

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCION TRANSITORIA DEL GAS EN REDES URBANAS POR EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Suárez, B. y Oñate, E.

Departamento de Estructuras.
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Cataluña

RESUMEN. Se presenta una formulación por elementos finitos que permite simular la distribución transitoria de presiones y caudales del gas en redes urbanas. Esta formulación, que parte de las ecuaciones básicas que proporciona la mecánica de fluidos para la circulación de un gas en régimen variable por conductos cilíndricos, utiliza elementos finitos unidimensionales parabólicos para discretizar los distintos tramos de la red y un esquema paso a paso de integración en el tiempo que supone una variación lineal de la presión del gas en cada intervalo de tiempo. La formulación se aplica al caso real de la red de media presión de la ciudad de Barcelona utilizando algunos resultados experimentales para confirmar su eficiencia y aproximación.

1. INTRODUCCION

El problema del transporte de gas para uso doméstico en ciudades constituye uno de los objetivos primordiales de la industria de gas. El conocimiento de la evolución en el tiempo de las presiones y caudales del gas que circula por la red urbana de distribución, al variar la demanda, es fundamental no solo en la fase de diseño sino también durante la explotación.

Una red de distribución tipo en una gran ciudad puede considerarse formada de acuerdo con el siguiente esquema básico:

1. Una red principal por la que el gas circula a alta o media presión. Por esta red circula el caudal total de consumo.
2. Un conjunto de redes secundarias que conducen el gas, a baja o media presión, hasta los diferentes usuarios individuales.

En la red principal debe mantenerse un nivel en la presión del gas adecuado de forma que llegue a las secundarias en condiciones tales que permitan asegurar la distribución final a los usuarios.

Esta condición unida a la variación temporal del consumo doméstico, diario y estacional, obligan a un diseño que prevea un caudal de alimentación variable, de forma que el valor de la presión del gas en cualquier punto de la red, en cada instante, no supere unos límites preestablecidos.

En cualquier diseño moderno, ya sea nueva

construcción, ampliación o adecuación de la red para una mejor explotación, debe establecerse en cada instante el caudal de gas y los puntos de alimentación del mismo a la red así como un control activo de presiones en los diversos tramos de la misma.

Esta metodología proporciona una red autoestable que garantiza en todo instante la distribución y la seguridad de la red siendo necesario disponer de un método de simulación eficiente que permita definir los parámetros de diseño.

Una descripción más completa de los aspectos matemáticos del problema así como algunas soluciones numéricas obtenidas utilizando el método de diferencias finitas pueden encontrarse en las referencias [1]-[3].

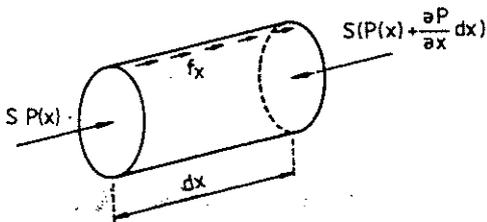
Esta comunicación desarrolla una formulación por elementos finitos que permite obtener la solución numérica de la evolución de presiones y caudales de gas que circula, en régimen variable, por redes cilíndricas, contemplando un caudal de alimentación variable y manteniendo la presión de los diversos tramos de la red controlada.

Se presenta tanto la obtención de las ecuaciones de la discretización como el algoritmo de solución de dichas ecuaciones en el tiempo. Las ecuaciones de la discretización se obtienen aplicando el método de residuos ponderados, en su forma débil de Galerkin, al sistema de ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno físico, tomando como variable principal la presión del gas. La solución de estas ecuaciones en el tiempo se realiza siguiendo el esquema de Galerkin modificado (MQS) [6] que proporciona soluciones

numéricas excelentes y económicas sin presencia de oscilaciones temporales.

2. ECUACIONES BASICAS

Consideremos el gas-ciudad como un fluido compresible y viscoso que circula en régimen variable por un conducto cilíndrico. Si aislamos un elemento diferencial de fluido de longitud "dx" y sección constante "S" podemos plantear las siguientes ecuaciones.



2.1. Ecuación del Movimiento

El gas en movimiento debe satisfacer la ley de Newton F=mx a. El gas está sometido a dos tipos de fuerzas: de presión (de superficie) y de rozamiento (de volumen) que pasamos a evaluar a continuación.

a) Fuerzas de presión

Posición	Presión	Fuerza
x	P(x)	P(x) S dx
x+dx	P(x) + $\frac{\partial P(x)}{\partial x} dx$	(P(x) + $\frac{\partial P(x)}{\partial x} dx$) S dx

P(x) representa la presión en la posición x en el tiempo t y S la sección de la conducción que suponemos constante en el elemento diferencial.

b) Fuerzas de rozamiento

Se puede demostrar que la pérdida de carga en tubos cilíndricos es proporcional a la longitud de la conducción y función de la velocidad media, U, del fluido, de su peso específico ρ, de su viscosidad ν y del diámetro de la tubería D. Un desarrollo más en profundidad nos proporciona para la pérdida de carga fx la expresión (1):

$$f_x = -\rho \frac{U^2}{2} \frac{\lambda(R)}{D} \quad (1)$$

donde R=UD/ν es el número de Reynolds y λ es una función desconocida de dicho número denominada "coeficiente de pérdida de carga".

