

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO AUTOMOTRIZ**

**“INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE EN EL  
ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN DE LOS BUSES DE TRANSPORTE MASIVO  
DE PASAJEROS DE LA CIUDAD DE CUENCA”**

**AUTOR: Jónatan Antonio Pozo Palacios**

**DIRECTOR: Ing. Pedro Cabrera**

**CUENCA, ENERO DEL 2010**

Cuenca, enero 18 del 2010

#### DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo, “INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE EN EL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN DE LOS BUSES DE TRANSPORTE MASIVO DE PASAJEROS DE LA CIUDAD DE CUENCA”, son de exclusiva responsabilidad del autor, Jónatan Antonio Pozo Palacios.

-----  
Jónatan Antonio Pozo Palacios

Cuenca, enero 18 del 2010

Yo, Ing. Pedro Cabrera, certifico que bajo mi dirección fue desarrollado el presente trabajo de tesis por el señor Jónatan Antonio Pozo Palacios.

-----

Ing. Pedro Cabrera

## **DEDICATORIA**

Este trabajo lo dedico a mis padres que han sabido ayudarme y guiarme a lo largo de toda mi vida. De igual manera a todas las personas que de una u otra forma me han ayudado a culminar con éxito mi carrera.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento a todos quienes hacen la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la UPS en especial al Ing. Pedro Cabrera quien me brindó sus conocimientos y apoyo para desarrollar el presente trabajo.

# INDICE

Pág

INTRODUCCIÓN.....	16
-------------------	----

## CAPITULO 1

### IMPORTANCIA Y NECESIDAD DE LA DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE

1.1. EL MOTOR DIESEL.....	18
1.1.1. GENERALIDADES.....	18
1.1.2. CICLOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DIESEL DE 4 TIEMPOS.....	18
1.1.2.1. PRIMER TIEMPO: ADMISIÓN.....	19
1.1.2.2. SEGUNDO TIEMPO: COMPRESIÓN.....	19
1.1.2.3. TERCER TIEMPO: EXPLOSIÓN.....	19
1.1.2.4. CUARTO TIEMPO: ESCAPE.....	19
1.1.3. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA COMBUSTIÓN.....	20
1.1.3.1. RETARDO A LA INFLAMACIÓN.....	21
1.1.3.2. COMBUSTIÓN DE PREMEZCLA.....	21
1.1.3.3. COMBUSTIÓN DE DIFUSIÓN.....	21
1.2. EMISIONES DE ESCAPE DEL MOTOR DIESEL.....	22
1.2.1. EL AIRE LIMPIO.....	22
1.2.2. CONTAMINACIÓN DEL AIRE.....	23
1.2.2.1. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PRIMARIOS.....	23
1.2.2.2. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS SECUNDARIOS.....	23
1.2.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES PRODUCIDOS POR EL MOTOR DIESEL.....	24
1.2.3. TRANSPORTE EN EL AIRE DE LAS EMISIONES DIESEL.....	27
1.2.3.1. TRANSPORTE EN EL AIRE DE EMISIONES DIESEL EN FORMA DE GASES.....	27

1.2.3.2. TRANSPORTE EN EL AIRE DE EMISIONES DIESEL EN FORMA DE PARTÍCULAS.....	28
1.3. SISTEMA DE ADMISION DE AIRE AL MOTOR.....	28
1.3.1. FILTRO DE AIRE.....	29
1.3.2. TUBERÍAS Y ABRAZADERAS.....	29
1.4. SISTEMA DE ESCAPE DE LOS GASES QUEMADOS.....	29
1.4.1. COMPONENTES DEL SISTEMA DE ESCAPE.....	30
1.4.1.1. COLECTOR DE ESCAPE.....	30
1.4.1.2. TUBOS DE ESCAPE Y CODOS.....	31
1.4.1.3. EL SILENCIADOR.....	32
1.4.1.4. BOCA DE SALIDA.....	33
1.4.2. ACCESORIOS DEL SISTEMA DE ESCAPE.....	34
1.4.2.1. SOPORTES.....	34
1.4.2.2. ABRAZADERAS.....	35
1.4.2.2.1. ABRAZADERA DE BANDA ANCHA.....	35
1.4.2.2.2. ABRAZADERA CON BANDA EN V.....	35
1.4.2.3. PROTECCIONES CONTRA EL CALOR.....	36
1.4.2.4. TAPA DE LLUVIA.....	37
1.5. LA SOBREALIMENTACION EN EL MOTOR DIESEL.....	37
1.5.1. GENERALIDADES DE LA SOBREALIMENTACIÓN.....	38
1.5.2. EL TURBOCOMPRESOR.....	38
1.5.3. EL INTERCOOLER.....	39
1.6. RECIRCULACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE.....	40
1.7. LA CONTRAPRESIÓN EN EL SISTEMA DE ESCAPE.....	40
1.7.1. DEFINICIÓN.....	40
1.7.2. DISEÑOS QUE PROVOCAN CONTRAPRESIÓN EN EL ESCAPE.....	41
1.7.3. MEDIDA DE LA CONTRAPRESIÓN.....	43
1.7.4. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN EL MOTOR DIESEL.....	45
1.7.4.1. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN LA POTENCIA DEL MOTOR Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE.....	45

1.7.4.2. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN LA SOBREALIMENTACIÓN.....	46
1.7.4.3. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN LA RECIRCULACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE.....	47
1.7.4.4. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN LA TEMPERATURA DE LOS COMPONENTES.....	49
1.8. LEYES Y NORMATIVAS QUE REGULAN LA DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE EN LOS BUSES DE TRANSPORTE MASIVO DE PASAJEROS.....	50
1.8.1. DISEÑO ORIGINAL DEL FABRICANTE DEL CHASIS.....	50
1.8.2. LEYES Y NORMATIVAS PARA LA CIUDAD DE CUENCA.....	51
1.8.2.1. REGLAMENTO GENERAL PARA LA APLICACIÓN DE LA LEY ORGÁNICA DE TRANSPORTE TERRESTRE, TRÁNSITO Y SEGURIDAD VIAL.....	51
1.8.2.2. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 205:2002 VEHÍCULOS AUTOMOTORES. BUS URBANO. REQUISITOS.....	51
1.8.2.3. CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y DE SEGURIDAD PARA LAS UNIDADES DE TRANSPORTE URBANO ESTANDARIZADAS (BUS TIPO) DE LA CIUDAD DE CUENCA.....	51
1.8.3. LEYES Y NORMATIVAS EN EL EXTRANJERO.....	52
1.8.3.1. DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA BUSES EN CHILE.....	52
1.8.3.2. DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA BUSES ESCOLARES EN ESTADOS UNIDOS.....	53
1.8.3.3. DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA BUSES EN BRASIL.....	53
1.8.3.4. DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA BUSES EN PERÚ.....	53
1.9. IMPORTANCIA DE LA DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE....	54

## **CAPITULO 2**

### **ESTUDIO ANALÍTICO DEL CONDUCTO DE ESCAPE**

2.1. INTRODUCCIÓN.....	55
------------------------	----

2.2. CONCEPTOS BÁSICOS.....	55
2.2.1. DEFINICIÓN DE FLUIDO.....	55
2.2.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....	55
2.2.2.1. DENSIDAD.....	55
2.2.2.2. PESO ESPECÍFICO.....	56
2.2.2.3. VISCOSIDAD.....	56
2.2.2.4. VISCOSIDAD CINEMÁTICA.....	57
2.3. FLUJO DE FLUIDOS.....	58
2.3.1. RAPIDEZ DE FLUJO DE FLUIDO.....	58
2.3.1.1. RAPIDEZ DE FLUJO DE VOLUMEN.....	58
2.3.1.2. RAPIDEZ DE FLUJO DE MASA.....	58
2.3.1.3. RAPIDEZ DE FLUJO DE PESO.....	58
2.3.2. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	59
2.3.3. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD PARA FLUIDOS COMPRESIBLES.....	60
2.3.4. LA CONSERVACIÓN DE ENERGÍA: ECUACIÓN DE BERNOULLI.....	60
2.3.5. LIMITACIONES A LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.....	62
2.3.6. ECUACIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA.....	62
2.4. TIPO DE FLUJO EN TUBERÍAS.....	62
2.4.1. FLUJO LAMINAR.....	63
2.4.2. NÚMERO DE REYNOLDS.....	63
2.4.3. NÚMEROS DE REYNOLDS CRÍTICOS.....	64
2.4.4. FLUJO TURBULENTO.....	64
2.4.5. RADIO HIDRÁULICO PARA SECCIONES TRANSVERSALES NO CIRCULARES.....	65
2.4.6. CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS PARA SECCIONES TRANSVERSALES NO CIRCULARES.....	66
2.5. PÉRDIDAS DE ENERGÍA.....	66
2.5.1. PERDIDAS MAYORES.....	66

2.5.1.1. ECUACIÓN DE DARCY.....	67
2.5.1.2. PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN FLUJO LAMINAR.....	67
2.5.1.3. PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN FLUJO TURBULENTO.....	68
2.5.1.3.1. RUGOSIDAD RELATIVA DEL CONDUCTO.....	68
2.5.1.3.2. ECUACIÓN EXPLÍCITA PARA EL FACTOR DE FRICCIÓN.....	69
2.5.1.4. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN SECCIONES TRANSVERSALES NO CIRCULARES.....	70
2.5.2. PERDIDAS MENORES.....	70
2.5.2.1. ECUACIÓN GENERAL DE LAS PÉRDIDAS MENORES.....	71
2.5.2.2. DILATACIÓN SÚBITA.....	71
2.5.2.3. PÉRDIDA DE SALIDA.....	72
2.5.2.4. DILATACIÓN GRADUAL.....	73
2.5.2.5. CONTRACCIÓN SÚBITA.....	75
2.5.2.6. CONTRACCIÓN GRADUAL.....	76
2.5.2.7. PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR CODOS Y TES.....	78
2.5.2.8. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN CODOS.....	80
2.5.2.9. PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN CODOS MITRADOS.....	81
2.6. FLUJO COMPRESIBLE EN TUBERÍAS.....	83
2.6.1. VELOCIDAD SÓNICA.....	83
2.6.2. NÚMERO DE MACH.....	83

### **CAPITULO 3**

#### **DIAGNÓSTICO E INFLUENCIA DEL CONDUCTO DE ESCAPE EN LA CONTAMINACIÓN DE LOS BUSES DE LA CIUDAD DE CUENCA**

3.1. INTRODUCCIÓN.....	84
3.2. BUSES DE TRANSPORTE MASIVO DE PASAJEROS DE LA CIUDAD DE CUENCA.....	84
3.2.1 BUSES DE TRANSPORTE URBANO.....	84

3.2.2. BUSES DE TRANSPORTE INTERPARROQUIAL.....	85
3.3. CONFIGURACIONES BÁSICAS DEL SISTEMA DE ESCAPE.....	85
3.3.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO A LA IZQUIERDA.....	86
3.3.1.1. VENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE.....	86
3.3.1.2. DESVENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE.....	87
3.3.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ARRIBA A LA IZQUIERDA.....	87
3.3.2.1. VENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE.....	88
3.3.2.2. DESVENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE.....	88
3.3.3. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE LATERAL IZQUIERDA.....	88
3.3.3.1 VENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE.....	89
3.3.3.2 DESVENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE.....	89
3.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS CHASIS DE BUS ESTUDIADOS.....	90
3.5. VELOCIDAD DE SALIDA Y CAUDAL DE LOS GASES DE ESCAPE.....	91
3.6. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA PROMEDIO DE LOS GASES EN EL SISTEMA DE ESCAPE.....	92
3.7. CALCULO DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO.....	93
3.7.1. PROPIEDADES DEL AIRE A LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL ESCAPE DEL BUS CHEVROLET FTR 32M.....	93
3.7.2. PROPIEDADES DEL AIRE A LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL ESCAPE DEL BUS MERCEDES BENZ OF 1721.....	93
3.7.3. PROPIEDADES DEL AIRE A LA TEMPERATURA PROMEDIO DEL SISTEMA DE ESCAPE $T=536^{\circ}\text{K}$ DEL BUS CHEVROLET FTR 32 M.....	94
3.7.4. PROPIEDADES DEL AIRE A LA TEMPERATURA PROMEDIO DEL SISTEMA DE ESCAPE $T=536^{\circ}\text{K}$ DEL BUS MERCEDES BENZ OF 1721.....	94
3.8. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE MACH.....	94
3.9. INFLUENCIA DE LA DIFERENCIA EN ALTURA ENTRE DOS PUNTOS EN LA CONTRAPRESIÓN DEL SISTEMA DE ESCAPE.....	95
3.10. DETERMINACIÓN DE LA CONTRAPRESIÓN EN LOS DIFERENTES DISEÑOS DE SISTEMAS DE ESCAPE.....	97
3.10.1. INTRODUCCIÓN.....	97

3.10.2. DETERMINACIÓN DE LA CAIDA DE PRESIÓN EN EL SILENCIADOR.....	97
3.10.2.1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA DEL SILENCIADOR.....	99
3.10.3. DATOS PARA EL CÁLCULO.....	99
3.10.4. CONTRAPRESIÓN EN EL BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR 32M.....	100
3.10.4.1. DIMENSIONES DEL BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR 32M...100	
3.10.4.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO A LA IZQUIERDA.....	101
3.10.4.2.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR.....	102
3.10.4.2.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO.....	105
3.10.4.2.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR.....	106
3.10.4.2.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR.....	108
3.10.4.3. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ARRIBA A LA IZQUIERDA.....	110
3.10.4.3.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR.....	112
3.10.4.3.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO.....	114
3.10.4.3.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR.....	115
3.10.4.3.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR.....	117
3.10.4.4. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE LATERAL IZQUIERDA.....	120
3.10.4.4.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR.....	121
3.10.4.4.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO.....	123
3.10.4.4.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR.....	125
3.10.4.4.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR.....	126
3.10.4.5. SISTEMA DE ESCAPE CON DOBLE SALIDA: EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO Y DESPUÉS DEL SILENCIADOR.....	128
3.10.4.6. DETERMINACIÓN DE LA CONTRAPRESIÓN EN UN SISTEMA DE ESCAPE CON AGUJERO ANTES DEL SILENCIADOR DEL BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR-32M.....	134

3.10.4.7. DETERMINACIÓN DE LA CONTRAPRESIÓN EN UN SISTEMA DE ESCAPE CON CONDUCTO DE MAYOR DIÁMETRO DESPUÉS DEL SILENCIADOR DE UN BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR-32M.....	136
3.10.4.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	138
3.10.4.8.1. VALORES DE CONTRAPRESIÓN DE LAS TRES DISPOSICIONES DE SISTEMAS DE ESCAPE.....	138
3.10.4.8.2. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA EL SISTEMA DE ESCAPE CON DOBLE SALIDA: EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO Y DESPUÉS DEL SILENCIADOR DEL BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR-32M.....	141
3.10.4.8.3. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA EL SISTEMA DE ESCAPE CON AGUJERO ANTES DEL SILENCIADOR DEL BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR-32M.....	142
3.10.4.8.4. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA UN SISTEMA DE ESCAPE CON CONDUCTO DE MAYOR DIÁMETRO DESPUÉS DEL SILENCIADOR.....	142
3.10.4.8.5. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA DIFERENTES FORMAS Y ÁNGULOS DE CODO POSTERIOR.....	143
3.10.5. CONTRAPRESIÓN EN EL BUS MERCEDES BENZ OF 1721.....	145
3.10.5.1. DIMENSIONES DEL BUS MERCEDES BENZ OF 1721.....	145
3.10.5.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO A LA IZQUIERDA.....	146
3.10.5.2.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR.....	147
3.10.5.2.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO.....	149
3.10.5.2.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR.....	151
3.10.5.2.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR.....	152
3.10.5.3. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ARRIBA A LA IZQUIERDA.....	154
3.10.5.3.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR.....	156
3.10.5.3.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO.....	158
3.10.5.3.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR.....	159
3.10.5.3.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR.....	161
3.10.5.4. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE LATERAL IZQUIERDA.....	164
3.10.5.4.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR.....	165

3.10.5.4.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO.....	167
3.10.5.4.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR.....	168
3.10.5.4.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR.....	170
3.10.5.5. SISTEMA DE ESCAPE CON DOBLE SALIDA: EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO Y DESPUÉS DEL SILENCIADOR.....	172
3.10.5.6. DETERMINACIÓN DE LA CONTRAPRESIÓN EN UN SISTEMA DE ESCAPE CON AGUJERO ANTES DEL SILENCIADOR DE UN BUS CON CHASIS MERCEDES-BENZ OF1721.....	177
3.10.5.7. RESULTADOS.....	178
3.10.5.7.1. VALORES DE CONTRAPRESIÓN DE LAS TRES DISPOSICIONES DE SISTEMAS DE ESCAPE.....	179
3.10.5.7.2. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA EL SISTEMA DE ESCAPE CON DOBLE SALIDA: EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO Y DESPUÉS DEL SILENCIADOR DEL BUS CON CHASIS MERCEDES-BENZ OF1721.....	181
3.10.5.7.3. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA EL SISTEMA DE ESCAPE CON AGUJERO ANTES DEL SILENCIADOR DEL BUS CON CHASIS MERCEDES-BENZ OF1721.....	182

## **CAPITULO 4**

### **PROPUESTA TÉCNICA DEL DISEÑO FINAL DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA LOS BUSES DE TRANSPORTE MASIVO DE PASAJEROS DE LA CIUDAD DE CUENCA**

4.1. RECOMENDACIONES DEL FABRICANTE DEL CHASIS.....	183
4.1.1. RECOMENDACIONES DEL FABRICANTE PARA EL CHASIS CHEVROLET FTR-32M.....	182
4.1.2. RECOMENDACIONES DEL FABRICANTE MERCEDES-BENZ.....	187
4.2. CONFIGURACIÓN DE LA SALIDA DEL SISTEMA DE ESCAPE.....	189
4.3. PROPUESTA TÉCNICA DEL DISEÑO FINAL DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA LOS BUSES CON CHASIS FTR-32M.....	189
4.4. PROPUESTA TÉCNICA DEL DISEÑO FINAL DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA LOS BUSES CON CHASIS MERCEDES-BENZ OF1721.....	191
4.5. APLICACIÓN A OTROS MODELOS DE CHASIS.....	192
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>193</b>

<b>RECOMENDACIONES</b> .....	194
<b>BIBLIOGRAFIA Y PÁGINAS WEB CONSULTADAS</b> .....	195
<b>ANEXOS</b> .....	199

## INTRODUCCIÓN

Los vehículos de transporte masivo de pasajeros equipados con motores a diesel generan contaminantes atmosféricos con efectos adversos sobre la salud humana, los gases de escape de este tipo de motores son responsables de varios compuestos químicos, siendo los Nox y las partículas de hollín los contaminantes más nocivos a la salud.

Es necesaria por lo tanto la realización de un continuo mejoramiento de los componentes utilizados en los buses de transporte masivo de pasajeros, siendo de gran importancia el conducto de escape del motor ya que un diseño adecuado del mismo permite que el motor funcione de una manera más eficiente emitiendo menos contaminantes y evitando molestias al direccionar adecuadamente los gases.

En la ciudad, las carrocerías de buses de transporte masivo de pasajeros se fabrican por empresas que emplean chasis de distintas marcas. Durante el proceso de construcción, el sistema de escape es colocado en función de los lineamientos que al respecto se disponen en las distintas empresas constructoras sin considerar muchas de las veces los aspectos técnicos respectivos por lo que se tienen sistemas de escape inadecuados.

El presente trabajo tiene por objetivo determinar la influencia de la disposición del conducto de escape en el índice de contaminación de los buses de transporte masivo de pasajeros de la ciudad de Cuenca, de forma que se pueda seleccionar la ubicación más idónea de este componente estipulando sus características constructivas, logrando un rendimiento eficiente del motor con una emisión de productos de combustión dentro de márgenes especificados.

El presente estudio abarca diferentes temas, los cuales serán desarrollados de la siguiente manera:

En el capítulo uno se presentan: las características del motor diesel, los gases emitidos por este durante su proceso de combustión, las características del sistema de escape con todos sus componentes, se analizan los efectos en el motor de la contrapresión generada en el sistema de escape y se revisan algunas leyes y normativas que regulan la disposición del conducto de escape en el país y en el extranjero.

En el capítulo dos se revisan los fundamentos teóricos necesarios para el análisis del flujo en las diferentes configuraciones del sistema de escape. Inicialmente se estudian los conceptos básicos que permiten definir las propiedades de un fluido y sus características de flujo para posteriormente estudiar cómo se realiza el cálculo de las pérdidas de presión en componentes del sistema de escape como tuberías, codos, tes, transiciones, etc. Finalmente se revisan las condiciones de un sistema de flujo que permiten su análisis sin considerar la compresibilidad.

En el capítulo tres se realiza el estudio de la influencia que tienen las diferentes disposiciones de conductos de escape en la contaminación producida por los buses de transporte masivo de pasajeros, además se determina como afectan al funcionamiento del motor las diferentes modificaciones realizadas en el sistema de escape.

Inicialmente se determinarán cuáles son los chasis para bus más comúnmente utilizados en la ciudad de Cuenca, además se hará un análisis de las configuraciones de sistemas de escape que pueden ser utilizadas en buses, para posteriormente analizar su influencia en el funcionamiento del motor y en la contaminación generada.

En el capítulo cuatro se presenta una propuesta técnica del diseño final del conducto de escape para cada uno de los chasis de bus estudiados. Inicialmente se revisan las recomendaciones del fabricante del chasis para la construcción del sistema de escape y posteriormente, en base a esas recomendaciones se realiza una propuesta de diseño del conducto de escape.

## **CAPITULO 1**

### **IMPORTANCIA Y NECESIDAD DE LA DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE**

#### **1.1. EL MOTOR DIESEL**

##### **1.1.1. GENERALIDADES**

El motor diesel es un motor de combustión interna que recibe su nombre de su inventor, el alemán Rudolf Diesel quien en 1897 presentó su creación en la Asamblea General de Ingenieros Alemanes. Este tipo de motor ofrecía un mayor rendimiento que las máquinas de vapor y los motores a gasolina por lo que rápidamente despertó el interés en el mundo científico de aquel entonces.

En las primeras décadas, los motores diesel eran demasiado pesados por lo que fueron utilizados como motores navales o estacionarios, posteriormente el motor con inyección de antecámara de la marca Benz y el motor por inyección a chorro de la marca Man contribuyeron a la masiva producción en serie de camiones a diesel.

El principio básico de operación de este tipo de motor no ha cambiado con el transcurso de los años, el motor diesel funciona comprimiendo aire a altas presiones y temperaturas, cuando el combustible es inyectado autoenciende entregando su energía. El proceso de expansión de los gases empuja al pistón generando trabajo, posteriormente los gases son evacuados a la atmósfera. La potencia es controlada por el combustible inyectado, así a mayor cantidad de combustible inyectado se obtiene mayor potencia.

##### **1.1.2. CICLOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DIESEL DE 4 TIEMPOS**

El funcionamiento de este tipo de motor se realiza en los siguientes tiempos:

#### 1.1.2.1. PRIMER TIEMPO: ADMISIÓN

Durante este tiempo el émbolo realiza su primera carrera descendente desde el PMS al PMI, aspirando aire debidamente filtrado a través de la válvula de admisión que se encuentra abierta. Durante este tiempo la muñequilla del cigüeñal gira 180°.

#### 1.1.2.2. SEGUNDO TIEMPO: COMPRESIÓN

Durante este período y con las válvulas de admisión y escape cerradas, el émbolo realiza una carrera ascendente desde el PMI al PMS comprimiendo el aire que finalmente quedará alojado en la cámara de combustión. Durante este tiempo la muñequilla del cigüeñal gira 180°.

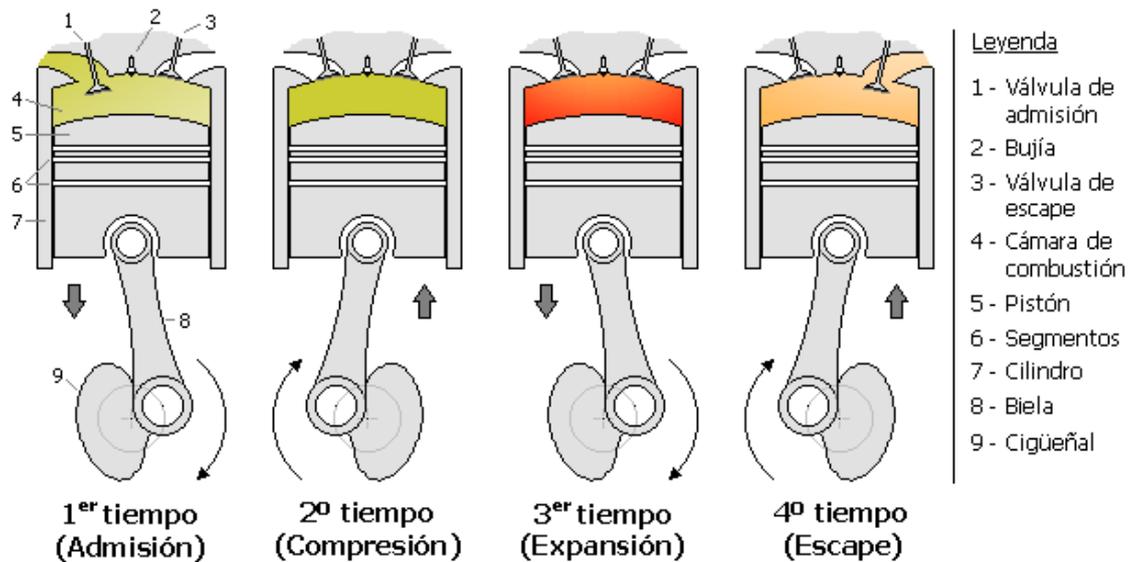
La temperatura en la cámara de combustión se mantiene elevada sobrepasando los 500 °C, siendo este valor superior al punto de inflamación del combustible.

#### 1.1.2.3. TERCER TIEMPO: EXPLOSIÓN

Al final del período de compresión de aire se inyecta combustible finamente pulverizado que al entrar en contacto con el aire que está a una elevada temperatura se inflama espontáneamente. La combustión producida eleva la temperatura y la presión haciendo que el émbolo se desplace desde el PMS al PMI. Durante este tiempo la muñequilla del cigüeñal gira 180°.

#### 1.1.2.4. CUARTO TIEMPO: ESCAPE

Durante este período el émbolo realiza una carrera ascendente desde el PMI al PMS efectuando el barrido de los gases por la válvula de escape que se encuentra abierta. Durante este tiempo la muñequilla del cigüeñal gira 180°, dando por terminado el ciclo de funcionamiento del motor diesel de cuatro tiempos.



**Figura 1.1** Ciclos de funcionamiento de un motor de cuatro tiempos

Fuente: s/a, Ciclo de Cuatro Tiempos, septiembre del 2009,

[http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo\\_de\\_cuatro\\_tiempos](http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_cuatro_tiempos)

### 1.1.3. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA COMBUSTIÓN

La combustión es una reacción termodinámica entre el oxígeno del aire y el combustible produciendo teóricamente un desprendimiento de energía en forma de calor más  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Para que esta reacción ocurra el combustible debe estar en estado gaseoso pudiendo ser mezclado de forma homogénea con el oxígeno. La combustión real difiere de la teórica ya que además de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  se producen sustancias contaminantes que son emitidas al medio ambiente en forma de emisiones.

El período de combustión se realiza muy rápidamente entre los  $30^\circ$  antes del PMS en el tiempo de compresión y  $20^\circ - 30^\circ$  después del PMS en el tiempo de combustión. Si se tiene un motor a diesel funcionando a 1600rpm y la combustión se realiza en  $50^\circ$  de giro del cigüeñal, el tiempo de combustión es de:

$$\text{tiempo de combustión} = 50^\circ \left( \frac{1 \text{ rev}}{360^\circ} \right) \left( \frac{1 \text{ min}}{1600 \text{ rev}} \right) \left( \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} \right) = 5.2 \text{ msec}$$

En el motor diesel el período de combustión puede dividirse en tres fases:

- a) Retardo a la inflamación
- b) Combustión de premezcla
- c) Combustión de difusión

#### 1.1.3.1. RETARDO A LA INFLAMACIÓN

El retardo a la inflamación es el tiempo transcurrido entre la entrada de las primeras gotas de combustible y el inicio de la combustión. El retardo a la inflamación debe ser el mínimo posible contrario a lo requerido en los motores a gasolina. Existen dos tiempos de retraso, el tiempo de retraso físico y el tiempo de retraso químico.

El tiempo de retraso físico se relaciona con la precisión y la velocidad de la inyección del combustible. Durante este período de tiempo el combustible es atomizado, vaporizado y mezclado con el aire en la cámara de combustión.

El tiempo de retraso químico es el tiempo transcurrido desde que el combustible se encuentre vaporizado y mezclado con el aire hasta que autoenciende. El tiempo de retraso químico depende de las condiciones de presión y de temperatura dentro del cilindro y de las características de atomización del combustible.

#### 1.1.3.2. COMBUSTIÓN DE PREMEZCLA

La combustión de premezcla representa la primera parte de la combustión en la que las primeras gotas de combustible inyectado se queman. En esta fase se producen gradientes de temperatura y de presión muy elevados desencadenando el encendido de todo el combustible presente en la cámara de combustión hasta ese momento. Esta fase produce el ruido característico de los motores diesel y se produce normalmente entre unos grados antes y después del PMS.

#### 1.1.3.3. COMBUSTIÓN DE DIFUSIÓN

En la combustión de difusión el combustible se va quemando a medida que entra en la cámara de combustión, al dosificar correctamente la cantidad de combustible

inyectado se puede tener el control de la presión máxima desarrollada en el interior del cilindro. La inmediata combustión del combustible inyectado es asegurada debido a las altas presiones y temperaturas generadas en la fase de combustión de premezcla. Cierta cantidad de combustible no encuentra el aire necesario para iniciar la combustión siendo quemada después de finalizar la inyección.

## 1.2. EMISIONES DE ESCAPE DEL MOTOR DIESEL

### 1.2.1. EL AIRE LIMPIO

El término aire limpio se utiliza para indicar una composición de referencia del aire sin que este hubiese sido afectado por la actividad humana. El aire limpio está formado por los siguientes componentes:

Componente		Concentración aproximada
<input type="checkbox"/> Nitrógeno	(N)	78.03% en volumen
<input type="checkbox"/> Oxígeno	(O)	20.99% en volumen
<input type="checkbox"/> Dióxido de Carbono	(CO <sub>2</sub> )	0.03% en volumen
<input type="checkbox"/> Argón	(Ar)	0.94% en volumen
<input type="checkbox"/> Neón	(Ne)	0.00123% en volumen
<input type="checkbox"/> Helio	(He)	0.0004% en volumen
<input type="checkbox"/> Criptón	(Kr)	0.00005% en volumen
<input type="checkbox"/> Xenón	(Xe)	0.000006% en volumen
<input type="checkbox"/> Hidrógeno	(H)	0.01% en volumen
<input type="checkbox"/> Metano	(CH <sub>4</sub> )	0.0002% en volumen
<input type="checkbox"/> Óxido nitroso	(N <sub>2</sub> O)	0.00005% en volumen
<input type="checkbox"/> Vapor de Agua	(H <sub>2</sub> O)	Variable
<input type="checkbox"/> Ozono	(O <sub>3</sub> )	Variable
<input type="checkbox"/> Partículas		Variable

**Tabla 1.1** Componentes del aire limpio

**Fuente:** s/a, septiembre del 2009, *Propiedades Físicas y Químicas del aire*,  
<http://www.ingenieroambiental.com/?pagina=695>

## 1.2.2. CONTAMINACIÓN DEL AIRE

La contaminación del aire es la emisión al aire de sustancias peligrosas a una tasa que excede la capacidad de los procesos naturales de la atmósfera para transformarlos, precipitarlos (lluvia o nieve), y depositarlos o diluirlos por medio del viento y el movimiento del aire.<sup>1</sup>

### 1.2.2.1. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PRIMARIOS

Los contaminantes atmosféricos primarios relacionados a la emisión de gases de escape de motores diesel son los siguientes:

- Monóxido de carbono, CO
- Óxidos de nitrógeno, NO<sub>x</sub>
- Dióxido de azufre, SO<sub>2</sub>
- Material particulado, MP
- Hidrocarburos no quemados, HC

### 1.2.2.2. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS SECUNDARIOS

Los contaminantes atmosféricos secundarios relacionados a la emisión de gases de escape de motores diesel son los siguientes:

- Ozono (O<sub>3</sub>) formado por la reacción química del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de luz solar.
- El ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y el ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) que son los principales constituyentes de la lluvia ácida.

---

<sup>1</sup> YASSI Annalee, y otros, *Salud Ambiental Básica*, Primera edición, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, México D.F. México, 2002, p.239.

### 1.2.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES PRODUCIDOS POR EL MOTOR DIESEL<sup>2</sup>

Nombre	<b>Material particulado (MP)</b>
Definición	Es una compleja mezcla de partículas suspendidas en el aire de diferente tamaño y composición.
Efectos	El material particulado es un vehículo de entrada en los pulmones de varias sustancias tóxicas que pueden provocar enfermedades pulmonares como el asma o el cáncer de pulmón. Adicionalmente, las partículas en el aire actúan absorbiendo otros contaminantes que al ingresar en los pulmones provocan intoxicaciones crónicas. Las partículas son más peligrosas mientras su tamaño es menor, ya que por su tamaño pueden atravesar con facilidad las mucosas que actúan como filtros en el sistema respiratorio.
Concentraciones	Aire limpio: 10-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Aire contaminado: 70-700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Nombre	<b>Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)</b>
Definición	Los óxidos de azufre son gases tóxicos producidos durante la combustión de carburantes que contienen azufre. El SO <sub>2</sub> se oxida en la atmósfera y forma SO <sub>3</sub> que al combinarse con el agua forma ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), que es uno de los principales componentes de la lluvia ácida.
Efectos	La contaminación por SO <sub>x</sub> puede causar daños a los seres humanos en el aparato respiratorio, ojos y mucosas que pueden llegar a ser graves. Algunos de los efectos de la lluvia ácida son: la deforestación y los desequilibrios químicos en el agua y los suelos a causa de la acidificación. Los óxidos de azufre causan el deterioro de materiales ya que

<sup>2</sup> Laboratorio de Calidad de Aire Urbano, *Estudio de la calidad del aire de la ciudad de Ambato*, Quito-Ecuador, 2008, p.36-39.



Efectos	<p>Los óxidos de nitrógeno provocan visibilidad reducida, irritación en la nariz y ojos, edema pulmonar, bronquitis y neumonía.</p> <p>La lluvia ácida generada por los óxidos de nitrógeno, participa junto con los compuestos orgánicos volátiles y las partículas en suspensión para crear smog.</p>
Concentraciones	Aire limpio: 0.001-0.01ppm                      Aire contaminado: 0.01-0.5ppm
Nombre	<b>Ozono (O<sub>3</sub>)</b>
Definición	<p>El ozono (O<sub>3</sub>) es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno. Es importante la diferenciación entre el ozono troposférico y el ozono estratosférico. En la estratósfera (capa alta de la atmósfera situada entre los 10 y los 50 km de altitud) se encuentra la capa de ozono que es la responsable de la absorción de la radiación ultravioleta del sol. En la tropósfera (capa baja de la atmósfera en contacto con la superficie terrestre) el ozono se forma por la reacción química del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de la luz solar.</p>
Efectos	<p>El ozono causa en los seres humanos problemas respiratorios, irritación ocular, dolor de cabeza y sequedad en la garganta.</p> <p>Destruye materiales como el caucho y elementos de construcción.</p> <p>El ozono troposférico favorece el efecto invernadero que causa un incremento de la temperatura del planeta.</p>
Concentraciones	Aire limpio:<0.01ppm                      Aire contaminado: >0.05ppm

### 1.2.3. TRANSPORTE EN EL AIRE DE LAS EMISIONES DIESEL

Las emisiones primarias de motores a diesel pueden ser divididas en dos grupos:

- Emisiones diesel en forma de gases
- Emisiones diesel en forma de partículas

#### 1.2.3.1. TRANSPORTE EN EL AIRE DE EMISIONES DIESEL EN FORMA DE GASES

Las emisiones diesel en forma de gases pueden seguir el proceso de deposición seca que es la caída de una sustancia por gravedad hasta la superficie, la deposición seca depende de la superficie en la que los gases caerán, de la estabilidad atmosférica y de propiedades químicas de los componentes. La deposición seca de compuestos orgánicos de emisiones diesel puede durar de semanas a meses mientras que la deposición húmeda que es la caída de sustancias por lluvia o nieve hasta la superficie puede tener una velocidad de  $10^{-4}$  cm/seg<sup>3</sup>.

La tasa de deposición de compuestos inorgánicos como el SO<sub>2</sub> y el ácido nítrico es relativamente rápida con valores de 0.1 – 2.5cm/seg<sup>4</sup>, además estos componentes permanecerán en la atmósfera por períodos más cortos de tiempo en comparación con los compuestos orgánicos.

Los procesos de deposición seca y húmeda pueden reducir extensamente la concentración atmosférica de los compuestos en estado gaseoso. Los tiempos de permanencia en la atmósfera de muchos de los componentes en forma de gases de las emisiones de motores a diesel están en el rango de horas o incluso de días, tiempo suficiente para que el movimiento del viento pueda dispersar los contaminantes ampliamente

---

<sup>3</sup> United States Environmental Protection Agency, *Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust*, Washington DC, mayo del 2002, p. 120.

<sup>4</sup> Idem p. 120

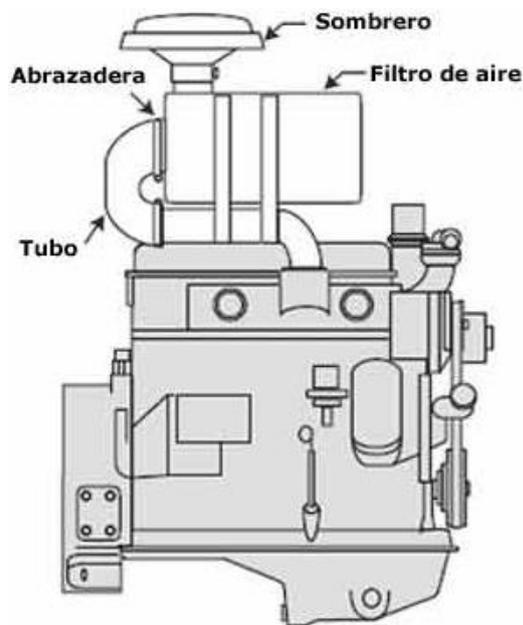
### 1.2.3.2. TRANSPORTE EN EL AIRE DE EMISIONES DIESEL EN FORMA DE PARTÍCULAS

Las partículas pueden ser removidas de la atmósfera por deposición seca o húmeda. Las partículas de diámetro pequeño ( $<1\mu\text{m}$ ) son removidas menos eficientemente de la atmósfera que las partículas grandes ya sea por deposición seca o húmeda por lo que tienen períodos muy largos de permanencia en la atmósfera.

Debido a su pequeño tamaño, el material particulado emitido por los motores a diesel puede tener períodos de permanencia en la atmósfera de varios días, con velocidades de deposición seca de  $0.01\text{cm/seg}$ <sup>5</sup>.

### 1.3. SISTEMA DE ADMISION DE AIRE AL MOTOR

El sistema de admisión de aire es el encargado de llevar aire fresco proveniente de la atmósfera a través de un filtro hacia el interior del motor con el fin de realizar el proceso de combustión. Está formado por la caja del filtro, filtro de aire, tubería y abrazaderas.



**Figura 1.2** Sistema de admisión de aire del motor

<sup>5</sup> United States Environmental Protection Agency, *Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust*, Washington DC, mayo del 2002, p. 123.

**Fuente:** John Deere, Sistema de Admisión de Aire del Motor, septiembre del 2009,

[http://www.deere.com.ar/es\\_AR/ag/homepage/consejo/cs071\\_sist\\_admision\\_motor.html](http://www.deere.com.ar/es_AR/ag/homepage/consejo/cs071_sist_admision_motor.html).

### 1.3.1. FILTRO DE AIRE

El filtro de aire es un elemento de gran importancia para el correcto funcionamiento del motor ya que debe remover las impurezas contenidas en el aire con una mínima pérdida de carga, es decir, el filtro debe oponerse lo menos posible al flujo del aire de manera que no afecte al rendimiento volumétrico. El filtro de aire debe permitir el correcto funcionamiento del motor por un período prolongado sin requerir mantenimiento. Algunos sistemas de admisión de aire cuentan con indicadores de restricción, que son elementos colocados entre el filtro de aire y el múltiple de admisión que muestran el momento oportuno de realizar un mantenimiento al filtro de aire.

### 1.3.2. TUBERÍAS Y ABRAZADERAS

Las tuberías utilizadas en el sistema de admisión deben tener la menor cantidad de restricciones para permitir que el aire proveniente de la atmósfera fluya libremente hacia el interior del motor. Codos con radios inadecuados, tuberías muy delgadas o demasiado largas deben ser evitadas. La caída total de presión en el conducto de admisión incluido el filtro de aire no debe ser superior a la recomendada en el manual del fabricante. Las abrazaderas construidas en materiales resistentes evitan las conexiones defectuosas que puedan permitir la entrada de contaminantes al motor.

## 1.4. SISTEMA DE ESCAPE DE LOS GASES QUEMADOS

En el tiempo de escape del motor, los gases quemados son evacuados del cilindro a una elevada temperatura y presión por el sistema de escape. Estos gases deben ser

expulsados de una manera rápida y eficaz vaciando el cilindro para que los gases frescos puedan volver a llenarlo en el tiempo de admisión.

La elevada presión y temperatura de los gases genera un ruido característico en el escape que debe ser corregido. El sistema de escape se diseña con la finalidad de reducir el ruido producido, de manera que cuando los gases sean vertidos en la atmósfera el ruido generado esté dentro de límites permitidos por la ley. De otra parte, es necesario evitar la introducción de estos gases en el habitáculo, el sistema de escape también cumple con este fin.

Debido a los problemas generados por las emisiones tóxicas del motor diesel, ciertos sistemas de escape contienen dispositivos anticontaminantes como filtros de partículas, catalizadores, etc. Dichos dispositivos han llegado a ser una función adicional del sistema de escape permitiendo el control de emisiones contaminantes.

#### 1.4.1. COMPONENTES DEL SISTEMA DE ESCAPE

El sistema de escape está formado por los siguientes elementos:

##### 1.4.1.1. COLECTOR DE ESCAPE

El colector de escape es un componente generalmente construido en hierro fundido que permite la salida de los gases quemados desde el motor hacia el tubo de escape. Está fijado a la culata por medio de espárragos con interposición de juntas. En la figura se puede apreciar a este componente.



**Figura 1.3** Colector de Escape

**Fuente:** s/a, Exhaust Manifold, septiembre del 2009,

<http://www.atpturbo.com/Merchant2/graphics/00000001/Catalog%20Images/Vehicle%20Specific/manifold2.jpg>

#### 1.4.1.2. TUBOS DE ESCAPE Y CODOS

Los tubos y codos de escape permiten contener y dirigir los gases de escape desde el motor hasta el medio ambiente de manera que se evite la entrada de los mismos al habitáculo del vehículo. Existen en el mercado una gran variedad de formas y tamaños; se pueden hacer una clasificación general en dos tipos: tubos regulares y tubos flexibles. Los tubos de escape regulares son rígidos siendo los más comúnmente aplicados. Los tubos de escape flexibles son utilizados cuando el sistema de escape debe ser lo suficientemente flexible para acomodarse a las condiciones del camino y para ajustarse a las expansiones térmicas de los tubos que en el caso de ser regulares podría quebrarse o romperse.



**Figura 1.4** Tubos regulares

**Fuente:** s/a, Magnaflow exhaust system, septiembre del 2009, [http://shop.oreillyauto.com/product\\_images/img/mfl/15753.jpg](http://shop.oreillyauto.com/product_images/img/mfl/15753.jpg), imagen modificada por el autor



**Figura 1.5** Tubo flexible

**Fuente:** s/a, *Exhaust Pipes*, septiembre del 2009, <http://allneed.net/product/images/6-2.gif>

### 1.4.1.3. EL SILENCIADOR



**Figura 1.6** Silenciador del chasis para bus Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

El silenciador es el componente del sistema de escape encargado de reducir el ruido producido por el motor durante su funcionamiento. Una onda de presión generada durante la combustión dentro del cilindro se propaga a través del sistema de escape hasta salir al medio ambiente, el número de pulsos por segundo se repiten a la frecuencia de explosión del motor. Debido a que el ciclo de funcionamiento del motor es de cuatro tiempos se necesitan dos revoluciones para completar un ciclo total, es decir, se tendrá una explosión por cada dos revoluciones, la frecuencia de explosión del motor viene dada por la siguiente fórmula<sup>6</sup>:

$$f = \frac{rpm \times \text{número de cilindros}}{2} \left[ \frac{\text{explosiones}}{\text{minuto}} \right]$$

$$f = \frac{rpm \times \text{número de cilindros}}{2 \times 60} \left[ \frac{\text{explosiones}}{\text{segundo}} \right]$$

$$f = \frac{rpm \times \text{número de cilindros}}{120} \left[ \frac{\text{explosiones}}{\text{segundo}} \right]$$

El valor de la frecuencia de explosión es importante para el diseño de los silenciadores ya que la frecuencia del ruido del escape es dominada por este valor.

---

<sup>6</sup> s/a, *Exhaust Muffler Design Principles*, septiembre del 2009, [www.aussiefrogs.com/forum/uploaded/5308/1155795969.pdf](http://www.aussiefrogs.com/forum/uploaded/5308/1155795969.pdf).

En general las ondas de sonido que se propagan por el sistema de escape pueden ser atenuadas por silenciadores reactivos o disipativos. Los silenciadores disipativos utilizan materiales capaces de absorber el sonido que toman de la energía de las ondas sonoras mientras estas atraviesan el silenciador. Los silenciadores reactivos eliminan las ondas de sonido basándose en el principio del resonador de Helmholtz o en el principio de la cámara de expansión.

En el resonador de Helmholtz una cavidad es añadida al tubo de escape. A una frecuencia específica la cavidad entrará en resonancia y las ondas que están en el tubo de escape se reflejarán hacia la fuente. El silenciador es diseñado para frecuencias específicas en donde la mayor atenuación es requerida. En algunos casos, el silenciador puede contener algunas cavidades de distintos tamaños de manera que puede trabajar atenuando el ruido en un rango mayor de frecuencias.

En el silenciador de cámara de expansión las ondas son reflejadas a la fuente al introducir una expansión súbita en el área del tubo. No es tan eficiente como el resonador de Helmholtz pero trabaja en un mayor rango de frecuencias. Algunos silenciadores de cámara de expansión contienen material absorbente de ruido consiguiendo así mayores características de atenuación.

En todos los diseños de silenciadores la longitud del tubo de escape tiene una gran importancia ya que el tubo de escape actúa como una caja de resonancia que modifica las características de atenuación del silenciador. Además si se varía el área del tubo las velocidades de los gases también varían afectando el funcionamiento del silenciador.

#### 1.4.1.4. BOCA DE SALIDA

La boca de salida completa el diseño del tubo de escape, este elemento es el encargado de direccionar los gases de manera que no puedan entrar en el habitáculo, la figura 1.7 muestra algunos diseños que han sido utilizados en los buses de la ciudad de Cuenca.



**Figura 1.7** Diseños de bocas de salida que han sido utilizados en la ciudad de Cuenca

**Fuente:** El autor

## 1.4.2. ACCESORIOS DEL SISTEMA DE ESCAPE

### 1.4.2.1. SOPORTES

Los soportes son componentes metálicos utilizados para sujetar a alguna pieza del sistema de escape. Generalmente se usan elementos de goma para suprimir las vibraciones.



**Figura 1.8** Soportes del silenciador

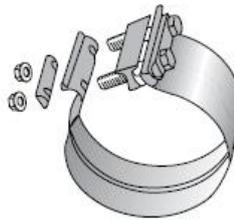
**Fuente:** Mandrel Bending, Catalog School Bus Exhaust Systems, octubre del 2009,  
[http://www.mandrelbending-tubefabrication.com/pdf/2008\\_bus\\_complete\\_catalog.pdf](http://www.mandrelbending-tubefabrication.com/pdf/2008_bus_complete_catalog.pdf).

#### 1.4.2.2. ABRAZADERAS

Las abrazaderas son componentes utilizados para realizar conexiones herméticas entre dos tubos o un silenciador y un tubo evitando fugas de gases hacia el exterior. Los tipos más comunes de abrazaderas son:

##### 1.4.2.2.1. ABRAZADERA DE BANDA ANCHA

Este tipo de abrazadera evita la necesidad de soldadura realizando un sellado adecuado sin dañar los tubos a unir. Puede unir tubos regulares o tubos flexibles.



**Figura 1.9** Abrazadera de banda ancha

**Fuente:** Cummins Filtration, *Exhaust System Guide*, octubre del 2009, [www.cumminsfiltration.com/pdfs/product\\_lit/americas\\_brochures/LT32201.pdf](http://www.cumminsfiltration.com/pdfs/product_lit/americas_brochures/LT32201.pdf)

##### 1.4.2.2.2. ABRAZADERA CON BANDA EN V

Se utiliza para conectar el múltiple de escape o el turbocargador al tubo de escape.



**Figura 1.10** Abrazadera con banda en V

**Fuente:** Cummins Filtration, *Exhaust System Guide*, octubre del 2009, [www.cumminsfiltration.com/pdfs/product\\_lit/americas\\_brochures/LT32201.pdf](http://www.cumminsfiltration.com/pdfs/product_lit/americas_brochures/LT32201.pdf)

### 1.4.2.3. PROTECCIONES CONTRA EL CALOR

Para la configuración de sistema de escape vertical cuando el silenciador se coloca exterior a la carrocería se instala una protección contra el calor que evita quemaduras a personas en caso de contacto.



**Figura 1.11** Protección contra el calor colocada en un silenciador

**Fuente:** Cummins Filtration, *Exhaust System Guide*, octubre del 2009,  
[www.cumminsfiltration.com/pdfs/product\\_lit/americas\\_brochures/LT32201.pdf](http://www.cumminsfiltration.com/pdfs/product_lit/americas_brochures/LT32201.pdf)

Cuando se instalan elementos del sistema de escape muy cercanos a componentes del vehículo como instalaciones eléctricas, se debe instalar protecciones contra el calor para evitar daños por altas temperaturas.



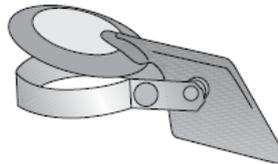
**Figura 1.12** Placa con aislante térmico

**Fuente:** Agriemach LTD, *Heat Shield Muffler – Catalytic Converter*, octubre del 2009  
[www.agriemach.com/default.php?cPath=0\\_7&osCsid=4sd1khsptfuhqsja6hsdt16nl5](http://www.agriemach.com/default.php?cPath=0_7&osCsid=4sd1khsptfuhqsja6hsdt16nl5)

El “MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DE CARROCERÍAS PARA BUSES DE TRABAJO PESADO CON MOTOR TRASERO DE LA SERIE LV150 DE GM” indica que en caso de instalar partes de la carrocería cercanas al tubo de escape, se requiere instalar una placa metálica de protección con aislante de calor. El protector debe ser ajustado a 30 mm de distancia de la superficie del tubo de escape.

