sobre toda la sección. Lo que vendría siendo un perfil hiperbólico de velocidad. Este tipo de flujo es llamado flujo de rotación libre; este flujo cambia sus características con relación a las fuerzas viscosas, las cuales tratan de hacer girar el aire como si fuese un sólido libre. En los límites la velocidad angular viene a ser constante. Se debe considerar que si el cambio de una rotación libre a una rotación constante no es acompañado por pérdidas de energía como resultado de la fricción, entonces el momento angular total no varía sobre toda la sección.

El autor de esta teoría también supone compresión adiabática; los perfiles de velocidad tienen perfiles de presión a los que les corresponden una distribución adiabática de temperatura; lo que quiere decir que el cambio en la distribución de velocidad se acompaña por un cambio en la distribución de temperatura, en la cual un aumento en la caída de temperatura en el aire del centro incrementa la temperatura en el aire de la periferia.

El calor transferido, necesario para la distribución de temperatura se afecta por un bombeo turbulento de calor también mencionado por VAN DEEMTER.

1.6.6 Teoría de PARULEKAR – HAHNWALKAR – HINGE

Estos autores proponen la siguiente hipótesis de acuerdo a investigaciones experimentales: el aire entra tangencialmente al tubo formando un vórtice libre, gracias a la acción centrífuga. El vórtice libre viaja a lo largo de la pared y como resultado de la obstrucción de la válvula el aire deja de rotar en la región cercana a ella; como la presión en este punto es mayor a la del diafragma en el otro extremo, un flujo contrario se origina, el cual entra en contacto con el vórtice libre que se mueve hacia adelante a lo largo de la superficie interior del tubo. Este vórtice libre está rotando a una velocidad alta y obliga a la corriente axial a rotar, formando en ella un vórtice forzado. La energía externa requerida por el vórtice

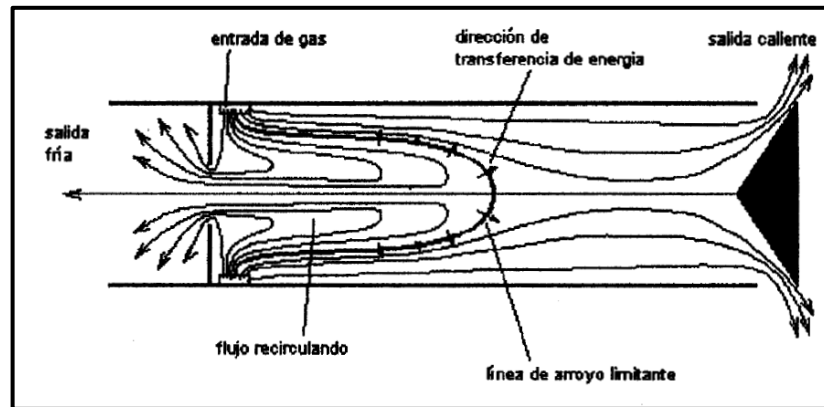
forzado es suministrada por el vórtice libre y por lo tanto, hay un flujo de energía desde las capas periféricas hacia el centro; sin embargo el flujo de energía en dirección opuesta es mucho mayor al flujo hacia el eje del tubo.

En el plano transversal de las toberas, el aire tiene la velocidad de rotación más alta, la cual disminuye gradualmente desde las toberas hasta la válvula en donde es despreciable. Existe un deslizamiento entre varios planos transversales, en donde los planos de movimiento rápido tratan de aumentar la velocidad de los planos adjuntos comunicándole a los planos lentos un poco de su momento. Eso quiere decir que en esta forma desde el plano de las toberas hacia la válvula existe un flujo continuo.

1.6.7 Teoría de SCHULTZ – GRUNOW

Estos autores están de acuerdo con la teoría anterior y con la teoría de VAN DEERMER; además estiman que la mezcla turbulenta en el campo centrífugo resulta de un bombeo de energía desde la región de baja presión en el eje de la región de alta presión en el extremo. Esta energía es entonces transmitida hacia la válvula en forma de transferencia de momento y también a la misma masa trasladándose hacia la válvula. Plantean un traslado de calor turbulento en un flujo estratificado, explicó que se daba capa a capa del fluido arremolinado como se muestra en la figura 33.

FIGURA 33. Separación y distribución del flujo dentro del tubo y transferencia de energía capa a capa, según Schultz-Grunow

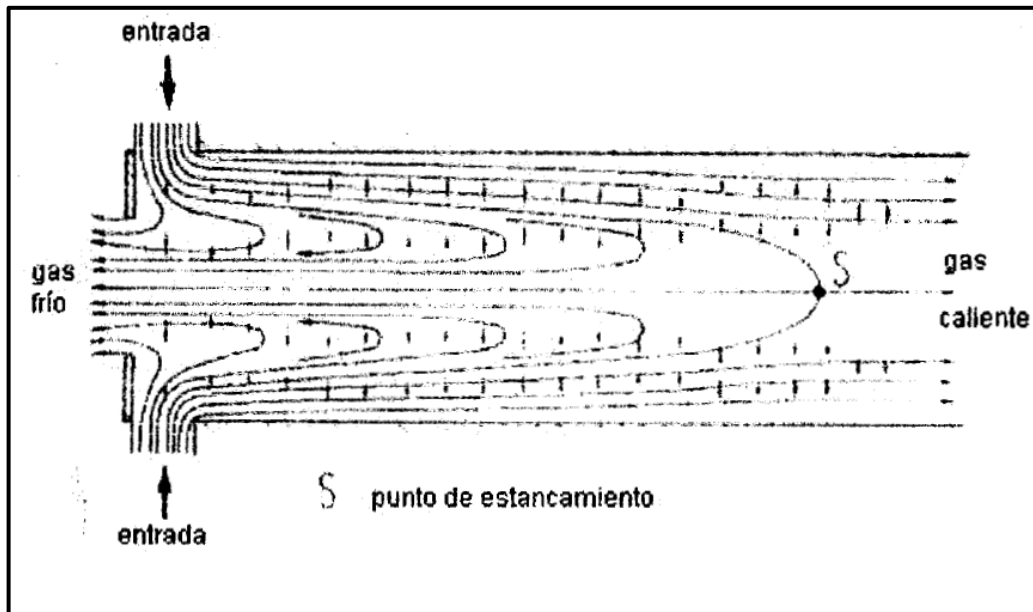


Fuente: MEDINA, Robert Patricio. Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPOL

1.6.8 Teoría de STEPHAN

Explico que la transferencia de calor total se daba en forma radial; además planteó la existencia de un punto de estancamiento o neutro, S, ubicado donde el eje atraviesa la capa límite, en el caudal se dividen los futuros flujos fríos y calientes, pasando por allí pasa el plano de mayor temperatura y que su ubicación depende de la magnitud de la fracción fría μ (Figura 34).

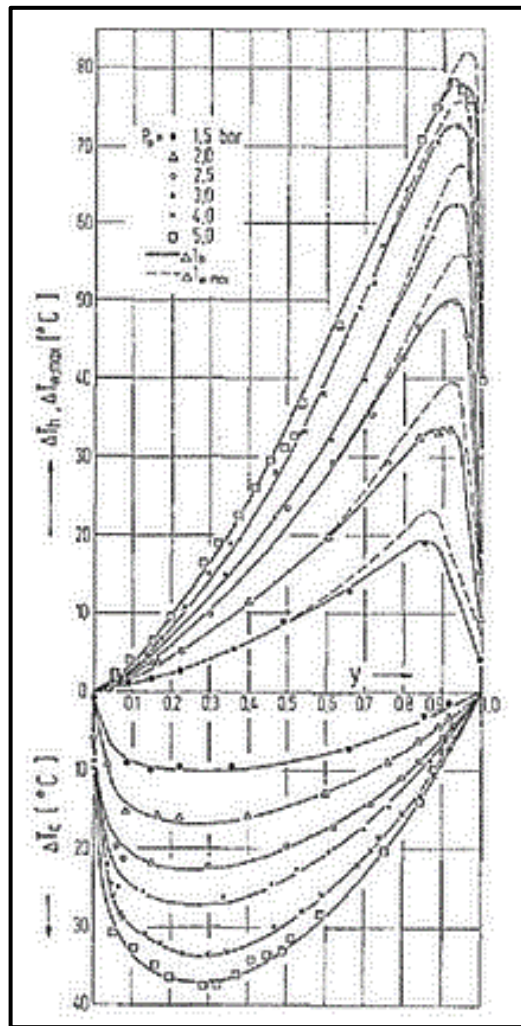
FIGURA 34. Separación y distribución del flujo, punto de estancamiento, S, y dirección radial de la energía.



Fuente: MEDINA, Robert Patricio. Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPOL

STEPHAN estima la diferencia de temperatura de la salida fría, ΔT_c , como función de la proporción de flujo de masa fría, μ , presentando los resultados en la siguiente figura.

FIGURA 35. Diferencia de la salida fría y caliente en función de la fracción fría y la presión de entrada como parámetro según Stephan



Fuente: MEDINA, Robert Patricio. Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPOL

1.6.9 Teoría de KASSNER – KNOERNSCHIL D.

Proponen su modelo analítico siguiendo la descripción cualitativa de HILSCH, asumiendo que los perfiles de velocidad de aire que entra en una parte es un vórtice libre y a medida que el aire se mueve hacia la válvula, el perfil de velocidad es convertido en un vórtice forzado por la acción de la viscosidad. También

postulan una distribución adiabática de temperatura debido a la mezcla turbulenta. Logrando así curvas de funcionamiento que concuerdan con las mediciones de HILSCH.

1.6.10 Teoría de DORNBRAND

En su estudio, utiliza un estado bi-direccional en reemplazo del tubo vórtice, en donde maneja vórtices que tienen perfiles de velocidad y temperatura idénticos en las secciones perpendiculares al eje del vórtice. Solo consideró la ecuación de momento y la de transferencia de energía debido al trabajo de corte, pero incluyendo el efecto del flujo radial.

1.6.11 Teoría de MERWIN SIBULKIN

Sostiene que el tubo vórtice debe tener en cuenta la variación el campo de flujo con la posición axial dentro del tubo. Hace un análisis semi-infinito de flujo único, considerando que el flujo es simétrico a lo largo del eje longitudinal, sin embargo esto da origen a un problema de flujo estable tridimensional, el cual es intratable matemáticamente; es por ello que hace una aproximación del flujo estable tridimensional a un flujo inestable bidimensional en donde despreja las fuerzas de corte asociadas a las componentes axial y radial de la velocidad en comparación con la fuerza de corte asociada a la distribución de velocidad circunferencial.

1.6.12 Teoría de C.U. LINDERSTROM – LANG

Hace un estudio tridimensional de la distribución de la temperatura y velocidad, de la separación de energía dentro del tubo vórtice, además asocian las teorías que

en uno y otro aspecto fueron expuestas por varios autores que daban una explicación similar y proponen una solución matemática.

1.6.13 Teoría de DEISSLER – PERLMUTTER

Proponen la solución analítica más completa al flujo del tubo vórtice como vórtice estable; ya que incluyen en su análisis tanto el flujo radial como el axial y toda la ecuación de la energía. Esta solución es básicamente bidimensional, sin embargo los perfiles de temperatura y velocidad circunferencial son idénticos en todas las secciones perpendiculares al eje del vórtice.

1.7 APLICACIONES¹⁶

El tubo vórtice es un método simple que sirve para la refrigeración del aire y posee múltiples ventajas a la hora de compararlo con otras máquinas refrigerantes. En la industria existen muchas aplicaciones que requieren un equipo como el tubo vórtice, que sea compacto, de bajo costo, sin desgastes, de poco mantenimiento, ligero, y sobre todo que actúe de manera instantánea.

