

CAPÍTULO 6

ESTRATEGIAS PARA SELECCIÓN DE DIÁMETROS DE TUBERÍAS Y MANGUERAS EN UN SISTEMA

Introducción

Herramientas de Diseño

Diferentes diseñadores han adoptado con amplitud algunos procedimientos y herramientas de diseño de sistemas de riego. Algunos ejemplos de herramientas incluyen:

1. “Reglas de cálculo” desarrolladas por varias compañías de fabricación de aspersores, tanto para laterales de goteo como de aspersión. Estas reglas de cálculo son usadas para encontrar la fricción a lo largo de una línea lateral con salidas de igual separación entre si y para un solo diámetro de tubería.
2. “Curvas de diseño” disponibles en muchas fábricas de mangueras y emisores. Estas curvas, encontradas generalmente en manuales técnicos, proporcionan al diseñador un estimativo de la pérdida por fricción a lo largo de una manguera de diámetro, separación entre emisores y presión de entrada dados.
3. Nomogramas de diseño como “Poly-Plot™” y “Tele-Plot™” para líneas subprincipales y laterales de varios diámetros, tales como los que pueden ser encontrados en Hardie Irrigation Microirrigation Design (Boswell, 1994).
4. Pequeños y numerosos programas de computadora, los cuales están disponibles para resolver la hidráulica de laterales de goteo y de aspersión.

Todas estas herramientas son excelentes y cada una tiene ventajas y desventajas. Este capítulo describe las estrategias de diseño, las cuales deben seleccionarse antes de usar esas herramientas.

Procedimientos de Diseño

Los procedimientos de diseño seleccionados por un diseñador indican la profundidad de entendimiento del diseñador en relación con conceptos tales como Uniformidad de Distribución (UD) y economía. Con frecuencia las herramientas serán las mismas para dos diseñadores; la forma como ellos las utilicen puede ser completamente diferente:

Antes de entrar en la discusión sobre cómo seleccionar apropiadamente los diámetros de las tuberías, conviene señalar varios puntos:

1. Un diseño hidráulico excelente debe estar acompañado de una disposición apropiada del sistema. Si los tubos están en el lugar equivocado, el sistema resultará muy costoso y difícil de manejar.

2. Una obsesión del diseñador por la hidráulica de las tuberías puede costarle el subestimar la importancia de la selección correcta del aspersor, de la separación entre aspersores, del sistema de filtrado, o de otros ingredientes esenciales. En otras palabras, la selección de diámetros es un elemento muy importante en el diseño, aunque no el único.

(Nota: los ítems 1 y 2 definen porqué el diseño de un sistema de riego no es simplemente un “diseño hidráulico”, el cual puede ser hecho por cualquier ingeniero hidráulico).

3. La uniformidad de distribución del sistema de riego (UD) consta de muchos elementos. Por ejemplo, la uniformidad de distribución (UD) de un sistema de riego por goteo/microaspersión es afectada por:
 - a. Diferencias de presión, las cuales causan diferencias de caudal.
 - b. Diferencias en tiempo por posición.
 - c. Obstrucción.
 - d. Variación de fabricación de los emisores.
 - e. Diferencias de temperatura entre emisores.
 - f. Drenaje desigual de las mangueras al suspenderse el riego.
 - g. Desgaste del emisor.

La selección de diámetros de la tubería afecta solamente el ítem (a).

4. La uniformidad de distribución del sistema (UD), anticipada, debe ser conocida siempre antes de diseñar el sistema de tubería y debe basarse sobre buenos estimativos de ingeniería.
5. El objetivo de instalar la mayoría de los sistemas de riego es el de desarrollar algún tipo de cultivo. Los sistemas que puedan entregar el agua uniformemente tienen un buen potencial de producir grandes cosechas y/o de obtener un crecimiento uniforme. Un análisis de la economía en el diseño debe incluir más que los costos de energía y del agua y los costos iniciales; también debe tener en cuenta el efecto de desuniformidad en la producción (agrícola) o en la apariencia del cultivo (paisaje).
6. Cada sistema de riego presurizado debe diseñarse con una estrategia bien definida para seleccionar los diámetros de toda la tubería. Esa estrategia debe siempre apuntar a un diseño económico y a una distribución uniforme del agua desde las salidas. Un diseñador que entienda claramente las estrategias de diseño de tuberías, sabe donde cortar esquinas con seguridad y cómo reducir costos, para obtener un sistema excelente.

Descripción de Sistemas de Tubería

Descripción Convencional

Los sistemas de tubería de riego son generalmente descritos como sistemas de ramales. Se dan nombres a los varios ramales tales como “principal”, subprincipal”, “múltiple” y “lateral”, como puede observarse en la Figura 22. Aunque hay diferencias entre diseñadores individuales, hay casi una aceptación universal de este tipo de descripción.

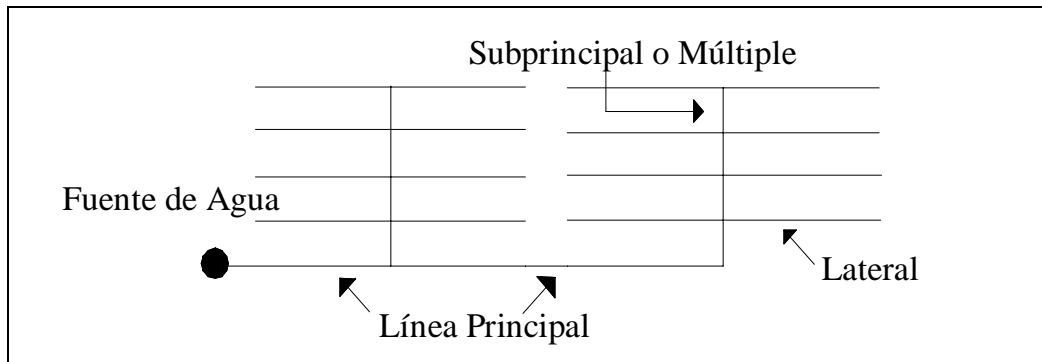


Figura 22. Disposición de un sistema de riego, el cual ilustra la clasificación convencional de los segmentos de la tubería.

Descripción Holística

Quizá el primer paso hacia el mejoramiento del diseño de líneas de tubería de sistemas de riego es tener una imagen reciente de cómo debe ser descrita la disposición de una tubería. Para fines de diseño, los conceptos de “línea principal” y de “línea subprincipal” deben ser sustituidos por una percepción de la disposición del sistema, más amplia y con orientación de diseño holístico.

La descripción de la disposición de un sistema de diseño holísticamente orientado de la Figura 23 difiere del de la Figura 22. Los componentes de la Figura 22 se denominan con base en su jerarquía relativa dentro de los ramales del sistema. Los componentes en la Figura 23 están clasificados con base en las estrategias de diseño.

La descripción se llama “holística” porque requiere que el diseñador adopte una estrategia integral de todo el sistema en lugar de utilizar la forma tradicional de diseñar un lateral independientemente de una línea subprincipal, y de diseñar una línea subprincipal independientemente de una línea principal.

Una clasificación de diseño holístico y su filosofía incorporan conocimiento a partir de dos ideas principales:

1. Uniformidad de Distribución (UD). Las líneas de tubería deben diseñarse de tal manera que las salidas (aspersores, emisores) a través de todo el sistema de riego no tengan más de una variación porcentual de caudal específica. En otras

palabras, aquellas aproximaciones de orden empírico comúnmente utilizadas en la industria del riego tales como “diseñar un lateral de tal manera que la pérdida de energía no sea mayor que el 20% de la presión promedio de operación” no son aceptadas en la actualidad porque:

- a. La pérdida por fricción aceptable en la línea lateral debe tener en cuenta el cambio en elevación.
- b. La afirmación no tiene en cuenta muchos otros factores los cuales ejercen influencia sobre la uniformidad de distribución del sistema.
- c. Un regador riega un campo o bloque completos y no únicamente un lateral simple. Por consiguiente, las diferencias de presión permisibles deben basarse en las diferencias entre la más alta y las más baja presiones de salida a través de todo el sistema.

- Conclusión: El criterio de selección de diámetros de tubería para algunas partes de un sistema de riego se basa en la obtención de una uniformidad de distribución deseable.

2. Economía y Presión Disponible. La diferentes partes de la disposición de un sistema de riego pueden no afectar la uniformidad de distribución de los caudales de salida. Para esos segmentos de tubería los diámetros deben seleccionarse para proveer el costo anual más bajo (incluyendo los costos inicial y de energía), además la selección de diámetros debe considerar el hecho de que en algunos sistemas la fuente de agua puede tener algún límite máximo en la disponibilidad de presión.

Camino Crítico

El “camino crítico” que muestra la Figura 23 se define simplemente como la ruta hidráulica hacia el punto más distante desde la fuente de agua (este punto es además el punto más alto en el sistema de riego). Desde luego, el punto más distante puede no ser el más alto. La camino crítico, por consiguiente, se define más correctamente como la ruta hidráulica que tiene el requerimiento de presión mayor desde la fuente de agua. Para fines de diseño, una vez que se haya determinado el camino crítico, es primordial que para ningún segmento aledaño se seleccione un diámetro tan pequeño que llegue a incrementar el requerimiento de presión de la fuente de agua más allá de la que necesita el camino crítico.

En el RP2 de la Figura 23 el caudal (Q) y la presión (P) son dictaminados por el sistema aguas abajo de este punto. Primero, diseñe la porción aguas abajo. Segundo, determine Q y P en el RP2. Luego diseñe el camino crítico para que se ajuste a estos Q y P bien sea: (a) usando algún tipo de norma tal como mantener la velocidad por debajo de 1,52 m/s (5 pies/s), o (b) por medio de un análisis económico.

