



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Industrial

Sistemas de Ventilación en Ferrocarriles

Metropolitanos: Panorámica y Estrategias de Diseño

Rodrigo Herrero Paredes

Madrid, Octubre de 2009

1. Revisar y validar las bases de cálculo e hipótesis de diseño con las que los Projectistas dimensionan las instalaciones
2. Determinar si los equipamientos actualmente instalados y las operativas que rigen su funcionamiento permiten satisfacer los requerimientos ambientales normativos y las solicitudes asociadas a los diferentes escenarios de explotación
3. Analizar y definir posibles modos de operación que contribuyan a optimizar el funcionamiento del sistema, manteniendo las prestaciones que debe garantizar, y reduciendo el consumo energético



Ventilación forzada – compensada

897 Motoventiladores axiales

382 operando en inmisión

515 operando en extracción

20 MW potencia instalada

Más de 2000 Millones de m^3 de
aire desplazados cada día en
meses estivales

¿FINALIDAD? GARANTIZAR UNAS CONDICIONES AMBIENTALES ADECUADAS EN EL INTERIOR DE LAS INSTALACIONES (TEMPERATURA, VELOCIDAD DEL AIRE, VARIACIONES DE PRESIÓN) Y LA EVACUACIÓN DE GASES EN CONDICIONES DE EMERGENCIA (INCENDIO) CONFORME A NORMATIVA

ADQUISICION DE DATOS E HIPÓTESIS DE PARTIDA



CÁLCULO DE LAS CARGAS TERMICAS



OBTENCIÓN DE LOS CAUDALES REQUERIDOS PARA CADA MODO DE OPERACIÓN



CÁLCULO HIDRAULICO DE LA INSTALACIÓN



DIMENSIONADO DE EQUIPOS Y COMPONENTES

ADQUISICION DE DATOS E HIPÓTESIS DE PARTIDA

PARAMETROS AMBIENTALES OBJETIVO Y REQUISITOS MÍNIMOS (UNE EN 13779): caracterización térmica del emplazamiento de la instalación, temperatura objetivo, humedad relativa, velocidad del aire, renovaciones mínimas.

CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DEL TRAMO A ESTUDIO: caracterización del tramo (dimensiones de estaciones, diámetro hidráulico y longitud de túneles, disposición, sección y profundidad de ventosas posibles, ubicación de rejillas de difusión de aire.

CONDICIONES OPERATIVAS DE TRANSPORTE: frecuencia de trenes, velocidad comercial, distancias de frenado y aceleración, geometría de trenes, capacidad de transporte, afluencia de viajeros.

CÁLCULO DE LAS CARGAS TERMICAS

CALOR GENERADO POR EL MATERIAL MOVIL

FRENADO

TRACCION (HILO DE CONTACTO)