La fuerza de rozamiento viene expresada como:

$$F_x = f_x S dx = -\rho \frac{U^2}{2D} \lambda(R) S dx \quad (2)$$

La aplicación de la ley de Newton nos proporciona la ecuación del movimiento:

$$F_x + S P(x) - (P(x) + \frac{\partial P}{\partial x} dx) S = S dx \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3)$$

Por otra parte $\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dU}{dt} = U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial t}$ (4)

y de (2), (3) y (4) se deduce

$$\frac{U^2}{2D} \lambda(R) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

2.2. Ecuación de Continuidad

Debe satisfacerse el balance másico del elemento diferencial de fluido, supuesto fijo en el tiempo dt.

a) Variación másica en el tiempo dt

$$S dx \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \quad (6)$$

b) Variación másica de fluido de entrada y salida en el elemento diferencial en el tiempo dt

$$U S dt - [\rho U + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} dx] S dt \quad (7)$$

El balance másico nos proporciona la siguiente ecuación

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

La ecuación del movimiento puede simplificarse si tenemos en cuenta que la pendiente de la curva de presiones, función de la posición, en un punto de caudal y presión conocido, es la misma que la obtenida suponiendo el gas circulando en régimen permanente con los mismos valores de caudal y presión. Esto indica que, en la práctica, podemos despreocupar los términos de inercia

$$U \frac{\partial U}{\partial x} \quad \text{y} \quad \frac{\partial U}{\partial t} \quad (9)$$

La ecuación del movimiento (5) toma entonces la siguiente forma:

$$\frac{U^2}{2D} \lambda(R) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

Se admite que el gas-ciudad sigue la ecuación de estado de un gas real

$$\frac{P}{P_0 Z T} = \frac{P_0}{P_0 Z_0 T_0} \quad \text{o bien} \quad \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{P}{P_0} \frac{Z_0 T_0}{Z T} \quad (11)$$

donde P, ρ y Z representan la presión, peso específico y el factor de compresibilidad del gas a la temperatura T. Sin embargo en las aplicaciones prácticas y para presiones no muy elevadas, está aceptado suponer una temperatura constante, T=T₀, y el carácter de incompresible, Z=Z₀. En estas condiciones el gas se comporta como perfecto y podemos expresar directamente su velocidad media, U, como:

$$U = \frac{Q}{S} \frac{P_0}{P} \quad (12)$$

Sustituyendo las expresiones (11), simplificada para gas perfecto, y (12) las ecuaciones básicas pueden escribirse:

(movimiento) $\frac{\partial P^2}{\partial x} + A \frac{Q^2}{D^5} = 0$ (13)

(continuidad) $\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{B}{D^2} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$ (14)

con $A = \frac{16P_0 \rho_0 \lambda(R)}{\pi^2}$ y $B = \frac{4P_0}{\pi}$ (15)

Si expresamos ρ en función de s , densidad del gas con respecto al aire, y empleamos las unidades más usuales en la industria del gas, es decir, caudal Q en m^3/h , diámetro D en mm . y distancia x en m , estas "constantes" A y B toman la forma

$A = 1614 s \lambda(R)$ y $B = 1.270.000$ (16)

La función $\lambda(R)$ depende esencialmente del régimen de circulación del gas, que a su vez depende del número de Reynolds. Los autores especializados en distribución de gas-ciudad proponen numerosas expresiones aproximadas para $\lambda(R)$ destacando entre todas ellas, por los excelentes resultados que proporciona, la fórmula de Renouard simplificada

$\lambda(R) = 0.172 R^{-0.18}$ (17)

Esta función, de fácil implementación en cualquier proceso numérico, depende de las características físicas y cinemáticas del gas. Así, por ejemplo, para un gas-ciudad con una cantidad relativa de 0.65 la fórmula de Renouard simplificada nos proporciona un valor de A

$A = 31.6 \left(\frac{Q}{D}\right)^{-0.18}$ (18)

Las ecuaciones (13) y (14) permiten conocer, en cualquier punto de la red, las variaciones de presión en el tiempo. Para ello es necesario prescribir en cada instante la presión y/o el caudal al menos en dos puntos de la red.