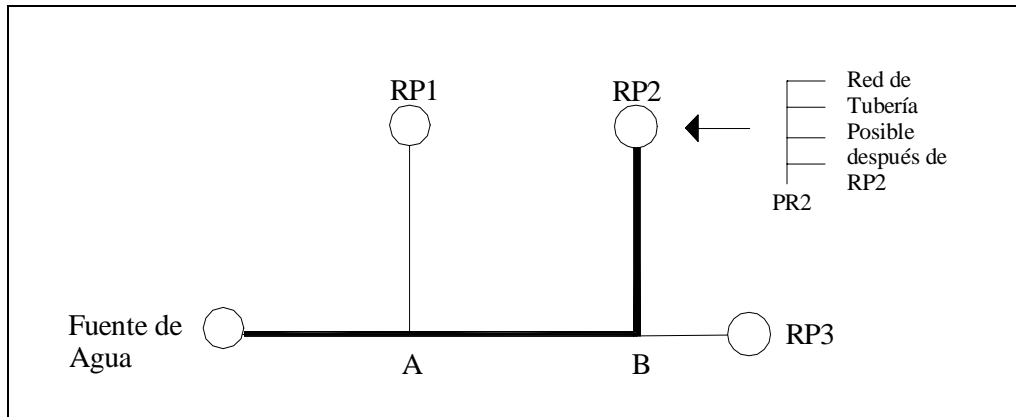


Figura 23. Disposición de un sistema de riego desde un punto de vista de diseño “holístico”. El camino, Fuente de Agua-A-B-RP2 es el “camino crítico”. Todos los puntos “RP tienen algún requerimiento mínimo de presión. (“RP” se refiere a cualquiera de los puntos RP1, RP2, o RP3).

La Tabla 13 muestra que los segmentos de tubería de riego pueden dividirse en dos grandes categorías:(1) aquellos que afectan la uniformidad de distribución del caudal (UDLPM) y (2) aquellos que no la afectan. Para aquellos que no afectan la UDLPM, hay dos designaciones posteriores: (a) aquellos en el camino crítico hidráulico y (b) aquellos al lado del camino crítico.

Ideas claves para diseño a partir de las Figuras 23 y 24:

1. Todas las diferencias de presión aguas abajo de los puntos “ RP_i ” afectarán la UDLPM.
2. La selección de diámetros aguas abajo de los puntos “ RP_i ” no afectará sustancialmente los requerimientos de presión en la fuente de agua.
3. El requerimiento de presión del sistema debe incluir una variación permisible en la presión más allá de los puntos “ RP_i ”, con base en las necesidades de UDLPM.

Tabla 13. Clasificación de diseño holístico para varios segmentos de tubería ilustrados en la Figura 23.

Segmento	Clasificación	Descripción
FA-A-B-RP2	Camino crítico	<ol style="list-style-type: none"> 1. La selección de diámetros <u>no</u> afectará la uniformidad de distribución del caudal del sistema. 2. El punto RP2 requiere la mayor presión en la FA para abastecer. En un caso muy simple, es el punto más alto y más distante. 3. La selección de los diámetros de tubería a lo largo de esta ruta determinará una porción significativa de los requerimientos de presión en la bomba.
A-RP1 o B-RP3	Fuera de el camino crítico	<ol style="list-style-type: none"> 1. La selección de diámetros <u>no</u> afectará la uniformidad de distribución del caudal del sistema.
	Aguas arriba de zonas de uniformidad	
Aguas abajo de RP _i	Zona de Uniformidad	<ol style="list-style-type: none"> 1. La selección de diámetros afectará la uniformidad de distribución del caudal del sistema. 2. Diferencia de presión permisible determinada por consideraciones de uniformidad de distribución.

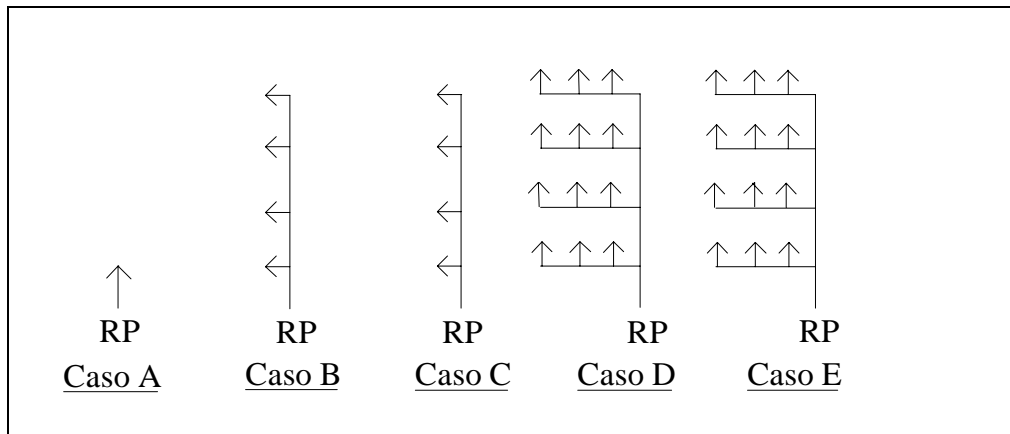


Figura 24. Zonas posibles aguas abajo de los puntos RP1, RP2 y RP3 de la Figura 23.

Tabla 14. Descripción de varios casos **aguas abajo** de “RPi”, como muestra la Figura 24. Esto incluye ejemplos para una gran gama de tipos de sistemas de riego.

Descripción de Caso	Situaciones Típicas
A Salida con control de flujo o regulador de presión.	<p>** Cada salida (aspersor o emisor) debe ser uno de los siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Emisores compensadores de presión. 2. Aspersor con boquilla de control de flujo o con base de control de flujo. 3. Aspersor con regulador de presión. “RP” representa una salida de estas.
B Lateral con salidas igualmente separadas. Tubo de 1 solo diámetro. Todas las salidas tienen el mismo tamaño de boquilla o de orificio. El lateral tiene una pendiente más o menos constante.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Manguera de goteo con un regulador de presión a la entrada de la manguera. 2. Lateral de aspersión bajo árboles con un regulador de presión en la cabecera del lateral. <p>Situaciones que caen dentro de esta categoría incluyen:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cualquier sistema con aspersores o emisores individuales con regulación. 2. Aspersores portátiles manualmente, a menos que haya un solo lateral.
C Lateral con varias salidas. El diámetro no es constante, la separación entre salidas no es igual, o las salidas tienen diferentes tamaños. El lateral puede ir pendiente arriba y pendiente abajo.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lateral permanente de aspersión bajo árboles con diámetros gradualmente menores. 2. Línea de tubería que abastece aspersores gigantes o cañones, con diferentes separaciones.
D. Combinación de subprincipal y varios laterales. Los laterales todos de 1 solo diámetro, igual separación entre salidas y salidas de igual tamaño. Los segmentos del subprincipal pueden no ser iguales en longitud.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sistema de aspersión portátil manualmente. 2. Sistema de aspersión de laterales sobre ruedas. 3. Bloque Goteo/Micro sin reguladores de presión en la entrada a los laterales. 4. Bloque de aspersión bajo árboles sin reguladores de presión en la entrada a los laterales. Laterales con 1 solo diámetro.
E Combinación de subprincipal y varios laterales. Los laterales pueden tener diámetros diferentes, separación variada entre salidas y salidas de diferentes caudales. La topografía puede ser ondulada.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bloque de aspersión o micro bajo árboles con lateral de diámetros gradualmente menores. Sin reguladores de presión en la entrada a los laterales. Sistema de aspersión para praderas con variados caudales y separación entre aspersores. 2.

Estrategias Posibles para la Selección de Diámetros de Tuberías

Las Tablas 15 y 16 enumeran nueve estrategias diferentes para la selección de diámetros de tubería (S1 - S9), las cuales dependen de la localización del segmento de tubería o bloque dentro del todo sistema. Estas estrategias conforman una

aproximación holística al diseño de sistemas de riego. Aunque ellas no cubren todas las situaciones de diseño posibles, si son una base para el diseño racional.

En el libro Sprinkle and Trickle Irrigation por Keller y Bliesner (1990) hay una excelente discusión sobre técnicas de selección económica de diámetros de tuberías.

Tabla 15. Estrategias de selección de diámetros de tuberías para usar aguas arriba de los puntos de regulación de presión, “RP_i” ilustrados en la Figura 23.

Segmento de Tubo	Presión en la Fuente de Agua	Estrategia	Breve Descripción de Estrategia
En el camino crítico	Fija	S1	Fricción y elevación no pueden exceder la presión abastecida menos la presión necesaria en la última salida, RP2.
	La bomba será adquirida	S2	Económica (costo anual más bajo)
		S3	o Norma de 1,52 m/s de velocidad
Ramal fuera del camino crítico (A-RP1 o B-RP3)	N/A	S4	Use toda la diferencia de presión disponible entre la RP _i y el camino crítico.

Tabla 16. Estrategias de selección de diámetros de tuberías para usar aguas abajo de los puntos de regulación de presión, “RP_i” ilustrados en la Figura 23.

Caso	Estrategia	Breve Descripción de Estrategia
A	S5	No hay segmentos de tubería. La selección de diámetros de tubería en todo el sistema no afectará la uniformidad de descarga, a menos que las presiones sean demasiado extremas para el ajuste apropiado de los reguladores automáticos.
B	S6	Diseño lateral clásico para varias salidas de igual separación. Una ecuación simple usualmente es suficiente para todo el diseño. Típico de las soluciones que ofrecen las “reglas de cálculo de aspersión”. Se debe diseñar para un cambio en presión permisible, teniendo en cuenta tanto fricción como ganancia por elevación. Para pendientes descendentes acentuadas y terrenos ondulados, el punto de presión mínima puede no ocurrir en el extremo final de la línea lateral.
C	S7	Los diámetros de tubería en esta zona son seleccionados, uno a la vez, por medio de una hoja de cálculo en lugar de hacerlo con solución de regla de cálculo. Los demás aspectos son iguales que para S6.
D	S8	Las diámetros de las líneas laterales se seleccionan con la estrategia S6 porque en esta situación parte del total de diferencia de presión permisible ocurrirá en la línea subprincipal. Los diámetros de la línea subprincipal se seleccionan con la estrategia S7.
E	S9	Los diámetros de la línea lateral de mayor longitud y más distante se seleccionan con la estrategia S7. El total de la diferencia de presión entre las salidas a lo largo de la distancia combinada lateral/subprincipal debe ser menor que la diferencia permisible en el sistema. Para todas las demás líneas laterales la selección de diámetros se hace de tal manera que todo el exceso de presión disponible sea utilizado.