AERODINAMICO

CONTACTO RUEDA - ESCALERAS MECANICAS

CLIMATIZACION DE COCINAS

CALOR GENERADO POR LAS INSTALACIONES

ALUMBRADO Y DISTRIBUCION ELECTRICA

ESCALERAS MECANICAS

ASCENSORES

SISTEMAS DE VENTA Y PEAJE

CLIMATIZACION DE CUARTOS

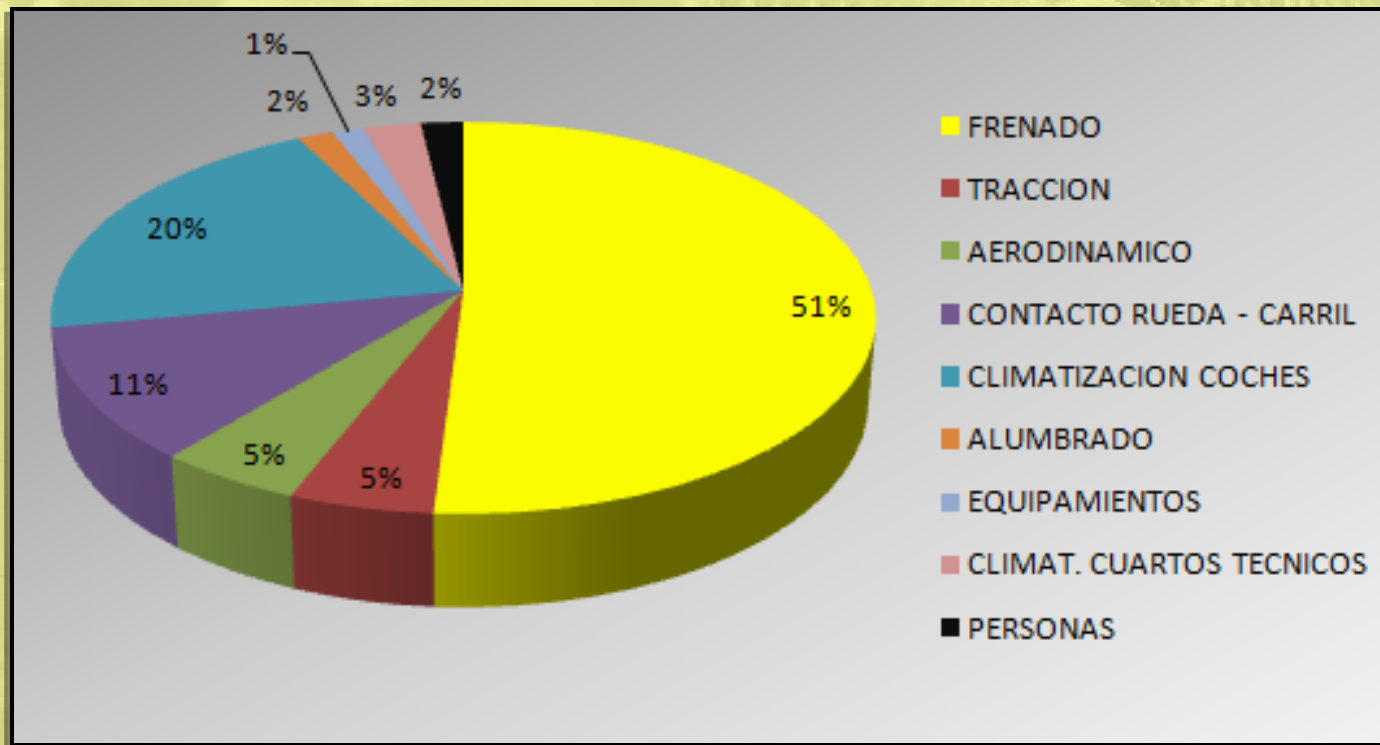
CALOR GENERADO POR LAS PERSONAS

CALOR SENSIBLE

CALOR LATENTE

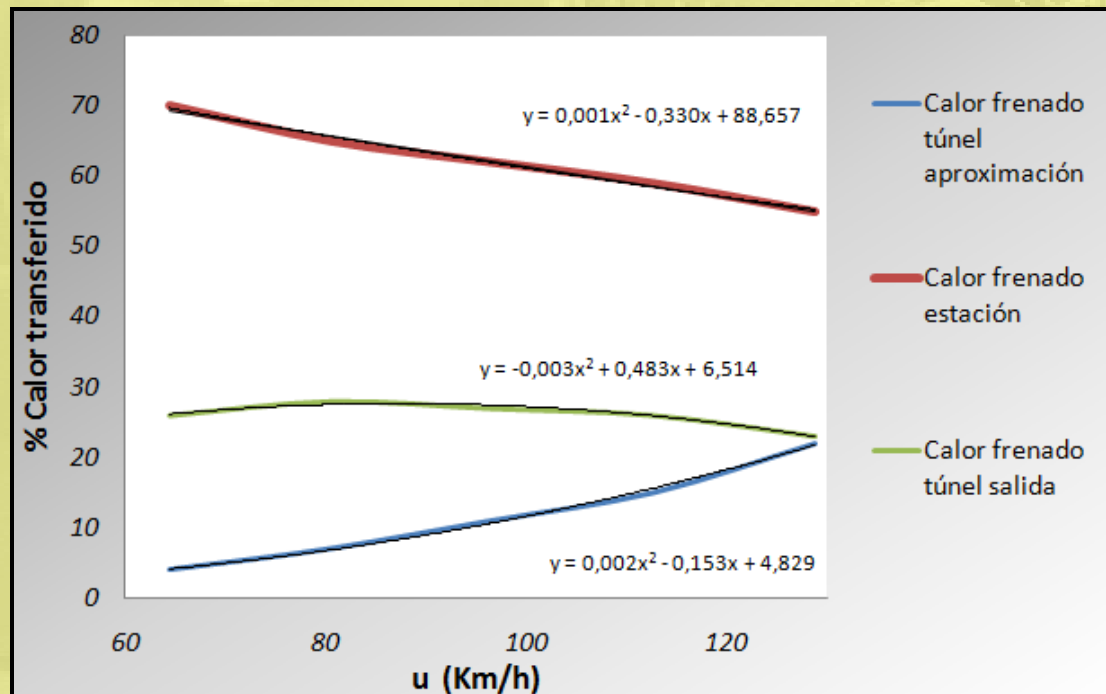
CÁLCULO DE LAS CARGAS TERMICAS

DISTRIBUCION DE CARGAS



CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS

DISTRIBUCION DEL CALOR DE FRENADO



PARAMETRO DE MÉRITO: ENERGIA CINÉTICA DEL TREN TRAS REGENERACION $E_{K \text{ REGEN}}$

$$Q_{fi} = E_{K \text{ REGEN}} \cdot N \cdot \% Q_{fi}$$

OBTENCIÓN DE LOS CAUDALES REQUERIDOS PARA CADA MODO DE OPERACIÓN

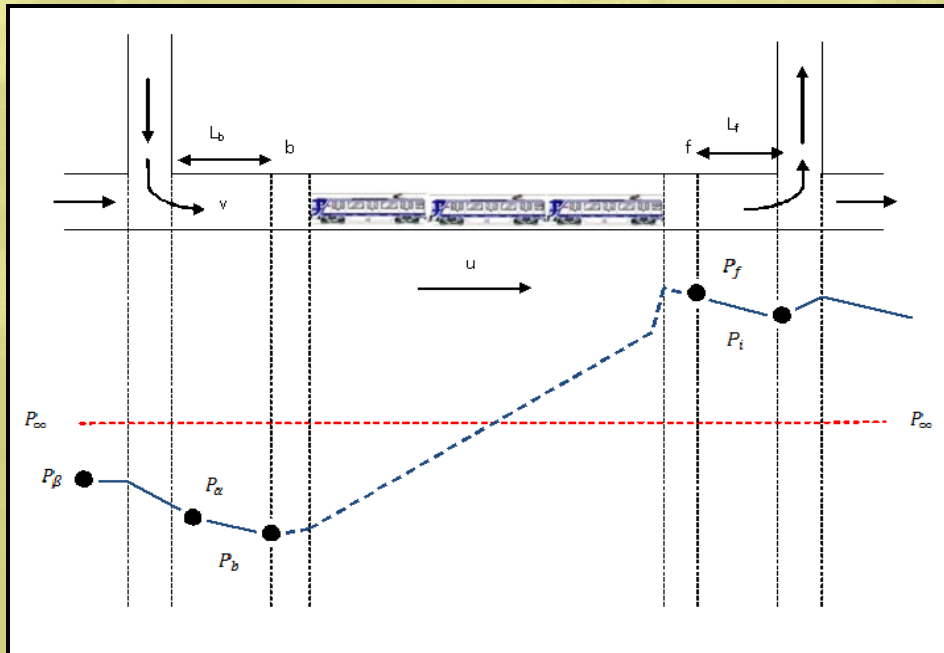
RENOVACIONES MÍNIMAS (UNE EN 13779): 29 m³/h por persona