#### 1.4.2.4. TAPA DE LLUVIA

La tapa de lluvia es utilizada en el sistema de escape vertical para evitar el ingreso de agua dentro de los diferentes componentes evitando así la corrosión de los mismos.



**Figura 1.13** Tapa de lluvia

**Fuente:** Cummins Filtration, *Exhaust System Guide*, octubre del 2009,  
[www.cumminsfiltration.com/pdfs/product\\_lit/americas\\_brochures/LT32201.pdf](http://www.cumminsfiltration.com/pdfs/product_lit/americas_brochures/LT32201.pdf)

### 1.5. LA SOBREALIMENTACION EN EL MOTOR DIESEL

#### 1.5.1. GENERALIDADES DE LA SOBREALIMENTACIÓN

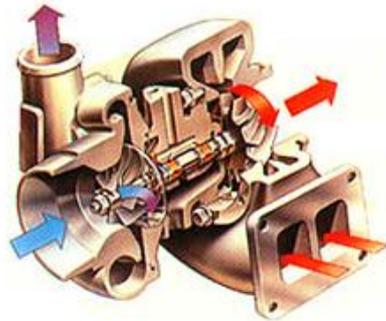
La utilización de elementos que permitan sobrealimentar a los motores diesel viene dado por la necesidad de incrementar la potencia sin aumentar la cilindrada. La potencia es dependiente de la cantidad de combustible quemada adecuadamente en cada ciclo de funcionamiento del motor. Pero por mucho que se aumente la cantidad de combustible inyectado si no se introduce al mismo tiempo mayor cantidad de aire dentro del cilindro no se conseguirá el aumento de potencia deseado.

Por lo tanto, se conseguirá aumentar la potencia con una misma cilindrada si conseguimos colocar dentro del cilindro una cantidad de aire mayor a la que se obtiene en un motor de aspiración normal.

En ciudades situadas a grandes altitudes como es el caso de la ciudad de Cuenca con aproximadamente 2500 msnm, se debe compensar la disminución de la densidad del aire debido a la menor presión atmosférica. La sobrealimentación permite el mayor ingreso de aire a los cilindros corrigiendo los problemas de disminución de la densidad del aire.

Al introducir un exceso de aire en el cilindro la compresión aumenta, este incremento de compresión facilita el autoencendido y el completo quemado del combustible inyectado lo que permitirá un aumento en la potencia del motor. Por otro lado, la

mayor presión de aire de admisión favorece la expulsión de los gases quemados y el llenado de los cilindros con aire fresco con lo que se consigue que el motor respire mejor.

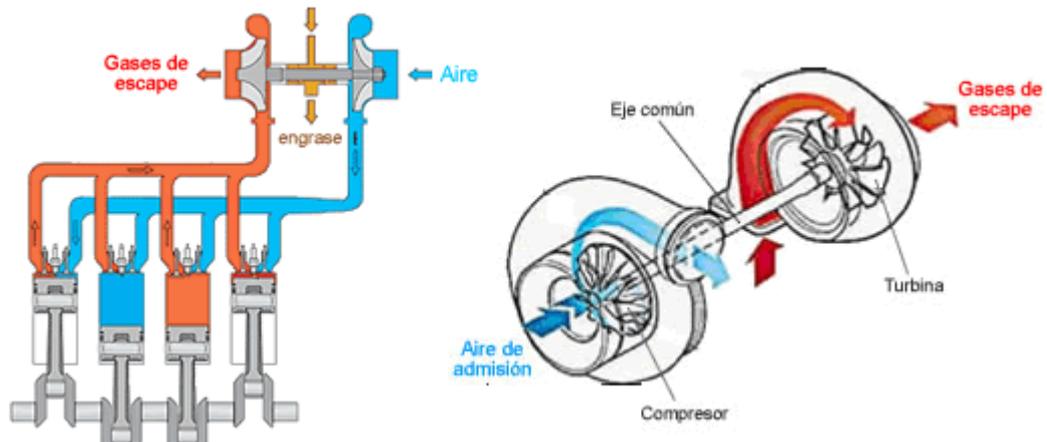


**Figura 1.14** Turbocompresor de la marca Garret

**Fuente:** s/a, *Motores Sobrealimentados*, octubre del 2009,  
<http://www.mecanicavirtual.org/turbo.htm>

### 1.5.2. EL TURBOCOMPRESOR

El turbocompresor es un sistema de sobrealimentación que aprovecha la energía con la que salen los gases de escape para impulsar una turbina la cual está unida mediante un eje a un compresor. El compresor está colocado en el sistema de admisión de aire del motor posee un movimiento giratorio obtenido de la turbina por el eje común. El compresor eleva la presión del aire que pasa por el filtro hacia cada uno de los cilindros mejorando la alimentación del motor. El turbocompresor gira a velocidades de rotación por encima de las 100000rpm por lo que el sistema de lubricación debe estar en correcto estado, además la turbina del turbocompresor está sometida a temperaturas muy elevadas de los gases de escape que alcanzan los 750°C.



**Figura 1.15** Esquema de funcionamiento de un turbocompresor

**Fuente:** s/a, *Motores Sobrealimentados*, octubre del 2009,  
<http://www.mecanicavirtual.org/turbo.htm>

### 1.5.3. EL INTERCOOLER

El intercooler es un intercambiador de calor que permite enfriar el aire comprimido por el turbocompresor antes de que sea enviado al motor. Cuando un gas como el aire es comprimido su temperatura aumenta, en el caso del turbocompresor el aire alcanza una temperatura entre 90 - 120°C. Este aumento de temperatura debe ser evitado ya que la densidad del aire se vuelve menor y por consiguiente la masa de oxígeno por unidad de volumen disminuye provocando una reducción en la potencia del motor ya que la cantidad de oxígeno disponible en los cilindros es menor.

El intercooler permite la reducción de la temperatura del aire de admisión a unos 60 °C con lo que se consigue un incremento de potencia del 10 al 15% en comparación con un motor sobrealimentado sin intercooler.

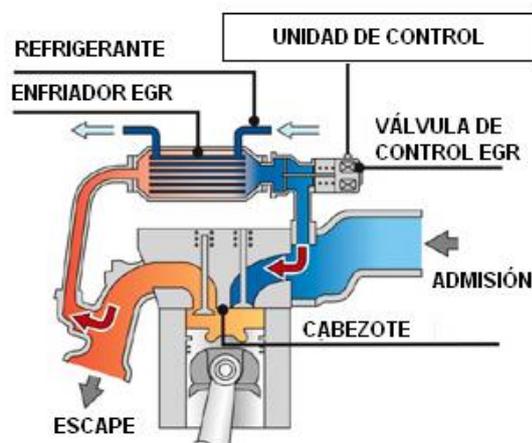


**Figura 1.16** Intercooler aire/aire

**Fuente:** s/a, *Intercooler*, octubre del 2009,  
<http://informaciondeautos.com/sistematurbo/>

## 1.6. RECIRCULACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE

Los óxidos de nitrógeno son contaminantes del motor diesel que pueden ser reducidos al utilizar un sistema de recirculación de los gases de escape EGR proveniente del inglés Exhaust Gas Recirculation. Este sistema reenvía cierto porcentaje de los gases de escape al colector de admisión consiguiendo de esta manera una reducción en la cantidad de oxígeno presente en el aire de admisión que provoca un descenso en la temperatura de la combustión reduciendo de esta manera los óxidos de nitrógeno.



**Figura 1.17** Esquema de funcionamiento de sistema externo EGR

**Fuente:** Hitachi Construction Machinery, *Cooled EGR System*, octubre del 2009, [http://www.hitachi-c-m.com/asia/products/excavator/wheel/zx210w-3/feature\\_1.html](http://www.hitachi-c-m.com/asia/products/excavator/wheel/zx210w-3/feature_1.html)

El momento de apertura de la válvula EGR y la cantidad de gases de escape enviados a la admisión es determinado por la ECU. Se consideran los siguientes parámetros: la cantidad de combustible inyectado, el régimen de giro del motor, el caudal de aire aspirado, la temperatura del motor y la presión atmosférica.

## 1.7. LA CONTRAPRESIÓN EN EL SISTEMA DE ESCAPE

### 1.7.1. DEFINICIÓN

La diferencia entre la presión media en el tubo de escape y la presión atmosférica es la denominada contrapresión en el sistema de escape. El valor de contrapresión es una medida de la resistencia al flujo libre de los gases a través de los diferentes

componentes del sistema de escape; éste parámetro permite evaluar las restricciones ocasionadas por el silenciador, tuberías demasiado largas, tuberías de diámetro demasiado pequeño, cambios de dirección bruscos, etc.

### 1.7.2. DISEÑOS QUE PROVOCAN CONTRAPRESIÓN EN EL ESCAPE

En nuestro medio son muchos los diseños inadecuados de sistemas de escape realizados para los buses de transporte masivo de pasajeros, estos diseños incrementan el valor de contrapresión ocasionando problemas en el funcionamiento del motor; a continuación se indican algunos ejemplos de sistemas con defectos constructivos.



**Figura 1.18** Contrapresión generada por tubería de menor diámetro

**Fuente:** El autor



**Figura 1.19** Contrapresión generada por cambios de dirección bruscos

**Fuente:** El autor



**Figura 1.20** Contrapresión generada por unión entre dos tuberías de diferente diámetro

**Fuente:** El autor

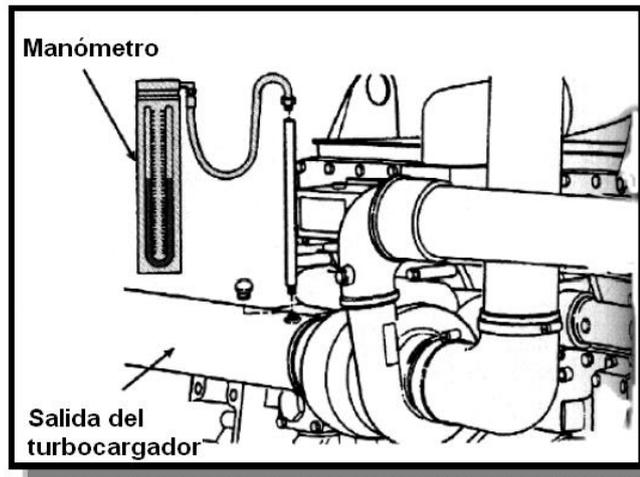


**Figura 1.21** Contrapresión generada por uniones soldadas inadecuadas

**Fuente:** Ing. Pedro Cabrera

### 1.7.3. MEDIDA DE LA CONTRAPRESIÓN

La medición de la contrapresión en el sistema de escape se realiza con un manómetro conectado en un agujero taladrado en la salida del turbocargador en el tubo de escape, luego de la medición el orificio debe ser cerrado con un punto de suelda. Dependiendo del medidor de contrapresión, los valores pueden ser dados en psi, kPa, pulgadas de mercurio, milibares, etc. Los sistemas de escape mal diseñados que ofrecen mayor resistencia al flujo de los gases empiezan a crear problemas en el desempeño del motor a un régimen elevado de revoluciones, debido a esto la medida de la contrapresión no debe ser realizada en ralentí.



**Figura 1.22** Medida de la contrapresión en el escape

**Fuente:** s/a, Diesel Engine Exhaust Systems, septiembre del 2009,  
<http://transportation.centennialcollege.ca/gwright/Engine/Diesel%20Engine%20Exhaust%20Systems%2010-06.pdf>

Valores altos de contrapresión indican una gran resistencia al flujo de los gases de escape mientras que valores bajos de contrapresión indican una resistencia al flujo muy baja. Generalmente los fabricantes de motores indican los valores máximos admisibles de contrapresión en el sistema de escape de manera que el funcionamiento del motor no se vea afectado.



**Figura 1.23** Medidor de contrapresión

**Fuente:** s/a, Exhaust Back Pressure Testes, noviembre del 2009,  
<http://www.mytoolstore.com/toolaid/diagn04.html>.

En el manual “DIRECTRICES PARA MONTAJE DE SUPERESTRUCTURAS Y EQUIPOS EN CHASIS PARA AUTOBUSES Y PLATAFORMAS DE MERCEDES BENZ” indica que el valor de contrapresión máximo para los buses con chasis Mercedes-Benz OF1721 es de 100mbar.

#### 1.7.4. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN EL MOTOR DIESEL

Una elevada contrapresión en el sistema de escape afectará a los siguientes aspectos:

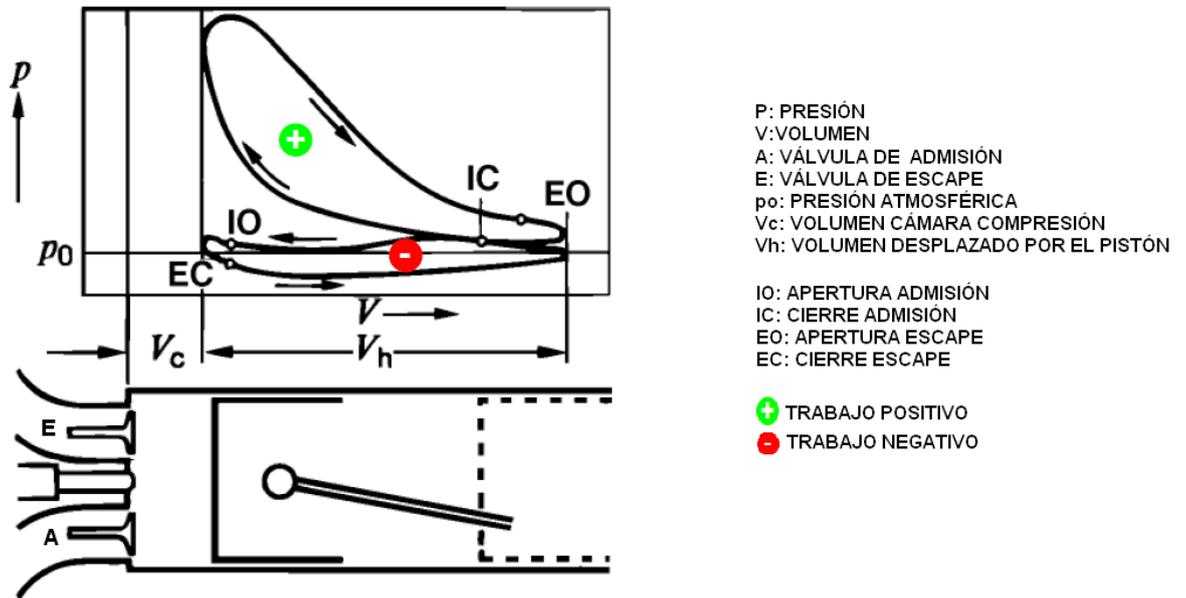
##### 1.7.4.1. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN LA POTENCIA DEL MOTOR Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Mientras mayor sea la contrapresión generada en el sistema de escape menor será la potencia disponible en el volante motor y por ende mayor será el consumo de combustible. Una presión de 200mbar ocasiona una pérdida de potencia en un motor a diesel de 2-3% y un aumento en el consumo de combustible de igual magnitud<sup>7</sup>.

La pérdida de potencia del motor puede ser explicada si se analiza el ciclo real de un motor de cuatro tiempos en un diagrama P-V. En este diagrama se puede observar una zona de trabajo negativo denominada trabajo de bombeo que es generada por la acción del pistón en las fases de admisión y escape. Durante la admisión la presión es menor a la presión atmosférica, mientras que en el escape la presión es superior a la presión atmosférica; estas dos condiciones obligan a realizar un trabajo que consume parte de la energía proveniente del motor. Mientras mayor sea la contrapresión en el sistema de escape, mayor será la presión durante la fase de escape y más significativo será el trabajo que tiene que realizar el motor para evacuar los gases del cilindro.

---

<sup>7</sup> JAUSSEI, François, *Critical Effects of Filters on Engines and on Filters by Engines*, junio del 2009, [www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf](http://www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf).



**Figura 1.24** Ciclo real en un diagrama P-V (motor no sobrealimentado)

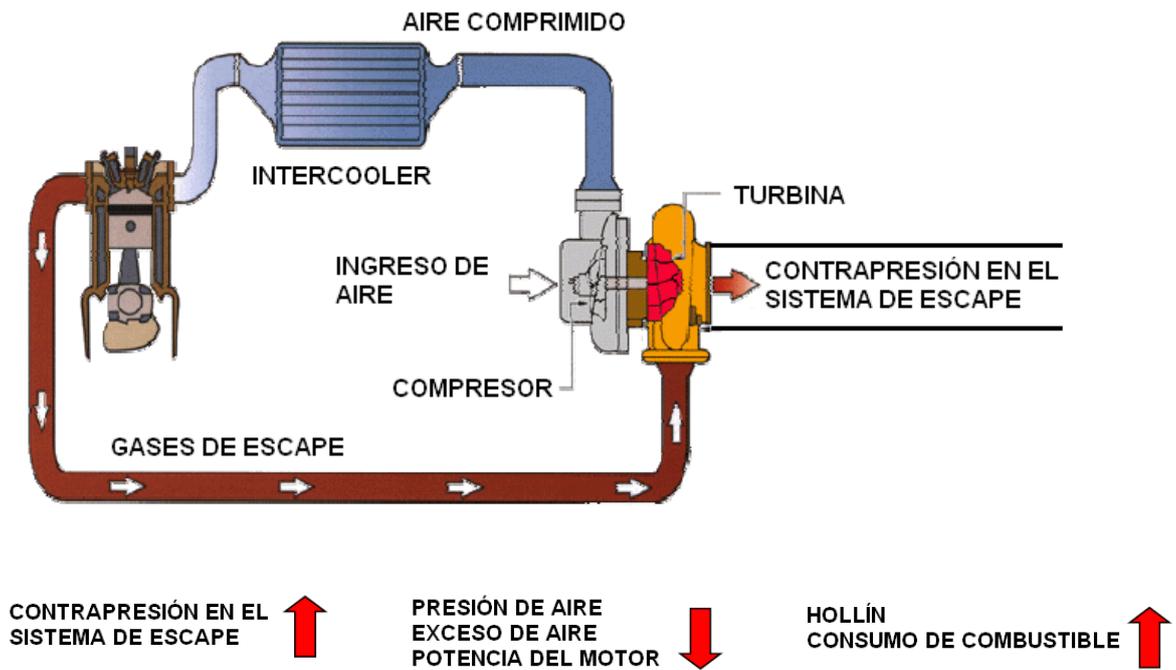
**Fuente:** JAUSSEI, François, *Critical Effects of Filters on Engines and on Filters by Engines*, junio del 2009, [www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf](http://www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf).

#### 1.7.4.2. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN LA SOBREALIMENTACIÓN

Los motores sobrealimentados tienen mayores problemas en su funcionamiento que los motores naturalmente aspirados cuando se presenta un aumento de la contrapresión en el sistema de escape. En el turbocompresor se aprovechan los gradientes de temperatura y de presión entre la entrada y la salida de la turbina para producir energía cinética que hace girar al eje que une a la turbina y al compresor, este último eleva la presión del aire que es enviado hacia la admisión del motor.

Mientras mayor sea la contrapresión en los elementos del sistema de escape, menores serán los gradientes de presión y de temperatura entre la entrada y la salida de la turbina por lo que se tendrá menor energía disponible para impulsar al compresor y por ende menor cantidad de aire será enviada al motor por unidad de tiempo.

Una disminución del exceso de aire disponible para la combustión provocará una disminución en la potencia del motor, un aumento en la producción de hollín y un incremento en el consumo de combustible.

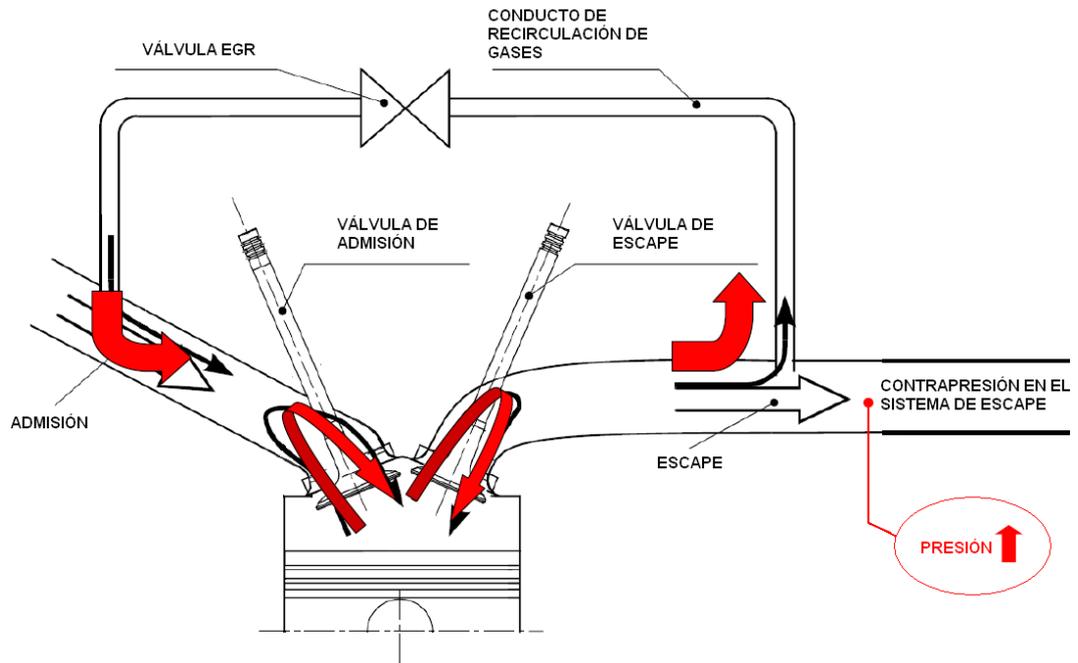


**Figura 1.25** Influencia de la contrapresión en la sobrealimentación

**Fuente:** JAUSSEI, François, *Critical Effects of Filters on Engines and on Filters by Engines*, junio del 2009, [www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf](http://www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf).

#### 1.7.4.3. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN LA RECIRCULACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE

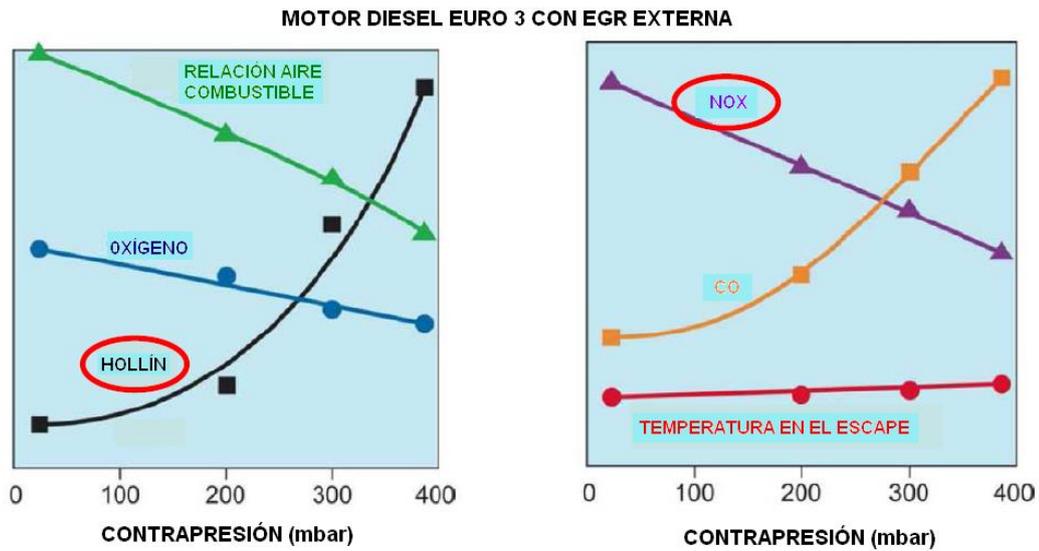
La cantidad de gases recirculados es directamente proporcional a la presión en el conducto de recirculación de gases de escape y al tiempo de apertura de la válvula EGR. Si el valor de presión de los gases aumenta por encima de los valores nominales, se tendrá mayor cantidad de gases enviados a la admisión en un mismo tiempo de apertura de la válvula EGR. Por lo tanto, se tendrá mayor recirculación de gases de escape a medida que la contrapresión aumente.



**Figura 1.26** Influencia de la contrapresión en la recirculación de gases de escape

**Fuente:** JAUSSE, François, *Critical Effects of Filters on Engines and on Filters by Engines*, junio del 2009, [www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf](http://www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf).

Valores de recirculación de gases de escape exagerados provocarán mayor empobrecimiento de la mezcla aire/combustible y a su vez menor cantidad de oxígeno presente para las reacciones de combustión por lo que las emisiones contaminantes se verán modificadas. En la siguiente figura se indica como ciertas características de funcionamiento y emisiones contaminantes de un motor varían al ser sometido a distintos valores de contrapresión.

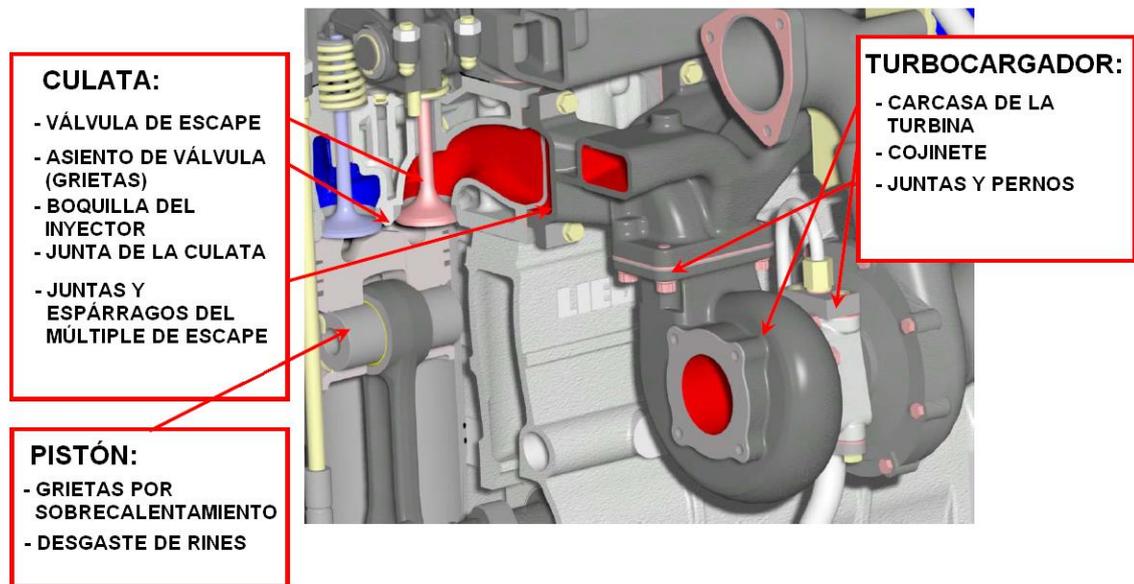


**Figura 1.27** Variación de características de funcionamiento y emisiones al variar la contrapresión.

**Fuente:** JAUSSEI, François, *Critical Effects of Filters on Engines and on Filters by Engines*, junio del 2009, [www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf](http://www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf).

#### 1.7.4.4. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN LA TEMPERATURA DE LOS COMPONENTES

El aumento de contrapresión produce un incremento de temperatura en los gases de escape que afectará a componentes del motor reduciendo su vida útil, en la siguiente figura se pueden apreciar los elementos afectados:



**Figura 1.28** Componentes del motor afectados por el incremento de contrapresión.

Fuente: JAUSSEI, François, *Critical Effects of Filters on Engines and on Filters by Engines*, junio del 2009, [www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf](http://www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf).

## 1.8. LEYES Y NORMATIVAS QUE REGULAN LA DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE EN LOS BUSES DE TRANSPORTE MASIVO DE PASAJEROS

### 1.8.1. DISEÑO ORIGINAL DEL FABRICANTE DEL CHASIS

Algunas leyes y normativas mencionan el diseño original del fabricante del chasis, debido a esto, a continuación se indica cómo se presentan los diseños originales de chasis en nuestro medio:

- El diseño original del chasis para transporte de pasajeros incluye la salida única de escape por la parte posterior en la parte baja de la carrocería.
- El diseño original del chasis para carga modificado para transporte de pasajeros incluye una salida central de escape hacia un costado del vehículo en la parte baja.

## 1.8.2. LEYES Y NORMATIVAS PARA LA CIUDAD DE CUENCA

Las leyes y normativas que regulan la disposición del conducto de escape en los buses de transporte masivo de pasajeros son las siguientes:

### 1.8.2.1. REGLAMENTO GENERAL PARA LA APLICACIÓN DE LA LEY ORGÁNICA DE TRANSPORTE TERRESTRE, TRÁNSITO Y SEGURIDAD VIAL

Art. 181.- La salida del tubo de escape de los vehículos de transporte público y comercial, y por cuenta propia, deberá estar instalado en la parte posterior izquierda o derecha en un ángulo de cuarenta y cinco grados.

Art. 328.- El sistema de salida de escape de gases de los vehículos de transporte público o comercial deberá estar construido considerándose el diseño original del fabricante del chasis; sin embargo, debe constar de una sola salida sin la apertura de orificios u otros ramales a la tubería de escape, no debe disponer de cambios de dirección brusco, evitando de esta manera incrementar la contrapresión en las válvulas de escape del motor, y la ubicación final de la tubería deberá estar orientada conforme a las normas técnicas establecidas para cada servicio de transporte.

### 1.8.2.2. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 205:2002 VEHÍCULOS AUTOMOTORES. BUS URBANO. REQUISITOS.

- Sistema de escape: Debe respetarse el diseño original del fabricante, evitando incrementar la contrapresión en las válvulas de escape.

### 1.8.2.3. CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y DE SEGURIDAD PARA LAS UNIDADES DE TRANSPORTE URBANO ESTANDARIZADAS (BUS TIPO) DE LA CIUDAD DE CUENCA.

- Salida de escape: Debe tener una sola salida en la parte posterior izquierda del vehículo, siempre en la parte baja de la carrocería. La salida puede sobrepasar las líneas finales de la carrocería hasta 10 cm. y el tramo final del escape debe ser curvo a 45 grados en dirección al suelo.

### 1.8.3. LEYES Y NORMATIVAS EN EL EXTRANJERO

#### 1.8.3.1. DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA BUSES EN CHILE

La resolución de la Subsecretaría de Transporte de Chile (Res\_121.1987) indica lo siguiente:

- Los buses y taxibuses con motor Diesel, que presten servicios de locomoción colectiva urbana en la ciudad de Santiago, deberán estar dotados de un tubo de escape en forma vertical, de modo que la descarga de gases se efectúe por sobre el nivel del techo del habitáculo de pasajeros del vehículo.
- Solamente los buses y taxibuses con motor diesel, que presten servicios de locomoción colectiva urbana en la ciudad de Santiago, que tengan instalado un filtro o purificador catalítico y cuyo índice de emisión no sobrepase los máximos permitidos, lo que se acreditará mediante certificado de revisión correspondiente, podrán sustituir el tubo de escape de gases vertical establecido en el artículo primero de la presente resolución, por uno horizontal que en forma recta expelerá los gases por el extremo posterior del vehículo.
- El tramo de tubo vertical deberá contar con una adecuada protección o pantalla y su terminal estar diseñado de manera que permita en forma fácil la medición de la opacidad

#### 1.8.3.2. DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA BUSES ESCOLARES EN ESTADOS UNIDOS

El documento denominado “SCHOOL BUS STANDARDS” de Estados Unidos en el cual se indican las especificaciones técnicas y de seguridad de los buses escolares indica lo siguiente:

- Los fabricantes de chasis deberán suministrar el sistema de escape con un tubo de una longitud lo suficientemente grande para que la salida sea por la parte posterior del bus o por la parte izquierda de la carrocería entre los ejes a una distancia no mayor a 18 pulgadas (46cm) al borde del alojamiento de la rueda posterior. Si el sistema de escape es diseñado para

que el tubo salga por la parte posterior del bus, la salida debe extenderse al menos 5 pulgadas (12.7 cm) más allá del final del marco del chasis. Si el sistema de escape es diseñado para que su salida sea por la parte lateral, el tubo de escape debe extenderse por lo menos 48 pulgadas (51.5 pulgadas si la carrocería debe tener 102 pulgadas de ancho) hacia afuera desde la línea media longitudinal del chasis.

#### 1.8.3.3. DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA BUSES EN BRASIL

En Brasil, un documento denominado: “Projeto de Norma Técnica 5:11.03-06 – Posicionamiento do Tubo de Descarga em Veículos Rodoviários Automotores – julho/1988” indica lo siguiente:

- La configuración del tubo de escape debe estar integrada en el proyecto del fabricante del vehículo.
- Para los buses de transporte de pasajeros, el proyecto recomienda que el tubo de descarga vertical debe estar situado en la región trasera del vehículo, en el lado izquierdo, con la salida lo más próxima posible al techo del vehículo a una altura, no menor de 2.4 metros desde el suelo. El tubo puede ser construido interna o externamente a la carrocería. La salida puede ser curvada entre 10 y 90° en relación con el plano horizontal y cortada en un ángulo de 90° para evitar el ingreso de agua.

#### 1.8.3.4. DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA BUSES EN PERÚ

En Perú, un documento denominado: “Reglamento del Servicio Público de Transporte Urbano e Interurbano de Pasajeros en Omnibus y otras modalidades para la provincia de Lima” indica lo siguiente:

- El tubo de escape, silenciador y tubo de cola, tendrán una dimensión apropiada que no sobresalga del nivel de la carrocería (a una altura igual o mayor de la del techo del vehículo) y serán sujetados adecuadamente.

- El sistema de escape deberá ser diseñado y proporcionado por el fabricante del chasis, quien deberá tener en cuenta la seguridad del vehículo para el transporte de pasajeros.
- Los tubos de escape estarán montados en la parte inferior de la carrocería hacia el lado izquierdo, en forma tal que los gases que expidan no recaigan directamente en las personas que circulan por las veredas o que están en los paraderos.

### **1.9. IMPORTANCIA DE LA DISPOSICIÓN DEL CONDUCTO DE ESCAPE**

La correcta disposición del conducto de escape en los buses de transporte masivo de pasajeros es un factor muy importante ya que afecta de forma directa al funcionamiento del motor. Al construir un sistema de escape con excesiva restricción se disminuye la potencia disponible, se aumenta el consumo de combustible, la temperatura de ciertos componentes del motor y se incrementa la emisión de contaminantes.

Además de los problemas generados en el motor, una disposición indebida del sistema de escape puede causar molestias a los peatones o causar la intromisión de contaminantes en el habitáculo afectando a los pasajeros.

## CAPITULO 2

### ESTUDIO ANALÍTICO DEL CONDUCTO DE ESCAPE

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrollan los fundamentos teóricos necesarios para el análisis de los sistemas de escape en sus distintas configuraciones. Primero se revisarán los conceptos básicos que permiten definir las propiedades de un fluido y sus características de flujo para posteriormente realizar el estudio del flujo de fluidos en tuberías, codos, accesorios, etc. Finalmente se estudiarán las condiciones necesarias para realizar el cálculo del flujo de un fluido en un conducto sin considerar la compresibilidad.

#### 2.2. CONCEPTOS BÁSICOS

##### 2.2.1. DEFINICIÓN DE FLUIDO

Un fluido es una sustancia o medio continuo que se deforma continuamente en el tiempo ante la aplicación de una sollicitación o tensión tangencial sin importar la magnitud de ésta<sup>8</sup>. Existen dos clases de fluidos, los líquidos y los gases. Todos los fluidos pueden comprimirse en cierto grado, los líquidos son prácticamente incompresibles mientras que los gases son comprensibles; éste hecho hace que los estudios de los gases y de los líquidos tengan características diferentes.

##### 2.2.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

###### 2.2.2.1. DENSIDAD

La densidad es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia.

Se utiliza la letra griega  $\rho$  (rho) para denotar la densidad.

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

---

<sup>8</sup> s/a, *Fluido*, Octubre del 2009, <http://es.wikipedia.org/wiki/Fluido>

### 2.2.2.2. PESO ESPECÍFICO

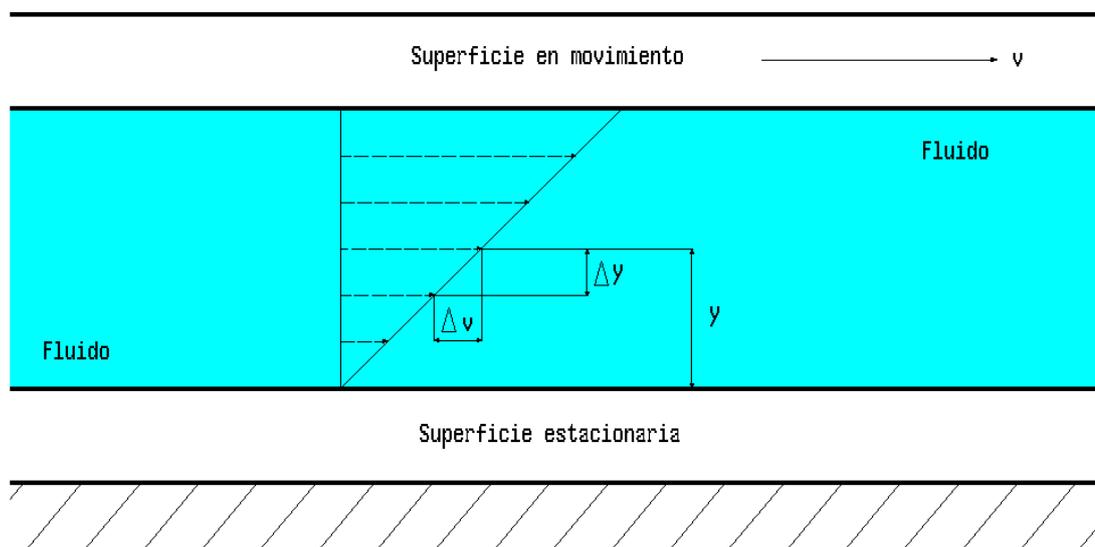
El peso específico es la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia.

Se utiliza la letra griega (gamma) para denotar el peso específico.

$$\gamma = \frac{w}{V} \left[ \frac{N}{m^3} \right]$$

### 2.2.2.3. VISCOSIDAD

Cuando un fluido está en movimiento, en él se desarrolla una tensión de corte denotada con la letra griega  $\tau$  (tao) cuya magnitud es dependiente de la viscosidad del fluido. La tensión de corte puede ser definida como la fuerza necesaria para mover una capa de área unitaria sobre otra capa de la misma sustancia. En fluidos como el agua, el aceite o cualquier otro líquido común, se ha demostrado que la tensión de corte es directamente proporcional al cambio de velocidad entre diferentes posiciones del fluido.



**Figura 2.1** Gradiente de velocidad en un fluido en movimiento

**Fuente:** El autor

En la figura 2.1 se presenta el concepto de cambio de velocidad en un fluido. Una capa delgada de fluido se encuentra entre dos placas, la placa inferior es estacionaria

mientras que la placa superior se mueve a una velocidad  $\mathbf{v}$ . Un fluido real que está en contacto con una superficie frontera tiene la misma velocidad que esta superficie, por lo que en el caso de la figura, el fluido que está en contacto con la placa inferior estará en reposo mientras que el fluido en contacto con la placa superior tendrá una velocidad  $\mathbf{v}$ .

Si la distancia entre las dos placas es pequeña, la rapidez de cambio de velocidad con respecto a la posición  $y$  será lineal. Debido a esta condición de linealidad, el gradiente de velocidad que es una medida del cambio de velocidad  $\mathbf{v}$  con respecto a la distancia  $y$  es definido como  $\Delta v/\Delta y$ .

Al ser la tensión de corte  $\tau$  del fluido directamente proporcional al gradiente de velocidad  $\Delta v/\Delta y$ , se puede establecer la siguiente expresión matemática:

$$\tau = \mu \left( \frac{\Delta v}{\Delta y} \right)$$

En la que la constante  $\mu$  es conocida como viscosidad dinámica del fluido.

$$\mu = \tau \left( \frac{\Delta y}{\Delta v} \right) \quad \left[ \frac{N \cdot s}{m^2} \right]$$

#### 2.2.2.4. VISCOSIDAD CINEMÁTICA

La viscosidad cinemática es una medida comúnmente utilizada en cálculos de mecánica de fluidos y es igual al cociente de la viscosidad dinámica entre la densidad del fluido.

Se utiliza la letra griega  $\nu$  (ny) para denotar la viscosidad cinemática.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

## 2.3. FLUJO DE FLUIDOS

### 2.3.1. RAPIDEZ DE FLUJO DE FLUIDO

La cantidad de flujo que recorre una tubería por unidad de tiempo, puede ser expresada de tres formas diferentes: rapidez de flujo de volumen, rapidez de flujo de masa y rapidez de flujo de peso.

#### 2.3.1.1. RAPIDEZ DE FLUJO DE VOLUMEN

La rapidez de flujo de volumen o caudal es la medida más comúnmente utilizada, se denota por la letra Q y se calcula de la siguiente forma:

$$Q = A \cdot v \quad \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Donde A es el área de la sección y v es la velocidad promedio del flujo.

#### 2.3.1.2. RAPIDEZ DE FLUJO DE MASA

La rapidez de flujo de masa o flujo másico es la cantidad de masa de una sustancia por unidad de tiempo que atraviesa un conducto, se denota con la letra M y está relacionada con la rapidez de flujo de volumen mediante la siguiente ecuación:

$$M = \rho Q \quad \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

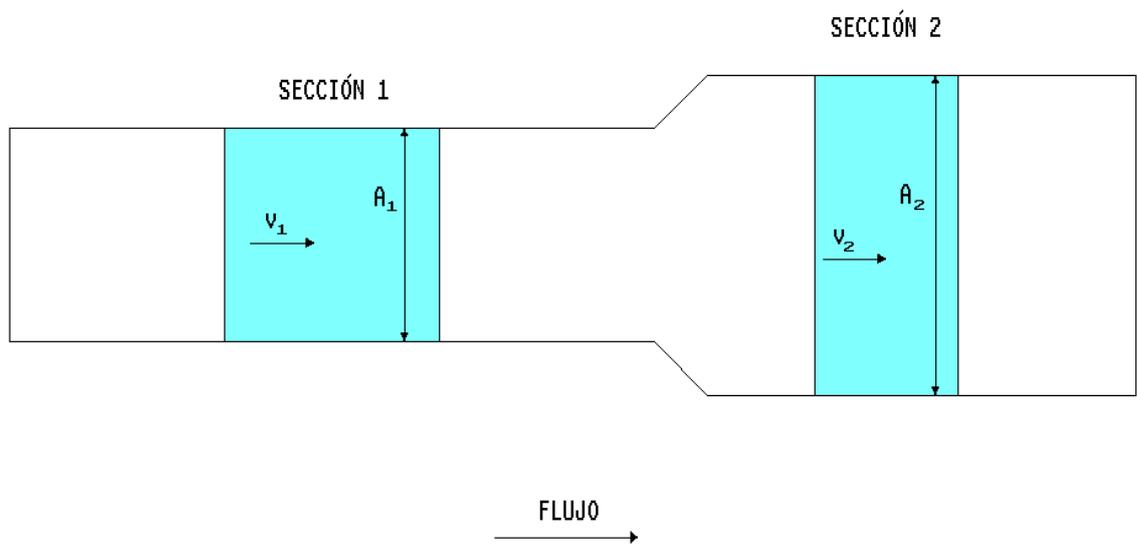
#### 2.3.1.3. RAPIDEZ DE FLUJO DE PESO

La rapidez de flujo de peso es la cantidad de peso de una sustancia por unidad de tiempo que atraviesa un conducto, se denota con la letra W y está relacionada con la rapidez de flujo de volumen mediante la siguiente ecuación:

$$W = \gamma Q \quad [N/s]$$

### 2.3.2. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad es una herramienta muy importante que permite el análisis del flujo de fluidos a través de tubos con diámetro variable. Si consideramos el flujo de un fluido a través de una tubería como la indicada en la figura 2.2, un fluido atraviesa el conducto desde la sección 1 hasta la sección 2 con una rapidez de flujo constante. Si no se adiciona, almacena o merma fluido entre las secciones 1 y 2, la cantidad de fluido que pasa por unidad de tiempo por las dos secciones debe ser igual.



**Figura 2.2** Flujo de fluido a través de conductos de diámetro variable

**Fuente:** El autor

Lo mencionado anteriormente se puede expresar de la siguiente forma:

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Esta ecuación permite conocer la velocidad de flujo en cualquier sección de la tubería.

### 2.3.3. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD PARA FLUIDOS COMPRESIBLES

Para el caso de fluidos compresibles como gases en los que la densidad es un valor variable la ecuación de continuidad es la siguiente:

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2$$
$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

### 2.3.4. LA CONSERVACIÓN DE ENERGÍA: ECUACIÓN DE BERNOULLI

El análisis del flujo de fluidos en conductos debe considerar toda la energía del sistema. La ley de la conservación de la energía dice que la energía no puede ser creada ni destruida, solo puede ser transformada. Esta consideración es muy importante cuando se analizan problemas en dinámica de fluidos.

Existen tres formas de energía a tomar en consideración para el flujo de fluidos:

- Energía cinética que depende de la velocidad del fluido.

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2$$

- Energía potencial que depende de la elevación del fluido con respecto a un nivel de referencia.

$$E_P = mgh$$

- EF: Energía de flujo que es la energía necesaria para mover un fluido a través de una sección en contra de una presión.

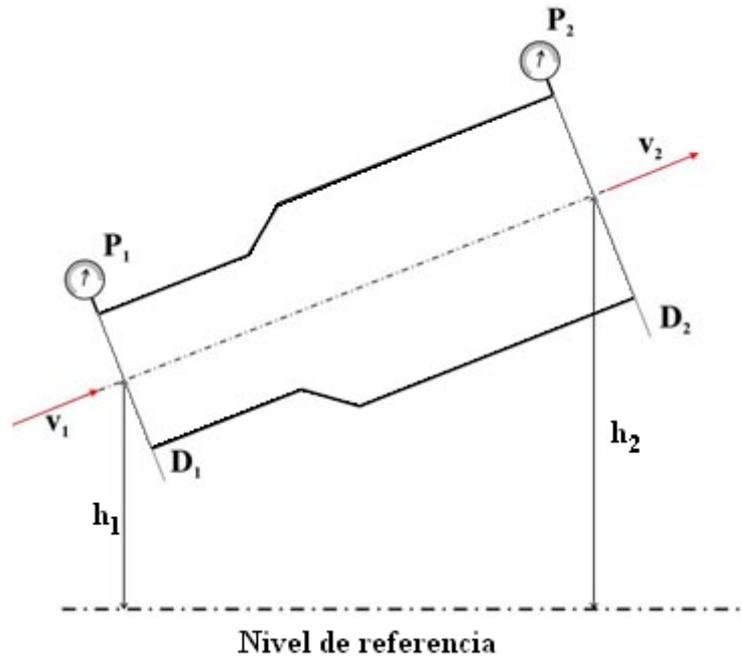
$$E_F = Fx$$

$$E_F = PAx$$

$$E_F = PV$$

La suma de todas las energías da:

$$E = E_C + E_P + E_F$$
$$E = \frac{1}{2}mv^2 + mgh + PV$$
$$E = \frac{Wv^2}{2g} + Wh + \frac{PW}{\gamma}$$



**Figura 2.3** Parte de un sistema de distribución de fluido

**Fuente:** El autor

Si consideramos el flujo de un fluido a través de una tubería como la indicada en la figura 2.3, un fluido atraviesa el conducto desde la sección 1 hasta la sección 2. En la sección 1, la energía total es:

$$E_1 = \frac{P_1 W}{\gamma_1} + \frac{W v_1^2}{2g} + W h_1$$

En la sección 2 la energía total es:

$$E_2 = \frac{P_2 W}{\gamma_2} + \frac{W v_2^2}{2g} + W h_2$$

El principio de conservación de energía establece que la energía en la sección 1 debe ser igual a la energía en la sección 2 por lo que:

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$

A la ecuación anterior se le conoce como ecuación de Bernoulli.

### 2.3.5. LIMITACIONES A LA ECUACIÓN DE BERNOULLI

Existen algunas restricciones a la ecuación de Bernoulli que deben considerarse al momento de su aplicación.

- No puede haber transferencia de calor hacia dentro o fuera del fluido.
- No puede haber pérdidas de energía por fricción
- No se puede agregar o quitar energía por dispositivos mecánicos.

### 2.3.6. ECUACIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA

Las limitaciones mencionadas anteriormente a la ecuación de Bernoulli pueden ser eliminadas al agregar a la ecuación términos que consideren las pérdidas y adiciones de energía. Las pérdidas y adiciones de energía se pueden presentar en las siguientes formas:

- Adiciones de energía por dispositivos mecánicos  $h_A$
- Pérdidas de energía por dispositivos mecánicos  $h_R$
- Pérdidas de energía por fricción o por la presencia de válvulas y conectores  $h_L$

La ecuación de la energía considerando las pérdidas y adiciones de energía es la siguiente:

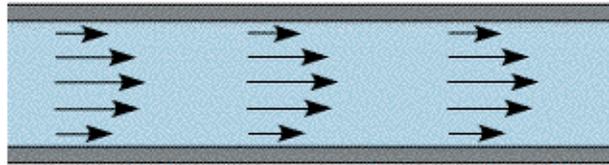
$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$

## 2.4. TIPO DE FLUJO EN TUBERÍAS

La cantidad de energía perdida por fricción en un sistema de tuberías depende del tipo de flujo. Existen dos tipos de flujos para el caso de fluidos reales que se denominan flujo laminar y flujo turbulento.

### 2.4.1. FLUJO LAMINAR

El flujo laminar es un flujo lento y uniforme en el que parece que las partículas fluidas se desplazan en trayectorias paralelas formando capas o láminas, de ahí su nombre. En el caso del flujo en tuberías circulares, el fluido se mueve en capas cilíndricas coaxiales sin mezclarse unas entre otras.



**Figura 2.4** Flujo laminar

**Fuente:** Centre for Research in Electrochemical Science and Technology,  
*Hydrodynamics*, octubre del 2009,

[www.cheng.cam.ac.uk/research/groups/electrochem/JAVA/electrochemistry/ELEC/17html/hydro.html](http://www.cheng.cam.ac.uk/research/groups/electrochem/JAVA/electrochemistry/ELEC/17html/hydro.html)

El flujo laminar se rige por la ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular, es decir, la tensión cortante es igual a la viscosidad del fluido por el gradiente de las velocidades<sup>9</sup>.

### 2.4.2. NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds es un valor adimensional que permite predecir el carácter laminar o turbulento de un fluido al conocer los valores de las siguientes variables: la densidad del fluido, la viscosidad del fluido, el diámetro del conducto y la velocidad promedio de flujo.

