



# METRO

EMPRESA DE TRANSPORTE DE PASAJEROS METRO S.A.

REFUERZO DE SUBESTACIONES DE RECTIFICACIÓN DE LÍNEA 1

METRO DE SANTIAGO

INFORME DE REVISIÓN VENTILACIÓN EXISTENTE

Preparado por: PSI CONSULTORES

Rev.	Fecha	Emitido Para	Prepara	Revisa	Aprueba	Aprueba Metro
C	20-07-12	VALIDO PARA REVISION	JNC	JBR	TPA	CMS/FAD
B	11-04-12	PARA REVISIÓN	JNC	JBR	TPA	CMS/FAD
A	20-03-12	PARA REVISIÓN	JNC	JBR	TPA	CMS/FAD
CONSULTOR			Documento N°: MES-034-GG-IN-001			
			Archivo: MES-034-GG-IN-001-C.doc			

## REFUERZO DE SUBESTACIONES DE RECTIFICACIÓN DE LÍNEA 1

## METRO DE SANTIAGO

## INFORME DE REVISIÓN VENTILACIÓN EXISTENTE

## CONTENIDO

1.	OBJETIVOS	3
1.1.	OBJETIVO PRINCIPAL	3
1.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
2.	ANTECEDENTES	3
3.	CÁLCULO DE VENTILACIÓN TEORICA NECESARIA POR GRUPO.	4
3.1.	Cálculo de ventilación de Transformador 4500 kVA.	4
3.2.	Cálculo de ventilación de Rectificador 4000 kW.	5
3.3.	Caudal total teórico necesario por grupo para la extracción de calor.	5
4.	MEDICION DE VELOCIDAD Y CÁLCULO DE CAUDAL EN SER NEPTUNO.	5
4.1.	Medición de caudal para Grupo A (Ventilación antigua).	5
4.2.	Medición de caudal para Grupo B (Solo Rectificador).	7
5.	MEJORAS PROPUESTAS A LOS SISTEMAS DE VENTILACION.	9
5.1.	Modificaciones al sistema actual de ventilación.	11
5.1.1.	Subestaciones Huelen y Pedro de Valdivia	12
5.1.2.	Subestaciones Las Rejas, Central, U Católica y E Militar	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
5.2.	Mejoras para SERs con ventilación inferior.	15
5.2.1.	Separación de ventilación de grupos A y B	15
5.2.2.	Redundancia en la ventilación.	15
5.3.	Mejoras para SERs con ventilación superior.	16
6.	CONCLUSIONES.	20

---

**REFUERZO DE SUBESTACIONES DE RECTIFICACIÓN DE LÍNEA 1  
METRO DE SANTIAGO  
INFORME DE REVISIÓN VENTILACIÓN EXISTENTE**

**1. OBJETIVOS**

**1.1. OBJETIVO PRINCIPAL**

Lograr determinar opciones de refuerzo y/o mejora al sistema de ventilación existente en las SERs en base a las mediciones realizadas de caudal y temperatura, y los antecedentes recibidos.

**1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar el caudal de aire teórico necesario para ventilar los grupos de rectificación.
- Calcular el caudal de los ventiladores existentes mediante las mediciones de velocidad de viento y determinar su punto de operación.
- Revisar los antecedentes de las visitas a las SERs para verificar los diseños de flujo de aire en la ventilación existente.
- Proponer mejoras o adiciones de ventilación.

**2. ANTECEDENTES**

Los antecedentes usados para el desarrollo de este informe se conforman de:

- Informe de pérdidas de transformadores RHONA de 4500 kVA entregado por METRO S.A.
- Mediciones de velocidad y temperatura realizadas en terreno en la SER Neptuno.
- Inspección de sistemas existentes de SERs Huelén, Las Rejas, Estación Central.

### 3. CÁLCULO DE VENTILACIÓN TEORICA NECESARIA POR GRUPO.

#### 3.1. Cálculo de ventilación de Transformador 4500 kVA.

Mediante el documento de prueba de transformadores RHONA se revisa que la pérdida de calor de los transformadores corresponde a 45 kW a plena carga.