EMERGENCIA (VELOCIDAD CRÍTICA): Fórmula de Kennedy

EVACUACIÓN DE CARGA TÉRMICA: $C = Q / (C_p \cdot \Delta T)$

VENTILACIÓN GRATUITA ASOCIADA AL EFECTO PISTÓN

VENTILACIÓN INDUCIDA POR EL EFECTO PISTÓN



Tren: discontinuidad móvil en el campo de presiones del túnel

$$C_D = \frac{\Delta P}{\rho u^2 \sigma} = f_t \cdot \left(\frac{|\sigma - \beta| \cdot (\sigma - \beta)}{(1 - \sigma)^2} \right) \cdot \left(\frac{l}{d\sqrt{\sigma}} \right)$$

Resolución: Cálculo de las presiones aguas arriba y aguas debajo de la discontinuidad

$$\beta^2 \cdot \Omega = C_{D\infty} \cdot (1 - \beta)^2$$

Caudal efecto pistón = f (n^2 ventosas, condiciones operación, geometría tren)

CÁLCULO HIDRAULICO DE LA INSTALACIÓN

Ecuación de la Energía:

$$\left(\frac{|\vec{v}|^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + y \right)_{salida} - \left(\frac{|\vec{v}|^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + y \right)_{entrada} = h_s + h_f$$

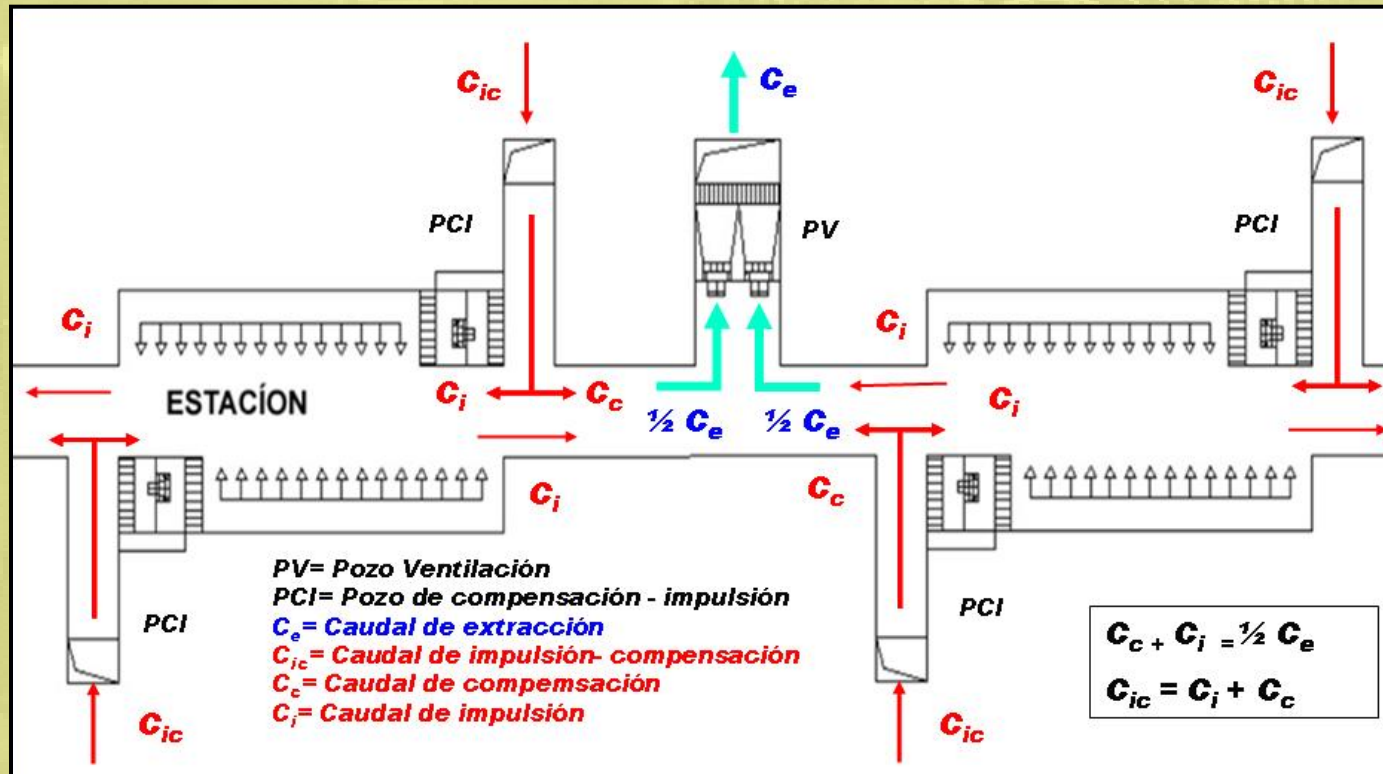
Pérdidas de carga lineales en conductos:

$$h_{f\text{cond}} = \left(f \frac{L}{D_H} \right) \cdot \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Pérdidas de carga localizadas:

$$h_{f\text{loc}} = C \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

DIMENSIONADO DE EQUIPOS Y COMPONENTES

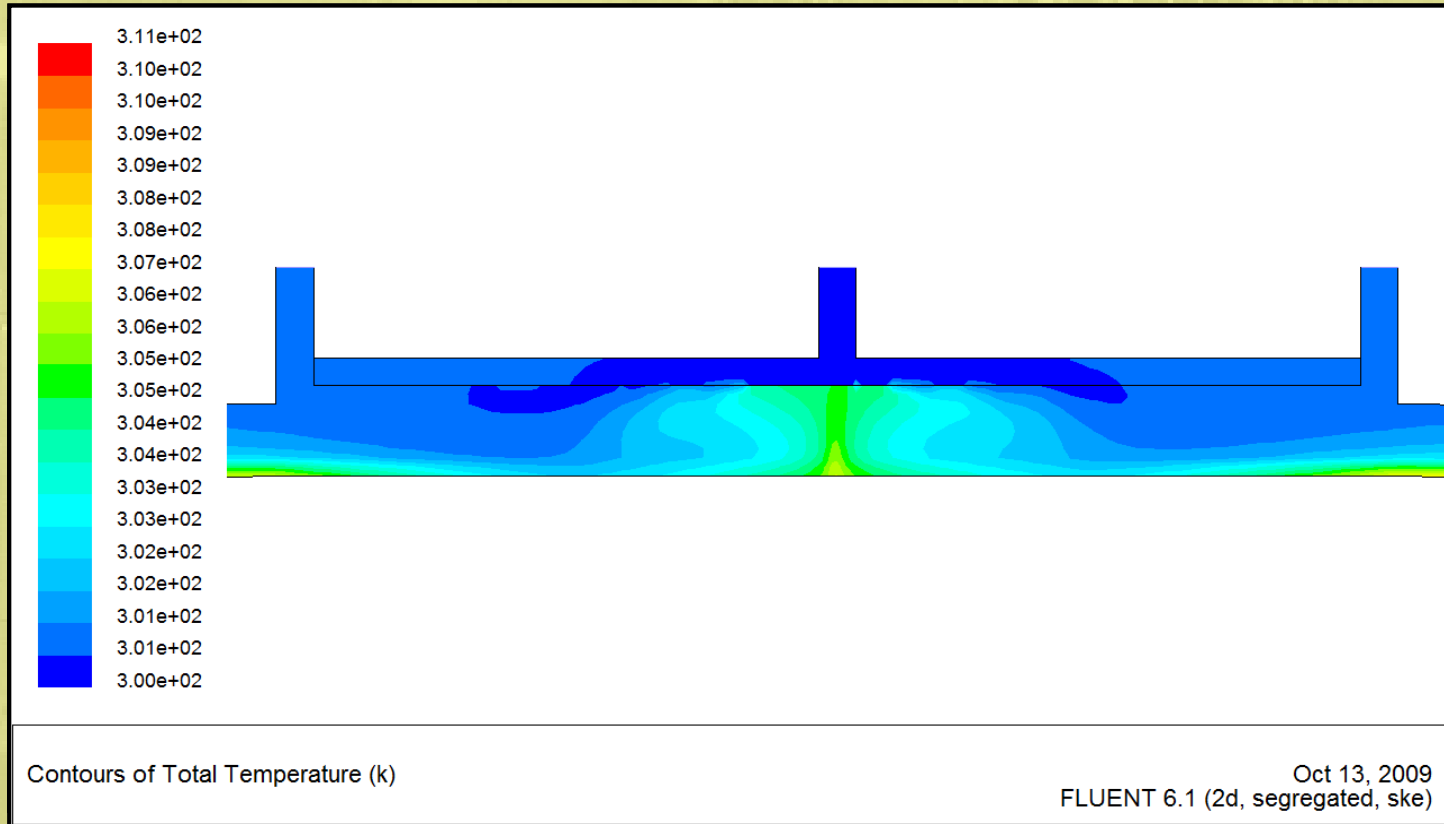


FENÓMENOS NO CONTEMPLADOS EN EL PROCESO DE DISEÑO

- Difusión de la masa de aire a través de rejillas en el volumen de la estación
- Variación en la ubicación e intensidad de las cargas térmicas
- Inercia térmica de la instalación: temperatura interior como condición inicial
- Mezclado inducido por el movimiento de trenes y personas
- Modelo de transferencia de calor al terreno circundante
- Estratificación

SIMULACIÓN NUMÉRICA (TÉCNICAS CFD)

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN



¿Permiten satisfacer los requerimientos?

RENOVACIONES MÍNIMAS

- Caudal medio requerido en estación: 50.000 m³/h
- Caudal medio vehiculado velocidad baja: 90.000 m³/h

**ESTABLECER UN RÉGIMEN DE FUNCIONAMIENTO ACORDE
A LAS NECESIDADES MÍNIMAS**

¿Permiten satisfacer los requerimientos?

