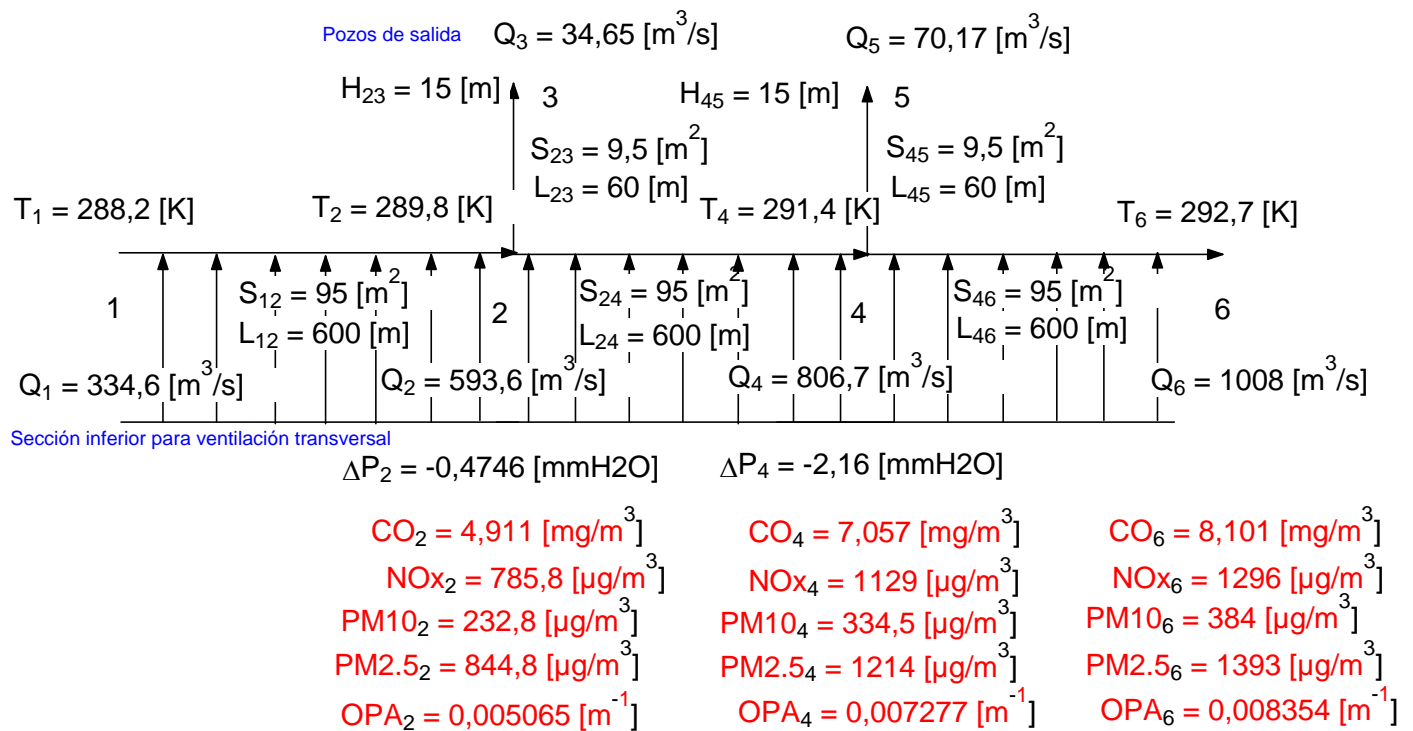


Ventilación transversal natural o forzada del túnel. Flujos de aire y emisiones



Análisis de la ventilación en un túnel mediante simulación en estado estacionario

Copyright 2008 José Ignacio Zubizarreta Dr. Ing.Ind. ETSII UPM

Prohibida la reproducción total o parcial sin permiso del autor

La programación de este modelo de estado estacionario sigue los fundamentos señalados en el artículo:

Axel Bring, Tor-Göran Malmström, and Carl Axel Boman; Simulation and Measurement of Road Tunnel Ventilation; Tunnelling and Underground Space Technology Volume 12, Number 3, (1997) 417-424

que se refiere a la descripción de un modelo conceptual desarrollado por la compañía EQUA Simulation AB, P.O. Box 1376 SE-172 27 Sundbyberg, Sweden; para PC, denominado:

IDA Tunnel Road and Rail Tunnel Ventilation and Fire Simulation Software. EQUA Simulation Technology Group

cuya información y catálogo se encuentran en Internet.

La calibración del modelo se puede realizar a través de medidas reales siguiendo lo señalado en el artículo:

H.-M. Jang, F. Chen; On the determination of the aerodynamic coefficients of highway tunnels; J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 90 (2002) 869-896

lo cual puede hacerse, ajustando los parámetros acotados del modelo, minimizando la suma de las desviaciones cuadráticas ponderadas entre los valores experimentales y los obtenidos a través del modelo, utilizando este mismo entorno de Engineering Equation Solver.

