

02-020

ANALYSIS OF THE VENTILATION OF BUILDING DRAINAGE SYSTEMS IN ITS STATES LIMITS OF OPERATION WITH HYGROMETRIC VARIATIONS

Romero Sedó, Antonio Manuel; Arrué Burillo, Paloma

Universitat Politècnica de València

This paper analyses the dimensioning of the sanitation network in buildings and its ventilation is analysed, providing a calculation methodology based on fluid mechanics that takes into account all the variables involved in the process. The geometric variables of the pipes of different materials and the physical characteristics of the fluids that take part in the process, of the water and of the air according to the hygrometric conditions are taken into account, analysing their influence. Limit states of operation are established according scientific and normative criteria and a calculation methodology is developed whose results allow the dimensioning of the pipes to evacuate the water flow and guarantee ventilation simultaneously, guaranteeing compliance with the overpressure limit states and depression established by the CTE HS-5 (BOE, 2006). The results have been presented graphically and have been contrasted with the computational calculation through the Epanet program (Rossman, 2018) for the purpose of validation. This article provides a calculation tool that achieves the optimization of the sanitation network achieving an efficient installation that facilitates the work of the designer when designing or evaluating a sanitation network.

Keywords: *Ventilation; Building drainage systems; CTE.*

ANÁLISIS DE LA VENTILACIÓN DE LAS REDES DE SANEAMIENTO EN EDIFICIOS EN SUS ESTADOS LÍMITES DE FUNCIONAMIENTO CON VARIACIONES HIGROMÉTRICAS.

En este trabajo se analiza el dimensionamiento de la red de saneamiento en edificios y su ventilación, aportando una metodología de cálculo basada en la mecánica de fluidos que tenga en cuenta todas las variables que intervienen en el proceso. Se tienen en cuenta las variables geométricas de las tuberías de distintos materiales y las características físicas de los fluidos que intervienen en el proceso, del agua y del aire según las condiciones higrométricas, analizando su influencia. Se establecen los estados límites de funcionamiento siguiendo criterios científicos y normativos y se desarrolla una metodología de cálculo cuyos resultados permiten el dimensionamiento de los conductos para evacuar el caudal de agua y garantizar la ventilación de forma simultánea, garantizando el cumplimiento de los estados límites de sobrepresión y depresión establecidos por el CTE HS-5 (BOE, 2006). Los resultados han sido presentados de forma gráfica y has sido contrastados con el cálculo computacional mediante el programa Epanet (Rossman, 2018) con el objeto de su validación. Este artículo aporta una herramienta de cálculo que consigue la optimización de la red de saneamiento logrando una instalación eficiente que facilita el trabajo del proyectista a la hora de diseñar o peritar una red de saneamiento.

Palabras clave: *Ventilación; Saneamiento en edificios; CTE*

Correspondencia: Antonio Manuel Romero Sedó aromeros@csa.upv.es



©2019 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación en su exigencia HS 5 Evacuación de aguas [CTE], (BOE, 2006), ha supuesto una herramienta útil para el proyectista en el dimensionamiento de las bajantes, no obstante, debe de utilizarse con limitaciones dado que este documento aporta resultados mínimos a instalar, sin especificar algunas de las variables de cálculo y es el proyectista quién debe de verificar el cumplimiento de la variación de presión máxima de $\pm 250\text{Pa}$. Por otro lado, existen estudios experimentales y modelizaciones matemáticas que abordan este problema (Swaffield, Jack, & Campbell, 2004), (Jack, Cheng & Lu, 2006) y (Cheng et al., 2010), analizando las frecuencias y transitorios generados en la red, pero mediante herramientas complejas.

Este artículo pretende aportar una metodología de cálculo que tenga en cuenta todas las variables, dimensionando los conductos para evacuar el caudal de agua y garantizar la ventilación de forma simultánea en los estados límite de funcionamiento aportando una herramienta de cálculo sencilla que facilita el trabajo del proyectista a la hora de diseñar o peritar una red de saneamiento.

Inicialmente se estudia la influencia de cada variable, se establecen los estados límites de funcionamiento siguiendo criterios científicos y normativos y se desarrolla la metodología de cálculo mediante las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Los resultados son presentados de forma gráfica y son contrastados con el cálculo computacional mediante el programa Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems [EPANET], (Rossman, 2018) con el objeto de su validación.

2. Objetivos

En este estudio se plantea la resolución de los estados límite de funcionamiento con variaciones higrométricas del aire, para el cálculo máximo del agua y del aire a transportar por las bajantes en régimen uniforme y permanente para el estudio de la ventilación primaria y secundaria, así como las longitudes efectivas, velocidad y altura terminal para varios materiales tanto poliméricos como metálicos para distintos rangos de llenado, sin sobrepasar la variación de presión de $\pm 250\text{ Pa}$, indicada en el CTE, (BOE, 2006), presión muy conservadora si se contrasta con los estudios realizados por Cheng et al. (2010). Se realiza el estudio analítico y computacional mediante el programa EPANET (Rossman, 2018) con el objeto de analizar la validez de los resultados.

3. Materiales y métodos

El estudio se ha realizado considerando las variables de la tabla 1, los diámetros comerciales de las bajantes, de diversos materiales con distintas rugosidades absolutas (ϵ) en materiales nuevos y las condiciones higrométricas de 84 localidades españolas de temperatura media mensual (T) y humedad relativa media (e) obtenidos de la Guía resumida del clima en España (1981-2010) de la Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2010). Las características de los fluidos de la viscosidad cinemática del agua (ν_{agua}), del aire

húmedo y seco (v_h , v_s) y la densidad del aire húmedo y seco (ρ_h , ρ_s). Y el rango de llenado (r) como relación entre la superficie de la corona de agua y la superficie de la bajante.

Tabla 1. Variables de estudio

Variable	Parámetro	Rango de estudio
Diámetro bajante	DN y D	Diámetros normalizados
Material	Rugosidad absoluta ε (mm)	Cu, cerámica y gres (0.0015); PVC, PE, PP (0.025); Fe-Zn (1 mm); Fe (1.5)
Localidad	T, e, v_{agua} , v_h , ρ_h , v_s , ρ_s	84 localidades españolas
Rango de llenado	Relación r	0 a 1

3.1 Dimensionamiento de la bajante

El dimensionamiento de la bajante para la caída libre del agua en conductos verticales se realiza mediante la ecuación (1), (Romero & Arrué, 2010), siendo Q_{agua} el caudal simultáneo del agua y x , el espesor de la corona de agua en la bajante en el tramo a estudio. Este espesor se recomienda menor o igual a $D/16$ (Swaffield & Thancanamootoo, 1991), (Swaffield & Galowin, 1992), (Wise & Swaffield, 2002), correspondiente a una relación (r) de 0.23, inferior al recomendado por el CTE (2006), de 0.33.

$$\frac{Q_{agua}}{\pi \cdot x \cdot (D - x) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot x}} = -4 \cdot \log_{10} \left[\frac{D}{4 \cdot x \cdot (D - x)} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{3.71} + \frac{1.26 \cdot v_{agua}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot x}} \right) \right] \quad (1)$$

3.2 Ventilación primaria

El dimensionamiento del diámetro de la bajante implica cumplir la condición de evacuar el caudal de agua con la limitación de la relación r a través del coeficiente $\omega = D/x$ y por otro lado que la variación de presión (ΔP) que se produzca entre los dos puntos extremos de la bajante no sea superior a ± 250 Pa. En este cálculo interviene la rugosidad del material de la tubería (ε) y la viscosidad del agua (v_{agua}) y la densidad (ρ_h) y viscosidad del aire húmedo (v_h) influenciados por la altitud, temperatura y humedad relativa del aire de la localidad donde se realiza el estudio.