Resumen de Estrategias de Regulación de Presión para Riego por Goteo/Microaspersión.

Las secciones previas permitieron observar que decidir sobre la adopción de una buena estrategia de regulación de presión es un asunto crítico. Las alternativas para riego por goteo/microaspersión pueden revisarse y ampliarse aquí. En primer término, recuerde que hay 3 “zonas” generales, las cuales requieren estrategias diferentes.

- A. Aguas arriba del punto de RP con la presión más baja a lo largo del camino crítico. Para esta zona en realidad tan solo hay una estrategia válida si la bomba suministra la presión: selección económica de diámetros de tubería. Sin embargo, a menudo los diseñadores hacen un análisis para la selección

económica de diámetros para las condiciones locales y así desarrollan “normas empíricas”, las cuales pueden ser usadas para condiciones limitadas. Una “norma empírica” típica es: “No exceda la velocidad de 1,22 m/s (*4 pies/s*)”.

B. Aguas arriba del punto de RP, pero fuera del camino crítico.

Los diámetros de tubería serán más pequeños que aquellos con el mismo caudal en el camino crítico. La estrategia consiste en consumir en fricción toda la presión en exceso disponible, en tanto que se asegure que el punto de RP en el extremo aguas abajo de esta sección de tubería tenga por lo menos la presión mínima requerida.

C. Aguas abajo del punto de RP.

La selección de diámetros está basada en la UD. Alguna máxima diferencia de presión disponible no puede ser excedida con el fin de mantener la UD deseada del sistema.

La Zona “C” anterior (aguas abajo del punto de RP) en sistemas de goteo/microaspersión tendrá típicamente 1 de 3 configuraciones posibles. Las 3 configuraciones se describen a continuación:

1. Emisores compensadores de presión (CP).

En teoría, los emisores CP deberían caer bajo la categoría de la zona “A”. Un emisor CP teóricamente descargará el mismo caudal independientemente de la presión del emisor. En la práctica, esto resulta más complicado debido a:

- a. Algunos emisores llamados “CP” en realidad no tienen un exponente de descarga de “0,0” en un rango grande de presión. Son llamados así con el único propósito de incrementar las ventas.
- b. Aún los mejores emisores CP tienen solamente un cierto rango de presiones en las cuales proporcionan una buena compensación de presión. Típicamente, sus descargas varían a presiones bajas (por debajo de 34,5 kPa - 69 kPa, aproximadamente *5 psi - 10 psi*) y a algunas presiones altas (dependiendo del fabricante). Una curva de descarga posible para un buen emisor CP puede ser como la que muestra la Figura 25. Conviene señalar que hay muchas formas de curvas para emisores CP. La curva ilustrada en la Figura 25 muestra un emisor CP para el cual no hay acción de CP al inicio, sino que más bien hay una acción de lavado por corto tiempo durante el encendido del sistema. A medida que la presión en el sistema (y por consiguiente en el emisor) se incrementa, la acción de CP entra en funcionamiento.

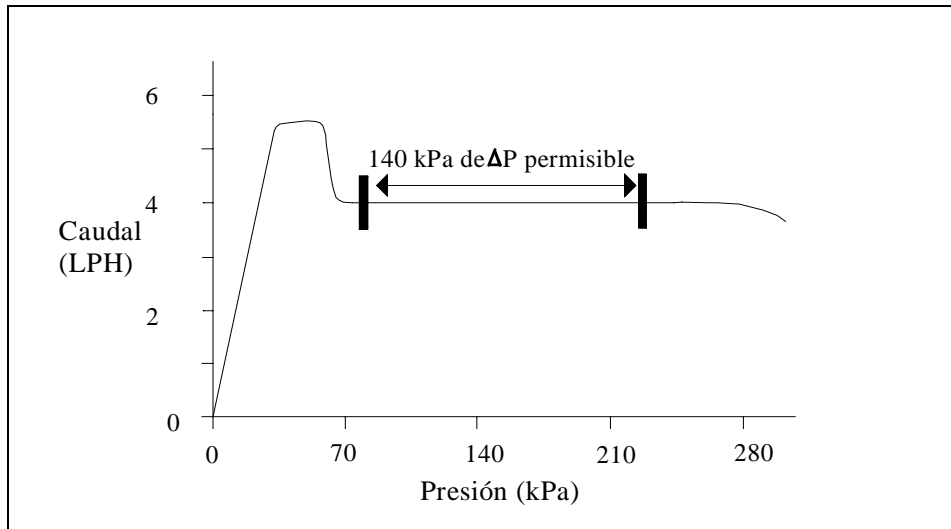


Figura 25. Curva hipotética del funcionamiento caudal/presión de un emisor CP.

- c. Un emisor CP puede retener sus capacidades de compensación a presiones muy altas. No obstante, cuando las presiones exceden algo así como 241 kPa (35 psi) los emisores tienden a salirse de la manguera, o la manguera tiende a salirse de sus uniones.

Al considerar los ítems (b) y (c) anteriores para un buen emisor compensador de presión, la mayoría de los diseñadores intentarán mantener las presiones en el emisor *a través de todo el campo* (no solo a lo largo de un lateral individual) en un rango entre 69 kPa y 241 kPa (10 psi - 35 psi). Esto significa que hay alrededor de 172 kPa (25 psi) de cambio de presión permisible. Si el terreno es tan inclinado que las presiones en el emisor no pueden mantenerse en este rango, los diseñadores a menudo usan reguladores de presión en las cabeceras de los bloques, o en las cabeceras de mangueras individuales, para mantener las presiones en los emisores dentro de este rango. En mangueras con pendientes extremas, algunos diseñadores instalarán pequeñas válvulas esféricas en la línea en las mangueras con pendiente descendente pronunciada para producir un quiebre de presión.

Comúnmente los ingenieros diseñan primero la manguera y determinan el cambio anticipado en presión que ocurrirá a lo largo de una manguera individual. Luego determinan el cambio en presión permisible a lo largo de los múltiples y de las líneas principales. Si por ejemplo, se decide que no puede haber más de 241 kPa (35 psi) de cambio en presión entre los emisores en el sistema y hay un cambio de presión de 69 kPa (10 psi) en presión a lo largo de una manguera individual, significa que la diferencia permisible en presión entre las entradas a las mangueras en el sistema es de 172 kPa (25 psi). Más adelante en este capítulo, se ilustra el procedimiento para seleccionar diámetros de secciones de tubería múltiple para un cambio permisible en presión, por medio de un ejemplo.

La UD del sistema para emisores CP debe tomar en consideración dos factores:

- i. La variación de fabricación de los emisores. Esta es una medida de la diferencia de caudal de un grupo de emisores, todos a la misma presión.
- ii. El hecho es que hay una variación en caudal con una variación en presión para la mayoría de los emisores CP. Esto es, los emisores CP no tienen un exponente de descarga exactamente igual a 0,0, aún cuando esto es lo que se muestra en la Figura 25.

Por consiguiente, la UD para un sistema con emisores CP (ignorando drenaje desparejo) es aproximadamente:

$$UD \text{ del Sistema} \cong UD_{cv} \times UD_{\Delta p}$$

$$\text{Donde: } UD_{cv} = 1 - \frac{1,27cv}{\sqrt{n}}$$

n = número de emisores/planta

cv = coeficiente de variación fabricación

Y

$$UD_{\Delta p} = 1 - \frac{Q_{ci}}{Q_{prom.}}$$

Q_{ci} = caudal “mínimo” debido a la variación de presión
(promedio del ¼ inferior de los caudales bajos)

$Q_{prom.}$ = caudal promedio

2. Regulador de presión en la cabecera de cada manguera.

Esta aproximación se basa completamente en la UD. Cuando se desprecia el drenaje desparejo y la posibilidad de separación desigual entre plantas (y por consiguiente tasas de aplicación desuniformes), los componentes de la UD de un sistema se limitan a:

El cv de fabricación, y

Diferencias de presión, causadas por:

- Diferencias de elevación
- Fricción
- Diferencias en presión de descarga entre reguladores de presión.

En general los programas de computadora para la hidráulica de mangueras tratan lo siguiente:

- El cv de fabricación, y
- Diferencias de presión, causadas por:
 - Diferencias de elevación en una manguera
 - Fricción en una manguera.

Si todos los reguladores de presión entregaran exactamente la misma presión,

$$UD_{\text{sistema}} = UD_{\text{una manguera}}$$

No obstante, puesto que los reguladores de presión (especialmente los de presión fija, los cuales comúnmente se usan a la entrada a las mangueras) no entregan la misma presión,

$$UD_{\text{sistema}} \neq UD_{\text{una manguera}}$$

Las diferencias entre presión de descarga entre los reguladores de presión fijos se deben a:

- Variabilidad de fabricación de los reguladores.
- Caudales diferentes (debido a longitudes de manguera diferentes).

El capítulo 7 contiene una explicación más detallada sobre reguladores de presión fijos.

En general, los diseñadores ignoran el impacto de “caudales diferentes”, usualmente porque demanda mucho más esfuerzo tener en cuenta cada elemento en detalle, o porque no están enterados de que el problema existe.

Sin embargo, muchos diseñadores tienen en cuenta la variabilidad de fabricación. Los fabricantes de reguladores de presión fijos afirman que sus reguladores tienen una precisión de “ $\pm 5\%$ ”. Para emisores con exponente de descarga de 0,5, la tolerancia de fluctuación de presión de $\pm 5\%$ de los reguladores se traduce en cerca de $\pm 2,5\%$ de variación de caudal cuando los reguladores se conectan a mangueras.

Esto puede determinarse por:

$$\frac{Q_{\text{min.}}}{Q_{\text{prom.}}} = \left[\frac{P_{\text{min.}}}{P_{\text{prom.}}} \right]^x$$

Por ejemplo, si el regulador tiene una precisión de $\pm 6\%$ de presión, entonces $P_{\text{min.}} = 0,94P_{\text{prom.}}$. Asumiendo que el exponente de descarga es 0,5,

$$\frac{Q_{\min.}}{Q_{\text{prom.}}} = \left[\frac{0,94 P_{\text{prom.}}}{P_{\text{prom.}}} \right]^{0,5} = 0,97 \cong UD_{ci} \text{ de los reguladores de presión}$$

Se podría argumentar si el $\pm 6\%$ de presión es una diferencia de presión máxima absoluta, en cuyo caso por consiguiente el uso de la UD del “1/4” inferior sería inapropiado. En términos prácticos, sin embargo, este procedimiento es suficiente. Los datos sobre rangos de tolerancia precisos muy rara vez son suministrados por los fabricantes; además, esta simplificación podría también justificarse afirmando que hay compensación por otros factores menores tales como diferentes longitudes de manguera (y por consiguiente diferentes presiones de descarga de los reguladores), pequeñas diferencias en fricción a través de las mallas de lavado de las mangueras, etc.