Parámetros iniciales

$T_1 = 273,15 \text{ [K]} + 15 \text{ [C]}$ Temperatura ambiente exterior

$$P_1 = 1 \text{ [atm]} \cdot \left| 101325 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{atm}} \right| \text{ Presión atmosférica exterior}$$

Densidad del aire exterior

$$\rho_1 = P_1 \cdot \frac{\text{MolarMass ['Air']}}{8314 \text{ [J/kmol-K]} \cdot T_1}$$

Contracción en el portal de entrada

$$K_{en} = 0,5 \text{ Factor de pérdida de carga por el portal de entrada de aire al tunel}$$

Velocidad de vehículos en km/h

$$U = 60 \text{ [km/h]} \cdot \left| 0,2778 \cdot \frac{\text{m/s}}{\text{km/h}} \right| \text{ Se considera la velocidad del tráfico}$$

Energía calorífica liberada en vatios por vehículo, 8 L/100 km para un rendimiento del motor del 30% por vehículo

$$\text{Energía} = 0,00008 \text{ [L/m]} \cdot 0,8 \text{ [kg/l]} \cdot 4,4 \times 10^7 \text{ [J/kg]} \cdot 0,7 \cdot U \text{ Se pueden variar estos datos}$$

Emisión de CO y NOx en los vehículos en g/m a 60 km/h = (g/h)/(velocidad en m/h). Se pueden variar estos datos

$$\text{CO} = 0,005 \text{ [g/m]} \text{ Se toma un 70% del tráfico diesel y un 30% de gasolina con una media de las emisiones Euro1 y Euro2}$$

$$\text{NOx} = 0,0008 \text{ [g/m]} \text{ Resultan 5 g/km en CO y 0,8 g/km en NOx que se pueden variar considerando el parque de vehículos}$$

Emisión de partículas PM10 y PM2.5 por vehículo 237 mg/km PM10 y 20+840 = 860 mg/km PM2.5 que incluye los vehículos diesel 70% 1200 mg/km

$$\text{PM10} = 0,000237 \text{ [g/m]} \text{ Se pueden variar estos datos}$$

$$\text{PM2.5} = 0,00086 \text{ [g/m]} \text{ Se pueden variar estos datos}$$

Tráfico número de vehículos por segundo

$$n_s = 1 \text{ [s}^{-1}] \text{ Se puede variar este valor}$$

Número de vehículos por m = (número de vehículos/s)/(velocidad en m/s)

$$N_v = \frac{n_s}{U}$$

Coefficiente aerodinámico de arrastre de los vehículos

$$C_d = 0,33 \text{ Se puede variar este valor tomado de referencias bibliográficas}$$

Área frontal promedio de los vehículos

$$A_v = 2,5 \text{ [m}^2] \text{ Se puede variar este valor tomado de referencias bibliográficas}$$

Tramo 1-2

Longitud del tramo

$$L_{12} = 600 \text{ [m]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Superficie de la sección del tunel

$$S_{12} = 95 \text{ [m}^2\text{]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Perímetro de la sección

$$Pe_{12} = 38 \text{ [m]} \text{ Se puede variar este valor con los datos geométricos del tunel real}$$

Ventilación transversal del tramo

Profundidad de ventilación

$$HV_2 = 25 \text{ [m]}$$

Área total de apertura ventanas a túnel en el tramo

$$AV_{12} = 30 \text{ [m}^2\text{]}$$

Caudal de ventilación $G = AV \cdot 0,6 \cdot ((P + \rho g H - p) \cdot 2 \cdot r_o)^{0,5}$

$$GV_{12} = AV_{12} \cdot 0,6 \cdot \left[\left(P_1 + \rho_1 \cdot 9,807 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot HV_2 - \left[\frac{P_1 + P_2}{2} + \rho_2 \cdot 9,807 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot H_{23} \right] \right) \cdot 2 \cdot \rho_1 \right]^{0,5}$$

Diámetro hidráulico del tramo $4S/Pe$

$$D_{12} = 4 \cdot \frac{S_{12}}{Pe_{12}}$$

Emisión de CO en los coches considerando 5 g/km Vehículo obtenemos g/s

$$CO_{12} = CO \cdot L_{12} \cdot n_s$$

Emisión de NOx en los coches considerando 0,8 g/km Vehículo obtenemos g/s

$$NO_{12} = NOx \cdot L_{12} \cdot n_s$$

Emisión de PM10 y PM2.5 en los coches en g/s

$$PM10_{12} = PM10 \cdot L_{12} \cdot n_s$$

$$PM2.5_{12} = PM2.5 \cdot L_{12} \cdot n_s$$

Número de ventiladores activos en el tramo

$$N_{F12} = 0 \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Área de flujo de los ventiladores

$$A_{F12} = 2 \text{ [m}^2\text{]} \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Velocidad axial del aire en los ventiladores

$$V_{F12} = 30 \text{ [m/s]} \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Factor de presión del ventilador

$$KV_{12} = 0,56 \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Accesorios de pérdida de carga en el tramo

$$K_{12} = 0 \quad \text{Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Rugosidad superficial del tramo

$$e_{12} = 0,003 \quad [\text{m}] \quad \text{Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Número de Reynolds del tramo

$$\text{Re}_{12} = \rho_2 \cdot V_2 \cdot \frac{D_{12}}{\text{Visc} ['\text{Air}'; T = T_2]}$$