La longitud máxima equivalente de la ventilación primaria se obtiene de la ecuación (2), (Colebrook & White, 1937). Esta longitud equivalente (L_e) se considera 1.5 veces mayor a la longitud efectiva o geométrica, para incluir las pérdidas de carga por los accesorios de la instalación (BOE, 2006).

$$Q_{aire} = -2 \cdot \log_{10} \left[\frac{\varepsilon}{3.71 \cdot D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right)} + \frac{2.51 \cdot v_h \cdot \pi \cdot D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right)}{4 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot \left[D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right)\right]^5 \cdot \pi^2}{L_e \cdot 8 \cdot \rho_h}}} \right] \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot \left[D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right)\right]^5 \cdot \pi^2}{L_e \cdot 8 \cdot \rho_h}} \quad (2)$$

La velocidad terminal (v_t) o uniforme que alcanza el fluido una vez alcanzada la altura terminal (y_t) se calcula con la ecuación (3), (Swaffield & Galowin, 1992) y (4), siendo la variable a de 0.99. Posteriormente estos estudios fueron contrastados por Cheng et al. (2011).

$$v_t = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot Q_{\text{agua}}}{\pi \cdot (D - x) \cdot \lambda}} \quad (3)$$

$$y_t = \frac{1}{g} \cdot v_t^2 \cdot \left[\frac{\pi}{6 \cdot \sqrt{3}} + \frac{\arctg\left(\frac{1+2a}{\sqrt{3}}\right)}{\sqrt{3}} \right] - \frac{\ln(1-a)}{3} + \frac{\ln(1+a+a^2)}{6} \quad (4)$$

3.3 Ventilación secundaria

La ventilación secundaria permite introducir caudal de aire, alcanzando la variación de presión de ± 250 Pa a una longitud equivalente mayor que con ventilación primaria. En el cálculo de la ventilación secundaria, mediante la ecuación (5), intervienen los parámetros indicados en la ventilación primaria junto con el diámetro de la ventilación secundaria (d_j) y la viscosidad y densidad del aire seco y húmedo.

$$Q_{\text{aire}} = -2 \cdot \log_{10} \left[\frac{\varepsilon}{3.71 \cdot D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right)} + \frac{2.51 \cdot v_h \cdot \pi \cdot D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right)}{4 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot \left[D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right)\right]^5 \cdot \pi^2}{L_e \cdot 8 \cdot \rho_h}}} \right] \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot \left[D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right)\right]^5 \cdot \pi^2}{L_e \cdot 8 \cdot \rho_h}} \cdot \left[1 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\varepsilon}{3.71 \cdot D} + \frac{2.51 \cdot v_s}{d_j \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot d_j \cdot \Delta P}{L_e \cdot \rho_s}}} \right]}{\log_{10} \left[\frac{\varepsilon}{3.71 \cdot D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right)} + \frac{2.51 \cdot v_h}{D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right) \cdot \Delta P}{L_e \cdot \rho_h}}} \right]} \cdot \sqrt{\frac{\rho_h}{\rho_s} \cdot \left[\frac{d_j}{D \cdot \left(1 - \frac{2}{\omega}\right)} \right]^5} \right] \quad (5)$$

3.4 Cálculo computacional de ventilación en redes ramificadas y malladas

Cuando el sistema de ventilación está formado por redes ramificadas y malladas, como es el caso de la ventilación primaria, secundaria o terciaria, se debería de cumplir, por una parte, la condición de conservación de masas, es decir, la suma de los caudales de aire entrantes en un nudo es igual a los caudales que salen de él, ecuación (6) y, por otra parte, la pérdida de carga en cada una de las mallas de la instalación debe de ser nula, ecuación (7). Además, para que el sistema sea válido debe de cumplirse que la presión en cualquier nudo debe de ser ± 250 Pa.

$$\sum (\pm) Q_i dt + \sum (\pm) Q_{j-k} dt = 0 \quad (6)$$

$$\sum (\pm) H_{r_{j-k}} dt = \sum (\pm) \left(\lambda \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{8 \cdot Q_{\text{aire}}^2}{\pi^2 \cdot g} + \xi \cdot \frac{8 \cdot Q_{\text{aire}}^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^4} \right)_{j-k} dt = 0 \quad (7)$$

En el diseño de redes de saneamiento vertical malladas, la resolución de las ecuaciones (6) y (7) se realiza mediante cálculo computacional con el programa EPANET (Rossman, 2018).

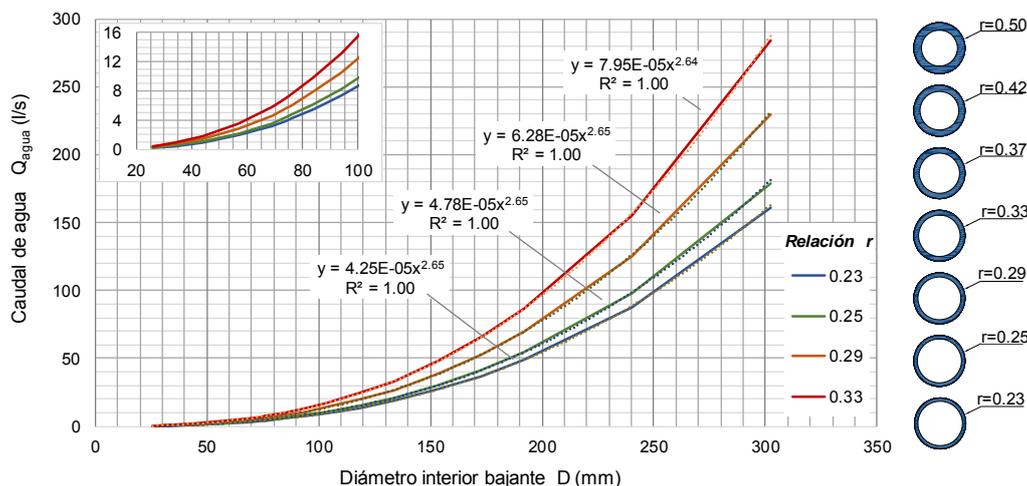
4. Resultados

4.1 Dimensionamiento de la bajante y ventilación primaria

Para un caudal de agua a evacuar en la tubería vertical se obtiene un diámetro interior de bajante para una relación r , de forma que, a mayor diámetro, menor es el rango de llenado (r). El CTE establece como relación r máxima 0.33. La figura 1 corresponde al dimensionamiento de bajantes de PVC-U(B) normalizado con las condiciones higrométricas de Valencia en el mes de agosto.

