

Propuesta para la Recuperación, Operación y Mantenimiento de Sistemas de Ventilación en Túneles de Carretera

Caso específico: TÚNEL BOQUERÓN I

Rafael Fernando Campo Curiel (1), Luis Bernardo De Sá Fernández (1)

y Francois Ucciani (2)

(1) resista, ingeniería Industrial, UCAB.

(2) Profesor Guía, ingeniería Mecánica, industrias METALAIRE, C.A., Manche.

RESUMEN

La necesidad de recuperar el sistema de ventilación del Túnel Boquerón I por parte de la empresa encargada de la manutención de la Autopista Caracas-La Guaira, ICAPEV C.A., y por la comunidad en general, ha motivado la elaboración de esta propuesta cuyo objetivo es diseñar un sistema de ventilación capaz de asegurar la calidad del aire en cualquier túnel de carretera, basado en las recomendaciones de las Normas Internacionales «Permanent International Association of Road Congress», PIARC; junto con un plan de mantenimiento preventivo para garantizar el buen funcionamiento y la vida útil de los equipos.

I.- AUDITORÍA TÉCNICA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN ACTUAL DEL TONEL BOQUERÓN I.

1.1.- Infraestructura existente.

El sistema de ventilación consta de 19 ventiladores Vena-axiales, donde 15 de ellos actúan como inyectores y los 4 restantes como extractores, los cuales trabajando en combinación inducen un flujo de aire de en el interior del túnel.

Estos ventiladores están conectados, mediante ductos de acero, a un plenum de ventilación (dueto prin-

cipal) construido con concreto, dividido en tres secciones para el túnel de subida y en dos para el de bajada. Estas secciones se encuentran físicamente separadas por paredes de concreto. El plenum de ventilación se extiende a lo largo del túnel sobre las vías de circulación automotor, separados entre sí por un plafón de concreto, el cual posee ranuras de inyección transversal distribuidas convenientemente a lo largo de los dos canales de circulación. La inyección de aire fresco y limpio se produce en tres puntos en el túnel de subida y en dos en el de bajada, mientras que la extracción se produce sólo en un punto en el túnel de subida al nivel de la galería de circulación, el cual coincide físicamente con una de las cuatro aberturas transversales que comunican a ambos túneles, logrando así extraer un porcentaje de aire viciado de las dos galerías.

Cada uno de estos puntos tiene tres ventiladores en paralelo, a excepción del punto de extracción que consta de cuatro.

Las tomas de aire fresco de los ventiladores están ubicadas hacia la montaña, con el fin de garantizar la pureza del aire en la inyección. El sistema de extracción es transversal y descarga el aire viciado directamente al valle de la montaña a través de un túnel corto. En cuanto al estado físico de los ductos de aire como la infraestructura general de los túneles se encuentra en buenas condiciones a excepción de algunas zonas de los plafones donde existen pequeñas rupturas del mismo.

1.2.- Estado operativo del Sistema

Actualmente el sistema de ventilación no se encuentra en funcionamiento ni en condiciones de poder

operar debido al mal estado de los equipos provocado por las condiciones ambientales severas de la zona (humedad, salitre) y la falta de mantenimiento, que han llevado a la corrosión de la carcasa, rotor y partes metálicas de los ventiladores así como daños en los motores. El sistema eléctrico colapso producto de la desidia y del hurto de sus componentes y del cabreado.

1.3.- Grado de contaminación existente y puntos críticos de ventilación

En el año 1979, el MARNR, por solicitud del MTC, realizó mediciones de los niveles de contaminación del Monóxido de Carbono (CO) existentes en los túneles Boquerón 1 y Boquerón II. No se midieron los dañados, que el túnel está lleno (3600 veh/h) y circulan a 15 Km/h. El valor máximo de contaminación que arrojó esta simulación es de 2515 ppm a 1470 m del portal Norte.

Según el análisis de los valores y las gráficas realizadas con los datos del MARNR, se pudo observar que los niveles críticos de contaminación se alcanzan en el canal de subida alrededor de los 1100 m. del portal Norte y en el canal de bajada alrededor de los 1300 m del portal Sur.

1.4.- Mantenimiento del sistema de ventilación

Por el grado de deterioro que presentan las unidades de ventilación e infraestructura, se puede evidenciar que no ha existido un mantenimiento preventivo apropiado a todo el sistema. Existe cierta diversidad de daños presentes en los ventiladores como por ejemplo (para el año 1995), el desbalanceo de las aspas, la destrucción de rodets, varios arrancadores dañados, etc., que reflejan la falta de un mantenimiento correctivo permanente, el cual se manifiesta en la inoperabilidad del sistema.