Coefficiente de fricción del tramo

$$f_{12} = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{\text{Re}_{12}} \right)^{12} + \left(\left[2,457 \cdot \ln \left(\frac{1}{\left[\frac{7}{\text{Re}_{12}} \right]^{0,9} + 0,27 \cdot \frac{e_{12}}{D_{12}}} \right)} \right]^{16} + \left[\frac{37530}{\text{Re}_{12}} \right]^{16} \right)^{-1,5} \right] \left[\frac{1}{12} \right]$$

Balance de momento en el tramo 1-2

$$-\rho_1 \cdot \frac{K_{en}}{2} \cdot V_1^2 + P_1 + C_d \cdot \frac{\rho_1}{2} \cdot A_v \cdot N_v \cdot \frac{L_{12}}{S_{12}} \cdot [U - V_2]^2 + N_{F12} \cdot \rho_1 \cdot A_{F12} \cdot V_{F12} \cdot [V_{F12} - V_2]$$

$$\cdot \frac{KV_{12}}{S_{12}} = P_2 + f_{12} \cdot \rho_2 \cdot \left[\frac{L_{12}}{D_{12}} + K_{12} \right] \cdot V_2^2$$

Balance de materia en el tramo 1-2

$$V_1 \cdot \rho_1 + \frac{GV_{12}}{S_{12}} = V_2 \cdot \rho_2$$

$$\rho_2 = P_2 \cdot \frac{\text{MolarMass} ['\text{Air}']}{8314 \quad [\text{J/kmol-K}] \cdot T_2}$$

Balance de energía en el tramo 1.2

$$N_v \cdot L_{12} \cdot \text{Energía} = S_{12} \cdot V_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\text{Cp} ['\text{Air}'; T = T_1]}{\text{MolarMass} ['\text{Air}']} \cdot [T_2 - T_1]$$

Balance de materia en el nodo 2

$$S_{12} \cdot V_2 = S_{23} \cdot V_{a3} + S_{24} \cdot V_{d2} \quad V_{d2} \text{ y } V_{a3} \text{ son las velocidades en el túnel después de la bifurcación en el nodo 2}$$

Depresión en el nodo 2

$$\Delta P_2 = [P_2 - P_1] \cdot \left| 0,102 \cdot \frac{\text{mmH}_2\text{O}}{\text{Pa}} \right|$$

Tramo 2-4

Longitud del tramo

$$L_{24} = 600 \quad [\text{m}] \quad \text{Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Superficie de la sección del tunel

$$S_{24} = 95 \text{ [m}^2\text{]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Perímetro de la sección

$$Pe_{24} = 38 \text{ [m]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Ventilación transversal del tramo

Profundidad de ventilación

$$HV_4 = 25 \text{ [m]}$$

Área total de apertura ventanas a túnel en el tramo

$$AV_{24} = 30 \text{ [m}^2\text{]}$$

Caudal de ventilación $G = AV \cdot 0,6 \cdot ((P + \rho g H - p) \cdot 2 \cdot ro)^{0,5}$

$$GV_{24} = AV_{24} \cdot 0,6 \cdot \left[\left(P_1 + \rho_1 \cdot 9,807 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot HV_4 - \left[\frac{P_2 + P_4}{2} + \rho_2 \cdot 9,807 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot H_{45} \right] \right) \cdot 2 \cdot \rho_1 \right]^{0,5}$$

Diámetro hidráulico del tramo $4S/Pe$

$$D_{24} = 4 \cdot \frac{S_{24}}{Pe_{24}}$$

Emisión de CO en los coches considerando 1 g/km Vehículo obtenemos g/s

$$CO_{24} = CO \cdot L_{24} \cdot n_s$$

Emisión de NOx en los coches considerando 0,8 g/km Vehículo obtenemos g/s

$$NO_{24} = NOx \cdot L_{24} \cdot n_s$$

Emisión de PM10 y PM2.5 en los coches en g/s

$$PM10_{24} = PM10 \cdot L_{24} \cdot n_s$$

$$PM2.5_{24} = PM2.5 \cdot L_{24} \cdot n_s$$

Número de ventiladores activos en el tramo

$$N_{F24} = 0 \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Área de flujo de los ventiladores

$$A_{F24} = 2 \text{ [m}^2\text{]} \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Velocidad axial del aire en los ventiladores

$$V_{F24} = 30 \text{ [m/s]} \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Factor de presión del ventilador

$$KV_{24} = 0,56 \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Accesorios de pérdida de carga en el tramo

$$K_{24} = 0 \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Rugosidad superficial del tramo

$$e_{24} = 0,003 \text{ [m]}$$

Número de Reynolds del tramo

$$Re_{24} = \rho_4 \cdot V_2 \cdot \frac{D_{24}}{\mathbf{Visc} \text{ ['Air' ; T = T}_4 \text{]}}$$