Genéricamente estas condiciones de contorno pueden escribirse de la forma:

$P = f(P_{t0}, P, Q, t)$
 $Q = g(Q_{t0}, P, G, t)$ (19)

donde P_{t0} y Q_{t0} son los valores de P y Q al inicio de la solución transitoria, instante t_0 , y f y g son dos funciones conocidas que representan la ley de variación, en el tiempo, de la presión y el caudal en los puntos prescritos. Estas funciones deben satisfacer que para $t=t_0$, $P=P_{t0}$ y $Q=Q_{t0}$. Es práctica normalmente aceptada tomar como valores P_{t0} y Q_{t0} los obtenidos en la solución estacionaria.

3. SOLUCION POR ELEMENTOS FINITOS

En las ecuaciones (13) y (14), que rigen la circulación de un gas por conductos cilíndricos, puede eliminarse el caudal Q como

$Q(x,t) = - \frac{D^5}{A} \frac{\partial P^2(x,t)}{\partial x}$ (20)

y sustituyendo en la ecuación (14) tendremos

$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} - B D^3 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{A Q(x,t)} \frac{\partial P^2(x,t)}{\partial x} \right) = 0$ (21)

El problema puede pues considerarse como unidimensional, tomando la presión como variable principal, pero teniendo en cuenta que la presencia del caudal Q nos conducirá a un proceso no lineal (Formulación en presiones).

Aplicando el método de los "residuos ponderados" [4] a la ecuación (21) podemos escribir:

$\int_1 W(x) \frac{\partial P}{\partial t} dx - 2BD^3 \int_1 W(x) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{AQ} \frac{\partial P}{\partial x} \right) dx = 0$ (22)

integrando por partes la segunda integral y utilizando la ecuación (20)

$\frac{D^2}{B} \int_1 W \frac{\partial P}{\partial t} dx + [WG]_0^1 + 2D^5 \int_1 \frac{P}{AQ} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial W}{\partial x} dx = 0$ (23)

Siguiendo el proceso normal del método de los elementos finitos discretizamos la red de distribución del gas en "m" elementos unidimensionales con "n" nodos. La presión en un punto genérico de cada elemento se expresa a partir de sus valores en los nodos mediante unas funciones de interpolación

$P(x,t) = \sum_1^n N_i(x) P_i(t)$ (24)

entonces sus derivadas respecto a x y t toman los siguientes valores

$\frac{\partial P}{\partial x} = \sum_1^n \frac{\partial N_i}{\partial x} P_i$ y $\frac{\partial P}{\partial t} = \sum_1^n N_i \frac{\partial P_i}{\partial t}$ (25)

donde $N_i(x)$ son las funciones de interpolación (o de forma) [4] asociadas con el nodo "i" del elemento "e" y P_i los valores de la presión del gas en dicho nodo.

En principio la función $W(x)$ utilizada en la expresión (22) puede ser cualquiera. Si elegimos las funciones de forma, $W(x)=N_i(x)$, método de Galerkin, podemos escribir:

$\frac{D^2}{B} \int_1^n N_1 \sum_1^n N_i \frac{\partial P_i}{\partial t} dx + D^5 \int_1^n \frac{2P}{AQ} \sum_1^n \frac{\partial N_1}{\partial x} P_i \frac{\partial N_1}{\partial x} dx + Q_1 = 0$
 $\frac{D^2}{B} \int_1^n N_2 \sum_1^n N_i \frac{\partial P_i}{\partial t} dx + D^5 \int_1^n \frac{2P}{AQ} \sum_1^n \frac{\partial N_2}{\partial x} P_i \frac{\partial N_2}{\partial x} dx + Q_2 = 0$ (26)
.....
 $\frac{D^2}{B} \int_1^n N_n \sum_1^n N_i \frac{\partial P_i}{\partial t} dx + D^5 \int_1^n \frac{2P}{AQ} \sum_1^n \frac{\partial N_n}{\partial x} P_i \frac{\partial N_n}{\partial x} dx + Q_n = 0$

o bien expresando este sistema de ecuaciones en forma matricial

$\underline{M}^e \underline{\dot{P}}^e + \underline{K}^e \underline{P}^e + \underline{F}^e = 0$ (27)

donde \underline{P}^e representa el vector de presiones nodales del elemento "e" y $\underline{\dot{P}}^e$ el valor de sus derivadas respecto al tiempo.

Un elemento genérico de las matrices \underline{M}^e ; \underline{K}^e

y \underline{F}^e viene dado por

$$m_{ij}^e = \frac{D^2}{B} \int_1 N_i N_j dx \quad (28)$$

$$k_{ij}^e = D^5 \int_1 \frac{2P}{AQ} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx \quad (29)$$

$$f_j^e = Q_j \quad (30)$$

Extendiendo esta ecuación matricial a toda la red de distribución y teniendo en cuenta que en cada nodo de la misma, donde coinciden dos o más elementos, debe verificarse que la suma de caudales es nula, podemos escribir:

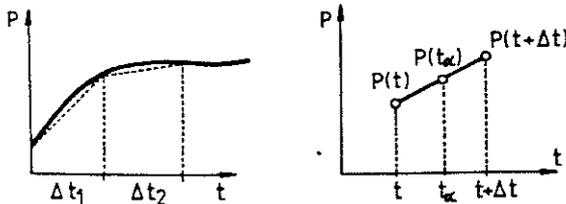
$$\underline{M} \dot{\underline{P}} + \underline{K} \underline{P} + \underline{F} = \underline{Q} \quad (31)$$

donde $\underline{M} = \sum M^e$, $\underline{K} = \sum K^e$ y $\underline{F} = \sum F^e$ donde el sumatorio tiene un significado de "ensamblaje" de acuerdo con las normas anteriores.