Las salas de los ventiladores se encuentran habitadas por palomas y otros animales cuyas heces han contribuido al deterioro físico de los equipos y los vidrios de las ventanas están en su mayoría rotos, especialmente los de la fachada frontal, contribuyendo a que el aire contaminado proveniente de los portales forme parte del aire fresco que entra a las salas de ventilación.

1.5.- Seguridad en caso de incendio

El sistema de ventilación actual no cumple con las normas internacionales vigentes que garantice la rápida y segura evacuación de los usuarios en caso de un incendio provocado dentro del túnel. Para lograr esta condición es necesario contar con la reversibilidad del flujo de aire (ventiladores reversibles) de tal manera que se induzca el humo hacia el punto de ventilación más conveniente concediendo un área libre para el desalojo de las personas sin sufrir lesiones (intoxicaciones, asfixias).

16.- Normas y regulaciones para gases contaminantes

No existe en Venezuela ninguna Ley que regule el nivel de contaminación permisible en túneles de carretera ni las emisiones de los gases contaminantes de los vehículos. La única referida a la contaminación provocada por los vehículos es la que existe en la Ley Penal del Ambiente del año 1992 donde se menciona que el nivel de opacidad permisible para los vehículos con motores diesel no debe exceder las 40 unidades Hartridge.

1.7.- Posibilidad de Recuperar los Equipos Existentes

Revisando el presupuesto entregado por Industrias Metalaire C.A. a la empresa ICAPEV C.A. el 14 de mayo de 1997, se aprecia que es muy viable la recuperación de la mayoría de los equipos existentes.

Para esta fecha, la cotización de la recuperación del sistema es de Bs. 288.1 94.503. Este presupuesto engloba la recuperación total de los equipos de ventilación existentes con sus accesorios sin ningún tipo de modificación en el diseño del sistema actual de ventilación.

En vista de que los ventiladores no son reversibles el sistema de ventilación no cumple con las Normas Internacionales contra incendio (requisito básico para el diseño). Por esta razón no es recomendable reacondicionar estos equipos para un nuevo sistema de ventilación acorde con las exigencias actuales.

I.- PROPUESTA PARA LA RECUPERACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DEL TÚNEL BOQUERÓN I.

11.1.- Datos del Túnel

El Túnel Boquerón I se encuentra ubicado en un ambiente rural, con gran afluencia de vehículos por lo que se considera, simultáneamente, un túnel de tipo urbano. Los parámetros de construcción, uso, así como del ambiente que lo rodea se resumen en la tabla # 11.1.

Parámetro	
Tipo de túnel según PIARC	Rural-Urbano
Número de galerías	2
Uso por galería	Unidireccional
Número de vías por galería	2
Longitud	1845 m.
Altura del túnel	4,40 m.
Ancho del túnel	8,81 m.
Ancho de la vía	7,43 m.
Area transversal	37,36 m ² .
Altura del ducto de suministro	1,6 m.
Ancho del ducto de suministro	6,0 m.
Area transversal del ducto de suministro	7,31 m ² .
Altitud Portal Norte	336 m.
Altitud Portal Sur	401 m
Temperatura promedio	21 °C
Pendiente del camino	3,5%
Tipo de sistema de ventilación instalada	Semi-transversal

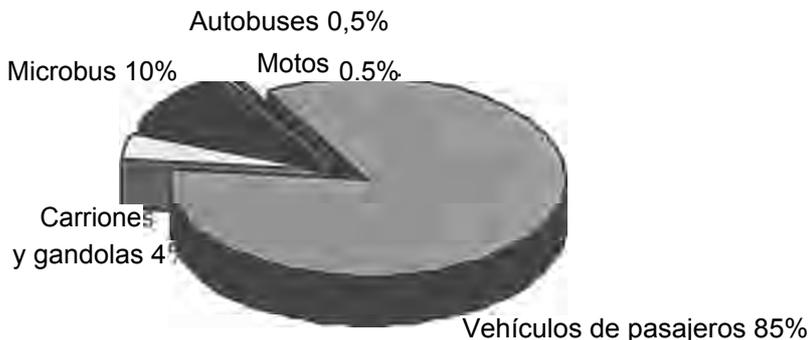
Tabla # fi.1

Características del Túnel Boquerón

11.2.- Tráfico del Túnel

El parque automotor que circula por la autopista Caracas-La Guaira está compuesto por vehículos de pasajeros impulsados por motores a gasolina, microbuses (en donde el 30% aproximadamente, utiliza gasolina o

gas natural como combustible y el resto diesel), autobuses y camiones de mediano y gran peso, que trabajan con motores diesel. La composición porcentual depende del día y del horario de circulación; pero el promedio general (aproximado), excluyendo las horas picos, se puede apreciar en el gráfico # 11.1.



