

DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPO SILENCIADOR PARA LA ELIMINACIÓN DE  
RUIDO INDUSTRIAL EN LA DESCARGA DEL COMPRESOR C-301 DE LA  
UNIDAD U300 MODELO IV DEPARTAMENTO DE CRACKING CATALÍTICO III  
DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA ECOPETROL S.A

KEVIN MARTIN CALDERÓN FLÓREZ  
JOHAN ANDRÉS SERRANO CONTRERAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2018

DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPO SILENCIADOR PARA LA ELIMINACIÓN DE  
RUIDO INDUSTRIAL EN LA DESCARGA DEL COMPRESOR C-301 DE LA  
UNIDAD U300 MODELO IV DEPARTAMENTO DE CRACKING CATALÍTICO III  
DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA ECOPETROL S.A

KEVIN MARTIN CALDERÓN FLÓREZ  
JOHAN ANDRÉS SERRANO CONTRERAS

Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Químico

Director  
GIOVANNI MORALES MEDINA  
Ingeniero Químico, Dr.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2018

## **DEDICATORIA**

Dedico y encomiendo mis esfuerzos a mi madre María Editta Flórez Noriega, hermosa entre las mujeres y a mi padre Carlos Leopoldo Calderón Paba, un hombre de mucho valor.

A todos los familiares, amigos y docentes que influyeron en mi formación profesional y por ultimo pero no menos importante a Minelva Ester Noriega Mesa por nunca perder la esperanza de que su pequeño se convertiría en científico

**KEVIN MARTIN CALDERÓN FLÓREZ**

## **DEDICATORIA**

Dedico este título principalmente a mi madre Nellys Serrano Contreras, por su apoyo incondicional que de una u otra forma a través de las circunstancias, las vivencias, las enseñanzas, los buenos y malos momentos desde una perspectiva social, influyeron para generar en mí la conciencia necesaria para querer salir adelante. De igual forma a mis hermanos por estar ahí cuando se requirió.

A mis tías y tíos que con sus aportes mantuvieron firme mi decisión de querer ser profesional, en especial a Miladys Serrano Contreras. A mis primos y primas con sus ejemplos de vida, con sus palabras y demás calificativos enfundaban valor en mí, resaltando a Tatiana Moreno, Mayra Diaz, Yurleydis Utria, en fin.

A mis amigos de la vida, Franklin, Pablo, Gonzalo, Hernando, Jesús, por los momentos compartidos, por las experiencias, por las enseñanzas, por los tiempos de ocio (#Halo). Y los que conocí durante este trayecto universitario Siris, Coronel, Rafael, Mylle, Paula, Brayan Reyes, Martha, Danilo, Kevin, Gabriel, Astrid, Jasmin, Karold, Brayan Toro, si se me paso alguien de igual se recuerda, por prestarme atención, por los momentos de jovialidad, por su ayuda en los días de fragilidad, cordialidad, risas, eufemismos, penurias, sustos en los parciales, en fin por estar en los momentos preciados que hicieron llevaderos los días en la Universidad, tienen un lugar en lo que sentimentalmente se denomina Corazón, y en mi memoria. A mi amigo Angulito y Lina claro está, por todo el apoyo por conformar ese inigualable trípode, por los momentos en Cartagena, Arigato Sushi, y de más llenos de felicidad desbordada que generaron un enorme síndrome de abstinencia por lo inefables que fueron y se recuerdan cuando ocurren los altibajos.

A mis docentes en el colegio que constantemente me recuerdan y me apoyaron en la distancia, mandándome las mejores energías, que aún mantienen vivo ese sentimiento de transmitir conocimiento y forjar mejores generaciones.

En general a todas las personas que hacen parte de mi plano existencial que sirvieron como médium para dar por cumplido este importante paso.

**JOHAN ANDRÉS SERRANO CONTRERAS**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos:

Al doctor Giovanni Morales Medina, por brindarnos esa gran oportunidad de llevar y culminar a cabalidad este proyecto de grado, por su guía, su formación integral y profesional, excelente calidad humana que siempre predisponía de los espacios necesarios para entender y explicar todo lo que se necesitaba para culminar con éxito este proyecto.

A la Gerencia de la Refinería de Barrancabermeja Ecopetrol S.A. por servir como medio y calificador que dio paso y fin a este proyecto de grado y su constante cooperación en todo lo que fuese necesario.

Al ingeniero Químico Christian Angulo Beleño, por su guía, tics, y los datos suministrados y el apoyo en los momentos que dieron pie de partida para llevar a su total finalización y éxito esta tesis de grado.

Y por último a la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, por las enseñanzas, la formación integral, el conocimiento y por forjar excelentes personas que estuvieron brindando su apoyo y su predisposición.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	15
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2. METODOLOGÍA .....	20
2.1 PARÁMETROS.....	20
2.2 MODELACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE SILENCIADORES.....	21
2.3 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	21
2.4 CALCULO DE PÉRDIDAS POR INSERCIÓN .....	22
3. RESULTADOS.....	23
3.1 PARÁMETROS PARA EL SILENCIADOR.....	23
3.2 MODELACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL SILENCIADOR.....	24
3.3 SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SILENCIADOR.....	29
3.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON LA GEOMETRÍA DEL SILENCIADOR ...	33
3.5 CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE INSERCIÓN.....	40
4. CONCLUSIONES .....	42
5. RECOMENDACIONES.....	43
BIBLIOGRAFIA.....	44
ANEXOS.....	47

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Especificaciones de operación para el equipo silenciador. ....	23
Tabla 2. Especificaciones de diseño y construcción encontradas en literatura.....	23
Tabla 3. Condiciones de operación del SI.....	24
Tabla 4. Espesor para los componentes principales del SI-4201 .....	26
Tabla 5. Reporte de reducción de LD respecto a dimensiones iniciales.....	41

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Metodología .....	20
Figura 2. Modelo de silenciador elaborado a partir del SI-4702 para la U-300 .....	28
Figura 3. Cabeza toriesferica silenciador .....	28
Figura 4. Perfil de Presión a lo largo del eje según.....	31
Figura 5. Perfil de velocidad del trabajo en comparación según Mori .....	31
Figura 6. Perfil de presión .....	32
Figura 7. Perfil de velocidad.....	32
Figura 8. Número de Mach .....	33
Figura 9. -20% de altura.....	36
Figura 10. +20% Diámetro .....	37
Figura 11. -20% Diámetro .....	38
Figura 12. +20 Altura .....	39

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Sección de compresión de aire hacia el regenerador.....	47
Anexo B. Sistema propuesto en la sección de compresión de aire hacia el regenerador. ....	48
Anexo C. Localización en campo del venteo atmosférico (ubicación del equipo silenciador.....	49
Anexo D. Plano del equipo silenciador propuesto.....	50

## RESUMEN

**TITULO:** DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPO SILENCIADOR PARA LA ELIMINACIÓN DE RUIDO INDUSTRIAL EN LA DESCARGA DEL COMPRESOR C-301 DE LA UNIDAD U300 MODELO IV DEPARTAMENTO DE CRACKING CATALITICO III DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA ECOPETROL S.A\*

**AUTORES:** JOHAN ANDRES SERRANO CONTRERAS  
KEVIN MARTIN CALDERON FLOREZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Procesos FCC, Silenciadores, técnicas modales, silenciadores híbridos, Flow Simulation, SolidWork, Cad, escalamiento, análisis de sensibilidad, acústica, ruido, contaminación auditiva, presión sonora.

### DESCRIPCIÓN:

Los Procesos de Craqueo Catalítico FCC, son uno de los procesos más importantes para la obtención de gasóleos en la industria del petróleo, estos procesos son más eficientes en comparación con los procesos de Craqueo Térmico. La mayoría de las líneas de producción tienen como semejanza un regenerador de catalizador el cual por combustión retira el coque acumulado en los sitios activos; para esta operación se toma el aire de la atmosfera a través de un compresor y se regula la cantidad de aire suministrado por medio de una válvula de venteo con descarga atmosférica en la línea de paso, la cual se cierra gradualmente incrementando el flujo de aire al regenerador. Este venteo atmosférico genera ruido de aproximadamente 130 dB el cual se considera contaminación auditiva y por norma en Salud Ocupacional, un trabajador no puede estar expuesto a más de 90 dB en un periodo de 8 horas laborales.

Se plantea la implementación de un equipo silenciador, el cual será instalado en la válvula de venteo mitigando el ruido producido alrededor de los 90 dB exigidos por la norma, para garantizar la seguridad de los operarios; para ello se buscaron referentes bibliográficos que enmarquen la información necesaria, validando la opción más viable.

Se inició con un escalamiento de un equipo homologado, se ajustaron los parámetros dimensionales tales como diámetros y alturas así como la elección de la configuración propia a simular, sumado a ello se dimensiono el equipo por medio de un CAD del software SolidWork 2017.

A través de la herramienta Flow Simulations, se hizo un barrido en donde se analizó el cambio de los diferentes perfiles; presión, velocidad y número de mach para reportar la influencia de estos a lo largo de la trayectoria y posteriormente calcular la disminución o atenuación de ruido.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Giovanni Morales Medina

## ABSTRACT

**TITLE:** DIMENSIONING OF SILENCER EQUIPMENT FOR THE ELIMINATION OF INDUSTRIAL NOISE IN THE DISCHARGE OF THE COMPRESSOR C-301 OF THE UNIT U300 MODEL IV DEPARTMENT OF CATALYTIC CRACKING III OF THE REFINERY OF BARRANCABERMEJA ECOPETROL SA\*

**AUTHORS:** JOHAN ANDRES SERRANO CONTRERAS  
KEVIN MARTIN CALDERON FLOREZ\*\*

**KEYWORDS:** FCC processes, silencers, modal techniques, hybrid silencers, Flow Simulation, SolidWork, Cad, scaling, sensitivity analysis, acoustics, noise, noise pollution, sound pressure.