4. ESQUEMA DE INTEGRACION EN EL TIEMPO

En el análisis numérico de problemas reales de ingeniería transitorios se han realizado considerables esfuerzos en la búsqueda de algoritmos de solución, del sistema de ecuaciones resultante, estables, eficientes y aproximados. Cada algoritmo de integración en el tiempo tiene sus propias características siendo prácticamente imposible encontrar uno válido para cualquier problema transitorio.

En el presente trabajo la integración, paso a paso en el tiempo, de la ecuación (31) se basa en el esquema numérico sugerido por Damjanic y Owen [6]. La hipótesis fundamental de este esquema consiste en suponer una variación lineal de la presión en cada intervalo discreto de tiempo, t .



con $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ y $t_\alpha = t_n + \alpha \Delta t$ variando n de 0 a N , número total de intervalos considerados, y α entre 0 y 1.

En esta hipótesis la derivada de la presión en un punto intermedio del intervalo puede escribirse como:

$$\dot{P}_\alpha = \frac{P(t_\alpha) - P(t)}{\alpha \Delta t} \quad \text{con } \Delta t \rightarrow 0 \quad (32)$$

El sistema de ecuaciones a resolver se puede expresar, evaluando las diferentes matrices en el tiempo t , de la forma

$$\underline{M}(t_\alpha) \dot{\underline{P}}(t_\alpha) + \underline{K}(t_\alpha) \underline{P}(t_\alpha) + \underline{F}(t_\alpha) = \underline{Q} \quad (33)$$

sustituyendo el valor de $\dot{\underline{P}}(t_\alpha)$ (32) podemos escribir

$$\underline{M}(t_\alpha) \left[\frac{P(t_\alpha) - P(t)}{\alpha \Delta t} \right] + \underline{K}(t_\alpha) \underline{P}(t_\alpha) + \underline{F}(t_\alpha) = \underline{Q} \quad (34)$$

y agrupando términos

$$\left[\underline{M}(t_\alpha) \frac{1}{\alpha \Delta t} + \underline{K}(t_\alpha) \right] \underline{P}(t_\alpha) + \left[\underline{F}(t_\alpha) - \underline{M}(t_\alpha) \underline{P}(t_\alpha) \frac{1}{\alpha \Delta t} \right] = \underline{Q} \quad (35)$$

es decir en una forma clásica en el método de los elementos finitos

$$\hat{\underline{K}}(t_\alpha) \underline{P}(t_\alpha) + \hat{\underline{F}}(t_\alpha) = \hat{\underline{Q}} \quad (36)$$

$$\text{con } \hat{\underline{K}}(t_\alpha) = \frac{1}{\alpha \Delta t} \underline{M}(t_\alpha) + \underline{K}(t_\alpha) \quad (37)$$

$$\hat{\underline{F}}(t_\alpha) = \underline{F}(t_\alpha) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \underline{M}(t_\alpha) \underline{P}(t_\alpha) \quad (38)$$

La ecuación (36) constituye un sistema de ecuaciones no lineal debido a la presencia en la matriz \underline{K} , y por tanto en la $\hat{\underline{K}}$, de los valores P y Q . La solución de este sistema en cada tiempo, se realiza mediante una simple esquema de iteración directa

$$\underline{P}(t_\alpha)^n = \left[\hat{\underline{K}}^{n-1} \right]^{-1} \hat{\underline{F}} \quad (39)$$

donde el índice n indica valores en la iteración n -sima.

Este esquema finaliza cuando la norma del error cuadrático de los valores de la presión en el tiempo t es inferior a un valor establecido de antemano.

Resolviendo el sistema (36) obtenemos los valores de la presión del gas en el tiempo t . La presión en el tiempo t_{n+1} puede obtenerse a partir de la expresión:

$$\underline{P}(t_{n+1}) = \frac{1}{\alpha} \underline{P}(t_\alpha) + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \underline{P}(t) \quad (40)$$

El esquema de integración presentado en este apartado es estable con $\alpha \geq 1/2$ [5] [6] tanto en un contexto lineal como no lineal.

DIFERENTES ESQUEMAS DE INTEGRACION

Valores de α	Esquema
1/2	Crank-Nicolson (CN)
2/3	Galerkin (QS)
1	Euler-Backward (EB)

El esquema de Galerkin presenta una variante, que es la que se ha utilizado en este trabajo, denominada Galerkin modificada (QSM) que no extiende la solución al final del primer intervalo.