Usando la ecuación fundamental de la calorimetría se calcula el caudal necesario de aire para extraer este calor considerando un salto térmico entre la entrada y salida del aire por los disipadores del transformador de 5°C (es un valor usualmente usado para salas de transformadores y se verificó en SER Huelen, donde la temperatura medida del aire de entrada al túnel subterráneo fue de 29°C y la temperatura del aire en el segundo piso de la SER fue de 34°C).

$$\dot{Q} = \dot{m} \times C_p \times (T_s - T_e)$$

Ecuación 1: Ecuación fundamental de la Calorimetría

Donde:

- Q: Flujo de Calor (potencia térmica)
- m: Flujo másico de fluido caloportador (en este caso el caudal de aire en unidades de masa/tiempo)
- Cp: Calor específico del fluido caloportador
- Ts: Temperatura de salida del fluido caloportador.
- Te: Temperatura de entrada del fluido caloportador.

Con estas consideraciones tenemos:

$$45(\text{kW}) = 38700 (\text{kcal/h}) = V(\text{m}^3/\text{h}) \times 1.08 (\text{kg}/\text{m}^3) \times 0.24 \text{ kcal}/\text{kg } ^\circ\text{C} \times (35^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C})$$

$$V = 29861 \text{ m}^3/\text{h} = 8295 \text{ l/s}$$

### 3.2. Cálculo de ventilación de Rectificador 4000 kW.

Se estimó como pérdida de calor del rectificador un valor de 20 kW de potencia térmica

Siguiendo el mismo método anterior tenemos:

$$20(\text{kW}) = 17200 (\text{kcal/h}) = V(\text{m}^3/\text{h}) \times 1.08 (\text{kg}/\text{m}^3) \times 0.24 \text{ kcal}/\text{kg } ^\circ\text{C} \times (35^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C})$$

$$V = 13272 \text{ m}^3/\text{h} = 3687 \text{ l/s}$$

### 3.3. Caudal total teórico necesario por grupo para la extracción de calor.

Con esto se concluye un caudal necesario total de 11982 l/s por grupo para extraer el calor generado por estos a plena carga.

$$V = 13272 \text{ m}^3/\text{h} + 29861 \text{ m}^3/\text{h} = 43133 \text{ m}^3/\text{h} = 11982 \text{ l/s}$$

## 4. MEDICION DE VELOCIDAD Y CÁLCULO DE CAUDAL EN SER NEPTUNO (VALIDO PARA SERs HUELEN Y PEDRO DE VALDIVIA).

### 4.1. Medición de caudal para Grupo A (Ventilación antigua).

Se midió velocidad del aire dentro de los túneles bajo los grupos de rectificación, específicamente de manera frontal a los ventiladores. Las celosías existentes al producir una gran turbulencia hacen necesario medir el caudal también en la sección del túnel a unos 2m de distancia frente a los ventiladores y de estas dos tomar el promedio de caudal. El valor de caudal calculado en cada una de las secciones se promedió. El perfil obtenido se muestra en la tabla 1, con el cual se calcula un caudal de aire total de ventilación existente de 8660 l/s.

Ventilador			Sección de tunel		
Perfil de velocidad	V (m/s)		Perfil de velocidad	V (m/s)	
1	5,7		1	2,8	
2	1,9		2	2,6	
3	2,6		3	2	
4	3,4		4	1,1	
5	6,1		5	2,3	
6	0,8		6	2,2	
7	1,8		7	1,5	
8	2,7		8	1,1	
9	3,3		9	1,9	
10	1		10	1,8	
11	1,3		11	2	
12	2,4		12	2,5	
13	3,4		13	0,9	
14	1		14	5,1	
15	1,7		15	4,8	
16	3,3		16	5,5	
Velocidad Promedio	2,65	m/s	Velocidad Promedio	2,51	m/s
Velocidad Promedio sin mínimas	3,99	m/s	Velocidad Promedio sin mínimas	4,16	m/s
Sección de medición			Sección de medición		
Alto	0,65	m	Alto	1,9	m
Ancho	0,65	m	Ancho	1,85	m
Área	0,4225	m <sup>2</sup>	Área	3,515	m <sup>2</sup>
Caudal estimado con promedio	1120	l/s	Caudal estimado con promedio	8809	l/s
Caudal estimado sin mínimas	1684	l/s	Caudal estimado sin mínimas	14622	l/s
CAUDAL VENTILADOR PROMEDIO	1402	l/s	CAUDAL VENTILADOR PROMEDIO	2929	l/s
			CAUDAL PROMEDIO POR VENTILADOR TOTAL	2165	l/s
				7795	m <sup>3</sup> /h