Para tuberías circulares en flujo a tubería llena el número de Reynolds viene dado por:

---

<sup>9</sup> FACIOLINCE, Andrea, *Flujo Laminar*, octubre del 2009,  
<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/flujolaminar/flujolaminar.html>

$$N_R = \frac{V \times d \times \rho}{\mu}$$

Donde:

$V =$  velocidad media en  $\frac{m}{seg}$

$d =$  diámetro de la tubería en m

$\rho =$  densidad del fluido en  $\frac{kg}{m^3}$

$\mu =$  viscosidad absoluta en  $\frac{kg}{m \times seg}$

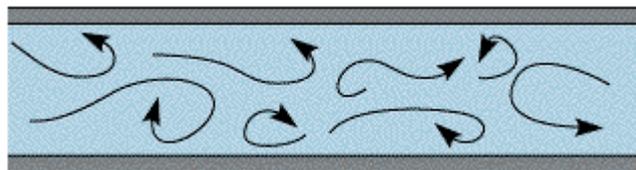
### 2.4.3. NÚMEROS DE REYNOLDS CRÍTICOS

Para aplicaciones prácticas en flujos en conductos se consideran los siguientes valores críticos:

- Para valores de  $N_R \leq 2000$  el flujo es laminar.
- Para valores de  $2000 \leq N_R \leq 4000$  se denomina régimen de transición y es imposible determinar si el flujo es laminar o turbulento.
- Para valores de  $N_R \geq 4000$  el flujo es turbulento.

### 2.4.4. FLUJO TURBULENTO

El flujo turbulento es un flujo en el que las partículas fluidas se mueven de forma desordenada en todas direcciones formando remolinos. En este tipo de flujo la trayectoria de una partícula es impredecible.



**Figura 2.5** Flujo turbulento

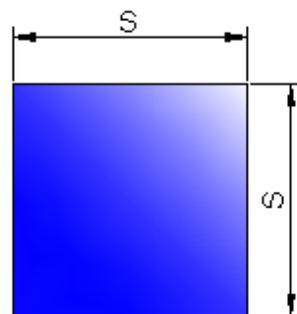
**Fuente:** Centre for Research in Electrochemical Science and Technology,  
*Hydrodynamics*, octubre del 2009,

#### 2.4.5. RADIO HIDRÁULICO PARA SECCIONES TRANSVERSALES NO CIRCULARES

Para el cálculo de tuberías de secciones transversales no circulares se utiliza una dimensión característica denominada radio hidráulico R, que es definido como el cociente entre el área de la sección transversal y el perímetro mojado.

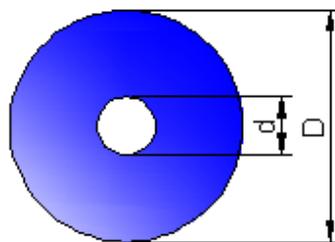
$$R = \frac{A}{PM} = \frac{\text{área}}{\text{perímetro mojado}} \quad [m]$$

El área se calcula considerando las características geométricas de la sección. El perímetro mojado es la suma de los lados de la sección que están en contacto con el fluido.



$$A = S^2$$

$$PM = 4S$$



$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$$

$$PM = \pi(D + d)$$

**Figura 2.6** Cálculo del radio hidráulico de una sección transversal

**Fuente:** El autor

#### 2.4.6. CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS PARA SECCIONES TRANSVERSALES NO CIRCULARES

El número de Reynolds para secciones transversales se calcula de manera muy similar que para el caso de conductos de sección circular. La única alteración en la fórmula de obtención del  $N_R$  es el cambio del diámetro  $D$  con  $4R$ , es decir, el radio hidráulico multiplicado por cuatro.

$$N_R = \frac{V \times 4R \times \rho}{\mu}$$

### 2.5. PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Cuando un fluido atraviesa un conducto, ya sea una tubería o cualquier otro tipo de dispositivo, se producen pérdidas de energía que son ocasionadas por la fricción del fluido con las paredes del conducto y por la fricción entre las distintas capas del fluido. Estas pérdidas de energía ocasionan pérdidas de presión entre dos puntos de un sistema de flujo. En el caso de los sistemas de escape de los buses de transporte masivo de pasajeros, el cálculo de la pérdida de energía permitirá evaluar la restricción que ofrece el sistema de escape al flujo de los gases, determinando el diseño más idóneo que evite contrapresiones excesivas, que como ya se estudió en el capítulo anterior, afectan de forma adversa al funcionamiento del motor.

Las pérdidas de energía pueden ser divididas en dos clases: pérdidas mayores y pérdidas menores.

#### 2.5.1. PERDIDAS MAYORES

Las pérdidas mayores se deben a la fricción producida cuando el fluido se desplaza por secciones rectas de conductos. El cálculo de la pérdida de energía por fricción depende de si el flujo es laminar o turbulento. A continuación se estudiarán las diferentes ecuaciones que se utilizan para el cálculo de las pérdidas de energía mayores según el tipo de flujo.

### 2.5.1.1. ECUACIÓN DE DARCY

En la ecuación general de la energía, el término  $h_L$  representaba la energía pérdida por el sistema debido a la fricción o por la presencia de válvulas y conectores. Se ha determinado que la fricción en el fluido es proporcional a la cabeza de velocidad del flujo y al cociente de la longitud entre el diámetro. Lo mencionado anteriormente se define como la ecuación de Darcy y se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

Donde  $f$  es un factor de fricción adimensional

Esta ecuación permite el cálculo de la pérdida de energía tanto para flujo laminar como para flujo turbulento y es utilizada para determinar pérdidas de energía en conductos de gran longitud y de sección circular.

### 2.5.1.2. PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN FLUJO LAMINAR

En el flujo laminar, el fluido se desplaza en forma de capas colocadas unas sobre las otras. La pérdida de energía es debida a la fricción producida por la tensión de corte entre capas que es dependiente de la viscosidad del fluido. Al ser el flujo laminar tan ordenado, se pueden utilizar los parámetros implicados en las propiedades del flujo para establecer una relación entre la pérdida de energía por fricción y los parámetros del flujo. Esta relación es conocida como la ecuación de Hagen-Poiseuille:

$$h_L = \frac{32\mu Lv}{\gamma D^2}$$

Para flujos de tipo laminar en donde  $N_R < 2000$ , se puede establecer una ecuación del factor de fricción al asociar la ecuación de Darcy con la ecuación de Hagen-Poiseuille:

$$f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} = \frac{32\mu Lv}{\gamma D^2}$$
$$f = \frac{2Dg}{Lv^2} \times \frac{32\mu Lv}{\gamma D^2}$$

Al ser  $\rho = \frac{\gamma}{g}$  se tiene:

$$f = \frac{64\mu}{vDP}$$

El número de Reynolds es  $R_E = vDP/\mu$  por lo que obtenemos:

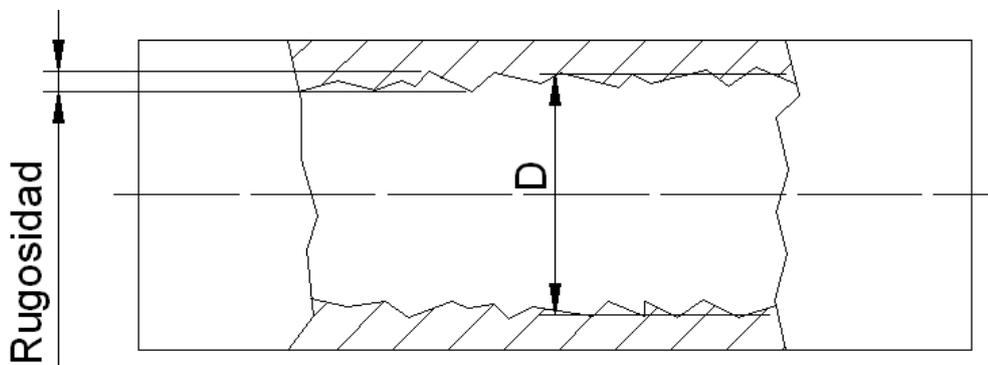
$$f = \frac{64}{N_R}$$

### 2.5.1.3. PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN FLUJO TURBULENTO

En el flujo turbulento, el fluido se mueve de forma desordenada en todas direcciones formando remolinos. Debido a esto es difícil determinar el factor de fricción de una forma sencilla como en el caso del flujo laminar. Se ha determinado experimentalmente que además de los parámetros utilizados para el cálculo de las pérdidas de energía en flujo laminar, se debe considerar también la rugosidad relativa del conducto.

#### 2.5.1.3.1. RUGOSIDAD RELATIVA DEL CONDUCTO

La rugosidad relativa del conducto es el cociente de la rugosidad promedio  $\epsilon$  de la pared del conducto entre el diámetro  $D$ . La rugosidad de la pared del conducto indicada en la figura se define como la altura de los picos de las irregularidades de la superficie.



**Figura 2.7** Rugosidad promedio de la pared del conducto  $\epsilon$

**Fuente:** El autor

El valor de la rugosidad de la pared del conducto depende del material utilizado y el procedimiento de fabricación. Para conductos y tuberías disponibles comercialmente existen valores ya determinados de la rugosidad de la pared. Con el transcurso del tiempo la rugosidad puede variar debido a la formación de depósitos sobre las paredes, en el caso de los tubos utilizados en el sistema de escape se forman depósitos de carbonilla.

Tipo de tubería	Tipos de materiales	Rugosidad, $k$ (mm)
Tuberías suaves	Cobre, aluminio, etc.	0.0025
	Vidrio, plástico, fibra de vidrio, etc.	0.0025
Tuberías de acero	Tubería nueva	0.025
	Oxidación ligera	0.25
Otras tuberías	Ductos de acero con juntas suaves.	0.0025
	Metales galvanizados – acabado normal	0.15
	Metales galvanizados – acabado suave	0.025
	Fundición de hierro	0.15
	Tubo flexible de caucho con paredes interiores lisas.	0.025

**Tabla 2.1** Rugosidad de conducto: valores de diseño

**Fuente:** Software Flowmaster V7 Automotive R1 - Reference Help - Colebrook-White Roughness Values

#### 2.5.1.3.2. ECUACIÓN EXPLÍCITA PARA EL FACTOR DE FRICCIÓN

La siguiente ecuación permite realizar el cálculo directo del factor de fricción  $f$  para resolver la ecuación de Darcy cuando se presenta flujo turbulento en el sistema de flujo. Esta ecuación es utilizada por el software Flowmaster V7 para el cálculo de las pérdidas de energía por fricción.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3.7(D/\epsilon)} \right) + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right]^2}$$

#### 2.5.1.4. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN SECCIONES TRANSVERSALES NO CIRCULARES

La ecuación de Darcy puede ser utilizada para el cálculo de pérdidas por fricción en secciones transversales no circulares al utilizar el valor del radio hidráulico de la sección. La única alteración en la ecuación de Darcy es el cambio del diámetro D con 4R, es decir, el radio hidráulico multiplicado por cuatro.

$$h_L = f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g}$$

La fórmula de rugosidad relativa es  $4R/\epsilon$ .

#### 2.5.2. PERDIDAS MENORES

Las pérdidas menores se presentan cuando hay un cambio en la sección del conducto, cuando se modifica la dirección del flujo o cuando la trayectoria del flujo se encuentra obstruida. Estos tipos de pérdidas son pequeñas en comparación con las pérdidas de energía por fricción en el conducto, por esto se les denomina pérdidas menores.

Las pérdidas menores en el sistema de flujo se deben a:

- Entradas y salidas de la tubería
- Dilatación o contracción súbita
- Dilatación o contracción gradual
- Codos, T.
- Válvulas abiertas o parcialmente cerradas

### 2.5.2.1. ECUACIÓN GENERAL DE LAS PÉRDIDAS MENORES

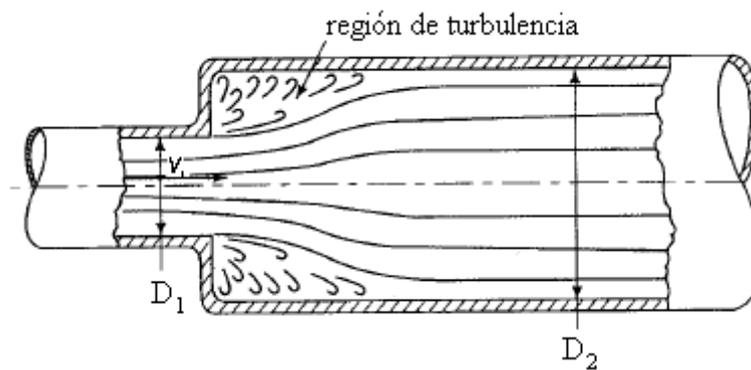
La siguiente ecuación se aplica para el cálculo de las pérdidas menores:

$$h_L = K \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

Donde:  $h_L$  es la pérdida de energía,  $K$  es un coeficiente de resistencia obtenido en datos experimentales y  $v$  es la velocidad del flujo promedio en el conducto cerca del lugar en donde se presenta la pérdida menor. El valor del coeficiente de resistencia depende de las características geométricas del dispositivo y algunas veces de la velocidad del flujo. A continuación se analizará como determinar el valor del coeficiente  $K$  para diferentes condiciones de perdidas menores.

### 2.5.2.2. DILATACIÓN SÚBITA

Si un fluido atraviesa una dilatación súbita en la que el diámetro del conducto pasa de  $D_1$  a  $D_2$  súbitamente, se crea una región de turbulencia que ocasiona una pérdida de energía. La cantidad de turbulencia generada que es directamente proporcional a la pérdida de energía depende del cociente de los diámetros de los dos conductos.



**Figura 2.9** Dilatación súbita

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 268.

La pérdida de energía se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_L = K \left( \frac{v_1^2}{2g} \right)$$

Donde  $v_1$  es la velocidad del flujo promedio en el conducto de menor diámetro. En la tabla 2.2 se muestra el coeficiente de resistencia por dilatación súbita para diferentes relaciones entre  $D_2/D_1$  y para diferentes valores de velocidad  $v_1$ .

$D_2/D_1$	Velocidad, $v_1$						
	0.6 m/s 2 pies/s	1.2 m/s 4 pies/s	3 m/s 10 pies/s	4.5 m/s 15 pies/s	6 m/s 20 pies/s	9 m/s 30 pies/s	12 m/s 40 pies/s
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.2	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08
1.4	0.26	0.25	0.23	0.22	0.22	0.21	0.20
1.6	0.40	0.38	0.35	0.34	0.33	0.32	0.32
1.8	0.51	0.48	0.45	0.43	0.42	0.41	0.40
2.0	0.60	0.56	0.52	0.51	0.50	0.48	0.47
2.5	0.74	0.70	0.65	0.63	0.62	0.60	0.58
3.0	0.83	0.78	0.73	0.70	0.69	0.67	0.65
4.0	0.92	0.87	0.80	0.78	0.76	0.74	0.72
5.0	0.96	0.91	0.84	0.82	0.80	0.77	0.75
10.0	1.00	0.96	0.89	0.86	0.84	0.82	0.80
$\infty$	1.00	0.98	0.91	0.88	0.86	0.83	0.81

**Tabla 2.2** Coeficiente de resistencia por dilatación súbita

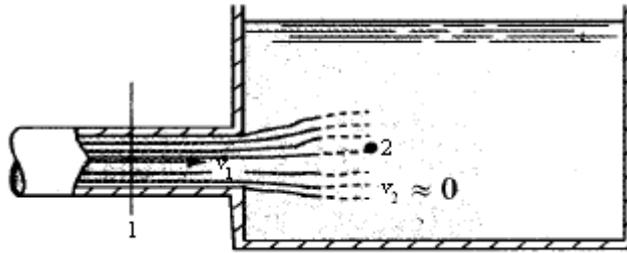
**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 270.

### 2.5.2.3. PÉRDIDA DE SALIDA

La pérdida de salida ocurre cuando el fluido de un conducto pasa hacia un depósito de gran tamaño disminuyendo su velocidad hasta casi cero. En este cambio de velocidad la energía cinética del fluido se disipa, por lo que, la pérdida de energía en la salida se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_L = K \left( \frac{v_1^2}{2g} \right)$$

En donde  $K=1$  sin importar las características geométricas de la salida.

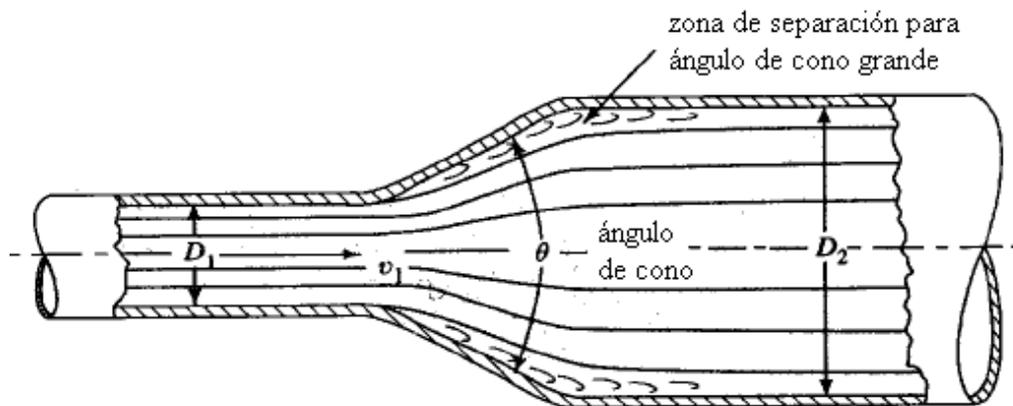


**Figura 2.10** Pérdida de salida

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 271

#### 2.5.2.4. DILATACIÓN GRADUAL

Cuando un fluido atraviesa una dilatación gradual en la que el diámetro del conducto pasa de  $D_1$  a  $D_2$  de forma menos abrupta, la pérdida de energía es reducida ya que la turbulencia generada es menor. La dilatación gradual se realiza en una zona de transición en forma de cono. Mientras mayor sea el ángulo de cono  $\theta$  para una misma relación de diámetros entre  $D_2/D_1$ , mas alto será el valor del coeficiente de resistencia y de las pérdidas por energía.



**Figura 2.11** Dilatación gradual

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 272.

La pérdida de energía se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_L = K \left( \frac{v_1^2}{2g} \right)$$

La pérdida de energía que se calcula con la ecuación indicada anteriormente no considera las pérdidas de energía por fricción en las paredes de la transición. Cuando el ángulo de cono  $\theta$  es grande, la longitud de la zona de transición es corta y por ende las pérdidas por fricción en las paredes serán menores. Cuando el ángulo de cono  $\theta$  es pequeño, la longitud de la zona de transición es grande y por ende las pérdidas por fricción en las paredes serán mayores. La pérdida de energía mínima considerando la fricción en las paredes de la transición y la pérdida por dilatación gradual se produce cuando el ángulo de cono  $\theta$  es de  $7^\circ$ <sup>10</sup>.

En la tabla 2.3 se muestra el coeficiente de resistencia por dilatación gradual para diferentes relaciones entre  $D_2/D_1$  y para diferentes ángulos de cono  $\theta$ .

$D_2/D_1$	Ángulo del cono, $\theta$											
	2	6	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
1.1	0.01	0.01	0.03	0.05	0.10	0.13	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23
1.2	0.02	0.02	0.04	0.09	0.16	0.21	0.25	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37
1.4	0.02	0.03	0.06	0.12	0.23	0.30	0.36	0.41	0.44	0.47	0.50	0.53
1.6	0.03	0.04	0.07	0.14	0.26	0.35	0.42	0.47	0.51	0.54	0.57	0.61
1.8	0.03	0.04	0.07	0.15	0.28	0.37	0.44	0.50	0.54	0.58	0.61	0.65
2.0	0.03	0.04	0.07	0.16	0.29	0.38	0.46	0.52	0.56	0.60	0.63	0.68
2.5	0.03	0.04	0.08	0.16	0.30	0.39	0.48	0.54	0.58	0.62	0.65	0.70
3.0	0.03	0.04	0.08	0.16	0.31	0.40	0.48	0.55	0.59	0.63	0.66	0.71
$\infty$	0.03	0.05	0.08	0.16	0.31	0.40	0.49	0.56	0.60	0.64	0.67	0.72

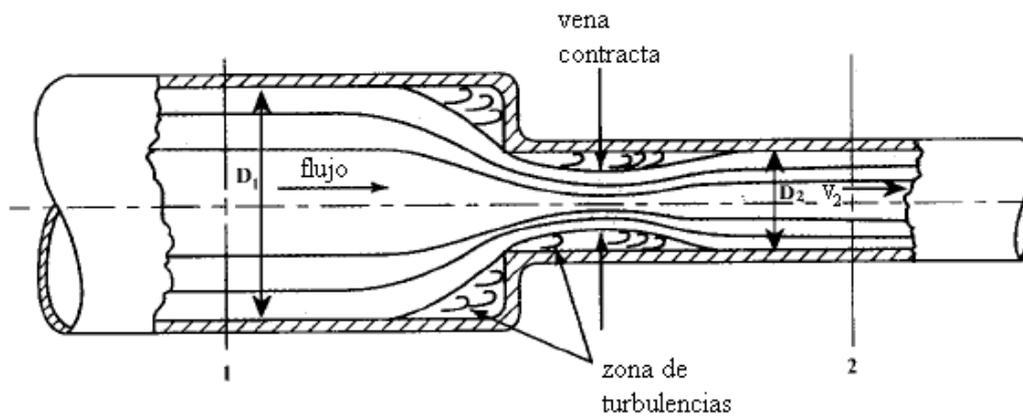
**Tabla 2.3** Coeficiente de resistencia por dilatación gradual

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 274.

<sup>10</sup> MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, pag. 273.

### 2.5.2.5. CONTRACCIÓN SÚBITA

Si un fluido atraviesa una contracción súbita en la que el diámetro del conducto pasa de  $D_1$  a  $D_2$  súbitamente se origina una pérdida de energía. El flujo a través de una contracción súbita forma una vena contracta en el conducto de diámetro  $D_2$  aguas abajo del cambio de sección. La pérdida de energía se origina por la turbulencia ocasionada por la contracción aguas arriba de la vena contracta y por la dilatación aguas abajo de la vena contracta.



**Figura 2.12** Contracción súbita

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 276.

La pérdida de energía se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_L = K \left( \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

En la tabla 2.4 se muestra el coeficiente de resistencia por contracción súbita para diferentes relaciones entre  $D_2/D_1$  y para diferentes valores de velocidad  $v_2$ .

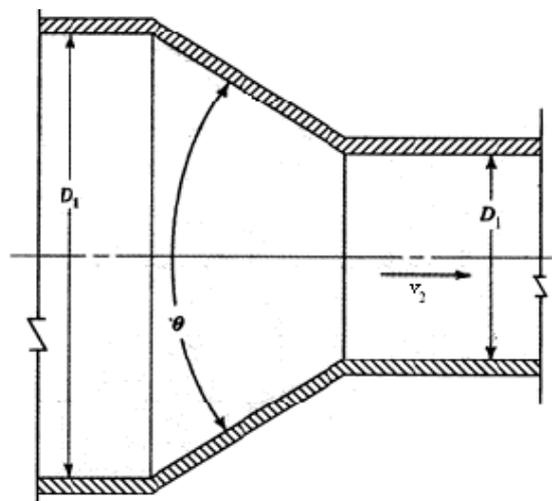
$D_2/D_1$	Velocidad, $v_2$								
	0.6 m/s 2 pies/s	1.2 m/s 4 pies/s	1.8 m/s 6 pies/s	2.4 m/s 8 pies/s	3 m/s 10 pies/s	4.5 m/s 15 pies/s	6 m/s 20 pies/s	9 m/s 30 pies/s	12 m/s 40 pies/s
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.1	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06
1.2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11
1.4	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20
1.6	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.24
1.8	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.29	0.27
2.0	0.38	0.37	0.37	0.36	0.36	0.34	0.33	0.31	0.29
2.2	0.40	0.40	0.39	0.39	0.38	0.37	0.35	0.33	0.30
2.5	0.42	0.42	0.41	0.40	0.40	0.38	0.37	0.34	0.31
3.0	0.44	0.44	0.43	0.42	0.42	0.40	0.39	0.36	0.33
4.0	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44	0.42	0.41	0.37	0.34
5.0	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.42	0.38	0.35
10.0	0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.43	0.40	0.36
$\infty$	0.49	0.48	0.48	0.47	0.47	0.45	0.44	0.41	0.38

**Tabla 2.4** Coeficiente de resistencia por contracción súbita

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 275.

### 2.5.2.6. CONTRACCIÓN GRADUAL

Si un fluido atraviesa una contracción gradual en la que el diámetro del conducto pasa de  $D_1$  a  $D_2$  de forma menos abrupta, la pérdida de energía es reducida ya que la turbulencia generada por la contracción y la posterior dilatación es menor. La contracción gradual se realiza en una zona de transición en forma de cono.



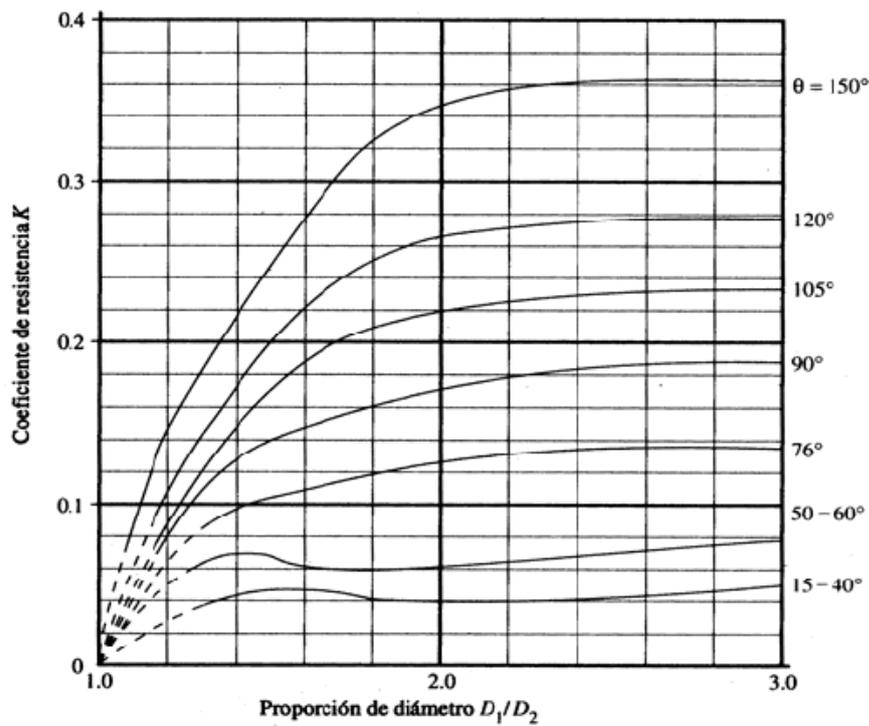
**Figura 2.13** Contracción gradual

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 277.

La pérdida de energía se calcula con la siguiente ecuación:

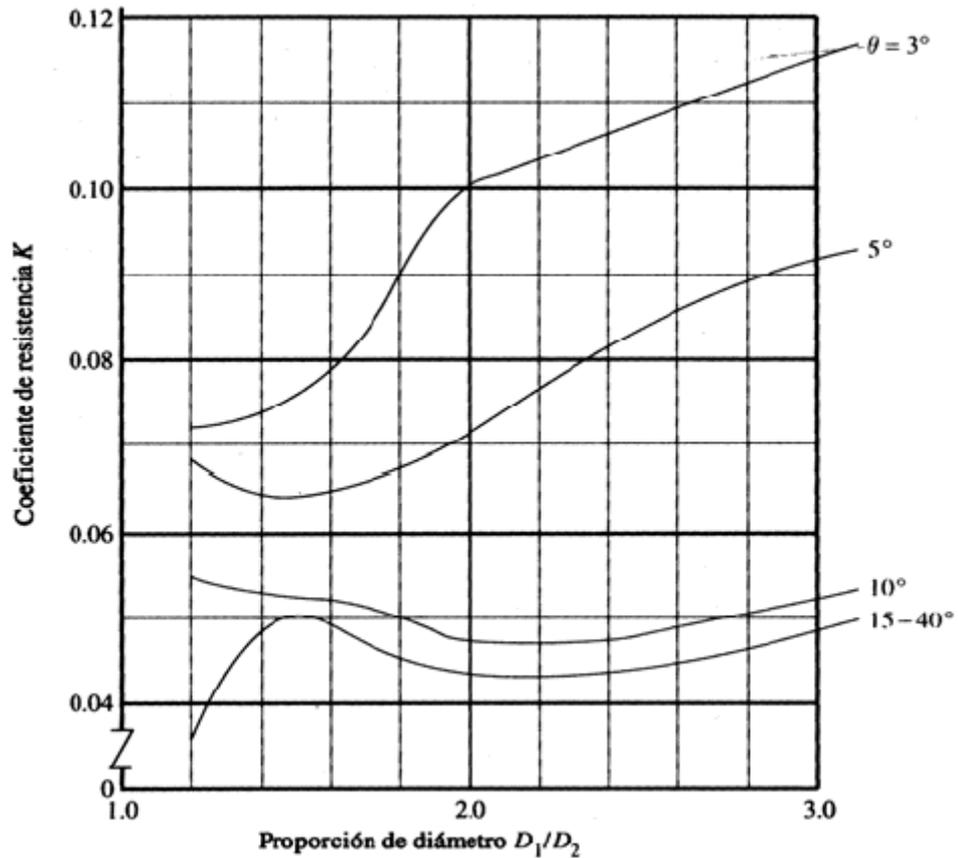
$$h_L = K \left( \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

En las figuras 2.14 y 2.15 se muestran los valores del coeficiente de resistencia por contracción gradual para diferentes relaciones entre  $D_2/D_1$  y para diferentes ángulos de cono  $\theta$ .



**Figura 2.14** Coeficiente de resistencia por contracción gradual

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 277.

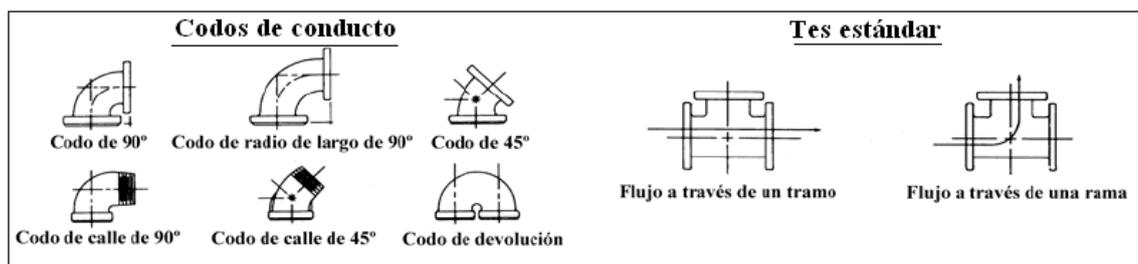


**Figura 2.15** Coeficiente de resistencia por contracción gradual

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 278.

### 2.5.2.7. PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR CODOS Y TES

Los codos y las tes son elementos encargados de modificar o cambiar el tamaño de la trayectoria del flujo. La figura 2.16 muestra algunos tipos de codos y tes utilizados comúnmente en sistemas de tuberías.



**Figura 2.16** Codos de conducto y tes

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 282.

La pérdida de energía en codos y tes se calcula utilizando la ecuación general para pérdidas menores. El coeficiente de resistencia K se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$K = \left(\frac{L_e}{D}\right) f_T$$

Donde:  $L_e/D$  es la denominada proporción de longitud equivalente la cual es indicada en la tabla 2.5 y depende del tipo de elemento. El término  $f_T$  es el valor del coeficiente de fricción del conducto al cual está conectado el elemento en la zona de turbulencia completa. La razón por la cual el coeficiente de fricción se toma en la zona de completa turbulencia es debido a que en esta zona el valor no depende del número de Reynolds.

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de conducto, $L_e / D$
Codo estándar de 90°	30
Codo de radio largo de 90°	20
Codo de calle de 90°	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de calle de 45°	26
Codo de devolución cerrada	50
Te estándar – con flujo a través de un tramo	20
Te estándar – con flujo a través de una rama	60

**Tabla 2.5** Resistencia en codos y tes expresada como longitud equivalente en diámetros de conducto  $L_e/d$

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 282.

En la tabla 2.6 se indican valores del coeficiente de fricción para diferentes tamaños nominales de conductos de acero comercial.

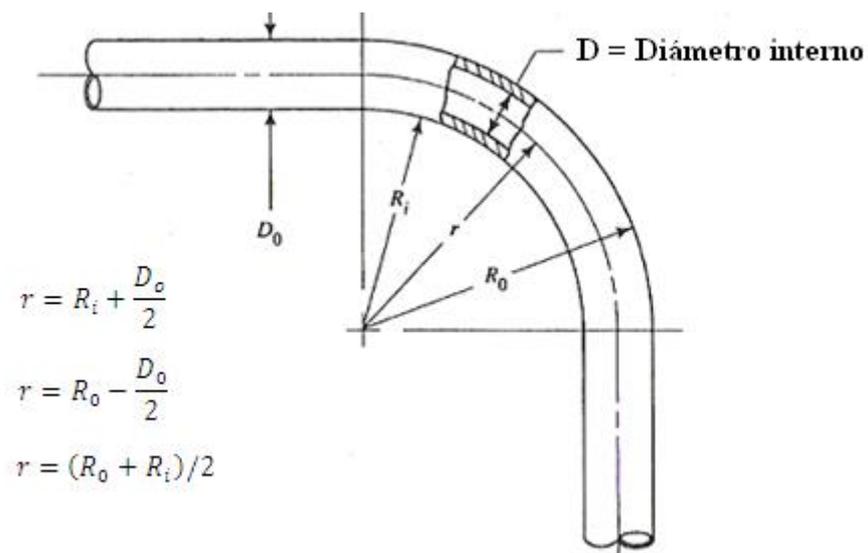
Tamaño del conducto nominal (pulg)	factor de fricción $f_T$	Tamaño del conducto nominal (pulg)	factor de fricción $f_T$
$\frac{1}{2}$	0.027	4	0.017
$\frac{3}{4}$	0.025	5	0.016
1	0.023	6	0.015
$1\frac{1}{4}$	0.022	8-10	0.014
$1\frac{1}{2}$	0.021	12-16	0.013
2	0.019	18-24	0.012
$2\frac{1}{2}, 3$	0.018		

**Tabla 2.6** Factor de fricción en zona de turbulencia completa para conductos de acero comercial nuevo y limpio.

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 284.

#### 2.5.2.8. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN CODOS

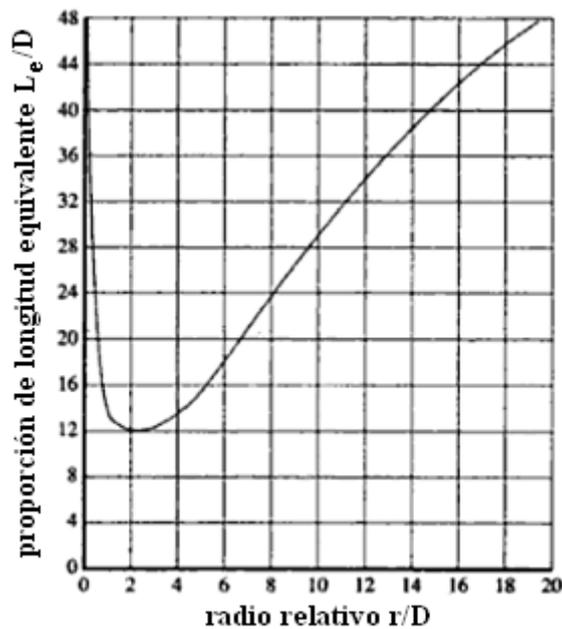
En muchas ocasiones se prefiere curvar un conducto y construir un codo a la medida que utilizar codos que están disponibles comercialmente, debido a esto, a continuación se indica cómo obtener las pérdidas de energía para diferentes diseños de codos. La figura 2.17 presenta las dimensiones básicas de un codo de tubería.



**Figura 2.17** Dimensiones de un codo de tubería

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 287.

La resistencia al flujo de un codo de tubería depende de la relación entre el radio  $r$  y el diámetro  $D$  del conducto. La figura 2.18 indica que se obtiene la menor proporción de longitud equivalente  $L_e/D$  cuando el valor de radio relativo  $r/D$  es de aproximadamente 2.5. Debido a esto se deben construir codos de tubería que tengan un valor de  $r/D=2.5$  para obtener la mínima resistencia al flujo.

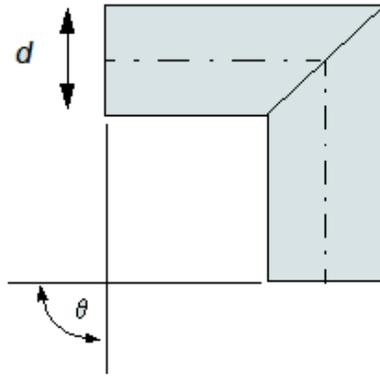


**Figura 2.17** Resistencia debido a los codos de tubería de 90°

**Fuente:** MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996, p. 286.

#### 2.5.2.9. PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN CODOS MITRADOS

En diseños mal realizados de sistemas de escape, es muy común la utilización de codos mitrados que ofrecen resistencia al flujo de los gases que un codo normal, en la figura 2.18 se pueden ver las dimensiones básicas de un codo mitrado.



**Figura 2.18** Codo mitrado

**Fuente:** Flowmaster V7 R1: Mitre bend

La pérdida de energía en codos mitrados se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_L = K \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

En donde K es el coeficiente de resistencia al flujo y depende del ángulo  $\theta$ , tal como se indica en la tabla 2.7.

Ángulo $\theta$	Coeficiente de resistencia K para superficie lisa	Coeficiente de resistencia K para superficie áspera $\frac{\epsilon}{D} \geq 0.0022$
45°	0.236	0.320
60°	0.471	0.684
90°	1.129	1.265

**Tabla 2.7** Coeficiente de resistencia al flujo K para codos mitrados.

**Fuente:** s/a, Apéndice Pérdidas de Carga Espol, noviembre 2009,

[http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/5337/2/APENDICE%20D\(PERDIDAS\).doc](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/5337/2/APENDICE%20D(PERDIDAS).doc)

## 2.6. FLUJO COMPRESIBLE EN TUBERÍAS

### 2.6.1. VELOCIDAD SÓNICA

La velocidad sónica es un valor que permite evaluar la compresibilidad de un fluido en un sistema de flujo y es la velocidad a la que una onda sonora viajaría a través del gas. La velocidad  $c$  sónica viene dada por la siguiente ecuación:

$$c = \sqrt{KRT}$$

Donde:

$K$  = es la relación de calores específicos a presión y volumen constante

$R$  = constante del gas en  $\frac{J}{Kg^{\circ}K}$

$T$  = temperatura absoluta en grados kelvin ( $^{\circ}C + 273$ )

### 2.6.2. NÚMERO DE MACH

El número de Mach es un valor adimensional que viene dado por el cociente entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido.

$$Ma = \frac{v}{c}$$

Este valor permite realizar una clasificación del flujo de la siguiente manera:

- Flujo incompresible:  $Ma < 0.3$
- Flujo subsónico:  $0.3 < Ma < 0.8$
- Flujo transónico:  $0.8 < Ma < 1.2$
- Flujo supersónico:  $1.2 < Ma < 3.0$
- Flujo hipersónico:  $3.0 < Ma$

Cuando  $Ma < 0.3$ , las variaciones de densidad son relativamente pequeñas (menores al 5%) por lo que el fluido a pesar de ser un gas puede considerarse como incompresible<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> WHITE, Frank, *Fluid Mechanics*, 5ta. Edición, McGraw-Hill, p. 577.

## **CAPITULO 3**

### **DIAGNÓSTICO E INFLUENCIA DEL CONDUCTO DE ESCAPE EN LA CONTAMINACIÓN DE LOS BUSES DE LA CIUDAD DE CUENCA**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

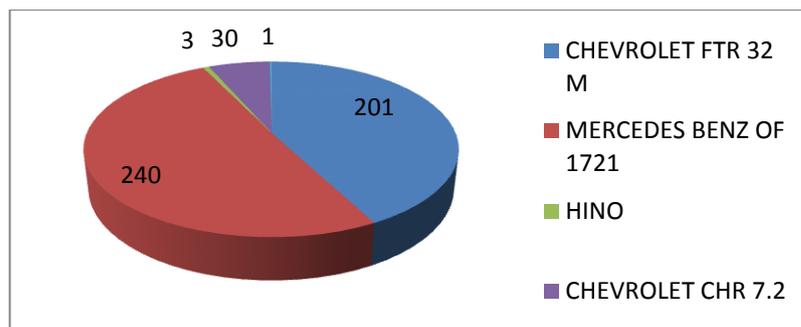
En este capítulo se realizará el estudio de la influencia que tienen las diferentes disposiciones de conductos de escape en la contaminación producida por los buses de transporte masivo de pasajeros, además se determinará como afectan al funcionamiento del motor las diferentes modificaciones realizadas. Algunos casos que se estudiarán son: la eliminación del silenciador, utilización de sistemas de escape con doble salida, la realización de orificios antes del silenciador, etc.

En la primera parte del capítulo se determinará cuáles son los chasis para bus más comúnmente utilizados en la ciudad de Cuenca, además se hará un breve análisis de las configuraciones de sistemas de escape que pueden ser utilizadas en buses, para luego determinar los valores de contrapresión en los diferentes diseños de sistemas de escape y analizar su influencia en el funcionamiento del motor y en la contaminación generada.

#### **3.2. BUSES DE TRANSPORTE MASIVO DE PASAJEROS DE LA CIUDAD DE CUENCA**

##### **3.2.1 BUSES DE TRANSPORTE URBANO**

El gráfico 3.1 muestra la clasificación de los buses de transporte urbano de la ciudad de Cuenca por marca para el año 2008. El chasis Mercedes Benz OF 1721 y el chasis Chevrolet FTR 32 M son utilizados en el 93% de las unidades.

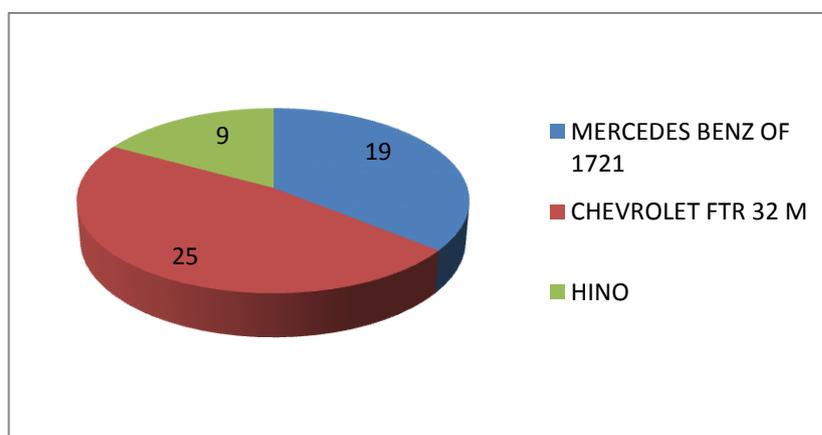


**Gráfica 3.1** Clasificación de los buses de transporte urbano por marca

**Fuente:** UNIDAD MUNICIPAL DE TRÁNSITO, 2008.

### 3.2.2. BUSES DE TRANSPORTE INTERPARROQUIAL

El gráfico 3.2 muestra la clasificación de los buses de transporte interparroquial de la ciudad de Cuenca por marca para el año 2009. De igual manera que para el caso de los buses de transporte urbano, el chasis Mercedes Benz OF 1721 y el chasis Chevrolet FTR 32-M son los más utilizados con un 83% del total de las unidades.



**Gráfica 3.2** Clasificación de los buses de transporte interparroquial por marca

**Fuente:** UNIDAD MUNICIPAL DE TRÁNSITO, 2009.

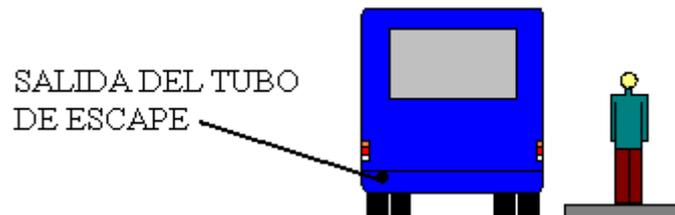
### 3.3. CONFIGURACIONES BÁSICAS DEL SISTEMA DE ESCAPE

Existen tres configuraciones básicas del sistema de escape las cuales se diferencian básicamente en la ubicación de la salida del escape:

- Sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda
- Sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda
- Sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda

### 3.3.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO A LA IZQUIERDA

Este sistema de escape dirige los gases de gases por debajo del chasis hacia la parte posterior izquierda del vehículo, la salida está generalmente dirigida hacia el suelo. Este sistema de escape es utilizado en la ciudad de Cuenca para los buses de transporte urbano de pasajeros.



**Figura 3.1** Sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda

**Fuente:** El autor

La boca de salida del tubo de escape se coloca en la parte izquierda para que los gases salgan a una distancia más lejana de las personas que están caminando por las aceras o están en una parada de bus.

#### 3.3.1.1. VENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE

- Menor contrapresión en el motor que el sistema de escape vertical.
- Se necesita menor cantidad de elementos para este sistema de escape por lo que su costo es menor que el del sistema de escape vertical.
- Los humos de escape no ingresan directamente hacia las viviendas o negocios de calles estrechas como es el caso del centro de la ciudad.

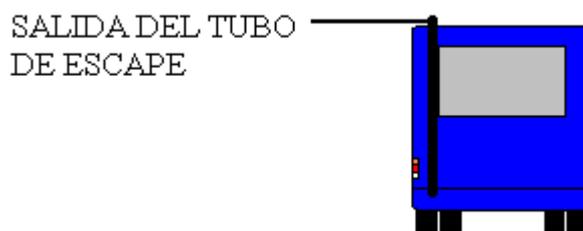
- La ubicación de la salida del escape en la parte posterior a la izquierda dificulta la intromisión de contaminantes en el habitáculo del vehículo por las puertas laterales que están a la derecha.

### 3.3.1.2. DESVENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE

- La turbulencia provocada por el movimiento del vehículo emisor y por los otros vehículos que recorren la misma vía produce una resuspensión de los gases que pueden alcanzar alturas iguales o incluso superiores al techo de la primera planta de las edificaciones<sup>12</sup>.
- En este sistema de escape las emisiones se dirigen de forma directa desde el vehículo emisor hacia el habitáculo del vehículo que está en la parte posterior, este hecho afecta directamente la seguridad y el confort de los ocupantes de ese vehículo<sup>13</sup>.

### 3.3.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ARRIBA A LA IZQUIERDA

Este sistema de escape dirige los gases de escape hacia una salida ubicada a una altura superior al techo del vehículo. Su configuración básica es presentada en la siguiente figura:



**Figura 3.2** Sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda

**Fuente:** El autor

<sup>12</sup> SZWARC, Alfred, *A EMISSÃO DE “FUMAÇA PRETA” POR VEÍCULOS DIESEL E A POSIÇÃO DO TUBO DE DESCARG*, CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 1989, p. 4.

<sup>13</sup> Idem., p. 5.

### 3.3.2.1. VENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE

- En ambientes abiertos, el movimiento del viento ayuda a dispersar las emisiones contaminantes de mejor manera.
- En el caso de vehículos con elevadas emisiones de contaminantes se tiene mayor seguridad de tráfico ya que se produce una menor reducción de visibilidad en comparación con los sistemas de escape horizontales, esto es especialmente crítico en condiciones de baja visibilidad.

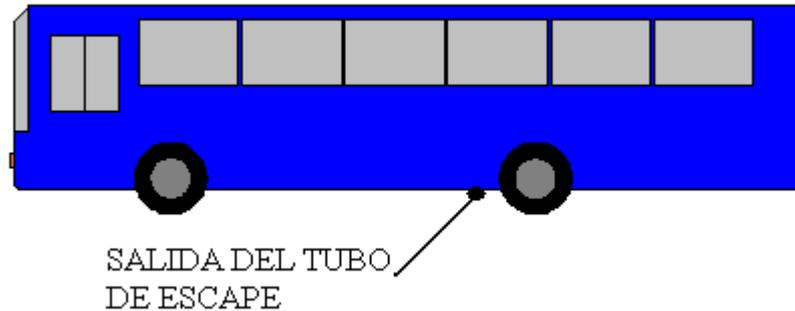
### 3.3.2.2. DESVENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE

- Dependiendo del diseño y la longitud de los componentes del sistema de escape se crea una mayor contrapresión en el motor.
- Se necesita mayor cantidad de elementos para este sistema por lo que su costo es mayor.
- Cuando los buses emiten humo excesivamente dañan y manchan las fachadas de las casas y edificios, esto es mucho más notorio en lugares con vías angostas como el centro de la ciudad.

### 3.3.3. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE LATERAL IZQUIERDA

Este sistema de escape dirige los gases por debajo del chasis hacia la parte lateral izquierda del vehículo. Este sistema de escape es utilizado en la ciudad de Cuenca por los buses de transporte interparroquial.

La salida de este sistema de escape se coloca en el lado izquierdo del bus ya que si se colocara en el lado derecho, los gases de escape serían emitidos directamente hacia las personas en la acera.



**Figura 3.3** Sistema de escape con salida en la parte inferior en el lado izquierdo

**Fuente:** El autor

### 3.3.3.1 VENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE

- Menor contrapresión en el motor de los tres sistemas.
- El menor costo de los tres sistemas ya que se utilizan menor cantidad de elementos.

### 3.3.3.2 DESVENTAJAS DE ESTE SISTEMA DE ESCAPE

- El ruido del sistema de escape puede ser más pronunciado.
- En este sistema de escape las emisiones se dirigen de forma directa desde el vehículo emisor hacia el habitáculo del vehículo que está en la parte izquierda, este hecho afecta directamente la seguridad y el confort de los ocupantes de ese vehículo.
- Las emisiones provenientes del sistema de escape se dirigen directamente hacia adentro de las edificaciones en vías angostas como es el caso del centro de la ciudad.

### 3.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS CHASIS DE BUS ESTUDIADOS

Las especificaciones técnicas del chasis de bus Chevrolet FTR-32M se presentan en la tabla 3.1, las especificaciones técnicas del chasis de bus Mercedes-Benz OF1721 se presentan en la tabla 3.2.

ESPECIFICACIONES DEL VEHÍCULO	
Marca	Chevrolet
Modelo	FTR-32M
Motor	6H E1-TCS
Nº cilindros	6
Cilindrada	7127cc
Diámetro del cilindro	110mm
Carrera del pistón	125mm
Potencia	169.2KW @ 2500rpm
Torque máximo	666.4Nm @ 1500rpm
Relación de compresión	16.9:1

**Tabla 3.1** Especificaciones técnicas del bus Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** Especificaciones Chevrolet FTR 32-M, octubre del 2009,  
<http://www.chevrolet.com.ec/vehiculos/Comerciales/Serie-F/Serie-F-ficha-tecnica.html>

ESPECIFICACIONES DEL VEHÍCULO	
Marca	Mercedes-Benz
Modelo	OF1721
Motor	MB OM 366 LA
Nº cilindros	6
Cilindrada	5958cc
Diámetro del cilindro	97.5mm
Carrera del pistón	133mm
Potencia	155KW @ 2600rpm
Torque máximo	660Nm @ 1400rpm
Relación de compresión	18:1

**Tabla 3.2** Especificaciones técnicas del bus Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** Chasis para autobús Mercedes –Benz OF1721, octubre del 2009  
[http://www.condor.com.py/pdfs/OF1721\\_esp.pdf](http://www.condor.com.py/pdfs/OF1721_esp.pdf).

