

Análisis y diseño de regaderas domésticas de bajo consumo

Dirección General de Construcción y Operación
Hidráulica—Secretaría General de Obras—DDF

Los experimentos realizados por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica de la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal, con regaderas comerciales, han confirmado que éstas pueden llegar a consumir un alto porcentaje de la dotación media de cada usuario, dependiendo de las condiciones de servicio en que operan. Un propósito de los experimentos fue encontrar una o algunas regaderas que, adaptándose a las condiciones variables de una red domiciliar típica, disminuyeran el consumo de agua sin modificar significativamente los parámetros de comodidad del usuario. La carencia de prototipos comerciales que llenaran los requisitos de selección originó la necesidad de diseñar nuevos modelos que corrigieran las deficiencias encontradas. Para ello, se plantea un modelo matemático del comportamiento hidrodinámico del chorro descargado por una regadera que satisfaga algunas variables de confort y la geometría que debe tener para lograrlo. Se establecen también criterios para adecuar los diseños a las condiciones variables de la red domiciliar, a la estatura media del usuario y a sus hábitos de aseo.

Antecedentes

El programa de evaluación experimental de regaderas comerciales desarrollado por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH), permitió conocer el funcionamiento de estos dispositivos, las variables más importantes que intervienen y establecer criterios de selección. Estos se basaron en el mejoramiento de tres variables: gasto descargado, diámetro del chorro a una altura previamente seleccionada y grado de dispersión de la lluvia a la misma altura. Fueron muy pocas regaderas las que cumplieron los requisitos de selección dentro del intervalo de presión en las pruebas. Las que satisfacían la necesidad de un diámetro amplio del cono de lluvia y buena uniformidad de la misma, eran de alto consumo.

Lo anterior originó la necesidad de plantear procedimientos de diseño de nuevos prototipos que mejoraran las deficiencias observadas en las regaderas comerciales, con base en un modelo matemático de la hidrodinámica de las regaderas susceptible de ser calibrado y mejorado experimentalmente, una vez que estos nuevos diseños se probaran en el laboratorio.

El procedimiento que aquí se expone constituye un primer intento que, desde luego, puede ser mejorado o sustituido por otro de mayor o menor complejidad, en la medida en que se acumule más experiencia y se establezca la manera de cuantificar otras variables relacionadas con el grado de confort del usuario, para ser incluidas en el procedimiento.

Planteamiento del modelo

Aspectos generales

El fenómeno queda esencialmente definido al conocer las trayectorias descritas en el aire por los diferentes chorros descargados por los orificios de una regadera. El acomodo óptimo de los chorros en una sección previamente especificada permitiría lograr, para cada gasto o presión, una distribución uniforme de la lluvia en dicha sección y, en buena medida, una mayor comodidad del usuario en cuanto a una distribución más uniforme de limpieza y temperatura. Esto eliminaría el choque térmico parcial que se registra en algunas regaderas cuando no logran dicha distribución.

Las coordenadas del chorro cayendo libremente en cualquier instante t son:

$$x = V_0 t \cos \theta_0 \quad (3a)$$

$$y = V_0 t \operatorname{sen} \theta_0 + \frac{g t^2}{2} \quad (3b)$$

Al eliminar t de las ecuaciones anteriores, se obtiene la ecuación del perfil del chorro, de forma parabólica, a saber:

$$y = x \tan \theta_0 + \frac{x^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \cos^2 \theta_0} \quad (4a)$$

donde el coeficiente k toma en cuenta el efecto de fricción con el aire.

Si es x la que se desea despejar, de la ecuación (4a) resulta:

$$x = \left[\sqrt{2y + k \frac{V_0^2}{g} \operatorname{sen}^2 \theta_0} - \sqrt{k \frac{V_0}{\sqrt{g}} \operatorname{sen} \theta_0} \right] \sqrt{k \frac{V_0}{\sqrt{g}} \cos \theta_0} \quad (4b)$$

Las ecuaciones (4a) ó (4b) permiten conocer la trayectoria del agua descargada por un orificio al centro de la regadera; es decir, la trayectoria del eje del chorro. Otras características del chorro se pueden obtener de las ecuaciones restantes; por ejemplo, la sustitución de la ecuación (4a) en la (1) conduce a la ecuación que da la velocidad del eje del chorro en cualquier punto de su trayectoria, que es:

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2g \left[x \tan \theta_0 + \frac{x^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \cos^2 \theta_0} \right]} \quad (5)$$

Por otra parte, la ecuación (2a) indica que $V_0 \cos \alpha_0 = V_0 \cos \theta_0$. Por tanto, con la ecuación (5) se obtiene una expresión para determinar el ángulo de inclinación del eje del chorro en cualquier punto, que es:

$$\cos \alpha_0 = \frac{V_0 \cos \theta_0}{\sqrt{V_0^2 + 2g \left[x \tan \theta_0 + \frac{x^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \cos^2 \theta_0} \right]}} \quad (6)$$