Coefficiente de fricción del tramo

$$f_{24} = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{Re_{24}} \right)^{12} + \left(\left[2,457 \cdot \ln \left(\frac{1}{\left[\frac{7}{Re_{24}} \right]^{0,9} + 0,27 \cdot \frac{e_{24}}{D_{24}}} \right)} \right)^{16} + \left[\frac{37530}{Re_{24}} \right]^{16} \right)^{-1,5} \left[\frac{1}{12} \right] \right]$$

Balance de momento en el tramo 2-4

$$P_2 + C_d \cdot \frac{\rho_2}{2} \cdot A_v \cdot N_v \cdot \frac{L_{24}}{S_{24}} \cdot [U - V_{d2}]^2 + N_{F24} \cdot \rho_2 \cdot A_{F24} \cdot V_{F24} \cdot [V_{F24} - V_{d2}] \cdot \frac{KV_{24}}{S_{24}} = P_4 + f_{24} \cdot \rho_4 \cdot \left[\frac{L_{24}}{D_{24}} + K_{24} \right] \cdot V_4^2$$

Balance de materia en el tramo 2-4

$$V_{d2} \cdot \rho_2 + \frac{GV_{24}}{S_{24}} = V_4 \cdot \rho_4$$

$$\rho_4 = P_4 \cdot \frac{\mathbf{MolarMass} \text{ ['Air']}}{8314 \text{ [J/kmol-K]} \cdot T_4}$$

Balance de energía en el tramo 2-4

$$N_v \cdot L_{24} \cdot \text{Energía} = S_{24} \cdot V_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\mathbf{Cp} \text{ ['Air' ; T = T}_2 \text{]}}{\mathbf{MolarMass} \text{ ['Air']}} \cdot [T_4 - T_2]$$

Tramo 2-3

Altura de la descarga sobre el tunel

$$H_{23} = 15 \text{ [m]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Longitud del tramo

$$L_{23} = 60 \text{ [m]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Superficie de la sección del tunel

$$S_{23} = 9,5 \text{ [m}^2\text{]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Perímetro de la sección

$$Pe_{23} = 10 \text{ [m]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Diámetro hidráulico del tramo 4S/Pe

$$D_{23} = 4 \cdot \frac{S_{23}}{Pe_{23}}$$

Número de ventiladores activos en el tramo

$$N_{F23} = 0 \quad \text{Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Área de flujo de los ventiladores

$$A_{F23} = 2 \quad [m^2] \quad \text{Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Velocidad axial del aire en los ventiladores

$$V_{F23} = 30 \quad [m/s] \quad \text{Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Factor de presión del ventilador

$$KV_{23} = 0,56 \quad \text{Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Accesorios de pérdida de carga en el tramo

$$K_{23} = 0 \quad \text{Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Rugosidad superficial del tramo

$$e_{23} = 0,003 \quad [m]$$

Número de Reynolds del tramo

$$Re_{23} = \rho_2 \cdot V_3 \cdot \frac{D_{23}}{\mathbf{Visc} \left[\text{'Air'} ; T = T_2 \right]}$$

Coefficiente de fricción del tramo

$$f_{23} = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{Re_{23}} \right)^{12} + \left(\left[2,457 \cdot \ln \left(\frac{1}{\left[\frac{7}{Re_{23}} \right]^{0,9} + 0,27 \cdot \frac{e_{23}}{D_{23}}} \right)} \right]^{16} + \left[\frac{37530}{Re_{23}} \right]^{16} \right)^{-1,5} \right] \left[\frac{1}{12} \right]$$

Balance de momento en el tramo 2-3

$$P_2 + N_{F23} \cdot \rho_2 \cdot A_{F23} \cdot V_{F23} \cdot [V_{F23} - V_3] \cdot \frac{KV_{23}}{S_{23}} = P_3 + 9,807 \quad [m/s^2] \cdot [\rho_1 - \rho_3] \cdot H_{23} + f_{23} \cdot \rho_3$$

$$\cdot \left[\frac{\frac{L_{23}}{D_{23}} + K_{23}}{2} \right] \cdot V_3^2 - \frac{\rho_3}{2} \cdot V_3^2$$

Balance de materia en el tramo 2-3

$$V_{a3} \cdot \rho_3 = V_2 \cdot \rho_2$$

$$\rho_3 = P_3 \cdot \frac{\mathbf{MolarMass} \left[\text{'Air'} \right]}{8314 \quad [J/kmol-K] \cdot T_3}$$

Balance de energía en el tramo 2-3

$$T_3 = T_2$$

Tramo 4-6

Longitud del tramo

$$L_{46} = 600 \text{ [m]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Superficie de la sección del tunel

$$S_{46} = 95 \text{ [m}^2\text{]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Perímetro de la sección

$$Pe_{46} = 38 \text{ [m]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

*Ventilación transversal del tramo**Profundidad de ventilación*

$$HV_6 = 25 \text{ [m]}$$

Área total de apertura ventanas a túnel en el tramo

$$AV_{46} = 30 \text{ [m}^2\text{]}$$

Caudal de ventilación $G = AV \cdot 0,6 \cdot ((P + \rho g H - p) \cdot 2 \cdot ro)^{0,5}$

$$GV_{46} = AV_{46} \cdot 0,6 \cdot \left[\left(P_1 + \rho_1 \cdot 9,807 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot HV_6 - \left[\frac{P_4 + P_6}{2} + \rho_2 \cdot 9,807 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot H_{45} \right] \right) \cdot 2 \cdot \rho_1 \right]^{0,5}$$