### 3.5. VELOCIDAD DE SALIDA Y CAUDAL DE LOS GASES DE ESCAPE

Para obtener la velocidad de salida de los gases de escape de los buses estudiados se utilizó un anemómetro, el mismo que fue colocado en la salida del tubo de escape. Las pruebas fueron realizadas con los buses estacionados y con el motor sin carga. La velocidad de salida de los gases de escape fue determinada para diferentes valores de rpms. El caudal de los gases se calculó con los datos de la velocidad de salida de los gases y el área interna del conducto.

Los valores obtenidos en las pruebas se indican a continuación:

<b>Chevrolet FTR-32M</b>				
Diámetro del conducto = 0.109m Área interna del conducto = 0.00933m <sup>2</sup> Temperatura de los gases en la salida = 43°C				
REGIMEN DE GIRO (RPM)	VELOCIDAD 1 (m/s)	VELOCIDAD 2 (m/s)	V PROMEDIO (m/s)	RAPIDEZ DE FLUJO DE VOLUMEN Q(m <sup>3</sup> /s)
600	6.99	6.93	6.96	0.065
1000	9.9	9.82	9.86	0.092
1500	11.7	12.1	11.9	0.133
2000	14.33	14.39	14.36	0.192
2500	25.95	26.15	26.05	<b>0.243</b>

**Tabla 3.3** Velocidad y caudal de los gases de escape del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

<b>Mercedes-Benz OF 1721</b>				
Diámetro del conducto = 0.115m Área interna del conducto = 0.01038m <sup>2</sup> Temperatura de los gases en la salida = 46°C				
REGIMEN DE GIRO (RPM)	VELOCIDAD 1 (m/s)	VELOCIDAD 2 (m/s)	V PROMEDIO (m/s)	RAPIDEZ DE FLUJO DE VOLUMEN Q(m <sup>3</sup> /s)
500	5.1	5.3	5.2	0.053
1000	8.9	8.5	8.7	0.090
1500	13.4	13.6	13.5	0.140

2000	17.3	17.1	17.2	0.178
2500	21.2	20.8	21	<b>0.217</b>

**Tabla 3.4** Velocidad y caudal de los gases de escape del bus con chasis Mercedes-Benz OF 1721

**Fuente:** El autor

Para la determinación de la contrapresión en el tubo de escape se utilizará el valor del caudal de gases obtenido con un régimen de 2500 rpm, ya que la contrapresión generada en el sistema de escape crea mayores problemas a un régimen elevado de revoluciones.

### 3.6. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA PROMEDIO DE LOS GASES EN EL SISTEMA DE ESCAPE

El valor de la temperatura promedio de los gases en el sistema de escape se obtiene considerando la temperatura de sus dos extremos, el uno es la salida de la turbina del turbocompresor y el otro es la boca de salida del tubo de escape.

Se puede considerar para que el cálculo de sistemas de escape que la temperatura de los gases de escape en la salida de la turbina para motores a diesel sea de 900°F (482°C)<sup>14</sup>.

Al realizar las mediciones de velocidad de los gases de escape se determinó que la temperatura promedio de salida de los gases de escape es de 44°C.

La temperatura promedio se obtiene de la siguiente forma:

$$T = \frac{T_{\text{salida de la turbina}} + T_{\text{en la boca de salida del tubo de escape}}}{2}$$

$$T = \frac{482+44}{2} = 263^{\circ}\text{C}=536^{\circ}\text{K}$$

<sup>14</sup> Western Filter Co., Inc., diciembre del 2009, *Determination of silencer pressure drop*, [http://www.westernfilterco.com/silencers/pressure\\_drop.html](http://www.westernfilterco.com/silencers/pressure_drop.html).

### 3.7. CALCULO DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO

Los cálculos se realizarán asumiendo que el fluido que atraviesa el sistema de escape es aire, para ello se determinará el flujo másico a la temperatura de salida de los gases para luego calcular el caudal y la velocidad del aire a la temperatura promedio de los gases en el sistema de escape que es de 263°C.

El valor de la velocidad del aire se utilizará posteriormente para determinar el número de Mach y el valor del caudal de aire será utilizado para el cálculo de la contrapresión.

#### 3.7.1. PROPIEDADES DEL AIRE A LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL ESCAPE DEL BUS CHEVROLET FTR 32M

$$\text{Caudal } Q = 0.243 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Temperatura } T = 44^\circ\text{C} = 317^\circ\text{K}$$

$$\text{Densidad del aire a } 317^\circ\text{K} = 0.8341 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Flujo másico } = M = \rho Q = 0.8341 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left( 0.243 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = 0.202 \text{ kg/s}$$

#### 3.7.2. PROPIEDADES DEL AIRE A LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL ESCAPE DEL BUS MERCEDES BENZ OF 1721

$$\text{Caudal } Q = 0.217 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Temperatura } T = 44^\circ\text{C} = 317^\circ\text{K}$$

$$\text{Densidad del aire a } 317^\circ\text{K} = 0.8341 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Flujo másico } = M = \rho Q = 0.8341 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left( 0.217 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = 0.181 \text{ kg/s}$$

### 3.7.3. PROPIEDADES DEL AIRE A LA TEMPERATURA PROMEDIO DEL SISTEMA DE ESCAPE T=536°K DEL BUS CHEVROLET FTR 32 M

Densidad del aire a 536°K =0.4982kg/m<sup>3</sup>

Flujo másico  $M = 0.202kg/s$

$$\text{Caudal } Q = \frac{M}{\rho} = \frac{0.202kg/s}{0.4982kg/m^3} = 0.405m^3/s$$

Diámetro interno del conducto = 77.9mm=0.0779m

Área interna del conducto= 0.00476m<sup>2</sup>

$$\text{Velocidad } = v = \frac{Q}{A} = \frac{0.405m^3/s}{0.00476m^2} = 85.084m/s$$

### 3.7.4. PROPIEDADES DEL AIRE A LA TEMPERATURA PROMEDIO DEL SISTEMA DE ESCAPE T=536°K DEL BUS MERCEDES BENZ OF 1721

Densidad del aire a 536°K =0.4982kg/m<sup>3</sup>

Flujo másico  $M = 0.181kg/s$

$$\text{Caudal } Q = \frac{M}{\rho} = \frac{0.181kg/s}{0.4982kg/m^3} = 0.363m^3/s$$

Diámetro interno del conducto = 97.6mm=0.0976m

Área interna del conducto= 0.00748m<sup>2</sup>

$$\text{Velocidad } = v = \frac{Q}{A} = \frac{0.363m^3/s}{0.00748m^2} = 48.529m/s$$

## 3.8. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE MACH

La velocidad del sonido en el aire se determina a 536°K, que es la temperatura promedio de los gases en el tubo de escape.

DATOS:

T=536°K

K=1.387

R= 287J/Kg°K

$$c = \sqrt{KRT}$$

$$c = \sqrt{1.387(287J/Kg^{\circ}K)(536^{\circ}K)}$$

$$c = 461.91m/s$$

El número de Mach es de:

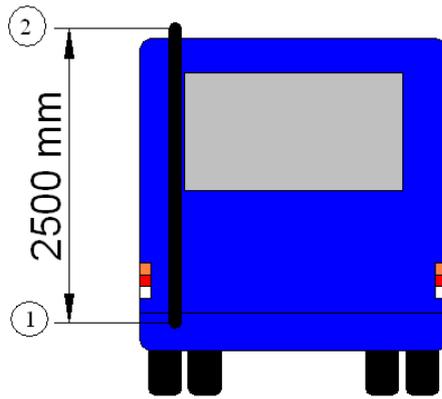
MARCA DE CHASIS	VELOCIDAD DEL SONIDO A 536°K c (m/s)	VELOCIDAD DEL AIRE A 536°K v (m/s)	NÚMERO DE MACH $a = \frac{v}{c}$
CHEVROLET FTR 32M	461.91	85.084	0.184
MERCEDES BENZ OF1721	461.91	48.529	0.105

**Tabla 3.5** Velocidad del sonido, velocidad del aire y número de Mach

Al ser el número de Mach menor a 0.3 en los dos casos, el flujo se puede considerar como incompresible.

### 3.9. INFLUENCIA DE LA DIFERENCIA EN ALTURA ENTRE DOS PUNTOS EN LA CONTRAPRESIÓN DEL SISTEMA DE ESCAPE

Una de las supuestas desventajas que comúnmente se le atribuye al sistema de escape vertical es que los gases de escape tienen que recorrer una distancia vertical de aproximadamente 2500 mm que incrementa en gran medida la contrapresión, a continuación se analizará cual es la influencia real de la altura entre dos puntos en un sistema de escape para determinar si debe ser considerada en los cálculos de contrapresión.



**Figura 3.4** Distancia entre dos puntos de un sistema de escape vertical

**Fuente:** El autor

DATOS:

La diferencia de altura entre el punto 1 y 2 es de:  $h_2 - h_1 = 2.5m$

El diámetro  $D_1 = D_2$  por lo que:  $v_1 = v_2$

El peso específico del gas puede considerarse constante por lo que:  $\gamma_1 = \gamma_2$

Para el cálculo se considerará como fluido al aire con una temperatura de  $263^\circ\text{C}$  por lo que su peso específico es de:  $4.887\text{N/m}^3$ .

$$\frac{P_1}{\gamma} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + h_2$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = h_2 - h_1$$

$$P_1 - P_2 = (h_2 - h_1)\gamma$$

$$P_1 - P_2 = 2.5m \left( \frac{4.88\text{N}}{\text{m}^3} \right)$$

$$P_1 - P_2 = 12.21\text{Pa} = 0.12\text{mbar}$$

La variación de presión entre los dos puntos con una diferencia de altura de 2.5m es de 0.12mbar, este valor representa el 0.12% del máximo admisible para el motor del bus Mercedes – Benz OF 1721 que es de 100mbar. En consecuencia se puede decir que la variación de altura entre dos puntos de un sistema de escape (sin considerar la

fricción en la tubería) provoca una diferencia de presión mínima que puede ser omitida en los cálculos de contrapresión.

### **3.10. DETERMINACIÓN DE LA CONTRAPRESIÓN EN LOS DIFERENTES DISEÑOS DE SISTEMAS DE ESCAPE**

#### **3.10.1. INTRODUCCIÓN**

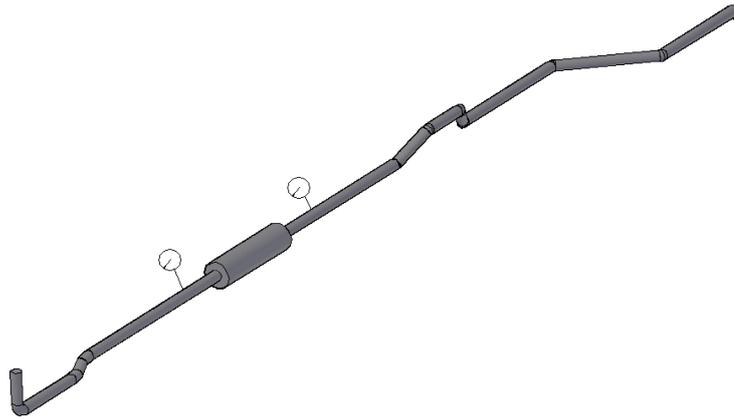
La determinación de la contrapresión en los diferentes diseños del sistema de escape permitirá evaluar las diferentes configuraciones posibles para determinar si existe una influencia de la disposición del conducto de escape en la contaminación producida.

El estudio de los diferentes diseños se realizará con la ayuda del software Flowmaster V7 Automotive R1 que permite evaluar diferentes diseños de sistemas de escape para analizar el desempeño de los mismos. Este software es utilizado en el medio automotriz en la etapa de diseño para determinar presiones, pérdidas, caudales y otros parámetros de funcionamiento para un sistema de escape dado.

Se analizarán las tres configuraciones básicas de sistemas de escape modificando sus componentes, además se evaluarán diseños mal realizados para determinar su influencia en el desempeño del motor y en la contaminación producida.

#### **3.10.2. DETERMINACIÓN DE LA CAIDA DE PRESIÓN EN EL SILENCIADOR**

La caída de presión en el silenciador es un valor muy importante que servirá posteriormente para determinar la contrapresión total del sistema de escape. El valor de caída de presión es la diferencia medida entre dos manómetros colocados antes y después del silenciador. La figura 3.5 muestra la ubicación de los manómetros en el sistema de escape.



**Figura 3.5** Ubicación de los manómetros en el sistema de escape para determinar la caída de presión entre la entrada y la salida del silenciador

**Fuente:** El autor

Las medidas de presión fueron realizadas con el bus estacionado y el motor sin carga a un régimen de giro de 2500rpm, los valores obtenidos fueron los siguientes:

	PRESIÓN ANTES DE SILENCIADOR mm Hg (mbar)	PRESIÓN DESPUES DEL SILENCIADOR mm Hg (mbar)	DIFERENCIA DE PRESIÓN mm Hg (mbar)
CHEVROLET FTR-32M	58(77.31)	34(45.32)	24(32)
MERCEDES-BENZ OF1721	48(63.98)	29(38.65)	19(25.32)

**Tabla 3.6** Caída de presión en el silenciador

**Fuente:** El autor

Para el diseño de silenciadores se considera que la restricción máxima que debe existir es de 1" Hg (33.86mbar)<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Western Filter Co., Inc., Art. Cit.

### 3.10.2.1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA DEL SILENCIADOR

Para realizar los cálculos de contrapresión en el sistema de escape es necesario definir la caída de presión del silenciador en la forma de un coeficiente de resistencia que se obtiene de la siguiente forma:

$$K = \frac{2\Delta P}{\rho v^2}$$

Donde:

$K$  = Coeficiente de resistencia del silenciador

$\Delta P$  = Caída de presión entre la entrada y la salida del silenciador

$\rho$  = Densidad del fluido en la entrada del silenciador

$v$  = Velocidad del fluido en la entrada del silenciador

El coeficiente de resistencia del silenciador de las dos marcas de chasis será obtenido al realizar las simulaciones en el software Flowmaster V7.

### 3.10.3. DATOS PARA EL CÁLCULO

En la tabla 3.7 se presentan los datos para el cálculo de la contrapresión del chasis Chevrolet FTR 32M y del chasis Mercedes-Benz OF1721. Estos datos serán cargados en el programa para definir las características del fluido de trabajo.

	CHEVROLET FTR-32M	MERCEDES-BENZ OF1721
TEMPERATURA DEL AIRE (°C)	263	263
CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	0.405	0.363
PRESIÓN ATMOSFÉRICA A 2500 msnm <sup>16</sup> (bar)	0.742	0.742
DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	0.4982	0.4982
Coeficiente K del Silenciador	2.05	4.754

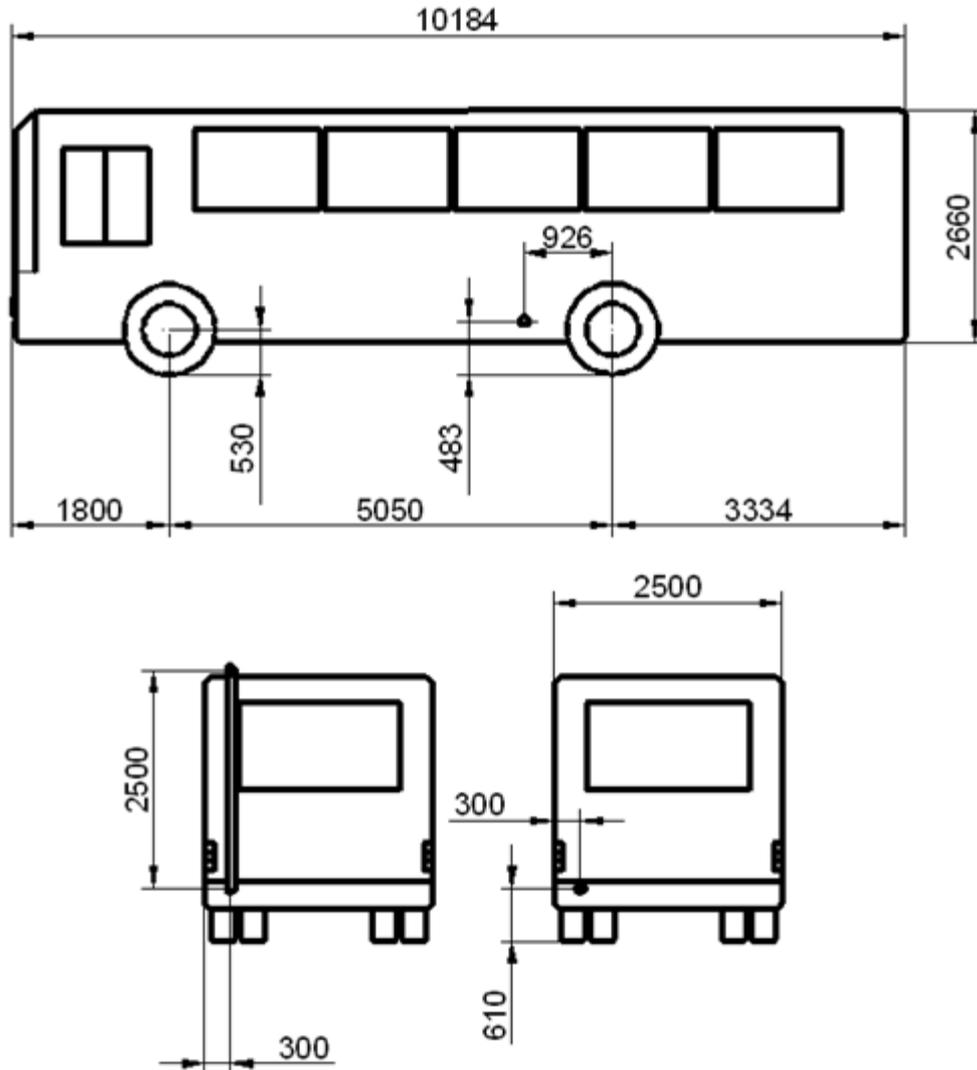
**Tabla 3.7** Datos para el cálculo de la contrapresión de las dos marcas de chasis estudiadas

<sup>16</sup> Engineering toolbox, diciembre del 2009, *Air – Altitude, Density and Specific Volume*, [http://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-density-volume-d\\_195.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-density-volume-d_195.html).

### 3.10.4. CONTRAPRESIÓN EN EL BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR 32M

#### 3.10.4.1. DIMENSIONES DEL BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR 32M

Para el cálculo de la contrapresión en el sistema de escape de los buses con chasis Chevrolet FTR-32M se utilizaron las medidas indicadas en la figura 3.6.



**Figura 3.6** Dimensiones del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

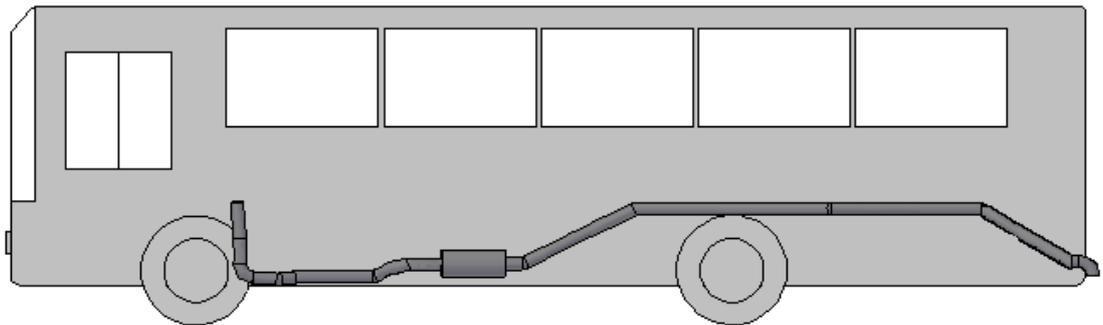
**Fuente:** El autor

#### 3.10.4.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO A LA IZQUIERDA

El cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda se realizará en cuatro sistemas de escape diferentes:

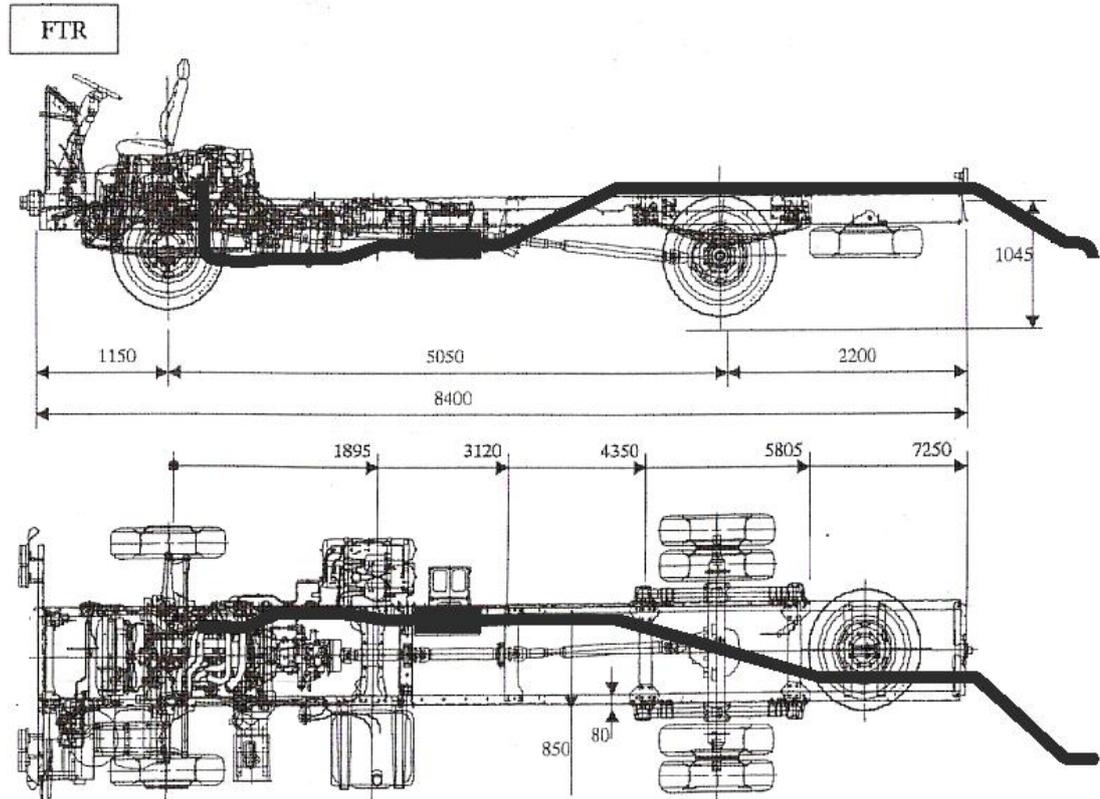
- Sistema de escape con silenciador
- Sistema de escape con silenciador vaciado
- Sistema de escape sin silenciador
- Sistema de escape con codos mitrados después del silenciador.

Las figuras 3.7 y 3.8 muestran el emplazamiento de este sistema de escape en un bus y en un chasis respectivamente.



**Figura 3.7** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda en un bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

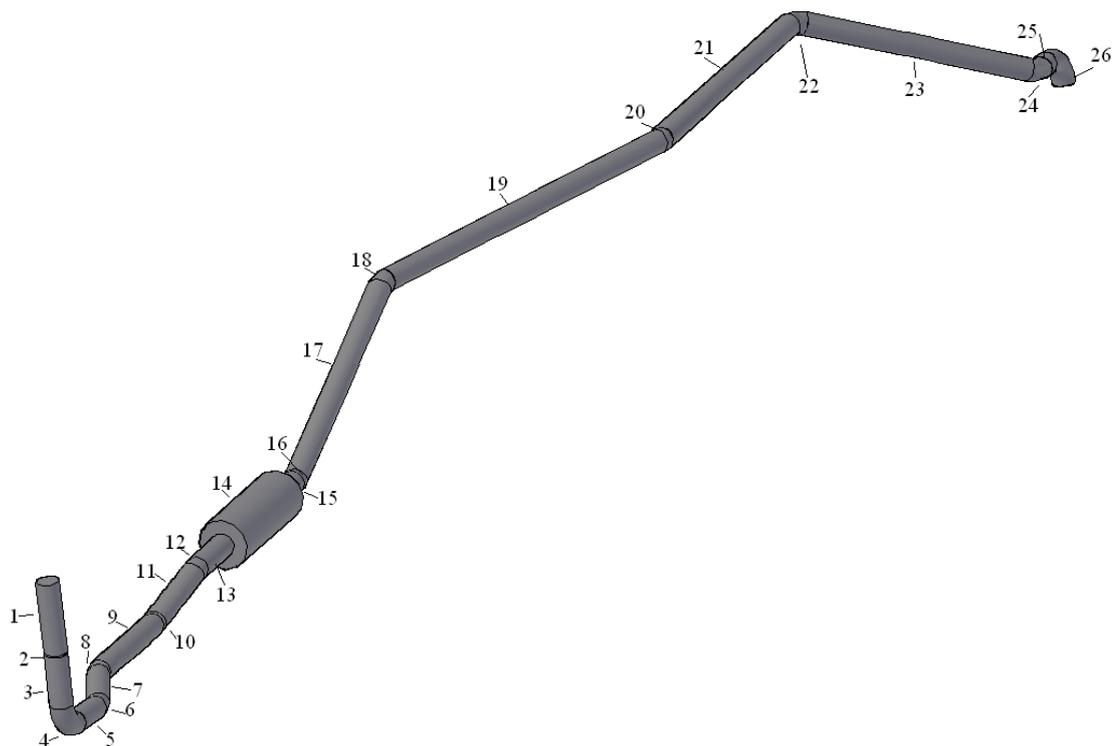


**Figura 3.8** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda en el chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** Imagen del chasis Chevrolet FTR-32M modificada por el autor

#### 3.10.4.2.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR

En la figura 3.9 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.8 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos para cada elemento. La caída de presión total obtenida al final es igual a la contrapresión generada por este sistema de escape.



**Figura 3.9** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	339.7	77.9	0.25	1.85
3	241.7	77.9	0.25	1.32
5	229	77.9	0.25	1.26
7	276.4	77.9	0.25	1.53
9	604.5	77.9	0.25	3.37
11	336.7	77.9	0.25	1.88
13	178.7	77.9	0.25	1.00
15	56.7	77.9	0.25	0.33
17	1129.6	77.9	0.25	6.64
19	1853.2	77.9	0.25	11.07
21	1371	77.9	0.25	8.32

23	1122.4	77.9	0.25	6.93		
25	55.4	77.9	0.25	0.34		
<b>ELEMENTOS TIPO CODO</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	4	1.922	77.9	0.25	0	
4	90	1.577	77.9	0.25	6.25	
6	25	1.283	77.9	0.25	1.68	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.62	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.34	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.34	
16	24	1.283	77.9	0.25	1.70	
18	31	1.283	77.9	0.25	2.13	
20	16	1.283	77.9	0.25	1.12	
22	48	1.283	77.9	0.25	3.84	
24	48	1.283	77.9	0.25	3.90	
26	90	1.925	77.9	0.25	6.44	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=2.05
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	32
<b>PÉRDIDA A LA SALIDA</b>					17.53	
<b>CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN</b>					126.85	

**Tabla 3.8** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con silenciador del bus con chasis Chevrolet

FTR-32M

**Fuente:** El autor

### 3.10.4.2.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO

En la figura 3.9 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.9 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

La caída de presión en el silenciador vaciado se calcula considerando la dilatación súbita a la entrada, la fricción en la tubería y la contracción súbita a la salida.

<b>CAIDA DE PRESIÓN</b>					
<b>ELEMENTOS TIPO TUBO</b>					
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	339.7	77.9	0.25	1.90	
3	241.7	77.9	0.25	1.35	
5	229	77.9	0.25	1.29	
7	276.4	77.9	0.25	1.57	
9	604.5	77.9	0.25	3.45	
11	336.7	77.9	0.25	1.93	
13	278.7	77.9	0.25	1.60	
15	156.7	77.9	0.25	0.91	
17	1129.6	77.9	0.25	6.65	
19	1853.2	77.9	0.25	11.05	
21	1371	77.9	0.25	8.30	
23	1122.4	77.9	0.25	6.92	
25	55.4	77.9	0.25	0.34	
<b>ELEMENTOS TIPO CODO</b>					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/ $D_1$	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	4	1.922	77.9	0.25	0
4	90	1.577	77.9	0.25	6.40
6	25	1.283	77.9	0.25	1.72
8	24	1.283	77.9	0.25	1.66
10	20	1.283	77.9	0.25	1.37
12	20	1.283	77.9	0.25	1.38
16	24	1.283	77.9	0.25	1.70
18	31	1.283	77.9	0.25	2.12
20	16	1.283	77.9	0.25	1.12
22	48	1.283	77.9	0.25	3.84
24	48	1.283	77.9	0.25	3.90

26	90	1.925	77.9	0.25	6.44	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	8.83
PÉRDIDA A LA SALIDA						17.53
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN						105.38

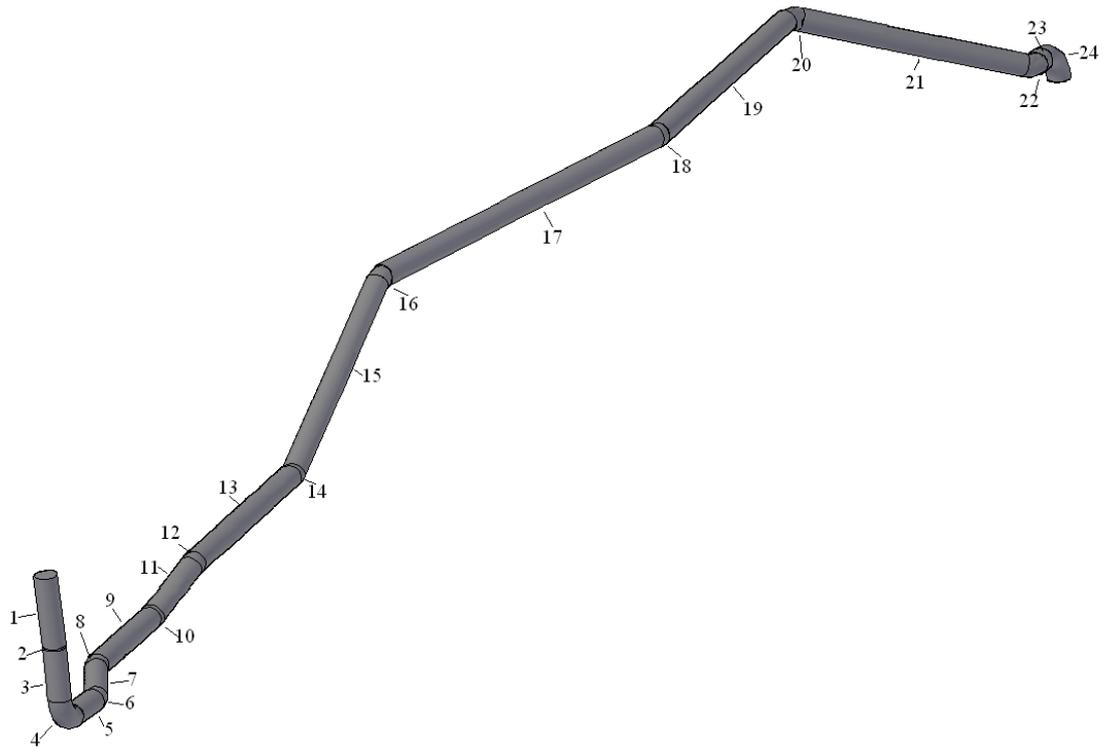
**Tabla 3.9** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con silenciador vaciado del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

#### 3.10.4.2.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR

En la figura 3.10 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.10 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

El silenciador es reemplazado por un conducto de igual longitud.



**Figura 3.10** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda sin silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>i</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	339.7	77.9	0.25	1.91
3	241.7	77.9	0.25	1.36
5	229	77.9	0.25	1.30
7	276.4	77.9	0.25	1.58
9	604.5	77.9	0.25	3.48
11	336.7	77.9	0.25	1.94
13	1035.4	77.9	0.25	6.02
15	1129.6	77.9	0.25	6.64
17	1853.2	77.9	0.25	11.05
19	1371	77.9	0.25	8.31
21	1122.4	77.9	0.25	6.92
23	55.4	77.9	0.25	0.34

ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	4	1.922	77.9	0.25	0
4	90	1.577	77.9	0.25	6.44
6	25	1.283	77.9	0.25	1.73
8	24	1.283	77.9	0.25	1.67
10	20	1.283	77.9	0.25	1.38
12	20	1.283	77.9	0.25	1.38
14	24	1.283	77.9	0.25	1.70
16	31	1.283	77.9	0.25	2.12
18	16	1.283	77.9	0.25	1.11
20	48	1.283	77.9	0.25	3.84
22	48	1.283	77.9	0.25	3.90
24	90	1.925	77.9	0.25	6.44
PERDIDA A LA SALIDA					17.53
CAIDA DE PRESIÓN TOTAL = CONTRAPRESIÓN					100.20

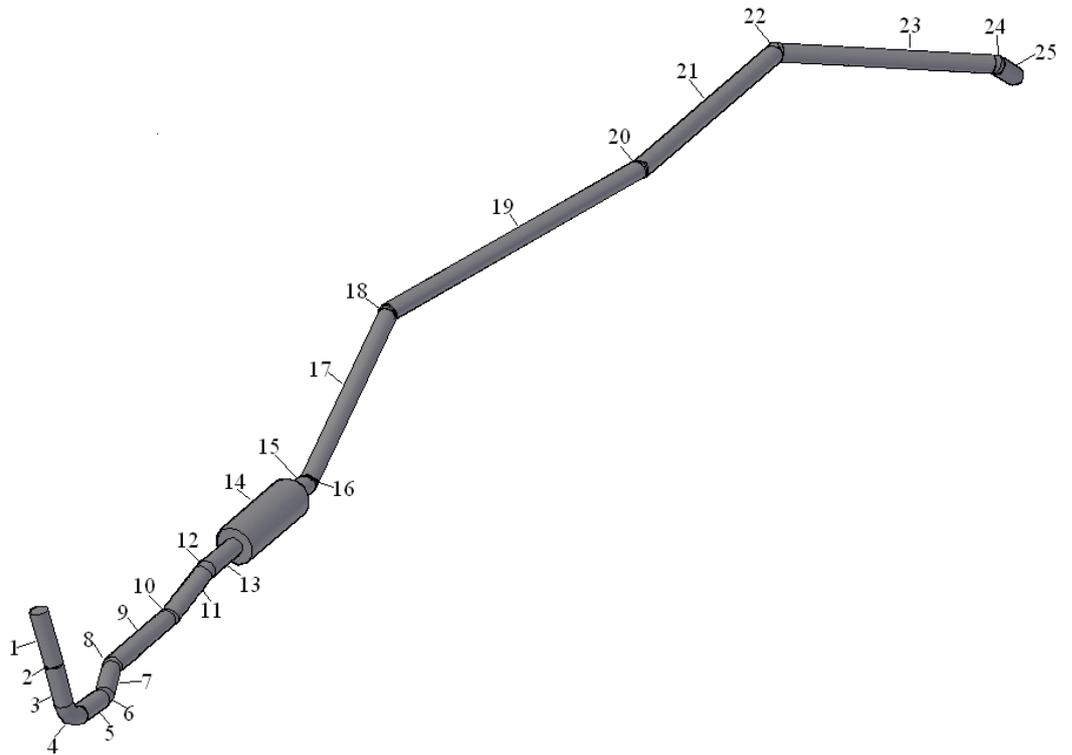
**Tabla 3.10** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda sin silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

#### 3.10.4.2.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR

Este sistema de escape es el utilizado más comúnmente en la ciudad de Cuenca por los buses con chasis Chevrolet FTR-32M, las empresas constructoras de carrocerías no realizan modificaciones antes del silenciador pero después de este construyen sistemas de escape con codos mitrados.

En la figura 3.11 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.11 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos.



**Figura 3.11** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con codos mitrados del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	339.7	77.9	0.25	1.89
3	241.7	77.9	0.25	1.35
5	229	77.9	0.25	1.29
7	276.4	77.9	0.25	1.56
9	604.5	77.9	0.25	3.44
11	336.7	77.9	0.25	1.93
13	178.7	77.9	0.25	1.02
15	168.1	77.9	0.25	0.98
17	1153.5	77.9	0.25	6.78
19	1878.8	77.9	0.25	11.20
21	1402	77.9	0.25	8.49
23	1242	77.9	0.25	7.73

25	194.5	77.9	0.25	1.23		
<b>ELEMENTOS TIPO CODO</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	4	1.922	77.9	0.25	0	
4	90	1.577	77.9	0.25	6.32	
6	25	1.283	77.9	0.25	1.70	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.63	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.35	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.36	
16	26	---	77.9	0.25	2.77	
18	20	---	77.9	0.25	1.77	
20	16	---	77.9	0.25	1.32	
22	45	---	77.9	0.25	9.34	
24	39	---	77.9	0.25	7.07	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION MEDIDA (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	32
<b>PÉRDIDA A LA SALIDA</b>						17.5
<b>CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN</b>						133.02

**Tabla 3.11** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

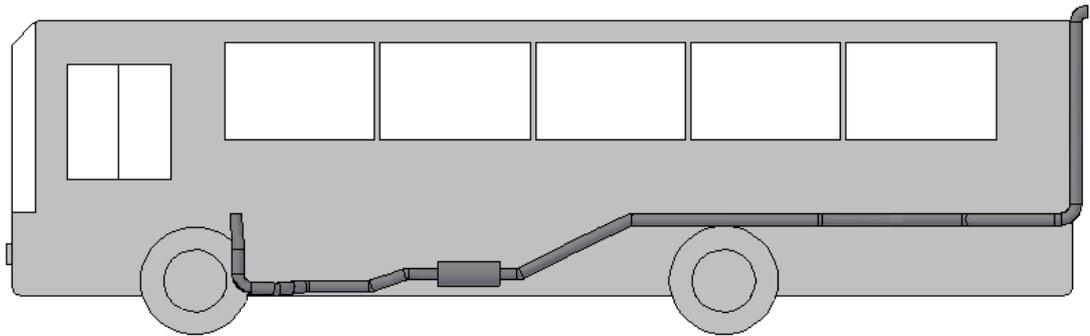
### 3.10.4.3. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ARRIBA A LA IZQUIERDA

El cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda se realizará en cuatro sistemas de escape diferentes:

- Sistema de escape con silenciador
- Sistema de escape con silenciador vaciado

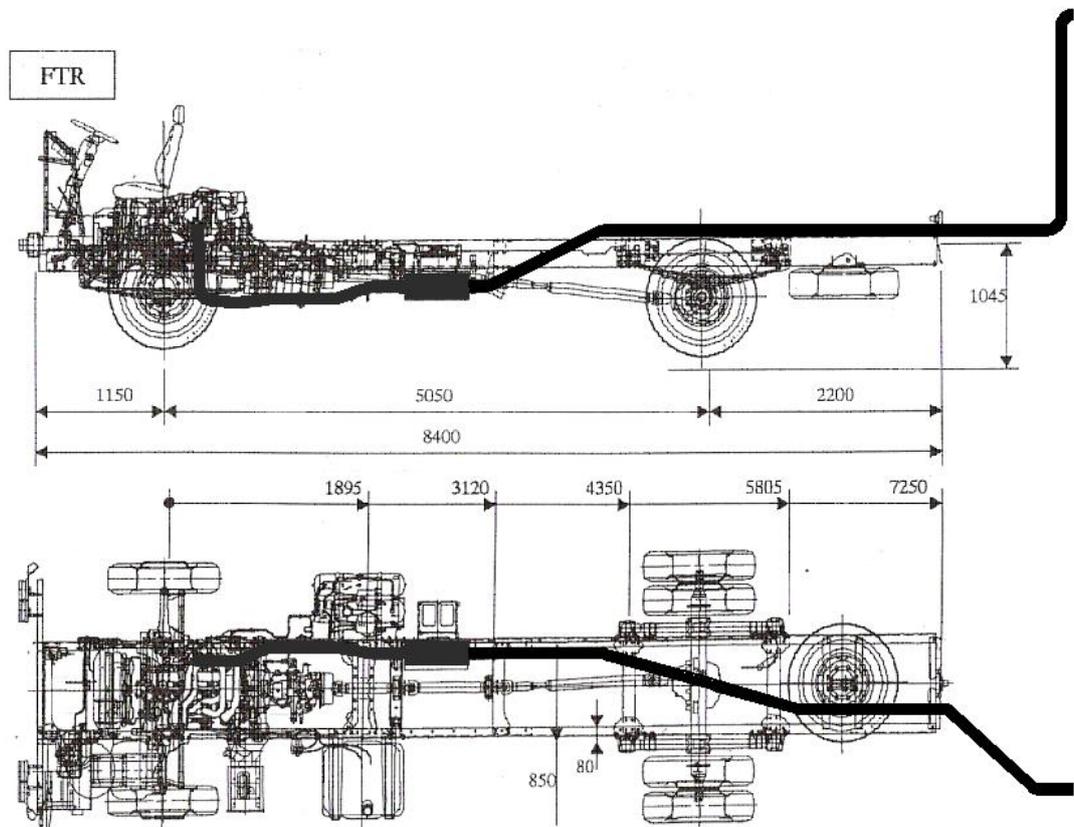
- Sistema de escape sin silenciador
- Sistema de escape con codos mitrados después del silenciador.

Las figuras 3.12 y 3.13 muestran el emplazamiento de este sistema de escape en un bus y en un chasis respectivamente.



**Figura 3.12** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda en un bus con chasis Chevrolet FTR-32M

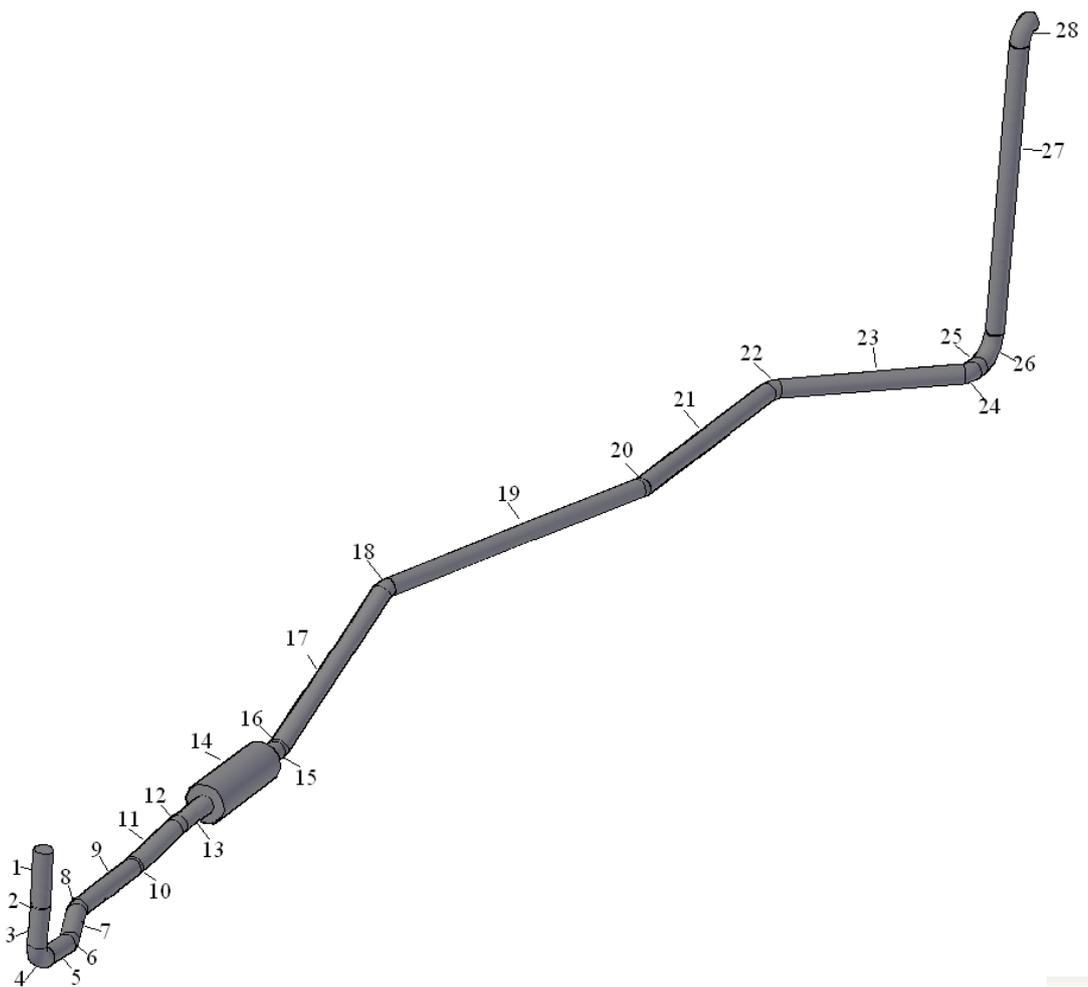
**Fuente:** El autor



**Figura 3.13** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda en el chasis Chevrolet FTR-32M

### 3.10.4.3.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR

En la figura 3.14 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.12 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos para cada elemento. La caída de presión total obtenida al final es igual a la contrapresión generada por este sistema de escape.



**Figura 3.14** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

<b>DATOS DE LOS ELEMENTOS</b>						
<b>ELEMENTOS TIPO TUBO</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> (mm)		ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	339.7	77.9		0.25	1.82	
3	241.7	77.9		0.25	1.30	
5	229	77.9		0.25	1.24	
7	276.4	77.9		0.25	1.51	
9	604.5	77.9		0.25	3.32	
11	336.7	77.9		0.25	1.85	
13	178.7	77.9		0.25	1	
15	56.7	77.9		0.25	0.32	
17	1129.6	77.9		0.25	6.54	
19	1853.2	77.9		0.25	10.87	
21	1371	77.9		0.25	8.15	
23	1021	77.9		0.25	6.16	
25	105.3	77.9		0.25	0.64	
27	1758.1	77.9		0.25	10.92	
<b>ELEMENTOS TIPO CODO</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	Θ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	4	1.922	77.9	0.25	0	
4	90	1.577	77.9	0.25	6.09	
6	25	1.283	77.9	0.25	1.64	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.57	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.30	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.31	
16	24	1.283	77.9	0.25	1.65	
18	31	1.283	77.9	0.25	2.09	
20	16	1.283	77.9	0.25	1.08	
22	43	1.283	77.9	0.25	3.31	
24	43	1.283	77.9	0.25	3.32	
26	90	1.925	77.9	0.25	6.24	
28	90	1.283	77.9	0.25	8.08	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION K=2.05 (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	31.61

PÉRDIDA A LA SALIDA	17.47
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN	142.50

**Tabla 3.12** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

### 3.10.4.3.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO

En la figura 3.14 se muestran los elementos del sistema de escape analizado y en la tabla 3.13 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

La caída de presión en el silenciador vaciado se calcula considerando la dilatación súbita a la entrada, la fricción en la tubería y la contracción súbita a la salida.

DATOS DE LOS ELEMENTOS					
ELEMENTOS TIPO TUBO					
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	339.7	77.9	0.25	1.87	
3	241.7	77.9	0.25	1.33	
5	229	77.9	0.25	1.27	
7	276.4	77.9	0.25	1.54	
9	604.5	77.9	0.25	3.39	
11	336.7	77.9	0.25	1.89	
13	278.7	77.9	0.25	1.57	
15	156.7	77.9	0.25	0.89	
17	1129.6	77.9	0.25	6.51	
19	1853.2	77.9	0.25	10.82	
21	1371	77.9	0.25	8.11	
23	1021	77.9	0.25	6.12	
25	105.3	77.9	0.25	0.63	
27	1758.1	77.9	0.25	10.85	
ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/ $D_1$	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	4	1.922	77.9	0.25	0

4	90	1.577	77.9	0.25	6.28	
6	25	1.283	77.9	0.25	1.69	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.62	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.34	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.35	
16	24	1.283	77.9	0.25	1.66	
18	31	1.283	77.9	0.25	2.08	
20	16	1.283	77.9	0.25	1.09	
22	43	1.283	77.9	0.25	3.29	
24	43	1.283	77.9	0.25	3.33	
26	90	1.925	77.9	0.25	6.27	
28	90	1.283	77.9	0.25	8.01	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	8.83
PÉRDIDA A LA SALIDA						17.53
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN						121.31

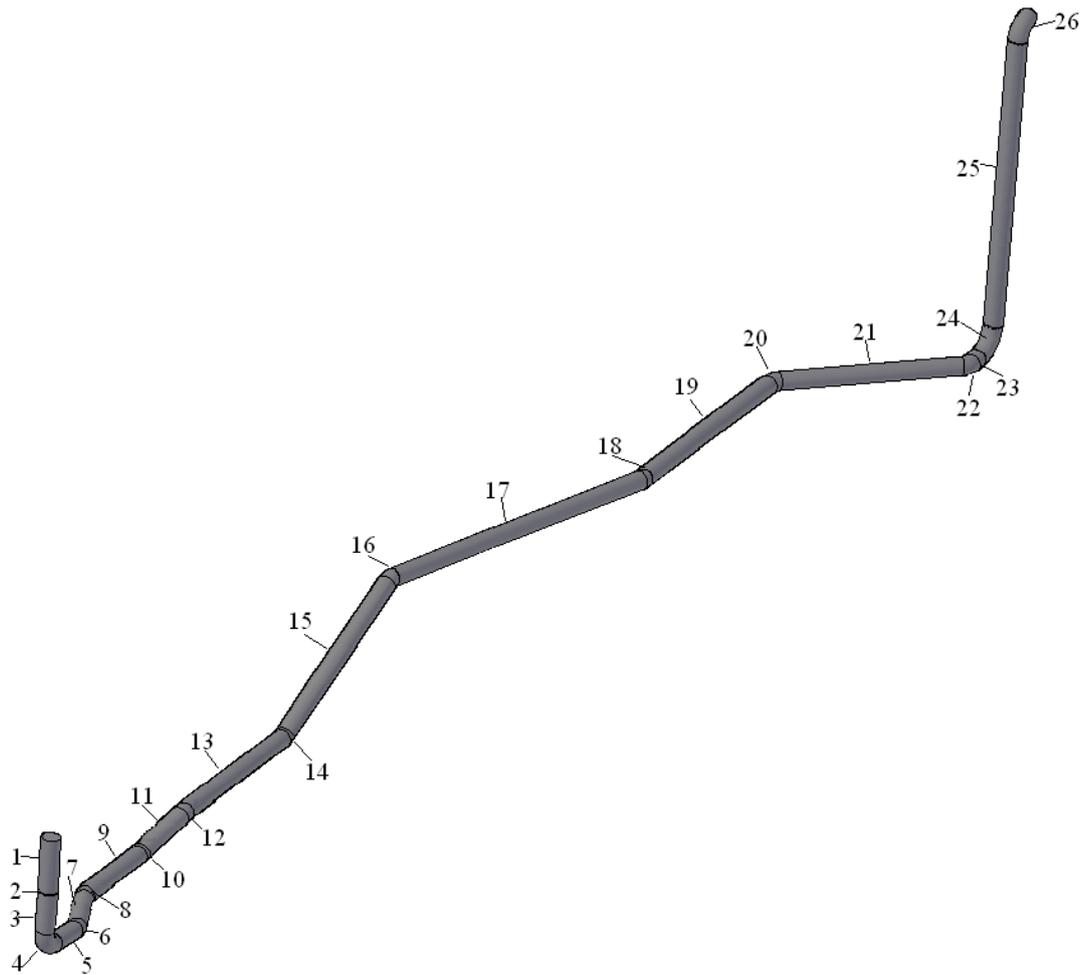
**Tabla 3.13** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con silenciador vaciado del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

#### 3.10.4.3.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR

En la figura 3.15 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.14 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

El silenciador es reemplazado por un conducto de igual longitud.