Se propone para el dimensionamiento de una bajante, desde el punto de vista de proyecto y de peritación, la utilización de la figura 2 que permite el cálculo hidráulico y de ventilación simultáneamente. Conociendo el caudal de agua a evacuar se obtienen los diámetros normalizados de la bajante posibles dentro del rango de la relación r entre 0.23 y 0.33, obteniendo la longitud efectiva máxima correspondiente a una variación de presión de ± 250 Pa que debe ser mayor a la longitud geométrica real de la instalación.

Figura 1: Caudal de agua vs. Diámetro interior de la bajante para $r=0.23, 0.25, 0.29$ y 0.33 . PVC-U(B) $\epsilon=0.025$ mm y Valencia en agosto.

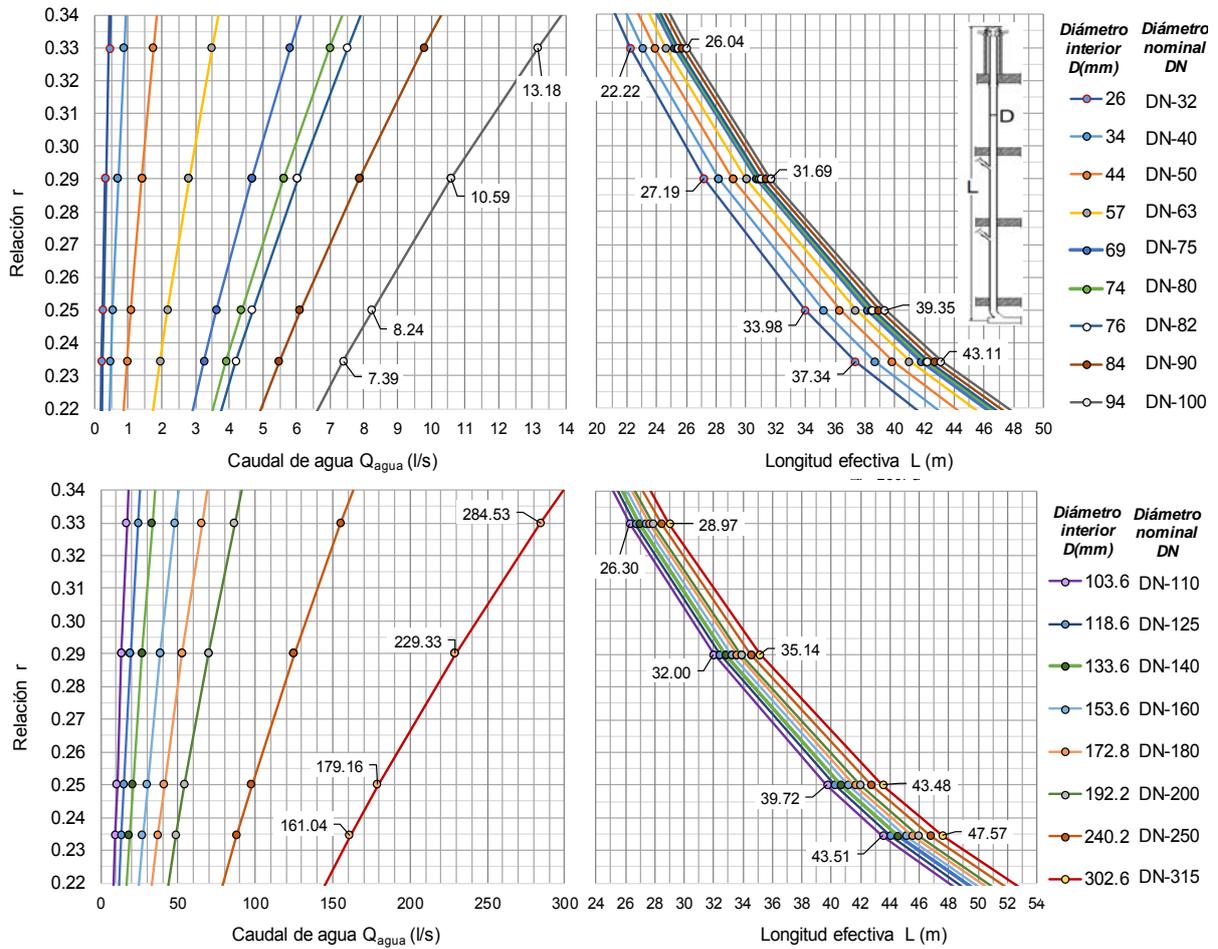


La figura 2 corresponde a bajantes de PVC-U(B) con las condiciones higrométricas de Valencia en el mes de agosto. Como ejemplo la evacuación de 60 l/s requiere un diámetro DN-200 con r de 0.27 y L de 38 m o bien un DN-180 con una r de 0.31 y L de 30.38 m.

En el cálculo de la longitud efectiva puede observarse que el aumento del diámetro implica un aumento de la longitud para una misma relación r , pero con desviaciones estándar pequeñas, de 2.81 para una relación r de 0.23, 2.61 para r de 0.25, 2.18 para r de 0.29 y 1.85 para r de 0.33, en bajantes de PVC-U(B) en Valencia en agosto.

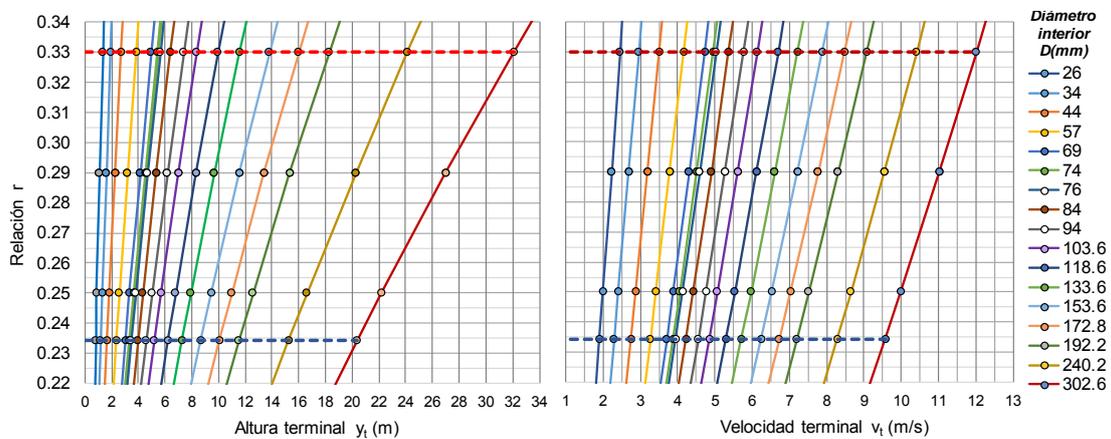
Por otro lado, en el proceso de dimensionamiento partiendo de un caudal de agua de cálculo, la limitación de mantener una relación r entre 0.23 y 0.33 hace que normalmente solo se tenga uno o dos diámetros posibles y consecutivos por lo que la longitud efectiva varía poco. Como consecuencia de ello si la longitud geométrica del proyecto no se cumple, la solución idónea no es aumentar diámetro sino instalar una ventilación secundaria.