Diámetro hidráulico del tramo $4S/Pe$

$$D_{46} = 4 \cdot \frac{S_{46}}{Pe_{46}}$$

Emisión de CO en los coches considerando 1 g/km Vehículo obtenemos g/s

$$CO_{46} = CO \cdot L_{46} \cdot n_s$$

Emisión de NOx en los coches considerando 0,8 g/km Vehículo obtenemos g/s

$$NO_{46} = NOx \cdot L_{46} \cdot n_s$$

Emisión de PM10 y PM2.5 en los coches en g/s

$$PM10_{46} = PM10 \cdot L_{46} \cdot n_s$$

$$PM2.5_{46} = PM2.5 \cdot L_{46} \cdot n_s$$

Número de ventiladores activos en el tramo

$$N_{F46} = 0 \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Área de flujo de los ventiladores

$$A_{F46} = 2 \text{ [m}^2\text{]} \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Velocidad axial del aire en los ventiladores

$$V_{F46} = 30 \text{ [m/s]} \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Factor de presión del ventilador

$$KV_{46} = 0,56 \quad \text{Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Accesorios de pérdida de carga en el tramo

$$K_{46} = 0 \quad \text{Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Rugosidad superficial del tramo

$$e_{46} = 0,003 \quad [\text{m}]$$

Número de Reynolds del tramo

$$Re_{46} = \rho_4 \cdot V_4 \cdot \frac{D_{46}}{\text{Visc} ['\text{Air}'; T = T_4]}$$

Coefficiente de fricción del tramo

$$f_{46} = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{Re_{46}} \right)^{12} + \left(\left[2,457 \cdot \ln \left(\frac{1}{\left[\frac{7}{Re_{46}} \right]^{0,9} + 0,27 \cdot \frac{e_{46}}{D_{46}}} \right)} \right)^{16} + \left[\frac{37530}{Re_{46}} \right]^{16} \right)^{-1,5} \left[\frac{1}{12} \right] \right]$$

Balance de momento en el tramo 4-6

$$P_4 + C_d \cdot \frac{\rho_2}{2} \cdot A_v \cdot N_v \cdot \frac{L_{46}}{S_{46}} \cdot [U - V_{d4}]^2 + N_{F46} \cdot \rho_2 \cdot A_{F46} \cdot V_{F46} \cdot [V_{F46} - V_{d4}] \cdot \frac{KV_{46}}{S_{46}} + \frac{\rho_6}{2} \cdot V_6^2 = P_6 + f_{46} \cdot \rho_4 \cdot \left[\frac{L_{46}}{D_{46}} + K_{46} \right] \cdot V_6^2$$

Balance de materia en el tramo 4-6

$$V_{d4} \cdot \rho_4 + \frac{GV_{46}}{S_{46}} = V_6 \cdot \rho_6$$

$$\rho_6 = P_6 \cdot \frac{\text{MolarMass} ['\text{Air}']} {8314 [\text{J/kmol-K}] \cdot T_6}$$

Balance de energía en el tramo 4-6

$$N_v \cdot L_{46} \cdot \text{Energía} = S_{46} \cdot V_{d4} \cdot \rho_4 \cdot \frac{C_p ['\text{Air}'; T = T_4]}{\text{MolarMass} ['\text{Air}']} \cdot [T_6 - T_4]$$

Balance de materia en el nodo 4

$$S_{24} \cdot V_4 = S_{45} \cdot V_{a5} + S_{46} \cdot V_{d4} \quad V_{d4} \text{ y } V_{a5} \text{ son las velocidades en el túnel después de la bifurcación en el nodo 4}$$

Depresión en el nodo 4

$$\Delta P_4 = [P_4 - P_1] \cdot \left| 0,102 \cdot \frac{\text{mmH}_2\text{O}}{\text{Pa}} \right|$$

Tramo 4-5

Altura de la descarga sobre el tunel

$$H_{45} = 15 \text{ [m]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Longitud del tramo

$$L_{45} = 60 \text{ [m]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Superficie de la sección del tunel

$$S_{45} = 9,5 \text{ [m}^2\text{]} \text{ Se puede variar este valor para considerar el del tunel real}$$

Perímetro de la sección

$$Pe_{45} = 10 \text{ [m]}$$

Diámetro hidráulico del tramo 4S/Pe

$$D_{45} = 4 \cdot \frac{S_{45}}{Pe_{45}}$$

Número de ventiladores activos en el tramo

$$N_{F45} = 0 \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Área de flujo de los ventiladores

$$A_{F45} = 2 \text{ [m}^2\text{]} \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Velocidad axial del aire en los ventiladores

$$V_{F45} = 30 \text{ [m/s]} \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Factor de presión del ventilador

$$KV_{45} = 0,56 \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Accesorios de pérdida de carga en el tramo

$$K_{45} = 0 \text{ Se puede variar este valor para considerar los del tunel real}$$