EVACUACIÓN DE CARGA TÉRMICA: Escenarios posibles

$T_{\text{ext}} < T_{\text{confort}} < T_{\text{in}}$ → efecto favorable

$T_{\text{confort}} < T_{\text{ext}} < T_{\text{in}}$ → efecto insuficiente

$T_{\text{ext}} < T_{\text{in}} < T_{\text{confort}}$ → efecto desfavorable

$T_{\text{in}} < T_{\text{ext}} < T_{\text{confort}}$ → Situación no realista

$T_{\text{in}} < T_{\text{confort}} < T_{\text{ext}}$ → Situación no realista

$T_{\text{confort}} < T_{\text{in}} < T_{\text{ext}}$ → efecto desfavorable

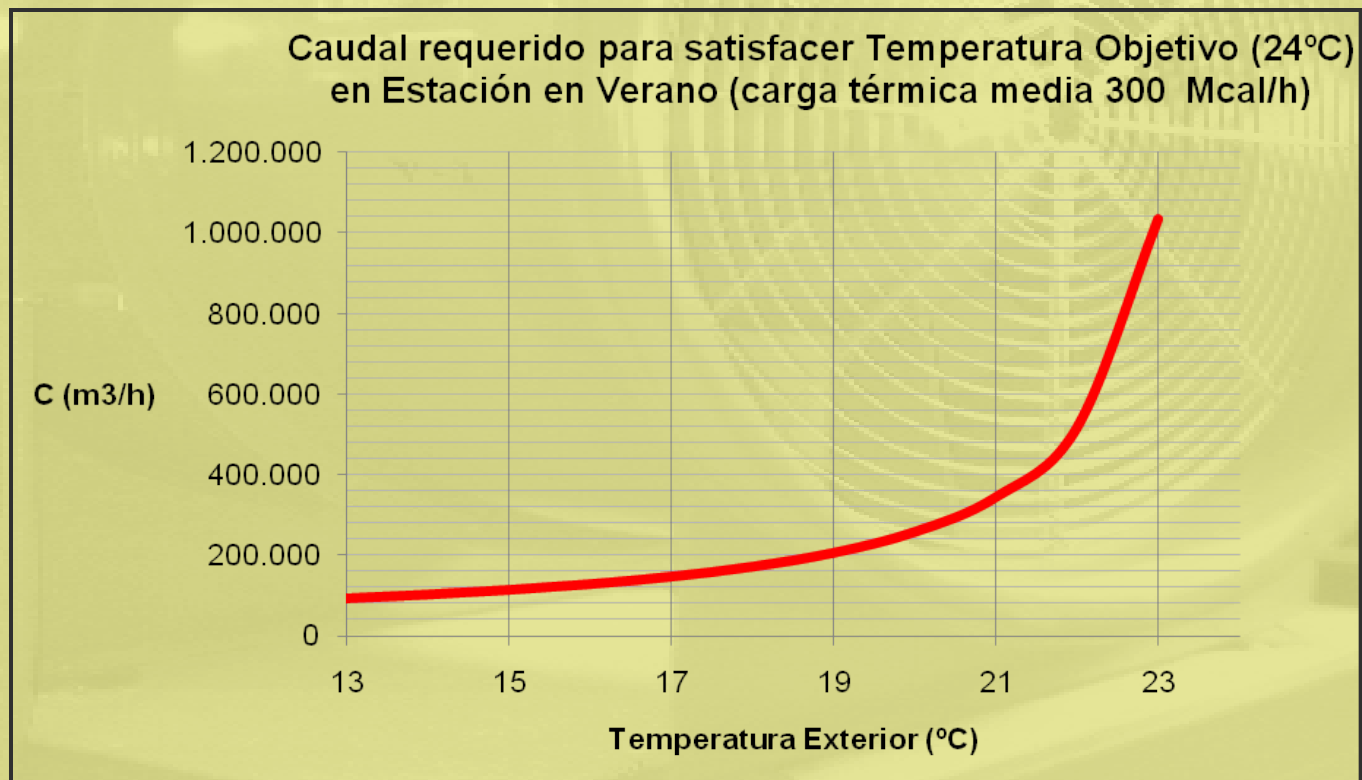
ESCENARIO FAVORABLE PARA EL EMPLEO DE VENTILACION:

Horas del día en las que la temperatura exterior (T_{ext}) sea inferior a la interior (T_{in}), en días en los que la temperatura de consigna (T_{confort}) sea inferior a la temperatura interior

REDUCIR LAS HORAS DE FUNCIONAMIENTO EN RÉGIMEN TÉRMICO A AQUELLAS EN LAS QUE SE DEN CONDICIONES FAVORABLES

¿Permiten satisfacer los requerimientos?