Cualquier otra trayectoria alojada en el plano vertical que contiene al eje del chorro, tiene una ecuación similar a la (4a), como sigue:

$$y = x \tan \theta + \frac{x_0^2}{2k \frac{V_0}{g} \cos^2 \theta} \quad (7)$$

donde el sistema de ejes (x_0, y_0) se relaciona con el general (x, y) a través de las ecuaciones: $x = x_0 + \Delta x$, $y = y_0 + \Delta y$, siendo Δx y Δy las coordenadas del orificio en cuestión. De este modo, las ecuaciones equivalentes a (4a) y (4b) para el sistema general de ejes (x, y) son ahora:

$$y - \Delta y = (x - \Delta x) \tan \theta + \frac{(x - \Delta x)^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \cos^2 \theta} \quad (8a)$$

$$x - \Delta x = \left[\sqrt{2(y - \Delta y) + k \frac{V_0^2}{g} \operatorname{sen}^2 \theta} - \sqrt{k \frac{V_0}{\sqrt{g}} \operatorname{sen} \theta} \right] \sqrt{k \frac{V_0}{\sqrt{g}} \cos \theta} \quad (8b)$$

En la misma forma, la ecuación (5) cambia a la expresión:

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2g \left[(x - \Delta x) \tan \theta + \frac{(x - \Delta x)^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \cos^2 \theta} \right]} \quad (9)$$

y la (6), a

$$\cos \alpha = \frac{V_0 \cos \theta_0}{\sqrt{V_0^2 + 2g \left[(x - \Delta x) \tan \theta + \frac{(x - \Delta x)^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \cos^2 \theta} \right]}} \quad (10)$$

Para obtener una lluvia de intensidad uniforme a cualquier altura h , no debe haber intersección de las distintas trayectorias descritas por los chorros que salen de la regadera. Esto es, debe existir un crecimiento continuo y uniforme del diámetro conjunto del chorro, desde el de la salida de la regadera, hasta el área que alcanza para $y = h$. Esto es difícil de obtener para cualquier valor de h , pero puede cumplirse con un valor previamente establecido. La abscisa c del centro del chorro a la

altura h , esto es, la del punto 1, puede obtenerse sustituyendo $y = h$ en la ecuación (4b), como sigue:

$$c = \left[\sqrt{2h + k \frac{V_0^2}{g} \text{sen}^2 \theta_0} - \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \text{sen} \theta_0 \right] \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \cos \theta_0 \quad (11)$$

En la misma forma, de la ecuación (6) se obtiene α_0 .

Para la trayectoria más alta, las coordenadas del punto A son:

$$\Delta x = a, \Delta y = -b.$$

De este modo, las ecuaciones (8a) y (8b) resultan:

$$y + b = (x - a) \tan \theta_A + \frac{(x - a)^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \cos^2 \theta_A} \quad (12a)$$

$$x - a = \left[\sqrt{2(y + b) + k \frac{V_0^2}{g} \text{sen}^2 \theta_A} - \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \text{sen} \theta_A \right] \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \cos \theta_A \quad (12b)$$

En la misma forma, para la trayectoria más baja las coordenadas del punto B son: $\Delta x = -e$, $\Delta y = f$. De este modo, las ecuaciones (8a) y (8b) se convierten en:

$$y - f = (x + e) \tan \theta_B + \frac{(x + e)^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \cos^2 \theta_B} \quad (13a)$$

$$x + e = \left[\sqrt{2(y - f) + k \frac{V_0^2}{g} \text{sen}^2 \theta_B} - \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \text{sen} \theta_B \right] \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \cos \theta_B \quad (13b)$$

Si la superficie que contiene a los orificios de la regadera fuera circular en el plano vertical coincidente con el eje del chorro, las condiciones de los puntos

A y B para las trayectorias más alta y más baja, de acuerdo con la ilustración 2, serían:

$$a = (\cos \theta_A - \cos \theta_0)r; \quad e = (\cos \theta_0 - \cos \theta_B)r$$

$$b = (\text{sen} \theta_0 - \text{sen} \theta_A)r; \quad f = (\text{sen} \theta_B - \text{sen} \theta_0)r \quad (14)$$

De este modo las ecuaciones (12a) y (12b) se transforman en:

$$y + (\text{sen} \theta_0 - \text{sen} \theta_A)r =$$

$$[x - (\cos \theta_A - \cos \theta_0)r][\tan \theta_A] + \frac{[x - (\cos \theta_A - \cos \theta_0)r]^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \cos^2 \theta_A} \quad (15a)$$