Tabla 1: Perfil de velocidades medidas en túnel grupo A SER Neptuno

Ventiladores en operación: 4 ventiladores

CAUDAL TOTAL MEDIDO: 8660 l/s

Comparando el caudal existente versus el caudal teórico necesario para ventilar cada grupo:

Caudal Teórico Necesario	11982	l/s
Caudal Medido en SER Neptuno	8660	l/s
Porcentaje de cumplimiento	72%	

Tabla 2: Porcentaje de cumplimiento del sistema de ventilación actual versus caudal teórico necesario.

Con esto se concluye que la ventilación existente en las condiciones actuales no cumple con los valores teóricos necesarios para la ventilación a carga plena de los grupos de rectificación.

#### 4.2. Medición de caudal para Grupo B (Solo Rectificador).

Se midió velocidad del aire dentro de los túneles bajo los grupos de rectificación, específicamente de manera frontal a los ventiladores. Las celosías existentes al contrario del sistema del grupo A no producen una gran turbulencia y abren adecuadamente en presencia del flujo de aire. El caudal total medido obtenido es de 6494 l/s y el perfil medido se presenta a continuación en la tabla 4.

Ventilador	
Perfil de velocidad	V (m/s)
1	9,7
2	10,3
3	8,5
4	2
5	11,5
6	10,9
7	11,8
8	11,3
9	12,1
10	2,4
11	8
12	12,1

13	5,8	
14	2,8	
15	8,7	
16	10,6	
17	6,4	
18	7,4	
Velocidad Promedio	8,46	m/s
Velocidad Promedio sin mínimas	9,58	m/s
Sección de medicion		
Alto	0,6	m
Ancho	0,6	m
Area	0,36	m2
Caudal estimado con promedio	3046	l/s
Caudal estimado sin minimas	3448	l/s
CAUDAL VENTILADOR PROMEDIO	3247	l/s
CAUDAL PROMEDIO TOTAL VENTILACION	6494	l/s
	23378	l/s

Tabla 3: Perfil de velocidades medidas en túnel grupo B (Rectificador) SER Neptuno  
 Comparando el caudal existente versus el caudal teórico necesario para ventilar solo el rectificador:

Caudal Teórico Necesario	3687	l/s
Caudal Medido en SER Neptuno	6494	l/s
Porcentaje de cumplimiento	189%	

Tabla 4: Porcentaje de cumplimiento del sistema de ventilación actual versus caudal teórico necesario.

Con esto se concluye que la ventilación existente en las condiciones actuales, si bien, no cumple de manera plena con los valores teóricos necesarios para la ventilación a carga plena del rectificador, si logra mantener un 89% de cobertura en caso de falla de uno de los ventiladores.

**5. MEDICION DE VELOCIDAD Y CÁLCULO DE CAUDAL EN SER ESTACIÓN CENTRAL (VALIDO PARA SERs LAS REJAS, ESTACIÓN CENTRAL, UNIVERSIDAD CATÓLICA Y ESCUELA MILITAR).**

En estas SERs la ventilación se realiza mediante dos ventiladores tubo-axial ubicados en el segundo piso de la subestación, los cuales extraen el aire del ambiente de los grupos de rectificación. Uno de los ventiladores opera extrayendo el aire general de la sala de los grupos y el otro ventilador está ubicado justo sobre el transformador del grupo B, marca SINDELEN.

Las mediciones se realizaron en las bocas de salida de los ventiladores. Considerando 8 puntos de medición.

Los datos obtenidos son los siguientes:

VENTILADOR AMBIENTE		
Perfil de velocidad	V (m/s)	
	1	28
	2	31,2
	3	26,7
	4	26,6
	5	28,2
	6	30,3
	7	26,2
	8	28,4
Velocidad Promedio	28,20	m/s
Sección de medicion		
Area ducto	0,65	m2
Area Silenciador	0,26	m2
Area	0,40	m2
Caudal estimado con promedio	11145	l/s

Tabla 5: Perfil de velocidades y cálculo de caudal de ventilador ambiente.

