DECALARACION EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Robert P. Medina S.

**RESUMEN**

Uno de los aspectos de mayor interés y demanda a nivel industrial y comercial son los procesos de refrigeración y aplicaciones. Pero uno de ellos, diferente al conocido por vaporización de un fluido refrigerante, es obtenida por la expansión de aire comprimido en forma de torbellino por un tubo de forma especifica; aplicado con éxito ya en otras partes y presentando una solución conveniente a problemas específicos, aún sin ser conocido detalladamente por nuestro medio académico y profesional.

Este trabajo expone los criterios y características del mencionado proceso, conocido como efecto Ranque-Hilsch, y del dispositivo que lo produce, llamado tubo vortex o de Ranque-Hilsch, como base para el diseño de un banco de pruebas experimental. Partiendo desde los orígenes y diversos estudios sobre la naturaleza y comportamiento del tubo vortex, se proyectan los pasos necesarios para determinar el equipo necesario que componen el banco.

Se realiza una breve introducción y explicación de este proceso de enfriamiento, sus características y principios básicos, además de sus variantes existentes para un mejoramiento del mismo.

Seguido, se entregan condiciones y consideraciones para el diseño específico del tubo. Se incluyen las demandas, tanto de presión como de caudal de aire, para luego calcular las partes del equipo, que comprende: medio de suministro de aire comprimido, tubo de expansión y dimensiones, conexiones de entrada y salida, así como los instrumentos de operación y control.

Posteriormente, se realizara el diseño del tubo vortex y la selección de los componentes del equipo, además de una breve explicación sobre su operación e instalación dentro del laboratorio.

Se expondrán los tipos de pruebas que pueden realizarse y los resultados que dichas pruebas deben aportar. Finalmente se entrega un análisis económico sobre el costo de realización que presentaría este banco de pruebas.

**INDICE GENERAL**

Pág.

RESUMEN ………………………………………………………………………. II

INDICE GENERAL ……………………………………………………………... IV

ABREVIATURAS ……………………………………………………………….. VII

SIMBOLOGÍA …………………………………………………………………… VIII

INDICE DE FIGURAS ………………………………………………………….. IX

INDICE DE TABLAS ……………………………………………………………. XI

INTRODUCCION ……………………………………………………………….. 1

CAPITULO 1

1. FACTIBILIDAD DE REALIZACIÓN DEL DISEÑO ………………….……. 2

1.1 Objetivo General y Particulares .……….……………………………... 2

1.2 Usos del Equipo Experimental en los

Laboratorios de la FIMCP ………………………………………...…… 3

CAPITULO 2

2. TEORIA DE REFRIGERACIÓN POR TUBO VORTEX

Y EFECTO RANQUE-HILSCH ………………………………………...…… 5

2.1 Orígenes del Efecto Ranque-Hilsch

y Características del Tubo Vortex ………………………………...….. 5

2.2 Usos y Aplicaciones del Tubo Vortex en Refrigeración ………..…... 21

CAPITULO 3

3. CALCULO DEL EQUIPO ……………………………….…………………… 31

3.1 Tubo de Expansión ……………………………………….……………. 31

3.2 Requerimientos Frigoríficos …………………………………..……….. 42

3.3 Calor Disipado por el Flujo ……………………….………….………... 46

CAPITULO 4

4. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE AIRE COMPRIMIDO …………………… 50