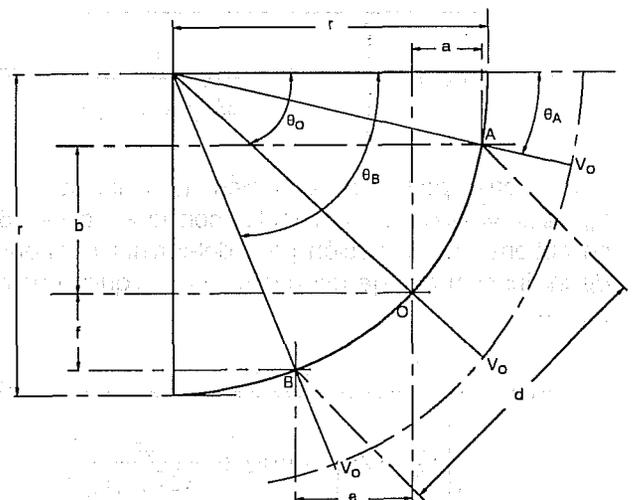
$$x - (\cos \theta_A - \cos \theta_0)r =$$

$$\left[\sqrt{2[y + (\text{sen} \theta_0 - \text{sen} \theta_A)r] + k \frac{V_0^2}{g} \text{sen}^2 \theta_A} - \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \text{sen} \theta_A \right] \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \cos \theta_A \quad (15b)$$

que son las ecuaciones del chorro más alto referidas al sistema original (x, y) .

De la misma manera, las ecuaciones (13a) y (13b) resultan:

2. Definición de variables en la placa de descarga de una regadera, con la forma de casquete esférico



$$y - (\text{sen } \theta_B - \text{sen } \theta_0)r =$$

$$\begin{aligned} & [x + (\text{cos } \theta_0 - \text{cos } \theta_B)r]^2 \tan \theta_B \\ & + \frac{[x + (\text{cos } \theta_0 - \text{cos } \theta_B)r]^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \text{cos}^2 \theta_B} \end{aligned} \quad (16a)$$

$$x + (\text{cos } \theta_0 - \text{cos } \theta_B)r =$$

$$\begin{aligned} & \left[\sqrt{2[(\text{sen } \theta_B - \text{sen } \theta_0)r] + k \frac{V_0^2}{g} \text{sen}^2 \theta_B} \right. \\ & \left. - \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \text{sen } \theta_B \right] \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \text{cos } \theta_B \end{aligned} \quad (16b)$$

que son las ecuaciones del chorro más bajo referidas al sistema original (x, y) .

Para el chorro más alto, cuando $y_{A'} = h$, $x_{A'} = c + R$, de las ecuaciones (15a) y (15b), se obtienen:

$$h + (\text{sen } \theta_0 - \text{sen } \theta_A)r =$$

$$\begin{aligned} & [c + R - (\text{cos } \theta_A - \text{cos } \theta_0)r] \tan \theta_A \\ & + \frac{[c + R - (\text{cos } \theta_A - \text{cos } \theta_0)r]^2}{2k \frac{V_0^2}{g} \text{cos}^2 \theta_A} \end{aligned} \quad (17a)$$

$$c + R - (\text{cos } \theta_A - \text{cos } \theta_0)r =$$

$$\begin{aligned} & \left[\sqrt{2[h + (\text{sen } \theta_0 - \text{sen } \theta_A)r] + k \frac{V_0^2}{g} \text{sen}^2 \theta_A} \right. \\ & \left. - \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \text{sen } \theta_A \right] \sqrt{k} \frac{V_0}{\sqrt{g}} \text{cos } \theta_A \end{aligned} \quad (17b)$$

Para el chorro más bajo, con $y_{B'} = h$, $x_{B'} = c - R$, de las ecuaciones (16a) y (16b), resultan ecuaciones similares a las anteriores.

Forma adimensional de las ecuaciones dinámicas

Conviene expresar las ecuaciones antes obtenidas en términos de cantidades relativas, a fin de reducir el número de variables.

Al dividir la ecuación (4a) entre $kV_0^2/2g$, resulta:

$$\frac{x}{kV_0^2/2g} = \left[\sqrt{\frac{y}{kV_0^2/2g} + \text{sen}^2 \theta_0} - \text{sen } \theta_0 \right] 2 \text{cos } \theta_0 \quad (18)$$

El parámetro adimensional $x/(kV_0^2/2g)$ depende únicamente de dos parámetros adimensionales: $y/kV_0^2/2g$ y θ_0 ; en cambio, la ecuación (4a) involucra a y, k, V_0 y θ_0 , esto es, cuatro variables. Sustituyendo la ecuación (11) en la (17b) e introduciendo el parámetro:

$$C_f = \frac{\sqrt{kV_0^2}}{2gh} \quad (19)$$

al despejar a $\text{cos } \theta_A$ se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{cos } \theta_A = & \left\{ \text{cos } \theta_0 \left[\sqrt{1 + C_f^2 \text{sen}^2 \theta_0} - C_f \text{sen } \theta_0 \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{2C_f} \frac{r}{h} \right] + \frac{1}{4C_f} \frac{D}{h} \right\} / \\ & \left[\sqrt{1 + (\text{sen } \theta_0 - \text{sen } \theta_A) \frac{r}{h} + C_f^2 \text{sen}^2 \theta_A} \right. \\ & \left. - C_f \text{sen } \theta_A + \frac{1}{2C_f} \frac{r}{h} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