Es decir inicialmente utiliza un esquema EB con un $t_1 = 2/3 \Delta t$.

5. EJEMPLOS

Los ejemplos que a continuación se presentan tienen dos objetivos claramente diferenciados:

1. Mostrar la eficiencia de la formulación presentada en los apartados anteriores, aplicándola al caso real de la red de transporte a media presión de la ciudad de Barcelona.
2. Incorporar el método a un proceso de diseño de redes autoestables, simulando el comportamiento del gas en el tiempo, bajo diversas condiciones de alimentación, consumo y control de presiones.

5.1. Ejemplo de Comprobación

La formulación propuesta en este trabajo se aplica a la red real de media presión de la ciudad de Barcelona utilizando algunos resultados experimentales para confirmar su eficiencia y aproximación.

En la Fig. 1 se muestra un esquema simulado de la red así como la malla de elementos finitos, unidimensionales parabólicos (tres nodos) [6] utilizada en las discretizaciones de la misma. Debido a la complejidad de la red no se explicita ningún detalle de longitudes, diámetros, etc. de los diferentes tramos.

Básicamente las condiciones de contorno utilizadas en el análisis se han establecido de la siguiente manera:

1. La alimentación de gas a la red se realiza en los nodos 1 y 4 con un caudal inicial de 8.970 y 18.000 m³/h respectivamente. En el nodo 1 la entrada de gas a la red es variable, de acuerdo con la ley representada en la Fig. 2, y en el nodo 4 permanece constan-

te durante todo el proceso transitorio.

2. El consumo, a través de 43 puntos de la red, se ha definido en función de la facturación media anual y se ha supuesto constante en el tiempo, de acuerdo con las condiciones sueltas el día en que se obtuvieron los resultados experimentales.
3. La solución estacionaria se obtiene prescribiendo una presión absoluta de 1,333 kg/cm² en el nodo 1. Las condiciones de contorno transitorias se establecen, partiendo de la distribución de presiones estacionaria, en términos de caudal en el nodo 41 de la red mediante un proceso iterativo en presiones de forma que el caudal obtenido como reacción a la presión prescrita coincida en cada instante con el consumo en dicho punto.

En la Fig. 3 se muestra la variación de la presión con el tiempo en los nodos 1, 4 y 34 de la malla de la Fig. 1. En la misma figura se presentan los resultados de la presión en dichos puntos obtenidos experimentalmente. La concordancia de los resultados puede calificarse de excelente sobre todo si tenemos en cuenta que la prueba experimental se realizó en condiciones reales con unos caudales de consumo difíciles de establecer, habiéndose estimado en el proceso numérico a partir de la facturación media anual. Por otro lado los diámetros de las conducciones utilizados presentan un cierto grado de desconfianza en algunos tramos debido a la antigüedad de la red, al uso (disminución del diámetro efectivo por aterramientos, etc.). No obstante, el proceso numérico simula perfectamente la ley de variación y las puntas de presión acotando los errores por debajo del 5%, cota aceptable en este tipo de análisis.

5.2. Ejemplos de Diseño

La formulación propuesta constituye, bajo nuestro punto de vista, una herramienta fundamental en la definición de los aspectos más in-

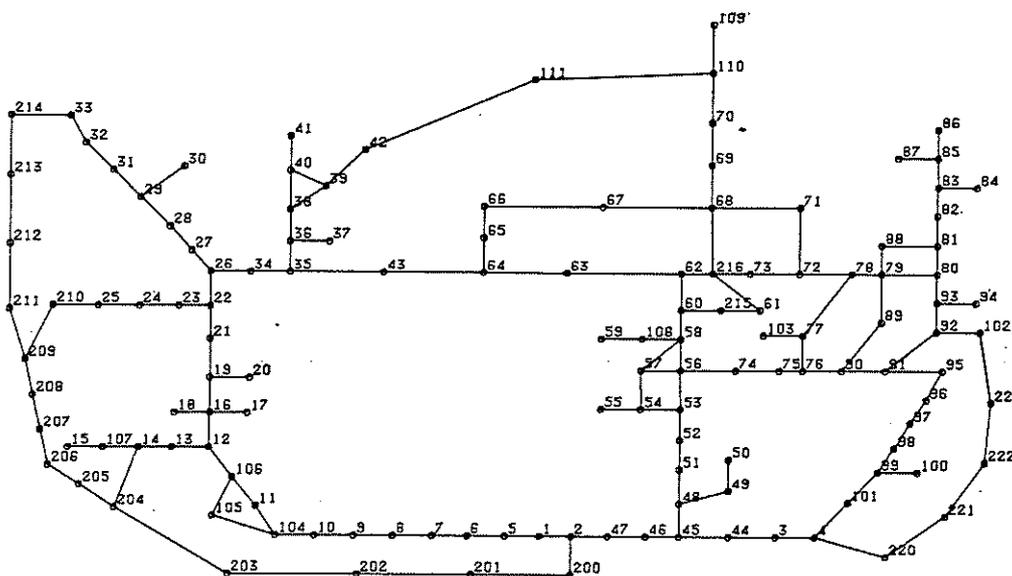


Fig. 1.- Malla de elementos finitos que simula la red de media presión de la ciudad de Barcelona.