4.1 Cálculo de Requerimientos …………………………………….……... 50

4.1.1 Consumo Probable y Total ……………………………….….….. 51

4.1.2 Selección y Características

Generales del Compresor ……………………………………….. 53

CAPITULO 5

5. DISEÑO DEL BANCO EXPERIMENTAL …………………….………….... 55

5.1 Descripción del Tubo Vortex ……………….………………………..... 55

5.2 Equipo Básico Complementario ………………………………………. 57

CAPITULO 6

6. DESCRIPCIÓN GENERAL DE INSTALACIÓN Y FUNCIONAMIENTO 77

6.1 Distribución de Operaciones …………………………………….…… 77

6.2 Ubicación del Equipo ………………………………………….………. 79

6.3 Descripción de la Estructura de Anclaje ………………………….…. 80

6.4 Condiciones de Instalación y Funcionamiento ……………….……... 82

6.4.1 Operación y Control …....……………………………………... 83

6.4.2 Pruebas de Presión y Temperaturas ……………………...… 84

6.5 Recomendaciones Generales de Instalación ……………………..... 85

CAPITULO 7

7. TIPO DE PRUEBAS Y RESULTADOS FINALES A OBTENER …….…. 89

7.1 Variaciones de Temperatura y Caudal ……………………..……...… 90

7.2 Comparación de Potencia Frigorífica ………………………….……... 98

CAPITULO 8

8. ANALISIS ECONOMICO DEL EQUIPO …………………………….…… 101

CAPITULO 9

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES …………………………… 111

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

**ABREVIATURAS**

N8, N11 Acabado Superficial Grado 8 y 11, respectivamente

Ar Argón

bar Bares de Presión

HP Caballos de Potencia

X Caída de Presión Normalizada en le Plano de Entrada

cp Calor Específico a Presión Constante

ΔTc Diferencia de Temperatura Fría

ΔTh Diferencia de Temperatura Caliente

CO2 Dióxido de Carbono

USD Dólares Americanos

Qc Energía Calorífica obtenida en el Extremo Frío

μ Fracción Fría del Flujo

frig./día Frigorías por Día

H2 Hidrógeno

kg/cm2 Kilogramos por Centímetro Cuadrado

psi Libras por Pulgada Cuadrada

CH4 Metano

m3 Metros Cúbicos

mm Milímetros

mm2 Milímetros Cuadrados

min Minutos

Pr Número de Prandtl

patm Presión Atmosférica

p0 Presión de Entrada

 Presión del Extremo Caliente en punta del Cono Estrangulador

CFM Pies Cúbicos por Minuto

p\*/p0 Relación Crítica de Presiones de Entrada al Tubo

pi/p0 Relación de Presiones de Entrada y Salida de la Boquilla

γ Relación de Calores Específicos cp/cv

di/D Relación Diámetro del Inyector respecto al Diámetro Nominal

dc/D Relación Diámetro de Pantalla respecto al Diámetro Nominal

D/L Relación entre Diámetro Nominal y Longitud del Tubo

SAE Society of Automotive Enginners

**SIMBOLOGIA**

r, θ, z Coordenada Cilíndrica Radial, Axial y Longitudinal,

respectivamente

di Diámetro de Inyector o Boquilla

dc Diámetro de Salida Fría

D Diámetro Nominal del Tubo

η Eficiencia

 Flujo Másico de Entrada

, Flujo Másico en la Salida Fría y Caliente, respectivamente

ºC Grados Centígrados o Celsius

º Grados Sexagesimal

i Inyector o Boquilla

L Longitud del Tubo

μm Micrómetro

% Por Ciento

p0 Presión de Entrada

pi Presión de Salida de la Boquilla

p\* Presión Crítica de Entrada al Tubo

pc Presión de la Salida Fría

‘’ Pulgadas

S Punto de Estancamiento del Fluido dentro del Tubo

R Rosca Withworth tipo Gas para conductos; Radio Adimensional

0 Subíndice del Aire de Entrada

h Subíndice del Aire Caliente

c Subíndice del Aire Frío

T0 Temperatura de Entrada

Tadiab. Temperatura de Proceso Adiabático

Tc, Th Temperatura de Salida Fría y Caliente, respectivamente

 Velocidad del Aire de Entrada

,  Velocidad en Salida Fría y Caliente, respectivamente

**INDICE DE FIGURAS**

Pág.

Figura 2.1 Dibujo esquemático de un tubo vortex y sus

partes principales ……………………………………………..….. 8

Figura 2.2 Esquematización idealizada de vórtices libre y forzado

formados dentro del tubo vortex a partir de la expansión

de aire comprimido ……………………………………………...... 8

Figura 2.3 Tubo vortex modelo ‘de contra flujo’ …………………….……. 10

Figura 2.4 Tubo vortex modelo ‘de un solo flujo’ …………………..……. 10

Figura 2.5 Tubo vortex tipo cónico …………………………………………. 17

Figura 2.6 Boquilla de Laval ………………………………………………… 17

Figura 2.7 Separación y distribución del flujo dentro del tubo y

transferencia de energía capa a capa,

según Schultz-Grunow …………………………………………. 19

Figura 2.8 Modelo de Fulton, empleado por Stephan, de la separación

y distribución del flujo, punto de estancamiento, S,

y dirección radial de la transferencia de energía ……………. 19

Figura 2.9 Robot soldador de carrocerías utilizando un chorro de aire

frío directamente en el punto de contacto ……………………. 24

Figura 2.10 Línea de sellado de tubos plásticos con un tubo vortex

acoplado en las mordazas selladoras ………………………… 24

Figura 2.11 Esquema de un tubo vortex adaptado al traje de un

trabajador de una fundición ……………………………………. 26

Figura 2.12 Fotografía del cinturón personal enfriado

por un tubo vortex ……………………………………………….. 26

Figura 2.13 Enfriado de zonas críticas en conformado

de partes plásticas ………………………………………………. 28

Figura 2.14 Conformado de tanques de combustible por soplado de aire

comprimido enfriado por tubos vortex ………………………… 29

Figura 3.1 Sección de las boquillas de entrada del tubo

utilizado por Lin ………………………………………………….. 37

Figura 3.2 Diversas formas de inyectores de aire ………………………... 39

Figura 5.1 Circuito de refrigeración convencional ……..…………….…… 56

**INDICE DE FIGURAS**

Pág.

Figura 5.2 Esquema del modelo propuesto para el

banco de pruebas de un sistema de

refrigeración por tubo vortex …………………...………………. 58

Figura 5.3 Circuito del banco de pruebas por tubo vortex ………………. 59

Figura 5.4 Circuito básico de operación de un tubo vortex ……………… 60

Figura 5.5 Partes de la operación en el circuito del tubo vortex …….….. 61

Figura 6.1 Ubicación de estribos para rotámetros …………………..…… 81

Figura 7.1 Coordenadas cilíndricas en el plano de entrada …………..… 94

Figura 7.2 División del gas dentro del tubo vortex …………………..…… 94

**INDICE DE TABLAS**

Pág.

Tabla 1 Condiciones óptimas de la relación

longitud/diámetro del tubo ……………………………………… 34

Tabla 2 Valores de diámetros nominales de tubos vortex

Experimentales ………………………………………………….. 35

Tabla 3 Condiciones óptimas de la relación diámetro de

inyector/diámetro nominal ……………………………………… 37

Tabla 4 Condiciones óptimas de la relación diámetro de

pantalla/diámetro nominal ……………………………………… 40

Tabla 5 Costos unitarios y monto parcial del 1er Grupo ……………. 104

Tabla 6 Cantidad de material empleado en el

tubo vortex y costos …………………………………………… 105

Tabla 7 Tiempos y valores de mecanizado de

piezas del tubo vortex ………………………………….……… 107

Tabla 8 Valores de tratamiento térmico y

protección superficial del acero ………………………….…… 108

Tabla 9 Valores individuales y parcial del 2do Grupo ……………….. 108

Tabla 10 Valores individuales y parcial del 3er Grupo ……………….. 109

Tabla 11 Porcentajes de valores y monto total del equipo …………... 110