Por consiguiente, el procedimiento de diseño para obtener una deseable UD del sistema, para el caso de un regulador de presión en la cabecera de cada manguera, es como sigue:

- a. Defina la UD del sistema deseable.
- b. Calcule la UD_{ci} para reguladores de presión, como se ilustró arriba.
- c. Calcule la UD_{ci} mínima aceptable para una manguera, por medio de la siguiente ecuación:

$$UD_{ci} \text{ min. acept. para una manguera} = \frac{UD_{ci} \text{ deseable para sistema}}{UD \text{ para reg. de pres.}}$$

Por ejemplo, asuma:

UD_{ci} de diseño deseable para el sistema = 0,92, y

UD_{ci} para los reguladores de presión = 0,975

Entonces:

$$UD_{ci} \text{ mínima aceptable para una manguera} = 0,92/0,975 = 0,94$$

- d. Use un programa de hidráulica de manguera de goteo para obtener el diseño de manguera correcto (longitud y DI de la manguera), el cual proporcione una UD_{ci} de una manguera, mayor que 0,94.
- e. Seleccione el diámetro del múltiple utilizando bien sea el procedimiento “económico” o el de “máxima velocidad permisible”. **Los procedimientos para seleccionar el diámetro de un múltiple basados en la economía o en la velocidad máxima permisible, se explican en mayor detalle con un ejemplo más adelante en este capítulo.

Algunos diseñadores usan una variación del “regulador de presión fijo” en la forma de mangueras microtubo de longitudes variables para alimentar las

mangueras laterales. Estas se describen en mayor detalle en el siguiente capítulo, pero, no es necesario aclararlo, hay una variación en la presión de descarga con estos dispositivos.

Con microtubos, el procedimiento de diseño es similar a aquel con reguladores de presión fijos a la entrada de cada manguera. En lugar de variación de presión de un regulador hay variación de presión de un microtubo debido a inconsistencias en el microtubo, cálculos incorrectos de longitud, longitudes imprecisas del tubo y diferencias en presión a la entrada a cada bloque (desviación con respecto a la presión de entrada asumida). Todas estas discrepancias podrían resumirse como una precisión \pm en presión, la cual puede ser tratada como una precisión \pm en presión en el paso “c” anterior.

3. Regulador de presión en la cabecera de cada bloque; sin reguladores de presión ni emisores compensadores de presión aguas abajo. Si se ignora:

Desuniformidad debida a separaciones desiguales (o tiempos por posición) y
drenaje desparejo, y
Calibraciones desiguales de los reguladores de presión ajustables en la cabecera de cada bloque,

entonces:

$$UD_{\text{sistema}} = UD_{\text{bloque}} = UD_{\text{una manguera}} \times UD_{\text{múltiple}}$$

El procedimiento para selección de diámetros de tubería dentro de un bloque es por consiguiente,

- a. Defina la UD deseada para el sistema.
- b. Use un programa para mangueras para determinar la combinación apropiada de diámetro/longitud que obtenga una UD para una manguera, mejor que la UD deseada para el sistema. El programa para mangueras tendrá en cuenta el cv de fabricación, así como también las diferencias de presión a lo largo de la manguera.
- c. Use (a) y (b) para determinar la $UD_{\text{múltiple}}$ mínima permisible como:

$$UD_{\text{múltiple min. permisible}} = \frac{UD_{\text{sistema}}}{UD_{\text{una manguera}}}$$

- d. Determine la diferencia de presión permisible a lo largo del múltiple y seleccione el diámetro del múltiple o localícelo de tal manera que la variación de presión a lo largo del múltiple sea menor que la permisible. Esta variación de presión incluye el impacto tanto de la fricción como de los cambios de elevación.

$$\Delta P \text{ Permisible en el Múltiple} = 2 \left[P_{\text{prom.}} - P_{\text{prom.}} \left(\frac{UD_{\text{sistema}}}{UD_{\text{manguera}}} \right)^{1/x} \right]$$

Por ejemplo, para una presión de emisor promedio de 103,41 kPa (15 psi) y un exponente de descarga (x) de 0,5, la siguiente tabla proporciona valores de ΔP (kPa) a lo largo del múltiple.

UD _{ci} de manguera (incluye cv y ΔP)	Valores UD _{sistema} Deseados			
	0,92	0,90	0,875	0,85
0,99	28,3	35,9	45,5	54,5
0,98	24,8	32,4	42,1	51,0
0,97	20,7	29,0	38,6	48,3
0,96	23,4	24,8	35,2	44,8
0,95	13,1	21,3	31,0	41,4
0,94	8,96	17,2	27,6	37,9
0,93	4,14	13,1	23,4	33,8
0,92	0,00	8,96	20,0	30,3
0,91		4,83	15,9	26,2
0,90		0,00	11,0	22,1
0,87			9,65	

Por ejemplo, si la UD_{ci} es 0,95 y la UD_{ci} deseada para el sistema es 0,90, la diferencia de presión permisible máxima a lo largo del múltiple es 21,3 kPa.

**El procedimiento para selección de diámetros de un múltiple con base en el cambio de presión permisible se explica en detalle con un ejemplo más adelante en este capítulo.

El Procedimiento Más Antiguo para la Determinación de la Diferencia de Presión Permisible

Antes de que se hiciera extensivo el uso de programas de computadora para calcular la hidráulica de las mangueras y los valores de UD se utilizó un procedimiento manual para determinar diferencias de presión permisibles aguas abajo del punto de RP. Este procedimiento puede ser usado cuando no se tiene acceso al uso de una computadora. No obstante, es considerablemente menos preciso que los procedimientos descritos anteriormente en este capítulo. En algunos casos sobrestima la diferencia de presión permisible y, en otros casos, subestima tal diferencia.

El procedimiento antiguo se presenta aquí primordialmente con fines conceptuales. La fórmula usada para calcular la UD de un sistema nuevo (sin obstrucción de ninguna naturaleza) fue:

$$UD_{ci} = \left[1 - \frac{1,27cv}{\sqrt{n}} \right] \times \frac{q_{min.}}{q_{prom.}}$$

donde: n = número de emisores/planta

cv = coeficiente de variación de fabricación de los
emisores/rociadores

UD = la UD de diseño de un sistema nuevo

$\frac{q_{min.}}{q_{prom.}}$ = relación de caudales “mínimo” y “promedio” dentro del
debida a variaciones de **presión**.

Por ejemplo, asuma:

$$cv = 0,025$$

$$UD = 0,89$$

$$n = 2$$

Resolviendo para la variación de caudal permisible debida a diferencias
de presión,

$$\left(\frac{q_{min.}}{q_{prom.}} \right) = \frac{0,89}{1 - 1,27 \left(\frac{0,025}{\sqrt{2}} \right)}$$

$$= \frac{0,89}{1 - 0,0225}$$

$$= 0,89/0,977$$

$$= 0,91$$

La “UD debida a cv” (0,977) pudo también haber sido obtenida usando la Tabla 17.

Tabla 17. UD causada solamente por el cv de fabricación (UD_{cv}). (procedimiento antiguo).

cv	n, número de emisores por planta				
	1	2	3	4	6
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,02	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99
0,04	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98
0,06	0,92	0,95	0,96	0,96	0,97
0,08	0,90	0,93	0,94	0,95	0,96
0,1	0,87	0,91	0,93	0,94	0,95
0,12	0,85	0,89	0,91	0,92	0,94
0,15	0,81	0,87	0,89	0,90	0,92
0,2	0,75	0,82	0,85	0,87	0,90
0,25	0,68	0,78	0,82	0,84	0,87

La variación de presión permisible también se estimó usando la ecuación de descarga de un emisor estándar como se ilustra adelante. Este procedimiento tiene unos errores significativos si se intenta usar el “promedio del cuarto inferior” como el “mínimo; es esta una de las razones por las cuales se recomienda el uso de los procedimientos discutidos en las secciones previas. En cualquier circunstancia, la fórmula antiguamente utilizada fue:

$$\left(\frac{P_{\min.}}{P_{\text{prom.}}} \right) = \left(\frac{q_{\min.}}{q_{\text{prom.}}} \right)^{1/x}$$

Asuma que para este problema:

$$x = 0,6$$

$$P_{\text{prom.}} = 124 \text{ kPa } (18 \text{ psi})$$

Resolviendo,

$$\left(\frac{P_{\min.}}{P_{\text{prom.}}} \right) = 0,91^{1/0,6} = 0,85$$

$$P_{\min.} = 0,85 \times P_{\text{prom.}}$$

$$= 0,85 \times 124 \text{ kPa}$$

$$= 106 \text{ kPa } (15,4 \text{ psi})$$

Tradicionalmente, el cambio permisible en presión entre emisores a través del sistema se ha calculado como:

$$\begin{aligned} & 2 \times (P_{\text{prom.}} - P_{\text{min.}}) \\ &= 2 \times (124 - 106) \\ &= 36 \text{ kPa } (5,2 \text{ psi}) \end{aligned}$$

Sin embargo, puesto que la fricción no es una pérdida a tasa constante a lo largo de la longitud de la manguera y, además, puesto que la UD_{ci} en realidad no se calcula utilizando los valores de “mínimo absoluto”, una aproximación más correcta de la diferencia permisible en presión entre los emisores a través del sistema fue:

Diferencia Permisible en Presión = $2,5 \times (P_{\text{prom.}} - P_{\text{min.}})$
--

Por consiguiente, en este ejemplo:

$$\begin{aligned} \text{Diferencia Permisible en } P &\cong 2,5 \times (124 \text{ kPa} - 106 \text{ kPa}) \\ &\cong \underline{\underline{45 \text{ kPa}}} \text{ (6,5 psi)} \end{aligned}$$

El multiplicador que debe usarse puede variar entre 2,0 y 3,0, dependiendo de la topografía y de si los reguladores de presión son o no usados en cada manguera. El patrón de distribución de presión será diferente para cada situación. No obstante, el multiplicador 2,5 fue recomendado típicamente para la mayoría de las situaciones. Se debe hacer énfasis sobre el hecho de que esta diferencia permisible en presión debe cubrir todo el campo y no justamente una sola manguera.