Rugosidad superficial del tramo

$$e_{45} = 0,003 \text{ [m]}$$

Número de Reynolds del tramo

$$Re_{45} = \rho_4 \cdot V_5 \cdot \frac{D_{45}}{\text{Visc} \text{ ['Air' ; T = T}_4 \text{]}}$$

Coefficiente de fricción del tramo

$$f_{45} = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{Re_{45}} \right)^{12} + \left(\left[2,457 \cdot \ln \left(\frac{1}{\left[\frac{7}{Re_{45}} \right]^{0,9} + 0,27 \cdot \frac{e_{45}}{D_{45}}} \right)} \right)^{16} + \left[\frac{37530}{Re_{45}} \right]^{16} \right)^{-1,5} \right] \left[\frac{1}{12} \right]$$

Balance de momento en el tramo 4-5

$$P_4 + N_{F45} \cdot \rho_4 \cdot A_{F45} \cdot V_{F45} \cdot [V_{F45} - V_5] \cdot \frac{KV_{45}}{S_{45}} = P_5 + 9,807 \text{ [m/s}^2] \cdot [\rho_1 - \rho_4] \cdot H_{45} + f_{45} \cdot \rho_4$$

$$\cdot \left[\frac{\frac{L_{45}}{D_{45}} + K_{45}}{2} \right] \cdot V_5^2 - \frac{\rho_5}{2} \cdot V_5^2$$

Balance de materia en el tramo 4-5

$$V_{a5} \cdot \rho_4 = V_5 \cdot \rho_5$$

$$\rho_5 = P_5 \cdot \frac{\text{MolarMass ['Air']}}{8314 \text{ [J/kmol-K]} \cdot T_5}$$

Balance de energía en el tramo 4-5

$$T_4 = T_5$$

Condiciones de contorno

$$P_6 = P_1$$

$$P_3 = P_1$$

$$P_5 = P_1$$

Caudales

$$Q_1 = S_{12} \cdot V_1$$

$$Q_2 = S_{24} \cdot V_2$$

$$Q_3 = S_{23} \cdot V_3$$

$$Q_4 = S_{24} \cdot V_4$$

$$Q_5 = S_{45} \cdot V_5$$

$$Q_6 = S_{46} \cdot V_6$$

Contaminaciones en miligramos y microgramos por metro cúbico normalizado a 20 °C y 101,3 kPa en nodos

$$CO_2 = \frac{CO_{12}}{Q_2} \cdot \frac{T_2}{298,15 \text{ [K]}} \cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_2} \cdot \left| 1000 \cdot \frac{mg/m^3}{g/m^3} \right|$$

$$NO_{x2} = \frac{NO_{12}}{Q_2} \cdot \frac{T_2}{298,15 \text{ [K]}} \cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_2} \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\mu g/m^3}{g/m^3} \right|$$

$$PM_{10_2} = \frac{PM_{10_{12}}}{Q_2} \cdot \frac{T_2}{298,15 \text{ [K]}} \cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_2} \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\mu g/m^3}{g/m^3} \right|$$

$$PM_{2.5_2} = \frac{PM_{2.5_{12}}}{Q_2} \cdot \frac{T_2}{298,15 \text{ [K]}} \cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_2} \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\mu g/m^3}{g/m^3} \right|$$

$$OPA_2 = [PM_{10_2} + PM_{2.5_2}] \cdot \left| 1,0 \times 10^{-6} \cdot \frac{g/m^3}{\mu g/m^3} \right| \cdot 4,7 \text{ [m}^2/g] \text{ Opacidad en el nodo 2}$$

$$CO_3 = CO_2$$

$$NO_{x3} = NO_{x2}$$

$$PM10_3 = PM10_2$$

$$PM2.5_3 = PM2.5_2$$

$$OPA_3 = OPA_2$$

$$CO_4 = \left[\frac{CO_{12} + CO_{24} - Q_3 \cdot \frac{298,15 \text{ [K]}}{T_3} \cdot \frac{P_4}{101300 \text{ [Pa]}} \cdot CO_3 \cdot \left| 0,001 \cdot \frac{\text{g/s}}{\text{mg/s}} \right|}{Q_4} \right] \cdot \frac{T_4}{298,15 \text{ [K]}}$$

$$\cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_4} \cdot \left| 1000 \cdot \frac{\text{mg/m}^3}{\text{g/m}^3} \right|$$

$$NOx_4 = \left[\frac{NO_{12} + NO_{24} - Q_3 \cdot \frac{298,15 \text{ [K]}}{T_3} \cdot \frac{P_4}{101300 \text{ [Pa]}} \cdot NOx_3 \cdot \left| 1,0 \times 10^{-6} \cdot \frac{\text{g/s}}{\mu\text{g/s}} \right|}{Q_4} \right] \cdot \frac{T_4}{298,15 \text{ [K]}}$$