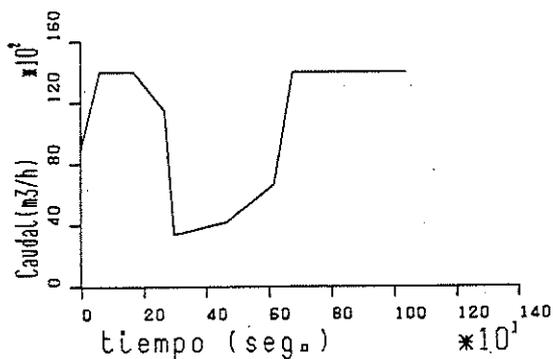


Fig. 2.- Evolución en el tiempo del caudal de alimentación en el nodo 1 de la malla de la Fig. 1.

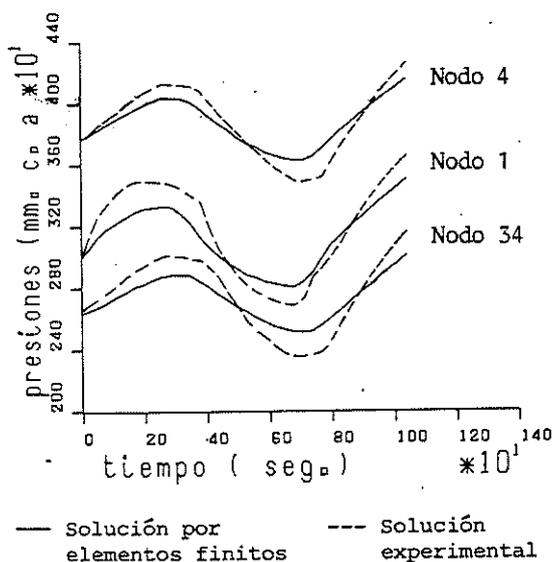


Fig. 3.- Variación de la presión con el tiempo en los nodos 1, 4 y 34 de la malla de la Fig. 1.

interesantes que aparecen en el diseño moderno de una red de distribución de gas.

La variación del consumo doméstico, que sigue prácticamente un modelo continuo, implica una variación del caudal, según un modelo discreto, en ciertas estaciones de alimentación. Este hecho provoca continuas variaciones de presión en la red que actúa como gasómetro, almacenando o cediendo gas, según las condiciones de consumo y alimentación.

El instante en que debe variarse el caudal de alimentación en una o varias estaciones se define, en la práctica, mediante un control de presiones en diversos puntos de la red, que pueden ser dichas estaciones, de manera que, cuando el valor de la presión sobrepasa unos límites preestablecidos el caudal se incrementa o reduce de acuerdo con un modelo discreto de funcionamiento.

Cuando la alimentación de gas a la red se realiza a través de varias estaciones autónomas

y con funcionamiento y gobierno independientes, las variaciones entre el caudal de consumo y alimentación originan unas ondas de presión que se transmiten por toda la red provocando continuos cambios de caudal en las estaciones de alimentación en intervalos de tiempo reducidos.

Esta situación, que denominaremos "inestable", no sólo conduce a un rápido deterioro de los mecanismos de accionamiento sino que además puede provocar una resonancia en la red de fatales consecuencias.

Por lo tanto en el diseño de una red es necesario establecer:

1. El número y situación de las estaciones de alimentación.
2. La función escalonada de alimentación de caudal en cada estación así como el tiempo mínimo que debe transcurrir entre dos cambios consecutivos de caudal y su valor máximo.
3. Los límites de presión que provocan la puesta en marcha de esquema de alimentación.

Para definir estos parámetros es necesario comprobar, mediante simulaciones, que la red es estable con distintos consumos, verano o invierno, leyes de variación crecientes o decrecientes, etc., buscando además por motivos económicos que los escalones de alimentación de caudal y el tiempo mínimo entre dos cambios consecutivos del mismo sean lo mayor posible.

Se presentan a continuación dos simulaciones concretas, en base a la red de la Fig. 1, en las que la utilización de valores distintos de los parámetros de diseño mencionados nos conduce a situaciones opuestas de validez de uso de la red con ellos diseñada.

En la tabla 1 se muestran los valores de los parámetros de diseño utilizados en dichas simulaciones, destacando que el número y posición de las estaciones de alimentación de gas se mantienen. En dicha tabla los caudales vienen dados en m³/h., las presiones, que son relativas, en mm. de columna de agua y el tiempo en segundos.