Las Tablas 18 a 20 permitieron a los diseñadores estimar porcentajes permisibles de diferencia en presión, en base a la UD_{cv} , la UD_{sistema} deseada y el exponente de descarga del emisor (x). Sin embargo, a cambio de esta metodología, se recomienda usar los nuevos procedimientos expuestos.

Tabla 18. Diferencia permisible en presión (kPa) entre emisores en el sistema, expresada como un porcentaje de la presión promedio en el emisor. Sistema nuevo con **UD de 0,95**. (Procedimiento antiguo).

UD _{cv}	Exponente de descarga del emisor, x				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
0,99	24	20	17	14	13
0,98	19	15	13	11	10
0,97	13	10	9	7	6
0,96	6	5	4	4	3
0,95	0	0	0	0	0

Tabla 19. Diferencia permisible en presión (kPa) entre emisores en el sistema, expresada como un porcentaje de la presión promedio en el emisor. Sistema nuevo con **UD de 0,90**. (Procedimiento antiguo).

UD _{cv}	Exponente de descarga del emisor, x				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
0,99	53	43	37	32	28
0,98	48	39	33	29	25
0,97	43	35	29	25	22
0,96	37	30	25	22	19
0,95	32	26	22	19	16
0,94	26	21	17	15	13
0,93	20	16	13	11	10
0,92	13	11	9	8	7
0,91	7	5	5	4	3
0,90	0	0	0	0	0

Con el fin de hacer énfasis, se advierte que el procedimiento “antiguo” que acaba de exponerse es válido solo para sistemas extremadamente simples, típicamente con mangueras de corta longitud y sobre topografía plana. Los procedimientos descritos en las secciones anteriores son los que se recomiendan para diseños reales.

Tabla 20. Diferencia permisible en presión (kPa) entre emisores en el sistema, expresada como un porcentaje de la presión promedio en el emisor. Sistema nuevo con **UD de 0,85**. (Procedimiento antiguo).

UD _{cv}	Exponente de descarga del emisor, x				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
0,99	79	66	56	49	43
0,98	75	62	53	46	41
0,97	70	58	49	43	38
0,96	66	54	46	40	35
0,95	61	50	42	37	32
0,94	56	46	39	33	30
0,93	50	41	35	30	27
0,92	45	37	31	27	24
0,91	39	32	27	23	20
0,90	33	27	23	20	17

Selección de Diámetros de Múltiples - Método de la Diferencia de Presión Permisible

En las secciones previas se ha explicado que si el punto de regulación de presión (“RP”) está en el extremo aguas arriba del múltiple, habrá una diferencia de presión permisible en el múltiple. Conviene notar que para muchos diseñadores “múltiple” y “subprincipal” son sinónimos. El múltiple es el tubo que abastece directamente las mangueras laterales.

En la Tabla 21 se muestra la hoja de entradas/salidas para un programa simple de hoja de cálculo, el cual permite al diseñador determinar rápidamente los diámetros de los tubos del múltiple. El procedimiento para desarrollar y usar tal hoja de cálculo se describe como sigue:

1. La mayoría de los valores de entrada se indican en el lado izquierdo superior de la página.
2. Esta hoja de cálculo usa la salida de “UD de la Manguera” de un programa de computadora para mangueras. En este ejemplo, la UD de una Manguera es igual a 0,932.
3. El exponente de descarga del emisor y el UD deseado para el sistema se combinan con el “UD de la Manguera” para determinar el “Cambio de Presión Permisible”, el cual se calcula y encuentra en la parte central superior de la hoja de cálculo (8,27 kPa o 1,2 psi en este ejemplo). La ecuación, la cual se encuentra en la primera parte de este capítulo, es:

$$\Delta P \text{ Permisible en el Múltiple} = 2 \left[P_{\text{prom.}} - P_{\text{prom.}} \left(\frac{UD_{\text{sistema}}}{UD_{\text{manguera}}} \right)^{1/x} \right]$$

4. En el lado derecho superior de la hoja de cálculo se muestra una tabla de selección de diámetros de tubería. Los valores claves son el diámetro interior (DI) y los valores “C” de Hazen-Williams (H-W”C”). Estos valores se insertan automáticamente dentro de las columnas de cálculo hidráulico apropiadas cuando el diámetro nominal (Dia Nom) del tubo se inserte manualmente.
5. Las columnas en la TABLA DE CÁLCULOS HIDRÁULICOS se explican como sigue:

<u>Punto:</u>	El ejemplo tiene 31 puntos, sin incluir el punto “0”, el cual es un punto imaginario más allá del extremo aguas abajo del tubo (ver “P ar”) para fines de contabilización. Cada punto es el extremo de un segmento de tubo. El Punto #1 es el punto de descarga más lejano aguas abajo. Con 31 puntos, hay 30 segmentos. (“P ar” = Punto aguas arriba, “P ab” = Punto aguas abajo).
<u>Elevación:</u>	Elevación del punto, en m, en este ejemplo. Este es un valor relativo, con algún valor arbitrario asignado al Punto 1 desde la casilla de ENTRADAS. En esta hoja de cálculo en particular, todos los valores son calculados en base a valores de entrada de pendiente y de elevación inicial. Las elevaciones pueden ser insertadas manualmente si la pendiente no es constante a lo largo del múltiple.
<u>Punto P:</u>	Presión en el punto, en kPa, en este ejemplo. Los cálculos van hacia abajo en la página. El punto P es la presión calculada. $\text{Punto P} = \text{Punto anterior} + \Delta P$
<u>Punto Q:</u>	Caudal desde el múltiple en este punto. Este es un valor proveniente de la sección de ENTRADAS (Flujo Lateral). Se pueden insertar valores manualmente en esta columna si los caudales de las mangueras no son idénticos. La hoja de cálculo no hace ningún tipo de ajustes de caudal en base a la presión dentro de las mangueras individuales. La simplificación hidráulica es suficientemente precisa.
<u>Segmento Q ar:</u>	Caudal que pasa a través del segmento de tubo aguas arriba del punto. Este es el caudal que se usa para calcular la fricción del segmento de tubo. Este es un valor calculado. $\text{Segmento Q ar} = \text{Segmento Q ar anterior} + \text{Punto Q}$
<u>Dia. Nom.:</u>	Diámetro nominal del tubo. Este valor se ingresa manualmente, hilera por hilera, luego de que todas las hileras

tengan la ecuación dentro de ellas. Esta es la columna de “trabajo” de la hoja de cálculo.

DI del Tubo: Diámetro interior del tubo correspondiente al diámetro nominal y clasificación de presión de la Tabla de Selección de Diámetros de Tubería. Este valor se selecciona automáticamente una vez que el usuario inserta el “diámetro nominal” en la columna anterior.

Valor C: Valor “C” de Hazen-Williams, el cual también proviene automáticamente de la Tabla de Selección de Diámetros de Tubería una vez que se ingresa el diámetro nominal.

Tasa de H_f : Valor calculado utilizando la ecuación de Hazen-Williams para el segmento de tubo aguas arriba del punto. El caudal “m³/h” en la ecuación es el “Segmento Q ar”. La respuesta en este ejemplo es en kPa por cada 100 m de tubo.

$$\text{Tasa de } H_f = 1,11 \times 10^{12} \times \left(\frac{\text{m}^3/\text{h}}{C} \right)^{1,852} \times D^{-4,87}$$

Longitud del Segmento: Valor de entrada antes de empezar los cálculos.

H_f del Segmento: kPa de fricción en el segmento aguas arriba del punto.

$$H_f \text{ del Segmento} = (\text{Tasa de } H_f)(\text{Longitud del Segmento})/100$$

ΔElev (kPa): Cálculo. Cambio de elevación para ese segmento en particular, en kPa. Las elevaciones originales del punto en la hoja de cálculo están en m.

$$\Delta\text{Elev} = [(\text{Elev de este Punto}) - (\text{Elev del Punto ar})] \times 9,806$$

Un valor positivo indica que el segmento va pendiente arriba mientras va aguas abajo. Un valor negativo indica que el segmento va pendiente abajo mientras va aguas abajo.

ΔP (kPa): Valor calculado. Cambio en presión (kPa) en el segmento de tubo, desde el presente punto hasta el próximo punto aguas arriba.

$$\Delta P = \text{Elev.} + H_f \text{ Segmento}$$

P ar (kPa): Valor calculado. Presión en el siguiente punto aguas arriba.

$$P_{ar} = P_{punto} + \Delta P$$

Costo del segmento: Costo del segmento de tubo. Este valor puede calcularse automáticamente de una Tabla de Selección de Diámetros de Tubería expandida, la cual contenga además el costo de cada 100 m para cada diámetro nominal de tubo.

Para usar la anterior hoja de cálculo, siga estos pasos:

1. Un punto “0” imaginario se asigna como el punto inicial para los cálculos. La celda para “ P_{ar} (kPa)” se ocupa automáticamente con el valor de entrada de “Punto inicial P para el extremo ab”.
2. Las ecuaciones para el Punto 1 forman la espina dorsal, o ecuaciones centrales. Todas las ecuaciones, como se describió anteriormente, deben ser instaladas primero en esta fila.
3. Las ecuaciones de la fila del Punto 1 se copian y se pegan dentro de la fila del Punto 2. Las ecuaciones de la fila del Punto 2 deben ser ajustadas para utilizar valores de la fila del Punto 1. Por ejemplo, en la fila del Punto 1 algunos valores son llamados desde la sección de ENTRADA, mientras que los valores de la fila del Punto 2 son llamados desde la fila del Punto 1.
4. Las ecuaciones de la fila del Punto 2 se copian y se pegan en todas las filas subsiguientes, en tantas filas cuantas sean necesarias para el número de segmentos en la línea de tubería.
5. Los valores de (i) Longitudes de Segmento (ii) el Punto Q y (iii) la Elevación se ingresan manualmente, si no son idénticos a los valores de la Longitud del Segmento, al Punto Q y a la Elevación para la fila del Punto 1.