VENTILADOR TRAF0 B		
Perfil de velocidad	V (m/s)	
1	28,8	
2	25,3	
3	30,3	
4	28,2	
5	30,1	
6	29,6	
7	27,5	
8	26,6	
Velocidad Promedio	28,30	m/s
Sección de medición		
Área ducto	0,65	m <sup>2</sup>
Área Silenciador	0,26	m <sup>2</sup>
Área	0,40	m <sup>2</sup>
Caudal estimado con promedio	11185	l/s

Tabla 6: Perfil de velocidades y cálculo de caudal de ventilador de transformador del grupo B

También se midió el caudal de aire que pasa a través de las celosías del portón de acceso a la subestación:

CELOSIA		
Perfil de velocidad	V (m/s)	
1	4,4	
2	3,9	
3	4,3	
4	3,8	
5	4,4	
6	4,5	
7	4,4	
Velocidad Promedio	4,24	m/s
Área de celosía	0,40	m <sup>2</sup>
Caudal estimado total (2 celosías)	3394	l/s

Tabla 7: Caudal calculado a través de celosías de portón de acceso a SER

Se comparan los caudales existentes con los caudales teóricos necesarios:

Caudal promedio por grupo existente	11165	l/s
Caudal teórico necesario	11982	l/s
% Cumplimiento	93%	
% ByPass primer piso	15%	

Tabla 8: Comparación de caudal teórico vs caudal medido (por grupo).

Se verifica que el caudal de aire existente en el sistema de ventilación de las SERs mencionadas es válido.

También se concluye que solo un 15% del aire de reposición del sistema de extracción entra a la SER a través de las celosías del primer piso.

## 6. MEJORAS PROPUESTAS A LOS SISTEMAS DE VENTILACION.

### 6.1. Mejoras al sistema actual de ventilación.

Antes de proponer sistemas nuevos de ventilación, se analiza la posibilidad de mejorar los sistemas actuales, para ello se agrupan las SER según el tipo de ventilación que poseen.

Las Subestaciones rectificadoras Huelén y Pedro de Valdivia cuentan con un sistema de ventilación inferior, mediante 4 ventiladores axiales existentes de idénticas características mecánicas a los existentes en la SER Neptuno, inyectando aire al túnel produciendo un flujo forzado por escotillas ubicadas bajo los disipadores de cada transformador y de los rectificadores, encontrándose estos elementos encapsulados en su perímetro con portones de acero, permitiendo el flujo de aire solo desde el túnel subterráneo hacia las celosías del segundo piso.

Las Subestaciones rectificadoras Las Rejas, Estación Central, Universidad Católica y Escuela Militar poseen un sistema de extracción de aire con ventiladores tubulares ubicados en el segundo piso y celosías ubicadas a ambos lados de la puerta de acceso a la SER.

6.1.1. Subestaciones Huelen y Pedro de Valdivia

Mediante las visitas a estas SER se observó la existencia de un sistema de celosías gravitacionales frontales a los ventiladores axiales, ubicadas dentro del túnel. Con el sistema de ventilación operando, se observó que las celosías no abrieron completamente, demostrando ser una celosía muy pesada para el sistema.

A continuación se presentan fotografías que explican el fenómeno:



Ilustración 1: Celosías gravitacionales de ventiladores de SER Neptuno con ventiladores funcionando, se aprecia que no se alcanzan a levantar completamente.



Ilustración 2: Celosías gravitacionales del sistema de ventilación del grupo B de SER Neptuno. Se aprecia en esta fotografía que las celosías operan correctamente abriéndose completamente al paso del aire.

El ventilador instalado en las SER Huelen y Pedro de Valdivia es de marca CASALS, modelo HJB 56 T4. Se ubica en base al caudal medido el punto de operación del ventilador en su curva característica, para analizar la caída de presión que generan estas celosías, obteniendo una caída de presión de 16mmca.