### DESCRIPTION:

The FCC Catalytic Cracking Processes, are one of the most important processes for obtaining gas oils in the petroleum industry, these processes are more efficient compared to the processes of Thermal Cracking. Most production lines have a similar catalyst regenerator which, by combustion, removes the accumulated coke in the active sites; for this operation the air is taken from the atmosphere through a compressor and the amount of air supplied is regulated by means of a vent valve with atmospheric discharge in the line of passage, which is gradually closed increasing the air flow to the regenerator. This atmospheric vent generates noise of approximately 130 dB which is considered as auditory contamination and as a rule in Occupational Health, a worker can not be exposed to more than 90 dB in a period of 8 working hours.

The implementation of a silencing device is proposed, which will be installed in the venting valve mitigating the noise produced around the 90 dB required by the standard, to guarantee the safety of the operators; To do this, bibliographic references were searched to frame the necessary information, validating the most viable option.

It started with a scaling of a homologous equipment, the dimensional parameters such as diameters and heights were adjusted as well as the choice of the own configuration to simulate, added to it the equipment was dimensioned by means of a CAD of the SolidWork 2017 software.

Through the Flow Simulations tool, a sweep was made where the change of the different profiles was analyzed; pressure, speed and number of mach to report the influence of these along the trajectory and later calculate the decrease or attenuation of noise.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering, Chemical Engineering School. Director: Dr. Giovanni Morales Medina

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de craqueo catalítico fluidizado (FCC por sus siglas del inglés *Fluid Catalytic Cracking*) son unos de los procesos más importantes en la industria del petróleo; estos ofrecen una alternativa para incrementar el rendimiento a gasolinas a partir de fracciones pesadas del petróleo<sup>12</sup>. En la operación del FCC es necesario regenerar el catalizador, con el fin de eliminar, por combustión, el coque depositado sobre su superficie y liberar los sitios activos; el coque depositado disminuye la actividad catalítica, con el consecuente impacto en los productos de mayor valor agregado. La relación oxígeno/combustible en la regeneración debe asegurar un rango de temperatura entre 705°C y 740°C<sup>3</sup> con lo cual la operación mantiene la integridad mecánica del catalizador y del equipo, mientras suministra la energía necesaria para las reacciones de craqueo catalítico (integración energética en el proceso).

En la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB), una de las unidades FCC corresponde a la denominada Modelo IV (Departamento de Cracking Catalítico III), en la cual, el catalizador gastado proveniente del reactor R-302, es reactivado en el regenerador R-301. El compresor C-301 es el encargado de inyectar aire al R-301; la operación del C-301 es garantizada por el controlador FIC-03021 (Anexo A), el cual toma la medida de flujo de un sensor tipo Venturi localizado en la succión del compresor.

La variable manipulada con el lazo del FIC-03021 corresponde a la entrada de vapor a la Turbina NC-301. Durante el procedimiento de arrancada de la unidad, una etapa

---

<sup>1</sup>CATEDRA DE PROCESOS INDUSTRIALES, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Departamento de Ingeniería Química, Argentina, 2010, pág. 2-7.

<sup>2</sup>SANCHEZ Gonzalo, Procesos Químicos Cracking Catalítico, Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland, Facultad de Ingeniería, Universidad Pública de Montevideo, Uruguay, Noviembre 2017, pág. 6-15

<sup>3</sup>CUQUERELLA Jesús Mengual, Craqueo Térmico Y Catalítico, Con Y Sin Vapor De Agua, De Alcanos Sobre Zeolitas. Cinética, Desactivación Y Estabilización Del Catalizador, Departament D'enginyeria Química, Universidad de Valencia, 2010, pág. 7-9

corresponde a la apertura de la válvula de venteo de la descarga del C-301; el flujo de aire succionado por el C-301 es liberado a la atmósfera para evitar daños por sobre-presionamiento. Posteriormente, el venteo se cierra gradualmente permitiendo un aumento progresivo de aire en el regenerador (por integridad del R-301 y del catalizador).

Esta operación de arrancada no dispone de ningún sistema de atenuación de ruido para el venteo atmosférico, por lo que el sonido generado alcanza niveles de contaminación auditiva (*i.e.* valores por encima de 130 dB según la resolución 8321 de 1983) por la cual se fija las normas sobre la protección y conservación de la salud y el bienestar de las personas.<sup>4</sup>

Los silenciadores son dispositivos que se encargan de la atenuación del sonido mediante el principio de la degradación de onda, según el cual la velocidad y la presión son disminuidos mediante choques a lo largo de una trayectoria con distancia radial despreciable respecto a su distancia axial<sup>5</sup>; durante la trayectoria, el ruido experimenta resonancia minimizando su frecuencia, mientras el gas alivia su presión y su velocidad antes de su descarga a la atmosfera<sup>6</sup>.

La resonancia depende del tipo de material del conducto, ya que la absorción de la energía de la onda sonora está en función de la masa por unidad de superficie expuesta. La incorporación de materiales absorbentes en los silenciadores mejora la atenuación sonora en tanto que elimina las bandas de paso del TL (índice de pérdidas por transmisión) y mejora su comportamiento a altas frecuencias [7,8]; las bandas de paso corresponden a las diferentes frecuencias características de un sonido complejo denominado como ruido.

---

<sup>4</sup>Resolución 8321 de 1983 Ministerio de Salud, Propiedad de la Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, publicación Diario Oficial, 04/08/1983.

<sup>5</sup>Ih, J.G. y Lee, B.H. Theoretical prediction of the transmission loss of circular reversing chamber mufflers. Journal of Sound and Vibration, 112, 261-272, 1987.

<sup>6</sup>Davern, W.A. Perforated facings backed with porous materials as sound absorbers-an experimental study. Applied Acoustics, 10, 85-112, 1977.

Las ondas en el material adsorbente no se propagan, sino que hacen que las partículas oscilen alrededor de su posición de equilibrio. La vibración de las distintas partículas componentes del medio posibilita la propagación del momento lineal y a la disipación de la energía<sup>7</sup>; las propiedades del material adsorbente conducen a oscilaciones sincronizadas de sus partículas cuando son expuestas a ondas sonoras<sup>8910</sup>.

El desempeño de los silenciadores depende también de la configuración interna del mismo<sup>11</sup>; usualmente los silenciadores son construidos habilitando orificios transversales irregulares por donde el aire transcurre, mientras el ruido es disipado por materiales que disipan el sonido. El dimensionamiento de los internos de los silenciadores puede ser guiado por la solución de las ecuaciones diferenciales derivadas de la ecuación de onda, el balance de energía y el balance de entropía<sup>12</sup>.

Los métodos de solución pueden aplicar algoritmos numéricos por elementos finitos y métodos analíticos, con el propósito de satisfacer las condiciones de contorno en la discontinuidad es de la sección y los modos de propagación<sup>13</sup>.

Con el fin de garantizar el cumplimiento de las normas HSE y el bienestar de los trabajadores, la instalación de silenciadores sobre las válvulas de venteo es una prioridad en la industria de la refinación<sup>14</sup>. Por lo anterior, se requiere el

---

<sup>7</sup>CAMPOSECO Espina Lesbia Ivonne, Medición, Evaluación y Control del Ruido en una Industria de Maquilado de Tubería de Acero, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica Industrial, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala Octubre de 2003, pág. 33

<sup>8</sup>TORRES Picazo María Isabel, Tesis Doctoral Modelado Acústico De Silenciadores Con Material Absorbente, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2006, pág. 15

<sup>9</sup>VALDERRABANO Salazar Sergio A., tesis Control de Ruido en Equipo industrial Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los garza, diciembre de 1997, pág. 6.

<sup>10</sup>CAMPOSECO Espina Lesbia Ivonne, Medición, Evaluación y Control del Ruido en una Industria de Maquilado de Tubería de Acero, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica Industrial, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala Octubre de 2003, pág. 38

<sup>11</sup>DENIA, F.D. Modelado del comportamiento acústico de silenciadores de escape mediante técnicas analíticas y métodos de Elementos Finitos. Tesis doctoral, Valencia, 2004.

<sup>12</sup>HUGHES, W.F., Gaylord, E.W. Ecuaciones básicas de las Ciencias de la Ingeniería. McGraw-Hill, México, 1971.

<sup>13</sup>MARTINEZ Bordes Manuel José, Modelado analítico-numérico y caracterización experimental de silenciadores de escape híbridos, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Abril del 2010, pág. 10

<sup>14</sup>RUIZ Casal Efrén, Trabajo de investigación, universidad de la laguna, facultad de medicina, cátedra de otorrinolaringología, contaminación acústica: efectos sobre parámetros físicos y psicológicos, pág. 28

dimensionamiento de un silenciador para el compresor C-301 de la unidad Modelo IV de la GRB (Anexo B); el silenciador será instalado como se observa en el Anexo C.

En este documento se presentan los resultados más importantes del dimensionamiento de un silenciador para el venteo del proceso descrito anteriormente. El dimensionamiento de los silenciadores se efectúa por medio de simulación con el programa FLOW SIMULATION para la obtención de perfiles de temperatura, presión y velocidad; las geometrías de los silenciadores analizados fueron generadas por medio del programa SOLIDWORDS.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Dimensionar un equipo silenciador para la válvula ubicada en la línea del compresor C-301 de la unidad Modelo IV del departamento de cracking Catalítico de la refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol S.A.