Un procedimiento similar se sigue para θ_B , y resulta:

$$\begin{aligned} \text{cos } \theta_B = & \left\{ \text{cos } \theta_0 \left[\sqrt{1 + C_f^2 \text{sen}^2 \theta_0} - C_f \text{sen } \theta_0 \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{2C_f} \frac{r}{h} \right] - \frac{1}{4C_f} \frac{D}{h} \right\} / \\ & \left[\sqrt{1 + (\text{sen } \theta_0 - \text{sen } \theta_B) \frac{r}{h} + C_f^2 \text{sen}^2 \theta_B} \right. \\ & \left. - C_f \text{sen } \theta_B + \frac{1}{2C_f} \frac{r}{h} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

Diámetro de la regadera

Las ecuaciones que proporcionan las coordenadas: a , b , e y f de los puntos de despegue A y B en términos del radio r de curvatura de la placa y de θ_A y de θ_B , pueden utilizarse para obtener el diámetro d de la regadera. En efecto, de la ilustración 2 se tiene que:

$$d^2 = (a + e)^2 + (b + f)^2$$

donde

$$a + e = (\cos \theta_A - \cos \theta_B)r$$

$$b + f = (\sen \theta_B - \sen \theta_A)r$$

Al desarrollar los binomios y simplificar, se obtiene:

$$\frac{d}{h} = [1 - (\sen \theta_A \sen \theta_B + \cos \theta_A \cos \theta_B)]^{1/2} \sqrt{2} \left(\frac{r}{h} \right) \quad (22)$$

ecuación que indica que d depende sólo de θ_A , θ_B (no de θ_0) y de r . Sin embargo, es cierto que θ_A y θ_B dependen de θ_0 , lo que haría que d al final, también lo fuera de θ_0 . Sin embargo, la ecuación (22) es muy útil porque elimina la necesidad de utilizar θ_A y θ_B en la fabricación de la regadera, siendo tan sólo necesario el valor del diámetro d .

Algoritmo de solución de las ecuaciones dinámicas

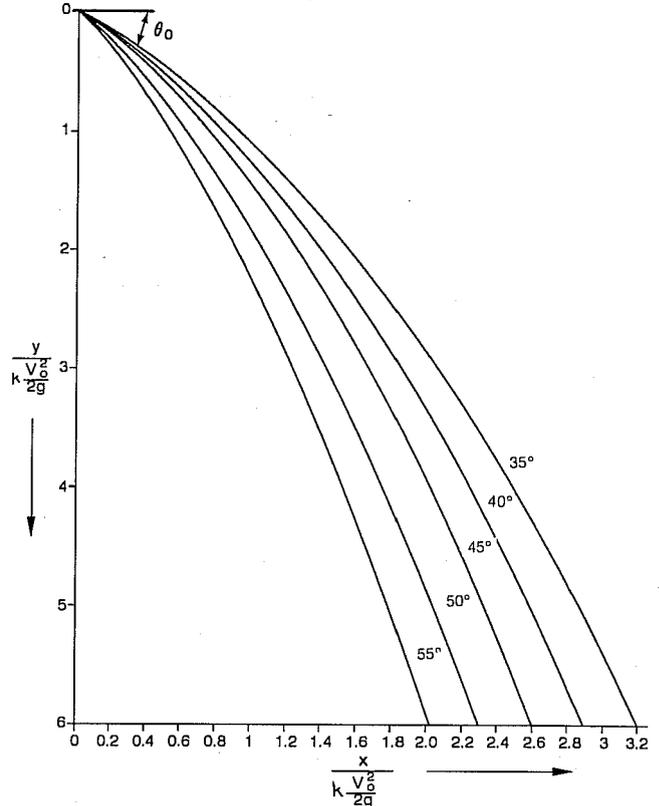
Para representar gráficamente la trayectoria del eje del chorro en términos adimensionales, se procede a tabular la ecuación (18) para cada valor particular de θ_0 , dando valores al parámetro:

$$2gy/kV_0^2$$

y calculando los valores de $2gx/(kV_0^2)$. Los resultados se muestran en la ilustración 3.

También resulta necesario obtener las representaciones gráficas de las ecuaciones (20) y (21), que pudieron haberse escrito de modo que el parámetro D/h apareciera en forma explícita, facilitando con ello la tabulación. Sin embargo, para fines de diseño es más conveniente obtener curvas que tengan como parámetro de entrada conocido D/h , figurando como constante de cada grupo, toda vez que éste tendría que ser elegido previamente por el diseñador. Por otra parte, de hecho es imposible obtenerlas de modo que aparezcan $\cos \theta_A$ y $\cos \theta_B$ en forma explícita. Por tanto, es preferible expresarlas como están en el texto y establecer un algoritmo de

3. Curvas adimensionales de las trayectorias del eje del chorro descargado por una regadera para distintos ángulos de inclinación θ_0



solución, que resuelto por computadora, permita la representación gráfica buscada y que a continuación se indica.