En las figuras 4 y 5 se muestra la evolución en el tiempo de las presiones y caudales, respectivamente, en las estaciones de alimentación de la simulación 1. Puede observarse que cuando la presión del gas sobrepasa el valor preestablecido entra en funcionamiento el mecanismo de alimentación (incrementando o disminuyendo el caudal). Este mecanismo se estimula suponiendo unas condiciones iniciales que provoquen una actividad en alguna de dichas estaciones. Las ondas de presión se propagan en el tiempo pero no alcanzan la proporción necesaria para desestabilizar la red (cambios de caudal en la alimentación suficientemente espaciados).

En las figuras 6 y 7 se muestra la evolución en el tiempo de las presiones y caudales, respectivamente, en las estaciones de alimentación de la simulación 2. Análogamente al caso anterior el mecanismo de alimentación se estimula inicial

Estaciones de alimentación	SIMULACION 1						SIMULACION 2				
	1	4	14	22	102	215	1-4	14	22	102	215
Caudal Inicial	12000	10000	8000	22000	4000	24000	5000	0			5000
Escalon de caudal	2000		4000	2000	4000	2000	5000				
Caudal Maximo	30000		12000	46000	12000	46000	35000	10000	45000	10000	45000
Tiempo Minimo	20						20				
Consumo por hora	Lineal creciente de 80000 a 120000						Lineal decreciente de 15000 a 13000				

Tabla 1.- Valores de los parámetros de diseño utilizados en las simulaciones presentadas.

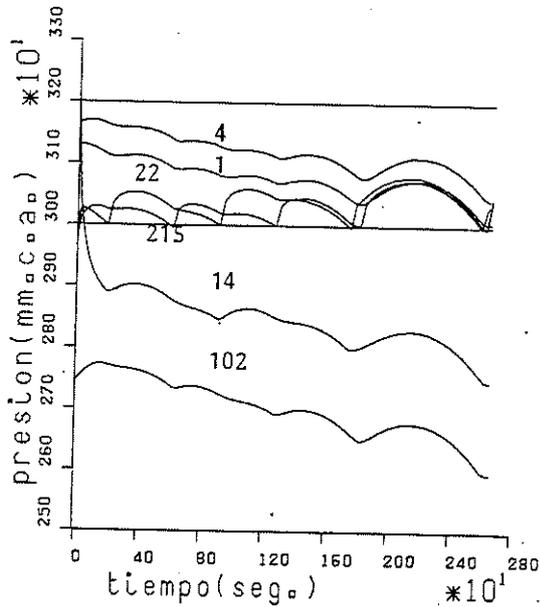


Fig. 4.- Evolución de presiones en el tiempo en las estaciones de alimentación de la simulación 1.

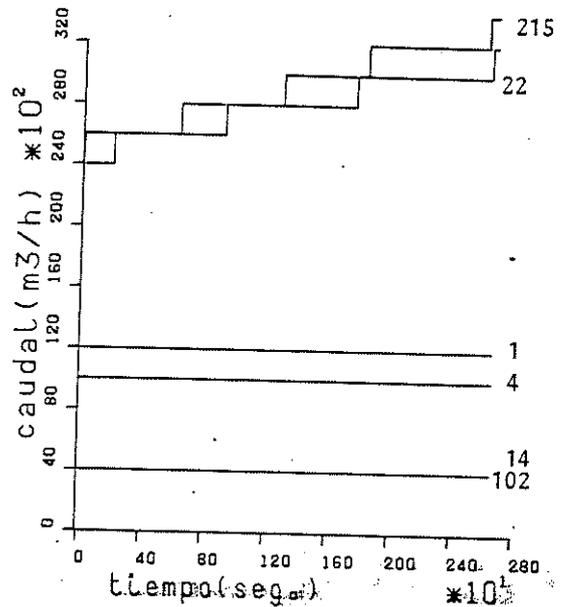


Fig. 5.- Evolución en el tiempo de caudales de alimentación en la simulación 1.

mente mediante unas condiciones adecuadas. Las condiciones límites de trabajo de la red, consumo pequeño con escalones de caudal de alimentación importantes, provocan al cabo de un cierto tiempo una gran actividad del mecanismo de alimentación con ondas de presión de gran pendiente por lo que la red puede considerarse desestabilizada y por tanto no utilizable en la práctica. El escalón de caudal que sobrealimenta la red en cada paso es excesivo debiendo reducirse para conseguir los objetivos deseados.

Estas dos simulaciones representan el ámbito de aplicación de la formulación expuesta en esta comunicación y de forma explícita ponen de manifiesto la importancia de los parámetros de diseño en la estabilidad final de la red.

6. CONCLUSIONES

La formulación presentada para analizar la evolución en el tiempo de presiones y caudales en redes urbanas de distribución de gas, creemos que reproduce fielmente los problemas reales que surgen en el ámbito de la industria del gas. El carácter unidimensional de la formulación la hace muy adecuada para su implementación en ordenadores, de pequeña capacidad de memoria central.