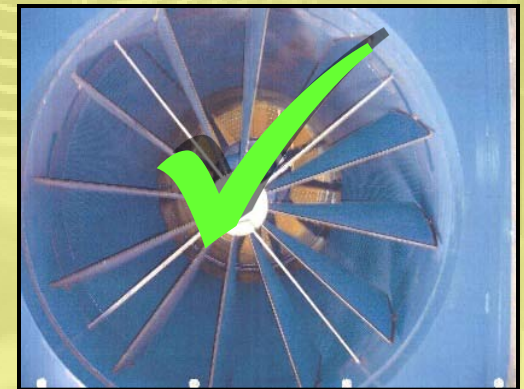
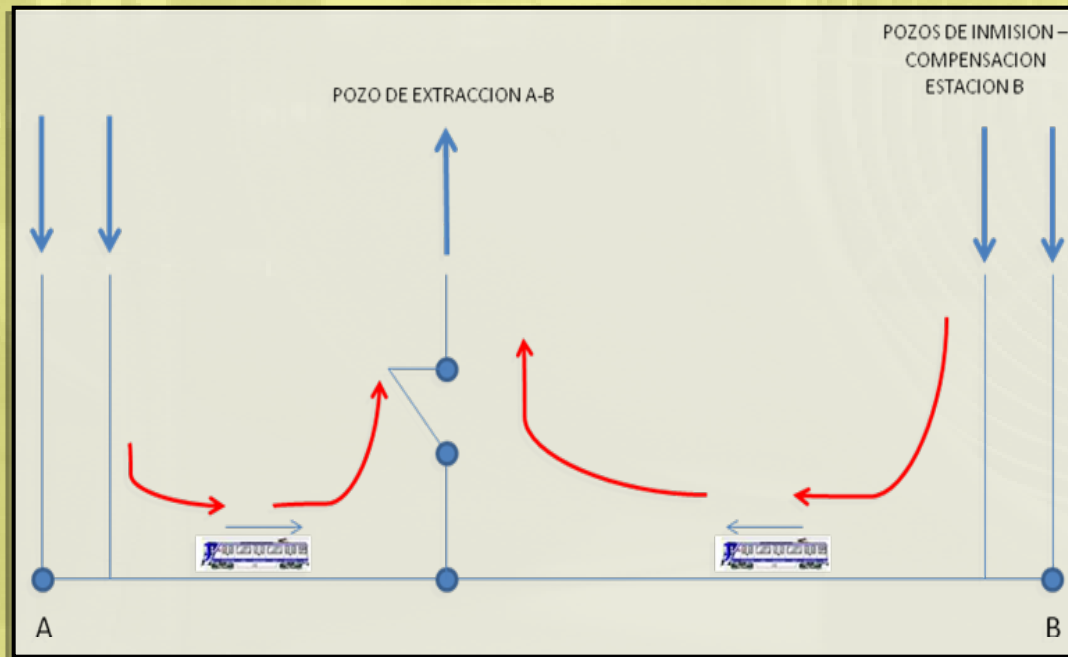
EVACUACIÓN DE CARGA TÉRMICA: Cálculo del caudal térmico



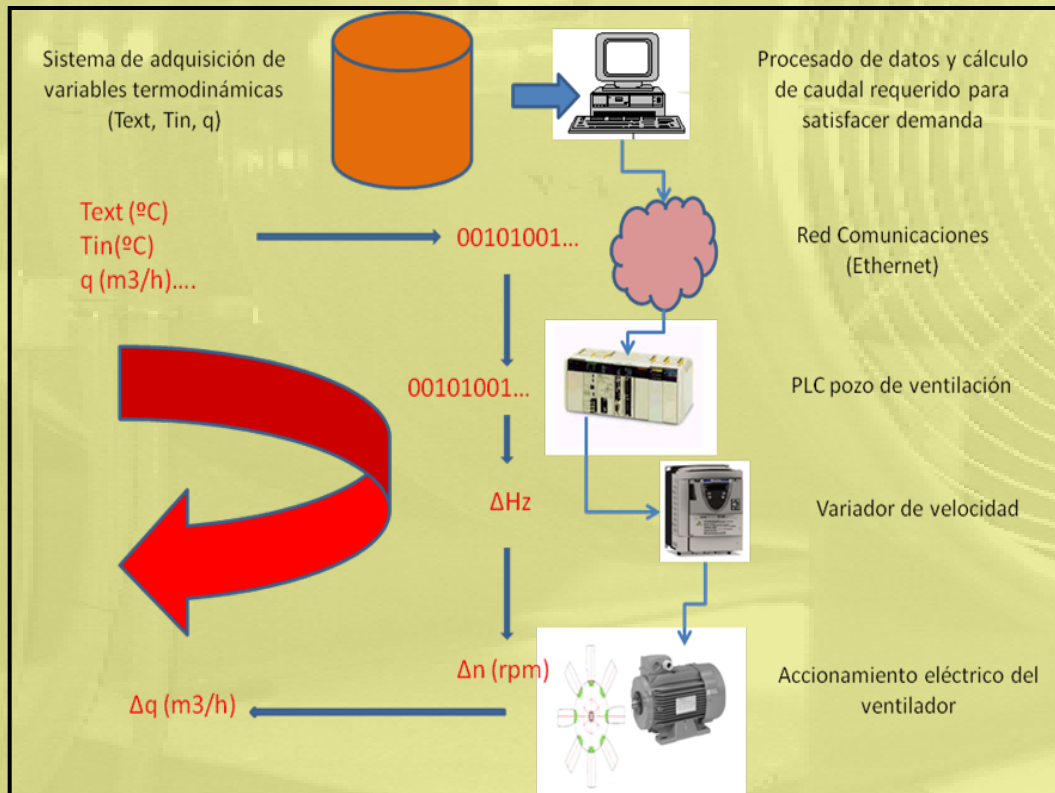
PROGRAMA DE FUNCIONAMIENTO AJUSTADO A REQUERIMIENTOS