En la actualidad se utiliza el tubo vórtice en múltiples aplicaciones como se verá a continuación:

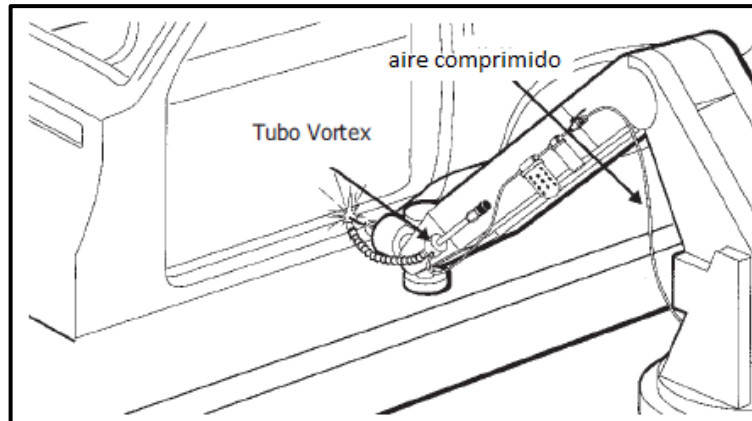
1.7.1 Soldadura

Utilizar el tubo vórtice al suministrar un flujo de aire frío en el lugar de alta temperatura ayuda a eliminar el proceso de limpieza, además mejora de manera significativa la apariencia del producto sin dar lugar a distorsiones o granulaciones.

¹⁶ -MEDINA, Robert Patricio. Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPOL.

- CATALOGO AiRTX. Tubi Vortex in acciaio inox AiRTX.

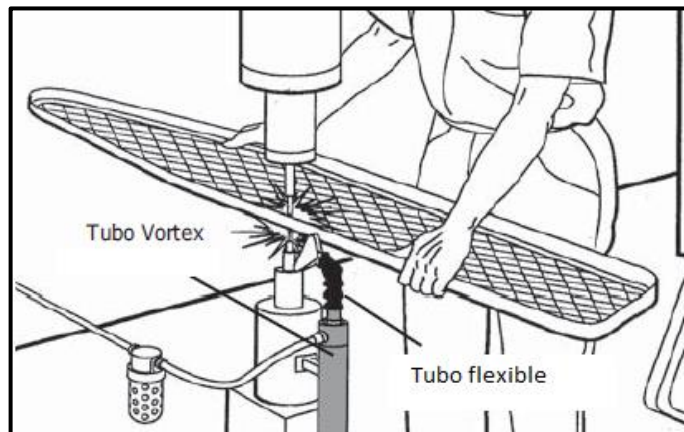
FIGURA 36. Soldadura de carrocerías con el tubo vórtice



Fuente: catálogo Tubi Vortex in acciaio inox AiRTX

En cuanto a la soldadura por puntos, su costo es de gran importancia, y al utilizar el tubo vórtice para enfriar los electrodos permite extender la vida de estos, aumentando el tiempo de funcionamiento y logrando grandes ahorros en la producción.

FIGURA 37. Soldadura por puntos con el tubo vórtice



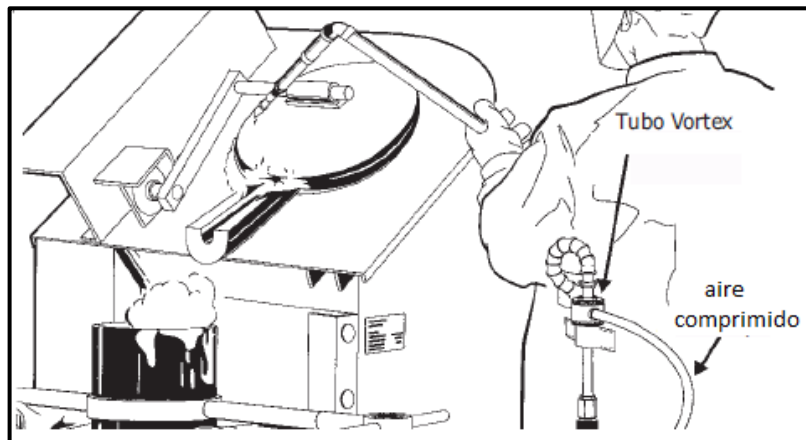
Fuente: catálogo Tubi Vortex in acciaio inox AiRTX

1.7.2 Trajes alimentados con aire

En procesos de fundición se requiere de un ambiente fresco y apto para el confort de los trabajadores, ya que estos se encuentran expuestos a altas temperaturas y protección pesada en sitios confinados. Es por esto que de manera práctica se utiliza el tubo vórtice para introducir aire frío al interior del traje que utilizan los trabajadores para mantener constante la temperatura promedio normal del cuerpo.

Además de seguridad y confortabilidad del traje, también se puede considerar como un ahorro de costo, gracias a que el trabajador puede lograr trabajar durante largos periodos de trabajo bajo condiciones desfavorables garantizando la integridad personal.

FIGURA 38. Trajes alimentados con aire



Fuente: catálogo Tubi Vortex in acciaio inox AiRTX

1.7.3 Ajuste en Caliente

Cuando no se recomiendan los ajustes a presión, por lo general se lleva a cabo un ajuste por contracción o en caliente, en donde se calienta el buje o cubo, o se

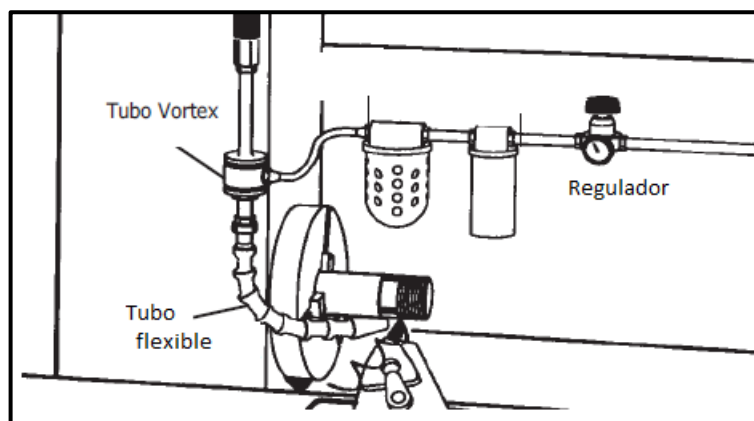
enfri  el eje (algunas veces se realizan ambas operaciones simultáneamente). En esta operación se requiere de calentamiento o refrigeración por cortos periodos de tiempo, lo que el tubo vórtice es una buena opción.

1.7.4 Herramientas de Corte

Existe la necesidad de utilizar un fluido para refrigerar diferentes operaciones de metalmecánica, y el tubo vórtice tiene un amplio uso dentro de esta  rea.

Algunos materiales es mejor cortarlos sin ninguna lubricación, y brindar un enfriamiento adicional a la punta de la herramienta de corte cuando estos materiales están siendo maquinados, incrementa la vida útil de la herramienta y reduce la frecuencia de afilado; además permite un mejor acabado superficial, reduce la formación de fillos y permite aumentar la velocidad de procesamiento sin pausas y sin perder la nitidez.

FIGURA 39. Enfriamiento de herramientas de corte



Fuente: catálogo Tubi Vortex in acciaio inox AiRTX

1.7.5 Control de Temperatura

El tubo vórtice tiene grandes usos en ambientes donde la temperatura es controlada y existen condiciones especiales; este es el caso de equipos, controles e instrumentos electrónicos, que generalmente se sitúan dentro de gabinetes de protección en donde solo un fluido seco y fresco puede acceder. En esta aplicación el tubo vórtice entra a reemplazar los ventiladores y extractores rotatorios o en combinación de estos. Una ventaja de utilizar el tubo vórtice es que proporciona un fluido refrigerante seco, ya que los niveles elevados de humedad pueden afectar los componentes y así mismo el funcionamiento de equipos.

1.7.6 Otras aplicaciones

El tubo vórtice tiene otras aplicaciones en diferentes campos, algunas de ellas cuestionables en cuanto a su rendimiento comparado con otros sistemas de refrigeración por aire.

- ✓ Industria: refrigeración controlada en cámaras, enfriamiento de rodamientos, enfriamiento de rotores de las turbinas a gas, refrigeradores portátiles, enfriadores y calentadores para automóviles, enfriadores y calentadores de equipos de potencia.
- ✓ Biología y medicina: congelamientos controlados, tratamientos de la piel, cirugía, terapia.
- ✓ Procesos químicos: autoenfriamiento de gas natural, procesos de calentamiento y enfriamiento.

2. PARÁMETROS DE DISEÑO ¹⁷

A continuación se mostraran las principales consideraciones y parámetros que se deben tener en cuenta para lograr el desarrollo del tubo vórtice y poder experimentar el comportamiento del tubo bajo ciertas consideraciones, ya sean de operación, ambiente de trabajo, y variaciones.

La configuración geométrica del tubo es fundamental, por ello el cálculo va destinado en gran medida a esta parte, y a su diseño. La otra parte es selección técnica. El tubo vórtice que se diseñará es de tipo contraflujo, y será para fines experimentales. El aire será el medio de trabajo a utilizar.

El diseño del tubo vórtice se basa en relaciones y parámetros geométricos basados únicamente en estudios experimentales hechos por cada autor.

2.1 TUBO PRINCIPAL

La principal característica del tubo vórtice son la longitud (L) y el diámetro nominal (D), los cuales son definidos más adelante.

Debido a que las boquillas no están situadas en el extremo del tubo, se deben aclarar las proporciones de longitud en cada uno de los lados. Estudios experimentales anteriores muestran que la longitud hacia el extremo frío es insignificante en cuanto a la función del tubo; esto se debe a que el proceso de separación ocurre en la parte caliente. Por lo tanto, las longitudes indicadas a

¹⁷ -MEDINA, Robert Patricio. Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPO. Tesis de grado ingeniería mecánica.

continuación son prácticamente la totalidad del lado caliente del tubo (la distancia que hay entre la pantalla fría y la válvula de control).

El diámetro nominal es el diámetro interno, sin importar el espesor de las paredes. Para que la operación sea satisfactoria se debe introducir el flujo de manera correcta, además de tener una pared interna lisa para minimizar la fricción. Por experimentos anteriores se sabe que al aumentar el diámetro nominal del tubo, crece el efecto RANQUE, aumentando considerablemente la eficiencia.

La relación L/D óptima cambia de acuerdo a cada autor, ya que no se aclara si efectúa la más alta separación de temperatura o si hacen referencia es a la mayor capacidad de enfriamiento.

En sus experimentos, RANQUE utilizó tubos de una longitud entre 25 a 50 veces su diámetro, aunque con valores bajos como el tubo de PARULEKAR, de longitud 3 veces su diámetro se obtuvieron resultados buenos. En la siguiente tabla se muestra la relación L/D de acuerdo a su autor.

TABLA 2. Tabla de relación longitud/diámetro según autores

AUTOR	L/D
Hilsch	25
Planck	50
Vierling y Hofmann	≥ 25
Birr	50
Young y McCutcheon	≥ 20

Continuación Tabla 2

Soni y Thomson	>45
Takamara y Yokosawa	≥ 114
VDI-Z 104	3

Fuente: Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPOL

Los diámetros también varían de acuerdo al autor, aunque en los estudios no se ha demostrado la influencia de este en sí. Sin embargo en la siguiente tabla se muestra los valores de diámetros dados por algunos autores.