Figura 2: Relación r vs. Caudal Q y Longitud efectiva L para PVC-U(B). Valencia en agosto.



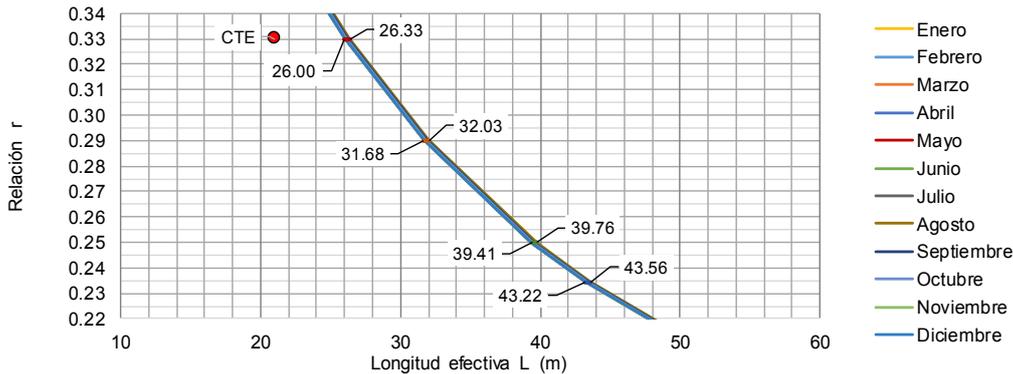
Con la bajante dimensionada se obtiene la altura terminal y la velocidad terminal a través de la figura 3. Como ejemplo una bajante DN-200 de PVC-U(B) ubicada en Valencia en el mes de agosto, con r de 0.27 tiene una altura terminal de 14 m y velocidad terminal de 8 m/s. La velocidad terminal máxima obtenida en estas bajantes con r=0.33 es de 12 m/s.

Figura 3: Relación r vs. Altura y Velocidad terminal para PVC-U(B) y Valencia en agosto.



Se ha analizado la influencia de las variaciones higrotérmicas sobre la longitud efectiva para cada localidad y cada mes del año y los resultados presentan desviaciones estándar para un mismo valor de r entre un mínimo de 0.03 y máximo de 0.38. En consecuencia, se considera admisible dimensionar con las características higrométricas promedio anual. En la figura 4 se representa la longitud efectiva de cada mes del año en Valencia para el caso de DN-110 de PVC-U(B), observándose que las curvas se solapan con una variación de la longitud con una desviación estándar de 0.12 entre los meses de agosto y enero, más extremos.

Figura 4: Relación r vs. Longitud efectiva L en Valencia. Bajantes PVC-U(B), $\epsilon=0.025$ mm. DN-110 (103.6 mm) y $\Delta P = 250$ Pa.



Para el rango de llenado (r) entre 0.23 y 0.33, en cada diámetro normalizado de PVC-U(B), se obtienen los valores límites indicados en la tabla 2, de caudal a evacuar en cada diámetro y longitud efectiva promedio anual, en el caso de Valencia, para un ΔP de ± 250 Pa.

Tabla 2: Caudal máximo de agua Q y Longitud efectiva promedio anual de ventilación primaria para bajantes de PVC-U (B), $\epsilon=0.025$ mm y $\Delta P=\pm 250$ Pa. Caso de Valencia.

r	Diámetro nominal de la bajante y ventilación primaria, DN.																	
	32	40	50	63	75	80	82	90	100	110	125	140	160	180	200	250	315	
0.23	Q (l/s)	0.2	0.5	1.0	1.9	3.2	3.9	4.2	5.4	7.3	9.5	13.6	18.6	26.9	36.7	48.6	87.4	160.3
	L (m)	37.8	38.9	40.0	41.0	41.8	42.1	42.2	42.5	43.0	43.3	43.8	44.2	44.7	45.1	45.5	46.2	47.0
0.25	Q (l/s)	0.3	0.5	1.1	2.2	3.6	4.3	4.6	6.1	8.2	10.6	15.1	20.7	30.0	40.9	54.1	97.2	178.3
	L (m)	34.3	35.4	36.4	37.4	38.1	38.3	38.4	38.8	39.2	39.5	40.0	40.4	40.8	41.2	41.5	42.2	42.9
0.29	Q (l/s)	0.3	0.7	1.4	2.8	4.6	5.6	6.0	7.8	10.5	13.6	19.4	26.6	38.4	52.4	69.4	124.6	228.3
	L (m)	27.4	28.3	29.2	30.0	30.6	30.8	30.9	31.2	31.5	31.8	32.2	32.5	32.9	33.2	33.5	34.1	34.7
0.33	Q (l/s)	0.4	0.9	1.7	3.5	5.8	6.9	7.5	9.7	13.1	16.9	24.2	33.1	47.8	65.2	86.2	154.7	283.4
	L (m)	22.4	23.2	23.9	24.6	25.1	25.3	25.3	25.6	25.9	26.1	26.4	26.7	27.1	27.3	27.6	28.1	28.6

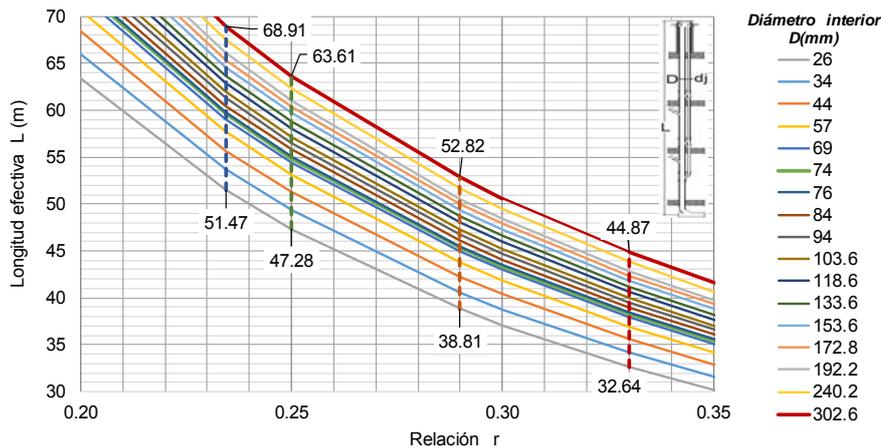
El CTE admite instalar únicamente la ventilación primaria en edificios de menos de 7 plantas. Para un edificio de 7 plantas de aproximadamente 3 metros de altura con una longitud efectiva de 21 metros, se comprueba que es inferior a los valores indicados en la tabla 2, estando del lado de la seguridad para los caudales indicados.