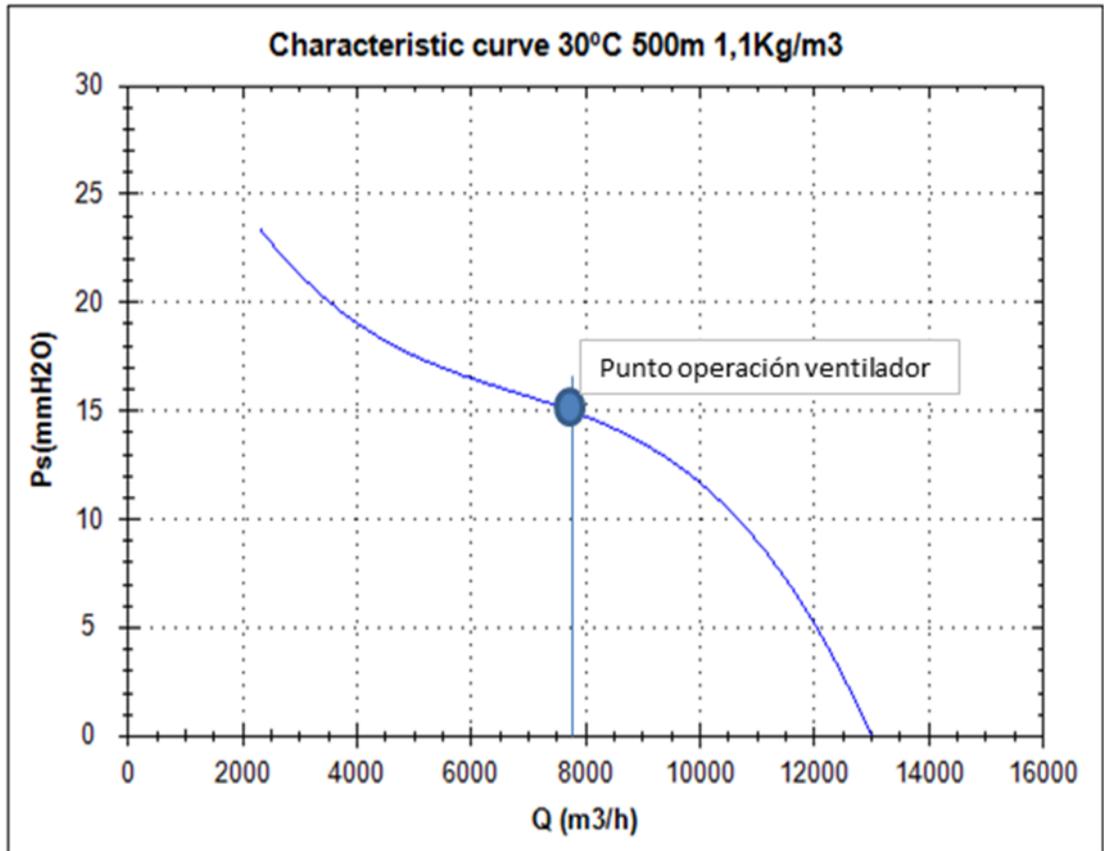


Gráfico 1: Curva característica de funcionamiento de ventilador CASALS HJB 56 T4 con el punto de operación actual.

Teóricamente, una celosía en correcta operación no debería causar una caída de presión superior a los 3mmca, pensando en que el sistema de celosías se logre mejorar para bajar la caída de presión total del sistema a 8mmca, el caudal disponible para ventilación por ventilador aumenta de 2165 l/s (7795 m<sup>3</sup>/h) a 3140 l/s (11304 m<sup>3</sup>/h). De lograr este caudal por ventilador, se lograría un caudal total de ventilación de 12560 l/s.

Considerando que el caudal teórico para ventilar cada grupo es de 11982 l/s, se tiene un cumplimiento de un 105%.

Cabe notar que si bien se logra con esta medida mejorar considerablemente la ventilación existente, no se tiene redundancia de caudal de aire, y en caso de falla de un ventilador se contaría con el 75% del caudal total necesario teórico para ventilación del grupo a plena carga.