Elegido un valor θ_0 se procede como sigue:

1. Se elige un valor D/h constante en el intervalo 0.25 y 1.5.
2. Se elige un valor de r/h en el intervalo 0.1 y 3.0 y se mantiene constante.
3. Se elige un valor de C_f en el intervalo 1.5 y 7.5.
4. Se elige un valor θ_A menor o igual que θ_0 y se procede al cálculo de θ_B mediante la ecuación (20). Con el valor de θ_A obtenido, se reitera el cálculo con la misma ecuación hasta que el valor de θ_B supuesto sea igual al calculado con la tolerancia de error que se imponga. En caso de que sea θ_B el valor deseado, se sigue el mismo procedimiento con θ_B mayor que θ_0 , pero utilizando la ecuación (21).
5. Se repiten los pasos 3 y 4 hasta obtener la gama completa de valores de C_f contra θ_A ó θ_B , según el caso, para el de r/h elegido en el paso 2 como constante.
6. Se repiten los pasos 2 al 5 hasta completar el grupo de curvas correspondientes al valor D/h elegido como constante en el paso 1.

7. Se repiten los pasos 1 al 6 hasta obtener los restantes grupos de curvas cuyo parámetro sea en cada caso D/h constante.

Para seguir la secuela de cálculo antes indicada, se elaboró un programa de computadora y se obtuvieron los grupos de curvas como los que aparecen en las ilustraciones 4 y 5 que son por sí mismas explicativas para el caso particular del ángulo θ_0 elegido. Si éste cambia, la solución gráfica será distinta y en ese caso será necesaria de nuevo la solución mediante el algoritmo propuesto. Antes de utilizar el procedimiento en un nuevo diseño, se aplicó en la revisión del comportamiento de algunas marcas comerciales y se encontró que los únicos modelos que poseen diámetros similares a los necesarios fueron la Tlaloc núm. 555 y la Mercurio, ambas de la marca Ideal Standard.

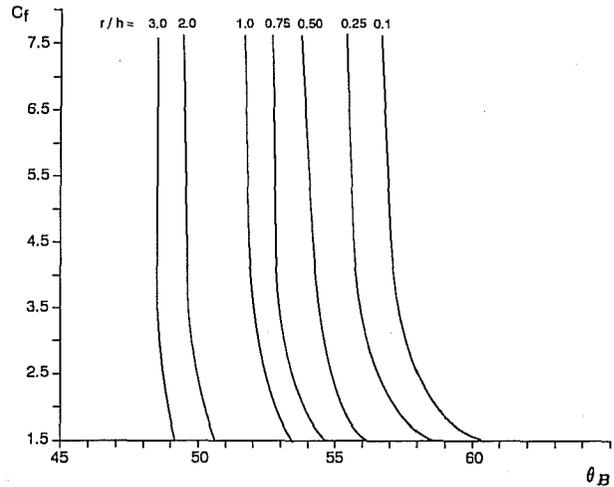
Ejemplo de diseño de una nueva regadera

Los resultados obtenidos se pueden aplicar de manera casi ilimitada al diseño de un conjunto de nuevos prototipos que satisfagan los requisitos previamente establecidos. Como ejemplo, se presenta a continuación el diseño de uno de ellos, con el único fin de ilustrar el procedimiento.

Parámetros de diseño:

- $\theta_0 = 45^\circ$
- $z_0 = 1.8$ m y $z_1 = 1.3, 1.4$ y 1.5 m. Por tanto, h varía entre 0.30 y 0.50 m. Se adopta la altura de caída promedio $h = 0.40$ m.
- Si $D = 0.30$ m es el diámetro estándar para la h media, entonces $D/h = 0.75$ sería el valor

5. Valores de θ_B contra C_f , para distintos valores del parámetro r/h , correspondiente a $D/H = 0.75$ y ángulo $\theta_0 = 45^\circ$

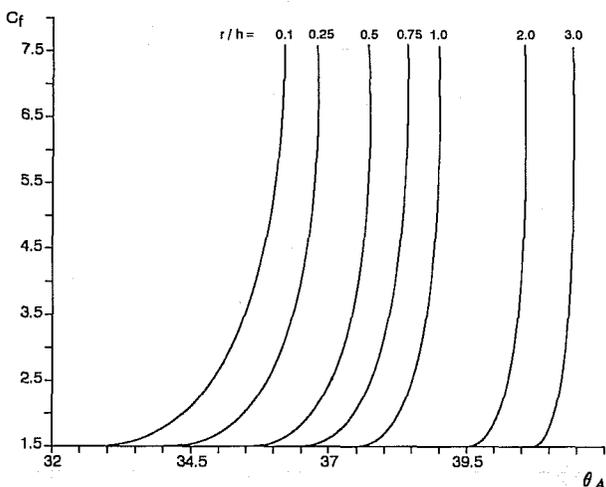


elegido de dicho parámetro, con validez para h comprendido entre 0.30 y 0.50 m, y para D entre 0.225 y 0.375 metros.