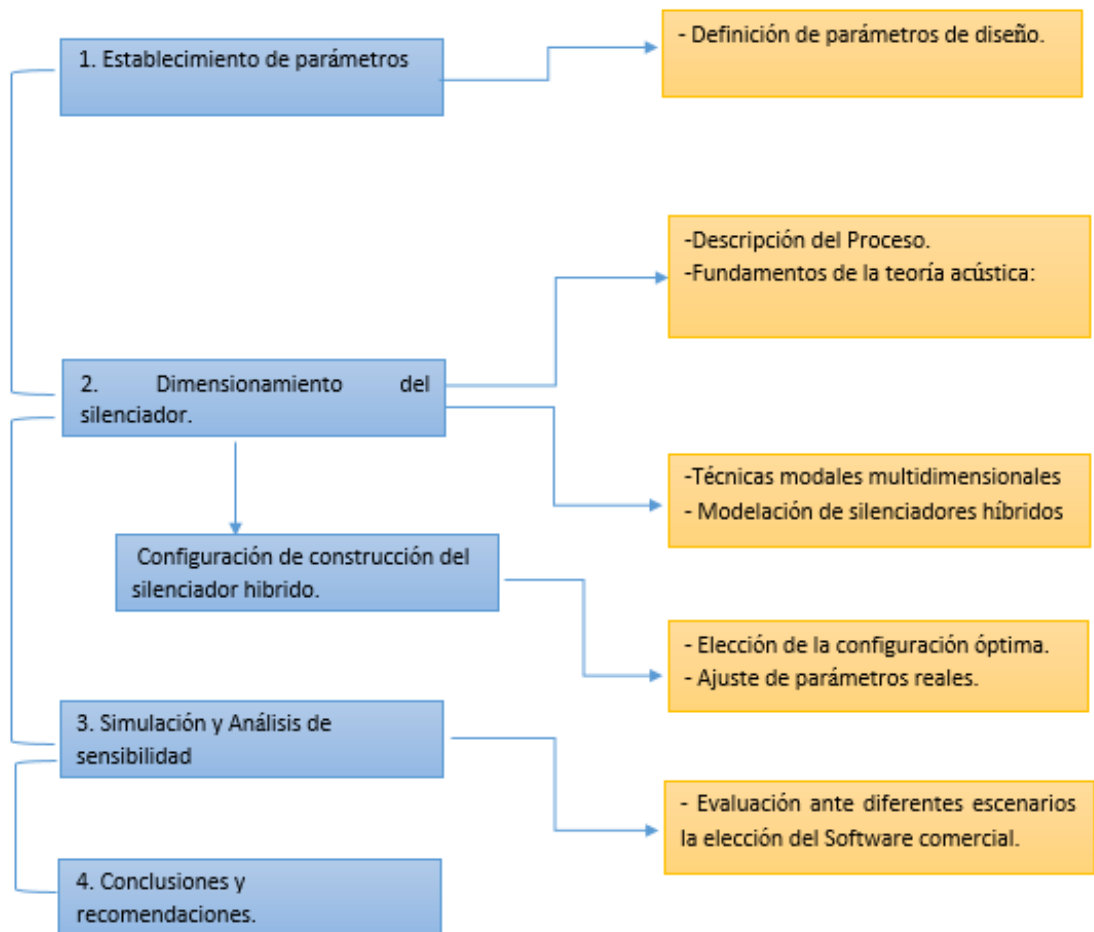
### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

1. Revisar los parámetros con mayor influencia en el dimensionamiento y la operación de los silenciadores.
2. Diseñar el equipo silenciador acoplado a la válvula a partir de su comparación con un silenciador homólogo.
3. Simular la operación del equipo silenciador considerando diferentes dimensiones.

## 2. METODOLOGÍA

En la siguiente figura se presenta la metodología seguida durante el desarrollo del documento.

Figura 1. Metodología



### 2.1 PARÁMETROS

Una búsqueda en la literatura fue efectuada para determinar los parámetros más influyentes en el desempeño de los silenciadores.

## **2.2 MODELACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE SILENCIADORES.**

El dimensionamiento del silenciador fue asumido como un modelo homólogo al silenciador SI-4201 de la planta UOPII. Las dimensiones del silenciador fueron definidas según la similitud con el SI-4201 por medio del número de Reynolds para las condiciones de flujo de aire de la U-300. Para la modelación virtual de las dimensiones se escogió como programa base SOLIDWORKS, dicho programa permite generar un CAD en 3D ajustando tanto las dimensiones especificadas como la configuración propuesta. La interfaz gráfica de este paquete expone diferentes parámetros de diseño a lo largo de los puntos de contorno necesarios para dar una validación en la eliminación de decibeles y obtención del índice de pérdidas por transmisión.

## **2.3 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

SOLIDWORKS cuenta con un paquete llamado FLOW SIMULATIONS, el cual permite hacer un análisis fluido dinámico del sistema diseñado; para la simulación se establece el tipo de fluido, en este caso aire, y se incorporan las condiciones de operación. FLOW SIMULATIONS permite la obtención, a través de una matriz gráfica, de los diferentes perfiles de temperatura, presión, velocidad, y número de mach a lo largo del eje en dirección del flujo.

Una vez obtenido el prototipo se hace diferentes ajustes por medio de sus herramientas dimensionales, para dar con distintos escenarios previstos (análisis de sensibilidad), con la intención de obtener una variante y verificar los parámetros de control, en este caso la longitud y el diámetro.

## 2.4 CALCULO DE PÉRDIDAS POR INSERCIÓN

Las pérdidas por inserción en el silenciador fueron calculadas utilizando la ecuación de Diferencia de Nivel  $LD$  para determinar el nivel de atenuación.<sup>15</sup>

$$LD = 20 \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$$

En esta ecuación,  $LD$  es una medida en decibeles que establece la relación de la presión sonora en un punto antes del silenciador ( $P_1$ ) y en un punto después del silenciador ( $P_2$ ), y establece la pérdida de inserción que el equipo otorga o atenúa por el paso del aire a través del equipo. Las presiones para el cálculo de las pérdidas por inserción fueron obtenidas de las simulaciones ejecutadas con FLOW SIMULATIONS.

---

<sup>15</sup>Blackstock, D. Fundamentals of physical acoustics. Wiley-Interscience, New York, 2000.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 PARÁMETROS PARA EL SILENCIADOR

Este silenciador se utiliza únicamente durante los períodos de arrancada de la unidad, por lo que su funcionamiento intermitente, sin embargo el período de ventilación podría extenderse durante días durante las condiciones de arranque. Por lo tanto, el silenciador debe diseñarse para una operación continua. Las especificaciones de operación del silenciador son presentadas en la Tabla 1. De otro lado, los reportes de diseño y construcción de silenciadores sugieren los parámetros presentados en la Tabla 2 [Departamento de diseño GRB]

Tabla 1. Especificaciones de operación para el equipo silenciador.

Variable	Unidad	Mínimo	Operación	Máximo
Presión	[psig]	16	20	22
Temperatura	[oF]	238	285	310
Flujo	[Lb/h]	161807	196207	215821

Fuente: Departamento de diseño GRB

Tabla 2. Especificaciones de diseño y construcción encontradas en literatura<sup>16</sup>

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN		
Temperatura diseño:		400 °F
Presión diseño		50 psig
Material	Carcaza	ASTM A285 GR C
	Internos	ASTM A285 GR C
	Relleno	Variados
Conexión entrada:		12" ANSI CL 150#, RF; Wn
Instalación prevista	Escape	Atmosférico
	Posición	Vertical

Las dimensiones para el silenciador fueron escaladas a partir del silenciador SI-4201; se escogió este silenciador como base debido a que sirve con el mismo

<sup>16</sup>GUZMAN Carreño Luis Javier, Diseño Mecánico De Recipientes Bajo El Código ASME Sección VIII División 1, Universidad Simón Bolívar, sartenejas, Venezuela, septiembre del 2016.

propósito para la unidad de craqueo catalítico UOP-II; este silenciador SI-4201 es de un tamaño mayor ya que recibe un flujo de aire de aproximadamente 485970 lb/h según la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones de operación del SI.

Variable	Unidad	Operación
Presión	[psig]	17.9
Temperatura	[oF]	350
Flujo	[Lb/h]	485970

Fuente: Hojas de especificaciones equipos unidad UOP-II, GRB]

### 3.2 MODELACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL SILENCIADOR

A partir de las Tablas 1 y 3 se aplicó la similitud de régimen de flujo utilizando la igualdad entre los números de Reynolds.

Para el escalamiento del silenciador se empleó el número de Reynolds para mantener las condiciones de flujo del prototipo, lo más similar posible a las del SI-4201.

$$\text{Ecuación 1} \quad Re_{UOPII} = Re_{MIV}$$

$$\text{Ecuación 2} \quad \left(\frac{4Q_m}{\pi\mu D}\right)_{UOPII} = \left(\frac{4Q_m}{\pi\mu D}\right)_{MIV}$$

Donde:

- $Q_m$ : Flujo másico.
- $D$ : diámetro de los cilindros.
- $\mu$ : viscosidad del fluido.

Ambos silenciadores trabajan con el mismo fluido y a condiciones similares de operación el término de la viscosidad es despreciable con respecto al cambio de flujo másico entre un silenciador y el otro, de tal manera:

$$\text{Ecuación 3} \quad D_{MIV} = \left( \frac{Qm_{MIV}}{Qm_{UOPII}} \right) D_{UOPII}$$

Para el flujo de diseño del silenciador el flujo de operación se sobredimensiono 20%.

$$\text{Ecuación 4} \quad D_{MIV} = \left( \frac{235448}{485970} \right) D_{UOPII}$$

$$\text{Ecuación 5} \quad D_{MIV} = (0.48) D_{UOPII}$$

Entonces para obtener los diámetros y longitudes principales del silenciador se multiplico los valores del SI-4702 por el valor de 0.48.