**Figura 3.15** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda sin silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

DATOS DE LOS ELEMENTOS				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	339.7	77.9	0.25	1.88
3	241.7	77.9	0.25	1.34
5	229	77.9	0.25	1.28
7	276.4	77.9	0.25	1.55
9	604.5	77.9	0.25	3.41
11	336.7	77.9	0.25	1.90
13	1035.4	77.9	0.25	7.73

15	1129.6	77.9	0.25	6.51	
17	1853.2	77.9	0.25	10.83	
19	1371	77.9	0.25	8.12	
21	1021	77.9	0.25	6.13	
23	105.3	77.9	0.25	0.63	
25	1758.1	77.9	0.25	10.86	
<b>ELEMENTOS TIPO CODO</b>					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	4	1.922	77.9	0.25	0
4	90	1.577	77.9	0.25	6.31
6	25	1.283	77.9	0.25	1.70
8	24	1.283	77.9	0.25	1.63
10	20	1.283	77.9	0.25	1.35
12	20	1.283	77.9	0.25	1.36
14	24	1.283	77.9	0.25	1.67
16	31	1.283	77.9	0.25	2.08
18	16	1.283	77.9	0.25	1.09
20	43	1.283	77.9	0.25	3.29
22	43	1.283	77.9	0.25	3.34
24	90	1.925	77.9	0.25	6.28
26	90	1.283	77.9	0.25	8.02
<b>PÉRDIDA A LA SALIDA</b>					<b>16.57</b>
<b>CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN</b>					<b>116.98</b>

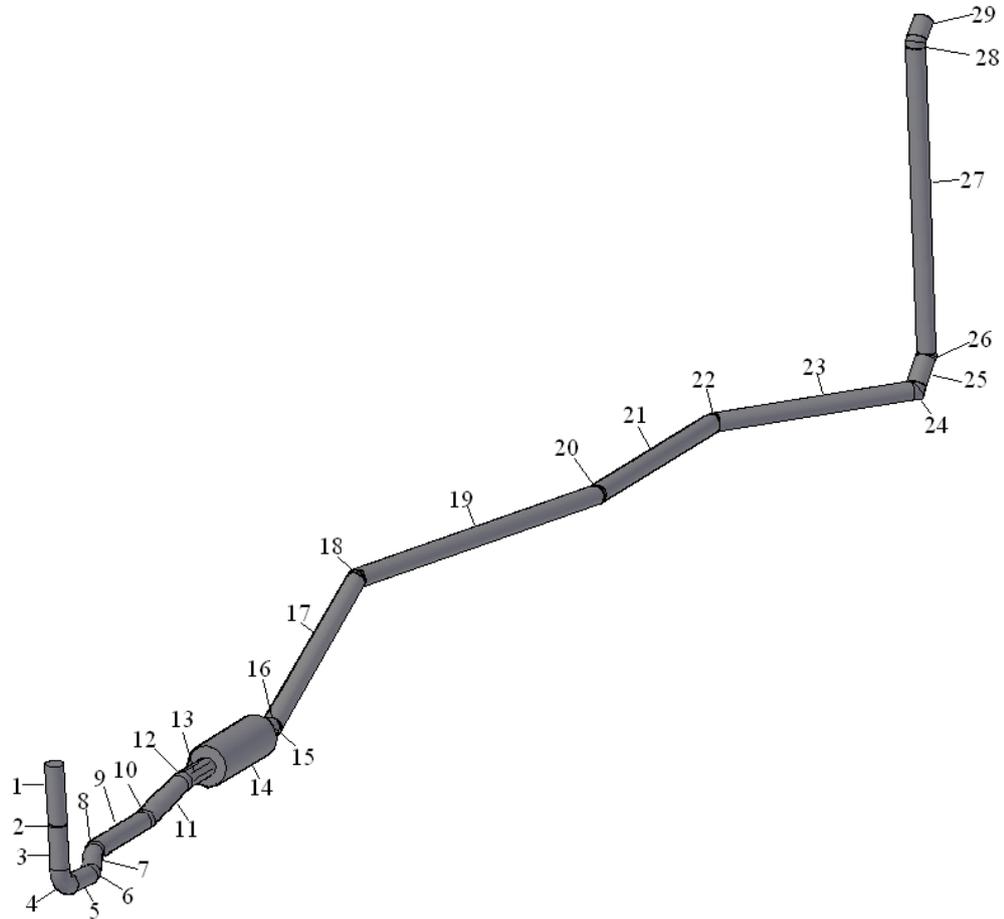
**Tabla 3.14** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda sin silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

#### 3.10.4.3.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR

Este sistema de escape es analizado debido a que las empresas constructoras de carrocerías no realizan modificaciones antes del silenciador pero después de este construyen sistemas de escape con codos mitrados.

En la figura 3.16 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.15 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos.



**Figura 3.16** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

DATOS DE LOS ELEMENTOS				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_1$ (mm)	$\epsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	339.7	77.9	0.25	1.79
3	241.7	77.9	0.25	1.28
5	229	77.9	0.25	1.22

7	276.4	77.9	0.25	1.48		
9	604.5	77.9	0.25	3.27		
11	336.7	77.9	0.25	1.83		
13	178.7	77.9	0.25	0.97		
15	168.1	77.9	0.25	0.95		
17	1153.5	77.9	0.25	6.57		
19	1878.8	77.9	0.25	10.85		
21	1360.6	77.9	0.25	7.96		
23	1136.1	77.9	0.25	6.76		
25	164.3	77.9	0.25	0.99		
27	1716.7	77.9	0.25	10.64		
29	120.7	77.9	0.25	0.23		
<b>ELEMENTOS TIPO CODO</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	4	1.922	77.9	0.25	0	
4	90	1.577	77.9	0.25	5.99	
6	25	1.283	77.9	0.25	1.61	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.55	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.28	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.29	
16	26	---	77.9	0.25	2.69	
18	20	---	77.9	0.25	1.72	
20	16	---	77.9	0.25	1.27	
22	39	---	77.9	0.25	6.69	
24	57	---	77.9	0.25	8.17	
26	45	---	77.9	0.25	9.19	
28	45	---	77.9	0.25	9.03	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=2.05 (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	31.11
PÉRDIDA A LA SALIDA						17.47
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN						155.98

**Tabla 3.15** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

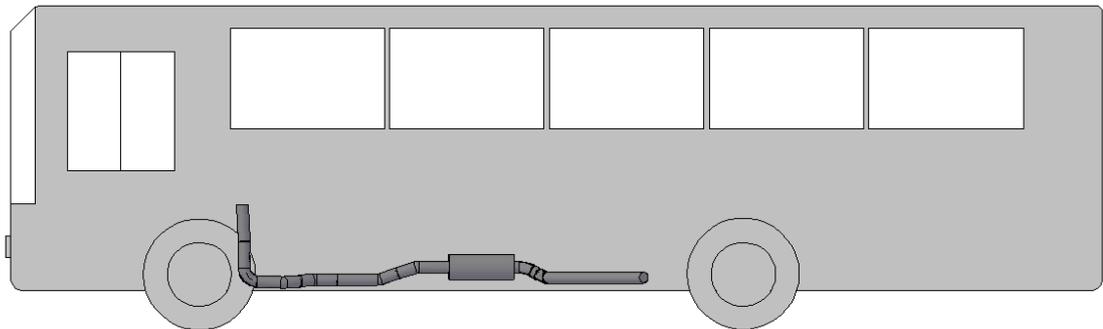
**Fuente:** El autor

#### 3.10.4.4. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE LATERAL IZQUIERDA

El cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda se realizará en cuatro sistemas de escape diferentes:

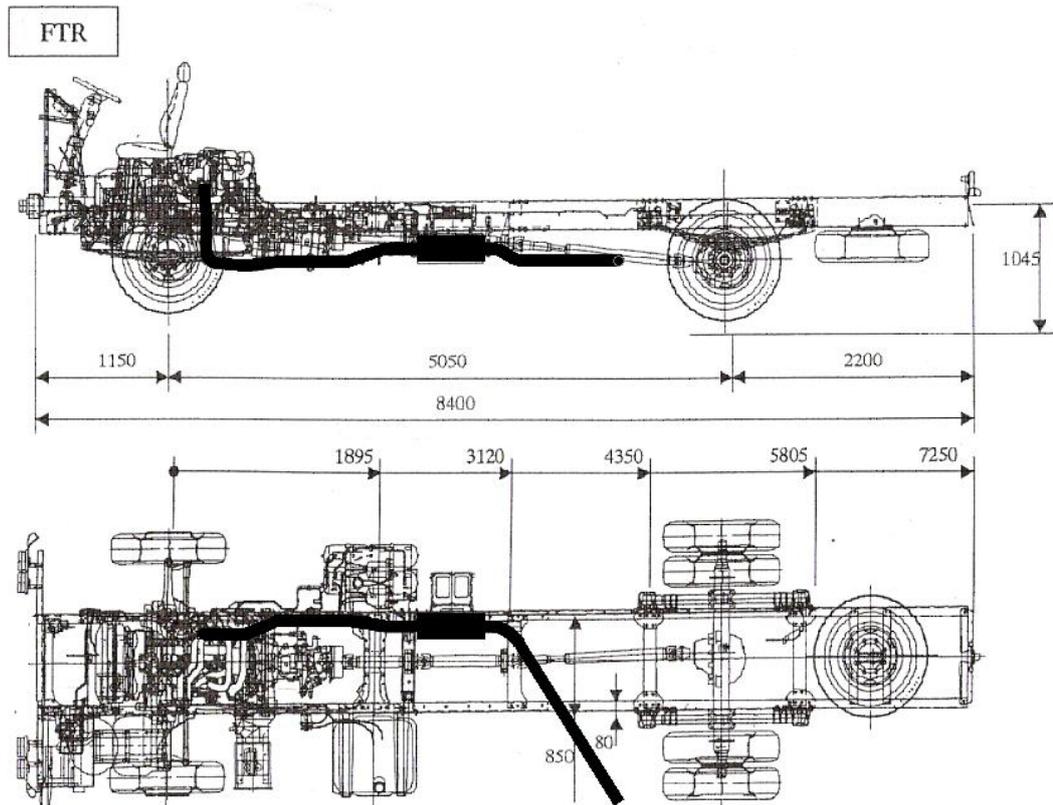
- Sistema de escape con silenciador
- Sistema de escape con silenciador vaciado
- Sistema de escape sin silenciador
- Sistema de escape con codos mitrados después del silenciador.

Las figura 3.17 y 3.18 muestran el emplazamiento de este sistema de escape en un bus y en un chasis respectivamente.



**Figura 3.17** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda en un bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

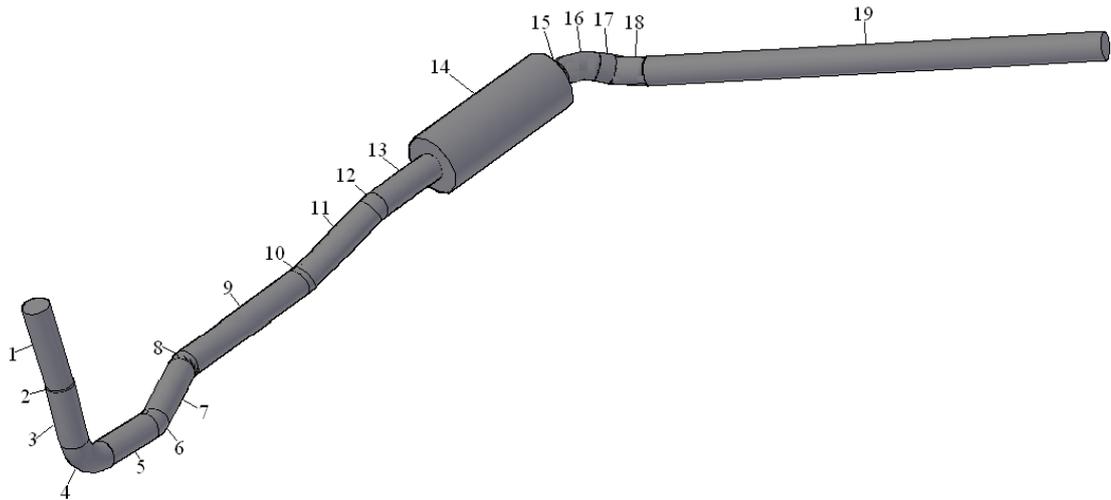


**Figura 3.18** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda en el chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** Imagen del chasis Chevrolet FTR-32M modificada por el autor

#### 3.10.4.4.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR

En la figura 3.19 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.16 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos para cada elemento. La caída de presión total obtenida al final es igual a la contrapresión generada por este sistema de escape.



**Figura 3.19** Elementos del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN					
ELEMENTOS TIPO TUBO					
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_I$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	339.7	77.9	0.25	1.93	
3	241.7	77.9	0.25	1.37	
5	229	77.9	0.25	1.32	
7	276.4	77.9	0.25	1.60	
9	604.5	77.9	0.25	3.52	
11	336.7	77.9	0.25	1.97	
13	178.7	77.9	0.25	1.05	
15	47.6	77.9	0.25	0.29	
17	60	77.9	0.25	0.37	
19	1688.2	77.9	0.25	10.62	
ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/ $D_I$	$D_I$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	4	1.922	77.9	0.25	0
4	90	1.577	77.9	0.25	6.44

6	25	1.283	77.9	0.25	1.73	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.67	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.38	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.39	
16	43	2.567	77.9	0.25	3.51	
18	37	2.567	77.9	0.25	3.17	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION K=2.05 (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	33.52
<b>PÉRDIDA A LA SALIDA</b>						17.47
<b>CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN</b>						94.39

**Tabla 3.16** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

#### 3.10.4.4.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO

En la figura 3.19 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.17 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

La caída de presión en el silenciador vaciado se calcula considerando la dilatación súbita a la entrada, la fricción en la tubería y la contracción súbita a la salida.

<b>CAIDA DE PRESIÓN</b>				
<b>ELEMENTOS TIPO TUBO</b>				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	339.7	77.9	0.25	2.00
3	241.7	77.9	0.25	1.42
5	229	77.9	0.25	1.36
7	276.4	77.9	0.25	1.65

9	604.5	77.9	0.25	3.64		
11	336.7	77.9	0.25	2.04		
13	278.7	77.9	0.25	1.69		
15	47.6	77.9	0.25	0.29		
17	60	77.9	0.25	0.39		
19	1688.2	77.9	0.25	10.69		
<b>ELEMENTOS TIPO CODO</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	4	1.922	77.9	0.25	0	
4	90	1.577	77.9	0.25	6.60	
6	25	1.283	77.9	0.25	1.78	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.71	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.42	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.42	
16	43	2.567	77.9	0.25	3.53	
18	37	2.567	77.9	0.25	3.19	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION MEDIDA (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	8.93
<b>PÉRDIDA A LA SALIDA</b>					17.43	
<b>CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN</b>					71.23	

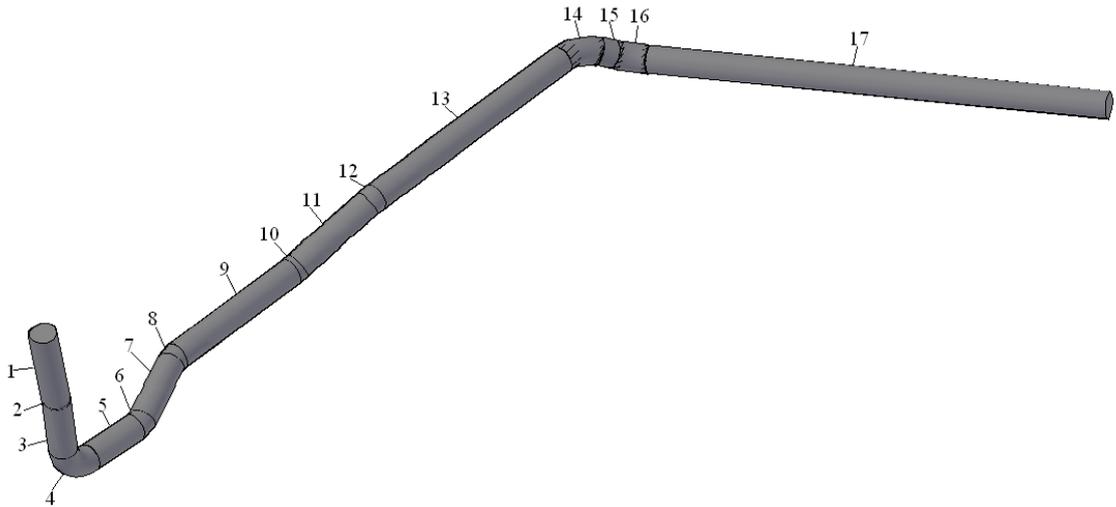
**Tabla 3.17** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con silenciador vaciado del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

### 3.10.4.4.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR

En la figura 3.20 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.18 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

El silenciador es reemplazado por un conducto de igual longitud.



**Figura 3.20** Elementos del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda sin silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	339.7	77.9	0.25	2.01
3	241.7	77.9	0.25	1.43
5	229	77.9	0.25	1.37
7	276.4	77.9	0.25	1.67
9	604.5	77.9	0.25	3.67
11	336.7	77.9	0.25	2.06
13	926.3	77.9	0.25	5.72
15	60	77.9	0.25	0.37
17	1688.2	77.9	0.25	10.69

ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	$\epsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	4	1.922	77.9	0.25	0
4	90	1.577	77.9	0.25	6.64
6	25	1.283	77.9	0.25	1.79
8	24	1.283	77.9	0.25	1.72
10	20	1.283	77.9	0.25	1.43
12	20	1.283	77.9	0.25	1.44
14	43	2.567	77.9	0.25	3.53
16	37	2.567	77.9	0.25	3.19
PÉRDIDA A LA SALIDA					17.43
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN					66.22

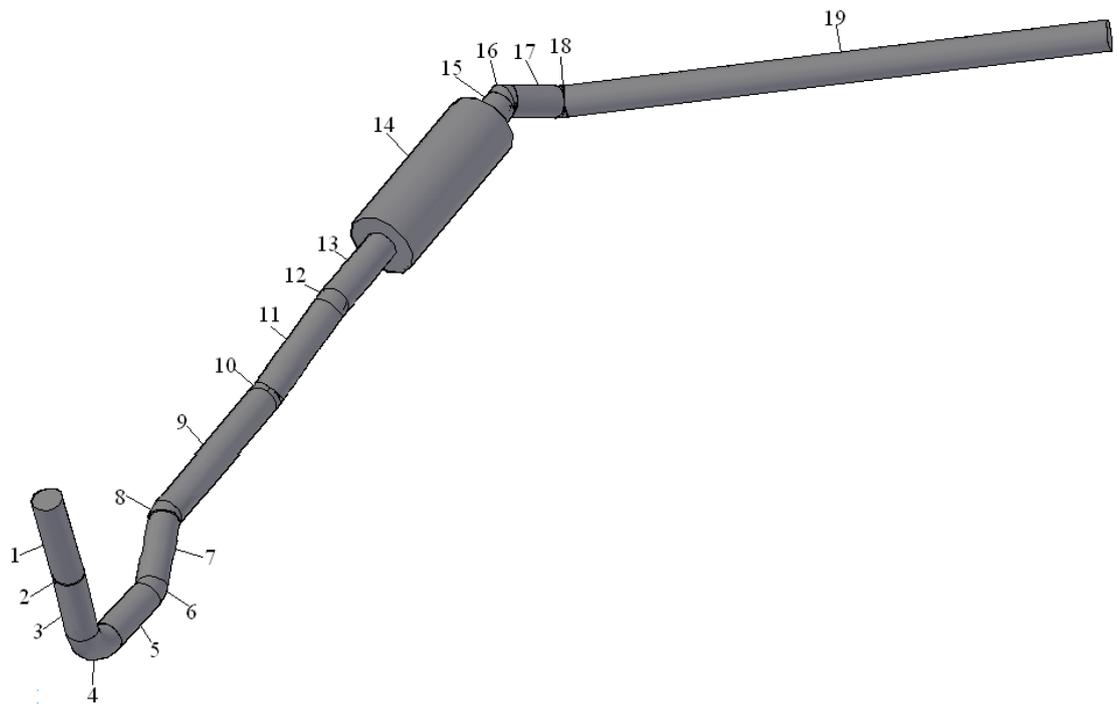
**Tabla 3.18** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda sin silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

#### 3.10.4.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR

Este sistema de escape es analizado debido a que las empresas constructoras de carrocerías no realizan modificaciones antes del silenciador pero después de este construyen sistemas de escape con codos mitrados.

En la figura 3.21 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.19 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos.



**Figura 3.21** Elementos del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_I$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	339.7	77.9	0.25	1.91
3	241.7	77.9	0.25	1.36
5	229	77.9	0.25	1.30
7	276.4	77.9	0.25	1.58
9	604.5	77.9	0.25	3.48
11	336.7	77.9	0.25	1.94
13	178.7	77.9	0.25	1.03
15	106.7	77.9	0.25	0.64
17	169.7	77.9	0.25	1.04
19	1738.7	77.9	0.25	10.93

ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	4	1.922	77.9	0.25	0	
4	90	1.577	77.9	0.25	6.37	
6	25	1.283	77.9	0.25	1.72	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.65	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.36	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.37	
16	43	---	77.9	0.25	8.49	
18	37	---	77.9	0.25	6.29	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=2.05 (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	33.15
PÉRDIDA A LA SALIDA						17.47
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN						103.20

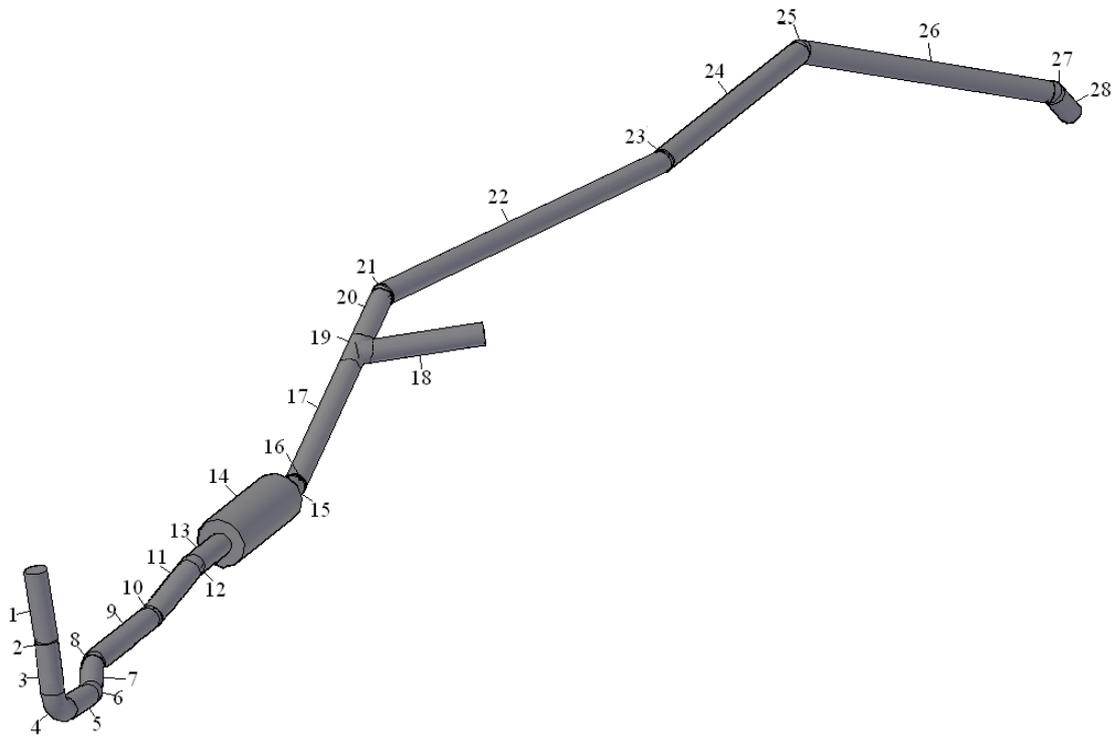
**Tabla 3.19** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

#### 3.10.4.5. SISTEMA DE ESCAPE CON DOBLE SALIDA: EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO Y DESPUÉS DEL SILENCIADOR

Este sistema de escape es analizado debido a que los dueños de los buses ocaionalmente construyen dos salidas para lograr que los gases salgan con mayor facilidad.

En la figura 3.22 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en las tablas 3.20, 3.21 y 3.22 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos para los tres condiciones posibles: dos salidas abiertas, salida posterior cerrada y salida lateral cerrada respectivamente.



**Figura 3.22** Elementos del sistema de escape con doble salida en la parte posterior abajo y después del silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN - DOS SALIDA ABIERTAS				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	339.7	77.9	0.25	1.95
3	241.7	77.9	0.25	1.39
5	229	77.9	0.25	1.33
7	276.4	77.9	0.25	1.61
9	604.5	77.9	0.25	3.55
11	336.7	77.9	0.25	1.98
13	178.7	77.9	0.25	1.05
15	68.1	77.9	0.25	0.42
17	799.2	77.9	0.25	5.02
18	300	77.9	0.25	0.59
20	354.2	77.9	0.25	0.45

22	1878.8	77.9	0.25	2.42		
24	1402	77.9	0.25	1.81		
26	1242	77.9	0.25	1.61		
28	194.5	77.9	0.25	0.25		
<b>ELEMENTOS TIPO CODO</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	4	1.922	77.9	0.25	0	
4	90	1.577	77.9	0.25	6.57	
6	25	1.283	77.9	0.25	1.77	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.70	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.41	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.41	
16	26	---	77.9	0.25	3.00	
21	20	---	77.9	0.25	0.40	
23	16	---	77.9	0.25	0.30	
25	45	---	77.9	0.25	2.06	
27	39	---	77.9	0.25	1.54	
<b>CONECTOR DE TUBERÍA EN FORMA DE T</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	DIAMETRO TUBERIA PRINCIPAL (mm)	DIAMETRO TUBERÍA SECUNDARIA (mm)	$\Theta$ (grados)	CAIDA DE PRESION (mbar)		
19	7.79	7.79	60	1-2	1.18	
				1-3	9.56	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTR AD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=2.05 (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	33.84
PÉRDIDA A LA SALIDA ATRÁS					3.47	
PÈRDIDA A LA SALIDA DESPUÈS DEL SILENCIADOR					5.39	
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN					82.56	

**Tabla 3.20** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape doble con salida en la parte posterior abierta y salida después del silenciador abierta para el bus con chasis

Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN - SALIDA POSTERIOR CERRADA					
ELEMENTOS TIPO TUBO					
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	339.7	77.9	0.25	1.92	
3	241.7	77.9	0.25	1.37	
5	229	77.9	0.25	1.31	
7	276.4	77.9	0.25	1.59	
9	604.5	77.9	0.25	3.49	
11	336.7	77.9	0.25	1.95	
13	178.7	77.9	0.25	1.04	
15	68.1	77.9	0.25	0.41	
17	799.2	77.9	0.25	4.92	
18	300	77.9	0.25	1.88	
20	354.2	77.9	0.25	0	
22	1878.8	77.9	0.25	0	
24	1402	77.9	0.25	0	
26	1242	77.9	0.25	0	
28	194.5	77.9	0.25	0	
ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/ $D_1$	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	4	1.922	77.9	0.25	0
4	90	1.577	77.9	0.25	6.44
6	25	1.283	77.9	0.25	1.73
8	24	1.283	77.9	0.25	1.67
10	20	1.283	77.9	0.25	1.38
12	20	1.283	77.9	0.25	1.39
16	26	---	77.9	0.25	2.93
21	20	---	77.9	0.25	0
23	16	---	77.9	0.25	0
25	45	---	77.9	0.25	0
27	39	---	77.9	0.25	0
CONECTOR DE TUBERÍA EN FORMA DE T					
NÚMERO DE ELEMENTO	DIAMETRO TUBERIA PRINCIPAL (mm)	DIAMETRO TUBERÍA SECUNDARIA (mm)	$\Theta$ (grados)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
19	7.79	7.79	60	1-2	6.09
				1-3	11.76

SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTR AD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION K=2.05 (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	33.27
PÉRDIDA A LA SALIDA ATRÁS						0
PÈRDIDA A LA SALIDA DESPUÉS DEL SILENCIADOR						17.51
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN						98.03

**Tabla 3.21** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape doble con salida en la parte posterior cerrada y salida después del silenciador abierta para el bus con chasis

Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN - SALIDA DESPUÉS DEL SILENCIADOR CERRADA					
ELEMENTOS TIPO TUBO					
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	339.7	77.9	0.25	1.84	
3	241.7	77.9	0.25	1.31	
5	229	77.9	0.25	1.25	
7	276.4	77.9	0.25	1.52	
9	604.5	77.9	0.25	3.34	
11	336.7	77.9	0.25	1.87	
13	178.7	77.9	0.25	0.99	
15	68.1	77.9	0.25	0.39	
17	799.2	77.9	0.25	4.65	
18	300	77.9	0.25	0	
20	354.2	77.9	0.25	2.07	
22	1878.8	77.9	0.25	11.14	
24	1402	77.9	0.25	8.44	
26	1242	77.9	0.25	7.68	
28	194.5	77.9	0.25	1.22	
ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	Θ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION

						(mbar)
2	4	1.922	77.9	0.25		0
4	90	1.577	77.9	0.25		6.20
6	25	1.283	77.9	0.25		1.67
8	24	1.283	77.9	0.25		1.60
10	20	1.283	77.9	0.25		1.32
12	20	1.283	77.9	0.25		1.33
16	26	---	77.9	0.25		2.78
21	20	---	77.9	0.25		1.76
23	16	---	77.9	0.25		1.32
25	45	---	77.9	0.25		9.28
27	39	---	77.9	0.25		7.08
<b>CONECTOR DE TUBERÍA EN FORMA DE T</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	DIAMETRO TUBERIA PRINCIPAL (mm)	DIAMETRO TUBERÍA SECUNDARIA (mm)	∅ (grados)	CAIDA DE PRESION (mbar)		
19	7.79	7.79	60	1-2	1.62	1-3 18.35
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTR AD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION K=2.05 (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	31.83
PÉRDIDA A LA SALIDA ATRÁS						17.53
PÉRDIDA A LA SALIDA DESPUÉS DEL SILENCIADOR						0
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN						133.18

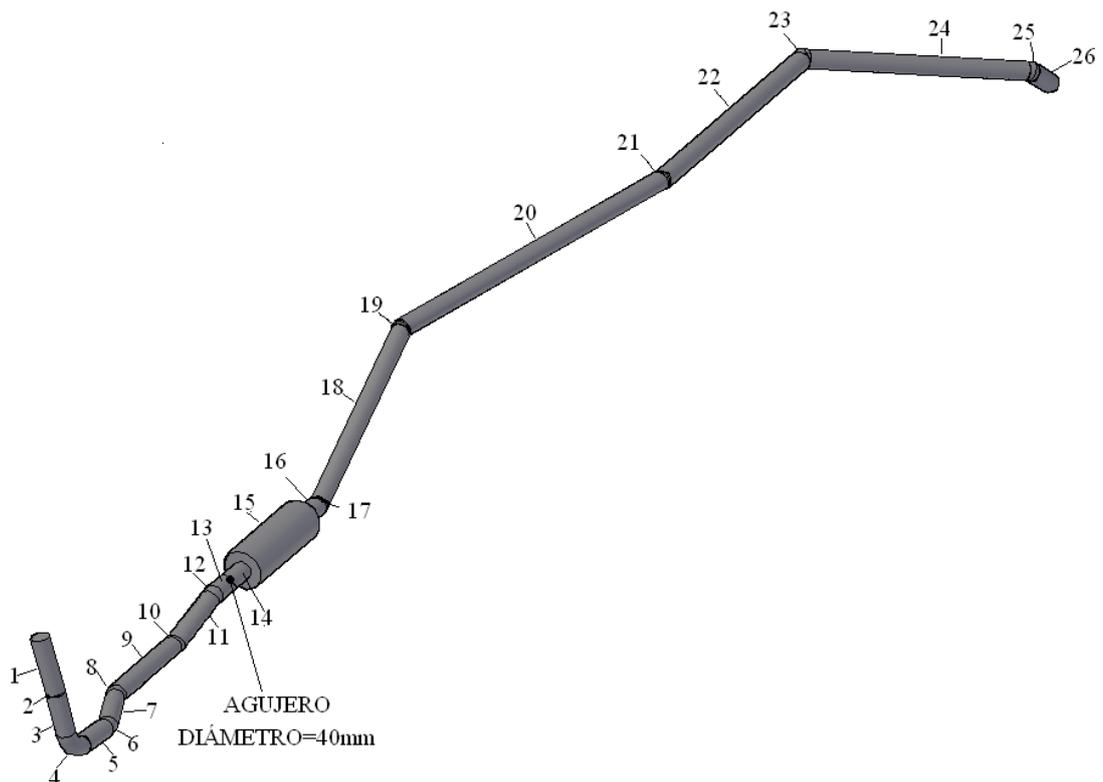
**Tabla 3.22** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape doble con salida en la parte posterior abierta y salida después del silenciador cerrada para el bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

### 3.10.4.6. DETERMINACIÓN DE LA CONTRAPRESIÓN EN UN SISTEMA DE ESCAPE CON AGUJERO ANTES DEL SILENCIADOR DEL BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR-32M

Es muy frecuente la realización de agujeros antes del silenciador en los buses de transporte masivo de pasajeros ya que los dueños de los buses quieren lograr que los gases de escape salgan con mayor facilidad. El inconveniente con estos agujeros es que al estar colocados antes del silenciador no permiten la reducción del ruido, además, los gases contaminantes no son evacuados correctamente ingresando en el habitáculo por la parte baja siendo esto muy peligroso para la salud de los pasajeros.

En la figura 3.23 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.23 se presenta los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos al realizar un agujero de 40mm de diámetro.



**Figura 3.23** Elementos de un sistema de escape con agujero antes del silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

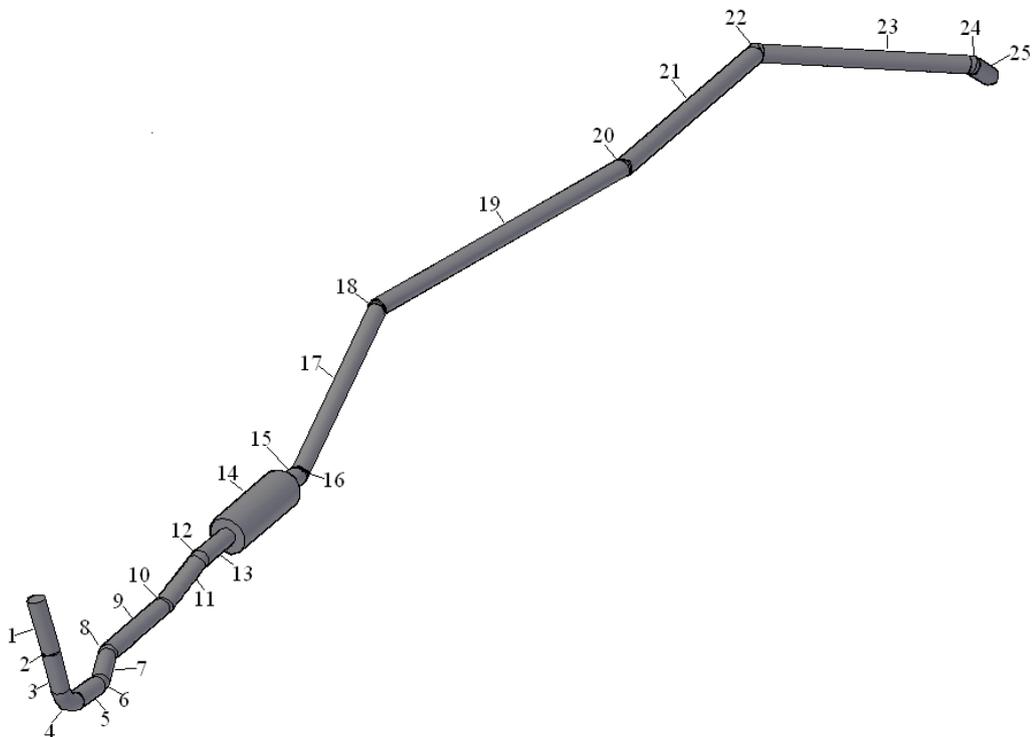
CAIDA DE PRESIÓN						
ELEMENTOS TIPO TUBO						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)		CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	339.7	77.9	0.25		2.00	
3	241.7	77.9	0.25		1.43	
5	229	77.9	0.25		1.37	
7	276.4	77.9	0.25		1.66	
9	604.5	77.9	0.25		3.66	
11	336.7	77.9	0.25		2.05	
13	78.7	77.9	0.25		0.48	
14	100	77.9	0.25		0.22	
16	168.1	77.9	0.25		0.37	
18	1153.5	77.9	0.25		2.60	
10	1878.8	77.9	0.25		4.27	
22	1402	77.9	0.25		3.21	
24	1242	77.9	0.25		2.88	
26	194.5	77.9	0.25		0.45	
ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/ $D_1$	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	4	1.922	77.9	0.25	0	
4	90	1.577	77.9	0.25	6.64	
6	25	1.283	77.9	0.25	1.79	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.72	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.43	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.43	
17	26	---	77.9	0.25	1.08	
19	20	---	77.9	0.25	0.70	
21	16	---	77.9	0.25	0.50	
23	45	---	77.9	0.25	3.62	
25	39	---	77.9	0.25	2.65	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_1$ ENTRAD (mm)	$D_1$ SILENC. (mm)	$D_1$ SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=2.05 (mbar)
115	600	77.9	247.4	77.9	0.25	12.24
PÉRDIDA A LA SALIDA ATRÁS					6.14	
PÉRDIDA A LA SALIDA EN EL AGUJERO					41.00	

**Tabla 3.23** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con agujero antes del silenciador para el bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

### 3.10.4.7. DETERMINACIÓN DE LA CONTRAPRESIÓN EN UN SISTEMA DE ESCAPE CON CONDUCTO DE MAYOR DIÁMETRO DESPUÉS DEL SILENCIADOR DE UN BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR-32M

La modificación del diámetro del tubo de escape después del silenciador es una medida muy común realizada en los buses de la ciudad de Cuenca, sobre todo en el chasis Chevrolet FTR-32M, a continuación se estudiará cual es la influencia de la modificación del diámetro del conducto en la contrapresión producida. La figura 3.24 muestra los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.24 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.



**Figura 3.24** Elementos de un sistema de escape con conducto de mayor diámetro después del silenciador para un bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN						
ELEMENTOS TIPO TUBO						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)		ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	339.7	77.9		0.25	1.95	
3	241.7	77.9		0.25	1.39	
5	229	77.9		0.25	1.33	
7	276.4	77.9		0.25	1.61	
9	604.5	77.9		0.25	3.55	
11	336.7	77.9		0.25	1.98	
13	178.7	77.9		0.25	1.05	
15	68.1	97.6		0.25	0.13	
17	1153.5	97.6		0.25	2.21	
19	1878.8	97.6		0.25	3.62	
21	1402	97.6		0.25	2.72	
23	1242	97.6		0.25	2.43	
25	194.5	97.6		0.25	0.38	
ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	Θ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	4	1.922	77.9	0.25	0	
4	90	1.577	77.9	0.25	6.50	
6	25	1.283	77.9	0.25	1.75	
8	24	1.283	77.9	0.25	1.68	
10	20	1.283	77.9	0.25	1.39	
12	20	1.283	77.9	0.25	1.40	
16	26	---	97.6	0.25	1.15	
18	20	---	97.6	0.25	0.73	
20	16	---	97.6	0.25	0.54	
22	45	---	97.6	0.25	3.78	
24	39	---	97.6	0.25	2.81	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION K=2.05 (mbar)
14	600	77.9	247.4	77.9	0.25	33.83
PÉRDIDA A LA SALIDA						7.09
CAIDA DE PRESION TOTAL						87.11

**Tabla 3.24** Cálculo de la contrapresión en un sistema de escape con conducto de mayor diámetro después del silenciador de un bus con chasis Chevrolet FTR-32M

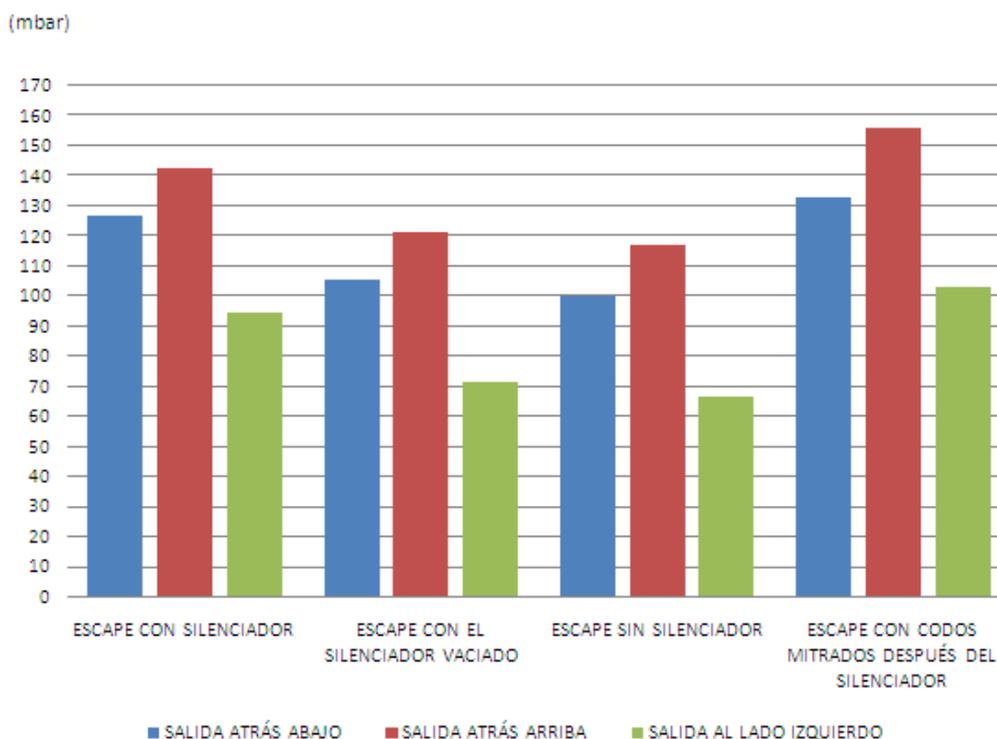
**Fuente:** El autor

### 3.10.4.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se realiza un análisis detallado de la influencia de la contrapresión en cada uno de los sistemas de escape estudiados para el chasis Chevrolet FTR-32M.

#### 3.10.4.8.1. VALORES DE CONTRAPRESIÓN DE LAS TRES DISPOSICIONES DE SISTEMAS DE ESCAPE

La gráfica 3.3 muestra los valores de contrapresión de las tres disposiciones de sistemas de escape de los buses con chasis Chevrolet FTR-32M con silenciador, con silenciador vaciado, sin silenciador y con codos mitrados después del silenciador.



**Gráfica 3.3** Valores de contrapresión para los diferentes disposiciones de sistemas de escape de los buses con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

El valor más alto de contrapresión se produce cuando se utilizan sistemas de escape con codos mitrados, para las tres configuraciones básicas se puede ver que este tipo de diseño produce valores de contrapresión muy elevados que están por encima de los 100mbar.

El vaciado del silenciador origina una reducción de la contrapresión en aproximadamente 22mbar, esto es ocasionalmente realizado por los dueños de los buses para facilitar el flujo de los gases a través del sistema de escape.

La eliminación del silenciador que es mucho menos común debido a la revisión frecuente de las unidades reduce la contrapresión en unos 32mbar, los 10 mbar de diferencia con la caída de presión originada por un silenciador vaciado se debe a la pérdida de energía por dilatación súbita a la entrada y pérdida de energía por contracción súbita a la salida. La pérdida de energía por fricción en las paredes del silenciador es despreciable ya que es mucho menor a un milibar.

En lo concerniente a la posición de la salida del sistema de escape, si se analiza el peor de los casos que es el de codos mitrados después del silenciador, existe un incremento del 17.26% en la contrapresión del sistema de escape con salida en la parte de atrás arriba en relación con el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo. Además, existe una disminución del 22.41% en la contrapresión del sistema de escape con salida lateral en relación con el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo. Al comparar el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda se ve que éste último presenta un incremento del 51.14% en la contrapresión.

El manual de construcción de carrocerías para el Chevrolet FTR-32M<sup>17</sup> no especifica valores máximos de contrapresión, la información indicada ahí sugiere que el chasis no está diseñado para sistemas de escape colocados en la parte posterior sino en la parte lateral derecha con salida vertical u horizontal.

---

<sup>17</sup> ISUZU MOTORS LIMITED, *BODY BUILDERS MANUAL FOR FRONT ENGINE BUSES FSR/FTR*, 1999.

Si se asume que el valor máximo de contrapresión permisible es de 100mbar, que es un valor comúnmente aceptado por varios fabricantes de motores diesel, se tienen tres sistemas que están debajo de ese rango y nueve que lo superan.

Los sistemas de escape con valores de contrapresión muy por encima de 100mbar generarán problemas en el turbocargador disminuyendo la cantidad de aire enviada a la admisión originando un aumento en la creación de hollín, disminución en la potencia del motor y un aumento en el consumo de combustible.

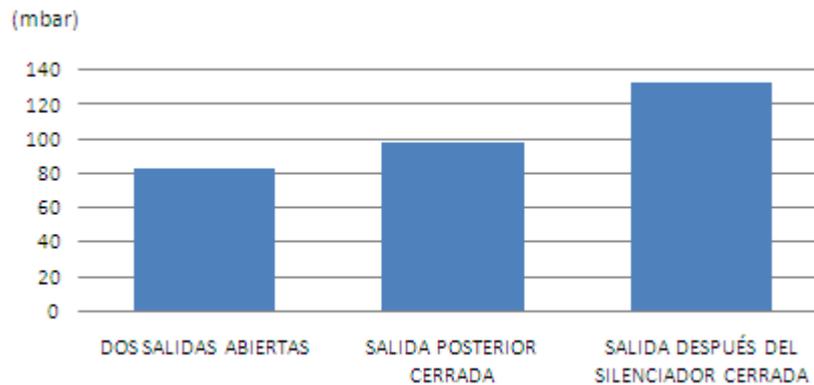
Utilizando la información estudiada en el capítulo uno que indica que por cada 66.6mbar de contrapresión existe un incremento en el consumo de combustible del 1% y una disminución de la potencia en 1% y tomando como referencia una presión de 100mbar, se puede observar que el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con codos mitrados después del silenciador que es el de mayor contrapresión tendrá una disminución del 0.84% en la potencia del motor y un aumento en el consumo de combustible del 0.84%. El sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda sin silenciador que es el de menor contrapresión al ser comparado con el sistema de escape antes mencionado tendrá un aumento en la potencia del motor del 1.34% y una disminución en el consumo de combustible del 1.34%.

El sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con codos mitrados después del silenciador tiene una disminución del 0.5% en la potencia del motor y un incremento del 0.5% en el consumo de combustible.

La temperatura de los componentes del motor indicados en la figura 1.40, aumenta para valores altos de contrapresión disminuyendo la vida útil de los mismos, los sistemas de escape con salida en la parte posterior abajo y arriba son los más afectados.

### 3.10.4.8.2. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA EL SISTEMA DE ESCAPE CON DOBLE SALIDA: EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO Y DESPUÉS DEL SILENCIADOR DEL BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR-32M

La gráfica 3.4 muestra los valores de contrapresión para el sistema de escape doble de los buses con chasis Chevrolet FTR-32M en las tres condiciones de funcionamiento posibles:



**Gráfica 3.4** Valores de contrapresión para el sistema de escape con doble salida: en la parte posterior y después del silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

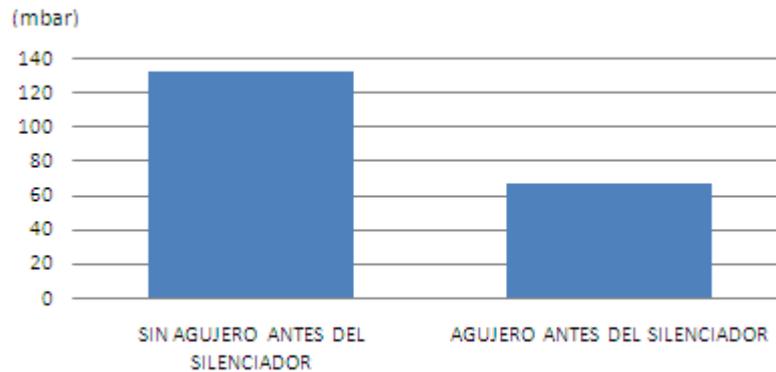
**Fuente:** El autor

El valor más alto de contrapresión se produce cuando se cierra la salida después del silenciador siendo un valor muy similar al obtenido con el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo con codos mitrados. El valor más bajo de contrapresión se produce cuando las dos salidas se abren, esto se debe a que la sección transversal para el flujo de los gases aumenta, disminuyendo la velocidad y por ende las pérdidas de energía por fricción.

El problema con la salida después del silenciador es que ésta no está dirigida hacia afuera de la carrocería, originándose la intrusión de contaminantes hacia el habitáculo siendo esto muy peligroso.

### 3.10.4.8.3. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA EL SISTEMA DE ESCAPE CON AGUJERO ANTES DEL SILENCIADOR DEL BUS CON CHASIS CHEVROLET FTR-32M

La gráfica 3.5 muestra una comparación entre los valores de contrapresión para un sistema de escape sin agujero antes del silenciador y otro sistema de escape con agujero antes del silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M.



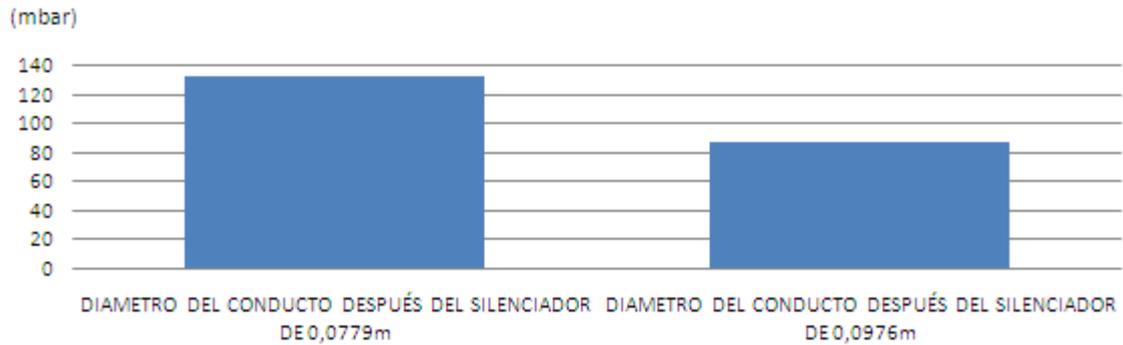
**Gráfica 3.5** Valores de contrapresión para un sistema de escape sin agujero antes del silenciador y un sistema de escape con agujero antes del silenciador del bus con chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** El autor

La diferencia de contrapresión entre un sistema de escape con agujero y otro sistema de escape sin agujero es de 66.29mbar. El sistema de escape con agujero disminuye el consumo de combustible en un 1% y aumenta la potencia del motor en un 1%.