TABLA 3. Tabla de diámetros nominales de acuerdo a autores

AUTOR	D(mm)
Ranque	12
Singh/Narayankhedkar	9
Stephan	17.6
Lin	20
Ahlborn	18

Fuente: Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPOL

2.2 BOQUILLAS E INYECTORES DE AIRE

La configuración de estos es más compleja, por un lado se deben considerar diferentes aspectos como el tipo de construcción del tubo vórtice, ya que se sabe que se colocan cerca a la pantalla fría y que la distancia entre ellos no influye en la separación de energía; también porque: “tubos con inyectores de diámetros

pequeños influyen desfavorablemente al efecto RANQUE, pues la eficiencia en el desarrollo del torbellino de gas se degrada bastante rápidamente. Inyectores grandes proveen una eficiencia más grande para el tubo, pues se eleva fuertemente la presión interna, p_i , del tubo.”

Es por esto que sobresale el trabajo hecho por LIN, ya que la alta presión interna, la relación de presiones a través de la boquilla de entrada, P_i/p_0 , se degrada de tal forma que la separación de temperatura se vuelve más pequeño gracias principalmente a los diámetros de las boquillas de entrada.

En este aspecto también se tienen condiciones óptimas por diferentes autores, del diámetro del inyector en relación con el diámetro nominal del tubo como se muestra a continuación.

TABLA 4. Tabla de relación d_i/D según autores

AUTOR	d_i/D
Hilsch	0.239
Birr, con referencia a Martynowskij	0.238
Young/McCutcheon	0.25

Fuente: Fuente: Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPOL

El número de inyectores debe tener un arreglo uniforme cuando son más de uno.

2.3 PANTALLA FRIA

La pantalla fría es un elemento esencial debido a que genera un medio limitante para que se forme y salga el flujo de aire frío. En cuanto a sus características

primordiales está el diámetro de la pantalla, d_c , el cual fue estudiado detalladamente por muchos autores, quienes proponen la relación óptima entre este diámetro y el diámetro nominal del tubo, d_c/D .

Según investigaciones anteriores, se cree que el diámetro de la pantalla fría influye de manera significativa en la separación de energía que ocurre dentro del tubo vórtice. En la siguiente tabla se puede observar las condiciones óptimas de la relación d_c/D según autores.

TABLA 5. Relación óptima d_c/D según autores

AUTOR	d_c/D	Comentario
Hilsch	0.37 hasta 0.48	0.48(D=4.6 mm)
		0.44(D=9.6 mm)
		0.37 (D=17.6 mm)
Young/McCutcheon	0.5	“optimo”
Birr, con referencia a Martynowskij	0.47	“optimo”
Birr, con referencia a Merkulow	0.55	Máxima cantidad de frío
	0.4	Enfriamiento máximo
Soni/Thomson	0.38	Eficiencia Máxima
	0.28	Enfriamiento Máximo

Fuente: Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPOL

2.4 VÁLVULA REGULADORA

La conicidad es una característica que se le ha dado a la válvula ya que al parecer facilita al final del vórtice interno su expansión y salida; lo demuestran los estudios hechos anteriormente.

Con respecto a su modo de operación, se sabe que cuando está cerrada totalmente la válvula, toda la cantidad de aire inyectado sale por el extremo frío; en esta expansión se produce una reducción politrópica de temperatura. Aumentando la apertura de la válvula, se eleva la presión en el extremo caliente, hasta que una parte del aire fluye por la pantalla saliendo como ventilación fresca en ese extremo. Con la válvula totalmente abierta, se produce una presión negativa en el tubo, aspirando aire atmosférico por la apertura de la pantalla, igual que una bomba de vacío, y abandonando por el extremo caliente la masa de aire inyectado.

Aunque se tenga la idea anterior con este tipo de geometría, no hay ninguna objeción en aplicar otro tipo de válvula, ya sea de globo o compuerta.

2.5 RESULTADOS COMUNES IMPORTANTES SOBRE LOS CRITERIOS DE DISEÑO DEL TUBO VÓRTICE¹⁸

TABLA 6. Resultados comunes importantes sobre los criterios de diseño del tubo vórtice

NOMBRE DEL GRUPO	PARAMETRO/NOMBRE DE LA VARIABLE	RESULTADOS COMUNES IMPORTANTES
------------------	---------------------------------	--------------------------------

¹⁸ YILMAZ, M., KAYA, M., A review on design criteria for vortex tubes.

Continuación Tabla 6

Parámetros Geométricos	Longitud del tubo	<p>-La longitud del tubo vórtice afecta el rendimiento significativamente.</p> <p>-Un tubo ya sea eficiente de diseño debe ser muchas veces más largo que su diámetro.</p> <p>-L/D óptimo es una función de parámetros geométricos y de operación.</p> <p>-La magnitud de la separación de energía aumenta a medida que la longitud del tubo aumenta a una longitud crítica, sin embargo, un aumento adicional de la longitud del tubo vórtice más allá de la longitud crítica no mejora la separación de energía.</p> <p>-la relación L/D debe ser mayor que 20 con el fin de tener una separación significativa de la temperatura en un tubo vórtice.</p> <p>L/D no tiene ningún efecto en el rendimiento más allá de L/D=45.</p>
	Diámetro del tubo	<p>-Diferentes diámetros de tubo se han utilizado experimentalmente en investigaciones, tan bajos como 4mm y tan altos como 800 mm.</p> <p>-en tubos de diámetro pequeño generalmente proporcionan más separación de temperatura que los diámetros mayores.</p> <p>-Un diámetro muy pequeño conduce a baja difusión de la energía cinética que también significa la separación a baja temperatura.</p> <p>-Un diámetro muy grande daría lugar a menores velocidades tangenciales en general, tanto en el núcleo como en la región periférica, lo que produciría baja difusión de la media energía cinética y también baja la temperatura.</p>
	Diámetro de las boquillas	<p>-El aumento de la boquilla, en general, aumenta el rendimiento.</p> <p>-El diámetro óptimo de la boquilla está cerca de 0.25D.</p>

Continuación Tabla 6

	Tipo y número de boquillas	<p>-Las boquillas de entrada deben ser diseñadas de manera que el flujo entre tangencialmente al tubo.</p> <p>-El aumento del número de boquillas de entrada conduce a una mayor separación de temperatura.</p> <p>-La ubicación de la boquilla de entrada debe estar tan cerca como sea posible del orificio para producir altas velocidades tangenciales.</p>
	Orificio de Frío	<p>-El uso de un pequeño orificio ($dc/D=0.2, 0.3, 0.4$) produce una contrapresión elevada mientras que un gran orificio frío ($dc/D=0.6, 0.7, 0.8$ y 0.9) permite alta velocidad tangencial en el lado frío, lo que resulta en una separación de energía térmica baja.</p> <p>-El diámetro del orificio frío debe estar en el rango $0.4 \leq dc/D \leq 0.6$, para resultados óptimos.</p> <p>-Orificios coaxiales tienen una mayor separación de temperatura en comparación con otros orificios de configuraciones tales como orificios excéntricos, boquillas diafragma y diafragmas con secciones transversales distintas de configuraciones cilíndricas.</p>
	Válvula de control de flujo	<p>-El tapón en el extremo caliente no es un componente crítico en el tubo vórtice.</p> <p>-Valor óptimo para el ángulo de la válvula de control en forma de cono es de aproximadamente 50°.</p>
	Geometría del tubo	<p>-En tubos vórtice divergentes, existe un ángulo óptimo de conicidad y éste ángulo es muy pequeño ($\sim 3^\circ$).</p> <p>-el redondeo de la entrada del tubo mejora el rendimiento.</p>
Flujo de Masa	Fracción de masa fría	<p>-La temperatura fría y caliente cambia significativamente con la fracción fría.</p> <p>-La temperatura de la salida de aire frío disminuye al aumentar la fracción fría hasta 0.3 y alcanza allí un valor mínimo.</p> <p>-La temperatura de salida del aire caliente aumenta con el incremento de la salida de masa de aire frío, en una relación de hasta 0.7-0.8.</p>
	Caudal másico total	<p>-La tasa de flujo de entrada o la masa total del gas de trabajo suministrado en el tubo vórtice es uno de los factores importantes que afectan el rendimiento.</p>

Continuación Tabla 6

Condiciones de entrada	Presión de entrada	<p>-El aumento de la presión de entrada mejora la separación de temperatura</p> <p>-La separación de temperatura es una función lineal en la caída de presión normalizada entre la entrada y el extremo frío del tubo de vórtice.</p> <p>-Tubos vórtice se comportan de forma idéntica en regímenes por encima y por debajo de la presión atmosférica.</p>
	Temperatura de entrada	<p>-La temperatura de entrada no afecta significativamente a las diferencias de temperatura y actuación.</p>
Otros factores	Material del tubo vórtice	<p>-El uso de materiales con superficies más lisas y baja conductividad térmica resulta una mejor separación de temperatura y rendimiento.</p> <p>-Usando el tubo vórtice con aislamiento para reducir la pérdida de energía al entorno da una mayor separación de temperatura en el tubo que sin aislamiento.</p> <p>-Para todas las operaciones posibles del tubo vórtice, la elección de un material duradero para la fabricación del tubo es bastante importante.</p>
	Masa Molecular del gas	<p>-Entre más bajo el peso molecular, mayor es la separación de temperatura.</p> <p>-Gas de entrada con helio da diferencias de temperatura superiores a los encontrados con el oxígeno, metano y aire.</p> <p>-Rendimiento del tubo vórtice con vapor de agua e hidrocarburos es similar al del aire.</p> <p>-Cuando la presión de entrada es alta existe el proceso de separación de energía en el flujo de vórtice incompresible.</p>

Fuente: A review on design criteria for vortex tubes.

3. DISEÑO DEL TUBO VORTICE

Teniendo en cuenta referencias, y resultados obtenidos en trabajos anteriores, el tubo vórtice será diseñado con consideraciones basadas en los parámetros de diseño mencionados anteriormente. Se elige el tubo vórtice contraflujo y aire como flujo de trabajo.

3.1 TUBO PRINCIPAL

El objetivo de este proyecto es seleccionar un tubo mediano para realizar el estudio experimental, es por ello que se toma un valor pequeño de la relación L/D , que sería de 20 para garantizar algo de estabilidad (propuesta por YOUNG Y MCCUTCHEAN, además de ser uno de los resultados comunes por los investigadores), el diámetro nominal será de 21 mm, ya que se trabajara con diámetros estándar del material utilizado. Lo que da como resultado una longitud de 420 mm.

Hay que tener en cuenta que la longitud total corresponde desde la pantalla fría hasta el extremo caliente, para el diseño se estima una longitud de 20 mm para la unión con el distribuidor, lo que significa que la longitud neta del tubo principal es de 400 mm.

3.2 BOQUILLA DE ENTRADA

Para este elemento se diseñaron dos distribuidores, cada uno con una boquilla cilíndrica; la diferencia radica en que en el primero, la posición de la boquilla está totalmente vertical y tangencial a la cámara de vórtice, mientras que el segundo la boquilla esta inclinada 5° con la vertical y tangencial a la cámara de vórtice. Lo

anterior con el fin de experimentar con cuál de los distribuidores el tubo vórtice genera mayor cambio en la temperatura.

En cuanto a la relación del d_i/D , será utilizado 0.25 (recomendado por Young/McCutcheon), dando así un diámetro de boquilla de 5,25 mm.

El distribuidor que contiene la boquilla de entrada se une al tubo principal por ajuste forzado, mientras que la unión con la pantalla fría es por medio de rosca de 1" UNF (rosca fina).