El modelo propuesto se puede observar en el Anexo D. Para obtener mayor información sobre las dimensiones del equipo dirigirse a **Anexo D**. Plano del silenciador. Se omitieron algunos componentes del SI- 4702 que pueden añadirse dependiendo de la evaluación de la caída de presión (debido a que muchos componentes podrían aumentar la caída de presión y provocar bombeo en el C-301 y aumentar costo). Sin embargo la caída de presión no debería suponer problema debido a que en estos equipos mantiene una relación cuadrada con la velocidad del flujo (Ecuación 6).

$$\text{Ecuación 6} \quad \Delta P = kV^2$$

Y teniendo en cuenta que se escaló el equipo para mantener las condiciones de flujo similares entre estas la velocidad (relacionando el flujo con el diámetro Ecuación 3), es de esperarse que la caída de presión presentada en el equipo en la U-300 sea similar a la de UPII (Ecuación 9).

$$\text{Ecuación 7} \quad \frac{(\Delta P)_{MIV}}{(\Delta P)_{UOPII}} = \frac{k_{MIV}}{k_{MIV}} * \frac{Q_{MIV}^2}{Q_{UOPII}^2}$$

Donde k es el factor de caída de presión por accesorios o del equipo en general que depende de la geometría, si se tienen en cuenta que la mayor parte del equipo fue escalado a partir del modelo usado en la UOP II, manteniendo sus relaciones geométricas similares el valor de  $k_{MIV} \approx k_{UOPII}$  y a partir de la ecuación 6 obtenemos que:

$$\text{Ecuación 8} \quad (\Delta P)_{MIV} = \frac{V_{MIV}^2}{V_{UOPII}^2} * (\Delta P)_{UOPII}$$

Se obtiene que

$$\text{Ecuación 9} \quad (\Delta P)_{MIV} \approx (\Delta P)_{UOPII}$$

Lo que no supondría ningún problema del equipo por la caída de presión, debido a que ambos equipos trabajan a similar presión de operación, similar caída de presión y para el mismo servicio.

Con lo anterior, el modelo de las dimensiones para el nuevo silenciador fue definido en SOLIDWORKS según la Figura 1. Debido a que el silenciador trabajará a presiones de operación similares a las del SI-4201, los espesores fueron asumidos similares (Tabla 3); los espesores del SI-4201 fueron definidos según la norma ASTM A285. El material de construcción del SI-4201 es Acero Inoxidable

Tabla 4. Espesor para los componentes principales del SI-4201

ELEMENTO	ESPESOR MINIMO [mm]
Carcasa exterior	4.33
Tubo entrada	1.60
Difusor perforado	2.24
Cabeza Toriesférica carcasa exterior	4.68
Cabeza Toriesférica difusor	1.73

Fuente: Hojas de especificaciones equipos unidad UOP-II, GRB

Los elementos perforados del silenciador son parte del difusor, y los tubos dorados y gris oscuro en la Figura 1. Además el silenciador presenta relleno absorbente de tipo fibra mineral ignífuga con fibra de vidrio (igual que el SI-4201) en (Figura 1):

- El tubo perforado interno de menor diámetro (Dorado).
- Entre el tubo gris claro y el tubo perforado dorado de mayor diámetro.
- Entre la carcasa exterior y el segundo cilindro perforado de mayor diámetro (gris oscuro).

Para el diámetro de los agujeros y el área libre en el tubo (Anexo D), fueron definidos según el silenciador de la succión del C-2701 en la unidad UOPI, debido a que las láminas para la construcción tiene unas dimensiones fijas se obtiene que por construcción que los agujeros representan solo el 67% del área libre de dichas laminas [Hojas de especificaciones equipos unidad UOP-II, GRB]. Por otra parte, las dimensiones para la cabeza toriesférica de la carcasa exterior del nuevo silenciador mantiene la relación  $L \times r = 702 \times 79.2$ , mientras que, para la cabeza toriesférica del difusor mantiene la relación  $L \times r = 304.8 \times 30.48$  (Figura 2). L indica la longitud de la brida de escape hacia el techo mientras que r indica el radio de la carcasa exterior [Hojas de especificaciones del equipo unidad UOP-II, GRB]. Según la literatura en la construcción de una cabeza toriesférica mantienen esta relación por lo cual se cumple en la construcción del nuevo equipo<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup>DrC. Idalberto de la C. Mendoza Díaz, Ing. Eusebio V. Ibarra Hernández, Capacidad Volumétrica De Tapas Y Fondos Toriesfericos, Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV, Centro de Estudios de Química Aplicada, UCLV. Santa clara, Cuba.

Figura 2. Modelo de silenciador elaborado a partir del SI-4702 para la U-300

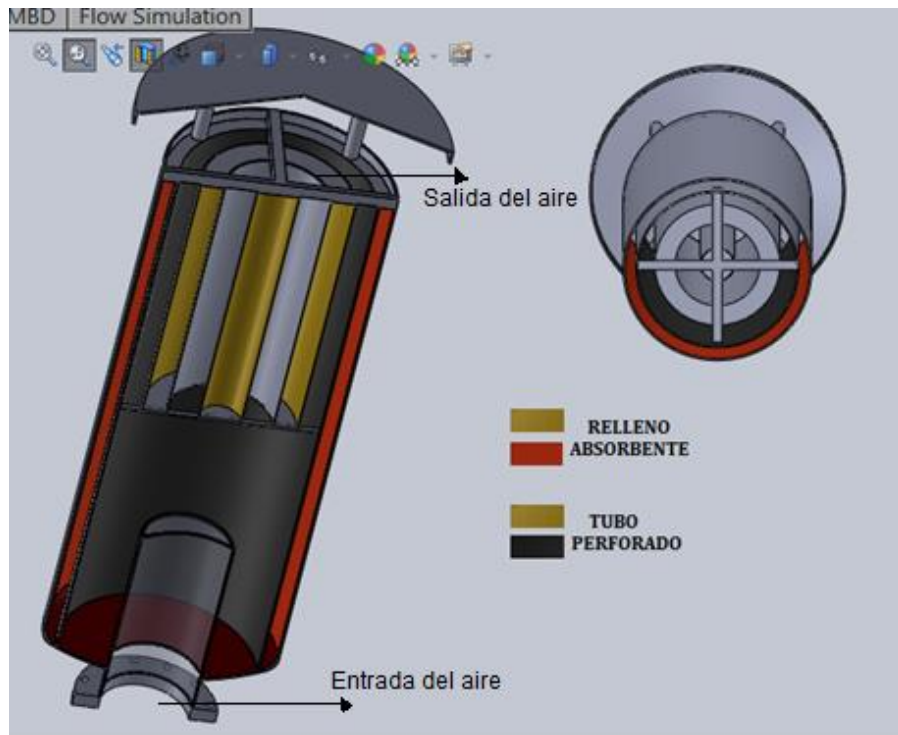
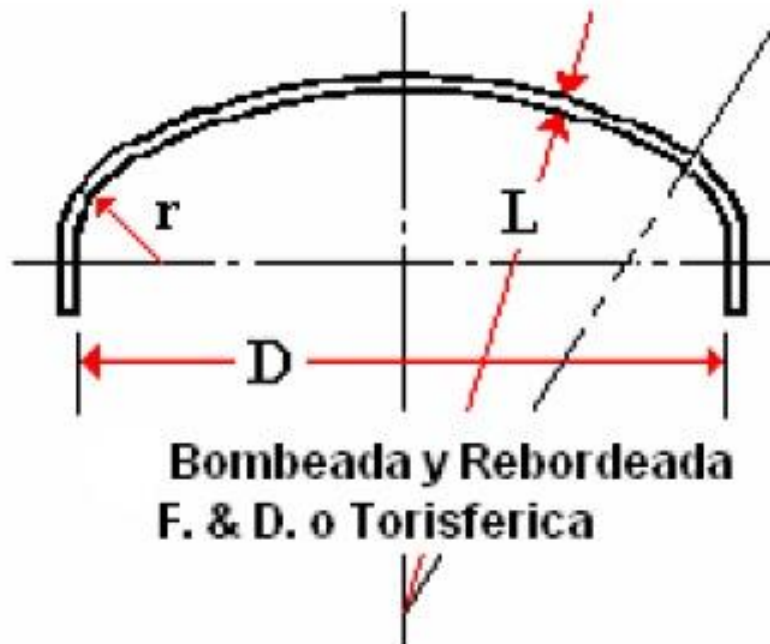


Figura 3. Cabeza toriesferica silenciador.



### 3.3 SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SILENCIADOR

La simulación fue realizada en el programa de dinámica de fluidos computacional denominado FLOW SIMULATIONS. Para la simulación se utilizaron las geometrías construidas en SOLIDWORKS. Los resultados para el perfil de presiones, perfil de velocidad y el perfil del número de Mach son mostrados en las Figuras 10, 11 y 12. En estas figuras es posible analizar las tendencias de los diferentes perfiles a lo largo del eje Z del silenciador. Los perfiles de presión y de velocidad indican una disminución considerable de estas variables, según los códigos de colores mostrados, lo cual se debe a que el aire debe salir a una presión cercana a la atmosférica; según la literatura, las ondas a través de estos dispositivos tienden a degradarse por medio de mecanismos autodestructivos o disipativos; dicha condición supone una disminución considerable tanto de la presión acústica como de la velocidad. La disminución repercute en el perfil para el número de Mach, el cual muestra el cambio de las ondas de supersónicas a ondas subsónicas.