### 3.10.4.8.4. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA UN SISTEMA DE ESCAPE CON CONDUCTO DE MAYOR DIÁMETRO DESPUÉS DEL SILENCIADOR.

La gráfica 3.6 muestra una comparación entre los valores de contrapresión para un sistema de escape con conducto de diámetro nominal y otro sistema de escape con conducto de mayor diámetro después del silenciador.



**Gráfica 3.6** Valores de contrapresión para un sistema de escape con diámetro del conducto después del silenciador nominal y otro sistema de escape con diámetro del conducto después del silenciador incrementado

**Fuente:** El autor

La modificación del diámetro del conducto de escape después del silenciador provoca una disminución de la contrapresión de 45.91mbar, representando un aumento de potencia de 0.68% y una disminución en el consumo de combustible de 0.68%.

#### 3.10.4.8.5. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA DIFERENTES FORMAS Y ÁNGULOS DE CODO POSTERIOR

El codo colocado en la parte final en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda permite dirigir los gases de escape hacia el suelo, de manera que no incidan de manera directa sobre los vehículos o las personas que estén ubicados en la parte posterior. La tabla 3.25 presenta los valores de contrapresión para ángulos de 15°-90° de codos con  $R/D_I=2.5$  y codos con  $R/D_I=1$ .

Si se compara un codo con  $R/D_I=2.5$  y un codo con  $R/D_I=1$  de 60°, el segundo ocasionará un incremento en la contrapresión de 1.55mbar.

CONTRAPRESIÓN EN CODOS						
Caída de presión en mbar						
	15°	30°	45°	60°	75°	90°
CODO R/D <sub>1</sub> =2.5	1.50	2.72	3.66	4.49	5.33	6.11
CODO R/D <sub>1</sub> =1	1.02	2.33	4.07	6.04	8.08	9.74

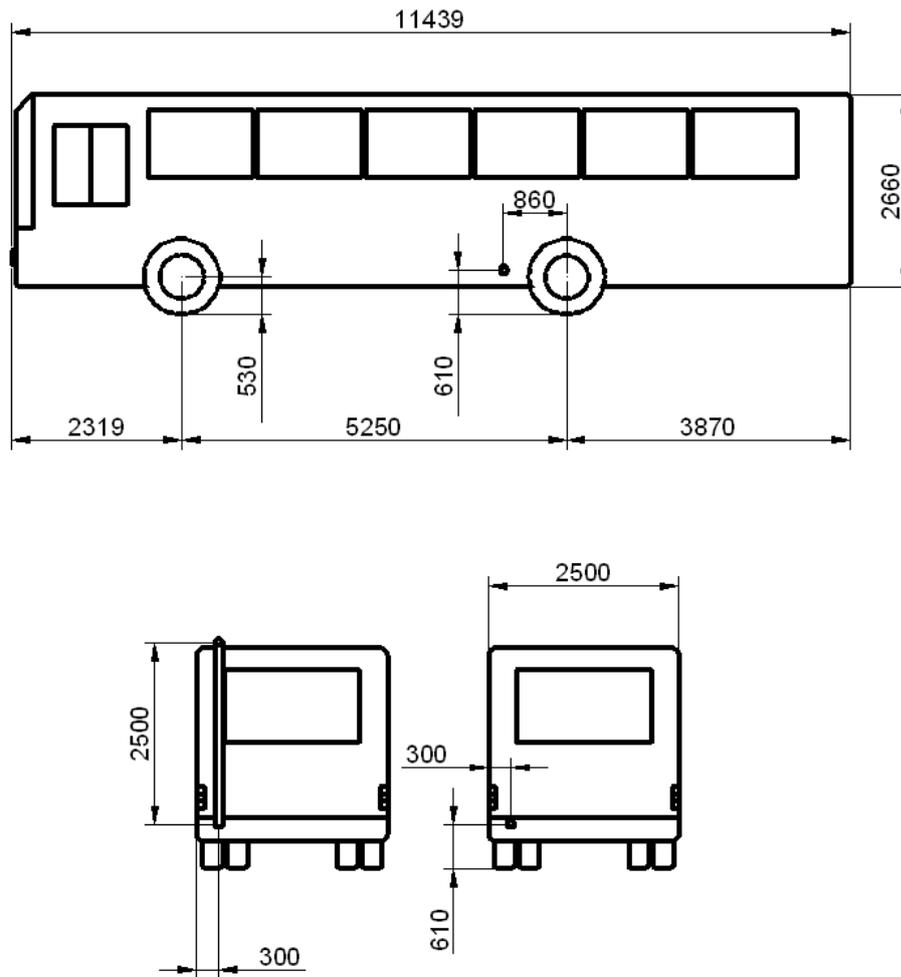
**Tabla 3.25** Influencia de la geometría del codo posterior en la contrapresión.

**Fuente:** El autor

### 3.10.5. CONTRAPRESIÓN EN EL BUS CON CHASIS MERCEDES BENZ OF1721

#### 3.10.5.1. DIMENSIONES DEL BUS MERCEDES BENZ OF 1721

Para el cálculo de la contrapresión en el sistema de escape de los buses con chasis Mercedes-Benz OF1721/52 se utilizaron las medidas indicadas en la figura 3.25.



**Figura 3.25** Dimensiones del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721/52

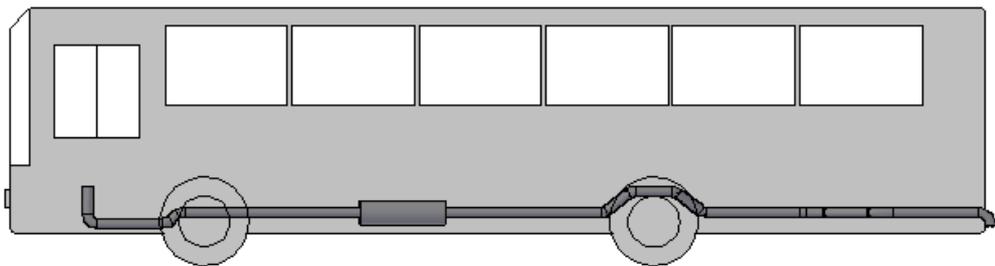
**Fuente:** El autor

### 3.10.5.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO A LA IZQUIERDA

El cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda se realizará en cuatro sistemas de escape diferentes:

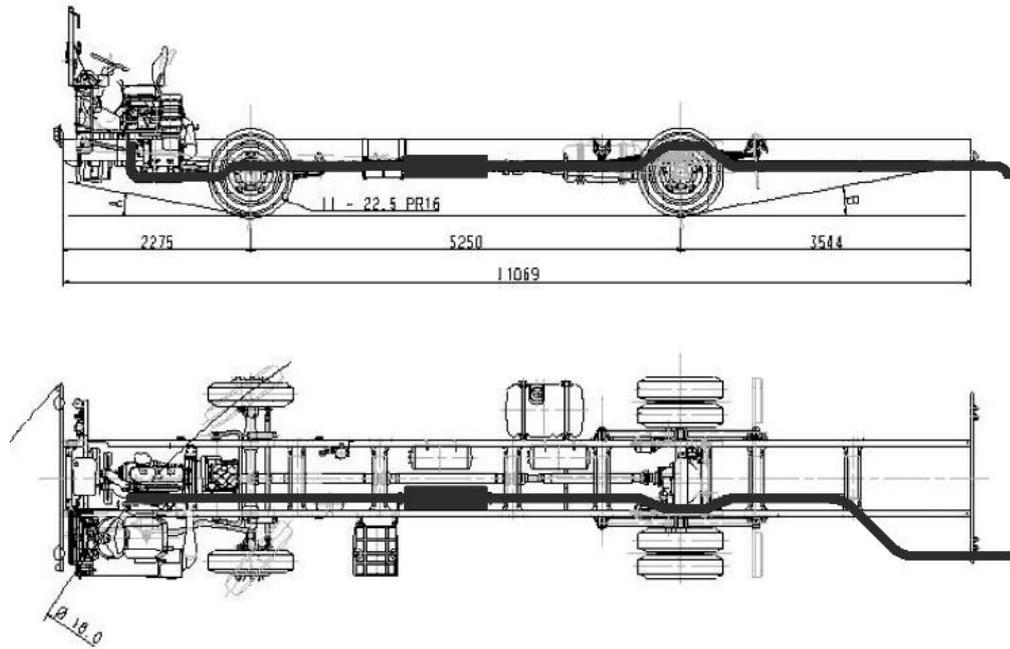
- Sistema de escape con silenciador
- Sistema de escape con silenciador vaciado
- Sistema de escape sin silenciador
- Sistema de escape con codos mitrados después del silenciador.

Las figuras 3.26 y 3.27 muestran el emplazamiento de este sistema de escape en un bus y en un chasis respectivamente.



**Figura 3.26** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda en un bus con chasis Mercedes-Benz OF1721/52

**Fuente:** El autor

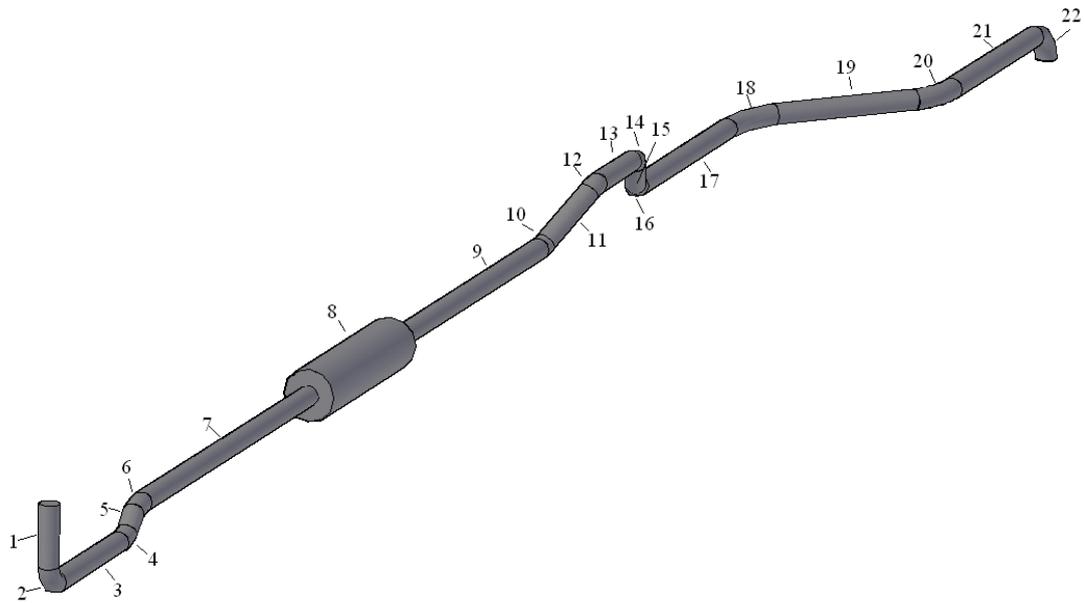


**Figura 3.27** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda en el chasis Mercedes-Benz OF1721/52

**Fuente:** Imagen del chasis Mercedes-Benz OF1721/52 modificada por el autor

#### 3.10.5.2.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR

En la figura 3.28 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.26 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos para cada elemento. La caída de presión total obtenida al final es igual a la contrapresión generada por este sistema de escape.



**Figura 3.28** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	325	97.6	0.25	0.48
3	930	97.6	0.25	1.38
5	117.3	97.6	0.25	0.17
7	1740	97.6	0.25	2.59
9	1514.5	97.6	0.25	2.36
11	354.1	97.6	0.25	0.55
13	418.1	97.6	0.25	0.65
15	348.7	97.6	0.25	0.54
17	1163.3	97.6	0.25	1.83
19	734	97.6	0.25	1.16
21	930	97.6	0.25	1.47

ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	90	2.433	97.6	0.25	1.76	
4	25	2.433	97.6	0.25	0.68	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.69	
10	40	1.024	97.6	0.25	1.03	
12	29	1.536	97.6	0.25	0.72	
14	29	1.536	97.6	0.25	0.72	
16	43	1.024	97.6	0.25	1.15	
18	36	5.647	97.6	0.25	1.19	
20	41	4.045	97.6	0.25	1.16	
22	90	1.536	97.6	0.25	2.26	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=4.754 (mbar)
8	1000	97.6	258.4	97.6	0.25	25.69
PERDIDA A LA SALIDA						5.69
CAIDA DE PRESION TOTAL CONTRAPRESIÓN						56.03

**Tabla 3.26** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

### 3.10.5.2.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO

En la figura 3.28 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.27 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

La caída de presión en el silenciador vaciado se calcula considerando la dilatación súbita a la entrada, la fricción en la tubería y la contracción súbita a la salida.

CAIDA DE PRESIÓN						
ELEMENTOS TIPO TUBO						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> (mm)		ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	325	97.6		0.25	0.49	
3	930	97.6		0.25	1.40	
5	117.3	97.6		0.25	0.17	
7	2040.6	97.6		0.25	3.10	
9	1814.5	97.6		0.25	2.80	
11	354.1	97.6		0.25	0.55	
13	418.1	97.6		0.25	0.65	
15	348.7	97.6		0.25	0.54	
17	1163.3	97.6		0.25	1.82	
19	734	97.6		0.25	1.15	
21	930	97.6		0.25	1.46	
ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	Θ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	90	2.433	97.6	0.25	1.82	
4	25	2.433	97.6	0.25	0.70	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.70	
10	40	1.024	97.6	0.25	1.04	
12	29	1.536	97.6	0.25	0.71	
14	29	1.536	97.6	0.25	0.71	
16	43	1.024	97.6	0.25	1.15	
18	36	5.647	97.6	0.25	1.18	
20	41	4.045	97.6	0.25	1.16	
22	90	1.536	97.6	0.25	2.24	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
8	1000	97.6	258.4	97.6	0.25	7.54
PERDIDA A LA SALIDA						5.71
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN						38.89

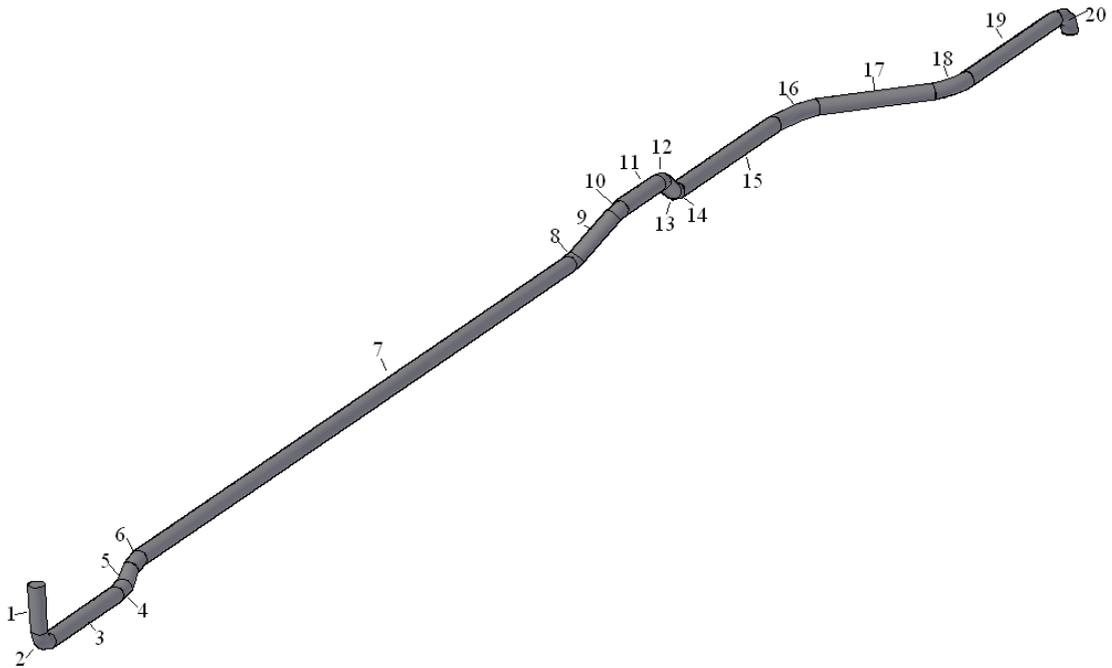
**Tabla 3.27** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con silenciador vaciado del bus con chasis Mercedes-

Benz OF1721

### 3.10.5.2.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR

En la figura 3.29 se muestran los elementos del sistema de escape analizado y en la tabla 3.28 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

El silenciador es reemplazado por un conducto de igual longitud.



**Figura 3.29** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda sin silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_I$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	325	97.6	0.25	0.49
3	930	97.6	0.25	1.42
5	117.3	97.6	0.25	0.18
7	4855.1	97.6	0.25	7.48
9	354.1	97.6	0.25	0.55

11	418.1	97.6	0.25	0.65	
13	348.7	97.6	0.25	0.54	
15	1163.3	97.6	0.25	1.82	
17	734	97.6	0.25	1.15	
19	930	97.6	0.25	1.46	
ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	90	2.433	97.6	0.25	1.83
4	25	2.433	97.6	0.25	0.71
6	25	2.433	97.6	0.25	0.71
8	40	1.024	97.6	0.25	1.04
10	29	1.536	97.6	0.25	0.71
12	29	1.536	97.6	0.25	0.71
14	43	1.024	97.6	0.25	1.15
16	36	5.647	97.6	0.25	1.18
18	41	4.045	97.6	0.25	1.16
20	90	1.536	97.6	0.25	2.24
PÉRDIDA A LA SALIDA					5.71
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN					32.9

**Tabla 3.28** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda sin silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz

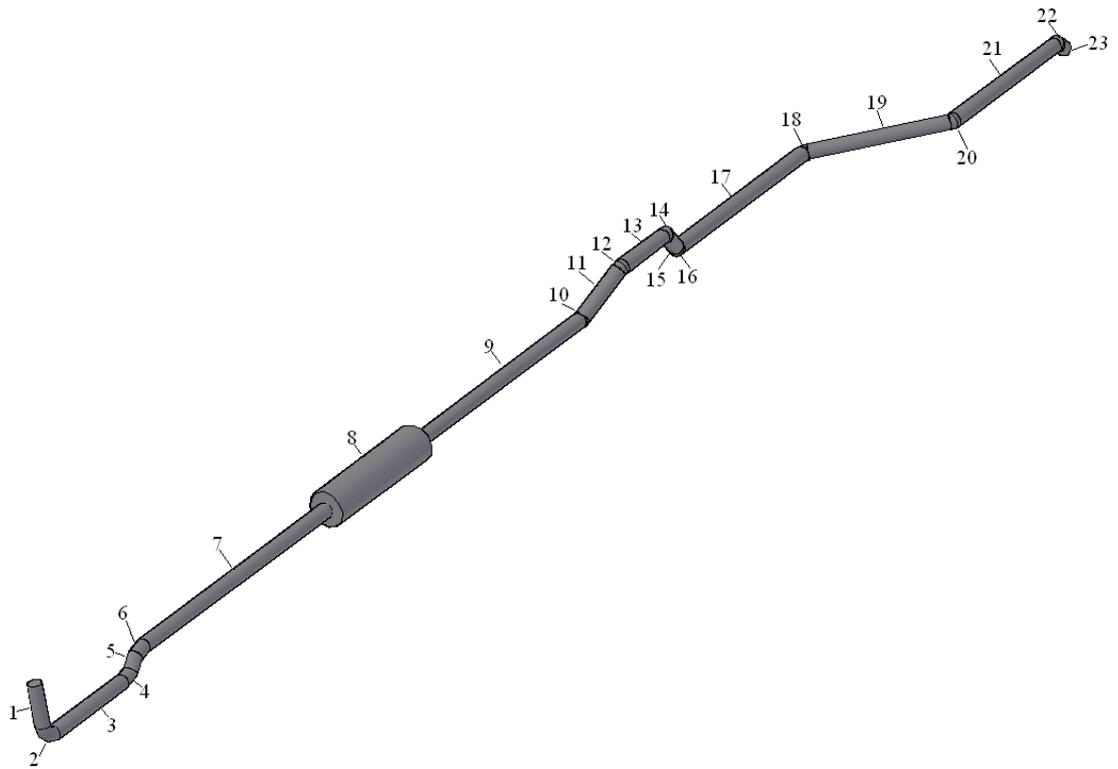
OF1721

**Fuente:** El autor

#### 3.10.5.2.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR

Este sistema de escape es el utilizado más comúnmente en la ciudad de Cuenca por el bus con chasis Mercedes-Benz OF1721, las empresas constructoras de carrocerías no realizan modificaciones antes del silenciador pero después de este construyen sistemas de escape con codos mitrados.

En la figura 3.30 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.29 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos.



**Figura 3.30** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	325	97.6	0.25	0.47
3	930	97.6	0.25	1.36
5	117.3	97.6	0.25	0.17
7	1740	97.6	0.25	2.56
9	1533.2	97.6	0.25	2.34
11	401.9	97.6	0.25	0.61
13	450.3	97.6	0.25	0.69
15	327.1	97.6	0.25	0.50

17	1385.8	97.6	0.25	2.16		
19	967	97.6	0.25	1.52		
21	1122	97.6	0.25	1.78		
23	167.5	97.6	0.25	0.26		
<b>ELEMENTOS TIPO CODO</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	90	2.433	97.6	0.25	1.74	
4	25	2.433	97.6	0.25	0.67	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.68	
10	40	---	97.6	0.25	2.32	
12	40	---	97.6	0.25	2.36	
14	50	---	97.6	0.25	2.55	
16	50	---	97.6	0.25	2.54	
18	45	---	97.6	0.25	3.06	
20	45	---	97.6	0.25	3.05	
22	45	---	97.6	0.25	3.10	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITU D (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD A (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALIDA (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=4.754 (mbar)
8	100mm	97.6	258.4	97.6	0.25	25.32
<b>PÉRDIDA A LA SALIDA</b>					5.69	
<b>CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN</b>					67.62	

**Tabla 3.29** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

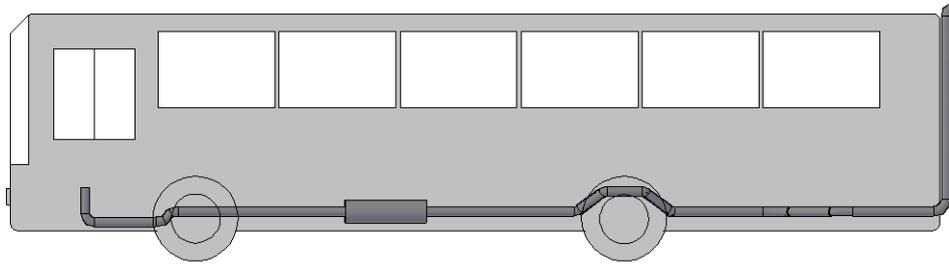
### 3.10.5.3. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE POSTERIOR ARRIBA A LA IZQUIERDA

El cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda se realizará en cuatro sistemas de escape diferentes:

- Sistema de escape con silenciador

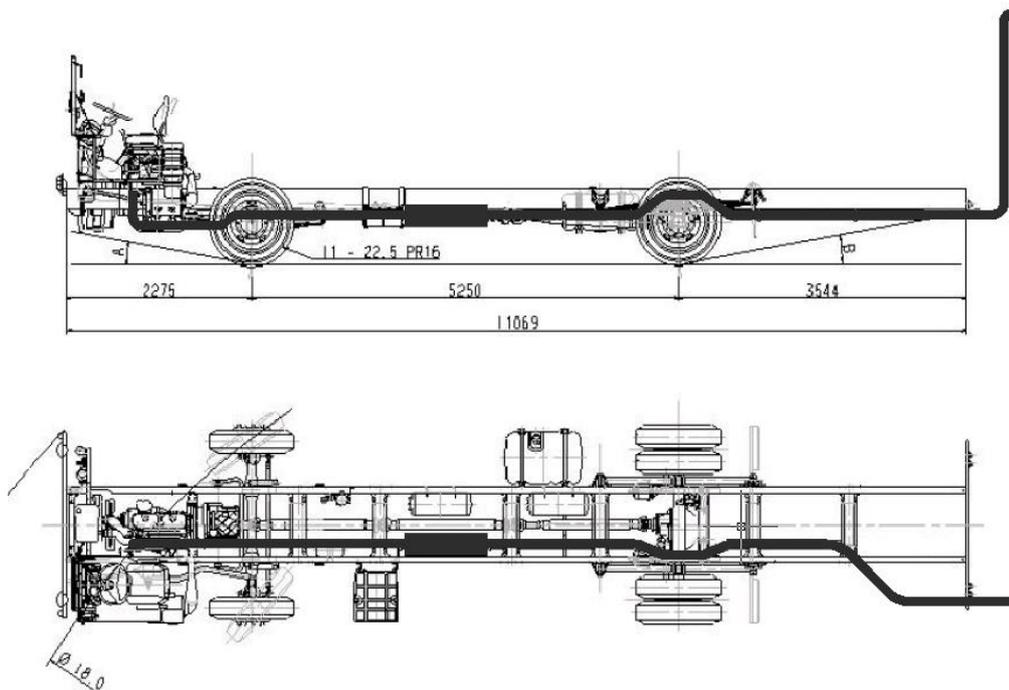
- Sistema de escape con silenciador vaciado
- Sistema de escape sin silenciador
- Sistema de escape con codos mitrados después del silenciador.

Las figuras 3.31 y 3.32 muestran el emplazamiento de este sistema de escape en un bus y en un chasis respectivamente.



**Figura 3.31** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda en un bus con chasis Mercedes-Benz OF1721/52

**Fuente:** El autor

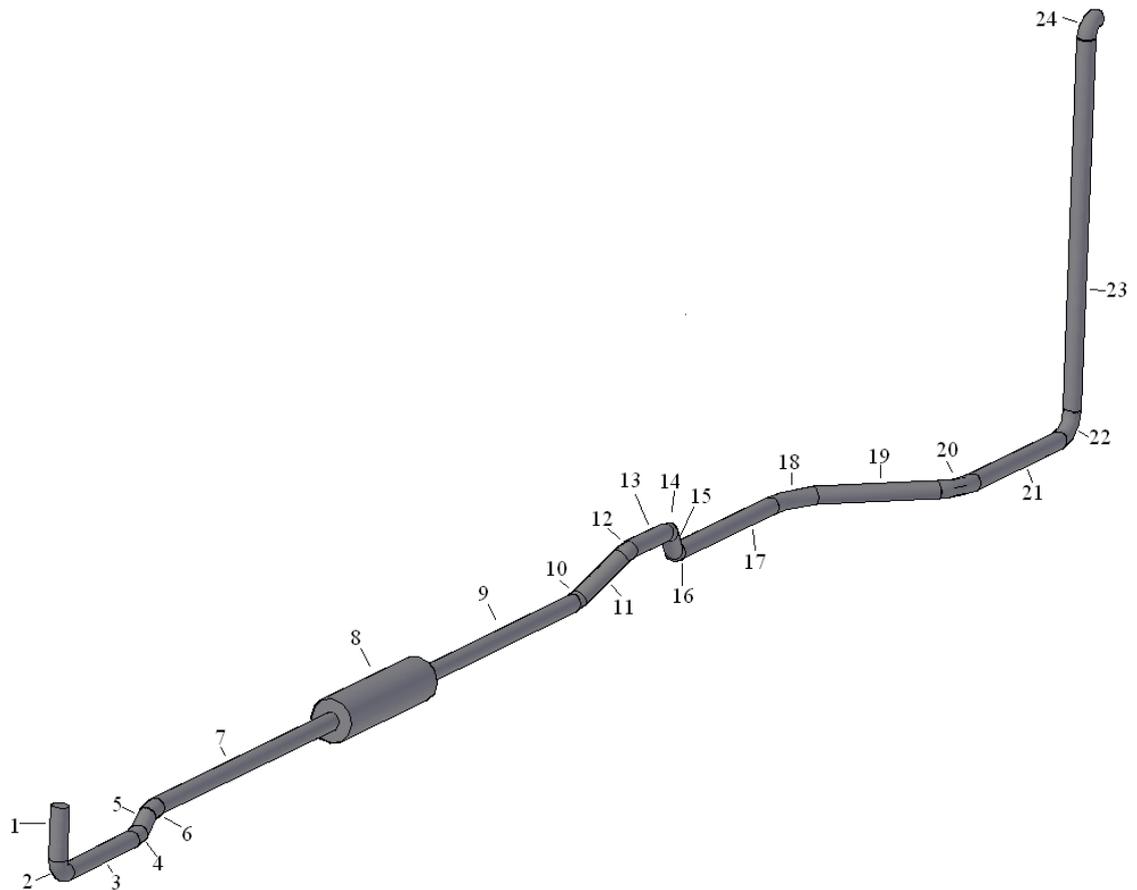


**Figura 3.32** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda en el chasis Mercedes-Benz OF1721/52

**Fuente:** Imagen del chasis Mercedes-Benz OF1721/52 modificada por el autor

### 3.10.5.3.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR

En la figura 3.33 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.30 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos para cada elemento. La caída de presión total obtenida al final es igual a la contrapresión generada por este sistema de escape.



**Figura 3.33** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN						
ELEMENTOS TIPO TUBO						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> (mm)		ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	325	97.6		0.25	0.48	
3	930	97.6		0.25	1.37	
5	117.3	97.6		0.25	0.17	
7	1740	97.6		0.25	2.59	
9	1514.5	97.6		0.25	2.35	
11	354.1	97.6		0.25	0.55	
13	418.1	97.6		0.25	0.65	
15	348.7	97.6		0.25	0.54	
17	1163.3	97.6		0.25	1.82	
19	734	97.6		0.25	1.15	
21	930	97.6		0.25	1.47	
23	2253.1	97.6		0.25	3.52	
ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	Θ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	90	2.433	97.6	0.25	1.74	
4	25	2.433	97.6	0.25	0.67	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.69	
10	40	1.024	97.6	0.25	1.02	
12	29	1.536	97.6	0.25	0.71	
14	29	1.536	97.6	0.25	0.72	
16	43	1.024	97.6	0.25	1.13	
18	36	5.647	97.6	0.25	1.19	
20	41	4.045	97.6	0.25	1.14	
22	90	1.536	97.6	0.25	2.21	
24	90	1.024	97.6	0.25	3.02	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION K=4.754 (mbar)
8	1000	97.6	258.4	97.6	0.25	25.62
PERDIDA A LA SALIDA						5.67

CAIDA DE PRESIÓN TOTAL = CONTRAPRESIÓN	62.31
----------------------------------------	-------

**Tabla 3.30** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz

OF1721

**Fuente:** El autor

### 3.10.5.3.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO

En la figura 3.33 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.31 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

La caída de presión en el silenciador vaciado se calcula considerando la dilatación súbita a la entrada, la fricción en la tubería y la contracción súbita a la salida.

CAIDA DE PRESIÓN					
ELEMENTOS TIPO TUBO					
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	325	97.6	0.25	0.48	
3	930	97.6	0.25	1.39	
5	117.3	97.6	0.25	0.17	
7	2040.6	97.6	0.25	3.07	
9	1814.5	97.6	0.25	2.78	
11	354.1	97.6	0.25	0.54	
13	418.1	97.6	0.25	0.64	
15	348.7	97.6	0.25	0.53	
17	1163.3	97.6	0.25	1.80	
19	734	97.6	0.25	1.14	
21	930	97.6	0.25	1.45	
23	2253.1	97.6	0.25	3.54	
ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/ $D_1$	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	90	2.433	97.6	0.25	1.80

4	25	2.433	97.6	0.25	0.69	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.69	
10	40	1.024	97.6	0.25	1.03	
12	29	1.536	97.6	0.25	0.70	
14	29	1.536	97.6	0.25	0.71	
16	43	1.024	97.6	0.25	1.14	
18	36	5.647	97.6	0.25	1.17	
20	41	4.045	97.6	0.25	1.15	
22	90	1.536	97.6	0.25	2.22	
24	90	1.024	97.6	0.25	2.96	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
8	1000	97.6	258.4	97.6	0.25	7.54
PERDIDA A LA SALIDA						5.71
CAIDA DE PRESIÓN TOTAL = CONTRAPRESIÓN						45.16

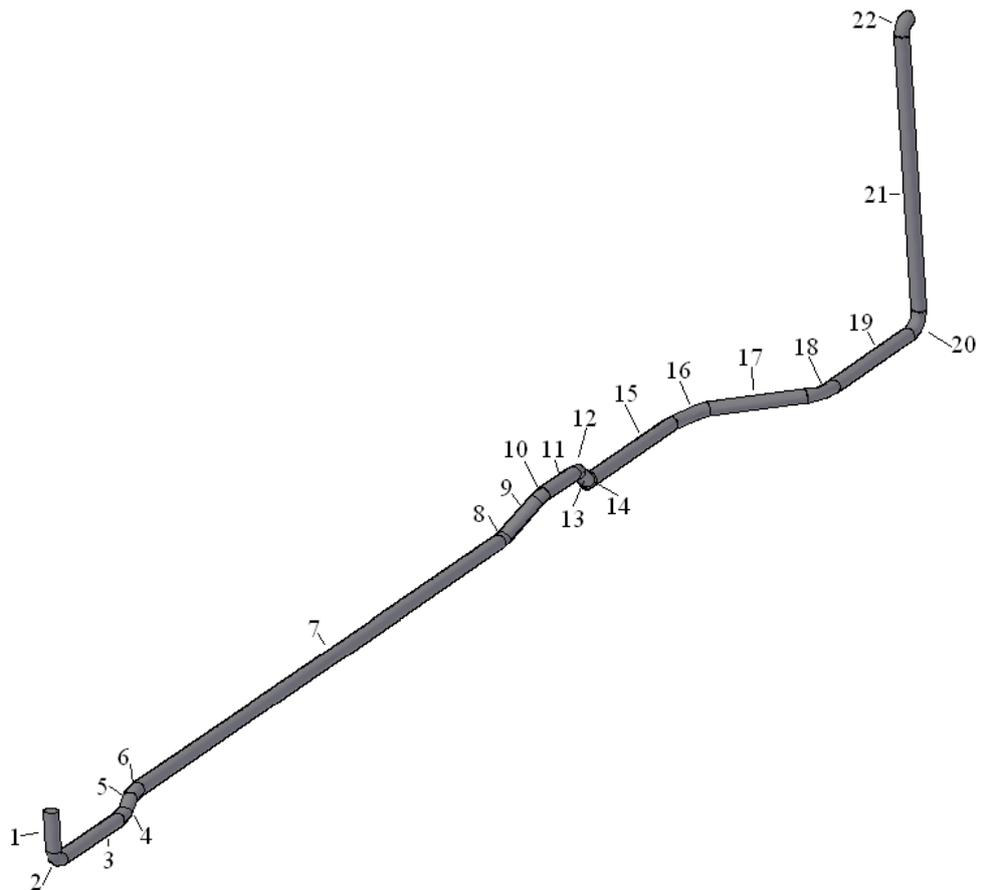
**Tabla 3.31** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con silenciador vaciado del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

### 3.10.5.3.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR

En la figura 3.34 se muestran los elementos del sistema de escape analizado y en la tabla 3.32 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

El silenciador es reemplazado por un conducto de igual longitud.



**Figura 3.34** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda sin silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	325	97.6	0.25	0.49
3	930	97.6	0.25	1.40
5	117.3	97.6	0.25	0.17
7	4855.1	97.6	0.25	7.41
9	1814.5	97.6	0.25	0.54
11	418.1	97.6	0.25	0.64
13	348.7	97.6	0.25	0.53
15	1163.3	97.6	0.25	1.80
17	734	97.6	0.25	1.14

19	930	97.6	0.25	1.45	
21	2253.1	97.6	0.25	3.54	
ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	$\epsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	90	2.433	97.6	0.25	1.81
4	25	2.433	97.6	0.25	0.7
6	25	2.433	97.6	0.25	0.7
8	40	1.024	97.6	0.25	1.03
10	29	1.536	97.6	0.25	0.70
12	29	1.536	97.6	0.25	0.71
14	43	1.024	97.6	0.25	1.14
16	36	5.647	97.6	0.25	1.17
18	41	4.045	97.6	0.25	1.15
20	90	1.536	97.6	0.25	2.22
22	90	1.024	97.6	0.25	2.96
PERDIDA A LA SALIDA					5.71
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN					39.23

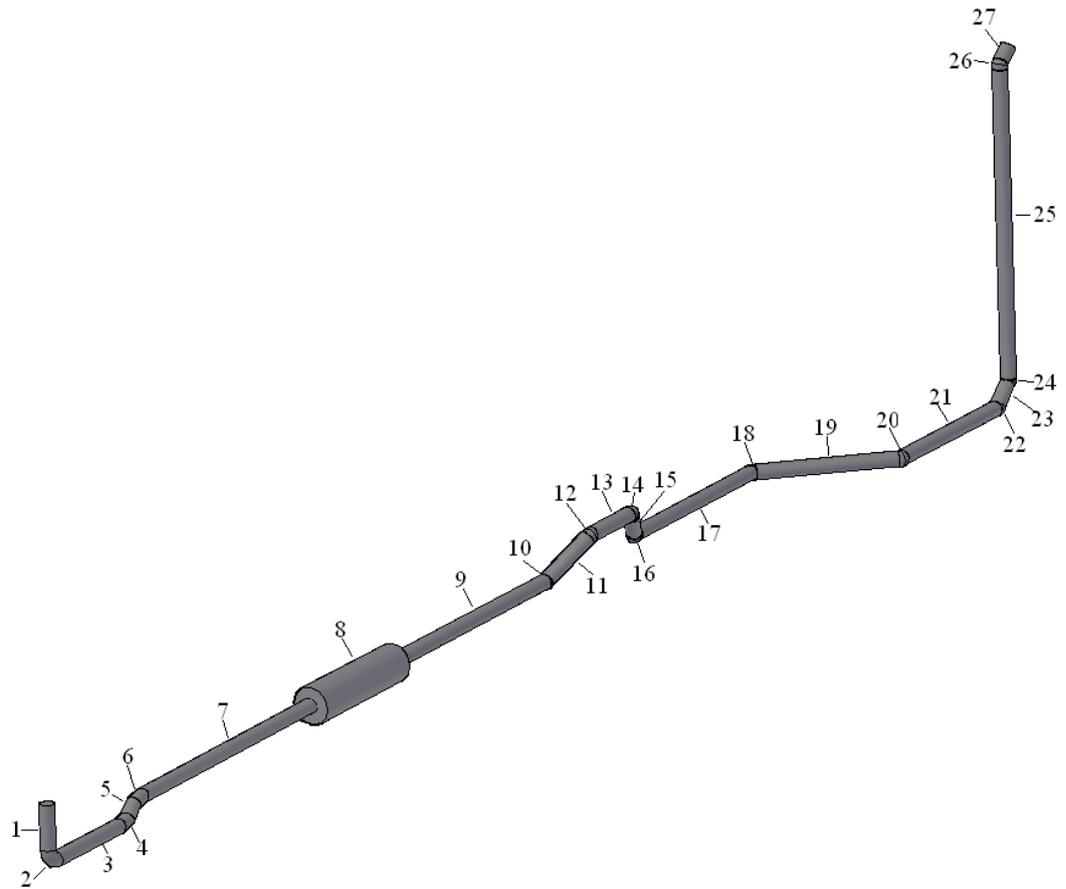
**Tabla 3.32** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda sin silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

#### 3.10.5.3.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR

Este sistema de escape es analizado debido a que las empresas constructoras de carrocerías no realizan modificaciones antes del silenciador pero después de este construyen sistemas de escape con codos mitrados.

En la figura 3.35 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.33 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos.



**Figura 3.35** Elementos del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_i$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	325	97.6	0.25	0.47
3	930	97.6	0.25	1.34
5	117.3	97.6	0.25	0.17
7	1740	97.6	0.25	2.53
9	1533.2	97.6	0.25	2.31
11	401.9	97.6	0.25	0.60

13	450.3	97.6	0.25	0.68		
15	327.1	97.6	0.25	0.50		
17	1385.8	97.6	0.25	2.13		
19	967	97.6	0.25	1.50		
21	1122	97.6	0.25	1.75		
23	170.7	97.6	0.25	0.26		
25	2217.11	97.6	0.25	3.51		
27	120.7	97.6	0.25	0.19		
ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	90	2.433	97.6	0.25	1.72	
4	25	2.433	97.6	0.25	0.66	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.67	
10	40	---	97.6	0.25	2.29	
12	40	---	97.6	0.25	2.33	
14	50	---	97.6	0.25	2.52	
16	50	---	97.6	0.25	2.51	
18	45	---	97.6	0.25	3.01	
20	45	---	97.6	0.25	3.00	
22	45	---	97.6	0.25	3.02	
24	45	---	97.6	0.25	3.04	
26	45	---	97.6	0.25	3.10	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRADA (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALIDA (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=4.754 (mbar)
8	100mm	97.6	258.4	97.6	0.25	25.05
PÉRDIDA A LA SALIDA					5.69	
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN					76.67	

**Tabla 3.33** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

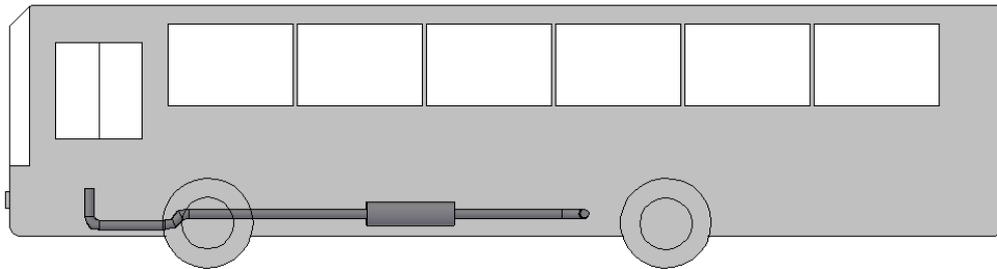
**Fuente:** El autor

#### 3.10.5.4. SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE LATERAL IZQUIERDA

El cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda se realizará en cuatro sistemas de escape diferentes:

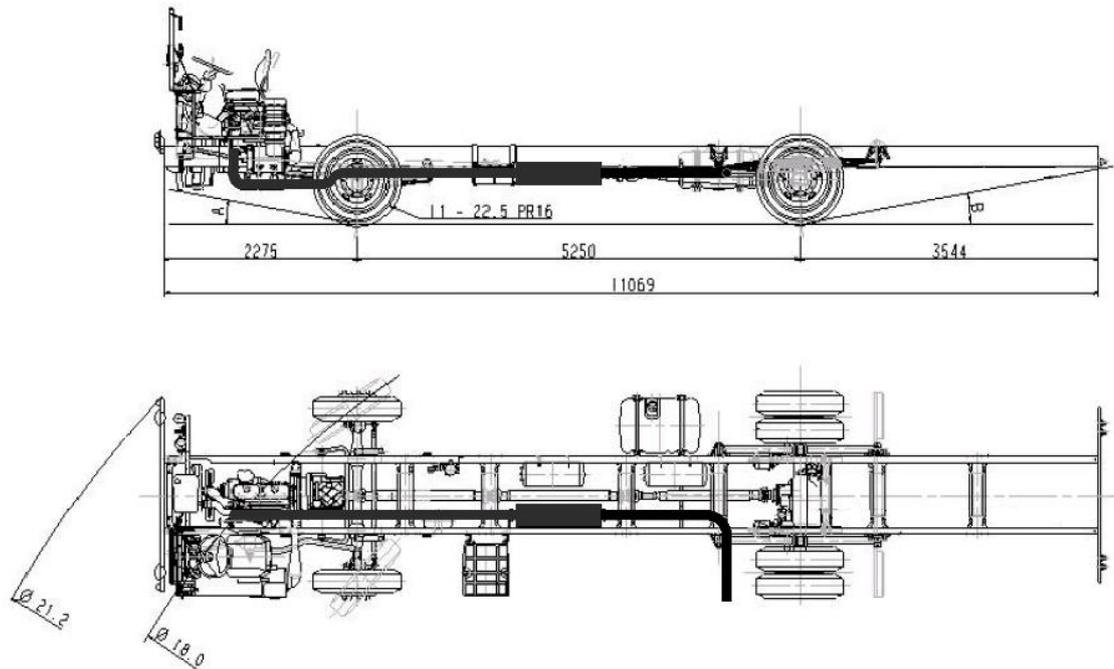
- Sistema de escape con silenciador
- Sistema de escape con silenciador vaciado
- Sistema de escape sin silenciador
- Sistema de escape con codos mitrados después del silenciador.

Las figuras 3.36 y 3.37 muestran el emplazamiento de este sistema de escape en un bus y en un chasis respectivamente.



**Figura 3.36** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda en un bus con chasis Mercedes-Benz OF1721/52

**Fuente:** El autor

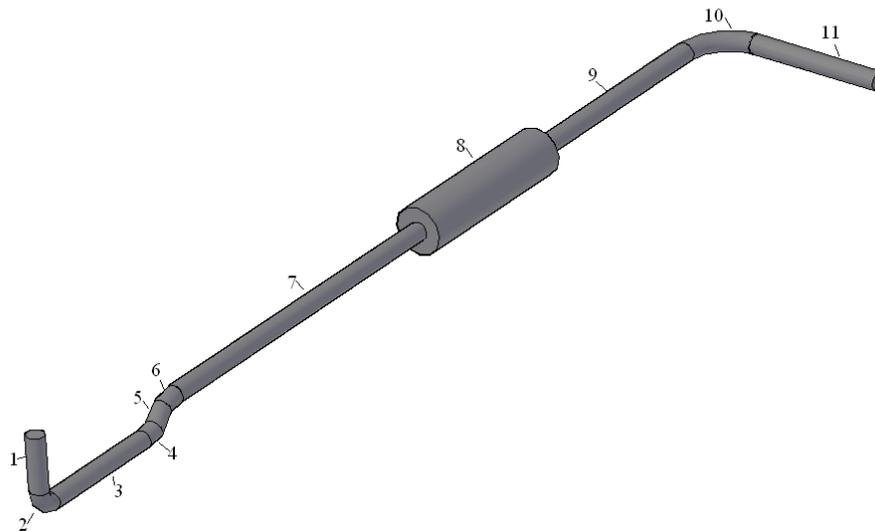


**Figura 3.37** Ubicación del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda en el chasis Mercedes-Benz OF1721/52

**Fuente:** Imagen del chasis Mercedes-Benz OF1721/52 modificada por el autor

#### 3.10.5.4.1. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR

En la figura 3.38 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.34 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos para cada elemento. La caída de presión total obtenida al final es igual a la contrapresión generada por este sistema de escape.



**Figura 3.38** Elementos del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN					
ELEMENTOS TIPO TUBO					
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_I$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	325	97.6	0.25	0.49	
3	930	97.6	0.25	1.41	
5	117.3	97.6	0.25	0.17	
7	1740.6	97.6	0.25	2.65	
9	939.4	97.6	0.25	1.50	
11	787.8	97.6	0.25	1.26	
ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/ $D_I$	$D_I$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	90	2.433	97.6	0.25	1.78
4	25	2.433	97.6	0.25	0.69

6	25	2.433	97.6	0.25	0.70	
10	90	2.561	97.6	0.25	2.40	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESION K=4.754 (mbar)
8	1000	97.6	258.4	97.6	0.25	26.27
PERDIDA A LA SALIDA						5.67
CAIDA DE PRESIÓN TOTAL = CONTRAPRESIÓN						45.05

**Tabla 3.34** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

#### 3.10.5.4.2. SISTEMA DE ESCAPE CON SILENCIADOR VACIADO

En la figura 3.38 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.35 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

La caída de presión en el silenciador vaciado se calcula considerando la dilatación súbita a la entrada, la fricción en la tubería y la contracción súbita a la salida.

<b>CAIDA DE PRESIÓN</b>				
<b>ELEMENTOS TIPO TUBO</b>				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	325	97.6	0.25	0.49
3	930	97.6	0.25	1.43
5	117.3	97.6	0.25	0.18
7	2040.6	97.6	0.25	3.16
9	1239.4	97.6	0.25	1.94
11	787.8	97.6	0.25	1.24

ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	90	2.433	97.6	0.25	1.85	
4	25	2.433	97.6	0.25	0.71	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.71	
10	90	2.561	97.6	0.25	2.36	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
8	1000	97.6	258.4	97.6	0.25	7.54
PERDIDA A LA SALIDA						5.71
CAIDA DE PRESIÓN TOTAL = CONTRAPRESIÓN						27.37

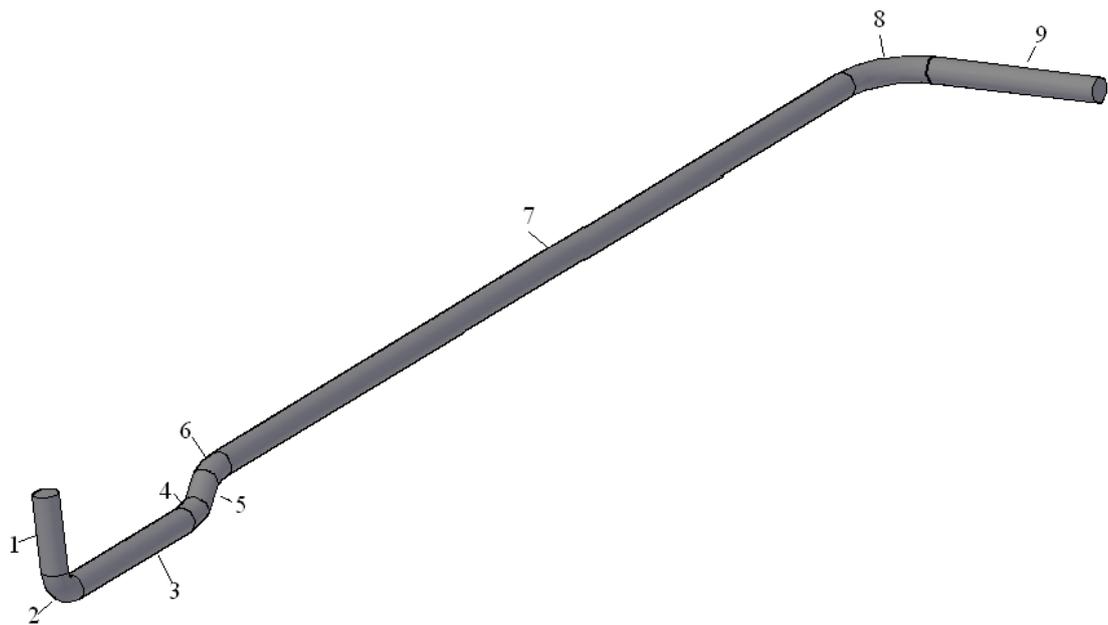
**Tabla 3.35** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con silenciador vaciado del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

#### 3.10.5.4.3. SISTEMA DE ESCAPE SIN SILENCIADOR

En la figura 3.39 se muestran los elementos del sistema de escape analizado y en la tabla 3.36 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión.