4.2 Ventilación secundaria.

En el estudio de la ventilación secundaria la longitud efectiva disminuye cuando aumenta el rango de llenado (r), debido a que la menor sección de aire hace que la variación de presión sea mayor y con una menor distancia se alcanza la variación máxima de ± 250 Pa, tal como se observa en la figura 5. En este caso el aumento del diámetro si presenta un mayor incremento en la longitud efectiva de ventilación secundaria que con la ventilación primaria.

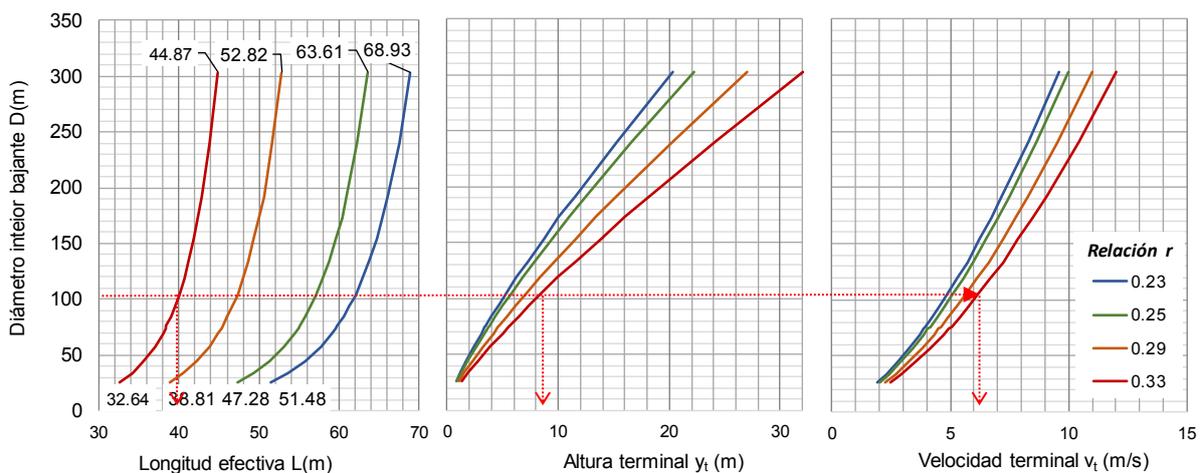
El diámetro de la bajante se ha dimensionado desde el punto de vista hidráulico para un caudal de agua de evacuación que implica un rango de llenado determinado. A partir del diámetro interior de la bajante, la relación r y la condición de que el diámetro interior de la tubería de la ventilación secundaria es la mitad del diámetro de la bajante, se obtienen los resultados de la longitud efectiva de la ventilación secundaria de la figura 5, para bajantes de PVC-U(B) normalizado con las condiciones higrométricas de Valencia en agosto.

Figura 5: Longitud efectiva vs. Relación r . Bajante de diámetro D con ventilación secundaria $d_j=D/2$. PVC-U(B) $\epsilon=0.025$ mm y $\Delta P=250$ Pa. Valencia en agosto.



La figura 6 corresponde a bajantes de PVC-U(B) de diámetros normalizados con el diámetro interior de la ventilación secundaria igual a la mitad de la bajante, bajo las condiciones higrométricas de Valencia en agosto. Como ejemplo a la bajante de diámetro interior 103.6 mm (DN-110) con ventilación secundaria de diámetro interior 51.8 mm, con la relación r máxima recomendada de 0.33, le corresponde una longitud efectiva de 38.99 m, altura terminal de 8.39 m y velocidad terminal de 6.14 m/s.

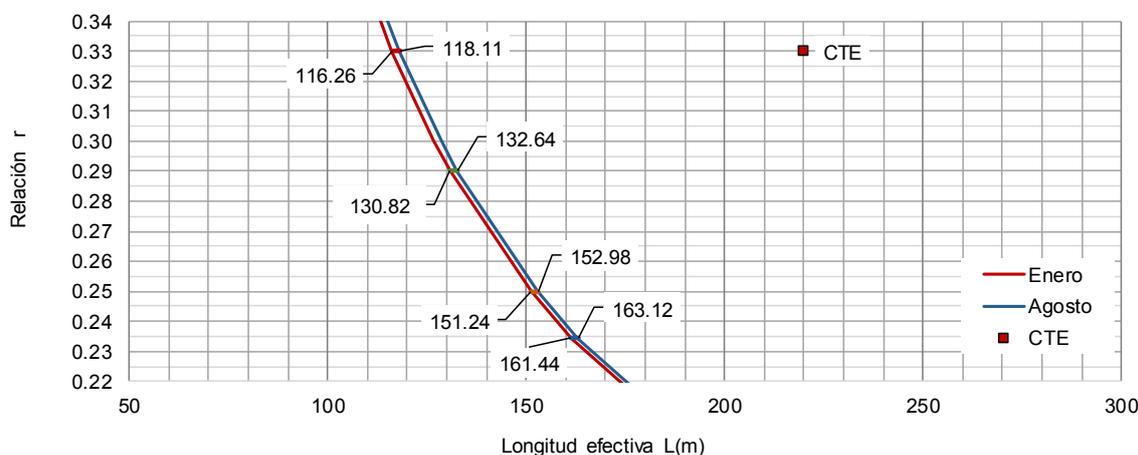
Figura 6: Diámetro interior Bajante con ventilación secundaria $d_j = D/2$ vs. Longitud efectiva, Altura terminal y Velocidad terminal para $r=0.23, 0.25, 0.29$ y 0.33 . PVC-U(B) $\epsilon=0.025$ mm y $\Delta P=\pm 250$ Pa. Valencia en agosto.



Se han realizado los cálculos de la longitud efectiva para cada mes del año en Valencia y cada diámetro normalizado de PVC-U(B). Los resultados de la longitud efectiva indican desviaciones estándar para un mismo valor de r entre un mínimo de 0.15 y un máximo de

2.28 y en el caudal de agua entre 0.003 y 0.81. En la figura 7 se indica la longitud efectiva para enero y agosto en la localidad de Valencia para el caso de DN-110 con ventilación secundaria DN-100 con una desviación estándar de 0.66.

Figura 7: Relación r vs. Longitud efectiva. Bajante DN-110 (103.6mm) y ventilación secundaria DN-100 (94 mm). PVC-U(B) $\epsilon=0.025$ mm y $\Delta P=250$ Pa. Caso de Valencia.



Para esta combinación de diámetros el CTE establece una longitud efectiva máxima de 220 metros, en este caso superior al analizado, lo que implica que es necesario el estudio para garantizar no sobrepasar la variación de presión máxima admisibles de ± 250 Pa.

Para el rango de llenado (r) entre 0.23 y 0.33 de cada diámetro normalizado de PVC-U(B) se indica los resultados en la tabla 3, del caudal máximo a evacuar en cada diámetro y la longitud efectiva promedio anual en el caso de Valencia para cada combinación entre diámetros nominales de bajante y ventilación secundaria.