Según la literatura los Silenciadores híbridos presentan una mayor eficiencia en la disminución de los niveles de ruido frente a los silenciadores reactivos, en el trabajo por cuestiones de Software comercial no se pudo considerar los efectos del material absorbente, en cuyo caso el silenciador fue reactivo y no se llegó a un nivel de disminución en ninguna de las configuraciones, menores a 50 dB, pero si a niveles satisfactorios, puesto que se supone que el material absorbente disipa al menos un 60% de los 50 dB es decir aproximadamente 30 dB nivel de ruido por su gran rendimiento y eficiencia.<sup>1819</sup>

Como característica se evidencia un decremento en la presión tanto de la velocidad entre un 10% y un 11%, el número de mach tiene una relación directa en estos

---

<sup>18</sup>MARTÍNEZ Bordes Manuel José, Modelado analítico-numérico y caracterización experimental de silenciadores de escape híbridos, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica Valencia, Valencia España, abril del 2010, Pág. 56-61

<sup>19</sup>Ingard, U. y Bolt, R.H. Absorption characteristics of acoustic material with perforated facings. Journal of the Acoustical Society of America, 23, 533-540, 1951.

perfiles puesto que sobre él se establece el régimen del aire y en los casos presentado tienen el mismo patrón de ondas subsónicas a supersónicas, cabe mencionar que el mayor cambio es en la entrada cuando el aire circula en la primera cámara disipativa, por lo cual se espera la influencia directa de los orificios en las paredes que mitigan o alivian la presión y la velocidad del aire; a medida que se avanza el decrecimiento porcentual prosigue hasta la franja amarilla, aunque si hay un decrecimiento no se mantiene en el resto del equipo, debido a la expansión ocasionada al atravesar los orificios de la cámara. Aunque la expansión en los orificios sucede de forma abrupta, se mantiene la linealidad del perfil de velocidad en esta sección.

Los resultados reflejan una disminución adecuada de los perfiles en los ductos con orificios perforados con la suposición de un material absorbente a base de fibra de carbono la eficiencia en el cambio de estos perfiles sería más considerable, en las secciones donde el aire circule por estas secciones en donde presenta dicha configuración; como fue mencionado, las disminuciones de los perfiles obtenidos corresponden a 10 y 11 % para la presión y la velocidad, respectivamente. En la literatura se reportan trabajos similares que validan los resultados obtenidos en el presente documento. Según lo reportado por Mori<sup>20</sup>, en sus estudios sobre un silenciador de escape de vehicular para cumplir con las normas estandarizadas en según las normas específicas para la contaminación auditiva en carreteras, se muestra una relación porcentual del 10% al 12% en la disminución de los perfiles de presión y velocidad (Figuras 3 y 4), según simulaciones empleando *Ansys Fluent Launcher* basado en la herramienta *Acoustic Model*.

---

<sup>20</sup>GONZÁLEZ Gonzalo Mori, Análisis estructural y atenuante de un silenciador, Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, España, 2016, pág. 31-40

Figura 4. Perfil de Presión a lo largo del eje según<sup>21</sup>

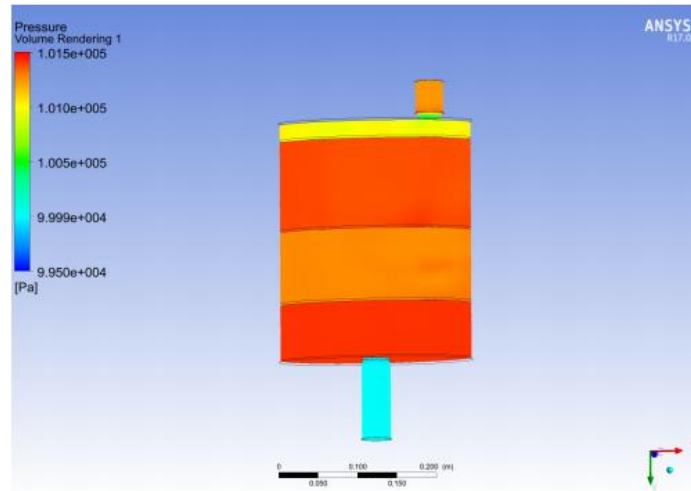
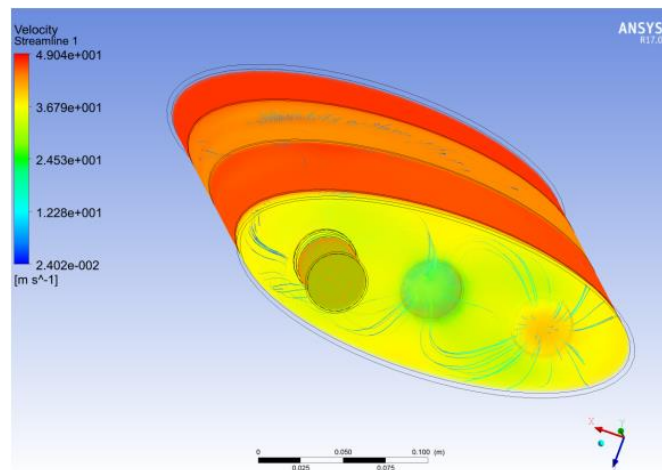


Figura 5. Perfil de velocidad del trabajo en comparación según Mori<sup>22</sup>



Existen otros trabajos reportados, con perfiles que coinciden con los obtenidos en el presente documento. En estos trabajos, se aplican también un análisis fluido dinámico y la resolución de la ecuación de onda como principio para hallar el índice de pérdidas<sup>23</sup>. Asimismo, algunos catálogos de empresas basados en modelos

<sup>21</sup>Ibíd.

<sup>22</sup>Ibíd.

<sup>23</sup>AMAYA Corredor Santiago Esteban, Estudio Computacional Del Flujo A Través Del Silenciador De Un Sistema De Escape Para Vehículos, Facultad De Ingeniería, Departamento De Ingeniería Mecánica, Universidad De Los Andes, Colombia, 2013.

probabilísticos, muestran un cambio porcentual de los perfiles de temperatura, presión y velocidad, similares a los mostrados en las Figuras 5, 6 y 7<sup>2425</sup>.

Figura 6. Perfil de presión

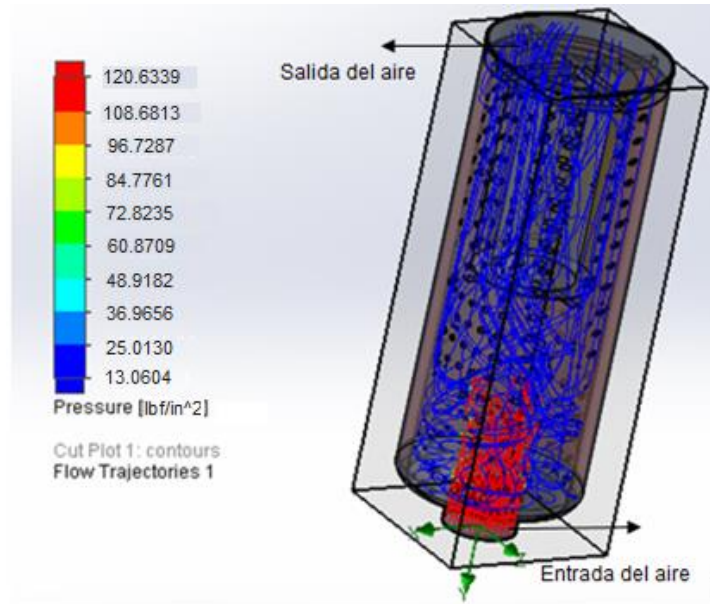
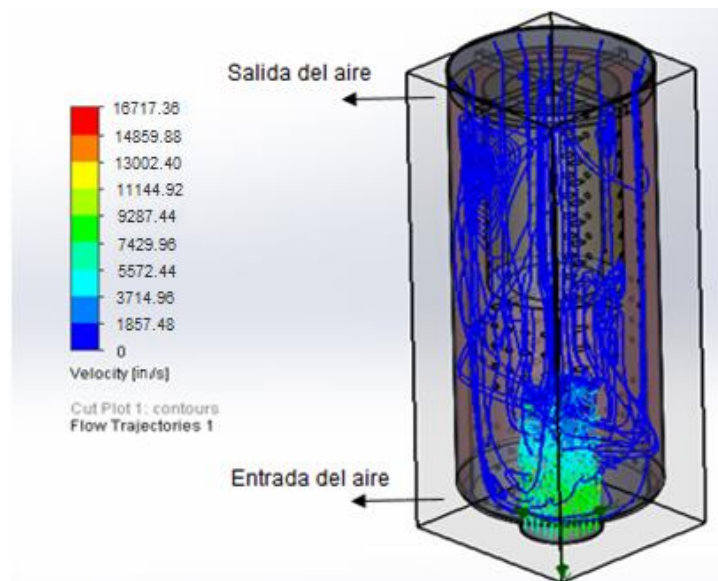


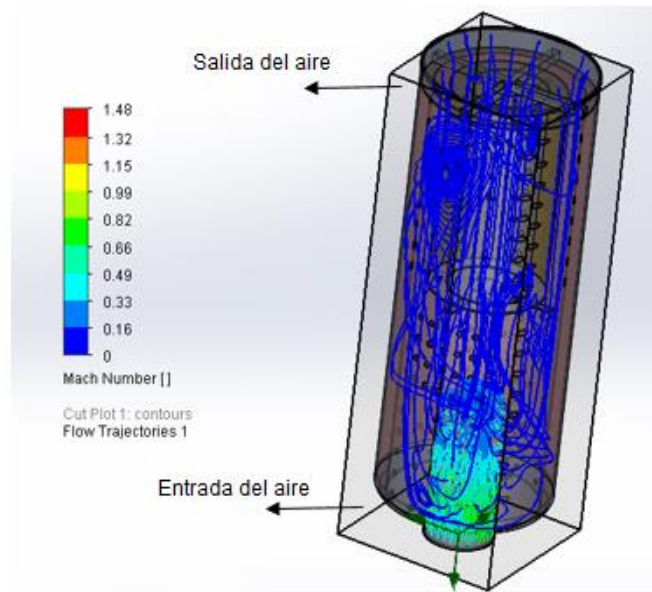
Figura 7. Perfil de velocidad



<sup>24</sup>Ibíd.