## 6.2. Mejoras para SERs con ventilación inferior.

### 6.2.1. Separación de ventilación de grupos A y B

Se propone replicar el sistema implementado en SER Neptuno, dividiendo la ventilación de ambos grupos colocando un tabique interior con puerta para acceso. Para lograr la ventilación del grupo B se deben agregar dos ventiladores axiales de igual forma al sistema implementado en SER Neptuno para la ventilación solo del Rectificador. Para poder ventilar el transformador del grupo B que es externo al sistema de escotillas subterráneas se propone confinar el recinto de este ventilador mediante portones sólidos, agregar un set de 3 ventiladores axiales sobre cada disipador (6 ventiladores totales) y dejar en todo el perímetro inferior del confinamiento una malla acma o reja para producir un flujo de aire desde la parte inferior del recinto de ventilador hacia la parte superior. Con esto se logra también, en caso de reemplazo o cambio del transformador, contar con un sistema fijo único de ventilación, sin tener que utilizar necesariamente transformadores como el implementado en SER Neptuno, el cual tiene ventilación forzada incorporada en sus disipadores.

### 6.2.2. Redundancia en la ventilación.

Se propone cambiar el sistema de celosías y ventiladores existentes en el grupo A con el objetivo de instalar 4 nuevos ventiladores axiales con celosías más efectivas, los cuales serán seleccionados para operar al 34% de la capacidad total de ventilación, de modo que en caso de falla de uno de los cuatro ventiladores, el sistema de ventilación sea capaz aún de extraer el 100% del calor del grupo a plena carga.

Para el grupo B se propone agregar dos ventiladores axiales por un muro lateral, seleccionados cada uno al 100% del caudal de ventilación teórico necesario solo para el rectificador, programando a estos para funcionar de manera rotativa con un sistema de conteo de horas de operación. De igual forma, se seleccionarán los ventiladores del transformador externo al 25% cada uno (para operar con dos ventiladores a plena carga sobre cada disipador y uno en reposo para caso de falla).

### **6.3. Mejoras para SERs con ventilación superior.**

#### **6.3.1. Optimización de la ventilación del transformador del grupo B (marca SINDELEN).**

En las visitas se observó que las subestaciones Las Rejas, Central, U Católica y Escuela Militar cuentan con extracción ambiental de aire a diferencia de las Subestaciones Huelén y Pedro de Valdivia que cuentan con ventilación subterránea. Los grupos de rectificación no están encerrados con portones de acero, si no que están encerrados en su perímetro con malla ACMA en su totalidad.

En cada una de estas SER se observó que cuentan con dos tipos diferentes de transformador, uno de los grupos cuenta con un transformador cuyos disipadores de calor se encuentran expuestos al ambiente y otro transformador (al parecer el más antiguo de cada SER, de marca SINDELEN) cuenta con sus disipadores de calor confinados en una especie de ducto ajustado a estos, abiertos en el lado superior y con faldones que conectan el lado inferior con la escotilla que da al subterráneo de cada disipador. El faldón se aprecia de materialidad de goma, haciendo la función de sello para obligar el paso del aire desde el subterráneo hacia el exterior.