De acuerdo con esta selección, será suficiente calcular los valores de θ_A y θ_B para D/h igual a 0.75, a menos que cambie alguno de los parámetros previamente elegidos.

Las curvas de las ilustraciones 4 y 5 indican que a partir de cierto valor de C_f , θ_A y θ_B se vuelven independientes de dicho parámetro y sólo dependen de r/h . También al seleccionar una geometría de regadera $r/h =$ constante para cualquier condición de operación, esto es, cualquier valor de C_f , θ_A y θ_B cambian poco en el intervalo $1.5 \leq C_f \leq 5.5$. Los valores de θ_A y θ_B que se obtienen de los cálculos se presentan a continuación para $D/h = 0.75$, dos de r/h y los valores extremos de C_f .

4. Valores de θ_A contra C_f , para distintos valores del parámetro r/h , correspondiente a $D/H = 0.75$ y ángulo $\theta_0 = 45^\circ$



		$r/h=0.1$	$r/h=3$
$C_f=1.5$	θ_A	33.2°	40.8°
	θ_B	60.1°	49.0°
$C_f=5.5$	θ_A	36.2°	41.6°
	θ_B	56.8°	48.5°

Los valores que adquieren V , C_d y C_f ($k=1$) se obtuvieron para algunas regaderas comerciales, como lo muestra el cuadro 1.

1. Valores experimentales de Q , V_0 , C_d , y C_f de dos regaderas comerciales

p_0 (kg/cm ²)	C_0 (m ³ /s)	V_0 (m/s)	C_v	C_f
a. Regadera Helvex H-1000 $A_0 = 9.08116 \times 10^{-5} \text{ m}^2$				
0.1	1.44×10^{-4}	1.59	0.359	0.32
0.2	2.05×10^{-4}	2.26	0.339	0.81
0.3	2.45×10^{-4}	2.70	0.352	0.96
0.4	2.63×10^{-4}	2.90	0.327	1.04
0.5	2.91×10^{-4}	3.20	0.323	1.14
0.6	2.97×10^{-4}	3.27	0.301	1.17
b. Regadera Tláloc sencilla 545 $A_0 = 3.1897 \times 10^{-5} \text{ m}^2$				
0.1	1.26×10^{-4}	3.95	0.892	1.41
0.2	1.76×10^{-4}	5.52	0.880	1.97
0.3	2.22×10^{-4}	6.96	0.907	2.48
0.4	2.48×10^{-4}	7.78	0.878	2.78
0.5	2.68×10^{-4}	8.40	0.848	3.00
0.6	2.90×10^{-4}	9.09	0.838	3.24
0.7	3.19×10^{-4}	10.00	0.853	3.57
0.8	3.36×10^{-4}	10.53	0.840	3.76

En los cálculos de C_v en regaderas comerciales, las que ofrecen resultados más razonables son: la Tláloc sencilla 545 y la Mercurio, ya que C_v está entre 0.85 y 0.7, y para $p_0 = 0.3 \text{ kg/cm}^2$, C_f está entre 1.9 y 2.48, según el valor que adquiera C_v .

$C_f = 2$, para $p_0 = 0.3 \text{ kg/cm}^2$, corresponde más o menos a la Ideal Standard Mercurio que, para estas condiciones, descarga un volumen de 218 litros en un baño de 10 minutos. Esta dotación resulta exageradamente elevada por habitante, si se compara con la media.

La Tláloc sencilla, en cambio, da $C_f = 2.48$ con una descarga de 133 litros en un baño de 10 minutos. Esto parece todavía elevado, pero se podrían recomendar 100 litros en un baño de ese lapso, para lo cual habría que reducir el área de descarga. En estas condiciones, C_v podría aceptarse de 0.87, por lo que $C_f = 2.38$ como valor mínimo, toda vez que la regadera descargaría de todos modos volúmenes mayores si aumenta la presión y consecuentemente, si C_f se incrementa. Por tanto, $D/H = 0.75$, $C_f = 2.38$.

El radio de curvatura medido en la regadera Tláloc sencilla 545 de Ideal Standard resultó de 0.327 m. Adoptando este valor, ya probado en una regadera comercial, resulta que $r/h = 0.82$. Por tanto, de los cálculos $\theta_A = 37.9^\circ$, $\theta_B = 53.3^\circ$ y de aquí que $d = 0.0876 \text{ m}$ que debe ser la distancia entre el orificio más alto y el más bajo, como lo indica la ilustración 2.