La inclusión de esta formulación en un esquema de diseño proporciona al proyectista un amplio abanico de posibilidades, permitiéndole obtener redes con mayor rendimiento e introducir unos mecanismos de autocontrol que aseguren el buen funcionamiento de la misma bajo las múltiples hipótesis de trabajo a que va a estar sometida.

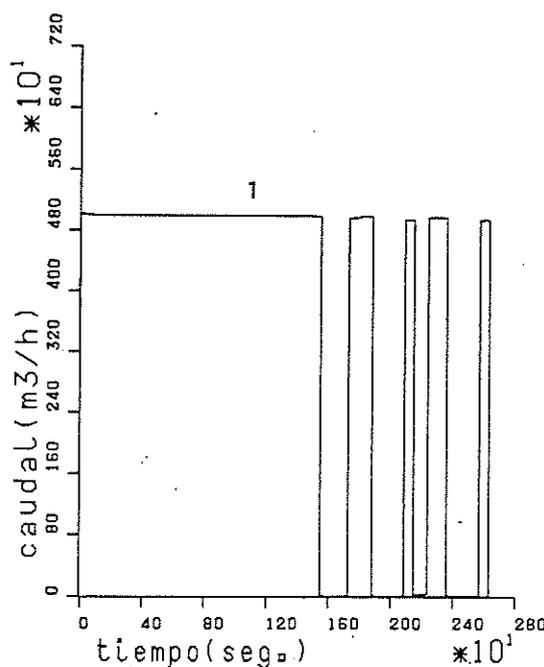
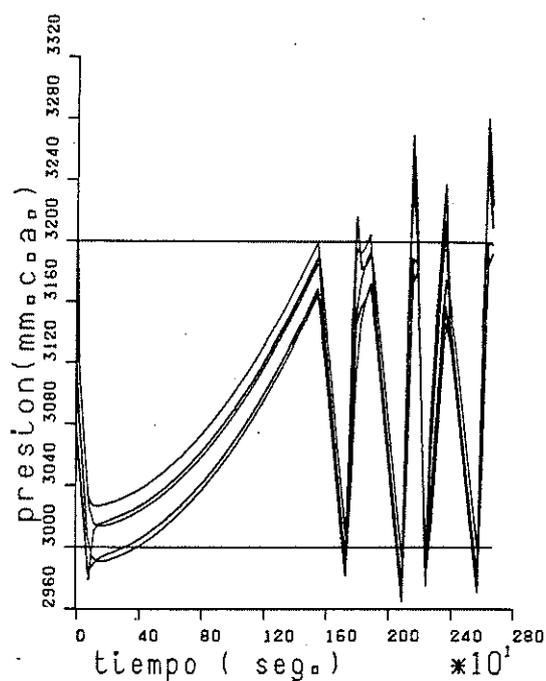


Fig. 6.- Evolución de presiones en el tiempo en las estaciones de alimentación de la simulación 2.

Fig. 7.- Evolución en el tiempo de caudales de alimentación en la simulación 2.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a Catalana de Gas y Electricidad, S.A. de Barcelona por el soporte técnico y económico que ha proporcionado a este trabajo. Asimismo quieren agradecer a F. Navarrina de la Cátedra de Cálculo Numérico de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Barcelona su colaboración en el desarrollo del software gráfico utilizado, que ha simplificado enormemente la interpretación de los resultados obtenidos.

8. REFERENCIAS

1. H. Pascal
"L'écoulement non permanent dans les gazoducts".
Technip. Paris. 1972.
2. J.J. Maugis y H. Kahane
"Methode de calcul numerique pour l'etude de l'écoulement d'un gaz en regime variable"
C.R. Congress ATQ. 1964.
3. H. Kahane, J.J. Maugis y P. Schauerer
"Nouvelles methodes numeriques pour l'etude de l'écoulement d'un gaz en regime variable"
C. R. Congress ATQ. 1965.
4. O.C. Zienkiewicz
"The finite element method"
McGraw Hill. 1979.
5. O.C. Zienkiewicz y K. Morgan
"Finite elements and approximations"
J. Wiley. 1983.
6. D.R.J. Owen y F. Damjanic
"Practical considerations for the termal transient

finite element analysis using finite element"
Nuc. Engng. and Design. Pp. 109-126. 1982.

5. Sánchez Pérez, A.M.; Rodríguez de Francisco, P.: "Shear spinning modeling", 1st International Conference on Technology of Plasticity, Tokyo (Japón), septiembre 1984
6. Sánchez Pérez, A.M.; Pérez García, J.M.; Rodríguez de Francisco, P.: "A study of the influence of parameters on shear spinning", 3rd International Conference on Rotary Metalworking Processes, Kyoto (Japón), septiembre 1984