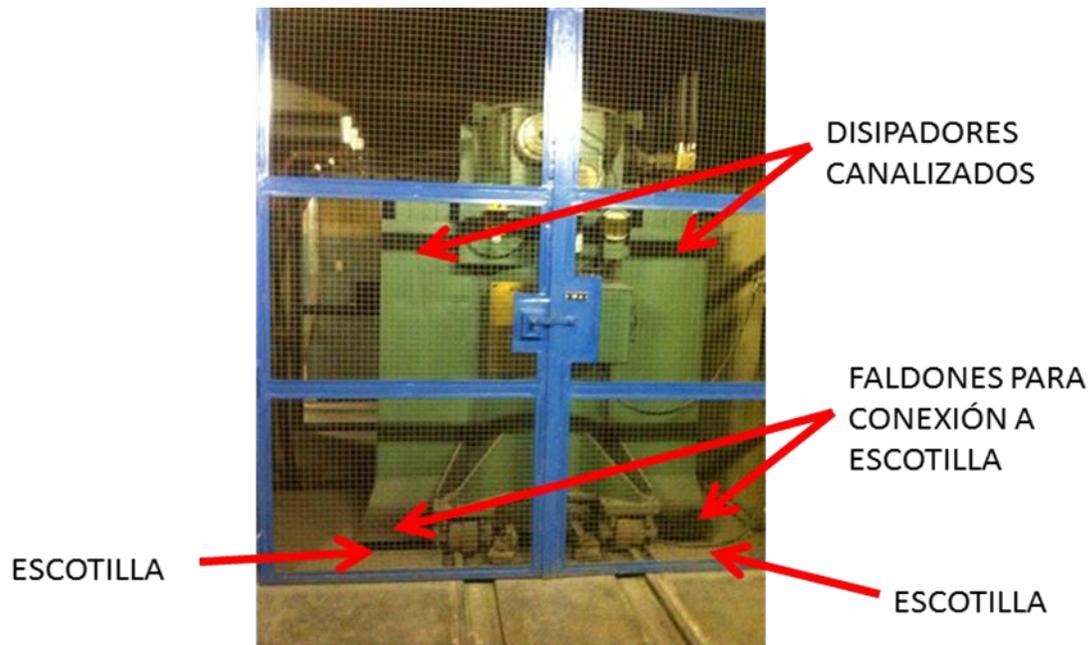


Ilustración 3: Transformador Sindelen con disipadores confinados.

En el segundo piso se encuentran dos ventiladores tubulares, uno canalizado sobre el transformador SINDELEN, y el otro tomando el aire del resto del espacio.



Ilustración 4: Ventiladores Tubulares con silenciadores.

Al revisar el túnel subterráneo se encontró que este no cuenta con los ventiladores axiales de Huelén, Neptuno y Pedro de Valdivia, además de encontrarse completamente cerrado (sin celosías o aberturas que permitan el paso de aire).



Ilustración 5: Túnel subterráneo de Ventilación.

Esta situación da cuenta de una ventilación ineficiente del transformador SINDELEN, dado que al no existir un sistema que fuerce al aire pasar a través del túnel subterráneo el aire circulará por donde le sea más fácil.

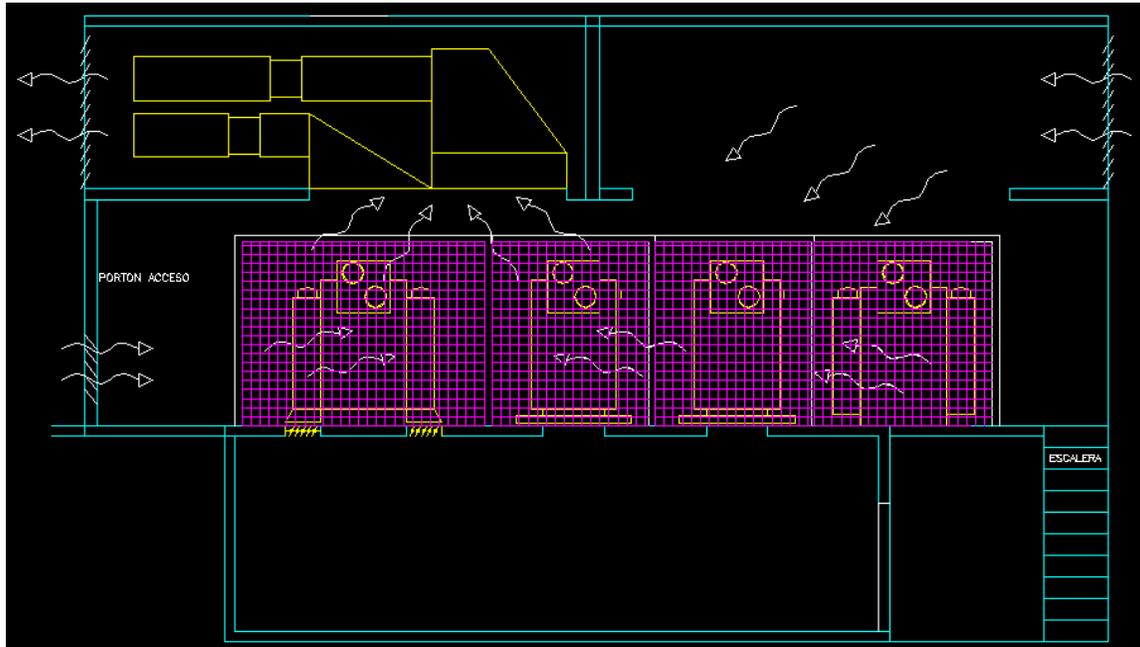


Ilustración 6: Flujo de ventilación actual de SERs.