3.3 PANTALLA FRÍA

El valor considerado es la relación $d_c/D = 0.5$ ya que es un valor promedio y óptimo para el funcionamiento correcto del tubo vórtice, dando así un diámetro de pantalla fría de 10.5 mm. En muchos estudios concuerdan que la distancia de la boquilla a la pantalla fría no influye de manera significativa en el funcionamiento del tubo vórtice.

Esta pieza tiene un corte plano en donde estará ubicado una unión macho-hembra, donde se ubicara el manómetro digital.

3.4 VÁLVULA REGULADORA

La válvula reguladora de flujo que se va a emplear es de forma cónica que se pueda adaptar al tubo principal. El diseño de esta válvula de cono se divide en tres: manguito adaptador, capuchón y el cono como se muestran en los planos (ver anexos).

La cara interna del manguito se une a la cara externa del extremo del tubo, por ajuste y soldadura para PVC. En el interior hay un bisel que sirve de asiento para el contacto con el cono. La cara tiene una rosca de 1 ½" UNF (rosca fina), por la cual avanza el capuchón. El capuchón contiene 6 agujeros de 5 mm de diámetro cada uno, por donde es expulsado el aire caliente.

El cono tiene una geometría sencilla, la conicidad es de 90° y debe ser la misma que la del asiento en el manguito. El asiento y el cono deben tener un buen acabado superficial para lograr que la válvula selle completamente. La unión del capuchón con el cono es mediante un perno de 5/16 x ½".

4. CONSTRUCCIÓN E INSTALACION

4.1 MATERIALES

El tubo vórtice fue construido básicamente de dos materiales: PVC y Duralón, los cuales tienen una alta estabilidad térmica para las temperaturas manejadas en el proceso, además de soportar presiones superiores a las utilizadas sin perder sus propiedades.

El tubo principal o tubo caliente es una pieza en PVC, y sus medidas se describen en los planos mostrados en los anexos.

FIGURA 40. Material del tubo principal



El resto de las piezas son en Duralón, y el mecanizado de las piezas tenía que ser muy preciso a las especificaciones para lograr que las paredes internas fueran lo más lisas posibles para evitar fricciones y poder observar el fenómeno. Las dimensiones y especificaciones se muestran en los anexos.

FIGURA 41. Material de los componentes



4.2 CONSTRUCCION

El tubo principal tiene de diámetro 21 mm, uno de los diámetros estándares de los fabricantes de PVC. Esta pieza no tiene roscas, es unida por ajuste y por soldadura para PCV con las piezas que corresponde.

Las demás piezas fueron mecanizadas en el torno y en la fresadora según fuera necesario. Las piezas en su mayoría son cilíndricas, y se les aplicaron procesos como cilindrada, refrentado, barrenado.

El distribuidor que contiene la boquilla con el ángulo de inclinación con la vertical, se mecanizó además con una fresadora para lograr el ángulo, adicional a esto con una fresa vertical se hizo el corte donde se ubica el acople para el ingreso del aire.

Las roscas se procesaron en el torno. Se combinaron roscas UNF (rosca fina) y NTP, las cuales son bastante utilizadas cuando el fluido de trabajo es aire.

En la unión del cono con el capuchón, se incorporó un O-ring para evitar las fugas de aire por el perno.

4.3 INSTALACION

El estudio experimental se realizó en el laboratorio de turbomáquinas de la Universidad Industrial de Santander, en el cual se elaboró un banco de pruebas que consta de las siguientes partes:

4.2.1 Compresor

Es el equipo encargado de suministrar el aire comprimido a una presión necesaria para realizar las pruebas.

FIGURA 42. Compresor



4.2.2 Tubo vórtice y soporte

El principal dispositivo, pues se quiere estudiar el fenómeno que ocurre en su interior, todo el diseño sobre su configuración geométrica está descrito en el capítulo 3.

El tubo vórtice esta soportado por dos láminas dobladas en frío con un perfil omega unidas por pernos a la mesa de trabajo, y ajustado por abrazaderas en cada uno de sus extremos.

FIGURA 43. Tubo vórtice y soporte



4.2.3 Instrumentos de medición

Los elementos utilizados para la medición son:

- **Termocuplas tipo K:** sensores de temperatura ubicados en cada uno de los extremos del tubo vórtice para medir la temperatura del aire que sale y enviarle la señal al Compac Rio de la National Instrument, encargado de adquirir esa señal y graficarla directamente las temperaturas salientes utilizando el LabVIEW.

FIGURA 44. Termocupla y Compac Rio



- **Manómetros:** Para medir la presión a la cual entra el aire al tubo vórtice se utiliza un manómetro de Bourdon, también se utiliza un manómetro digital para observar la presión a la que sale el aire después de atravesar la pantalla fría.

FIGURA 45. Manómetros



- **Anemómetro:** Para medir la velocidad a la cual el aire sale del tubo se utiliza un anemómetro de hélice, y de esta manera poder calcular el flujo volumétrico que atraviesa cada una de las salidas.

FIGURA 46. Anemómetro



4.2.4 Accesorios y conexiones

La conexión entre el compresor y el tubo se realiza con manguera de alta presión, ya que son flexibles y de fácil manejo e instalación y juegos de acople para mangueras.

FIGURA 47. Conexiones



4.4 COSTOS

El proyecto fue realizado con recursos propios.

TABLA 7. Costos

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PTRECIO
1	Duralón	3" Ø	20 cm	40.000
2	Duralón	2" Ø	15 cm	18.000
3	PVC	21 mm Ø	40 cm	3.000
4	Manómetro	-30 a 100 PSI	1 unidad	30.000
5	Manguera de alta presión	¼" Ø	200 cm	10.500
6	Juegos de acople	¼" a ½" Ø	3 unidades	8.000
7	Termocuplas	Tipo K	2 unidades	20.000
8	Soporte	Laminas, pernos y abrazaderas	2 unidades	20.000
9	Mecanizado de piezas		6 piezas	170.000
			TOTAL	\$ 319.500

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

La mayoría de las teorías e hipótesis sobre el tubo vórtice coinciden sobre los tipos de pruebas y los resultados obtenidos. Durante este estudio experimental, se tomaron datos de temperatura, velocidad de flujo, presión, para condiciones establecidas del tubo vórtice. La información recolectada se representa en datos y gráficas, para posteriormente ser analizados e interpretados y buscar la relación que existe entre estos y el fenómeno estudiado.

Durante el proceso, el caudal que atraviesa las salidas es controlado por la válvula ubicada en el extremo caliente, obteniendo siempre un caudal con diferente energía calorífica. Es por esto que el caudal y la temperatura son variables básicas a la hora de relacionarlas con el proceso de separación de energía.

Para este estudio experimental se realizaron pruebas con los dos tipos de boquillas diseñadas, y con diferentes aperturas de la válvula. Recordando que la fracción fría es $\mu = \frac{\text{caudal en el lado frío}}{\text{caudal total de entrada}}$, la válvula tendrá tres posiciones lo que significa que habrá tres fracciones frías, que son $\mu_1 = 0.42$; $\mu_2 = 0.64$; $\mu_3 = 0.80$; para cada boquilla.

El procedimiento para realizar las pruebas es el siguiente:

- Verificar que el compresor este a la presión adecuada
- Iniciar la prueba con la boquilla tangencial e inclinada 5° con la vertical
- Ubicar la válvula en cada una de las tres posiciones establecidas
- Verificar la ubicación y funcionamiento de las termocuplas
- Lectura gráfica de la temperatura, velocidad de flujo y presión a la salida fría
- Lectura gráfica de la temperatura, velocidad de flujo a la salida caliente

-Repetir el procedimiento para la boquilla tangencial completamente vertical.

5.1 BOQUILLA 1

La boquilla 1 está diseñada tangencial a la cámara vórtice, con inclinación de 5° con la vertical. El aire suministrado está comprimido a una presión de 3.4 Bar, y con una temperatura de 22°C. La temperatura ambiente en el momento de las pruebas es de 27 °C.

5.1.1 Prueba 1

Con las condiciones mencionadas anteriormente y con una fracción fría $\mu = 0.64$,
Las temperaturas fueron las siguientes:

GRAFICA 1. Temperaturas para prueba 1



La temperatura en el extremo caliente fue de $T_h=39.58$ °C y en el extremo frío fue de $T_c=13.21$ °C, obteniendo así:

$$\Delta T_h = 17.58 \text{ °C}$$

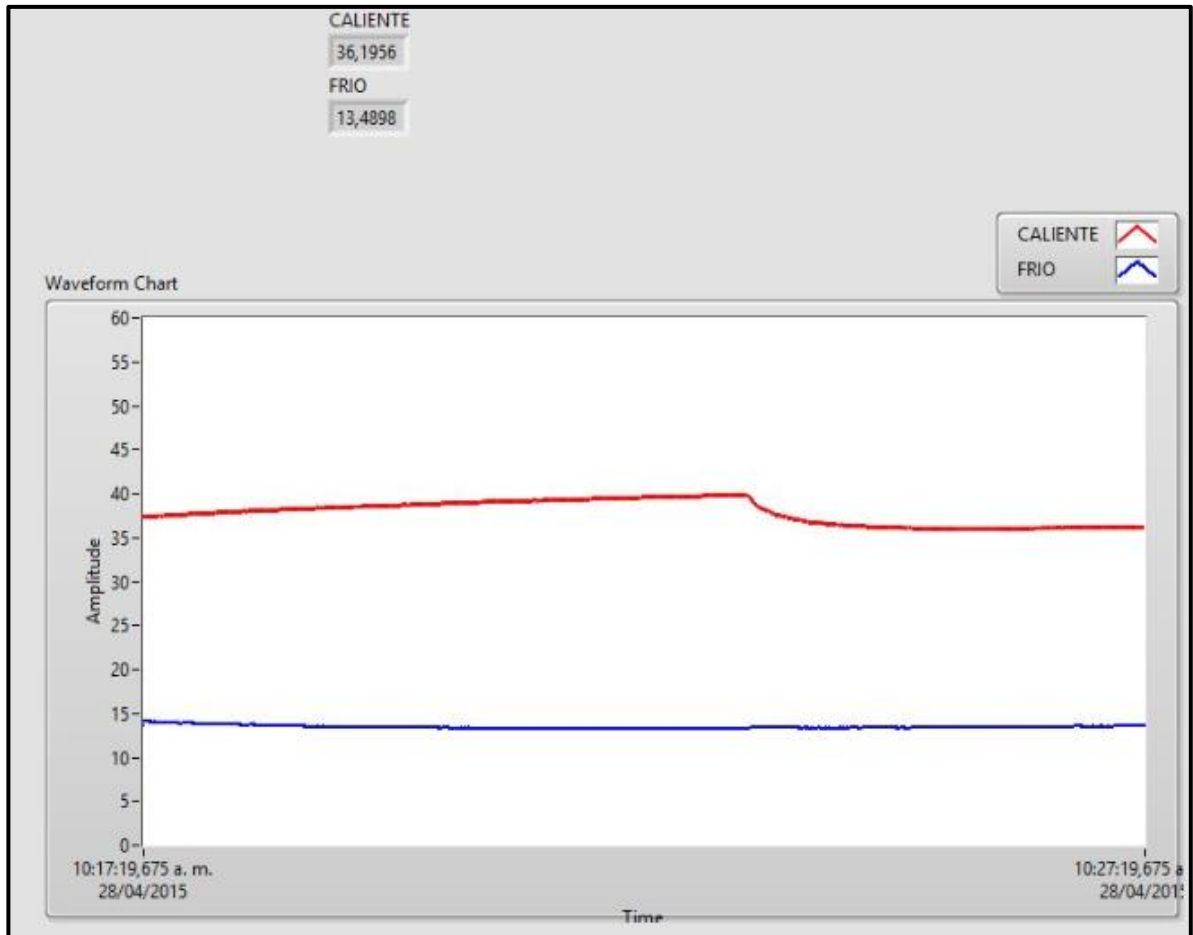
$$\Delta T_c = 8.79 \text{ °C}$$

$$\Delta T = 26.37 \text{ °C.}$$

5.1.2 Prueba 2

Para una fracción fría de $\mu = 0.42$, se obtiene:

GRAFICA 2. Temperaturas para prueba 2



La temperatura en el extremo caliente $T_h=36.19\text{ }^\circ\text{C}$ y en el extremo frio fue de $T_c=13.48\text{ }^\circ\text{C}$, obteniendo así:

$$\Delta T_h = 14.19\text{ }^\circ\text{C}$$

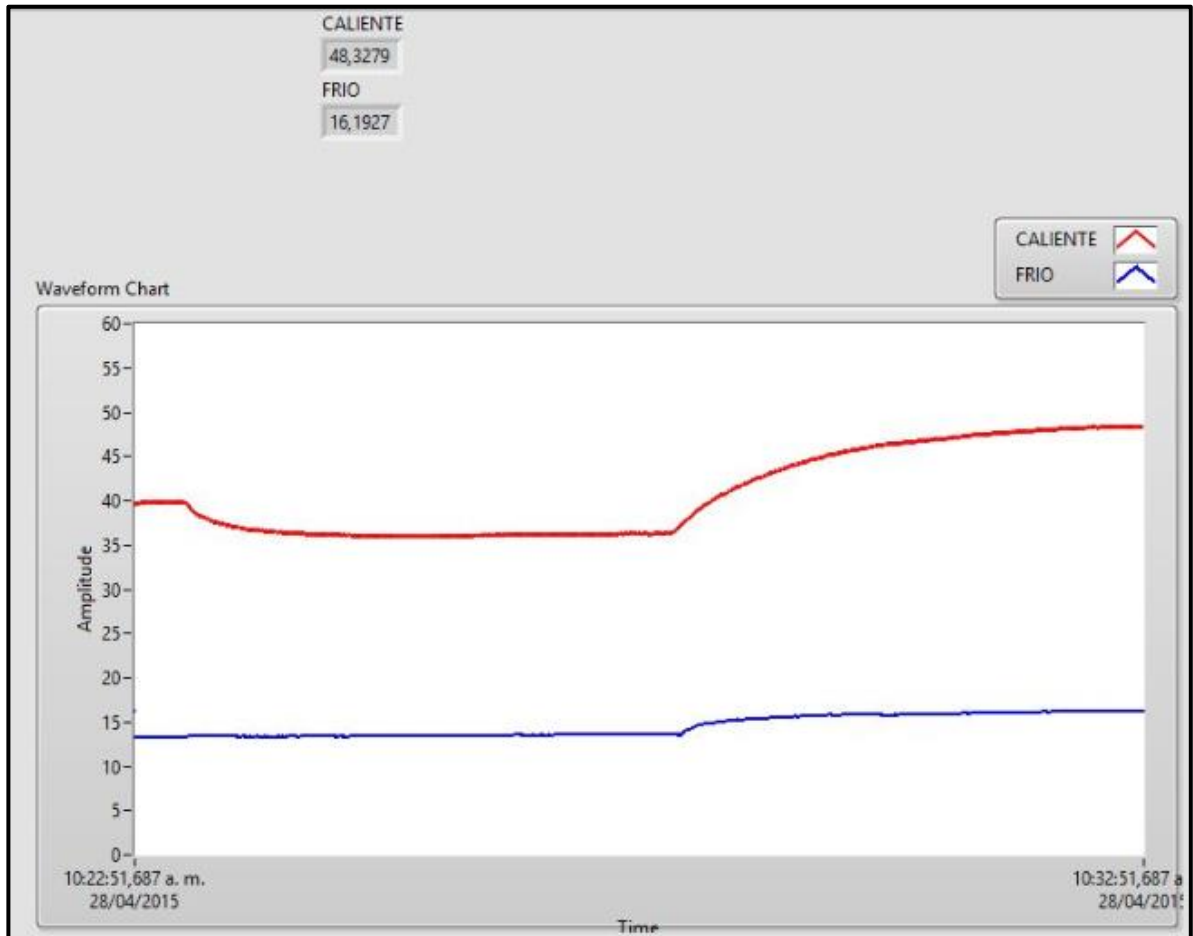
$$\Delta T_c = 8.52\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 22.7^\circ\text{C}$$

5.1.3 Prueba 3

Para una fracción fría de $\mu = 0.80$, se obtiene:

GRAFICA 3. Temperaturas para prueba 3



La temperatura en el extremo caliente $T_h=48.32^\circ\text{C}$ y en el extremo frío fue de $T_c=16.19^\circ\text{C}$, obteniendo así:

$$\Delta T_h = 26.32^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_c = 5.81^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 32.13^\circ\text{C}$$

Experimentalmente se observa que a mayor fracción fría de las utilizadas mayor T_h obtenida, sin embargo la T_c disminuyo durante las dos primeras pruebas, mientras que para el valor mayor de μ aumento. Con este tipo de boquilla se obtienen las T_c más bajas, lo se podría tomar como referencia si lo que se quiere diseñar es un tubo vórtice como dispositivo refrigerante.

Las presiones que se obtiene en la salida fría son bastante bajas a comparación de la entrada, y durante las pruebas varió de (0.04 bar a 0.06 bar), a mayor fracción fría, la presión en la salida fría aumenta.

5.2 BOQUILLA 2

La boquilla 2 es tangencial a la cámara vórtice, completamente vertical.

Al igual que con la boquilla 1, las condiciones iniciales son las mismas, el aire esta comprimido a una presión de 3.4 Bar, y una temperatura de 22°C, además una temperatura ambiente de 27 °C

5.2.1 Prueba 4

Con las mismas condiciones descritas y una fracción fría de $\mu = 0.64$,

GRAFICA 4. Temperaturas para prueba 4



La temperatura en el extremo caliente $T_h=44.21^\circ\text{C}$ y en el extremo frio fue de $T_c=15.58^\circ\text{C}$, obteniendo así:

$$\Delta T_h = 22.21^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_c = 6.42^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 28.63^\circ\text{C}$$

5.2.2 Prueba 5

Para esta prueba la fracción fría es de $\mu = 0.42$,

GRAFICA 5. Temperaturas para prueba 5



La temperatura en el extremo caliente $T_h=40.38^\circ\text{C}$ y en el extremo frío fue de $T_c=13.87^\circ\text{C}$, obteniendo así:

$$\Delta T_h = 18.38^\circ\text{C}$$

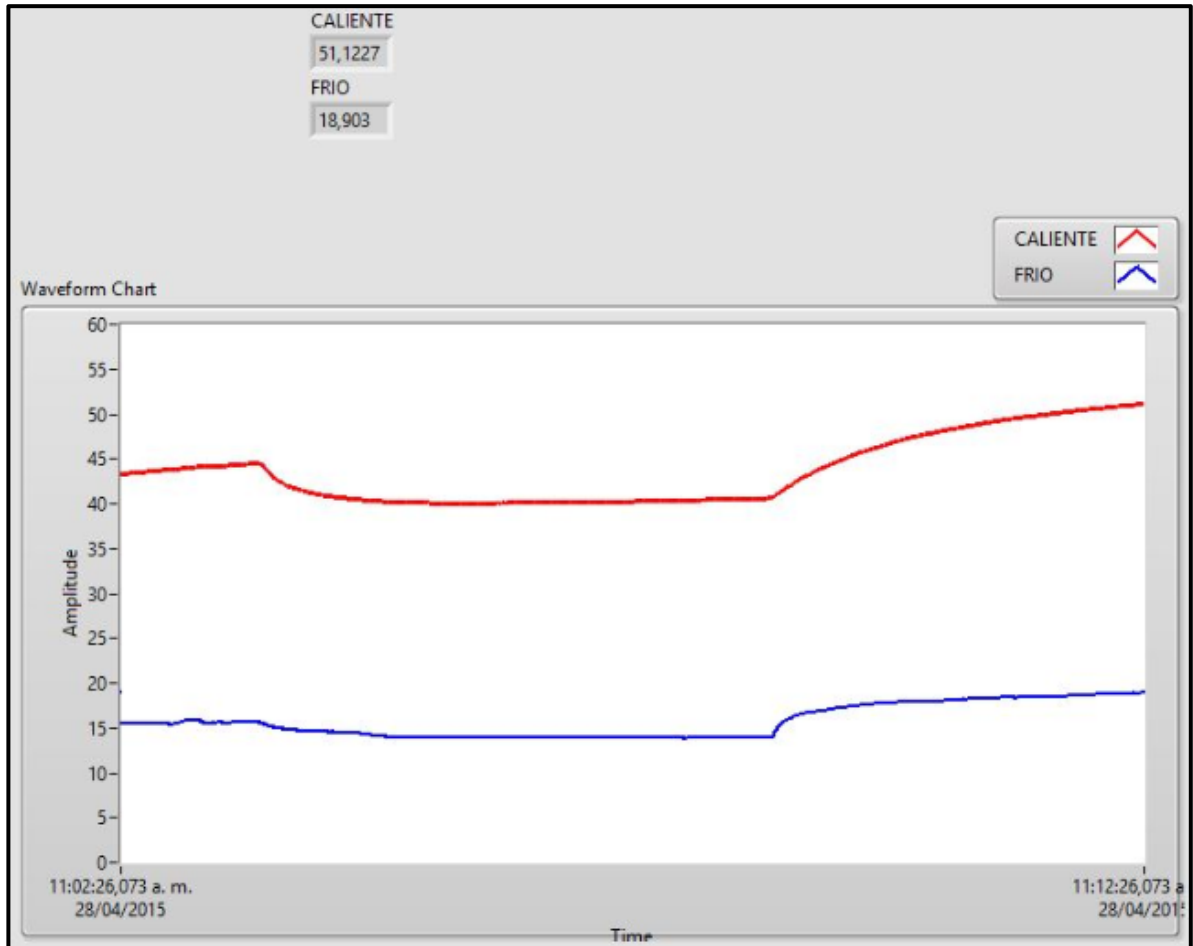
$$\Delta T_c = 8.13^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 26.5^\circ\text{C}$$

5.2.3 Prueba 6

Con una fracción fría de $\mu = 0.80$,

GRAFICA 6. Temperaturas para prueba 6



La temperatura en el extremo caliente $T_h=51.12^\circ\text{C}$ y en el extremo frío fue de $T_c=18.9^\circ\text{C}$, obteniendo así un

$$\Delta T_h = 29.12^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_c = 3.1^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 32,21^\circ\text{C}$$

Al utilizar esta boquilla se observa que al aumentar la fracción fría μ las T_h aumentan al igual que las T_c .

El mayor ΔT_h se presenta en este caso, cuando $\mu = 0.80$, lo que serviría de referencia si lo que se quiere lograr es un dispositivo calentador. Cuando existe un ΔT durante el funcionamiento del tubo vórtice, quiere decir que se está presentando el fenómeno de Ranque-Hilsh al interior del mismo; en ambas boquillas se logró el máximo ΔT cuando $\mu = 0.80$.

Las presiones que se obtienen en la salida fría son comparándolas con la entrada, durante las pruebas varió de (0.04 bar a 0.08 bar), a mayor fracción fría, la presión en la salida fría aumenta.