Ahora, para usar en realidad la hoja de cálculo de la Tabla 21, se siguen los pasos que se describen a continuación:

1. El Diám. Nom. se inserta manualmente en cada fila, uno a la vez, iniciando con el punto aguas abajo (Punto 1).
2. La hoja de cálculo evalúa la presión en el punto aguas arriba y también calcula las presiones Máxima y Mínima de los puntos hasta el momento. Estos valores se muestran en el centro superior de la hoja de cálculo. La diferencia entre estos dos valores (Max - Min) es el “Cambio Real de P ”. Puesto que se ingresan varios diámetros de tubo se observa qué tanto se aproxima el valor de “Cambio Real de P ” al “Cambio Permisible de P ”. La idea es seleccionar diámetros de tubo de tal manera que la “real” sea siempre menor que la “permisible”.
3. La asignación de diámetros de tubo continúa hasta que todos los diámetros hayan sido asignados a todos los segmentos, mientras se mantiene un “Cambio Real de P ” menor que el “cambio Permisible de P ”.
4. En este punto, se han seleccionado los diámetros apropiados de tubería dentro del cambio permisible en presión. Aún queda un paso. Cuando se corrió el

programa de la hidráulica de las mangueras laterales (antes de comenzar esta hoja de cálculo), se obtuvo una salida de la presión requerida a la entrada de la manguera, correspondiente al caudal promedio deseado por emisor. Esta presión de entrada a la manguera lateral es la “presión promedio del punto” deseada a lo largo del múltiple. Es un valor de entrada cerca al centro superior de la hoja de cálculo, el cual se denomina como “P. Promedio Deseada”.

En el lado inferior izquierdo de la sección de ENTRADAS se encuentra el “Punto Inicial para el extremo ab”. Este es el mismo valor que se inserta automáticamente en la fila del Punto “0”, bajo “P ar). Una vez obtenidos los diámetros apropiados para los segmentos, se ajusta manualmente el “P Inicial para el extremo ab” hasta que la “P prom. Real” (encontrada en el centro superior de la hoja de cálculo, justo debajo de la “P. Promedio Deseada”) iguale la “P. Promedio Deseada”.

En este ejemplo, se puede observar que una P aguas abajo de 109 kPa proporciona la presión de punto promedio correcta a 110 kPa. La presión de entrada al múltiple es 115 kPa. Este valor de 115 kPa se necesita para continuar los cálculos hasta la bomba. Al adicionar las pérdidas menores a 115 kPa, este valor también proporciona la presión de descarga de un regulador de presión en la cabecera del múltiple.

5. Al final de la porción central superior de la hoja de cálculo se encuentra el “Costo Total del Múltiple”. Hay muchas combinaciones de diámetros de 7,6 cm, 10,2 cm y 12,7 cm (3”, 4” y 5”) que hubieran podido estar dentro del cambio permisible de presión en este ejemplo. Estos resultados se pueden manipular con facilidad para determinar qué combinación es la más barata. En este ejemplo en particular no se hizo intento alguno de minimización del costo.
6. Debe observarse que en este ejemplo, el diámetro máximo de tubo es 12,70 cm (5”). Una aproximación empírica, para lavado adecuado de tuberías, es tener un diámetro mínimo de tubo no menor que la mitad del diámetro mayor en la tubería. El diámetro menor de tubo permitido con una entrada de 12,70 cm (5”) hubiera sido 6,4 cm (2,5”). No obstante, en este ejemplo el mínimo diámetro usado fue 7,6 cm (3”). El procedimiento consiste en hacer una selección inicial de los diámetros para todos los segmentos y luego observar el diámetro del segmento de entrada. Luego volver al extremo aguas abajo y ajustar los diámetros más pequeños de tal manera que el cambio de presión permanezca dentro del permisible y que la regla de la “mitad del diámetro” también se cumpla.

Tabla 21. Ejemplo de cálculos con una hoja de cálculo. Selección del diámetro del múltiple con base en el cambio permisible de presión.

Datos De Entrada					
Longitud Del Múltiple (pies):	600		Cambio Permissible de P: 1.2	psi	
Espaciamiento Del lateral (pies):	20		Cambio real de P: 1.0	psi	
Pendiente (%) (+ Si baja desde entrada):	0.5%		Máx. P	16.7	psi
Presión promedio del emisor (psi):	14.6		Mín. P	15.7	psi
DU Sistema:	0.91				
Du Manguera (Programa):	0.932		P Promedio Deseada:	16.0	psi
Exponente del emisor	0.55		P Prom. Real:	16.0	psi
Elevación en el final corriente abajo (pies)	300	(un número relativo)	P Recomendada abajo:	15.83	psi
Caudal en lateral (gpm)	12				
P Inicial para el extremo corriente abajo	15.83	psi	Costo Total Múltiple:	\$ 708	
Numero de salidas (calculado)	30				

Dia Nom.	DI	PR	Tipo	H-W "C"	\$/100'
1.5	1.72	200	IPS	145	34
2	2.193	160	IPS	146	43
2.5	2.655	160	IPS	147	63
3	3.284	125	IPS	148	75
4	4.28	100	IPS	149	99
5	5.291	100	IPS	150	152
6	6.301	100	IPS	150	215
8	8.355	100	IPS	150	363
10	10.41	100	IPS	150	565
12	12.13	100	IPS	150	795
15	14.55	100	PIP	150	1175

Tabla de Cálculos Hidráulicos:

Punto	Elevación (pies)	Punto P (psi)	Punto Q (GPM)	Arr. Segmento Q (GPM)	Dia Nom (pulgadas)	Tubería DI (pulgadas)	C Valor de H-W ecuación	Hf tasa (psi/100')	Segmento Longitud (ft)	Segmento Hf (psi)	ΔElev (psi)	ΔP (psi)	Arr. P (psi)	Costo del segmento
0	(0" Si es un punto imaginario en el extremo ab.)			0.0									15.83	
1	300.0	15.8	12	12.0	3.0	3.284	148	0.01	20	0.00	-0.043	-0.04	15.79	15.06
2	300.1	15.8	12	24.0	3.0	3.284	148	0.05	20	0.01	-0.043	-0.03	15.76	15.06
3	300.2	15.8	12	36.0	3.0	3.284	148	0.10	20	0.02	-0.043	-0.02	15.73	15.06
4	300.3	15.7	12	48.0	3.0	3.284	148	0.17	20	0.03	-0.043	-0.01	15.72	15.06
5	300.4	15.7	12	60.0	3.0	3.284	148	0.26	20	0.05	-0.043	0.01	15.73	15.06
6	300.5	15.7	12	72.0	4.0	4.28	149	0.10	20	0.02	-0.043	-0.02	15.71	19.86
7	300.6	15.7	12	84.0	4.0	4.28	149	0.13	20	0.03	-0.043	-0.02	15.69	19.86
8	300.7	15.7	12	96.0	4.0	4.28	149	0.17	20	0.03	-0.043	-0.01	15.68	19.86
9	300.8	15.7	12	108.0	4.0	4.28	149	0.21	20	0.04	-0.043	0.00	15.68	19.86
10	300.9	15.7	12	120.0	4.0	4.28	149	0.26	20	0.05	-0.043	0.01	15.69	19.86
11	301.0	15.7	12	132.0	4.0	4.28	149	0.31	20	0.06	-0.043	0.02	15.71	19.86
12	301.1	15.7	12	144.0	4.0	4.28	149	0.36	20	0.07	-0.043	0.03	15.74	19.86
13	301.2	15.7	12	156.0	4.0	4.28	149	0.42	20	0.08	-0.043	0.04	15.78	19.86
14	301.3	15.8	12	168.0	4.0	4.28	149	0.48	20	0.10	-0.043	0.05	15.83	19.86
15	301.4	15.8	12	180.0	4.0	4.28	149	0.54	20	0.11	-0.043	0.07	15.89	19.86
16	301.5	15.9	12	192.0	4.0	4.28	149	0.61	20	0.12	-0.043	0.08	15.97	19.86
17	301.6	16.0	12	204.0	4.0	4.28	149	0.68	20	0.14	-0.043	0.09	16.07	19.86
18	301.7	16.1	12	216.0	5.0	5.291	150	0.27	20	0.05	-0.043	0.01	16.08	30.36
19	301.8	16.1	12	228.0	5.0	5.291	150	0.30	20	0.06	-0.043	0.02	16.09	30.36
20	301.9	16.1	12	240.0	5.0	5.291	150	0.33	20	0.07	-0.043	0.02	16.11	30.36
21	302.0	16.1	12	252.0	5.0	5.291	150	0.36	20	0.07	-0.043	0.03	16.14	30.36
22	302.1	16.1	12	264.0	5.0	5.291	150	0.39	20	0.08	-0.043	0.03	16.18	30.36
23	302.2	16.2	12	276.0	5.0	5.291	150	0.42	20	0.08	-0.043	0.04	16.22	30.36
24	302.3	16.2	12	288.0	5.0	5.291	150	0.46	20	0.09	-0.043	0.05	16.26	30.36
25	302.4	16.3	12	300.0	5.0	5.291	150	0.49	20	0.10	-0.043	0.05	16.32	30.36
26	302.5	16.3	12	312.0	5.0	5.291	150	0.53	20	0.11	-0.043	0.06	16.38	30.36
27	302.6	16.4	12	324.0	5.0	5.291	150	0.57	20	0.11	-0.043	0.07	16.45	30.36
28	302.7	16.5	12	336.0	5.0	5.291	150	0.61	20	0.12	-0.043	0.08	16.53	30.36
29	302.8	16.5	12	348.0	5.0	5.291	150	0.65	20	0.13	-0.043	0.09	16.62	30.36
30	302.9	16.6	12	360.0	5.0	5.291	150	0.69	20	0.14	-0.043	0.09	16.71	30.36
Entrada	303.0	16.7												

Selección de Diámetros de Múltiples - Método de la Máxima Velocidad

Si el punto “RP” está en la cabecera de las mangueras laterales, la diferencia en presión a lo largo del múltiple no tendrá impacto alguno sobre la UD del sistema de riego. Como se mencionó en secciones previas de este capítulo, una de las técnicas de selección de diámetros de tuberías aguas arriba de los puntos “RP” es el uso de una regla empírica tal como la de “1,22 m/s (4 pies/s)”. Esto significa que el diseñador selecciona diámetros de tubo tan pequeños como sea posible, pero sin exceder la velocidad de 1,22 m/s en ningún segmento.