El ángulo de inclinación del eje del chorro deberá ser de 45.6° . También, y a reserva de

afinarlo, el valor de C_v , se propone de 0.87 con: $q = 0.00016667 \text{ m}^3/\text{s}$ y $V_0 = 6.675 \text{ m/s}$. El área de orificios necesaria sería $A_0 = 0.00002497 \text{ m}^2$. Con orificios de 0.95 mm de diámetro, resultan 35 orificios, lo que parece adecuado. Los orificios deben repartirse de acuerdo con los ángulos θ_A y θ_B . La diferencia total entre ambos es de 15.4° y para la parte alta, 7.1° . El número de orificios arriba del eje de la regadera sería de 16, y abajo del eje sería de 19.

Debiera pensarse que al disminuir C_v se requiere de un mayor número de orificios. Toda vez que C_v quedaría sujeta a experimentación, podría proporcionarse una mayor área en un nuevo diseño de regadera.

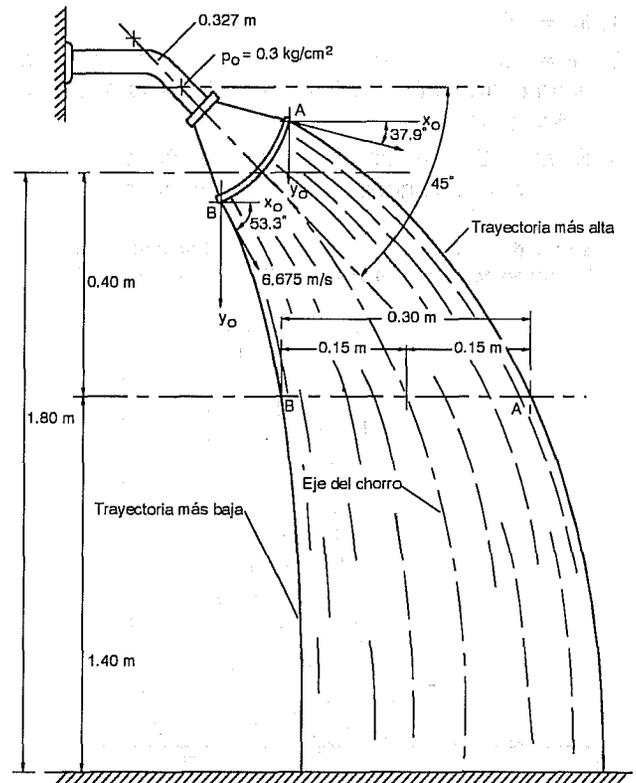
Las ilustraciones 6 y 7 muestran la geometría obtenida en el ejemplo numérico aquí presentado.

Diseño de nuevos prototipos

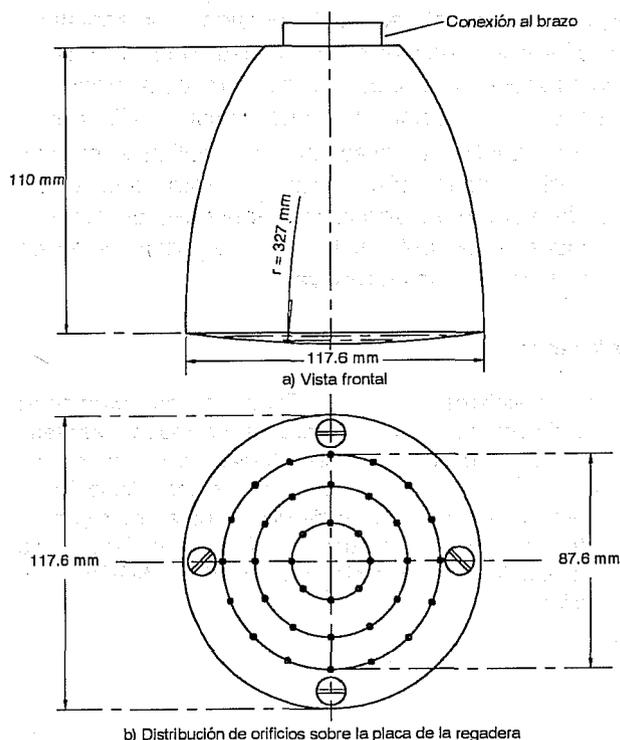
El modelo desarrollado se aplicó al diseño de un conjunto de nuevos prototipos, que una vez fabricados, permitieran iniciar un programa de experimentación para calibrar el modelo matemático y afinar gradualmente la geometría de los diseños, antes de proceder a su producción masiva.