6. CONCLUSIONES

- Se ha cumplido con el principal objetivo del proyecto de grado, que consiste en generar conocimiento sobre el fenómeno de Ranque-hilsh presente en un tubo vórtice; sus causas, su impacto, sus aplicaciones, mediante la experimentación.
- Las especificaciones de diseño que se presentan para el tubo vórtice son basadas en estudios preliminares, de diversos autores, las cuales fueron utilizadas en este proyecto para caracterizar el tubo con fines demostrativos del fenómeno. La mayoría de los análisis convergen en expresar relaciones geométricas con respecto al diámetro nominal del tubo, sin embargo no expresan con cual se obtiene un mayor o menor ΔT , ya que existen muchos factores que pueden alterar estos valores, como el material, el mecanizado, el acabado, el fluido de trabajo, etc. No hay una configuración geométrica ni de diseño óptimo.
- Según los resultados obtenidos muestran que es posible construir un tubo vórtice con cualquier tipo de material fácilmente disponible siempre y cuando sea capaz de soportar el rango de temperaturas y presiones que se establezcan.

En el mecanizado de las piezas se debe tener en cuenta que lograr un buen acabado ayudara a que las paredes internas sean más lisas y de esta manera disminuir considerablemente la fricción. Aunque en el tubo vórtice es poco complejo en su estructura básica requiere del cumplimiento de algunas especificaciones como:

- La ubicación de la boquilla debe ser completamente tangencial a la cámara de vórtice.

- La distancia entre la boquilla y la pantalla fría puede ser de algunos milímetros, ya que esto no afecta en la separación de energía.
 - Una válvula de cono ayuda de manera significativa a la formación del vórtice interno, sin embargo estudios anteriores demuestran que con otros tipos de válvulas también se presenta el fenómeno.
- Teniendo en cuenta los estudios teóricos y analíticos, ningún autor ha logrado explicar en forma completa el fenómeno, ni definir las proporciones óptimas de varios componentes del tubo vórtice, una manera práctica para la experimentación es definir si se trabajara el tubo vórtice como un dispositivo refrigerante o no, y así disminuir el rango de posibilidades para encontrar una geometría óptima de lo que se quiere.
 Cuando el tubo vórtice está en funcionamiento, hay presentes variables importantes, como la temperatura, el caudal, la presión; en el anterior trabajo se pudo demostrar que válvula ubicada en el extremo caliente sirve tanto para el control de la temperatura como de la proporción del flujo caliente y frío, trabajando a una presión de entrada constante.
 Cada componente o dispositivo que hacen parte de la estructura y medición del banco de pruebas como el compresor, manómetros, termocuplas, anemómetro, cumplen un papel fundamental para lograr una buena toma de datos durante el estudio experimental.
 - Al comparar el estudio experimental hecho con la teoría que propone Stephan a una presión de entrada constante, se puede observar que el máximo valor de ΔT_h está ubicado en un punto donde la fracción fría es relativamente alta (en el punto óptimo de calentamiento antes de que el ΔT_h empiece a decaer), mientras que en ese mismo punto el ΔT_c no está en su máximo valor, por otra parte para alcanzar el máximo valor de ΔT_c se requiere de una fracción fría μ pequeña (en el punto óptimo de enfriamiento antes de que el ΔT_c empiece a decaer).

Según los datos obtenidos se puede concluir que la boquilla inclinada 5° con la vertical alcanza T_c más bajas que al utilizar la boquilla completamente tangencial para las condiciones establecidas; por otra parte esta última alcanza valores de T_h más altos que a primera. Por esto es importante definir el propósito por el cual se diseña el tubo vórtice, si como dispositivo de enfriamiento o calentamiento. En este trabajo no se seleccionó el propósito ya que fue diseñado con fines experimentales.

BIBLIOGRAFIA

CATALOGO AiRTX. Tubi Vortex in acciaio inox AiRTX. ITALIA.

CERVANTES G. *et al.* Estudio experimental del fenómeno ranque-hilsch en un tubo vórtice. Memorias del XVI congreso internacional anual de la SOMIM. Monterey, Mexico. 2010.

FRÖHLINGSDORF W. Y UNGER H. Numerical investigations of the compressible flow and the energy separation in the Ranque_Hilsch vortex tube. International Journal of Heat and Mass Transfer. [online] 1999, Vol. 42. [cited: 14 March 2015] p. 415-422.

GAO, C.M. *et al.* Experimental study on a simple Ranque-Hilsch vortex tube. Cryogenics. [online] March, 2005. Vol. 45 N° 3. [cited: 5 January 2015] p. 173-183. Available from : Biblioteca UIS. Base de datos SCIENCE DIRECT. Elsevier.

LIEW, Raoul. Droplet behaviour and thermal separation In Ranque-Hilsch vortex tubes. Technische Universiteit Eindhoven. Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor. Holanda: Technische Universiteit Eindhoven. 2013. 194 p.

MEDINA, Robert Patricio. Diseño de banco de prueba de tubo vortex para laboratorio de la ESPOL. Tesis de grado ingeniería mecánica. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de ingeniería en mecánica y ciencias de la producción. 2004. 157p

OLIVER, Ronan. Numerical prediction of primary and secondary flows in a Ranque-Hilsch vortex tube. Degree of masters of philosophy in mechanical engineering. Dublin, IRLANDA. Dublin Institute of Technology. School of Mechanical and Transport Engineering. 2008. 136 p.

ROMERO, Luis Alberto y FUCIÑOS, Raul de Jesus. Estudio y construcción de un tubo vortex (Ranque's). Trabajo de grado ingeniería mecánica. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenieras Físico-Mecánicas. 1979. 102 p.

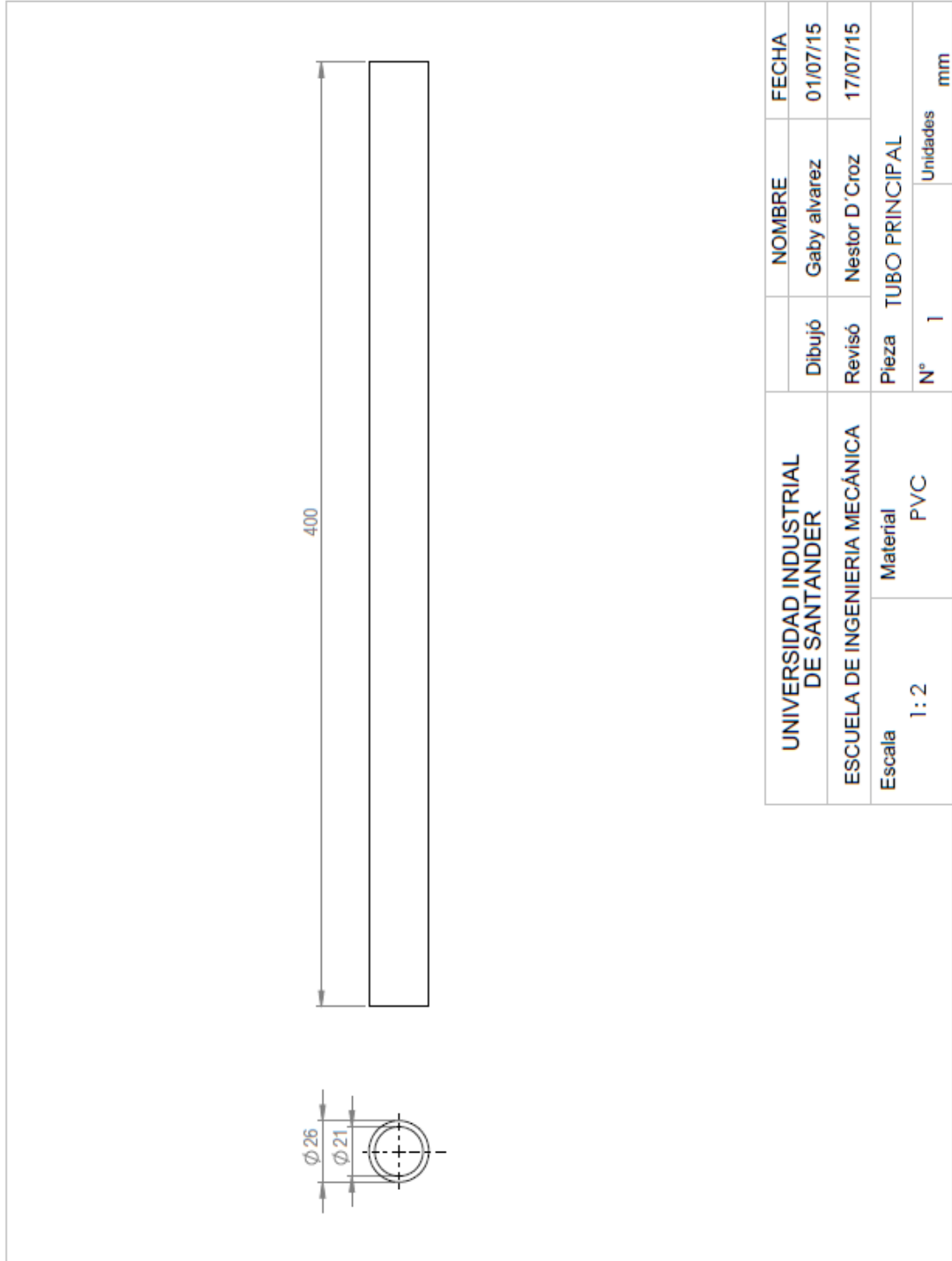
YILMAZ, M., *et al.* A review on design criteria for vortex tubes. Heat Mass Transfer. [online] 2009. Vol 45. [cited: 5 January 2015] p. 613-632.

YUNPENG X., ARJOMANDI M., KELSO R. A critical review of temperature separation in a vortex tube. Experimental Thermal and Fluid Science. [online] 2010. Vol. 34. [cited: 25 January 2015] p. 1367-1374. Available from : Biblioteca UIS. Base de datos SCIENCE DIRECT. Elsevier.

YUNPENG X., ARJOMANDI M., KELSO R., The working principle of a vortex tube. International journal of refrigeration. [online] 2013. Vol 36. [cited: 14 March 2015] p. 1730-1740. Available from : Biblioteca UIS. Base de datos SCIENCE DIRECT. Elsevier.