$$\cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_4} \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\mu\text{g/m}^3}{\text{g/m}^3} \right|$$

$$PM10_4 = \left[\frac{PM10_{12} + PM10_{24} - Q_3 \cdot \frac{298,15 \text{ [K]}}{T_3} \cdot \frac{P_4}{101300 \text{ [Pa]}} \cdot PM10_3 \cdot \left| 1,0 \times 10^{-6} \cdot \frac{\text{g/s}}{\mu\text{g/s}} \right|}{Q_4} \right]$$

$$\cdot \frac{T_4}{298,15 \text{ [K]}} \cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_4} \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\mu\text{g/m}^3}{\text{g/m}^3} \right|$$

$$PM2.5_4 = \left[\frac{PM2.5_{12} + PM2.5_{24} - Q_3 \cdot \frac{298,15 \text{ [K]}}{T_3} \cdot \frac{P_4}{101300 \text{ [Pa]}} \cdot PM2.5_3 \cdot \left| 1,0 \times 10^{-6} \cdot \frac{\text{g/s}}{\mu\text{g/s}} \right|}{Q_4} \right]$$

$$\cdot \frac{T_4}{298,15 \text{ [K]}} \cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_4} \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\mu\text{g/m}^3}{\text{g/m}^3} \right|$$

$$OPA_4 = [PM10_4 + PM2.5_4] \cdot \left| 1,0 \times 10^{-6} \cdot \frac{\text{g/m}^3}{\mu\text{g/m}^3} \right| \cdot 4,7 \text{ [m}^2/\text{g]} \text{ Opacidad en el nodo 4}$$

$$CO_5 = CO_4$$

$$NOx_5 = NOx_4$$

$$PM10_5 = PM10_4$$

$$PM2.5_5 = PM2.5_4$$

$$OPA_5 = OPA_4$$

$$CO_6 = \left[\frac{CO_{12} + CO_{24} + CO_{46} - Q_3 \cdot \frac{298,15 \text{ [K]}}{T_3} \cdot \frac{P_4}{101300 \text{ [Pa]}} \cdot CO_3 \cdot \left| 0,001 \cdot \frac{\text{g/s}}{\text{mg/s}} \right| - Q_5 \cdot \frac{298,15 \text{ [K]}}{T_5} \cdot \frac{P_5}{101300}}{Q_6} \right]$$

$$\cdot \frac{T_6}{298,15 \text{ [K]}} \cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_6} \cdot \left| 1000 \cdot \frac{\text{mg/m}^3}{\text{g/m}^3} \right|$$

$$\text{NOx}_6 = \left[\frac{\text{NO}_{12} + \text{NO}_{24} + \text{NO}_{46} - Q_3 \cdot \frac{298,15 \text{ [K]}}{T_3} \cdot \frac{P_4}{101300 \text{ [Pa]}} \cdot \text{NOx}_3 \cdot \left| 1,0 \times 10^{-6} \cdot \frac{\text{g/s}}{\mu\text{g/s}} \right| - Q_5 \cdot \frac{298,15 \text{ [K]}}{T_5} \cdot 10}{Q_6} \right]$$

$$\cdot \frac{T_6}{298,15 \text{ [K]}} \cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_6} \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\mu\text{g/m}^3}{\text{g/m}^3} \right|$$

$$\text{PM10}_6 = \left[\frac{\text{PM10}_{12} + \text{PM10}_{24} + \text{PM10}_{46} - Q_3 \cdot \frac{298,15 \text{ [K]}}{T_3} \cdot \frac{P_4}{101300 \text{ [Pa]}} \cdot \text{PM10}_3 \cdot \left| 1,0 \times 10^{-6} \cdot \frac{\text{g/s}}{\mu\text{g/s}} \right| - Q_5 \cdot \frac{298,15}{T_5}}{Q_6} \right]$$

$$\cdot \frac{T_6}{298,15 \text{ [K]}} \cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_6} \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\mu\text{g/m}^3}{\text{g/m}^3} \right|$$

$$\text{PM2.5}_6 = \left[\frac{\text{PM2.5}_{12} + \text{PM2.5}_{24} + \text{PM2.5}_{46} - Q_3 \cdot \frac{298,15 \text{ [K]}}{T_3} \cdot \frac{P_4}{101300 \text{ [Pa]}} \cdot \text{PM2.5}_3 \cdot \left| 1,0 \times 10^{-6} \cdot \frac{\text{g/s}}{\mu\text{g/s}} \right| - Q_5 \cdot \frac{298,15}{T_5}}{Q_6} \right]$$

$$\cdot \frac{T_6}{298,15 \text{ [K]}} \cdot \frac{101300 \text{ [Pa]}}{P_6} \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\mu\text{g/m}^3}{\text{g/m}^3} \right|$$

$$\text{OPA}_6 = [\text{PM10}_6 + \text{PM2.5}_6] \cdot \left| 1,0 \times 10^{-6} \cdot \frac{\text{g/m}^3}{\mu\text{g/m}^3} \right| \cdot 4,7 \text{ [m}^2/\text{g]} \text{ Opacidad en el nodo 6}$$