CAUDAL	INVIERNO	VERANO	EMERGENCIA
TOTAL INMISION	C_{IDA} (si es posible, por efecto pistón)	$T_{ext} < 17^{\circ}C$ ó T_{in} decreciente → C_{TERM}	PARADA
		C_{IDA} (si es posible, por efecto pistón)	
TOTAL EXTRACCION	$2 \cdot C_{IDA}$ (si es posible, por efecto pistón)	$T_{ext} < 17^{\circ}C$ ó T_{in} decreciente → $2C_{TERM}$	$2 \cdot C_{VCRITICA}$
		$2 \cdot C_{IDA}$ (si es posible, por efecto pistón)	

1 MAXIMIZAR VENTILACIÓN GRATUITA POR EFECTO PISTÓN



2 REGULACIÓN DEL CAUDAL TÉRMICO EN BASE A MEDIDA DE VARIABLES TERMODINÁMICAS



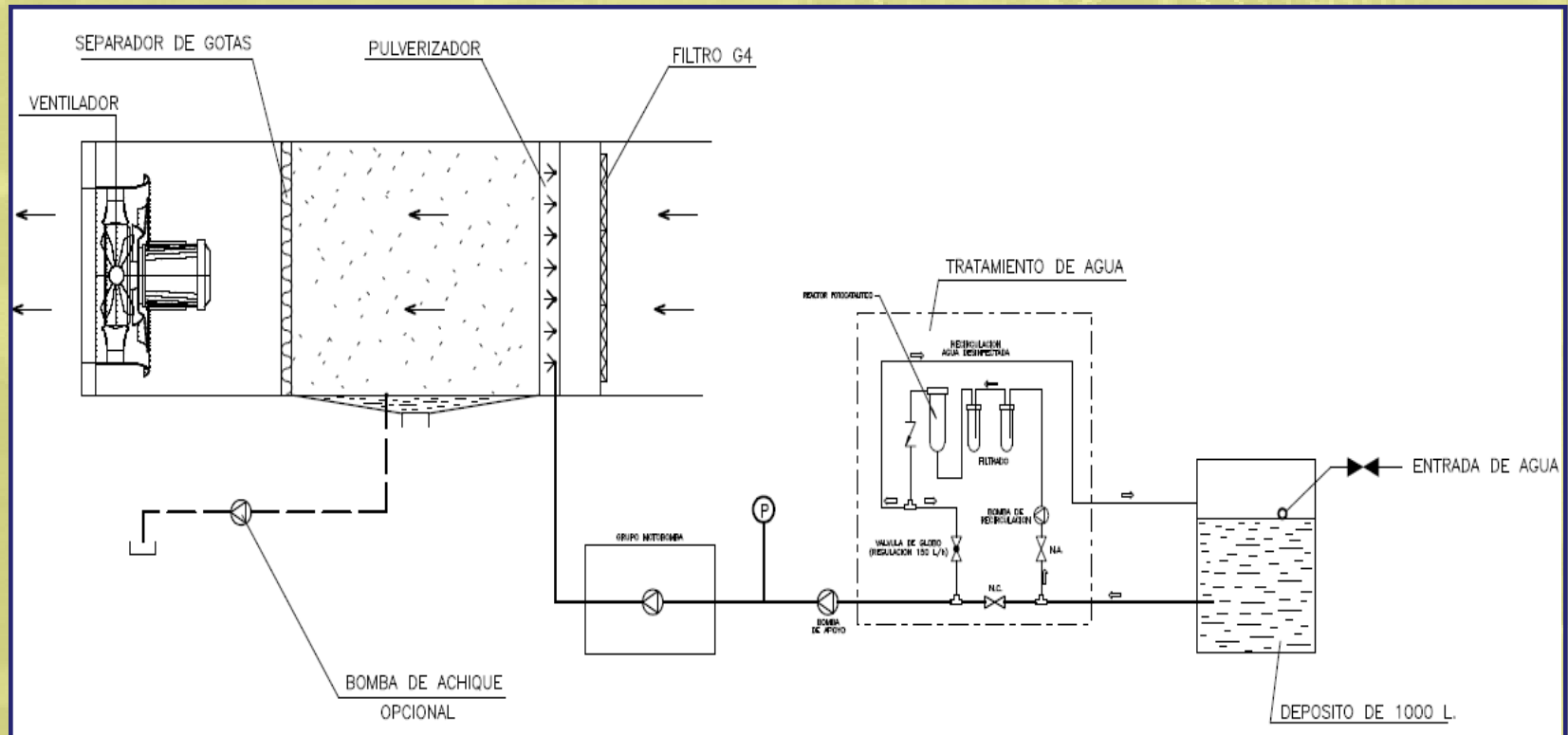
$$\pi_W \sim W/\rho N^3 D^5$$

$$\pi_Q \sim Q/ND^3$$

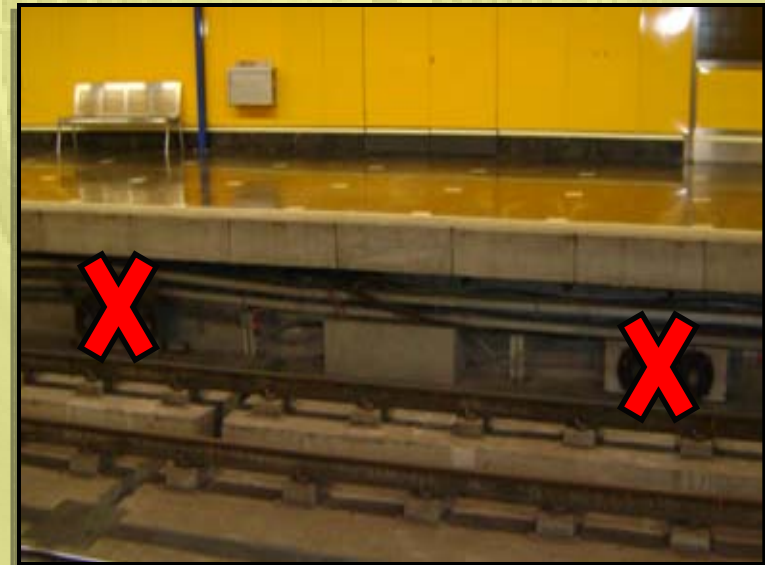
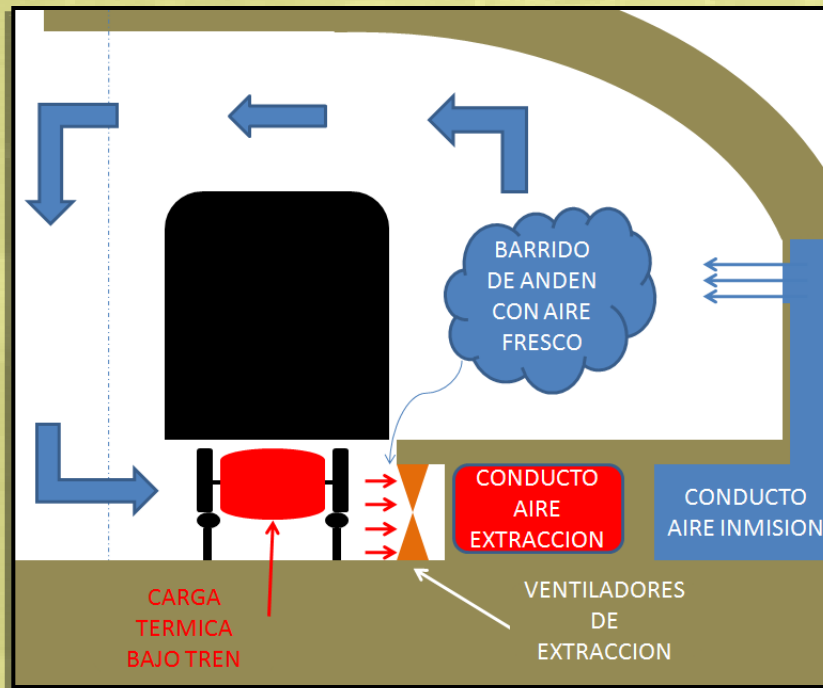
$$W_2/W_1 = (N_2/N_1)^3$$

**REDUCCIÓN DEL
 CONSUMO ENERGÉTICO
 Y DEL IMPACTO
 AMBIENTAL DE LA
 INSTALACIÓN (TEII)**

3 ENFRIAMIENTO ADIABÁTICO DEL AIRE INMISIONADO



4 REDUCCIÓN DE LA CARGA TÉRMICA EN SU ORIGEN



- ✓ ES PRECISO PROFUNDIZAR EN EL CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA FUNDAMENTAL, EL FRENADO DE TRENES: HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN ESPECÍFICAS
- ✓ ES PRECISO INCLUIR LA CONTRIBUCIÓN DEL EFECTO PISTÓN MEDIANTE HERRAMIENTAS UNÍVOCAS Y HOMOGÉNEAS, DADA SU RELEVANCIA