El silenciador es reemplazado por un conducto de igual longitud.



**Figura 3.39** Elementos del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda sin silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN					
ELEMENTOS TIPO TUBO					
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)	
1	325	97.6	0.25	0.50	
3	930	97.6	0.25	1.44	
5	117.3	97.6	0.25	0.18	
7	4280	97.6	0.25	6.71	
9	787.8	97.6	0.25	1.24	
ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/ $D_1$	$D_1$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	90	2.433	97.6	0.25	1.56
4	25	2.433	97.6	0.25	0.49
6	25	2.433	97.6	0.25	0.58

8	90	2.561	97.6	0.25	2.36
PÉRDIDA A LA SALIDA					5.71
CAIDA DE PRESIÓN TOTAL = CONTRAPRESIÓN					20.81

**Tabla 3.36** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda sin silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

#### 3.10.5.4.4. SISTEMA DE ESCAPE CON CODOS MITRADOS DESPUÉS DEL SILENCIADOR

Este sistema de escape es analizado debido a que las empresas constructoras de carrocerías no realizan modificaciones antes del silenciador pero después de este construyen sistemas de escape con codos mitrados.

En la figura 3.40 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.37 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos.



**Figura 3.40** Elementos del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN						
ELEMENTOS TIPO TUBO						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_I$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)		
1	325	97.6	0.25	0.48		
3	930	97.6	0.25	1.40		
5	117.3	97.6	0.25	0.17		
7	1740	97.6	0.25	2.63		
9	839.4	97.6	0.25	1.33		
11	974	97.6	0.25	1.56		
ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/ $D_I$	$D_I$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	90	2.433	97.6	0.25	1.77	
4	25	2.433	97.6	0.25	0.68	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.70	
10	90	---	97.6	0.25	6.78	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_I$ ENTRA DA (mm)	$D_I$ SILENC. (mm)	$D_I$ SALIDA (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION $K=4.754$ (mbar)
8	100mm	97.6	258.4	97.6	0.25	26.08
PÉRDIDA A LA SALIDA						5.67
CAIDA DE PRESION TOTAL = CONTRAPRESIÓN						49.32

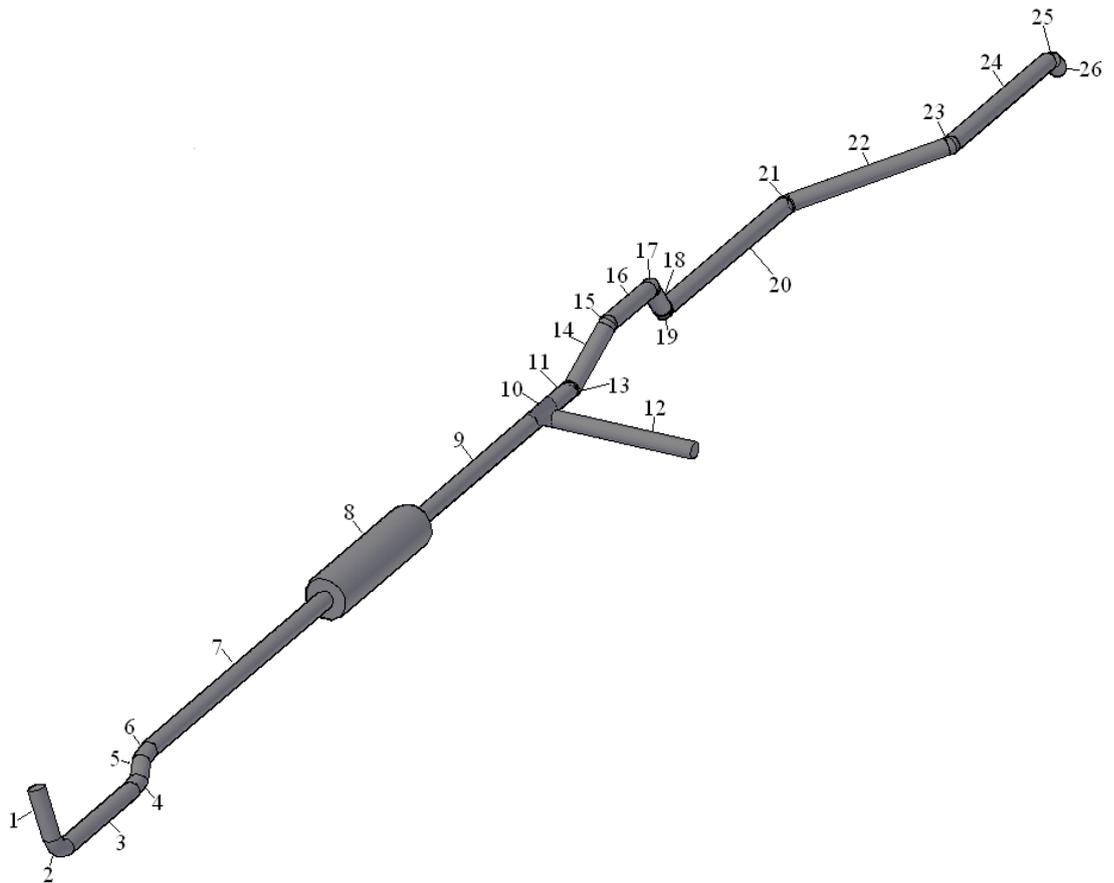
**Tabla 3.37** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con codos mitrados después del silenciador del bus con chasis

Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

### 3.10.5.5. SISTEMA DE ESCAPE CON DOBLE SALIDA: EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO Y DESPUÉS DEL SILENCIADOR

En la figura 3.41 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en las tablas 3.38, 3.39 y 3.40 se presentan los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos para los tres condiciones posibles: dos salidas abiertas, salida posterior cerrada y salida lateral cerrada respectivamente.



**Figura 3.41** Elementos del sistema de escape con doble salida en la parte posterior abajo y después del silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN - DOS SALIDAS ABIERTAS				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	325	97.6	0.25	0.48

3	930	97.6	0.25	1.40		
5	117.3	97.6	0.25	0.17		
7	1740	97.6	0.25	2.63		
9	1189.4	97.6	0.25	1.87		
11	343.8	97.6	0.25	0.10		
12	974	97.6	0.25	0.52		
14	401.9	97.6	0.25	0.12		
16	450.3	97.6	0.25	0.13		
18	327.1	97.6	0.25	0.10		
20	1385.8	97.6	0.25	0.42		
22	967	97.6	0.25	0.30		
24	1122	97.6	0.25	0.34		
26	167.5	97.6	0.25	0		
ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	$\epsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	90	2.433	97.6	0.25	1.81	
4	25	2.433	97.6	0.25	0.70	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.70	
13	40	---	97.6	0.25	0.48	
15	40	---	97.6	0.25	0.48	
17	50	---	97.6	0.25	0.59	
19	50	---	97.6	0.25	0.59	
21	45	---	97.6	0.25	0.62	
23	45	---	97.6	0.25	0.62	
25	45	---	97.6	0.25	0.62	
CONECTOR DE TUBERÍA EN FORMA DE T						
NÚMERO DE ELEMENTO	DIAMETRO TUBERIA PRINCIPAL (mm)	DIAMETRO TUBERÍA SECUNDARIA (mm)	$\Theta$ (grados)	CAIDA DE PRESION (mbar)		
10	97.6	97.6	90	1-2	4.52	
				1-3	4.72	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	$\epsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=4.754 (mbar)
8	1000	97.6	258.4	97.6	0.25	26.04
PÉRDIDA A LA SALIDA ATRÁS						1.04

PÉRDIDA A LA SALIDA AL LADO	1.87
CAIDA DE PRESION TOTAL	42.95

**Tabla 3.38** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape doble con salida en la parte posterior abierta y salida después del silenciador abierta para el bus con chasis

Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN – SALIDA POSTERIOR CERRADA					
ELEMENTOS TIPO TUBO					
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	$D_I$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar) $K=4.754$	
1	325	97.6	0.25	0.48	
3	930	97.6	0.25	1.39	
5	117.3	97.6	0.25	0.17	
7	1740	97.6	0.25	2.61	
9	1189.4	97.6	0.25	1.86	
11	343.8	97.6	0.25	0	
12	974	97.6	0.25	1.54	
14	401.9	97.6	0.25	0	
16	450.3	97.6	0.25	0	
18	327.1	97.6	0.25	0	
20	1385.8	97.6	0.25	0	
22	967	97.6	0.25	0	
24	1122	97.6	0.25	0	
26	167.5	97.6	0.25	0	
ELEMENTOS TIPO CODO					
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/ $D_I$	$D_I$ (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)
2	90	2.433	97.6	0.25	1.79
4	25	2.433	97.6	0.25	0.69
6	25	2.433	97.6	0.25	0.69
13	40	---	97.6	0.25	0
15	40	---	97.6	0.25	0
17	50	---	97.6	0.25	0
19	50	---	97.6	0.25	0

21	45	---	97.6	0.25	0	
23	45	---	97.6	0.25	0	
25	45	---	97.6	0.25	0	
<b>CONECTOR DE TUBERÍA EN FORMA DE T</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	DIAMETRO TUBERIA PRINCIPAL (mm)	DIAMETRO TUBERÍA SECUNDARIA (mm)	$\Theta$ (grados)	CAIDA DE PRESION (mbar)		
10	97.6	97.6	90	1-2	2.08	
				1-3	5.54	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION MEDIDA (mbar) K=4.754
8	1000	97.6	258.4	97.6	0.25	25.88
PÉRDIDA A LA SALIDA ATRÁS						0
PÉRDIDA A LA SALIDA AL LADO						5.71
CAIDA DE PRESION TOTAL						48

**Tabla 3.39** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape doble con salida en la parte posterior cerrada y salida después del silenciador abierta para el bus con chasis

Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

<b>CAIDA DE PRESIÓN – SALIDA DESPUÉS DEL SILENCIADOR CERRADA</b>				
<b>ELEMENTOS TIPO TUBO</b>				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	325	97.6	0.25	0.47
3	930	97.6	0.25	1.35
5	117.3	97.6	0.25	0.17
7	1740	97.6	0.25	2.54
9	1189.4	97.6	0.25	1.80
11	343.8	97.6	0.25	0.52
12	974	97.6	0.25	0
14	401.9	97.6	0.25	0.61

16	450.3	97.6	0.25	0.69		
18	327.1	97.6	0.25	0.50		
20	1385.8	97.6	0.25	2.15		
22	967	97.6	0.25	1.51		
24	1122	97.6	0.25	1.76		
26	167.5	97.6	0.25	0.26		
<b>ELEMENTOS TIPO CODO</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	90	2.433	97.6	0.25	1.75	
4	25	2.433	97.6	0.25	0.67	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.67	
13	40	---	97.6	0.25	2.33	
15	40	---	97.6	0.25	2.34	
17	50	---	97.6	0.25	2.54	
19	50	---	97.6	0.25	2.55	
21	45	---	97.6	0.25	3.03	
23	45	---	97.6	0.25	3.05	
25	45	---	97.6	0.25	3.07	
<b>CONECTOR DE TUBERÍA EN FORMA DE T</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	DIAMETRO TUBERIA PRINCIPAL (mm)	DIAMETRO TUBERÍA SECUNDARIA (mm)	$\Theta$ (grados)	CAIDA DE PRESION (mbar)		
10	97.6	97.6	90	1-2 1.13	1-3 4.72	
<b>SILENCIADOR</b>						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALID A (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=4.754 (mbar)
8	1000	97.6	258.4	97.6	0.25	25.15
					PERDIDA A LA SALIDA ATRÁS	
					5.71	
					PÉRDIDA A LA SALIDA AL LADO	
					0	
					CAIDA DE PRESION TOTAL	
					68.46	

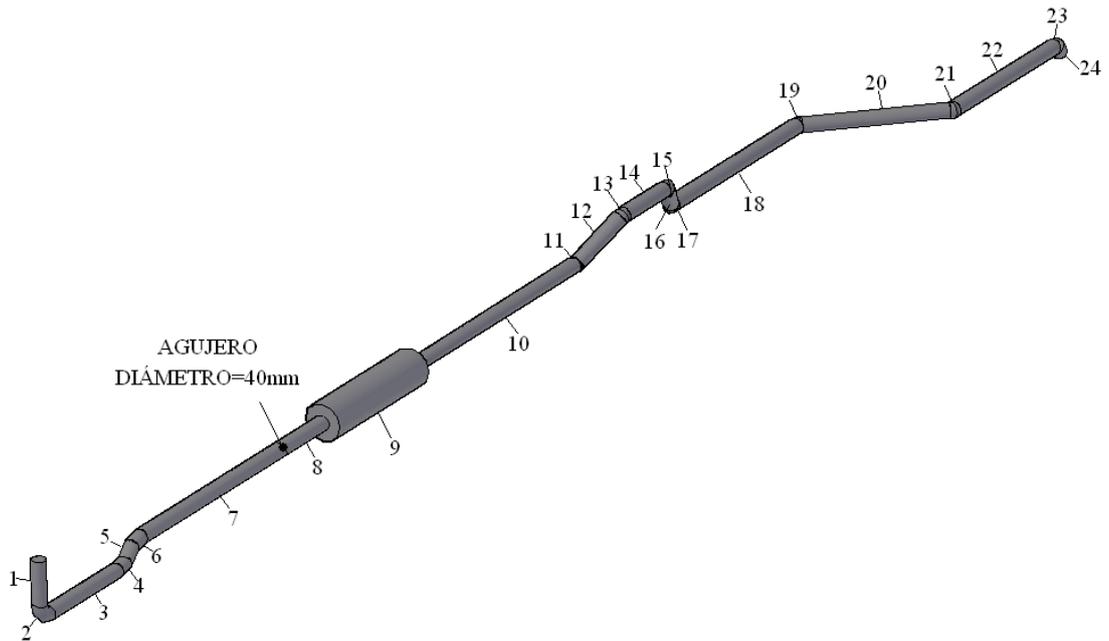
**Tabla 3.40** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape doble con salida en la parte posterior abierta y salida después del silenciador cerrada para el bus con chasis

Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

### 3.10.5.6. DETERMINACIÓN DE LA CONTRAPRESIÓN EN UN SISTEMA DE ESCAPE CON AGUJERO ANTES DEL SILENCIADOR DE UN BUS CON CHASIS MERCEDES-BENZ OF1721

En la figura 3.42 se muestran los elementos del sistema de escape analizado mientras que en la tabla 3.41 se presenta los valores necesarios para el cálculo y los resultados de caída de presión obtenidos al realizar un agujero de 40mm de diámetro.



**Figura 3.42** Elementos de un sistema de escape con agujero antes del silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN				
ELEMENTOS TIPO TUBO				
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>I</sub> (mm)	ε (mm)	CAIDA DE PRESIÓN (mbar)
1	325	97.6	0.25	0.49
3	930	97.6	0.25	1.43
5	117.3	97.6	0.25	0.18
7	1440	97.6	0.25	2.23
8	300	97.6	0.25	0.19
10	1533.2	97.6	0.25	1.02
12	401.9	97.6	0.25	0.26

14	450.3	97.6	0.25	0.30		
16	327.1	97.6	0.25	0.22		
18	1385.8	97.6	0.25	0.93		
20	967	97.6	0.25	0.65		
22	1122	97.6	0.25	0.76		
24	167.5	97.6	0.25	0.11		
ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	$\Theta$ (grados)	R/D <sub>I</sub>	D <sub>I</sub> (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION (mbar)	
2	90	2.433	97.6	0.25	1.81	
4	25	2.433	97.6	0.25	0.70	
6	25	2.433	97.6	0.25	0.71	
11	40	---	97.6	0.25	1.01	
13	40	---	97.6	0.25	1.04	
15	50	---	97.6	0.25	1.20	
17	50	---	97.6	0.25	1.17	
19	45	---	97.6	0.25	1.34	
21	45	---	97.6	0.25	1.31	
23	45	---	97.6	0.25	1.36	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITU D (mm)	D <sub>I</sub> ENTRAD A (mm)	D <sub>I</sub> SILENC. (mm)	D <sub>I</sub> SALIDA (mm)	$\varepsilon$ (mm)	CAIDA DE PRESION K=4.754 (mbar)
8	100mm	97.6	258.4	97.6	0.25	10.88
PÉRDIDA A LA SALIDA ATRÁS						2.31
PÉRDIDA A LA SALIDA EN EL AGUJERO DE 40mm						26.15
CAIDA DE PRESION TOTAL						33.74

**Tabla 3.41** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con agujero antes del silenciador para el bus con chasis Chevrolet Mercedes-Benz OF1721

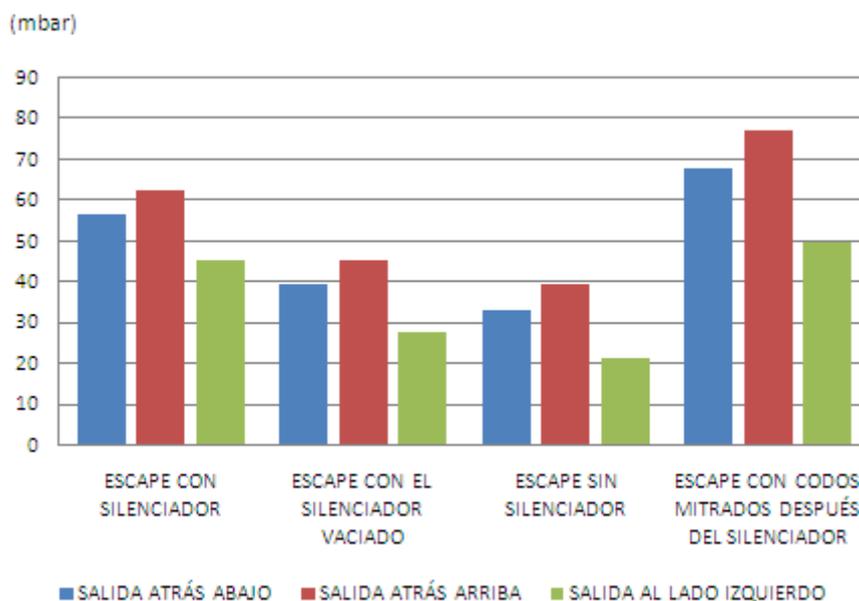
**Fuente:** El autor

### 3.10.5.7. RESULTADOS

A continuación se realiza un análisis detallado de la influencia de la contrapresión en cada uno de los sistemas de escape estudiados para el chasis Mercedes-Benz OF1721/52.

### 3.10.5.7.1. VALORES DE CONTRAPRESIÓN DE LAS TRES DISPOSICIONES DE SISTEMAS DE ESCAPE

La gráfica 3.7 muestra los valores de contrapresión de las tres disposiciones de sistemas de escape de los buses con chasis Mercedes-Benz OF1721/52 con silenciador, con silenciador vaciado, sin silenciador y con codos mitrados después del silenciador.



**Gráfica 3.7** Valores de contrapresión para los diferentes disposiciones de sistemas de escape de los buses con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

El valor más alto de contrapresión se produce cuando se utilizan sistemas de escape con codos mitrados, ninguna de las disposiciones de sistemas de escape supera el valor máximo de contrapresión admisible que es de 100mbar.

El vaciado del silenciador origina una reducción de la contrapresión en aproximadamente 18mbar, esto es ocasionalmente realizado por los dueños de los buses para facilitar el flujo de los gases a través del sistema de escape.

La eliminación del silenciador que es mucho menos común debido a la revisión frecuente de las unidades reduce la contrapresión en unos 25.32mbar, los 7.32 mbar de diferencia con la caída de presión originada por un silenciador vaciado se debe a

la pérdida de energía por dilatación súbita a la entrada y pérdida de energía por contracción súbita a la salida. La pérdida de energía por fricción en las paredes del silenciador es despreciable ya que es mucho menor a un milibar.

En lo concerniente a la posición de la salida del sistema de escape, si se analiza el peor de los casos que es el de codos mitrados después del silenciador, existe un incremento del 13.38% en la contrapresión del sistema de escape con salida en la parte posterior arriba en relación con el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo. Además, existe una disminución del 27.06% en la contrapresión del sistema de escape con salida lateral en relación con el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo. Al comparar el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con el sistema de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda se ve que éste último presenta un incremento del 55.45% en la contrapresión.

El manual de construcción de carrocerías para el chasis Mercedes-Benz OF1721<sup>18</sup> señala que el valor máximo de contrapresión es de 100mbar, la información indicada ahí sugiere que el sistema de escape está diseñado para que su salida sea en la parte posterior izquierda ya sea en la parte superior o en la parte inferior.

Si bien ninguno de los sistemas de escape supera el valor de contrapresión máximo admisible, los dos sistemas de escape más cercanos a este valor son:

- Sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda con codos mitrados después del silenciador, con una contrapresión de 67.62mbar.
- Sistemas de escape con salida en la parte posterior arriba a la izquierda con codos mitrados después del silenciador, con una contrapresión de 76.67mbar.

Si se realiza una disminución del diámetro del conducto de los dos sistemas de escape indicados anteriormente, el valor de contrapresión del sistema de escape puede superar fácilmente los 100mbar ocasionando un mayor consumo de combustible, un aumento en la producción de hollín y una disminución en la potencia del motor.

---

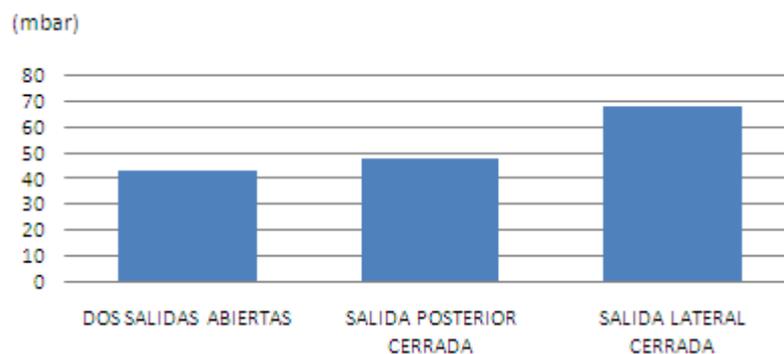
<sup>18</sup> Mercedes-Benz, *Directrices para montaje de superestructuras y equipos en chasis para autobuses y plataformas*, Brasil, abril de 1999.

Por cada 66.6mbar de incremento de la contrapresión del sistema de escape, se tendrá un aumento en el consumo de combustible del 1% y una disminución de la potencia del motor en un 1%.

La temperatura de los componentes del motor indicados en la figura 1.40, aumenta para valores altos de contrapresión disminuyendo la vida útil de los mismos, los sistemas de escape con salida en la parte posterior abajo y arriba son los más afectados.

### 3.10.5.7.2. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA EL SISTEMA DE ESCAPE CON DOBLE SALIDA: EN LA PARTE POSTERIOR ABAJO Y DESPUÉS DEL SILENCIADOR DEL BUS CON CHASIS MERCEDES-BENZ OF1721

La gráfica 3.8 muestra los valores de contrapresión para el sistema de escape doble de los buses con chasis Mercedes-Benz OF1721 en las tres condiciones de funcionamiento posibles:



**Gráfica 3.8** Valores de contrapresión para el sistema de escape con doble salida: en la parte posterior y después del silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

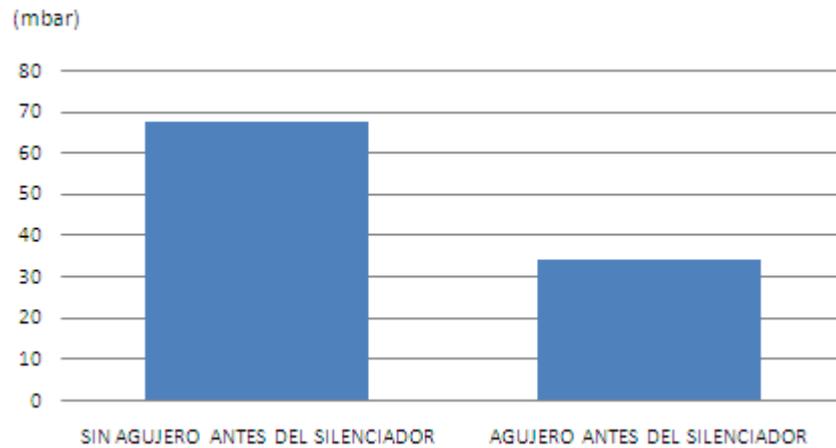
**Fuente:** El autor

El valor más alto de contrapresión se produce cuando se cierra la salida después del silenciador siendo un valor muy similar al obtenido con el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo con codos mitrados. El valor más bajo de

contrapresión se produce cuando las dos salidas se abren, esto se debe a que la sección transversal para el flujo de los gases aumenta, disminuyendo la velocidad y por ende las pérdidas de energía por fricción.

### 3.10.5.7.3. VALORES DE CONTRAPRESIÓN PARA EL SISTEMA DE ESCAPE CON AGUJERO ANTES DEL SILENCIADOR DEL BUS CON CHASIS MERCEDES-BENZ OF1721

La gráfica 3.9 muestra una comparación entre los valores de contrapresión para un sistema de escape sin agujero antes del silenciador y otro sistema de escape con agujero antes del silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721.



**Gráfica 3.9** Valores de contrapresión para un sistema de escape sin agujero antes del silenciador y un sistema de escape con agujero antes del silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** El autor

La diferencia de contrapresión entre el sistema de escape con agujero y otro sistema de escape sin agujero es de 33.88mbar. El sistema de escape con agujero disminuye el consumo de combustible en un 0.5% y aumenta la potencia del motor en un 0.5%.

## CAPITULO 4

# PROPUESTA TÉCNICA DEL DISEÑO FINAL DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA LOS BUSES DE TRANSPORTE MASIVO DE PASAJEROS DE LA CIUDAD DE CUENCA

### 4.1. RECOMENDACIONES DEL FABRICANTE DEL CHASIS

Antes de realizar cualquier modificación en el sistema de escape se debe revisar el manual de construcción de carrocerías del fabricante del chasis, en el se indican datos muy importantes como: valores de contrapresión máximos, materiales utilizados, distancia desde el tubo de escape hacia diferentes componentes del chasis, etc. A continuación se presenta información referente al sistema de escape para cada chasis.

#### 4.1.1. RECOMENDACIONES DEL FABRICANTE PARA EL CHASIS CHEVROLET FTR-32M

El manual “BODY BUILDERS MANUAL FOR FRONT ENGINE BUSES FSR/FTR” presenta la siguiente información en lo referente al sistema de escape:

Evitar modificaciones imprudentes de los tubos de escape. Cuando las modificaciones del sistema de escape son inevitablemente necesarias, cuidadosamente observar los siguientes puntos:

- Mantener la holgura especificada (por lo menos a la medida A en mm de la tabla indicada debajo) entre los tubos de escape.

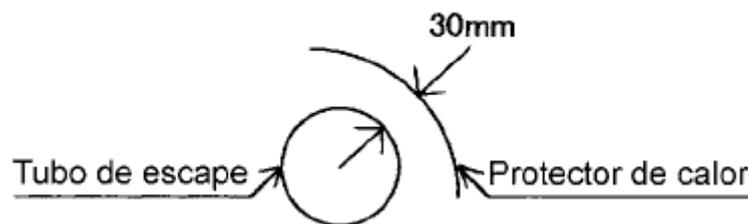
NOMBRE DE LA PARTE	MEDIDA A
Tuberías del sistema de frenos	60mm o más. Si una longitud de más de 200mm de la tubería del sistema de frenos está colocada paralelamente al sistema de escape, una tolerancia de 180mm o más debe ser utilizada.
Mangueras flexibles del sistema de frenos	100mm o más La temperatura de las mangueras flexibles del sistema

	de frenos no debe exceder 70°C. Si la temperatura más alta no puede ser medida, una holgura de más de 400mm debe ser mantenida entre las mangueras y el tubo de escape.
Cableado	100mm o más
Tuberías de combustibles	80mm o más
Mangueras de combustible	150mm o más

**Tabla 4.1** Distancia mínima entre el tubo de escape y diferentes componentes del chasis.

**Fuente:** ISUZU MOTORS LIMITED, *BODY BUILDERS MANUAL FOR FRONT ENGINE BUSES FSR/FTR*, 1999

- Preferiblemente debe instalarse una caja de herramientas de acero. Cuando se instala una caja de herramientas de madera, una holgura suficiente (200mm o más) debe ser mantenida entre la caja de herramientas de madera y el silenciador o el tubo de escape.
- En caso de instalar partes de la carrocería a lado del tubo de escape, se requiere la instalación de un protector de calor metálico con aislante térmico. El protector debe estar colocado a una distancia de 30mm de la superficie del tubo de escape.



**Figura 4.2** Distancia entre el protector de calor y el tubo de escape

**Fuente:** ISUZU MOTORS LIMITED, *BODY BUILDERS MANUAL FOR FRONT ENGINE BUSES FSR/FTR*, 1999

El manual “GM UPFITTERS CHASIS – BEST PRACTICES” que es un instructivo utilizado por constructores de carrocerías de la marca General Motors y es aplicable a varios modelos de Chevrolet e Isuzu incluido el modelo FTR indica lo siguiente:

Los constructores de carrocerías deben ser muy cuidadosos al usar los componentes y seguir procedimientos que eviten que los gases de escape ingresen al habitáculo. Se deben observar las siguientes directrices:

- Sellar todos los agujeros y aberturas a través del piso o la carrocería.
- Asegurarse de que la salida del escape no está obstruida y dirige los gases lejos del habitáculo.
- Con el vehículo en movimiento, probar la localización de la salida del escape para asegurar que los humos no ingresen al habitáculo.
- Alterar la salida del escape o su posición y la eliminación o remoción de componentes reductores de ruido pueden hacer que el vehículo viole leyes locales de ruido.

### **Modificaciones al diseño del sistema de escape**

Al realizar modificaciones al diseño del sistema de escape los constructores de carrocerías deben observar las recomendaciones indicadas a continuación.

Deben asegurarse que el diseño realizado mantiene:

- El diseño adecuado y espaciamiento de los soportes de los componentes del sistema de escape.
- Suficiente holgura para expansión térmica de los materiales.

Utilizar únicamente acero inoxidable aluminizado 406 o acero dulce aluminizado para alargar el tubo de escape.

Para evitar excesiva contrapresión y la resultante pérdida de potencia del motor, asegurarse de que el tubo de escape tenga curvas suaves y sin aristas que puedan impedir el flujo de los gases de escape.

En condiciones de funcionamiento extremas, la temperatura de los gases de escape puede llegar a 1400°F (760°C) con la temperatura de la superficie del tubo ligeramente inferior. Al agregar componentes de la carrocería cerca del sistema de escape, ser muy cuidadoso en seleccionarlos para que soporten las temperaturas elevadas o colocar protecciones contra el calor.

Cuando la modificación del sistema de escape es terminada, buscar fugas o restricciones y reparar si es necesario.



**Figura 4.3** Recomendaciones para la construcción de uniones.

**Fuente:** GENERAL MOTORS, *CHASIS - BEST PRACTICES*, 2009.

### **Direccionamiento del sistema de escape**

Al determinar el direccionamiento del sistema de escape se debe considerar la expansión térmica de los componentes utilizados para alargar el tubo de escape.

Los soportes agregados para el alargue del sistema de escape deben permitir el movimiento por la expansión térmica sin restricciones.

Probar la localización de la salida del escape con el vehículo detenido y en movimiento para asegurar que los gases no ingresen al habitáculo a través de ventanas laterales, ventanas posteriores o agujeros en el piso.

Soldar todas las conexiones al agregar extensiones a un sistema de escape existente.

### **Protección térmica**

Las protecciones térmicas son necesarias en áreas donde la alta temperatura del escape puede afectar a ciertos componentes. Las protecciones térmicas deben ser fabricadas en acero aluminizado con un mínimo de 0.9mm de espesor.

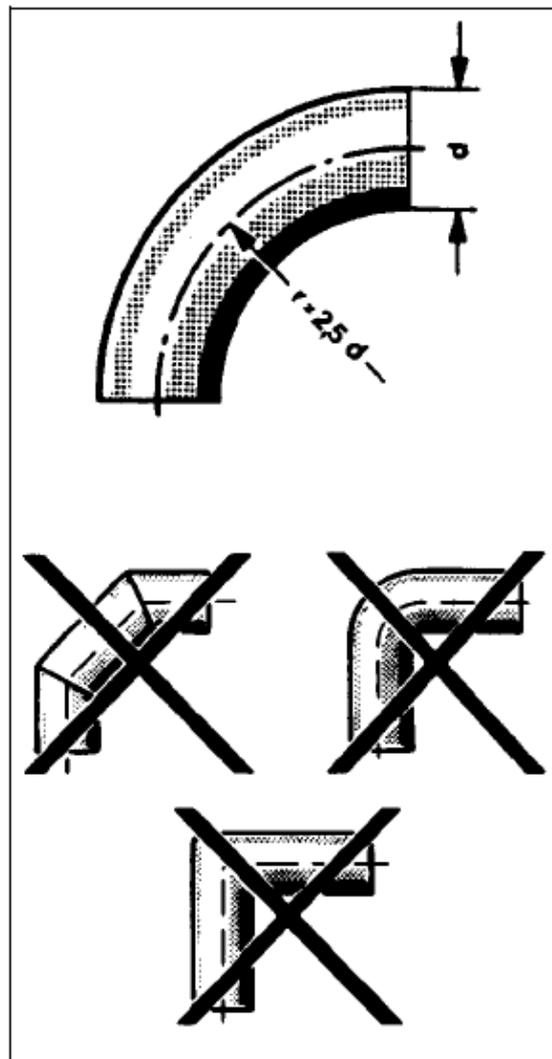
No retirar ninguna protección térmica colocada en el sistema de escape por el fabricante del chasis.

Proporcionar protección térmica para los componentes utilizados para alargar el sistema de escape. Si el tubo de escape es extendido hacia la parte posterior, utilizar protecciones térmicas para proteger el neumático de repuesto.

#### 4.1.2. RECOMENDACIONES DEL FABRICANTE MERCEDES-BENZ

Si se prolonga el tubo de escape atrás del silenciador, no utilizar tubo de menor diámetro interno debiendo ser prevista la fijación de esta prolongación en el chasis a través de elementos elásticos idénticos a los originales del vehículo.

Si hay necesidad de curvar el tubo de escape, no prever radios inferiores al indicado en la Fig. 4.4.



**Figura 4.2** Recomendaciones para realizar curvaturas en el sistema de escape

**Fuente:** Mercedes-Benz, *Directrices para montaje de superestructuras y equipos en chasis para autobuses y plataformas*, Brasil, abril de 1999.

Las tuberías o conductos de plástico, cables eléctricos y ruedas de auxilio deberán estar a una distancia mínima de 200 mm del sistema de escape. No siendo posible, deberá ser prevista la protección de estos componentes contra el calor.

Cuando la salida del tubo es para el lado izquierdo, también no deberá pasar por arriba del motor.

La unión del tubo de escape cerca del silenciador deberá ser revestida con material aislante, en conjunto con los periféricos del motor que necesitan mantenimiento, para evitar accidentes.

En los casos de prolongación del tubo de escape, con salida vertical para la derecha o izquierda, además de las indicaciones mencionadas, deberán ser efectuadas mediciones de la contrapresión, debiendo ser verificados los siguientes valores máximos:

<b>Motor</b>	<b>Contrapresión máxima</b>
OM 364 LA OM 366 A <u>OM 366 LA</u> OM 449 LA OM 447 LA	100 mbar
OM 904 LA OM 457 LA	80 mbar

**Figura 4.3** Contrapresión máxima para diferentes motores Mercedes-Benz

**Fuente:** Mercedes-Benz, *Directrices para montaje de superestructuras y equipos en chasis para autobuses y plataformas*, Brasil, abril de 1999.

Para vehículos con tubo de escape con salida horizontal a través del orificio en el paragolpes, prever un huelgo mínimo entre el tubo y el orificio de 10 mm.

## **4.2. CONFIGURACIÓN DE LA SALIDA DEL SISTEMA DE ESCAPE**

La configuración del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda es la más idónea debido a las siguientes razones:

- Si se construye un sistema de escape de la forma correcta el valor de contrapresión permanece dentro de rangos adecuados.
- La ubicación de la salida del escape en la parte posterior a la izquierda dificulta la intromisión de contaminantes en el habitáculo del vehículo por las puertas laterales que están a la derecha.
- Al colocar la salida del escape en la parte izquierda, se crea una mayor distancia entre las personas que están en las veredas y los humos del escape.
- Los humos de escape no ingresan directamente hacia las viviendas o negocios de calles estrechas como es el caso del centro de la ciudad.
- Al colocar un codo con un ángulo de 45-60° en la salida, se podrá hacer que los gases de escape se dirijan hacia el suelo facilitando el asentamiento de los mismos.

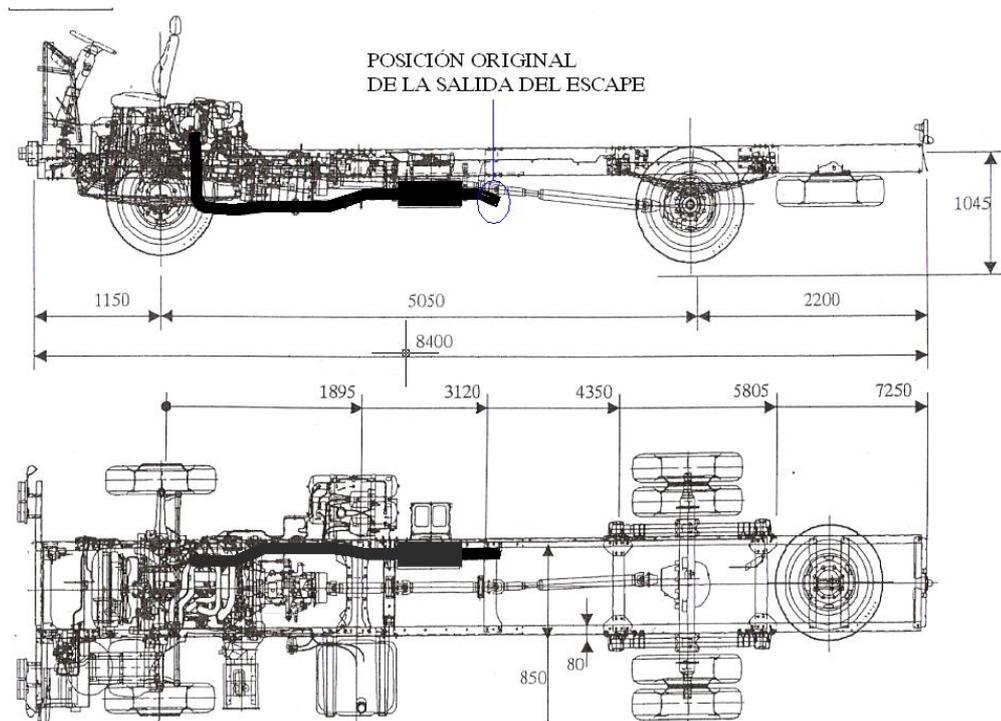
## **4.3. PROPUESTA TÉCNICA DEL DISEÑO FINAL DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA LOS BUSES CON CHASIS FTR-32M**

El diseño original del sistema de escape que se presenta en la figura 4.4 debe ser modificado a partir del silenciador. No es posible un diseño de un sistema de escape en el cual el tubo a partir del silenciador se dirija hacia la parte posterior en forma recta, el tubo de escape debe ser diseñado como se indica en la figura 4.5.

Se debe revisar la temperatura del sistema de escape en áreas cercanas a componentes sensibles al calor para determinar si se deben colocar protecciones térmicas.

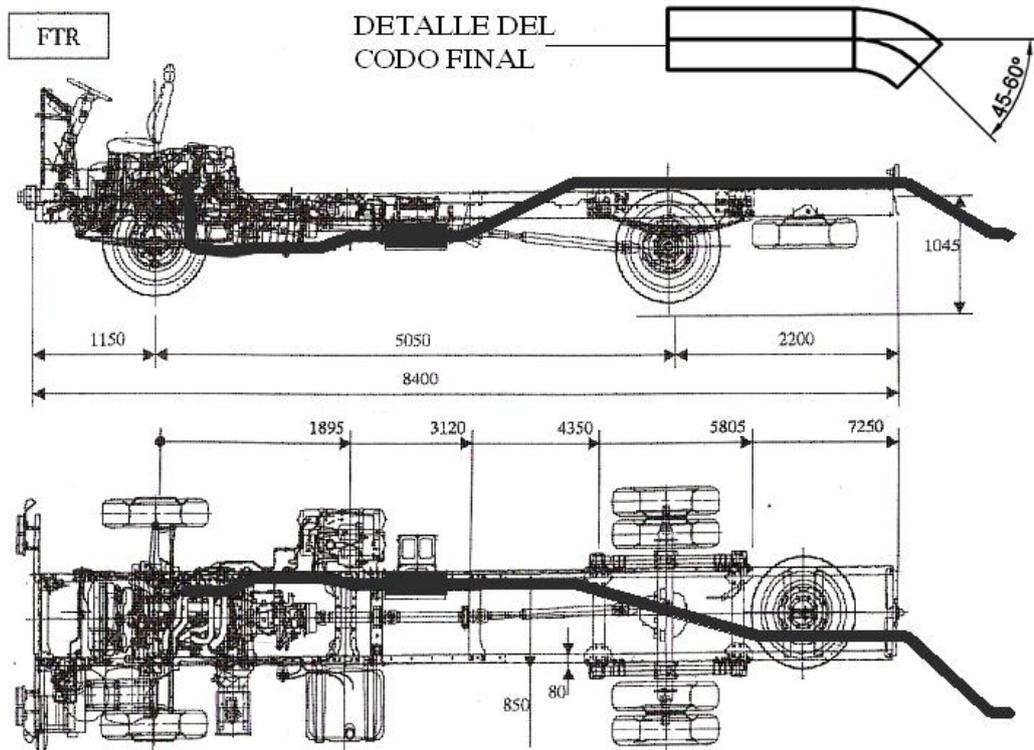
El incremento del diámetro del sistema de escape a partir del silenciador permite una disminución de la contrapresión de 45.91mbar, representando un aumento de potencia de 0.68% y una disminución en el consumo de combustible de 0.68%. Debido a esto se recomienda realizar una modificación a partir del silenciador con un tubo de diámetro interior mayor a 97mm.

En la parte final del sistema de escape se debe realizar un codo de 45-60° con una relación  $R/DI=2.5$ .



**Figura 4.4** Posición original de la salida del escape del chasis Chevrolet FTR-32M

**Fuente:** Imagen del chasis Chevrolet FTR-32M modificada por el autor.



**Figura 4.5** Posición propuesta del sistema de escape para el chasis Chevrolet FTR-32M

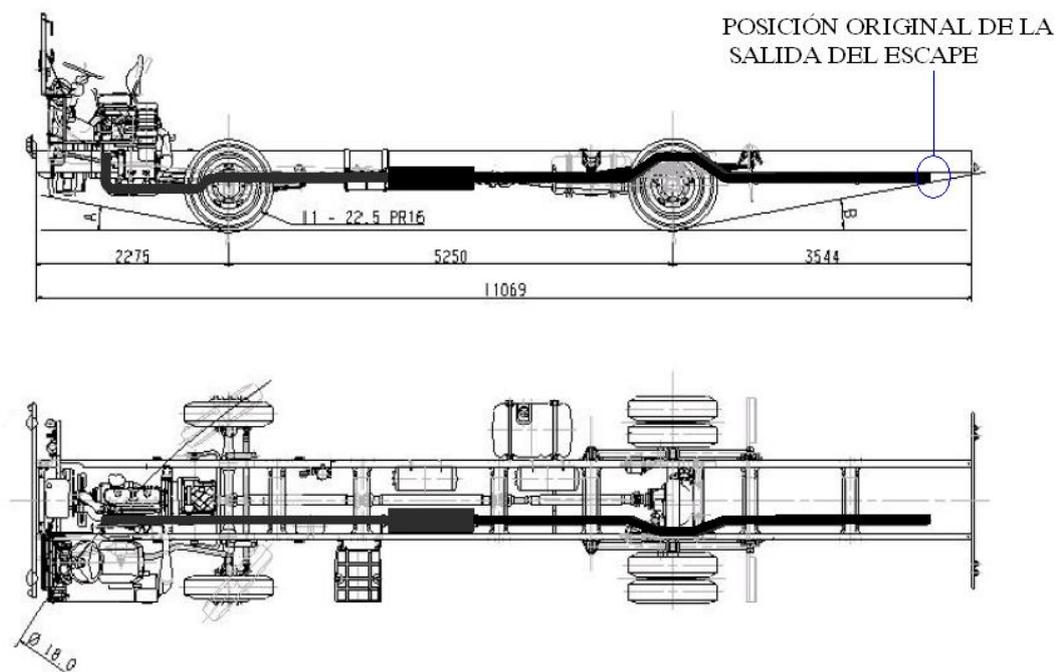
**Fuente:** Imagen del chasis Chevrolet FTR-32M modificada por el autor.

#### 4.4. PROPUESTA TÉCNICA DEL DISEÑO FINAL DEL CONDUCTO DE ESCAPE PARA LOS BUSES CON CHASIS MERCEDES-BENZ OF1721

El diseño original del sistema de escape que se presenta en la figura 4.6 debe ser modificado en la parte posterior del chasis como se indica en la figura 4.7.

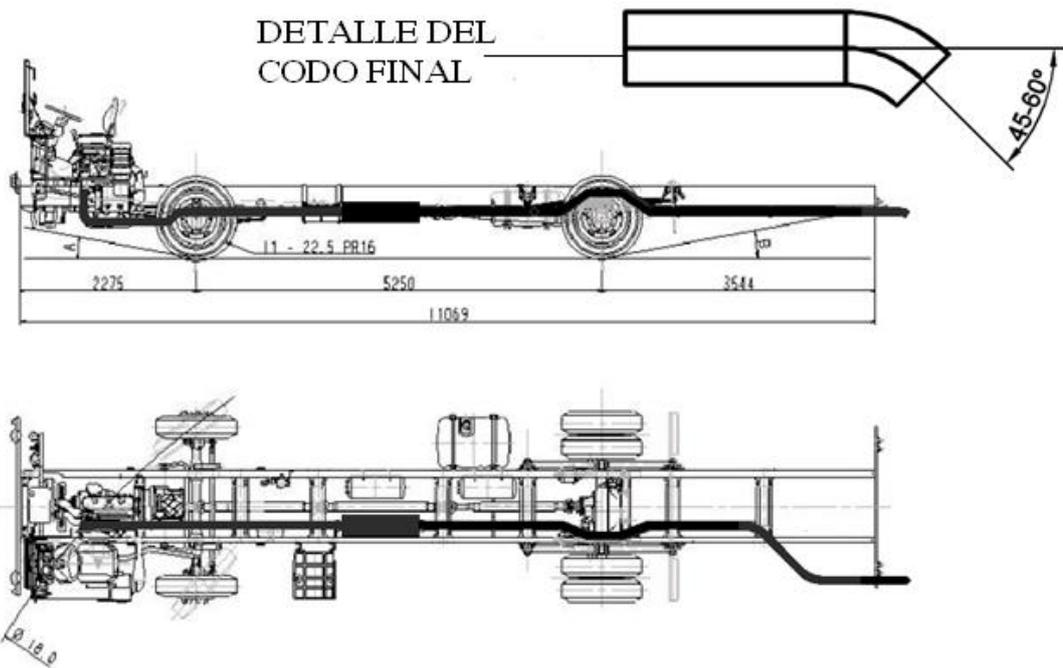
En el área que será modificada se recomienda revisar la temperatura para determinar si se deben colocar protecciones térmicas.

La medida del diámetro del conducto de escape debe ser mantenida, en la parte final se debe realizar un codo de 45-60° con una relación R/DI=2.5.



**Figura 4.6** Posición original de la salida del escape del chasis Mercedes-Benz OF1721/52

**Fuente:** Imagen del chasis Chevrolet FTR-32M modificada por el autor.



**Figura 4.7** Posición propuesta del sistema de escape para el chasis Mercedes-Benz OF1721

**Fuente:** Imagen del chasis Chevrolet FTR-32M modificada por el autor.

#### 4.5. APLICACIÓN A OTROS MODELOS DE CHASIS

La configuración del sistema de escape con salida en la parte posterior abajo a la izquierda debe ser aplicada a todos los buses de transporte masivo de pasajeros de la ciudad de Cuenca, en la parte final se debe realizar un codo de 45-60° con una relación R/DI=2.5.

Las recomendaciones indicadas en este capítulo pueden ser utilizadas para la modificación de sistemas de escape de otros modelos de chasis para bus.

## CONCLUSIONES

Mediante un cálculo matemático de los sistemas de escape utilizados en los buses de transporte masivo de pasajeros de la ciudad de Cuenca, se pudo determinar la influencia que tienen las diferentes disposiciones de los conductos de escape en la contaminación producida.

El valor de contrapresión en el conducto de escape permite determinar la influencia de las diferentes configuraciones de sistemas de escape en la potencia del motor, el consumo de combustible, funcionamiento del turbocompresor, sistema de recirculación de los gases de escape y la temperatura de ciertos componentes del motor.

Se pueden presentar incrementos del consumo de combustible superiores al 1% al realizar modificaciones incorrectas en el sistema de escape, al consumir mayor cantidad de combustible para realizar un mismo trabajo se está incrementando también la contaminación generada.

Existe un incremento del 15% en la contrapresión del sistema de escape con salida en la parte de atrás arriba en relación con el sistema de escape con salida en la parte de atrás abajo. Además, existe una disminución del 25% en la contrapresión del sistema de escape con salida lateral en relación con el sistema de escape con salida en la parte posterior abajo.

La realización de agujeros en el sistema de escape antes del silenciador afecta de forma directa a los pasajeros ya que se produce la intrusión de contaminantes en el habitáculo, además, se incrementa la producción de ruido del sistema de escape ya que los gases no pasan por el silenciador.

Los motores con sistemas de recirculación de los gases de escape externos son más sensibles a un incremento en la contrapresión, valores elevados de contrapresión, incrementan la producción de hollín y de monóxido de carbono.

Se ha demostrado que las modificaciones en el sistema de escape realizadas en la ciudad de Cuenca son ejecutadas sin ningún criterio técnico, encontrado diferentes diseños de sistemas de escape para una misma marca de chasis.

## RECOMENDACIONES

Se debe realizar un cálculo de la contrapresión si se desea modificar el diseño del conducto de escape para evitar problemas de funcionamiento en el motor.

Las pérdidas de energía en los sistemas de escape que ocasionan las caídas de presión son proporcionales al cuadrado de la velocidad, por lo que no se debe por ningún motivo disminuir el diámetro del conducto ya que al disminuir el área de paso de los gases la velocidad aumenta.

El conducto de escape debe ser construido con curvas suaves y sin aristas que faciliten el flujo libre de los gases.

No realizar agujeros en el sistema de escape para mejorar el flujo de los gases, un diseño adecuado del conducto de escape cumplirá con ese propósito evitando la intrusión de contaminantes en el habitáculo.