Gráfico

Composición promedio del tráfico de la autopista Caracas - La Guaira

Día	sentido La Guaira - Caracas		Sentido Caracas - La Guaira	
	Hora	Flujo máximo [veh/h]	Hora	Flujo máximo [veh/h]
De Lunes a Viernes	De 6:00 am a 9:00 am	2500	De 6:00 am a 9:00 am	2000
	De 5:00 pm a 8:00 pm	1900	De 5:00 pm a 8:00 pm	2300
Sábado	De 1:00 pm a 5:00 pm	1700	De 6:00 am a 1:00 pm	2500
	De 5:00 pm a 8:00 pm	2100	De 1:00 pm a 8:00 pm	1600
Domingo	De 1:00 pm a 6:00 pm	2700	De 6:00 pm a 8:00 pm	2400
	De 6:00 am a 12:00 pm	3200	De 12:00 pm a 8:00 pm	1100

Tabla # [1.2

Flujo máximo en función del día y horario de circulación

Fuente: MTC (Marzo 1997) y MAXIPISTA (May-Sep 1997)

En la tabla # 11.2 se aprecia en resumen, los flujos máximos de vehículos en distintos horarios, determinados a partir del análisis de los canteas realizados.

Se efectuaron distintos escenarios de operación para el diseño del sistema de ventilación tomando en cuenta la composición porcentual de vehículos por categorías (automóviles, autobuses, camiones, etc.), en función del horario de circulación y del tráfico normal y crítico a distintas velocidades.

11.3.- Factores de emisión.

El hecho de que el parque automotor venezolano sea relativamente viejo (65% viejos y 35% nuevos, según un muestreo efectuado en la autopista) y la tasa de renovación baja, comparada con los países industrializados, conlleva a niveles altos de contaminación.

11.3.1.- MONOXIDO DE CARBONO

Para estimar el valor del CO emitido por los vehículos se realizó un promedio ponderado del promedio de los factores básicos de emisión de las distintas normas internacionales en cuanto a emisiones de gases contaminantes y fueron ajustados dependiendo de la velocidad, la altitud y el gradiente del camino. Los resultados se muestran en la tabla #11.3.

Sentido Norte-Sur		Sentido Sur-Norte
Km/h	C1o(m ³ /h.veh)	Qo(m ³ /h.veh)
10	0,842	0,486
40	0,969	0,559
60	1,053	0,608
80	1,179	0,680

Tabla # 11.3
Factor básico de emisión del CO corregida
Óxidos de Nitrógeno

Para estimar el valor de los NO_x emitidos por los automóviles de pasajeros se realizó un promedio ponderado del promedio de los factores básicos de emisión de distintas normas internacionales en cuanto a emisiones de gases contaminantes y fueron ajustados dependiendo de la velocidad, altitud y gradiente del camino. Los resultados se muestran en la tabla # 11.4 y 11.5.

Km/h	Qo(m ³ /h.aut o)	Qo(m ³ /h.M. Bus)	Qo(m ³ /h.cam)
10	0,014	0,072	0,202
40	0,054	0,268	0,750
60	0,080	0,400	-
80	0.152	-	-

Tabla # 11.4

Factor básico de emisión de los NO_x corregido- Sentido La Guaira-
Caracas

Km/h	Qo(m ³ /h.aut o)	Qo(m ³ /h.M- Bus)	Qo(m ³ /h.cam)
10	0,005	0,027	0,076
40	0,020	0,101	0,281
60	0,030	0,150	-
80	0,057		

Tabla # 11.5

Factor básico de emisión de los NO, corregido-Sentido Caracas-La
Guaira

V3.3.- PARTICULAS DIESEL (HUMOS)

Los vehículos que utilizan el combustible diesel como fuente de energía son los principales generadores de este contaminante capaz de disminuir considerablemente la visibilidad

en túneles de carretera. Entre estos vehículos se encuentran los camiones y autobuses como los mayores contribuyentes. En la tabla # 11.6 se muestran los factores básicos de emisión ajustados.