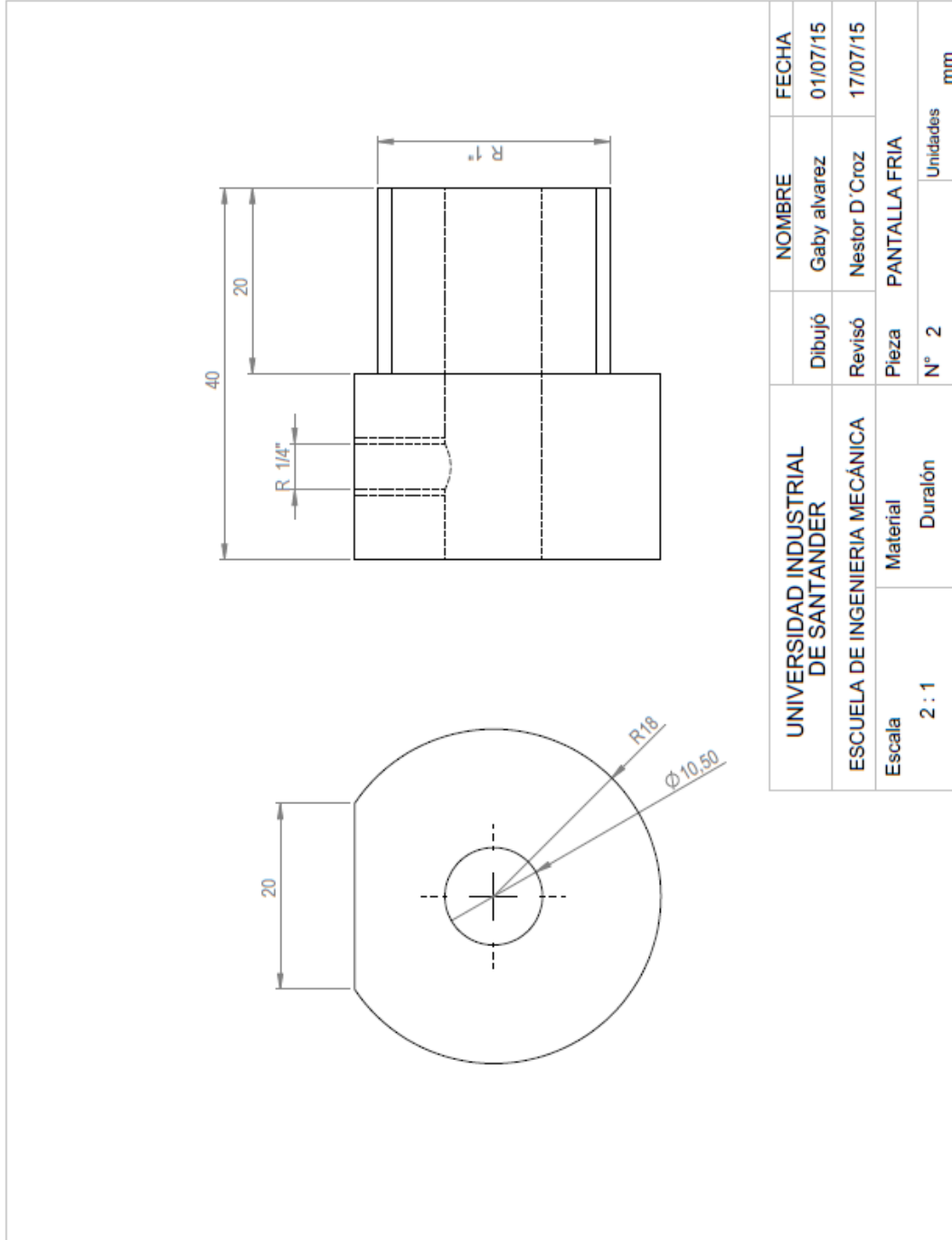
ANEXOS

ANEXO A. Plano del tubo principal

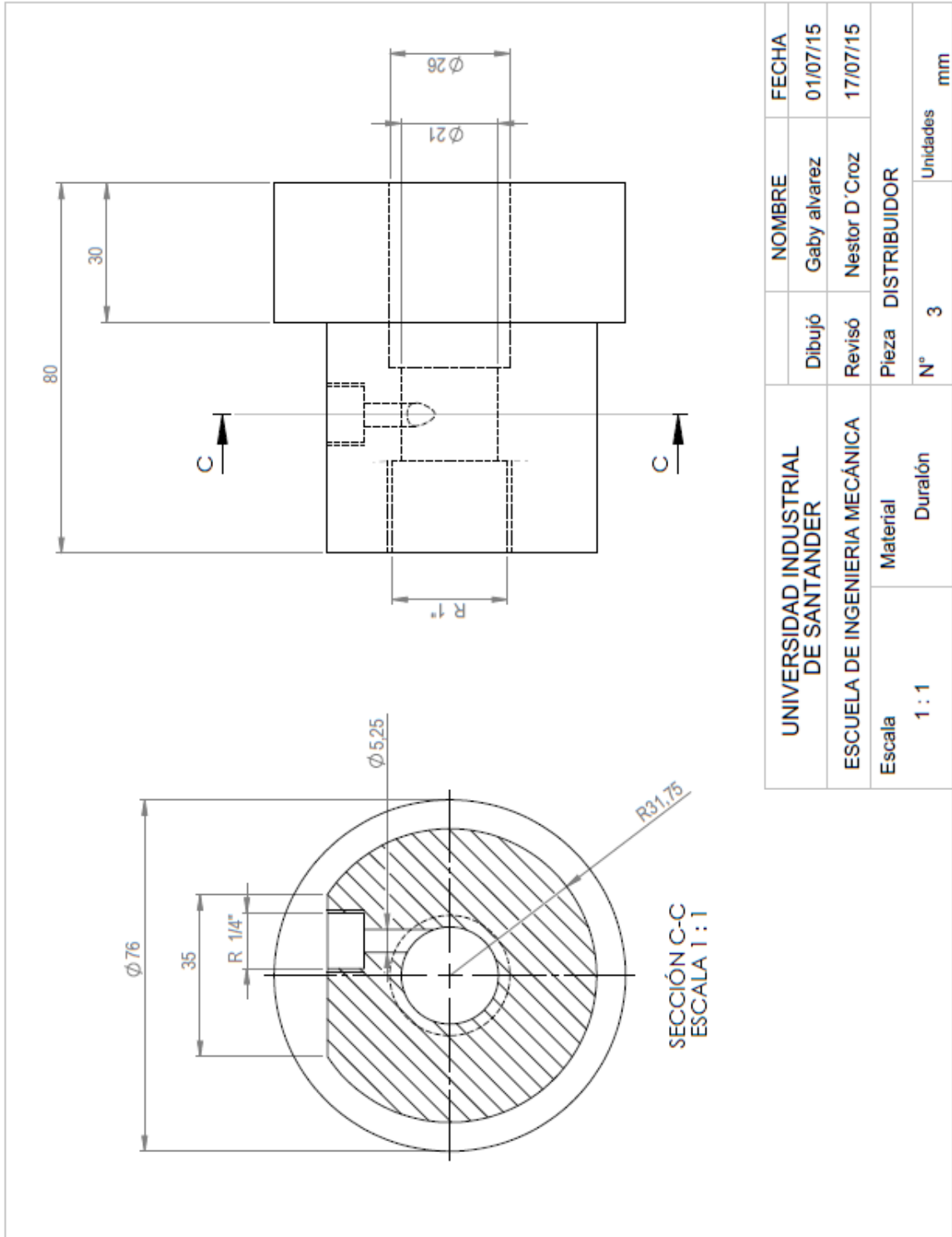


UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		NOMBRE	FECHA
		Dibujó	01/07/15
		Revisó	17/07/15
		Pieza TUBO PRINCIPAL	
Escala	Material	N°	Unidades
1:2	PVC	1	mm