No colocar salidas en el conducto de escape que limiten excesivamente el flujo de los gases ya que la contrapresión se verá aumentada.

La instalación de un filtro de partículas en el sistema de escape exige un mayor cuidado en el diseño del sistema de escape ya que valores elevados de contrapresión comprometerán el funcionamiento del motor y del filtro.

Se recomienda realizar un estudio que evalúe la intromisión de gases de escape dentro del habitáculo para determinar si se pueden hacer mejoras en la ventilación o en la construcción de las puertas, ventanas, piso de la cabina y carrocería.

Un sistema de escape bien diseñado no puede impedir la emisión de contaminantes en exceso por el mal estado del sistema de inyección de combustible, por lo que se debe mejorar el plan de mantenimiento realizado a las unidades.

## BIBLIOGRAFIA Y PÁGINAS WEB CONSULTADAS

1. AA1CAR, *Exhaust Backpressure*, octubre del 2009, [http://www.aa1car.com/library/exhaust\\_backpressure.htm](http://www.aa1car.com/library/exhaust_backpressure.htm)
2. Agriemach LTD, *Heat Shield Muffler – Catalytic Converter*, octubre del 2009  
[http://www.agriemach.com/default.php?cPath=0\\_7&osCsid=4sd1khsptfuhqja6hsdt16nl5](http://www.agriemach.com/default.php?cPath=0_7&osCsid=4sd1khsptfuhqja6hsdt16nl5)
3. BOMBAS ZEDA, *Sistema de Escape*, Octubre del 2009, [http://www.bombaszeda.com/\\_upload/Departamento/2/Es\\_19Escape.pdf](http://www.bombaszeda.com/_upload/Departamento/2/Es_19Escape.pdf).
4. Características y Especificaciones Técnicas y de Seguridad para las Unidades de Transporte Urbano Estandarizadas (Bus Tipo) de la Ciudad de Cuenca.
5. CIRIA, Ignacio, *Estudio de la combustión en motores diesel*, octubre del 2009,  
[http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/ANALISIS\\_DE\\_LA\\_COMBUSTION.pdf](http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/ANALISIS_DE_LA_COMBUSTION.pdf)
6. Cummins Filtration, *Exhaust System Guide*, octubre del 2009, [http://www.cumminsfiltration.com/pdfs/product\\_lit/americas\\_brochures/LT32201.pdf](http://www.cumminsfiltration.com/pdfs/product_lit/americas_brochures/LT32201.pdf)
7. CUMMINS POWER GENERATION, *Cálculo del tubo de escape de un motor Cummins*, Octubre del 2009, [http://www.cumminspower.com/www/literature/applicationmanuals/t-030f\\_spanish\\_p78-92.pdf](http://www.cumminspower.com/www/literature/applicationmanuals/t-030f_spanish_p78-92.pdf).
8. DIESELNET, *Diesel Exhaust Particle Size*, octubre del 2009, [www.dieselnet.com/tech/dpm\\_size.html](http://www.dieselnet.com/tech/dpm_size.html).
9. E.I. WILLIAMS STEEL DIVISION, *Engine Silencers*, noviembre del 2009, [http://www.industrial-silencers.com/engine\\_silencers.html](http://www.industrial-silencers.com/engine_silencers.html).
10. Engineering toolbox, diciembre del 2009, *Air – Altitude, Density and Specific Volume*, [http://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-density-volume-d\\_195.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-density-volume-d_195.html).
11. Especificaciones Chevrolet FTR 32-M, octubre del 2009, <http://www.chevrolet.com.ec/vehiculos/Comerciales/Serie-F/Serie-F-ficha-tecnica.html>.

12. FACIOLINCE Andrea, *Flujo Laminar*, octubre del 2009, [http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/conceptosbasicosmfluidos/flujo laminar/flujo%20laminar.html](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/conceptosbasicosmfluidos/flujo%20laminar/flujo%20laminar.html)
13. FERRIS, J., y otros, “Autobuses escolares y motores diesel: contaminación atmosférica, exposición pediátrica y efectos adversos en la salud humana”, *Revista Española de Pediatría*, VOL. 59 N°2, 2003.
14. FLORES, Julio, *Contaminantes atmosféricos primarios y secundarios*, noviembre del 2009, <http://www.cepis.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-02a9.pdf>
15. GILES, Ranald, *Mecánica de los fluidos e hidráulica*, 3<sup>ra</sup>. Edición, Mc.Graw-Hill, 1996.
16. HARGREAVES, Michael, *Analytical and Experimental Studies of Vehicle Pollution Dispersion*, University of Nottingham, octubre de 1997.
17. Hitachi Construction Machinery, *Cooled EGR System*, octubre del 2009, [http://www.hitachi-c-m.com/asia/products/excavator/wheel/zx210w-3/feature\\_1.html](http://www.hitachi-c-m.com/asia/products/excavator/wheel/zx210w-3/feature_1.html)
18. ISUZU MOTORS LIMITED, *Manual de Construcción de Carrocerías para Buses de Trabajo Pesado con motor trasero de la serie LV150 DE GM*, 1999.
19. ISUZU MOTORS LIMITED, *Body Builders Manual for Front Engine Buses FSR/FTR*, 1999.
20. JAUSSI, François, *Critical Effects of Filters on Engines and on Filters by Engines*, junio del 2009, [www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf](http://www.arb.ca.gov/diesel/verdev/wn/fjaussi.pdf).
21. John Deere, *Sistema de Admisión de Aire del Motor*, septiembre del 2009, [http://www.deere.com.ar/es\\_AR/ag/homepage/consejo/cs071\\_sist\\_admision\\_motor.html](http://www.deere.com.ar/es_AR/ag/homepage/consejo/cs071_sist_admision_motor.html).
22. KUMAR, Prashant, *Particulate Matter: Sources, Dispersion and Sinks in the Urban Environment*, University of Cambridge, agosto del 2006.
23. Laboratorio de Calidad de Aire Urbano, *Estudio de la calidad del aire de la ciudad de Ambato*, Quito-Ecuador, 2008.
24. Mandrel Bending, *Catalog School Bus Exhaust Systems*, octubre del 2009, [http://www.mandrelbending-tubefabrication.com/pdf/2008\\_bus\\_complete\\_catalog.pdf](http://www.mandrelbending-tubefabrication.com/pdf/2008_bus_complete_catalog.pdf)
25. Mercedes-Benz, *Chasis para autobús Mercedes-Benz OF1721*, octubre del 2009 [http://www.condor.com.py/pdfs/OF1721\\_esp.pdf](http://www.condor.com.py/pdfs/OF1721_esp.pdf).

26. Mercedes-Benz, *Directrices para montaje de superestructuras y equipos en chasis para autobuses y plataformas*, Brasil, abril de 1999.
27. MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos aplicada*, 4<sup>ta</sup>. Edición, Prentice-Hall Inc., México DF-México, 1996.
28. NELSON, *Silencer*, noviembre del 2009, [http://www.cumminsfirepower.com/documents/nelson\\_silencers.pdf](http://www.cumminsfirepower.com/documents/nelson_silencers.pdf)
29. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 205:2002 Vehículos Automotores. Bus Urbano. Requisitos.
30. Projeto de Norma Técnica 5:11.03-06 – Posicionamiento do Tubo de Descarga em Veículos Rodoviários Automotores – julho/1988
31. Reglamento del Servicio Público de Transporte Urbano e Interurbano de Pasajeros en Omnibus y otras modalidades para la provincia de Lima
32. Reglamento General para la Aplicación de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial
33. S/a, *Apéndice Pérdidas de Carga Espol*, noviembre 2009, [http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/5337/2/APENDICE%20D\(PERDIDAS\).doc](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/5337/2/APENDICE%20D(PERDIDAS).doc)
34. S/a, *Conversión de Unidades*, diciembre del 2009, <http://www.guemisa.com/conversion.html>
35. S/a, *Deposition (Aerosol Physics)*, diciembre del 2009, [http://en.wikipedia.org/wiki/Deposition\\_\(Aerosol\\_physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Deposition_(Aerosol_physics))
36. S/a, *Diesel Engine Exhaust Systems*, septiembre del 2009, <http://transportation.centennialcollege.ca/gwright/Engine/Diesel%20Engine%20Exhaust%20Systems%2010-06.pdf>
37. S/a, *Estado del flujo Hidráulico*, octubre del 2009, [http://es.wikipedia.org/wiki/Estado\\_de\\_flujo\\_hidr%C3%A1ulico](http://es.wikipedia.org/wiki/Estado_de_flujo_hidr%C3%A1ulico)
38. S/a, *Exhaust Manifold*, septiembre del 2009, <http://www.atpturbo.com/Merchant2/graphics/00000001/Catalog%20Images/Vehicle%20Specific/manifold2.jpg>
39. S/a, *Exhaust Muffler Design Principles*, septiembre del 2009, <http://www.aussiefrogs.com/forum/uploaded/5308/1155795969.pdf>.
40. S/a, *Fluido*, Octubre del 2009, <http://es.wikipedia.org/wiki/Fluido>
41. S/a, *Exhaust Pipes*, septiembre del 2009, <http://allneed.net/product/images/6-2.gif>

42. S/a, *Intercooler*, octubre del 2009, <http://informaciondeautos.com/sistematurbo/>
43. S/a, *Motores Sobrealimentados*, octubre del 2009, <http://www.mecanicavirtual.org/turbo.htm>
44. S/a, *Propiedades Físicas y Químicas del Aire*, septiembre 2009, <http://www.ingenieroambiental.com/pagina=695> S/a, *Ciclo de Cuatro Tiempos*, septiembre del 2009, [http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo\\_de\\_cuatro\\_tiempos](http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_cuatro_tiempos)
45. SEGURA, Javier y otros, *Contrapresión en el escape*, octubre del 2009, <http://www.latorretaonline.com/departamentos/articulos/MANTENIM.%20VEHICULOS/Contrapresion%20en%20el%20escape.pdf>.
46. STATE OF NEVADA, Department of Education, *SCHOOL BUS STANDARDS*, 2005.
47. SZWARC, Alfred, *A Emissão de "Fumaça Preta" por Veículos Diesel e a Posição do tubo de Descarg*, Cetesb – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1989.
48. United States Environmental Protection Agency, *Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust*, Washington DC, mayo del 2002.
49. VIGARA DE OTAZU, Jorge, *Última tecnología en emisiones de motores diesel, simulaciones de resultados e investigaciones de nuevas posibilidades*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Madrid-España, 2007.
50. WALKER, *Componentes y diseño del sistema de escape*, octubre del 2009, <http://espanol.walkerexhaust.com/support/exhaust101/componentsAndDesign.asp>
51. Western Filter Co., Inc., *Determination of silencer pressure drop*, diciembre del 2009, [http://www.westernfilterco.com/silencers/pressure\\_drop.html](http://www.westernfilterco.com/silencers/pressure_drop.html).
52. WHITE, Frank, *Fluid Mechanics*, 5ta. Edición, McGraw-Hill.
53. YASSI Annalee, y otros, *Salud Ambiental Básica*, Primera edición, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, México D.F. México, 2002.

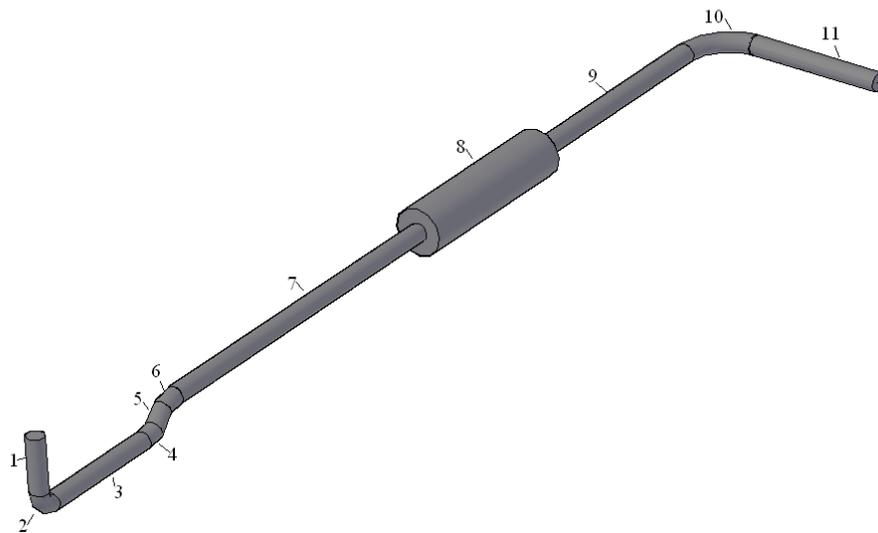
# ANEXOS

## ANEXO N°1

### PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN EN FLOWMASTER V7 AUTOMOTIVE R1

#### A1.1. DATOS DEL SISTEMA DE SISTEMA DE ESCAPE A SER SIMULADO

Se simulará el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda de un bus con chasis Mercedes-Benz OF1721/52, la figura A1.1 muestra los componentes del sistema de escape mientras que la tabla A1.1 presenta los datos de los componentes necesarios para la simulación.



**Figura A1.1** Elementos del sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda bus con chasis Mercedes-Benz OF1721/52

**Fuente:** El autor

CAIDA DE PRESIÓN						
ELEMENTOS TIPO TUBO						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> (mm)		ε (mm)		
1	325	97.6		0.25		
3	930	97.6		0.25		
5	117.3	97.6		0.25		
7	1740.6	97.6		0.25		
9	939.4	97.6		0.25		
11	787.8	97.6		0.25		
ELEMENTOS TIPO CODO						
NÚMERO DE ELEMENTO	Θ (grados)	R/D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> (mm)		ε (mm)	
2	90	2.433	97.6		0.25	
4	25	2.433	97.6		0.25	
6	25	2.433	97.6		0.25	
10	90	2.561	97.6		0.25	
SILENCIADOR						
NÚMERO DE ELEMENTO	LONGITUD (mm)	D <sub>1</sub> ENTRAD (mm)	D <sub>1</sub> SILENC. (mm)	D <sub>1</sub> SALID A (mm)	ε (mm)	ΔP <sub>silenc</sub>
8	1000	97.6	258.4	97.6	0.25	26.27mbar

**Tabla A1.1** Cálculo de la contrapresión en el sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda con silenciador del bus con chasis Mercedes-Benz OF1721/52

**Fuente:** El autor

Además de las características geométricas de los componentes se deben conocer los valores indicados a continuación:

Flujo volumétrico  $Q=0.363\text{m}^3/\text{s}$

Temperatura promedio en el tubo de escape  $T=263^\circ\text{C}$

Diferencia de presión entre la entrada y la salida del silenciador con el flujo volumétrico de  $Q=0.363\text{m}^3/\text{s}$ :  $\Delta P_{\text{silenc}}=26.27\text{mbar} = 0.02627\text{bar}$

## A1.2. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ESCAPE CON SALIDA EN LA PARTE LATERAL IZQUIERDA DE UN BUS CON CHASIS MERCEDES-BENZ OF1721/52 EN FLOWMASTER

### A1.2.1 CREACIÓN DEL MODELO

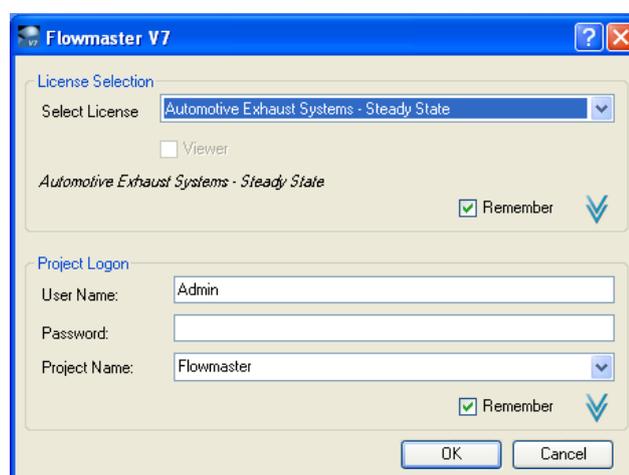
Para abrir el programa hacer doble click en el icono de escritorio Flowmaster V7 que se indica en la figura A1.2.



**Figura A1.2** Icono de Flowmaster en el escritorio

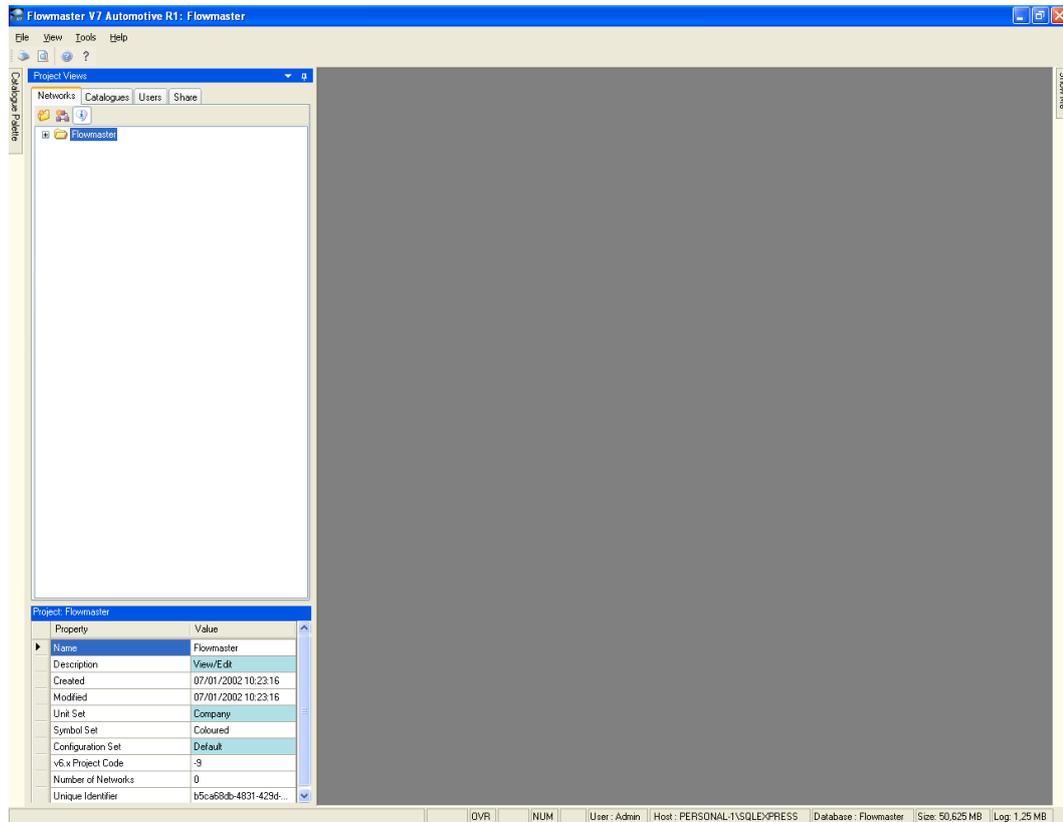
En la pantalla que aparece a continuación mostrada en figura A1.3 seleccionar en la opción **Select License:** la licencia **Automotive Exhaust Systems – Steady State**, esta licencia permite la simulación de sistemas de escape automotrices en fase estable.

A continuación hacer click en **OK**.



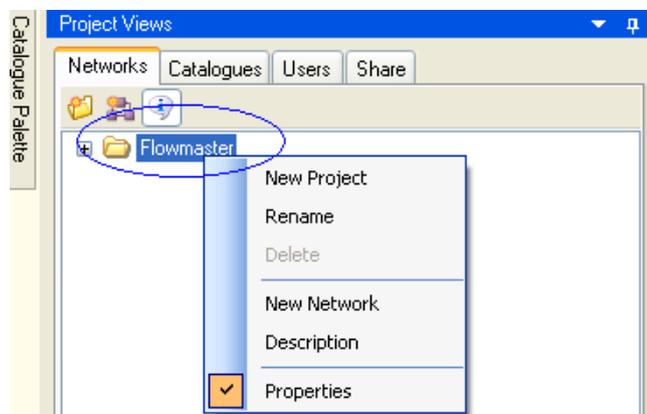
**Figura A1.3** Selección de licencia

Luego de un momento se presenta la pantalla principal del programa, ver figura A1.4.



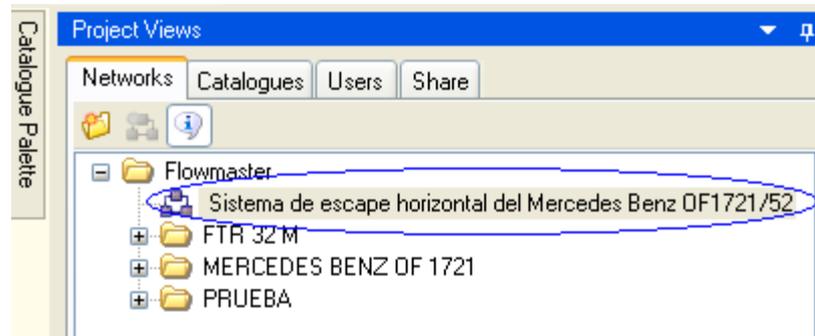
**Figura A1.4** Pantalla principal del programa

En la parte superior izquierda de la pantalla, hacer click derecho en **Flowmaster** y seleccionar **New Network**, esta opción se utiliza para empezar un diseño de un sistema de escape, ver figura A1.5.



**Figura A1.5** Creación de una hoja de diseño.

A continuación se presenta la nueva hoja de diseño la cual en este caso ha sido denominada: **Sistema de escape horizontal del Mercedes-Benz OF1721/52**, ver figura A1.6.

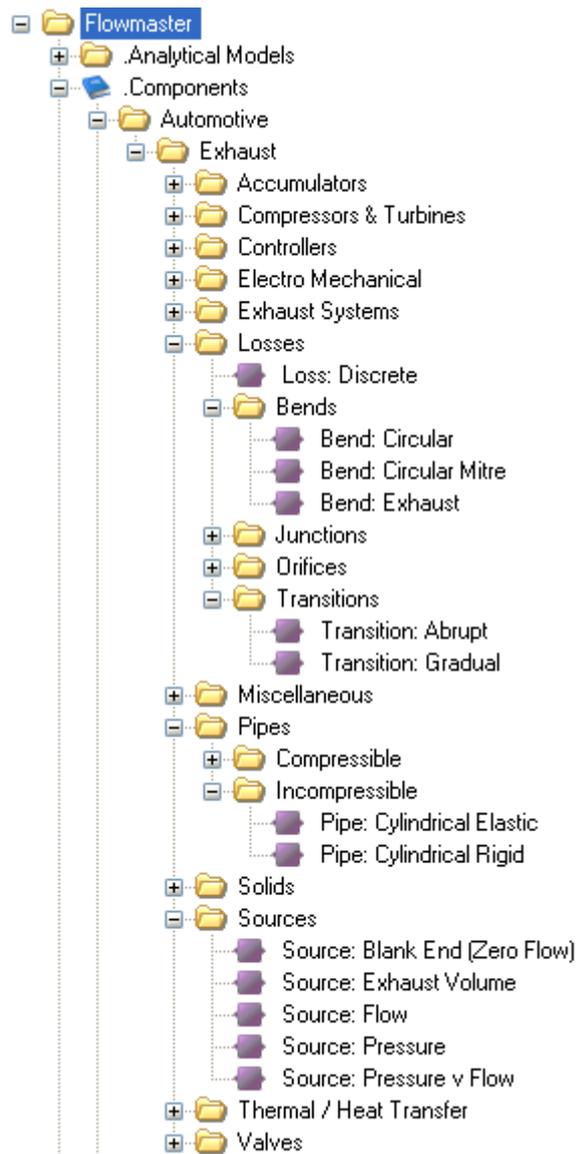


**Figura A1.6** Hoja de diseño para el sistema de escape que será analizado

Luego se introducen todos los componentes del sistema de escape necesarios para el cálculo, se necesitarán los siguientes elementos:

- Fuente de flujo: Entrega un caudal de gases al sistema de escape.
- 6 conductos rectos
- 4 codos
- 1 pérdida discreta: Modela la caída de presión en el silenciador
- 1 dilatación súbita: Modela la pérdida en la salida del tubo de escape
- Fuente de presión: Modela la presión atmosférica a la que está expuesta la salida del sistema de escape.

En la pestaña **Catalogues** seleccionar **Components** → **Automotive** → **Exhaust**, a continuación se muestran los elementos disponibles, ver figura A1.7.



**Figura A1.7** Componentes disponibles para la simulación de sistemas de escape

Para agregar la fuente de flujo seleccionar **Sources** y arrastrar el icono **source: Flow** a la hoja de diseño.

Para agregar un conducto recto seleccionar **Pipes** → **Incompressible** y arrastrar el icono **Pipe: Cylindrical Rigid** a la hoja de diseño.

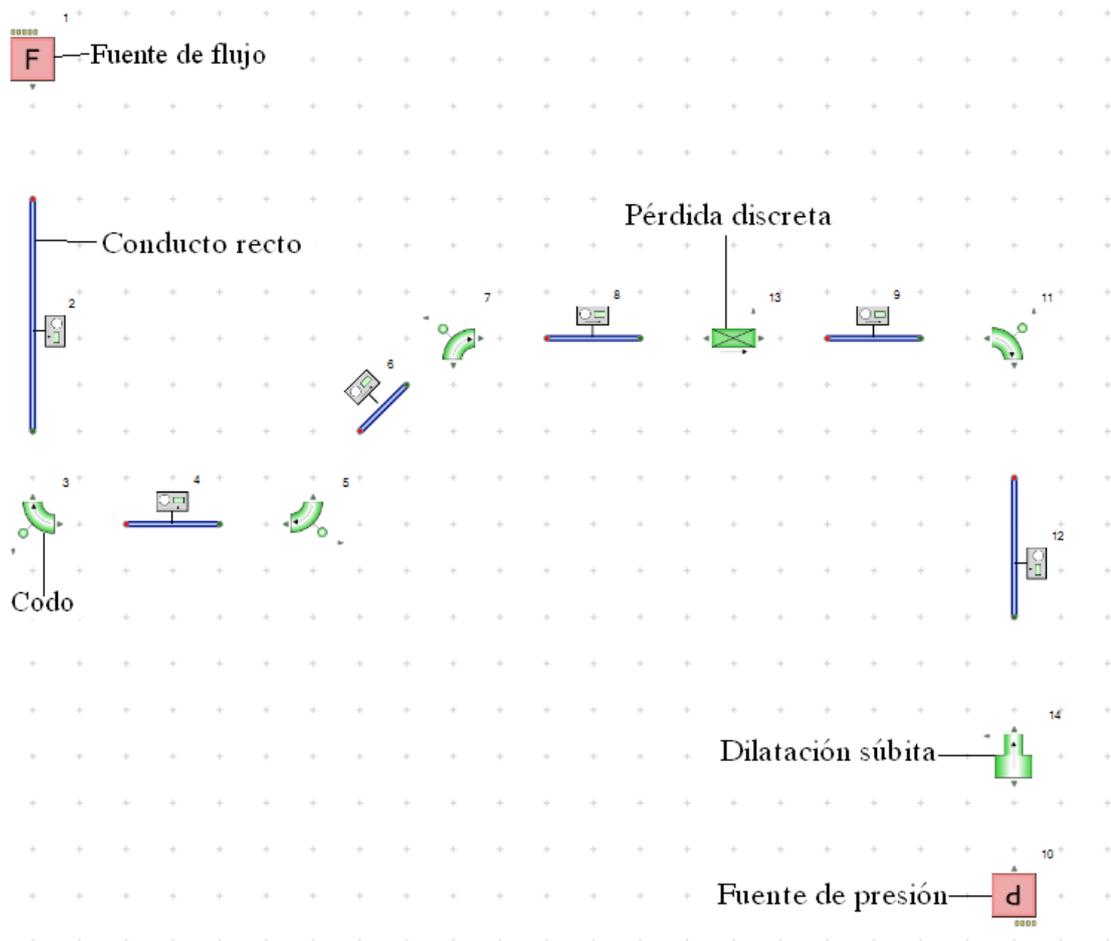
Para agregar un codo seleccionar **Losses** → **Bends** y arrastrar el icono **Bend: Circular** a la hoja de diseño.

Para agregar una pérdida discreta seleccionar **Losses** y arrastrar el icono **Loss: Discrete** a la hoja de diseño.

Para agregar una dilatación súbita seleccionar **Losses** → **Transitions** y arrastrar el icono **Transition: Abrupt** a la hoja de diseño.

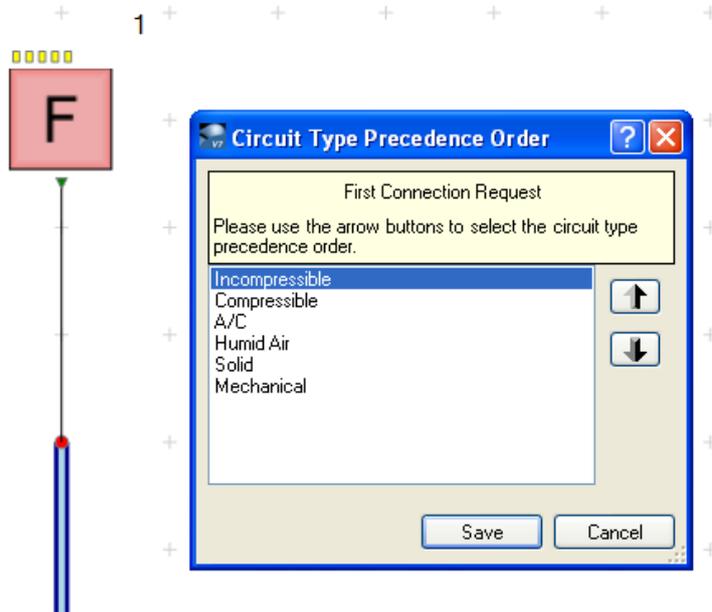
Para agregar una fuente de presión seleccionar **Sources** y arrastrar el icono **source: Pressure** a la hoja de diseño.

La figura A1.8 muestra los componentes insertados en la hoja de diseño del sistema de escape analizado.



**Figura A1.8** Presentación de los componentes en la hoja de diseño.

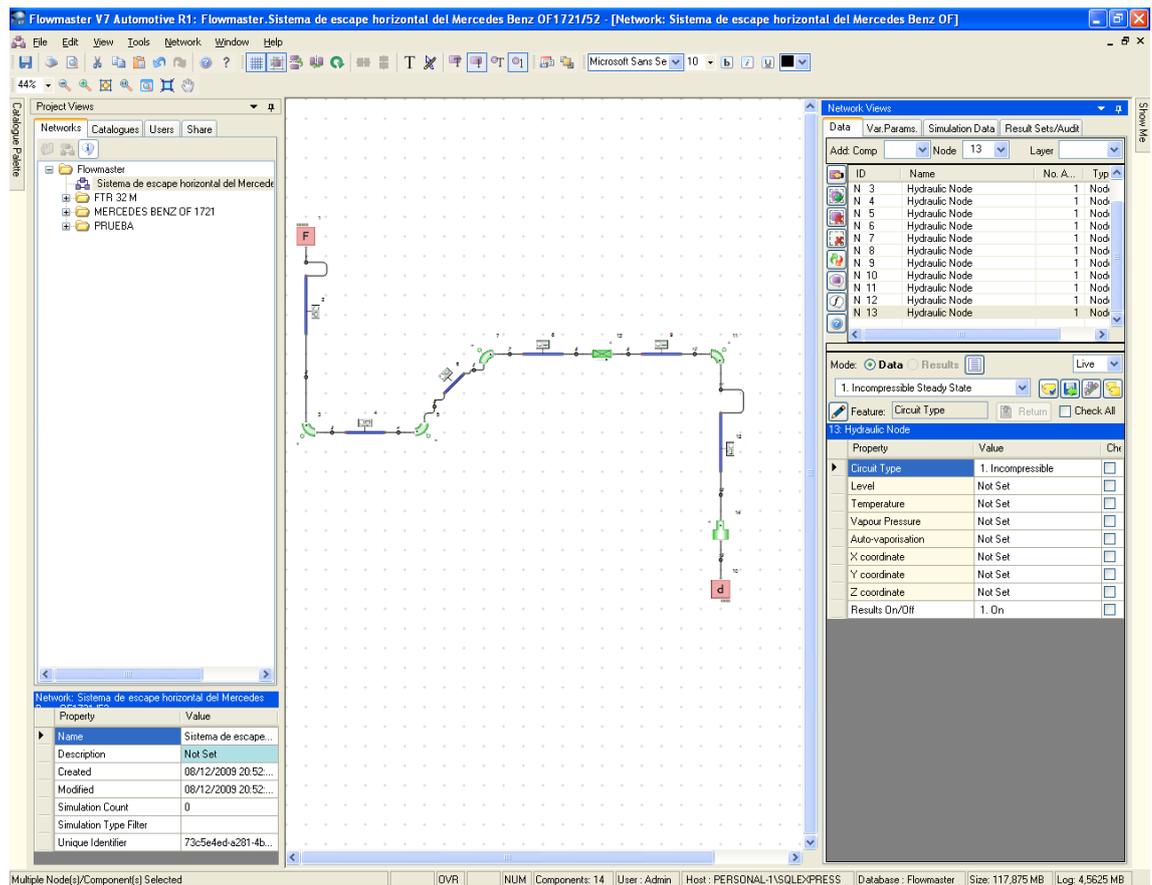
Los elementos deben ser unidos por líneas de flujo, al unir dos elementos se crea un nodo. Luego de realizar la primera unión de dos elementos se presenta la siguiente pantalla:



**Figura A1.9** Creación de la primera línea de flujo para unir dos componentes

La opción **Incompressible** debe ser elegida, el cuadro de la figura A1.9 define el tipo de simulación a ser realizado.

Luego de realizar la unión de los componentes el circuito queda en la siguiente forma:

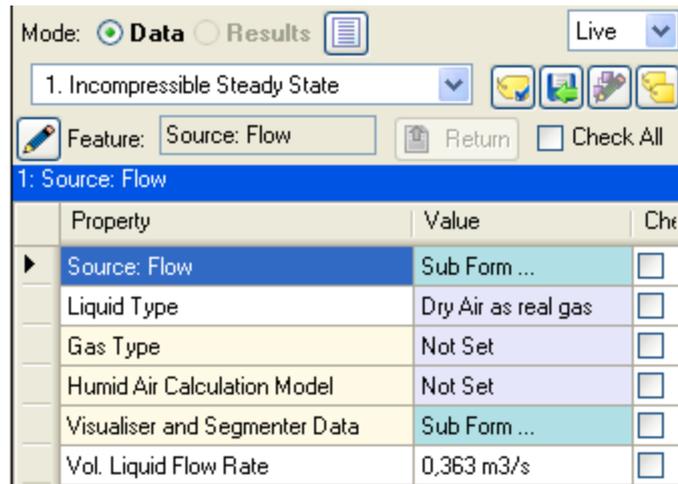


**Figura A1.10** Presentación del sistema de escape analizado en la hoja de diseño

En la parte lateral derecha de la pantalla presentada en la figura A1.10 se presenta un cuadro en el cual se pueden seleccionar las propiedades de los componentes, propiedades del fluido de trabajo, observar los resultados de las simulaciones, etc.

### A1.2.2. PROPIEDADES DE LA FUENTE DE FLUJO

Para definir las propiedades de la fuente de flujo hacer doble click en el icono de la fuente de flujo y modificar las propiedades indicadas en la parte inferior derecha de la pantalla, ver figura A1.11.



**Figura A1.11** Propiedades de la fuente de flujo

Los valores que deben ser modificados son los siguientes:

- Tipo de fluido

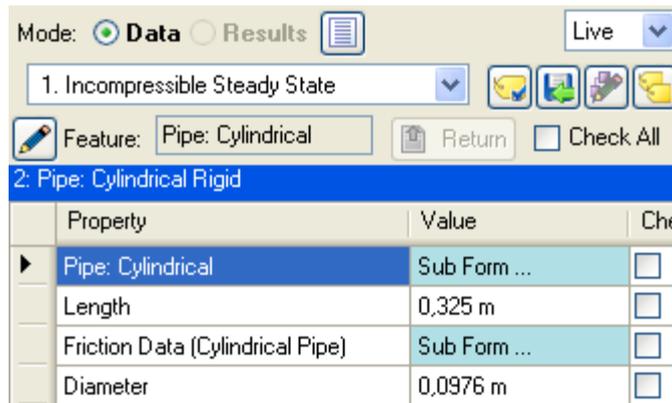
**Liquid type** = Dry Air as real gas

- Caudal de fluido

**Vol. Liquid Flow Rate** = 0,363m3/s

### A1.2.3. PROPIEDADES DEL CONDUCTO RECTO

Para definir las propiedades del conducto recto hacer doble click en el icono del conducto recto y modificar las propiedades indicadas en la parte inferior derecha de la pantalla, ver figura A1.12.



**Figura A1.12** Propiedades de un conducto recto

Los valores que deben ser modificados son los siguientes:

- Longitud de tubería

**Length**= 0,325m

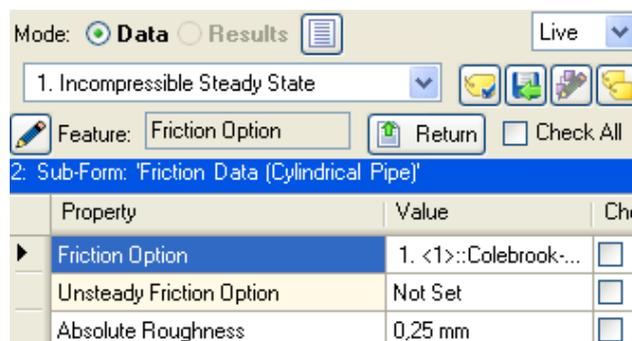
- Diámetro interno de la tubería

**Diameter** = 0,0976m

- Datos para el cálculo de la fricción:

**Friction Data (Cylindrical pipe)** → **Sub form...**

Se presenta un cuadro indicado en la figura A1.13.



**Figura A1.13** Datos para el cálculo de la fricción de un conducto recto

- Forma de calcular las pérdidas por fricción

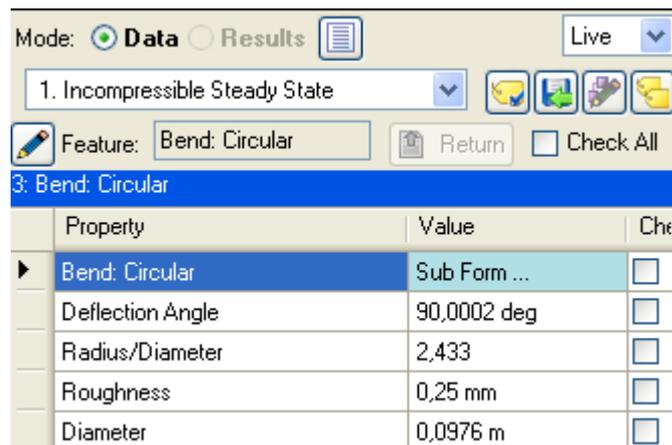
**Friction option** = 1. <1>:: Colebrook – White

- Rugosidad

**Absolute Roughness** = 0.25mm

#### A1.2.4. PROPIEDADES DEL CODO

Para definir las propiedades de un codo hacer doble click en el icono del codo y modificar las propiedades indicadas en la parte inferior derecha de la pantalla, ver figura A1.14.



**Figura A1.14** propiedades de un codo

Los valores que deben ser modificados son los siguientes:

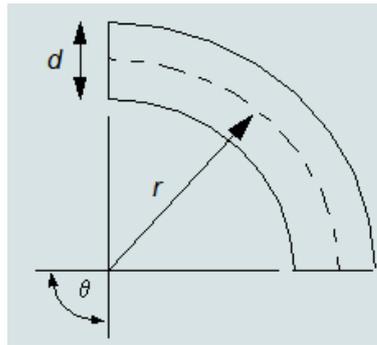
- Ángulo

**Deflection Angle:** 90°

- Relación radio/diámetro

**Radius/Diameter** = 2.433

La relación r/D se define en la figura A1.15



**Figura A1.15** Características geométricas de un codo

- Rugosidad

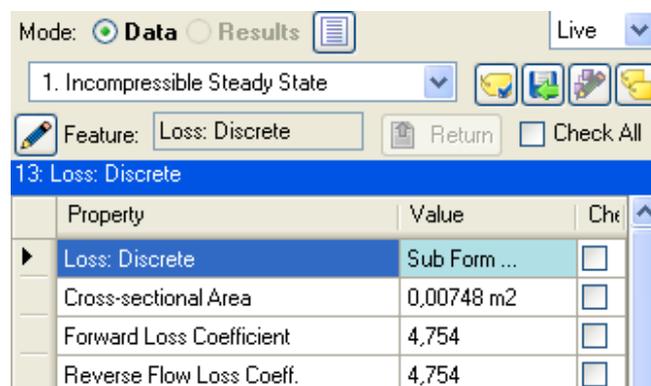
**Roughness** = 0,25mm

- Diámetro interior

**Diameter:** 0,0976mm

#### A1.2.5. PROPIEDADES DE LA PÉRDIDA DISCRETA

Para definir las propiedades de una pérdida discreta hacer doble click en el icono de pérdida discreta y modificar las propiedades indicadas en la parte inferior derecha de la pantalla, ver figura A1.16.



**Figura A1.16** Propiedades de una pérdida discreta

Los valores que deben ser modificados son los siguientes:

- Área transversal

**Cross-sectional Area** = 0,00748m<sup>2</sup>

- Coeficiente de pérdida flujo hacia adelante

**Forward Loss Coefficient** = 4,754

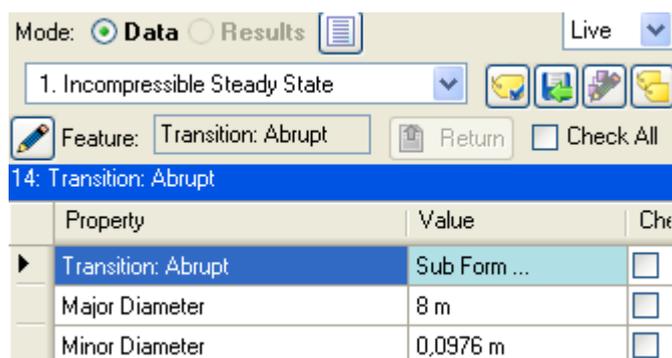
- Coeficiente de pérdida flujo hacia atrás:

**Reverse Flow Loss Coefficient** = 4,754

El valor de la caída de presión en la pérdida discreta es de 26.27mbar.

#### A1.2.6. PROPIEDADES DE LA DILATACIÓN SÚBITA

Para definir las propiedades de la dilatación súbita hacer doble click en el icono de dilatación súbita y modificar las propiedades indicadas en la parte inferior derecha de la pantalla, ver figura A1.17.



**Figura A1.17** Propiedades de una dilatación súbita

Los valores que deben ser modificados son los siguientes:

- Diámetro mayor:

La pérdida en la salida siempre tiene un valor  $K=1$ , para que el coeficiente sea igual a uno se debe escoger un diámetro mayor bien alto.

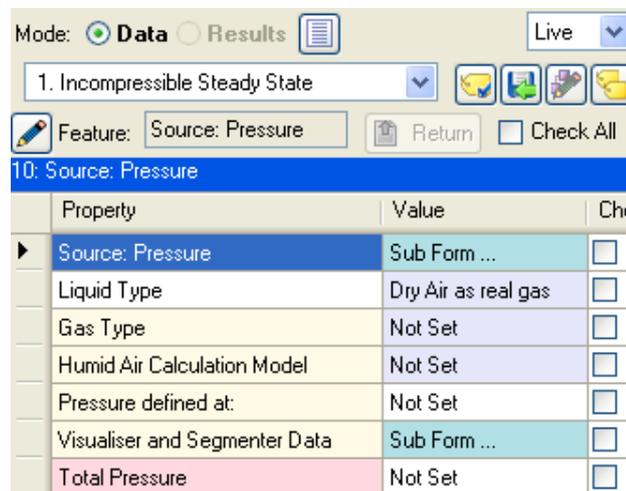
**Major Diameter** = 8m

- Diámetro menor:

**Minor Diameter** = 0,0976m

#### A1.2.7. PROPIEDADES DE LA FUENTE DE PRESIÓN

Para definir las propiedades de la fuente de presión hacer doble click en el icono de fuente de presión y modificar las propiedades indicadas en la parte inferior derecha de la pantalla, ver figura A1.18.



**Figura A1.18** Propiedades de una fuente de presión

Los valores que deben ser modificados son los siguientes:

- Tipo de fluido

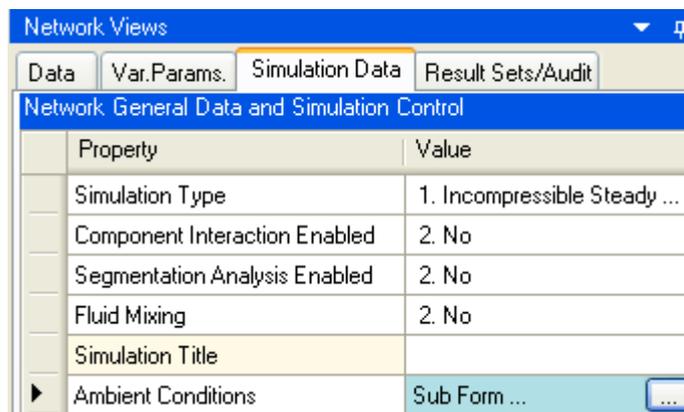
**Liquid Type = Dry Air as real gas**

- Presión

La presión se define posteriormente, la opción **Total Pressure** debe ser dejada en **NOT SET**.

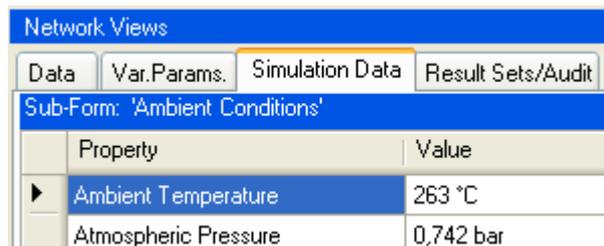
### A1.2.8. DATOS DE LA SIMULACIÓN

En la parte superior derecha de la pantalla se selecciona la pestaña **Simulation Data**, en la pantalla que se presenta revisar que la opción **Simulation Type = 1. Incompressible Steady State**, ver figura A1.19.



**Figura A1.19** Datos de la simulación

Luego se escoge la opción **Ambient Conditions** → **Sub Form**, ver figura A1.20.



**Figura A1.20** Propiedades del sub-menú Ambient Conditions

Los valores que deben ser modificados son los siguientes:

- Temperatura

**Ambient Temperature** = 263°C

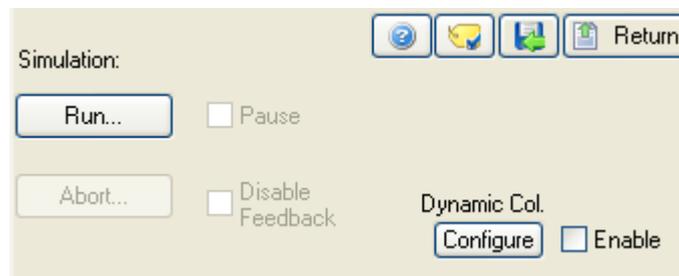
Con la temperatura seleccionada en esta opción se calculan las propiedades del fluido.

- Presión atmosférica

**Atmospheric Pressure** = 0,742 bar

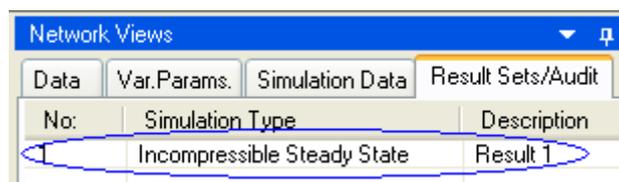
#### A1.2.9. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Luego de completar las características de todos los componentes se realiza la simulación dando un click en la parte lateral derecha de la pantalla en el botón **Run** en la pestaña **Simulation Data**, ver figura A1.21



**Figura A1.21** Ventana de inicio de la simulación.

Para observar los resultados ir a la parte superior derecha de la ventana y dar un click en la pestaña **Results/ Sets Audit**, ver figura A1.22.



**Figura A1.22** Ventana que contiene la lista de los resultados de las simulaciones.

Los resultados se graban en orden y son identificados con números, para revisar los datos de una simulación dar doble click en el resultado deseado.

En la parte lateral derecha de la pantalla, en el lugar donde antes se revisaban los datos de cada componente ahora se presentan los resultados como: caída de presión, flujo volumétrico, número de Reynolds, etc.

Property	Value
Arm: 1 Flow Rate (Volumetric FL...	-0,343009 m3/s
Arm: 2 Flow Rate (Volumetric FL...	0,343252 m3/s
Arm: 1 Velocity (Velocity)	-45,8475 m/s
Arm: 2 Velocity (Velocity)	45,88 m/s
Arm: 1 Reynolds Number (Norm...	82021,6
Arm: 2 Reynolds Number (Norm...	82021,6
Pressure Drop (Pressure Differe...	0,000491251 bar
Loss Coefficient Result (Loss C...	0,0908187
Pipe Length (Length)	0,325 m

**Figura A1.23** Resultados de la simulación de un conducto recto.

La contrapresión se obtiene al restar la presión en la parte inicial del sistema menos la presión en la parte final, en la figura A1.24 se presentan los resultados de la simulación que son utilizados para calcular la caída de presión total del sistema.

Property	Value
Node: Fluid Identifier (Normalise...	Dry Air as real gas
Node: Pressure (Pressure)	0,78705 bar
Node: Pressure at Node Level (...)	0,78705 bar

Property	Value
Node: Fluid Identifier (Normalise...	Dry Air as real gas
Node: Pressure (Pressure)	0,742 bar
Node: Pressure at Node Level (...)	0,742 bar

**Figura A1.24** Valores de presión de un nodo que está en la parte inicial del sistema y otro nodo que está en la parte final del sistema.

$$\text{CONTRAPRESIÓN} = 0.78705\text{bar} - 0.742\text{bar} = 0,04505\text{bar}$$

$$\text{CONTRAPRESIÓN} = 45,05\text{mbar}$$

El sistema de escape con salida en la parte lateral izquierda de un bus con chasis Mercedes-Benz OF1721 tiene una caída de presión de 45.05mbar a 2500 revoluciones por minuto.

## ANEXO N°2

### RECOMENDACIONES PARA LA MODIFICACIÓN DEL SISTEMA DE ESCAPE DE CHEVROLET DE ECUADOR<sup>19</sup>

#### Alargamiento tubo de escape

Las recomendaciones en lo referente al tubo de escape son:

- El grosor debe ser el mismo que el escape existente
- El alargamiento se lo hace por la parte inferior izquierda hacia la cola del chasis.  
Cabe indicar que si no existen cambios bruscos en la dirección del escape no se crean problemas evitando la contrapresión de válvulas de escape.
- Si por exigencias locales se determina en la parte superior, el codo debe tener un ángulo de 45° con avance progresivo hasta llegar a la perpendicularidad, evitando acumulación de gases.
- El tubo de escape tiene que estar no menos de 3cm de cualquier punto de la carrocería.

---

<sup>19</sup> Información obtenida en la Unidad Municipal de Tránsito