SOLUTION

Unit Settings: [J]/[K]/[Pa]/[kmol]/[degrees]

AV₁₂ = 30 [m²]

AV₄₆ = 30 [m²]

AF₂₃ = 2 [m²]

AF₄₅ = 2 [m²]

A_v = 2,5 [m²]

CO₁₂ = 3 [g/s]

CO₄₆ = 3 [g/s]

ΔP₂ = -0,4746 [mmH₂O]

D₁₂ = 10 [m]

D₂₄ = 10 [m]

D₄₆ = 10 [m]

e₁₂ = 0,003 [m]

e₂₄ = 0,003 [m]

e₄₆ = 0,003 [m]

f₂₃ = 0,01903

f₄₅ = 0,01881

GV₁₂ = 313,1 [kg/s]

GV₄₆ = 323,4 [kg/s]

HV₄ = 25 [m]

H₂₃ = 15 [m]

KV₁₂ = 0,56

KV₂₄ = 0,56

KV₄₆ = 0,56

K₂₃ = 0

K₄₅ = 0

K_{en} = 0,5

L₂₃ = 60 [m]

L₄₅ = 60 [m]

AV₂₄ = 30 [m²]

AF₁₂ = 2 [m²]

AF₂₄ = 2 [m²]

AF₄₆ = 2 [m²]

CO = 0,005 [g/m]

CO₂₄ = 3 [g/s]

C_d = 0,33

ΔP₄ = -2,16 [mmH₂O]

D₂₃ = 3,8 [m]

D₄₅ = 3,8 [m]

Energía = 32853 [W]

e₂₃ = 0,003 [m]

e₄₅ = 0,003 [m]

f₁₂ = 0,01517

f₂₄ = 0,01517

f₄₆ = 0,01512

GV₂₄ = 326,3 [kg/s]

HV₂ = 25 [m]

HV₆ = 25 [m]

H₄₅ = 15 [m]

KV₂₃ = 0,56

KV₄₅ = 0,56

K₁₂ = 0

K₂₄ = 0

K₄₆ = 0

L₁₂ = 600 [m]

L₂₄ = 600 [m]

L₄₆ = 600 [m]

NOx = 0,0008 [g/m]
 NO₂₄ = 0,48 [g/s]
 NF₁₂ = 0
 NF₂₄ = 0
 NF₄₆ = 0
 N_v = 0,06 [m⁻¹]
 Pe₂₃ = 10 [m]
 Pe₄₅ = 10 [m]
 PM₁₀ = 0,000237 [g/m]
 PM₁₀₂₄ = 0,1422 [g/s]
 PM_{2.5} = 0,00086 [g/m]
 PM_{2.524} = 0,516 [g/s]
 Re₁₂ = 4,207E+06
 Re₂₄ = 4,165E+06
 Re₄₆ = 5,660E+06
 S₂₃ = 9,5 [m²]
 S₄₅ = 9,5 [m²]
 U = 16,67 [m/s]
 Va₅ = 7,388 [m/s]
 V_{d4} = 7,752 [m/s]
 VF₂₃ = 30 [m/s]
 VF₄₅ = 30 [m/s]

NO₁₂ = 0,48 [g/s]
 NO₄₆ = 0,48 [g/s]
 NF₂₃ = 0
 NF₄₅ = 0
 n_s = 1 [s⁻¹]
 Pe₁₂ = 38 [m]
 Pe₂₄ = 38 [m]
 Pe₄₆ = 38 [m]
 PM₁₀₁₂ = 0,1422 [g/s]
 PM₁₀₄₆ = 0,1422 [g/s]
 PM_{2.512} = 0,516 [g/s]
 PM_{2.546} = 0,516 [g/s]
 Re₂₃ = 933074
 Re₄₅ = 1,871E+06
 S₁₂ = 95 [m²]
 S₂₄ = 95 [m²]
 S₄₆ = 95 [m²]
 Va₃ = 6,248 [m/s]
 V_{d2} = 5,623 [m/s]
 VF₁₂ = 30 [m/s]
 VF₂₄ = 30 [m/s]
 VF₄₆ = 30 [m/s]

No unit problems were detected.

Arrays Table

	P _i [Pa]	Q _i [m ³ /s]	ρ _i [kg/m ³]	T _i [K]	V _i [m/s]	CO _i [mg/m ³]	NO _x _i [μg/m ³]	PM ₁₀ _i [μg/m ³]	PM _{2.5} _i [μg/m ³]	OPA _i [m ⁻¹]
1	101325	334,6	1,225	288,2	3,522					
2	101320	593,6	1,218	289,8	6,248	4,911	785,8	232,8	844,8	0,005065
3	101325	34,65	1,218	289,8	3,647	4,911	785,8	232,8	844,8	0,005065
4	101304	806,7	1,211	291,4	8,491	7,057	1129	334,5	1214	0,007277
5	101325	70,17	1,211	291,4	7,386	7,057	1129	334,5	1214	0,007277
6	101325	1008	1,206	292,7	10,61	8,101	1296	384	1393	0,008354