<sup>25</sup>iac acosutics, catálogo de silenciadores de conducto IAC [en línea] ([http://www.achs.cl/portal/Empresas/DocumentosMinsal/520Ruido%20\(Prexor\)/5%2020Medidas%20control%20espec%C3%ADficas/Silenciadores%20de%20conductos%20HVAC.pdf](http://www.achs.cl/portal/Empresas/DocumentosMinsal/520Ruido%20(Prexor)/5%2020Medidas%20control%20espec%C3%ADficas/Silenciadores%20de%20conductos%20HVAC.pdf))

Figura 8. Número de Mach



### 3.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON LA GEOMETRÍA DEL SILENCIADOR

Las dimensiones del silenciador propuesto para el C-301 fueron variadas con el propósito de analizar su influencia respecto al desempeño en la atenuación de los perfiles de presión y velocidad. Las dimensiones tales como longitud, diámetros internos y externos y las posiciones de las vigas de anclaje fueron cambiadas en un  $\pm 20\%$  del valor de diseño definido en la sección 3.2. Cada nuevo sistema fue simulado en cuatro diferentes condiciones modificando solo un parámetro a la vez; los respectivos perfiles de cada modificación son mostrados en las Figuras 7-10. En general, el aumento en los parámetros de diseño del silenciador conduce a una mayor caída de presión y menores velocidades a lo largo del eje, con la consecuente reducción en el número de Mach. En oposición, una disminución en los parámetros dimensionales conduce a una menor caída de presión y un menor decremento en la velocidad y el Mach.

Todos los perfiles tienen un cambio con respecto a los resultados reportados por la simulación con la geometría inicial.

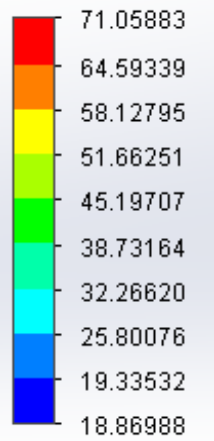
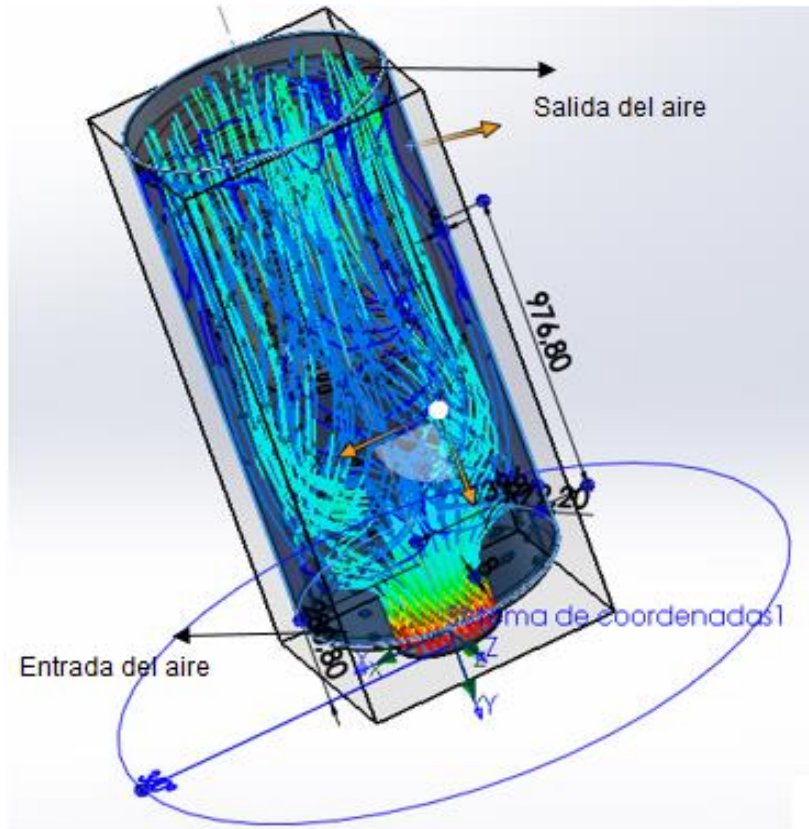
- Para la disminución de la altura en un 20%, se obtienen una mayor presión a la salida del sistema así como una menor presión a la entrada del equipo, en contraste se obtienen mayores velocidades al igual y la tendencia a ondas subsónicas.
- Para el aumento de la altura en un 20%, se obtiene mayor presión en el equipo con caídas más definidas a lo largo de su trayectoria, la velocidad tiende a ser menor que la geometría original, y al igual que en el caso anterior las ondas no superan un mach de 1 a lo largo de su trayectoria.
- Para la disminución del diámetro en un 20%, los valores son iguales de significativos que en el caso de la reducción de la longitud pero con una variante en menor grado, es decir una mayor presión a la salida del silenciador pero menor que en el caso de la altura y velocidades superiores a lo largo de la trayectoria, en este caso si se obtiene una diferencia significativa del número de mach cambiando de ondas supersónicas a subsónicas.
- Para el aumento del diámetro en un 20%, se registran mayores presiones así como mayores velocidades a lo largo de la trayectoria, el número de mach se mantiene por debajo de 1 lo que indica ondas subsónicas.

Según los perfiles de los casos presentados (Figuras 7-10), si la geometría se recorta longitudinalmente se obtendría un aumento de las presiones a la salida del dispositivo; asimismo, un recorte transversal conduciría a mayores turbulencias, por lo cual se obtiene un aumento de la velocidad y en el número de mach; en caso contrario, los aumentos en las dimensiones conducen a una mayor caída de presión. Era de esperarse que tanto el diámetro como la longitud del equipo tienen una influencia directa en la disipación del sonido; en esta sección se definieron una dimensiones iniciales con las definir niveles de disipación de ruido. Asimismo, se espera que a mayor longitud, la disipación de ruido aumente alcanzando el cumplimiento de los valores permitidos para el ruido industrial; al igual, la influencia del diámetro supone una disminución en los niveles de ruido con su incremento, sin embargo, hay un límite para el diámetro ya a que el equipo silenciador debe ser

adaptado a la válvula de escape que regula la salida de aire del compresor C-301. Es importante mencionar que se debe evitar la generación de caídas de presión de más de 15 KPa, para prevenir un reflujo en dirección opuesta, lo cual afectaría la integridad y la seguridad de la operación del compresor.

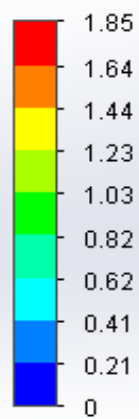
En cuestiones de atenuación del ruido, un aumento del 20% causa reducciones más significativas; sin embargo, mayores tamaños conducen a mayores costos, por lo que se requiere analizar la relación costo-eficiencia; además los incrementos en tamaño implican un análisis de los riesgos por una reducción de la presión y mayor peso del equipo.

Figura 9. -20% de altura



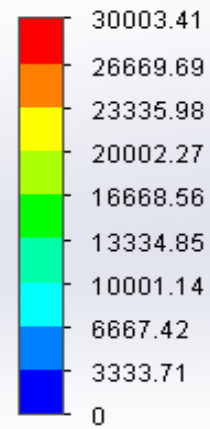
Pressure [lbf/in<sup>2</sup>]

Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1



Mach Number []

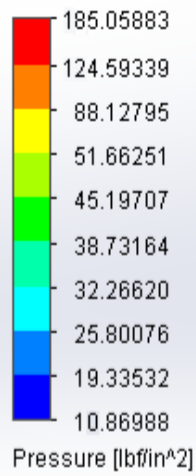
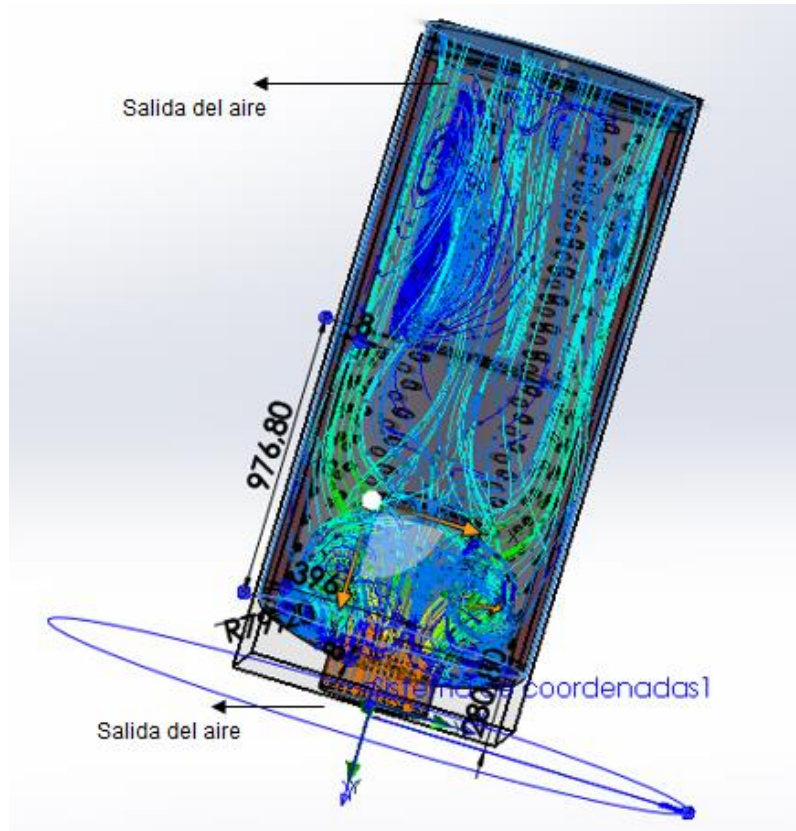
Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1