Km/h	Sentido La Guaira-Caracas		Sentido Caracas-La Guaira	
	Qo(m ² /h.M-Bus)	Qo(m ² /h.cam.)	Qo(m ² /h.M-Bus)	Qo(m ² /h.cam.)
10	201,83	458,65	59,67	183,6
40	456,30	1038,65	66,69	205,2
60	789,75		66,69	

Tabla # 11.6

Factor basico de emisión de las partículas diesel (humos) corregido

11.4. REQUERIMIENTOS DE DILUCIÓN

11.4.1.- INYECCIÓN

A partir de los escenarios propuestos juntamente con los factores básicos ajustados, se determinaron los caudales mínimos de dilución de los distintos contaminantes, en la cual se tomó el valor de la concentración admisible dentro del túnel para el CO de 200 ppm y de la constante de extinción para los humos diesel de $9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ (40% de visibilidad). Estos valores son los recomendados por las Normas PIARC, en donde el primero re-

presenta un promedio entre el nivel admisible para un tráfico congestionado y la clausura del túnel, y el segundo para un tráfico congestionado o estacionario. Para los NO se tomó el valor de 20 ppm, valor inferior al recomendado por las Normas COVENIN n° 2250-90 para lugares de trabajo (25 ppm), analogía realizada en vista del desconocimiento de Normas Nacionales referentes a túneles de carretera. En las tablas # 11.7 y 11.8 se resumen los caudales necesarios para los distintos contaminantes en función del escenario estudiado para su situación de mayor riesgo (10 km/h y túnel lleno),

ESCENARIOS	Q{ft ³ /min}		
	CO	NO _x	Humos
Día hábil hora: 6:00 am - 9:00 am	1.101.046	244.961	440.769
Día hábil, hora: 9:00 am - 10:00 am	725.973	250.948	819.493
Día hábil, hora: 10:00 am - 5:00 pm	776.011	201.503	435.876
Día hábil, hora: 5:00 pm - 8:00 pm	864.700	184.059	282.482
Día Sábado, hora: 5:00 pm - 8:00 pm	955.721	267.469	660.590
Día Domingo, hora pico crítica: 6:00 pm - 8:00 pm	1.123.019	236.091	343.362

Tabla #11.7

Caudales de dilución requeridos para los distintos escenarios de operación Sentido La Guaira-Caracas

ESCENARIO	Q(ft ³ /min)		
	CO	NO _x	Humos
Día hábil, hora: 6:00 am - 9:00 am	522.482	83.797	136.576
Día hábil, hora: 9:00 am - 5:00 pm	446.353	99.239	231809
Día hábil, hora: 5:00 pm - 8:00 pm	600.855	94.478	146.139
Sábado, hora: 6:00 am - 1:00 pm	635.145	104.453	184.211
Domingo, hora: 6:00 am - 12:00 m	625.712	85.849	100.220

Tabla # 11.8

Caudales de dilución requeridos para los distintos escenarios de operación

Sentido Caracas - La Guaira.

Los caudales de dilución que se tomaron en cuenta para ambas galerías de circulación, en el diseño del sistema de ventilación corresponden al resultado mayor observado en el estudio que se realizó para los distintos escenarios. En el sentido La Guaira-Caracas el punto crítico se presenta los días Domingo, entre las 6:00 y 8:00 pm, el cual necesita un caudal de 1.1123.019 ft³/min, y en el sentido contrario los días Sábado de 6:00 am a 1:00 pm., con un caudal de 635.145 ft³/min.

hacia el portal Norte y el flujo natural del aire que viaja en sentido contrario, trae como consecuencia la generación de turbulencias a lo largo del túnel y por ende un barrido pobre de los gases existentes, problema que podrá ser mitigado por la extracción y el direccionamiento del aire mediante este caudal estimado, el cual, para los cuatro ventiladores operando en conjunto, corresponde al 35% del aire inyectado en ambas galerías de circulación.

11.4.2.- EXTRACCIÓN.

El caudal estimado para la sala de extracción proviene del 25% del aire inyectado en el túnel de subida y del 50% del aire inyectado en el túnel de bajada. El flujo de aire impulsado por el efecto pistón de los vehículos

11.4.3.- INCENDIO .