Tabla 3: Longitud efectiva para cada bajante y ventilación secundaria de PVC-U (B), $\epsilon=0.025$ mm, $\Delta P=250$ Pa. $r=0.23$ y 0.33 . Valencia.

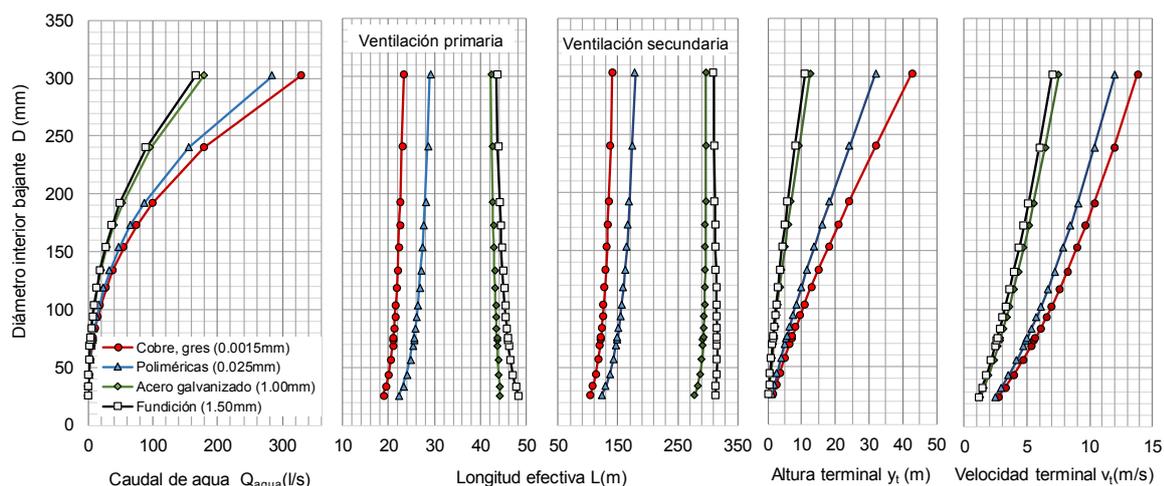
Bajante DN	r	Q _{agua} (l/s)	Diámetro nominal de la ventilación secundaria																
			32	40	50	63	75	80	82	90	100	110	125	140	160	180	200	250	315
110	0.23	9.48				68	87	97	102	125	162	210							
	0.33	16.92			44	59	67	70	88	117	155								
125	0.23	13.57				73	80	83	97	121	150	213							
	0.33	24.18			48	53	56	67	85	108	157								
140	0.23	18.60				65	70	72	82	98	117	158	216						
	0.33	33.10			42	46	47	55	67	82	114	160							
160	0.23	26.89							70	80	92	118	153	220					
	0.33	47.80						46	53	63	82	110	163						
180	0.23	36.70							70	79	96	119	163	223					
	0.33	65.16							46	52	66	84	118	165					
200	0.23	48.58								70	83	99	129	170	225				
	0.33	86.19								46	55	68	91	123	167				
250	0.23	87.36										74	89	108	133	231			
	0.33	154.73										49	60	74	94	171			
315	0.23	160.26											69	78	90	133	236		
	0.33	283.39											45	52	61	94	176		

4.3 Influencia del material de la tubería

La rugosidad absoluta del material de la tubería influye en el caudal de agua que es capaz de evacuar y en consecuencia en el caudal de aire y en las longitudes efectivas tanto de

ventilación primaria como secundaria, la altura y la velocidad terminal. Se han analizado cuatro grupos de materiales en base a su rugosidad absoluta con su diámetro interior normalizado para una misma relación r de 0.33 en el caso de Valencia en agosto, y los resultados mostrados en la figura 8 indican que el caudal de agua es mayor cuanto menor rugosidad posee la tubería.

Figura 8: Diámetro interior de la bajante vs. Caudal de agua, Longitud efectiva de ventilación primaria y secundaria, Altura terminal y velocidad terminal para cada material. Relación r de 0.33. Caso de Valencia en agosto.



Analizando la ventilación se observa que la longitud efectiva de la ventilación es mayor cuanto más rugosa es la tubería. Esto es debido a que, al ser el caudal de agua y del aire menores, para una misma relación de llenado (r), se obtiene una mayor longitud para alcanzar la variación de presión máxima de ± 250 Pa.

Realizando la comparativa entre el material de menor y mayor rugosidad para una relación r de 0.33 y las condiciones higrométricas de Valencia en agosto, el caudal presenta una variación promedio del 46.84%, la longitud efectiva en ventilación primaria de 214.36% y en ventilación secundaria del 253.92% en el material de cobre con respecto a la fundición.

Por otro lado, la tendencia de las curvas de la longitud efectiva de la figura 8 indican que tienen a un valor constante muy próximo cuando el diámetro es teóricamente muy elevado lo que implica ya no son relevantes el resto de variables. En cambio, la altura terminal y la velocidad terminal sí se incrementan con el aumento del diámetro, siendo mayores a medida que el material es menos rugoso.

4.4 Influencia de la localidad de ubicación de la instalación.

La ubicación de la instalación influye a través de la altitud de la localidad que determina la presión atmosférica local, la temperatura y humedad relativa media mensual, la densidad y la viscosidad del agua y del aire húmedo y seco. Estas variables modifican el caudal de agua y la longitud efectiva de ventilación primaria y secundaria.

Se han analizado 84 localidades de España con los datos higrométricos obtenidos de la base datos meteorológicos del periodo 1981 a 2010 (AEMET, 2010).

En la tabla 4 se indican los resultados del caudal de agua y longitud efectiva para algunas localidades, los mayores caudales se obtienen en Santa Cruz de Tenerife y los menores en el Puerto de Navacerrada y con respecto a la longitud efectiva máxima se obtiene en Izaña y

la menor en el aeropuerto de Santander. La desviación estándar del caudal de agua de las 84 localidades analizadas para bajantes de PVC-U(B) desde DN-32 a DN-315 es de 0.0027 a 0.5624 respectivamente, con un promedio de 0.11. Y de la longitud efectiva de 0.9989 a 1.2557 con un promedio de 1.14.

Tabla 4: Influencia de la localidad. Caudal de agua Q (l/s) y Longitud efectiva de ventilación primaria L(m) para cada bajante PVC-U (B), $\epsilon=0.025$ mm, $\Delta P=250$ Pa. $r=0.33$.