Velocity [in/s]

Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1

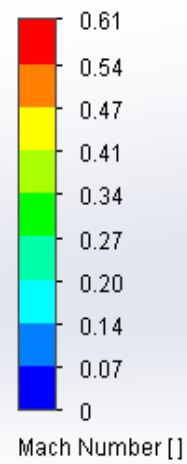
Figura 10. +20% Diámetro



Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1

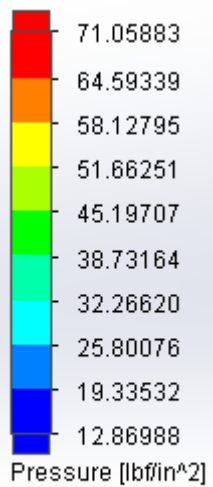
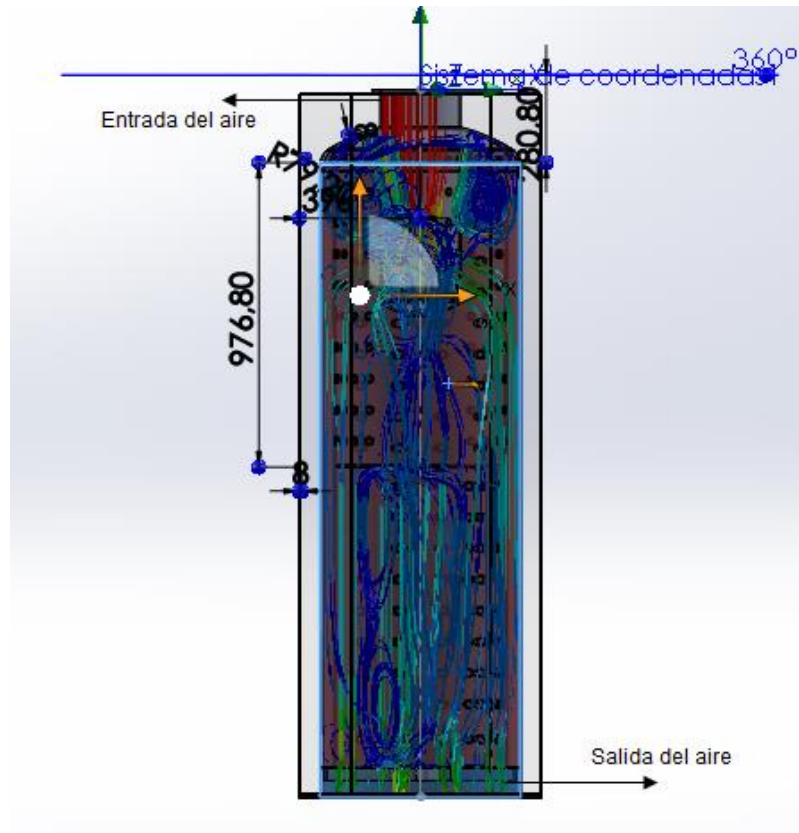


Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1

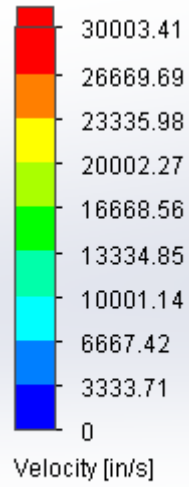


Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1

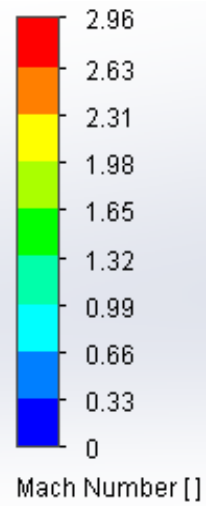
Figura 11. -20% Diámetro



Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1

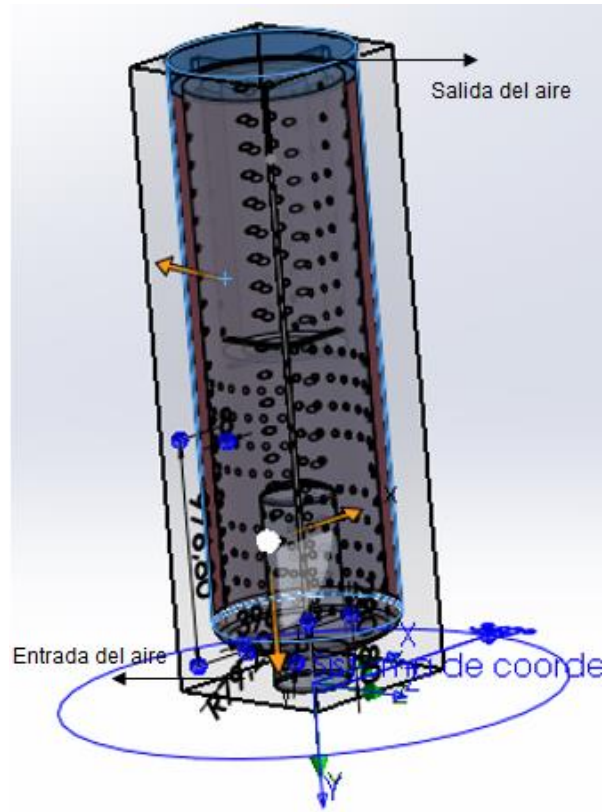


Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1



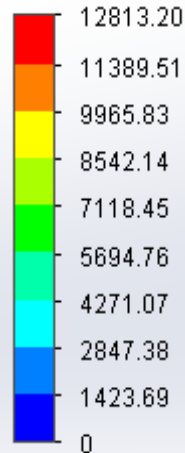
Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1

Figura 12. +20 Altura



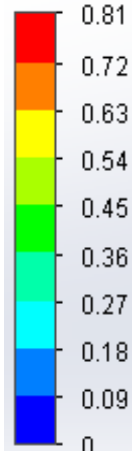
Pressure [lb/in<sup>2</sup>]

Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1



Velocity [in/s]

Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1



Mach Number []

Cut Plot 1: contours  
Flow Trajectories 1

### 3.5 CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE INSERCIÓN.

Utilizando la ecuación de Diferencia de Nivel  $LD$  para determinar el nivel de atenuación.

$$LD = 20 \log \left( \left| \frac{P_1}{P_2} \right| \right)$$

Se obtienen los siguientes valores:

- Configuración 1 dimensiones de escala

$$LD = 20 \log \left( \frac{120.63}{13.060} \right) = 19,91 \text{ dB}$$

- Configuración 2 -20% de Altura.

$$LD = 20 \log \left( \frac{71,05883}{18,86988} \right) = 11,51 \text{ dB}$$

- Configuración 3 +20%Diametro.

$$LD = 20 \log \left( \frac{185,05883}{10,86988} \right) = 24,62 \text{ dB}$$

- Configuración 4 -20% Diámetro.

$$LD = 20 \log \left( \frac{93,05883}{15,86988} \right) = 15,36 \text{ dB}$$

- Configuración 5 +20 de Altura.

$$LD = 20 \log \left( \frac{185,38301}{09,38549} \right) = 25,95 \text{ dB}$$

Según los valores obtenidos se afirma que tenemos una correspondencia directa con la atenuación del ruido. Al aumentar las dimensiones del equipo se obtiene una disminución mayor del ruido o el índice de pérdida.

Tabla 5. Reporte de reducción de LD respecto a dimensiones iniciales

Configuración	Perdida de inserción LD	Porcentaje %
Inicial	19.91 dB	
20% menos altura	11.51 dB	42.1.8% menos
20% mas diámetro	24.62 dB	23.65% mas
20% menos diámetro	15.36 dB	22.85% menos
20% más altura	25.95 dB	30.33% mas

La operación de arrancada no dispone de ningún sistema de atenuación de ruido para el venteo atmosférico, por lo que el sonido generado alcanza niveles de contaminación auditiva (*i.e.* valores por encima de 120 dB según la resolución 8321 de 1983) por la cual se fija las normas sobre la protección y conservación de la salud y el bienestar de las personas<sup>26</sup>

Se evidencia que la reducción del ruido llegara a un nivel de aceptado por la norma de 90 dB para trabajadores en este tipo de plantas químicas, se conseguirá con las configuraciones modificadas con 20% de sobre diseño tanto para el diámetro como para la altura, alcanzando una pérdida de inserción de aproximadamente 25 dB, lo que reduce el nivel de 120 dB hasta 95 dB.

<sup>26</sup>Resolución 8321 de 1983 Ministerio de Salud, Propiedad de la Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, publicación Diario Oficial, 04/08/1983.