- ✓ EMPLEAR LA SIMULACIÓN NUMÉRICA (CFD) PARA ANALIZAR LA CONTRIBUCIÓN DE FENÓMENOS IMPORTANTES PERO DIFÍCILES DE COMPUTAR ANALÍTICAMENTE
- ✓ CONTRIBUIR A LA REDUCCIÓN DE CARGA TÉRMICA EN SU ORIGEN (TRAZADO DE LÍNEA, CLIMATIZACIÓN INNECESARIA...) SOSTENIBILIDAD COMO CRITERIO DE DISEÑO
- ✓ EMPLEAR SISTEMAS AUXILIARES DE MEJORA AMBIENTAL (UTA) SÓLO EN LOS CASOS EXTRICTAMENTE NECESARIOS
- ✓ DEFINIR EQUIPAMIENTOS QUE PERMITAN POSTERIORES MODOS DE OPERACIÓN SOSTENIBLE

- ✓ REDUCIR LAS HORAS DE FUNCIONAMIENTO A CAUDAL TÉRMICO A LAS REALMENTE EFECTIVAS Y NECESARIAS
- ✓ AJUSTAR LOS PUNTOS DE TRABAJO DE LOS VENTILADORES AL CAUDAL ASOCIADO A RENOVACIONES MÍNIMAS
- ✓ PROMOVER OPERATIVAS QUE PERMITAN EL APROVECHAMIENTO DEL EFECTO PISTÓN EN LOS CASOS EN LOS QUE GARANTICE RENOVACIONES MÍNIMAS
- ✓ APROVECHAR LOS SISTEMAS DE MEDIDA DE VARIABLES TERMODINÁMICAS PARA OPTIMIZAR EL CAUDAL TÉRMICO, MEDIANTE EL EMPLEO DE VARIADORES DE VELOCIDAD

A large, industrial-grade circular fan with a white metal grille, mounted on a concrete base. The fan is the central focus of the image, with other similar fans visible in the background, slightly out of focus.

**¡GRACIAS POR SU
ATENCIÓN!**