Localidad	Diámetro nominal de la bajante y ventilación primaria, DN.																	
	32	40	50	63	75	80	82	90	100	110	125	140	160	180	200	250	315	
Ávila	Q	0.4	0.9	1.7	3.4	5.7	6.9	7.4	9.6	13.0	16.8	24.0	32.9	47.5	64.7	85.7	153.9	282.0
	L	24.9	25.8	26.5	27.3	27.8	28.0	28.1	28.4	28.7	28.9	29.3	29.6	30.0	30.2	30.5	31.0	31.6
Madrid	Q	0.4	0.9	1.7	3.5	5.7	6.9	7.4	9.7	13.0	16.9	24.1	33.0	47.7	65.0	86.0	154.4	282.8
	L	23.8	24.6	25.4	26.1	26.6	26.8	26.9	27.2	27.5	27.7	28.1	28.4	28.7	29.0	29.3	29.8	30.3
Valencia	Q	0.4	0.9	1.7	3.5	5.8	6.9	7.5	9.7	13.1	16.9	24.2	33.1	47.8	65.2	86.2	154.7	283.4
	L	22.4	23.2	23.9	24.6	25.1	25.3	25.3	25.6	25.9	26.1	26.4	26.7	27.1	27.3	27.6	28.1	28.6
STA. Cruz Tenerife	Q	0.4	0.9	1.8	3.5	5.8	7.0	7.5	9.8	13.1	17.0	24.3	33.2	47.9	65.3	86.4	155.1	283.9
	L	22.3	23.1	23.9	24.6	25.2	25.3	25.4	25.7	26.0	26.2	26.6	26.9	27.2	27.5	27.7	28.3	28.8
Aeropuerto Santander	Q	0.4	0.9	1.7	3.5	5.7	6.9	7.4	9.7	13.0	16.9	24.1	33.0	47.7	65.0	86.0	154.4	282.8
	L	22.5	23.2	23.9	24.6	25.1	25.2	25.3	25.5	25.8	26.0	26.3	26.6	26.9	27.2	27.4	27.9	28.4
Puerto de Navacerrada	Q	0.4	0.9	1.7	3.4	5.7	6.8	7.3	9.6	12.9	16.7	23.9	32.7	47.2	64.5	85.3	153.3	281.0
	L	26.9	27.8	28.6	29.4	30.0	30.2	30.3	30.6	30.9	31.2	31.5	31.9	32.3	32.6	32.8	33.4	34.0
Izaña	Q	0.4	0.9	1.7	3.4	5.7	6.9	7.4	9.6	13.0	16.8	24.0	32.8	47.4	64.7	85.6	153.8	281.9
	L	27.7	28.8	29.7	30.6	31.2	31.5	31.6	31.9	32.3	32.6	33.0	33.4	33.8	34.2	34.5	35.1	35.8
Caudal y longitud efectiva promedio de las 84 localidades y desviaciones estándar.																		
84 localidades	Q	0.4	0.9	1.7	3.5	5.7	6.9	7.4	9.7	13.0	16.9	24.1	33.0	47.7	65.0	86.0	154.4	282.9
	σ	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.13	0.17	0.21	0.34	0.56
	L	23.2	24.0	24.7	25.5	26.0	26.2	26.2	26.5	26.8	27.0	27.4	27.6	28.0	28.3	28.5	29.0	29.5
	σ	1.00	1.03	1.06	1.09	1.11	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.19	1.20	1.21	1.23	1.26

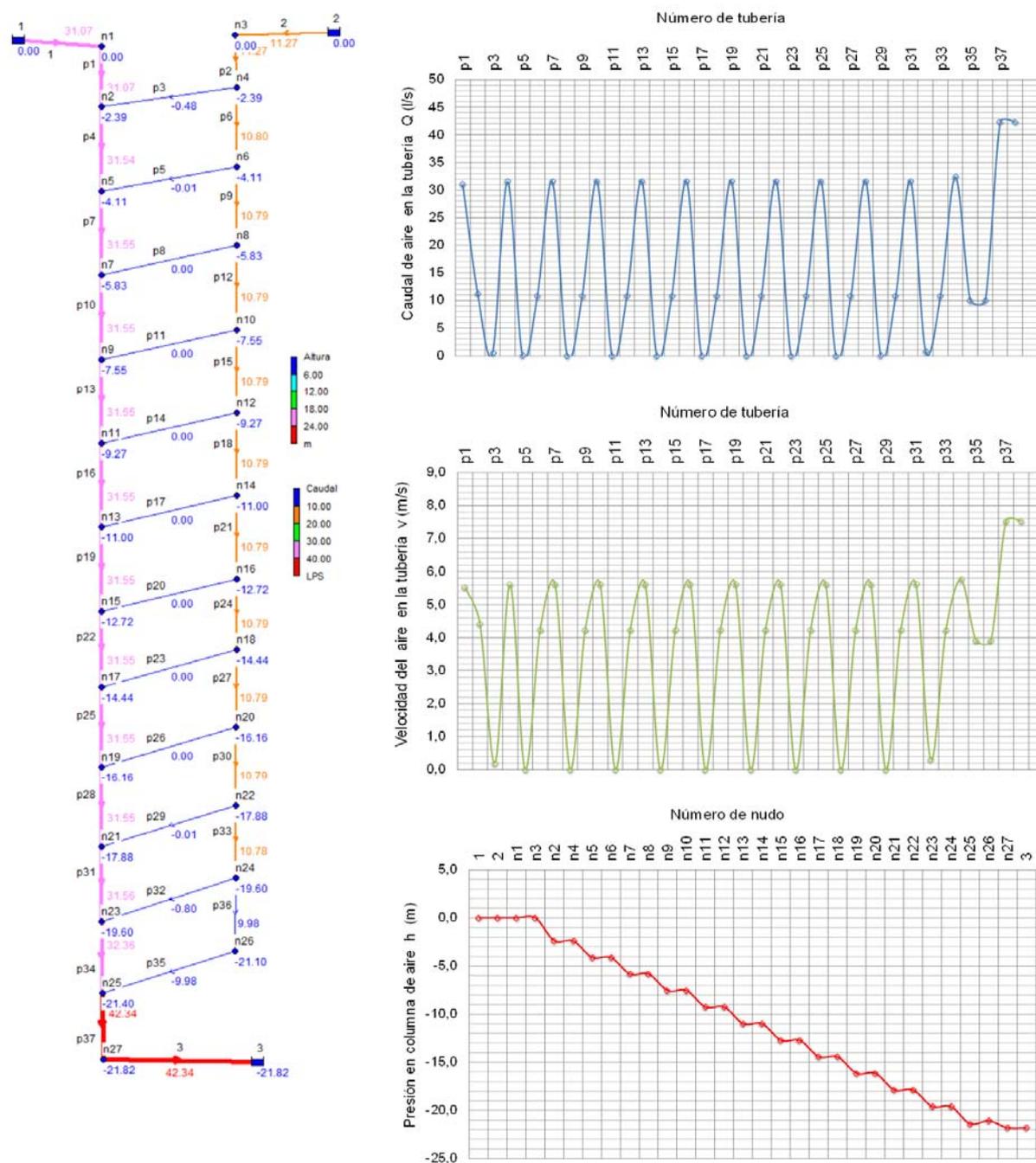
4.5 Validación de resultados mediante cálculo computacional.