En el caso de un incendio, los ventiladores trabajarán en sentido contrario, extrayendo el humo lo más rápido posible. Esto se logra empleando el caudal máximo que puede manejar el ventilador. Con esto se puede garantizar las velocidades de extracción aproximadas, en cada sección de ambas galerías, mostradas en la tabla # 11.8. (La velocidad mínima recomendada por las Normas PIARC es 787 ft/min),

Sección	Sentido La Guaira-Caracas			Sentido Caracas-La Guaira	
	1 ^{ra}	2da	3ra	1ra	2da
Velocidad de extracción (ft/min)	787	1023	1003	789	806

Tabla # 11.8

Velocidades de extracción del humo de incendio en cada sección de las galerías de circulación

11.5.- Pérdidas de Carga en el Plenum de Ventilación.

Una vez obtenido los caudales de dilución de contaminantes requeridos para cada una de las galerías de circulación del túnel, se procedió a determinar la forma

de realizar la introducción del aire fresco. Para ello se empleó una rutina de cálculo con las que se determinaron las pérdidas de presión total. En la tabla # 11.9 se muestran las presiones totales obtenidas.

Sección	Sentido La Guaira-Caracas			Sentido Caracas-La Guaira		
	1 ^{ra} *	2 ^{da}	3 ^{ra}	Extracción	1 ^{ra} *	2 ^{da}
Caudal (CFM)	99.822	138.295	136.216	154.500	104.103	107.612
Presión Total ("w.g)	2,73	6,56	6.40	3,08	4,83	5,31

*Primera sección a partir de portal Norte

Tabla # 11.9

Caudal máximo y presión total de cada ventilador a ser instalado en el túnel Boquerón I.

11.6.- SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS Y ACCESORIOS

V.6.1.- SELECCION DE LOS VENTILADORES

Para la selección de los ventiladores se tomaron en cuenta los siguientes factores:

- **Caudales máximos y presiones totales:** mostrados en la tabla # 11.9.

- **Espacio disponible:** Las salas de ventilación poseen una infraestructura para albergar tres ventiladores con diámetros nominales comprendidos entre 1,8 y 2.06 m., por lo que la selección de los nuevos debe ser similar, a saber el sistema de ventilación constará de 15 ventiladores reversibles nuevos y 4 recuperados para realizar la extracción.

- **Nivel de ruido:** El nivel de ruido de los ventiladores no debe exceder los 90 dB para un máximo de 8 horas de exposición y 115 dB para un máximo de 15 min.

- **Condiciones ambientales:** Los equipos de ventilación deben estar diseñados para soportar las características del ambiente del túnel al que están sometidos, en

caso normal (humedad, salitre, contaminación, etc.) o especial (temperaturas elevadas producto del humo de incendios).

- **Reversibilidad del sistema:** La manera de controlar el humo producto de un incendio dentro del túnel es mediante la reversibilidad del sistema de ventilación.

- **Potencia y eficiencia de los ventiladores:** Con todos los puntos expuestos anteriormente, se analizaron distintas curvas de ventiladores reversibles tomando en cuenta la eficiencia y potencia consumida, y por recomendaciones de la empresa METALAIRES C.A. se seleccionaron los ventiladores descritos en la tabla # 11.10.

V.6.2.- ACCESORIOS

En el área de la ventilación existe una gama de accesorios que contribuyen al mejoramiento del flujo del aire, reducción de ruidos, seguridad, uniones, etc. Para el sistema de ventilación propuesto se recomienda la instalación de los siguientes accesorios:

- Dampers
- Silenciadores
- Cono en la succión de los ventiladores
- Malla de protección en la succión
- Junta flexible