Las suposiciones que se hicieron para llevar a

6. Magnitud de las variables utilizadas en el ejemplo



7. Geometría resultante del ejemplo en el diseño de regaderas



cabo el diseño de las regaderas, quedan sujetas a experimentación. Por lo tanto, es necesario probar las regaderas diseñadas en laboratorio y realizar las afinaciones en la geometría que se consideren pertinentes, hasta llegar a un diseño definitivo. Esto permitirá, en una tercera etapa, afinar la evaluación de los parámetros de diseño y con ello generar nuevos prototipos con intervalos de presión de servicio más reducidos, incluyendo los reductores de presión indispensables para disminuir el consumo.

Programa experimental

Es recomendable continuar con la experimentación, mediante un programa encaminado a satisfacer cinco objetivos básicos:

- Determinar el coeficiente k de corrección de la trayectoria de un chorro individual, en que se conozca el ángulo y velocidad de despegue. Esto podrá hacerse con la regadera instalada para distintas presiones y ángulos de despegue.
- Determinar experimentalmente los coeficientes de velocidad y de descarga de los orificios, a base de parámetros adimensionales que involucren la presión reinante antes de la descarga del orificio, su diámetro y el caudal. Es muy

probable que ambos coeficientes dependan del número de Reynolds en el orificio, lo cual sólo podrá estudiarse a partir de los resultados obtenidos para una regadera instalada a distintas presiones, diámetros de orificio y caudales.

- En teoría, con los resultados de los dos incisos anteriores debe ser posible obtener el coeficiente C_f , parámetro que no es más que otra forma de expresar el número de Euler. Sin embargo, es conveniente que a través de las ecuaciones del modelo matemático se encuentren resultados analíticos y se verifiquen experimentalmente.
- El diseño de los nuevos prototipos se hizo a partir de $\theta_0 = 45^\circ$, sin embargo, será necesario determinar lo que acontece en el laboratorio cuando dicho ángulo cambia de valor.
- El ensayo con los prototipos de las regaderas debe permitir probar globalmente el modelo matemático utilizado, de modo que se verifiquen las premisas originales.

No se puede pensar que el conjunto de prototipos constituya una versión final de una regadera patrón, que funcione con distintos valores de la presión de servicio. Los resultados que se obtengan de los primeros prototipos deben servir para un diseño más refinado de los mismos. El número de etapas de prueba de diseño-experimentación que se requiera, dependerá de diferentes factores, como son:

- Precisión en el maquinado de las piezas.
- Precisión en la instrumentación de laboratorio.
- Habilidad y pericia en las mediciones.
- Interpretación y conformación adecuadas de los parámetros finales de diseño.
- Diseño más refinado de los prototipos y calibración, en su caso, del modelo matemático utilizado, como consecuencia de la experimentación en el laboratorio.
- Desarrollo de los prototipos que requiera el mercado nacional, de acuerdo con los resultados teórico-experimentales que se obtengan del proceso.

Conclusiones y recomendaciones

Se ha planteado un modelo matemático, con algunos parámetros sujetos a experimentación. Su aplicación permite diseñar nuevos modelos de regaderas que se ajusten a requerimientos previamente establecidos. Estos pueden consistir en que el nuevo modelo de descarga de un chorro forme un cono de lluvia uniforme sobre un área circular, de un diámetro

escogido, a una altura de caída también especificada con anterioridad.

En los casos en que θ_A y θ_B tengan poca variación, aunque C_f cambie en un intervalo amplio, el diseño podrá adaptarse a cualquier presión en la regadera (dentro de los valores usuales), ya que el intervalo de C_f incluiría invariablemente al correspondiente de presión. Cuando esto no ocurra, la presión podrá escalonarse (y con ello C_f), de modo que se planeará cada diseño para que en cada caso se adapte a intervalos de presión más reducidos, resultando de ello un mayor número de prototipos con el mismo valor r/h .

La determinación experimental de los parámetros desconocidos que intervienen en un diseño, como son el coeficiente de descarga de los orificios y el de fricción en el aire, se haría inicialmente con algunos modelos comerciales, lo que permitiría la calibración paulatina del modelo. La calibración final tendría que hacerse con los nuevos prototipos diseñados como aquí se expone. Por estas razones, es recomendable efectuar un programa de desarrollo de nuevos prototipos, utilizando valores preliminares

de los parámetros desconocidos, cuya evaluación se haría experimentalmente, para afinarlos.

El modelo permite definir la geometría de la regadera para valores de la presión representativos de diferentes instalaciones típicas domiciliarias, o bien proponer prototipos útiles para baja presión y, en consecuencia, para un menor consumo de agua.

Para aquellas instalaciones domiciliarias en que la presión fuera muy grande, ésta podría ser abatida mediante dispositivos reductores de presión, instalados antes del cuello de la regadera, a fin de que el usuario no los remueva.

Referencias

- Sotttec Ingenieros, S. A. "Ejecución de programas experimentales para desarrollo de un mueble sanitario de bajo consumo y estrategias de control de calidad para la producción de estos dispositivos, establecimiento de bases de diseño para una regadera patrón de consumo reducido", Informe final presentado a la DGCOH, DDF, diciembre de 1989, México, D.F. México.