Con el objeto de realizar la validación de los resultados obtenidos de la tabla 3 se ha realizado el cálculo computacional con el programa EPANET (Rossman, 2018). Los resultados del caso correspondiente a un diámetro de bajante DN-110, ventilación DN-63 con un rango de llenado (r) 0.33, con un valor de caudal de 16.92 l/s y una longitud efectiva de 44 metros se indican en la figura 9.

El caudal máximo de aire obtenido a pie de bajante es de 42,34 l/s, proporcionado por la bajante en un 73.38% y por la tubería de ventilación en un 26.62%, para una depresión máxima de -250 Pa cuyo valor equivalente es de -20.82 metros de columna de aire húmedo con una temperatura media de 26.1°C y humedad relativa del 68%, cuya densidad es de 1.17 kg/m³ y una viscosidad cinemática de 8.71·10⁻⁷ m²/s, bajo estas condiciones el caudal máximo de agua a evacuar es de 21.17 l/s. El caudal de agua por cálculo computacional es superior al indicado en la tabla 3 en un 125.12%, la justificación viene dada por varios factores como, el diseño de la instalación, la utilización para el cálculo de la longitud efectiva y no la equivalente, por desconocer el valor de los coeficientes de pérdida de carga secundaria de los accesorios a instalar y por último, el suponer que todo el aire tanto en la bajante como en la tubería de ventilación es aire húmedo, cuando en realidad la tubería de ventilación transporta aire seco, ecuación (5).

En la instalación se han realizado conexiones entre la bajante y la tubería de ventilación secundaria en todas las plantas, aunque no son preceptivas según criterio del CTE (BOE, 2006), por no superar el edificio las 15 plantas. La finalidad de este diseño, es cuantificar el caudal de aire que transportan las conexiones comprobándose que solo trabajan las p3, p5, p29, p32 y p35, correspondientes a las superiores e inferiores, siendo la conexión de mayor caudal la p35 con 9.98 l/s. En cambio, el resto de conexiones no trabajan debido al diseño.

Figura 9: Esquema de la ventilación secundaria, Caudal y velocidad de aire vs. Número de tubería, Presión en columna de aire vs. Número de nudo. PVC-U (B), $\epsilon=0.025$ mm, $\Delta P=-250$ Pa. $r= 0.33$. Caso de Valencia en agosto.



Las velocidades obtenidas en el cálculo computacional han sido una velocidad máxima del aire de 7.53 m/s a pie de bajante, 5.76 m/s en la bajante y 4.23 m/s en la tubería de ventilación. El valor de la velocidad terminal es de 6,17 m/s y la altura terminal de 8.47 m, obtenidos de forma analítica y coincidentes con los valores de la figura 6. En cualquier caso, la velocidad máxima nunca debería de haber superado la velocidad terminal cuyo error es del 122.52% en exceso, la justificación viene dada por lo ya expuesto anteriormente debido a los factores que intervienen en el cálculo, diseño, longitud efectiva, coeficientes de pérdida secundaria y el haber utilizado solo las características físicas del aire húmedo.

De los resultados obtenidos se deduce que, el cálculo computacional es una herramienta válida y efectiva proporcionando resultados muy aproximados a los obtenidos mediante las ecuaciones que se plantean en este artículo. Por tanto, el cálculo computacional poseerá menor error a medida que se obtenga mayor conocimiento de los coeficientes de pérdida de carga secundaria y se incorporen en el cálculo del diseño.

5. Conclusiones

La exigencia HS-5 del CTE (BOE, 2006) es una herramienta de trabajo de obligatorio cumplimiento para poder fijar los calibres mínimos de las tuberías a instalar, no obstante, al no plantear el tipo de material bien polimérico o metálico los resultados obtenidos de la HS-5 son orientativos. Es el propio proyectista quien debe de verificar y comprobar que las exigencias mínimas se cumplen, bien mediante cálculo analítico o computacional.

El caudal máximo del agua es el caudal simultáneo de cálculo a determinar por el proyectista para cada tipología de uso, edificios de oficinas, viviendas, hoteles, hospitales, escuelas, universidades, cuarteles, etc.

La influencia de las variaciones higrotérmicas, de las 84 localidades analizadas en un periodo anual, sobre la longitud efectiva presenta desviaciones estándar para un mismo rango de llenado entre un mínimo de 0.03 y máximo de 0.38 y, en consecuencia, se considera admisible dimensionar con las características higrométricas promedio anual.

La rugosidad absoluta del material de la tubería influye en el caudal de agua que es capaz de evacuar y en consecuencia en las longitudes efectivas tanto de ventilación primaria como secundaria, la altura y la velocidad terminal.

Los resultados obtenidos mediante cálculo computacional son muy aproximados a los obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones analíticas. El error cometido dependerá en gran medida del número de accesorios a instalar, así como, de los coeficientes de pérdida de carga secundaria de cada accesorio obtenido por caracterización.

6. Referencias

- Agencia Estatal de Meteorología (2010). *Guía resumida del clima en España (1981-2010)*. Obtenido en http://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/guia_resumida_2010.
- Cheng, C. L., Mui, K. W., Wong, L. T., Yen, C. J., & He, K. C. (2010). Characteristics of air pressure fluctuations in high-rise drainage stacks. *Building and Environment*, 45(3), 684–690. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.006>
- Cheng, C. L., Liao, W. J., He, K. C., & Lin, J. L. (2011). Empirical study on drainage stack terminal water velocity. *Building Services Engineering Research and Technology*, 32(2), 171-181.
- Colebrook, C. F., & White, C. M. (1937). Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences*, 161(906), 367–381. <http://doi.org/10.1098/rspa.1937.0150>.
- España. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 28 de marzo de 2006, núm.74, pp. 11816-11831.
- Jack, L. B., Cheng, C., & Lu, W. H. (2006). A comparison of modelling techniques and supporting data for the prediction of air pressure changes in building drainage and

ventilation systems. In *CIBW62 International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings*.

Romero, A. M. & Arrué, P. (2010). *Cálculo de Instalaciones Hidrosanitarias con Software para la calculadora gráfica HP y Excel. (Adaptado al CTE, exigencias HS-4 y HS-5). Tomo II*. València: Universitat Politècnica de València.

Rossmann, L.A. (2018). EPANET – Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems, Versión 2.00.12. United States Environmental Protection Agency. Available from: <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.

Swaffield, J.A., Thancanamootoo, A. (1991) Modelling unsteady annular down flow in vertical building drainage stacks. *Build Environ* 26(2):99–110. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(91\)90020-C](https://doi.org/10.1016/0360-1323(91)90020-C).

Swaffield, J. A. & Galowin, L. S. (1992). *The Engineered Design of Building Drainage Systems*. Aldershot: Ashgate Publishing.

Swaffield, J.A., Jack, L.B., & Campbell, D. P. (2004). Control and suppression of air pressure transients in building drainage and vent systems. *Building and Environment*, 39(7), 783–794. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.12.003>.

Wise, A. F. E., & Swaffield, J. A. (2002). *Water, sanitary, and waste services for buildings*. (5th ed), Butterworth-Heinemann, London.