Sección	Sentido Norte-Sur				Sentido Sur-Norte	
	1 ^a *	2 ^{da}	3 ^{ra}	Extracción	1 ^a *	2 ^{da}
Tipo:	Tuboaxial Reversible	Tuboaxial Reversible	Tuboaxial Reversible	Venaxial Unidireccional	Tuboaxial Reversible	Tuboaxial Reversible
Diametro del impeler [mm]	1.995	1.995	1.995	2.060	1.995	1.995
Diametro del cubo	1.000	1.000	1.000	1.100	1.000	1.000
Caudal (CFM)	100.000	138.300	136.300	154.500	104.200	107.700
Presión Total ("w.g)	2,73	6,56	6,40	3,08	4,83	5,31
Eficiencia (%)	88,0	83,2	83,2	76,0	87,0	87,4
N° de alabes	16	16	16	6	16	16
Inclinación Alabes	18°	26°	25°	Setting 3,0	16°	17°
Pot. máx. consumida. (HP)	49	173	165	99	91	103
Pot. máx. del motor (HP)	58	207	198	120	110	124
Ruido [Db (A)]	104	112	110	109	106	106
R.P.M.	713	891	891	1160	891	891
Características	575V-3F 60Hz	575V-3F 60Hz	575V-3F 60Hz	575V-3F 60Hz	575V-3F 60Hz	575V-3F 60Hz
Velocidad aire salida [PPM]	2.957	4.090	4.031	4.306	3.082	3.185

"Primera sección a partir del portal Norte

Tabla # 11.10

Características de cada ventilador a ser instalado en el túnel Boquerón |

V6.3.- SENSORES

La propuesta consta de la automatización del sistema de ventilación. El sistema recomendado es la serie VICOTEC 400, en su versión 404 y 405 de la empresa SICK, las cuales miden conjuntamente CO/visibilidad y CO/NO/visibilidad, respectivamente; (con un rango de medida para el CO de 0 a 300 ppm, NO de 0 a 100 ppm y Visibilidad de 0 a 0,015 m") junto con el dispositivo FLOWSIC 200 usado para medir la velocidad y dirección del aire en el túnel (con un rango de medida de -20 m/s a +20 m/s), para garantizar el barrido de los gases contaminantes.

Las respuestas de las mediciones obtenidas por los sensores son enviadas a una unidad evaluadora (VCA 400), la cual las procesa y envía las señales correspon-

dientes a un Controlador Lógico Programable (PLC), quien se encarga de analizar la información y enviar la respuesta inmediata hacia unos variadores de frecuencia propuestos para ser conectados a los ventiladores.

Los variadores de frecuencia alimentan a los ventiladores y los hace funcionar con mayor o menor número de revoluciones por minuto, reflejándose en los caudales, consumiendo **sólo** la energía necesaria para un escenario de operación en particular. El número de velocidades determinado es cuatro.

Los sensores para la medida de los niveles de gases contaminantes estarán ubicados como lo indica la tabla # 11.11.

Sensor	Sentido La Guaira	Sentido Caracas	Motivo
	Caracas*	La Guaira**	
VICOTEC 405	1.500 m.	1.200 m	Punto con mayor grado de contaminación
VICOTEC 404	650 y 1.050 m.	600 y 1.600 m.	Puntos de incremento de contaminación
FLAWSIC 400	1.145 m.	900 m.	Puntos Céntricos de circulación

*Medida a partir del Portal Norte.

**Medido a partir del Portal Sur.

Tabla #11.11

Ubicación de los sensores detectores de contaminación y velocidad del aire.

La detección de incendios se realizará mediante el uso de un sensor llamado **FibroLaser II**, el cual consta de un cable de fibra óptica instalado a lo largo de todo

el túnel y una unidad evaluadora. Los tiempos de respuesta dependen del aumento de la temperatura. así: para 5 °C es de 4 min., para 10 °C es de 1 min. y para 20 °C es de 30 seg.

11.6.4.- COSTOS DE LOS EQUIPOS Y ACCESORIOS

Equipos	Cantidad	Total [Bs.]
Ventiladores recuperados	4	51.679.680,00
Ventiladores nuevos	15	606.618.600,00
Piezas de transformación recuperadas	4	1.639.900, 00
Piezas de transformación nuevas	19	20.308.555,00
Silenciadores	8	27.967.760,00
Dampers recuperados	19	32.627.275,00
Dampers nuevos	12	25.725.180,00
Accesorios nuevos (cono de succión y mallas protectoras)	19	7.012.629,00
Desmontaje de equipos existentes	19	17.286.704, 00
Instalación de dampers en las ventanas posteriores	12	6.850.104,00
Transporte e instalación de equipos nuevos y recuperados	4	37.104.730,00
	SUB-TOTAL	834.821.117,00
	Más ISV (16,5%)	137.745.834,32
	TOTAL	972.566.601,32

Tabla tt 11,12

Costos estimados para Ea adquisición, recuperación e instalación de los Equipos de Ventilación.