#### 4. CONCLUSIONES

- Aunque los perfiles tanto de presión, velocidad y número de Mach obtenidos varían según las diferentes configuraciones, las geometrías más adecuadas para el diseño del silenciador serían las que se encuentran sobre diseñadas un 20% debido que con estas configuraciones se obtienen valores de reducción de ruido más elevados.
- Las simulaciones aplicadas para el análisis de sensibilidad ante las dimensiones del silenciador indican que una disminución del diámetro y la altura en un 20%, conlleva a una atenuación del nivel ruido, sin embargo, esta atenuación se desmejora respecto al diseño inicial planteado. Por otra parte, un aumento del 20% de estas dimensiones muestra en las simulaciones una mayor atenuación respecto al silenciador inicial planteado.

## 5. RECOMENDACIONES

- Aplicar un modelo económico para definir las dimensiones para una optimización del desempeño del silenciador y el costo del mismo.
- Evaluar la posibilidad de incluir un material absorbente con mejores características que permitan una mayor disipación del ruido.

## BIBLIOGRAFIA

AMAYA Corredor Santiago Esteban, Estudio Computacional Del Flujo A Través Del Silenciador De Un Sistema De Escape Para Vehículos, Facultad De Ingeniería, Departamento De Ingeniería Mecánica, Universidad De Los Andes, Colombia, 2013

Blackstock, D. Fundamentals of physical acoustics. Wiley-Interscience, New York, 2000.

CAMPOSECO Espina Lesbia Ivonne, Medición, Evaluación y Control del Ruido en una Industria de Maquilado de Tubería de Acero, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica Industrial, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala Octubre de 2003, pág. 33 y pág. 38

CATEDRA DE PROCESOS INDUSTRIALES, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Departamento de Ingeniería Química, Argentina, 2010, pág. 2-7.

CUQUERELLA Jesús Mengual, Craqueo Térmico Y Catalítico, Con Y Sin Vapor De Agua, De Alcanos Sobre Zeolitas. Cinética, Desactivación Y Estabilización Del Catalizador, Departament D'enginyeria Química, Universidad de Valencia, 2010, pág. 7-9

DAVERN, W.A. Perforated facings backed with porous materials as sound absorbers-an experimental study. Applied Acoustics, 10, 85-112, 1977.

DENIA, F.D. Modelado del comportamiento acústico de silenciadores de escape mediante técnicas analíticas y métodos de Elementos Finitos. Tesis doctoral, Valencia, 2004.

DrC. Idalberto de la C. Mendoza Díaz, Ing. Eusebio V. Ibarra Hernández, Capacidad Volumétrica De Tapas Y Fondos Toriesfericos, Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV, Centro de Estudios de Química Aplicada, UCLV. Santa clara, Cuba.

GONZÁLEZ Gonzalo Mori, Análisis estructural y atenuante de un silenciador, Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, España, 2016, pág. 31-40

GUZMAN Carreño Luis Javier, Diseño Mecánico De Recipientes Bajo El Código ASME Sección VIII División 1, Universidad Simón Bolívar, sartenejas, Venezuela, septiembre del 2016.

HUGHES, W.F., Gaylord, E.W. Ecuaciones básicas de las Ciencias de la Ingeniería. McGraw-Hill, México, 1971.

iac acosutics, catálogo de silenciadores de conducto IAC [en línea] ([http://www.achs.cl/portal/Empresas/DocumentosMinsal/520Ruido%20\(Prexor\)/5%2020Medidas%20control%20espec%C3%ADficas/Silenciadores%20de%20conductos%20HVAC.pdf](http://www.achs.cl/portal/Empresas/DocumentosMinsal/520Ruido%20(Prexor)/5%2020Medidas%20control%20espec%C3%ADficas/Silenciadores%20de%20conductos%20HVAC.pdf))

Ih, J.G. y Lee, B.H. Theoretical prediction of the transmission loss of circular reversing chamber mufflers. Journal of Sound and Vibration, 112, 261-272, 1987.

Ingard, U. y Bolt, R.H. Absorption characteristics of acoustic material with perforated facings. Journal of the Acoustical Society of America, 23, 533-540, 1951.

MARTINEZ Bordes Manuel José, Modelado analítico-numérico y caracterización experimental de silenciadores de escape híbridos, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Abril del 2010, pág. 10 y Pág. 56-61.

Resolución 8321 de 1983 Ministerio de Salud, Propiedad de la Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, publicación Diario Oficial, 04/08/1983.

RUIZ Casal Efren, Trabajo de investigación, universidad de la laguna, facultad de medicina, catedra de otorrinolaringología, contaminación acústica: efectos sobre parámetros físicos y psicológicos, pág. 28

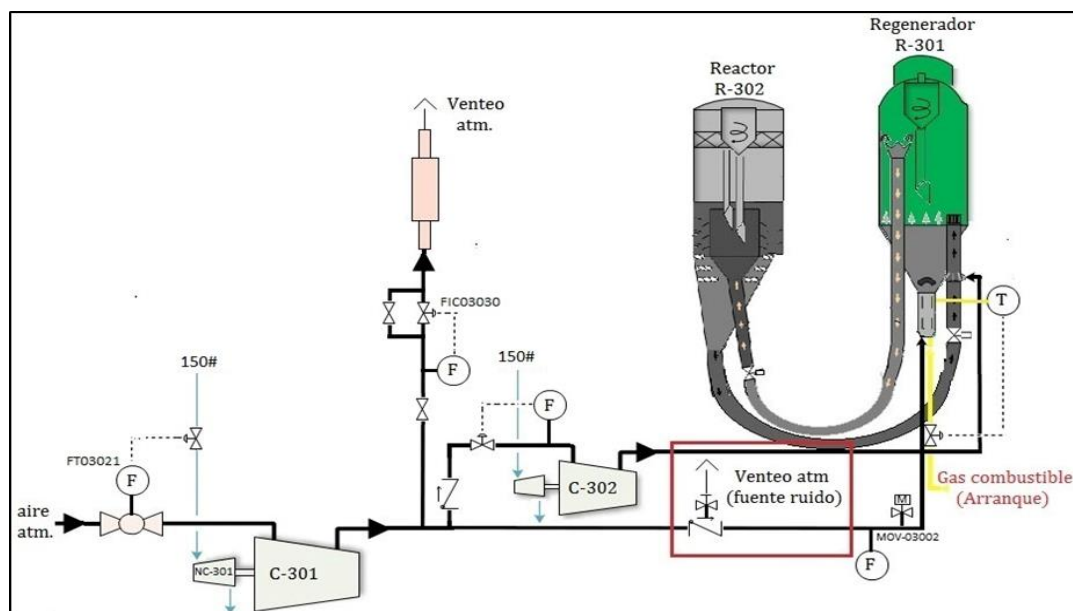
SANCHEZ Gonzalo, Procesos Químicos Cracking Catalítico, Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland, Facultad de Ingeniería, Universidad Pública de Montevideo, Uruguay, noviembre 2017, pág. 6-15

TORRES Picazo María Isabel, Tesis Doctoral Modelado Acústico De Silenciadores Con Material Absorbente, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2006, pág. 15

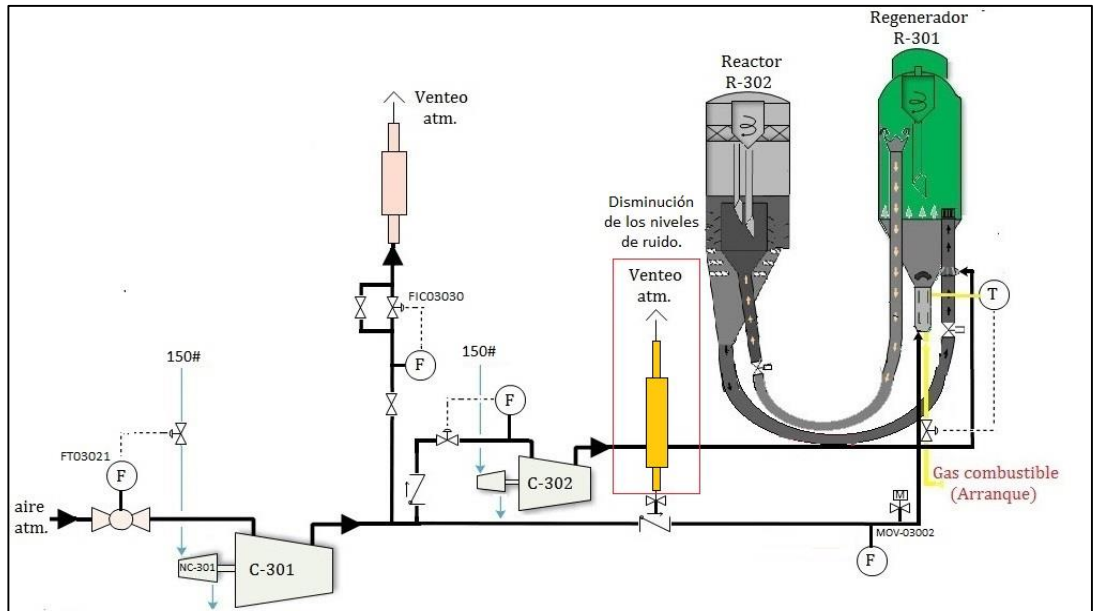
VALDERRABANO Salazar Sergio A., tesis Control de Ruido en Equipo industrial Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los garza.

## ANEXOS

### Anexo A. Sección de compresión de aire hacia el regenerador.



**Anexo B. Sistema propuesto en la sección de compresión de aire hacia el regenerador.**



**Anexo C. Localización en campo del venteo atmosférico (ubicación del equipo silenciador).**



### Anexo D. Plano del equipo silenciador propuesto