Si se proveen aberturas en el túnel subterráneo y además un sistema de ventiladores axiales ubicados bajo las escotillas del transformador SINDELEN se lograría una ventilación más eficiente, asegurando el flujo de aire necesario en los disipadores de este transformador (actualmente se comprobó por mediciones en terreno de que no existe paso alguno de aire por los disipadores).

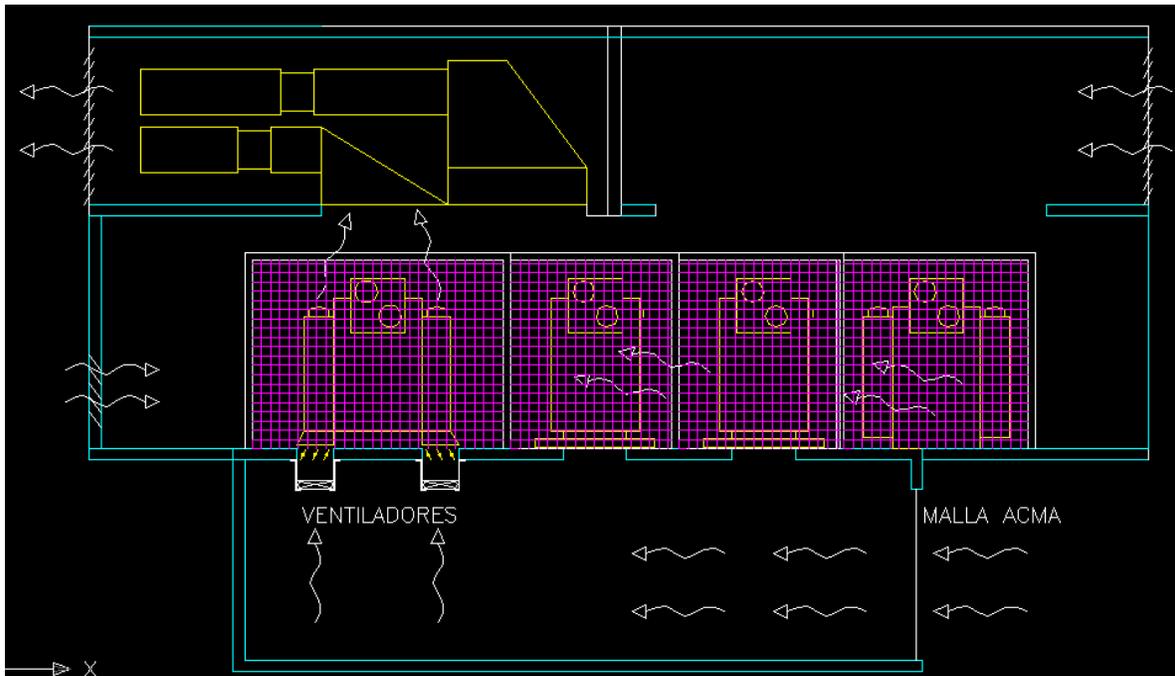


Ilustración 7: Flujo eficiente del aire para ventilación de transformador SINDELEN.

## 7. CONCLUSIONES.

- En el caso que el grupo generador-rectificador funcione a plena carga en las subestaciones con ventilación inferior, el sistema de ventilación existente no será capaz de extraer el calor generado por el grupo, es por esto que se proponen el cambio de celosías existentes.
- Aun realizando la mejora indicada en el punto anterior el grupo podría tener problemas ya que, en caso de falla de un ventilador se contaría con el 75% del caudal necesario para ventilación del grupo a plena carga, por ende se propone cambiar ventiladores para lograr una redundancia en el sistema.
- Respecto de las subestaciones con ventilación superior, se concluye que el caudal de aire actual del sistema es adecuado para ventilar ambos grupos en su totalidad pero no se cuenta con redundancia.
- En las subestaciones con ventilación superior el transformador SINDELEN no cuenta con ventilación apropiada, por ende se propone agregar una ventilación forzada por bajo las escotillas del transformador, de tal manera

de, en caso de cambio de transformador, poder mantener el sistema de ventilación.