Equipos	Cantidad	Total [Bs.]
VICOTEC 405 con accesorios	2	32.046.365,50
VICOTEC 404 con accesorios	4	37.261.741,00
FLAWSIC 200 con accesorios	2	4.257.981,20
VCA 400 con software y repetidora	4	13.357.809,50
FibroLaser II	2	99.991.500,00
PLC con software y accesorios	1	396.106,30
Variadores de frecuencia con accesorios	19	144.500.537,25
Transporte e instalación	1	154.886.611,00
	SUB-TOTAL	486.698.651,75
	Más ISV (16,5%)	80.305.277,55
	TOTAL	567.003.929.30

Tabla # 11.13

Costos estimados para la adquisición e instalación de Equipos Electrónicos.

Los costos que se presentan en la tabla # 11.12 resume los costos estimados asociados ala adquisición, transporte e instalación de los equipos de ventilación, para la fecha del 5 de marzo de 1998.La tabla # 11.13 muestra los costos de adquisición, transporte e instalación de los equipos electrónicos para la fecha 24 de Abril de 1998.

11. 7.- Reestructuración de las salas de ventilación.

Una de las principales actividades de recuperación que se debe realizar en el sistema de ventilación del túnel Boquerón I radica en la reestructuración de sus salas de ventilación del portal Norte y Sur, la cual consiste en dividir en dos el área común que comparten en la actualidad los ventiladores que surten de aire fresco a ambas

galerías de circulación con el fin de tener dos túneles independientes.

Esta proposición es producto del estudio de los casos de contingencia (exceso de contaminación e incendio) de ambos túneles, de donde al ocurrir alguno de ellos en una de las galerías no debe afectar la actividad de la otra, es decir, si un grupo de ventiladores que surte de aire fresco a una galería, se encuentra en un instante trabajando en reversa (extracción), el aire viciado de ésta no pase a formar parte del aire fresco de la otra que sigue trabajando como inyección.

La reestructuración de cada sala de ventilación de los Portales Norte y Sur consiste en una serie de construcciones de obras civiles e instalación de accesorios de ventilación. En la tabla # 11.14 se muestran en detalle las actividades con los costos asociados (14 de abril de 1998).

Actividad	Costo Unitario	Cantidad	Total [Bs.]
Demolición de paredes de bloques de cemento	3.360,00 Bs./m ²	7,00 m ²	23.520,00
Demolición de paredes de concreto armado	5.120,00 Bs./m ²	7,00 m ²	36.352,00
Construcción de paredes de 200 mm de espesor	7.340,00 Bs./m ²	45,6 m ²	334.704,00
Construcción de techo-placa	23.510,00 Bs./m ²	64,32 m ²	1.512.163, 20
Remoción de ventanas	3.000,00 Bs./m ²	88,46 m ²	265.380,00
Compra e instalación de portones de acero corredizos	1.250.000,00 Bs./unidad	4 unidad	5.000.000,00
Compra e instalación de chimeneas	5.636.046,00 Bs./unidad	4 unidad	22.544.184,00
Limpieza de las salas de ventilación	500,00 Bs./m ²	600 m ²	300.000,00
SUB-TOTAL			30.016.303,00
Más ISV (16,5%)			4.952.690,00
TOTAL			34.968.993,00

Tabla # 11.14

Costos estimados para la remodelación de las salas de ventilación.

11.8.- Operación del Sistema en Caso de Exceso de Contaminación □ Incendio.

En la presencia excesiva de gases contaminantes (mayor a 250 ppm) en la galería de circulación de subida, los ventiladores de la tercera sección operarán en reversa, a máxima capacidad, y los ventiladores de las dos secciones restantes así como los de la sala de extracción, inyectarán y extraerán, respectivamente, también a máxima capacidad. Si se presenta en la galería de bajada, operarán en reversa y a máxima velocidad los ventiladores de la sección donde ocurra esta contingencia; la otra sección inyectará y al igual que la sala de extracción, trabajarán a máxima velocidad.

El funcionamiento de las salas de ventilación será como se muestra a continuación:

1) *En la Inyección de aire al túnel:* Mientras los ventiladores funcionen como inyectores, la succión del aire será efectuada en la sala de ventilación, en la cual se mantendrán abiertos unos Dampers a ser instalados en las ventanas ubicadas en la fachada posterior del tercer piso del edificio de ventilación, de manera que circule el aire necesario para la inyección.