ANEXO B. Plano de la pantalla fría

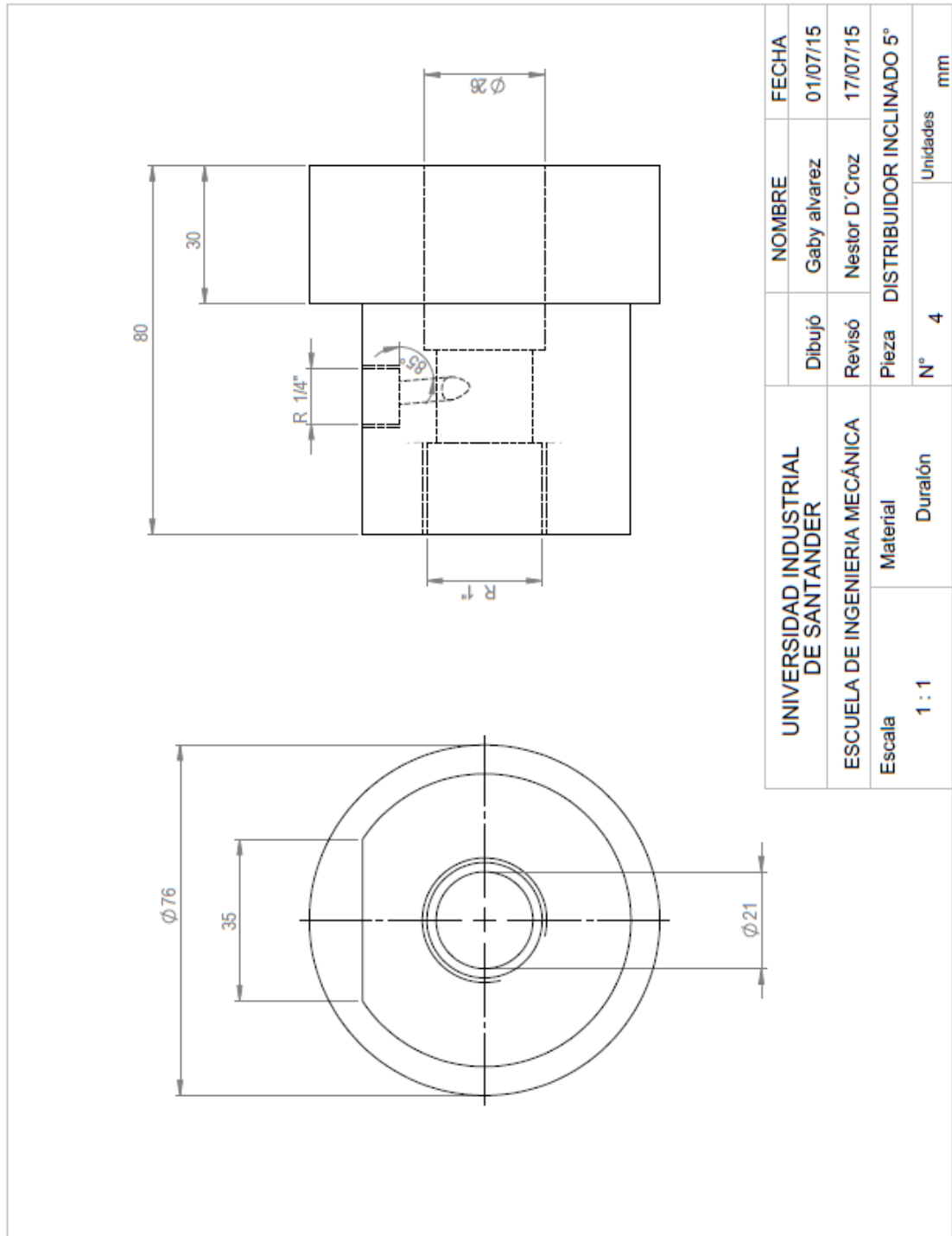


ANEXO C. Plano del distribuidor



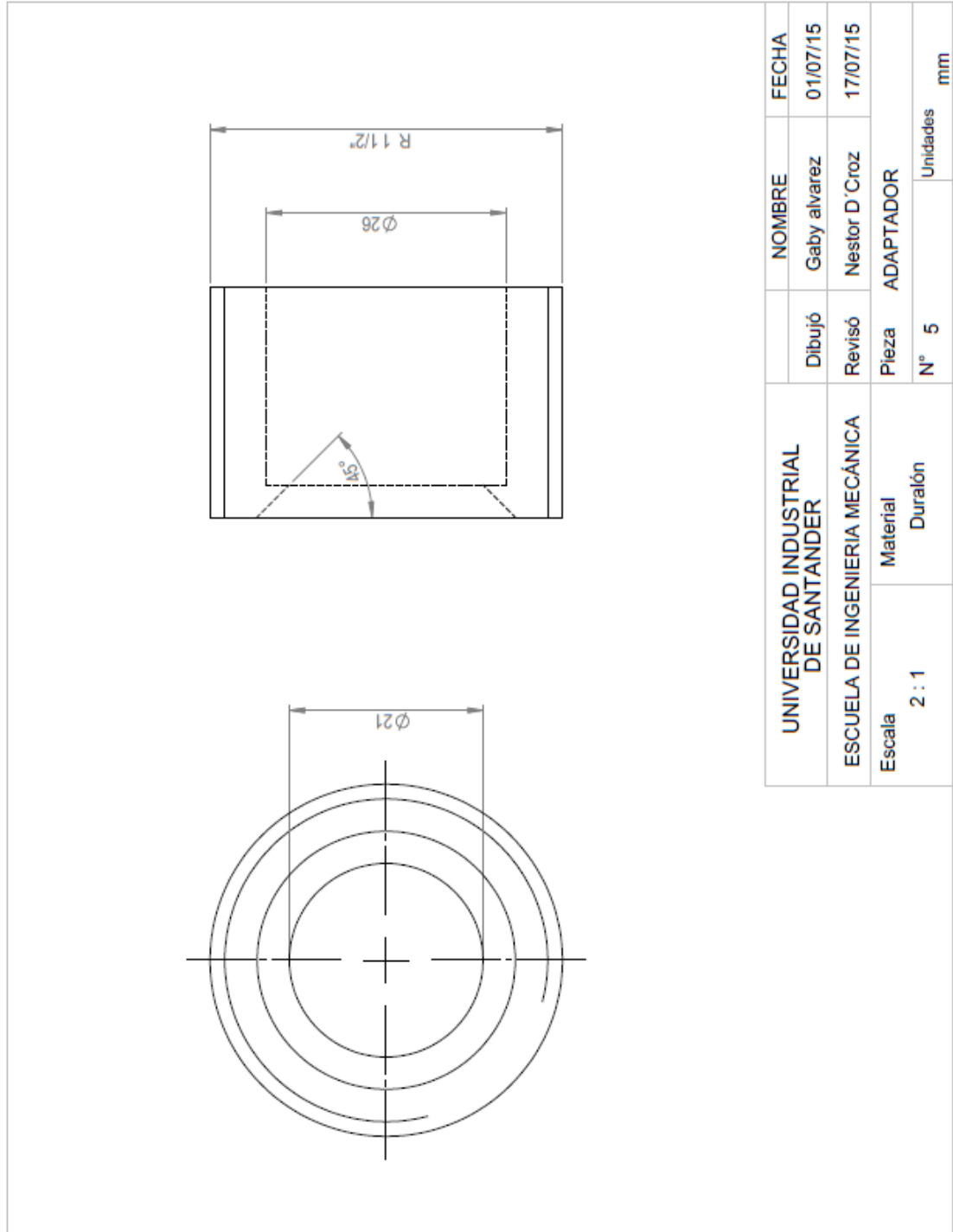
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Dibujó	NOMBRE	FECHA
		Revisó	Gaby alvarez	01/07/15
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA		Pieza DISTRIBUIDOR		
Escala	Material	Duralón	N°	Unidades
1 : 1			3	mm

ANEXO D. Plano del distribuidor inclinado



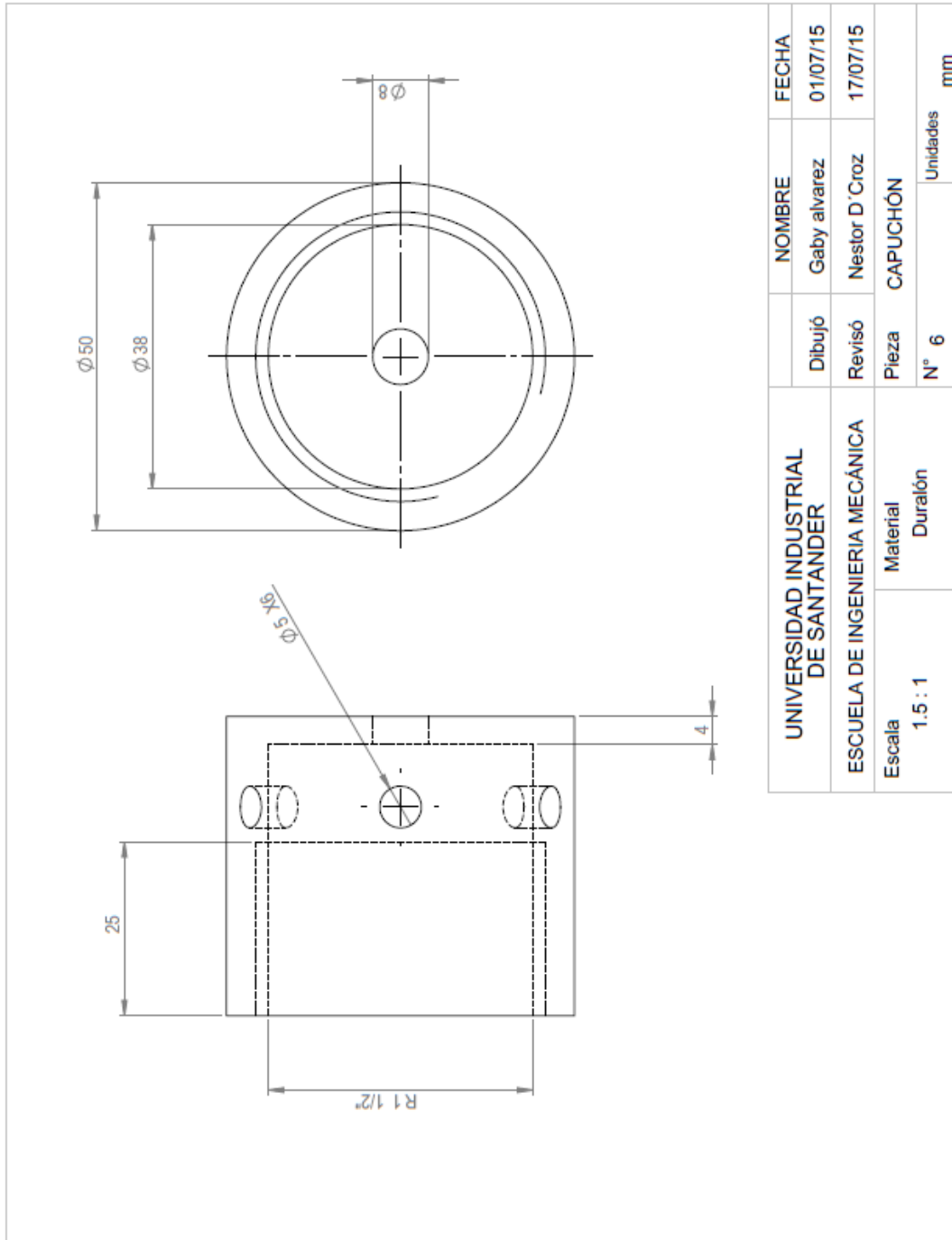
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Dibujó	NOMBRE	FECHA
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA		Revisó	Gaby alvarez	01/07/15
Escala	Material	Pieza	Nestor D' Cruz	17/07/15
1 : 1	Duralón	N°	DISTRIBUIDOR INCLINADO 5°	
		4	Unidades	mm

ANEXO E. Plano del adaptador



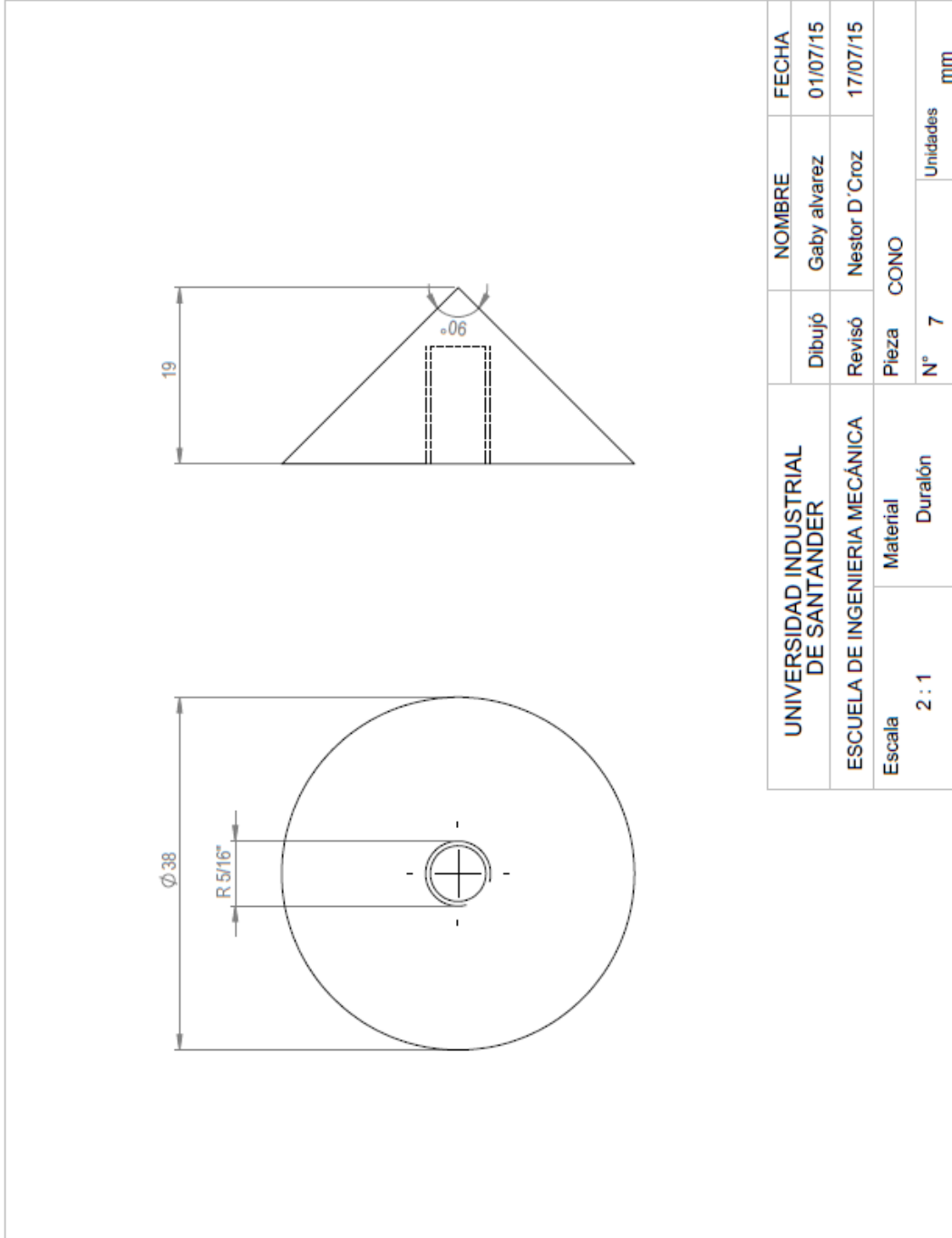
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		NOMBRE		FECHA
		Dibujó	Gaby alvarez	01/07/15
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA		Revisó		17/07/15
		Pieza		ADAPTADOR
Escala	Material	N°	Unidades	mm
2 : 1	Duralón	5		

ANEXO F. Plano del capuchón



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		NOMBRE		FECHA
		Gaby alvarez		01/07/15
Dibujó		Revisó		17/07/15
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA		Pieza		
Material		CAPUCHÓN		
Escala		N° 6		Unidades
1.5 : 1				mm
Duralón				

ANEXO G. Plano del cono



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		NOMBRE		FECHA
		Dibujó	Gaby alvarez	01/07/15
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA		Revisó		17/07/15
		Pieza		CONO
Escala	Material	N°	Unidades	mm
2 : 1	Duración	7		