Las Tablas 22 y 23 dan caudales para varias velocidades en una selección típica de diámetros de tubería de PVC usados en sistemas de riego por goteo/microaspersión. La ecuación para determinar el caudal a cada velocidad es:

$$Q = KVD^2$$

donde: Q = caudal, LPS en el Sistema Internacional, *GPM en el Sistema Inglés.*

K = una constante, $78,54 \times 10^{-5}$ en el Sistema Internacional, *2,45 en el Sistema Inglés.*

V = velocidad, m/s (*pies/s*).

D = diámetro interior del tubo, mm (*pulgadas*).

Tabla 22. Caudales (LPS) a varias velocidades.

Diam. Nom., mm	Diam. Nom., <i>pulgadas</i>	Clasif. de Presión		D int., mm	Velocidad, m/s		
		kPa	<i>psi</i>		0,91	1,22	1,52
38	1,5	1379	200	44	1,4	1,8	2,3
51	2	1103	160	56	2,2	3,0	3,7
64	2,5	1103	160	67	3,2	4,4	5,4
76	3	862	125	83	5,0	6,7	8,3
102	4	689	100	109	8,4	11,3	14,1
127	5	689	100	134	12,9	17,3	21,6
152	6	689	100	160	18,3	24,5	30,6
203	8	689	100	212	32,2	43,1	53,7
254	10	689	100	265	50,0	67,0	83,5
305	12	689	100	308	67,8	90,9	113
381	15	689	100	370	97,7	131	163

Tabla 23. Caudales (*GPM*) a varias velocidades.

Dia. Nom., <i>Pulg.</i>	Clasif. de Presión	D int., <i>Pulg.</i>	Velocidad, <i>pies/s</i>					
			3	3,5	4	4,5	5	5,5
1,5	200	1,72	22	25	29	33	36	40
2	160	2,193	35	41	47	53	59	65
2,5	160	2,655	52	60	69	78	86	95
3	125	3,284	79	92	106	119	132	145
4	100	4,28	135	157	180	202	224	247
5	100	5,291	206	240	274	309	343	377
6	100	6,301	292	340	389	438	486	535
8	100	8,355	513	599	684	770	855	941
10	100	10,414	797	930	1063	1196	1329	1461
12	100	12,13	1081	1262	1442	1622	1802	1983
15	100	14,56	1558	1818	2078	2337	2597	2857

La Tabla 24 muestra una hoja de cálculo simple, la cual permite al diseñador seleccionar diámetros para segmentos de múltiple utilizando la regla de una velocidad máxima. A primera vista, parece idéntica a la Tabla 21, pero hay dos

diferencias significativas. No hay, desde luego, “diferencia de presión permisible máxima” para esta tabla. Los dos cambios significativos son:

1. La Tabla 24 puede resolver automáticamente para el diámetro correcto del tubo, con base en la regla de la máxima velocidad permisible. Esto puede hacerse con argumentos “SI” en la hoja de cálculo. Cada segmento de tubo puede ser resuelto en forma independiente. Esto contrasta con la Tabla 21, en la cual el diseñador debe verificar constantemente si la diferencia de presión permisible máxima ha sido excedida. Para la Tabla 21, si hay una gran diferencia de presión en una sección del múltiple, se restringe la libertad para escoger diámetros menores en otra sección. Con la Tabla 24, no hay tal relación entre segmentos de tubo.
2. En lugar de “retorcer” la presión aguas abajo para obtener una presión puntual promedio (como se hizo con la Tabla 21), el método de velocidad máxima requiere que se cumpla alguna presión mínima en todas partes a lo largo del múltiple. Esto es, cada entrada a una manguera requiere por lo menos alguna presión mínima. Después de seleccionar los diámetros de las tuberías el valor de ENTRADA de “Presión Inicial para el extremo ab” se ajusta hasta que la “P Mínima Real” iguale la “P Mínima Deseada”. Una vez que esto se haga, se puede examinar la presión de “ENTRADA” calculada para saber qué presión es requerida en el extremo aguas arriba del múltiple.

Desde luego, el mismo ajuste de diámetros de tubo aguas abajo debe hacerse para asegurar que el diámetro mínimo no sea menor que la mitad del diámetro del tubo aguas arriba. Esto se requiere para un buen lavado de los tubos inmediatamente después de la construcción, así como también periódicamente cada año o lapso de tiempo parecido.

Tabla 24. Ejemplo de cálculos con una hoja de cálculo. Selección de diámetros de múltiple con base en la regla de máxima velocidad.

Datos De Entrada		Cambio real de P (psi):		GPM						
				Dia. Nom.	DI	PR	Tipo	H-W "C"	\$/100'	at Vel.
Longitud Del Múltiple (pies):	600			1.5	1.72	200	IPS	145	34	36
Espaciamento Del Lateral (pies):	20			2	2.193	160	IPS	146	43	59
Pendiente (%) (+ Si Baja desde entrada):	0.5%			2.5	2.655	160	IPS	147	63	86
Presión promedio del emisor (psi)	14.6			3	3.284	125	IPS	148	75	132
Exponente del emisor	0.55			4	4.28	100	IPS	149	99	224
Elevación en el final corriente abajo(pies)	300			5	5.291	100	IPS	150	152	343
Caudal en lateral	12			6	6.301	100	IPS	150	215	486
P Inicial para el extremo corriente abajo	14.6			8	8.355	100	IPS	150	363	855
Numero de salidas (calculado)	30			10	10.414	100	IPS	150	565	1328
Máxima velocidad aceptable	5.0			12	12.128	100	IPS	150	795	1801
				15	14.55	100	PIP	150	1175	2592

Tabla de Cálculos Hidráulicos

Punto	Elevación (pies.)	Punto P (psi)	Punto Q (GPM)	Arr. Segmento Q (GPM)	Tubería DI (pulgadas)	C Valor H-W ecuación	Hf tasa (psi/100')	Segmento Longitud (pies)	Segmento Hf (psi)	ΔElev (psi)	ΔP (psi)	Arr. P (psi)	Costo del segmento
0	(0" is an imaginary point at d/s end)			0.0								14.60	
1	300.0	14.6	12	12.0	1.72	145	0.32	20	0.06	-0.043	0.02	14.62	6.72
2	300.1	14.6	12	24.0	1.72	145	1.16	20	0.23	-0.043	0.19	14.81	6.72
3	300.2	14.8	12	36.0	1.72	145	2.45	20	0.49	-0.043	0.45	15.26	6.72
4	300.3	15.3	12	48.0	2.193	146	1.26	20	0.25	-0.043	0.21	15.47	8.58
5	300.4	15.5	12	60.0	2.655	147	0.74	20	0.15	-0.043	0.11	15.57	12.56
6	300.5	15.6	12	72.0	2.655	147	1.04	20	0.21	-0.043	0.17	15.74	12.56
7	300.6	15.7	12	84.0	2.655	147	1.39	20	0.28	-0.043	0.23	15.97	12.56
8	300.7	16.0	12	96.0	3.284	148	0.62	20	0.12	-0.043	0.08	16.05	15.06
9	300.8	16.1	12	108.0	3.284	148	0.77	20	0.15	-0.043	0.11	16.16	15.06
10	300.9	16.2	12	120.0	3.284	148	0.94	20	0.19	-0.043	0.15	16.31	15.06
11	301.0	16.3	12	132.0	3.284	148	1.12	20	0.22	-0.043	0.18	16.49	15.06
12	301.1	16.5	12	144.0	4.28	149	0.36	20	0.07	-0.043	0.03	16.52	19.86
13	301.2	16.5	12	156.0	4.28	149	0.42	20	0.08	-0.043	0.04	16.56	19.86
14	301.3	16.6	12	168.0	4.28	149	0.48	20	0.10	-0.043	0.05	16.61	19.86
15	301.4	16.6	12	180.0	4.28	149	0.54	20	0.11	-0.043	0.07	16.68	19.86
16	301.5	16.7	12	192.0	4.28	149	0.61	20	0.12	-0.043	0.08	16.76	19.86
17	301.6	16.8	12	204.0	4.28	149	0.68	20	0.14	-0.043	0.09	16.85	19.86
18	301.7	16.8	12	216.0	4.28	149	0.76	20	0.15	-0.043	0.11	16.96	19.86
19	301.8	17.0	12	228.0	5.291	150	0.30	20	0.06	-0.043	0.02	16.97	30.36
20	301.9	17.0	12	240.0	5.291	150	0.33	20	0.07	-0.043	0.02	17.00	30.36
21	302.0	17.0	12	252.0	5.291	150	0.36	20	0.07	-0.043	0.03	17.02	30.36
22	302.1	17.0	12	264.0	5.291	150	0.39	20	0.08	-0.043	0.03	17.06	30.36
23	302.2	17.1	12	276.0	5.291	150	0.42	20	0.08	-0.043	0.04	17.10	30.36
24	302.3	17.1	12	288.0	5.291	150	0.46	20	0.09	-0.043	0.05	17.15	30.36
25	302.4	17.1	12	300.0	5.291	150	0.49	20	0.10	-0.043	0.05	17.20	30.36
26	302.5	17.2	12	312.0	5.291	150	0.53	20	0.11	-0.043	0.06	17.26	30.36
27	302.6	17.3	12	324.0	5.291	150	0.57	20	0.11	-0.043	0.07	17.33	30.36
28	302.7	17.3	12	336.0	5.291	150	0.61	20	0.12	-0.043	0.08	17.41	30.36
29	302.8	17.4	12	348.0	6.301	150	0.28	20	0.06	-0.043	0.01	17.42	43.06
30	302.9	17.4	12	360.0	6.301	150	0.29	20	0.06	-0.043	0.02	17.44	43.06
Entrada	303.0	17.4											

Selección de Diámetros de Múltiples y de Líneas Principales - Método de la Selección Económica de Diámetros de Tuberías

Agua arriba del punto “RP”, a lo largo del camino crítico se debe usar, bien sea la técnica de selección de diámetros por “velocidad máxima”, o bien la técnica de la “selección económica de diámetros”. Existen técnicas de solución directa para seleccionar diámetros económicamente para cada segmento de tubo. Sin embargo, la explicación de las técnicas de solución directa está más allá de la esfera de este libro. Para fines prácticos, los autores recomiendan seguir los pasos que a continuación se describen para seleccionar los diámetros de todos los segmentos aguas arriba de los puntos “RP”:

1. Seleccione los diámetros de las tuberías y válvulas aguas arriba de los puntos “RP” usando la “velocidad máxima” apropiada en el camino crítico y “quiebre el exceso de presión” en los segmentos de tubería que estén fuera del camino crítico, pero aguas arriba de otros “puntos RP”.