2) *En la Extracción del aire del túnel:* Si los ventiladores tienen que extraer, el PLC enviará una señal a los Actuadores para que cierren los Dampers y por la ventana lateral, en la cual se instalará una chimenea, el humo o exceso de contaminación será evacuado, de manera de que no sea introducido como parte del aire fresco por la sala de ventilación de la galería de circulación vecina.

La función de la Sala de Extracción será evacuar el aire del túnel hacia el valle de la montaña, y en caso de un incendio los ventiladores serán desactivados.

El funcionamiento del sistema de ventilación en caso de un incendio dependerá de la ubicación de éste. Consiste en aplicar un efecto «campana de succión» para la extracción del humo, lo cual se puede lograr utilizando en la sección donde ocurre esta contingencia los ventiladores en reversa y a máxima capacidad, y las otras secciones a modo de inyección de manera de inducir un flujo de aire sin excedentes para que no incremente el fuego y contribuya a la rápida evacuación del humo. En las tablas #11.15 y # 11.16 se muestra el funcionamiento de los ventiladores según la localización del incendio.

Localización incendio* (m)	1 ^{ra} Sección		2 ^{da} Sección		3 ^o Sección		Sala Extracción	
	Inyecc	Extracc	Inyecc	Extracc	Inyecc	Extracc	Inyecc	Extracc
0 - 500		√	√		√			
500 - 1170	√			√	√			
1170 - 1845	√		√			√		

*Medido con respecto al portal Norte

Tabla # 11.15

Funcionamiento de los ventiladores según la localización del incendio
Sentido La Gualra-Caracas

Localización incendio* (m)	1 ^{va} Sección		2 ^{da} Sección		Sala Extracción	
	Inyecc	Extracc	Inyecc	Extracc	Inyecc	Extracc
0-907		√	√			
907 - 1845	√			√		

*Medido con respecto al portal Norte

Tabla # 11.16

Funcionamiento de los ventiladores según la localización del incendio
Sentido Caracas-La Guaira

En vista de que el sistema de ventilación es totalmente automatizado, el costo de operación asociado recae principalmente en el consumo eléctrico de los equipos. Para ello se ideó una metodología de cálculo, basándose en tres escenarios de operación: pesimista, probable y optimista, debido a que el sistema se adapta a los requ-

rimientos del túnel, lo cual es aleatorio y por ende, el uso de la capacidad de los ventiladores. En esta metodología se consideraron los horarios de circulación con su estimado flujo de vehículos y probabilidades de tráfico (lento, medio y fluido) anuales. Los resultados se muestran en la tabla # 11.17.

Parámetro	Escenario		
	Pesimista	Probable	Optimista
Inyección túnel de subida	80.092.036, 00	71.657.027,00	64.008.798,00
Inyección túnel de bajada	32.068.164, 00	28.223.648,00	24.408.627,00
Extracción	31.676.900,00	28.014.877,00	24.887.288,00
Equipos electrónicos	2.551.555,00	2.551.555,00	2.551.555,00
Equipo humano	10.547.372,00	10.547.372,00	10.547.372, 00
TOTAL	156.936.027,00	140.994.479,00	126.403.640,00

Tabla # 11.17

Costos operativos del sistema de ventilación

El costo mostrado en la tabla #11.17 se rige para el mes de enero de 1.998.

11.9.- Otros aspectos

Se elaboró un plan de mantenimiento preventivo con el objetivo principal de indicar las actividades que garanticen el buen funcionamiento y la vida útil de todos los equipos que componen el sistema de ventilación. Para su planificación e implantación se utilizó una metodología adecuada acorde con las condiciones del entorno. Este Plan arrojó un costo anual de Bs. 16.360.779,85 para la empresa encargada de la manutención de la autopista.

Además, se efectuó un plan de implantación para la puesta en marcha del sistema de ventilación, tomando en cuenta la planificación de todas las actividades que requiere la construcción y recuperación de los equipos de ventilación, las remodelaciones de las salas y la compra e instalación de los equipos electrónicos. El tiempo estimado para ello es de 165 días hábiles.

Finalmente se concluyó que la situación actual del sistema de ventilación del túnel Boquerón I es crítica en cuanto a la contaminación existente y el estado deplorable de los equipos de ventilación, para lo cual se recomendó un llamado a los organismos del estado encargados de la manutención de la autopista (M.T.C.) de manera que agilicen de los trámites requeridos en la aprobación y ejecución de ésta u otra propuesta que cumpla con las normativas de calidad en el servicio prestado a la comunidad.