2. Repita el procedimiento de selección usando otra “velocidad máxima”. Por ejemplo, si se usó primero una velocidad máxima de 1,52 m/s (*5 pies/s*), repita el diseño usando una velocidad máxima de 1,22 m/s (*4 pies/s*).
3. Repita de nuevo el procedimiento de selección de diámetros, utilizando aún otra velocidad, tal como 0,91 m/s (*3 pies/s*).

Los pasos 1 - 3 se refieren a la selección de diámetros de todas las líneas de tubería aguas arriba de todos los puntos RP en el sistema. Para cada uno de los diseños, se debe calcular el precio total de compra, más la presión total en la bomba (aunque se podría en realidad usar solo la presión de descarga de la bomba para comparación). El que sigue es el paso final:

4. Use un análisis económico para comparar los costos anualizados que resulten de los 3 diseños. Esto proporcionará una guía sobre cuál es la mejor “velocidad máxima” que se debe utilizar. Por ejemplo, puede resultar que en alguna áreas una velocidad máxima de 1,52 m/s (*5 pies/s*) sea la más económica. En otra área con muchas más horas de bombeo por año, la velocidad óptima económica que debe usarse para diseños, puede ser del orden de 1,07 m/s (*3,5 pies/s*).

La discusión que sigue describe un concepto general de un análisis económico y luego proporciona un ejemplo para comparación.

Para un análisis económico simple de un diseño, hay dos tipos de costos:

- El precio de compra.
- Los costos anuales de energía y agua.

Un precio de compra bajo puede ser el resultado de usar un valor alto de máxima velocidad (por ejemplo, 1,52 m/s (*5 pies/s*)). Sin embargo, los diámetros más pequeños requerirán una mayor presión en la bomba para vencer la fricción incrementada. De igual manera, un sistema con diámetros de tubería mayores tendrá un mayor costo inicial, pero tendrá un costo de bombeo más bajo. Para comparar los dos sistemas, todos los costos deben expresarse sobre las mismas bases. Típicamente, esto se hace convirtiendo primero los precios de compra a un costo anual equivalente. Este costo anualizado se adiciona entonces a los costos anuales de energía y agua. El ejemplo que se ilustrará más adelante asume que todos los sistemas tienen la misma UD y por consiguiente los costos de agua serán iguales.

Se puede convertir el precio inicial de compra en un costo anual determinando cuánto se debería pagar anualmente a un banco si la compra se hubiera hecho por medio de un préstamo. El préstamo tendría una cierta tasa de interés y ciertos años de vida.

La fórmula para convertir un precio inicial en costo anual es:

$$\text{Costo Anual} = (\text{Precio Inicial}) \times (\text{Factor de Recuperación de Capital})$$

$$= \text{Precio Inicial} \times \text{FRC}$$

La fórmula para el Factor de Recuperación de Capital (FRC) es:

$$\text{FRC} = \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1}$$

donde: i = tasa de interés expresada en forma decimal. Por ejemplo, 0,05 para una tasa de interés de 5%.
 n = años de vida de la inversión.

La Tabla 25 proporciona valores de FRC para tasas típicas de interés y años de vida.

Tabla 25. Valores de Factor de Recuperación de Capital.

Años de vida	Tasa de interés (%/100)									
	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13
1	1,040	1,050	1,060	1,070	1,080	1,090	1,100	1,110	1,120	1,130
2	0,530	0,538	0,545	0,553	0,561	0,568	0,576	0,584	0,592	0,599
3	0,360	0,367	0,374	0,381	0,388	0,395	0,402	0,409	0,416	0,424
4	0,275	0,282	0,289	0,295	0,302	0,309	0,315	0,322	0,329	0,336
5	0,225	0,231	0,237	0,244	0,250	0,257	0,264	0,271	0,277	0,284
6	0,191	0,197	0,203	0,210	0,216	0,223	0,230	0,236	0,243	0,250
7	0,167	0,173	0,179	0,186	0,192	0,199	0,205	0,212	0,219	0,226
8	0,149	0,155	0,161	0,167	0,174	0,181	0,187	0,194	0,201	0,208
9	0,134	0,141	0,147	0,153	0,160	0,167	0,174	0,181	0,188	0,195
10	0,123	0,130	0,136	0,142	0,149	0,156	0,163	0,170	0,177	0,184
11	0,114	0,120	0,127	0,133	0,140	0,147	0,154	0,161	0,168	0,176
12	0,107	0,113	0,119	0,126	0,133	0,140	0,147	0,154	0,161	0,169
13	0,100	0,106	0,113	0,120	0,127	0,134	0,141	0,148	0,156	0,163
14	0,095	0,101	0,108	0,114	0,121	0,128	0,136	0,143	0,151	0,159
15	0,090	0,096	0,103	0,110	0,117	0,124	0,131	0,139	0,147	0,155
16	0,086	0,092	0,099	0,106	0,113	0,120	0,128	0,136	0,143	0,151
17	0,082	0,089	0,095	0,102	0,110	0,117	0,125	0,132	0,140	0,149
18	0,079	0,086	0,092	0,099	0,107	0,114	0,122	0,130	0,138	0,146
19	0,076	0,083	0,090	0,097	0,104	0,112	0,120	0,128	0,136	0,144
20	0,074	0,080	0,087	0,094	0,102	0,110	0,117	0,126	0,134	0,142

Por ejemplo, asuma un precio de compra inicial de \$50.000 US dólares. La tasa de interés es 10% (0,10 en la Tabla 25) y los años de vida de la inversión son 15. Encuentre el costo anual para adquirir el sistema.

Primero, el FRC de la Tabla 25 es 0,131

$$\text{Precio de compra anualizado} = 0,131 \times \$50.000$$

$$= \$6.550$$

El siguiente paso es calcular el costo de energía anualizado.

La fórmula pertinente es:

$$Kw = \frac{P \times Q}{C \times (\text{Eficiencia en la Planta de Bombeo})}$$

donde: Kw = Kilovatios requeridos para un caudal y una presión específicos.

P = Presión, kPa (*psi*).

Q = Caudal de la bomba, LPS (*GPM*).

C = Constante para conversión de unidades, 10 para el Sistema Internacional (*23 para el Sistema Inglés*).

Eficiencia de la Planta de Bombeo = Eficiencia total de la planta, incluyendo rodamientos, motor, e impulsores; expresada como un %.

$$\text{Kilovatio-Horas} = Kw-h$$

$$= (Kw) \times (\text{horas de operación de la bomba por año}).$$

$$\text{Costo de bombeo anual} = (\$/Kw-h) \times (Kw-h)$$

Por ejemplo, asuma el sistema siguiente:

Condiciones: Presión total de bombeo = 241 kPa (*35 psi*)

Costo de energía = \$0,10/(Kw-h)

Eficiencia de la Planta de Bombeo = 80%

Caudal = 126,2 LPS (*2.000 GPM*)

Horas de operación anual estimadas = 1.800

Precio de compra = \$50.000 US dólares

Tasa de interés = 10%

Años de vida de la Inversión = 15

Encuentre: El costo anualizado para comprar el sistema y para pagar la energía.

Fórmulas: Las anteriormente vistas

Solución: El precio de compra anualizado se calculó anteriormente como:

$$\text{Compra anualizada} = \$6.550$$

$$K_w = \frac{(241 \text{ kPa}) \times 126,2 \text{ LPS}}{10 \times 80\%} = 38,0 \text{ Kw}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de energía anual} &= (38,06 \text{ Kw})(1800 \text{ h})[\$0,10/(\text{Kwh})] \\ &= \$6.850 \end{aligned}$$

Costo Combinado Anual por Compra y por Operación

$$\begin{aligned} &= (\text{Energía anual}) + (\text{Compra anual}) \\ &= \$6.850 + \$6.550 \\ &= \$13.400 \end{aligned}$$

A manera de otro ejemplo, compare los costos anuales por compra y operación de 3 sistemas y seleccione el sistema de menor costo. El sistema anteriormente descrito es el sistema “A”. Los otros 2 sistemas tienen la misma eficiencia de planta de bombeo, caudal y horas de operación. Las únicas diferencias son el costo inicial y la presión total de bombeo.

El sistema “B” tiene un precio de compra de \$55.000 y una presión de bombeo de 276 kPa (40 psi).

El sistema “C” tiene un precio de compra de \$58.000 y una presión de bombeo de 310 kPa (45 psi).

La tabla siguiente muestra los costos anualizados de los 3 sistemas. Se puede ver que el sistema con los costos combinados, compra y operación, más bajos es el sistema “A”. Si se cambiaran los costos de energía, las horas de operación, la tasa de interés, o los años de vida, cualquiera de los dos sistemas, el “B” o el “C”, podría ser el más económico.

Sistema	Precio de Compra, \$	Presión, kPa	Precio de Compra Anualizado, \$	Costo de Energía Anual, \$	Costo Total Compra y Operación, \$
A	50.000	241,30	6.550	6.850	13.400
B	55.000	275,77	7.205	7.828	15.033
C	58.000	310,24	7.598	8.807	16.405

Este mismo análisis puede ser usado para comparar válvulas, filtros y otros componentes de un sistema. Para los componentes se toma la fricción a través del mismo como la “Presión” y el costo inicial del componente como el Precio de Compra.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco.)