

VI Diseño del equipo

Es de suma importancia en el diseño y operación de un sistema de riego el concepto de infiltración de agua en el suelo, que se define como el proceso por medio del cual el agua pasa a través de la superficie y se distribuye en los estratos del suelo. El proyecto de un riego por aspersión pasa por la realización de un diseño agronómico y, a partir de él, de un diseño hidráulico. Con el primero se lleva a cabo el planteamiento general del sistema en base a los condicionantes del medio (suelo, cultivos, clima, parcelación, etc.), con el objetivo de conseguir un reparto uniforme del agua y que ésta se infiltre donde cae. Con el segundo se pretende realizar el dimensionamiento más económico de la red de tuberías, con la pretensión de alcanzar unas condiciones semejantes de presión en los emisores, para tratar de conseguir un reparto de agua uniforme.

VI.1 Determinación del tipo de pivote

Es necesario seleccionar el tipo de sistema de riego entre las múltiples opciones disponibles. Es posible seleccionar más de dos opciones y la elección dependerá de los factores siguientes:

- Disponibilidad de los recursos materiales y humanos
- Inventario de partes y refacciones
- Servicio y mantenimiento
- Distancia del proveedor
- Inversión inicial

VI.2 Dimensionamiento geométrico

Las variables geométricas usadas en la descripción del diseño de un sistema de riego son:
El área base cubierta por un lateral

$$A_b = \pi R^2$$

Donde
R es el radio efectivo de mojado del paquete de aspersores alimentados por el lateral de longitud L.

El radio efectivo de mojado R está dado por:

$$R = L + r_e$$

Donde L es la longitud del lateral definida por la distancia del pivote al último aspersor o cañón
 r_e es el radio de mojado efectivo del cañón final o los últimos aspersores que mojan fuera del radio L

VI.3 Diseño hidráulico del sistema

Para el diseño del sistema se requiere determinar la selección del diámetro del equipo, la presión hidrostática y las pérdidas por fricción.

VI.3.1 Selección del diámetro del equipo

El diámetro del equipo dependerá del gasto requerido para el área por regar y por ende de la longitud de la tubería. A menor diámetro y mayor longitud de tubería, mayor es la superficie de fricción y en consecuencia mayor es la disminución de la presión. A mayor pérdida de presión, mayores son los costos energéticos para producir la presión requerida por el equipo de bombeo y mantener la presión de operación en los puntos de emisión.

El diámetro de la tubería lateral del pivote central se selecciona utilizando la regla de que las pérdidas de carga por fricción no deben exceder el 20% de la carga de operación del aspersor, con el fin de que las variaciones del gasto en el primer y último aspersor no sobrepasen el 10%

En la tabla siguiente se presenta los diámetros nominales e internos de las tuberías más usadas en pivotes centrales.

Tuberías mas usadas en pivotes centrales		
Diámetro en pulgadas		Espesor de la pared en pulgadas
Nominal	Interno	
5 9/16	5.318	0.25
6	5.755	0.25
6 5/8	6.375	0.25
6	7.755	0.25
8 5/8	8.375	0.25
10	9.755	0.25

VI.3.2 Presión hidrostática

La pendiente de la línea de energía en cualquier punto r a lo largo del lateral se puede estimar como:

$$\frac{d}{dr} \left(h + \frac{v^2}{2g} + z \right) = \frac{dE}{dr} = S_r$$

Donde:

h es la carga de presión, $v^2/2g$ es la carga de velocidad y z la elevación del punto de análisis e, dr es la distancia elemental en la dirección de la tubería.

La pendiente del terreno es negativa a favor de la gravedad (descendente) y positiva en caso contrario (ascendente). Las pendientes de la línea de energía y carga de velocidad son negativas en la dirección del flujo.

Si se parte de la hipótesis de que el terreno tiene una pendiente uniforme, se tiene:

$$dh = S_f dr - S_v dr - S_o dr$$

$$h_{r_2} - h_{r_1} = S_f dr - S_v dr - S_o dr$$

La ecuación anterior permite estimar el cambio de presión entre dos puntos (Γ_1 y Γ_2), una vez que se conocen las pendientes de la línea de energía, carga de velocidades y del terreno (S_f, S_v y S_0)

VI.3.3 Pérdidas por fricción.

La pérdida por fricción es la disminución en la presión del agua al fluir en una tubería y producirse fricción entre la pared de la tubería y el líquido.

La pendiente de la línea de energía S_f en un punto r del lateral se puede representar en su forma general como:

$$S_f = -K \frac{Q_r^m}{D^n} = -K \frac{Q_o^m}{D^n} \left(\frac{Q_r}{Q_o} \right)^m$$

Donde K es un coeficiente que integra las unidades y el coeficiente de rugosidad de la tubería, D es el diámetro interno, m y n son los exponentes de velocidad y diámetro de la ecuación de pérdida de carga por fricción usada en los cálculos. Generalmente n se aproxima por $m+1$. La pendiente S_f es siempre negativa ya que disminuye en el sentido de flujo. En consecuencia, la pérdida de carga del lateral puede estimarse como:

$$h_f = \int S_f dr = -K \frac{Q_o^m}{D^n} \int_0^R \left(\frac{Q_r}{Q_o} \right)^m dr = -K \frac{Q_o^m}{D^n} \int_0^R \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^m dr = -K \frac{Q_o^m}{D^n} R \int_0^R \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^m \frac{dr}{R}$$

$$h_f = -K \frac{Q_o^m}{D^n} R \int_0^R \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^m \frac{dr}{R} = h_f \int_0^R \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^m \frac{dr}{R}$$

Definiendo h_f como la pérdida de carga de una lateral sin salidas múltiples, se tiene:

Donde

$$h_f = -KR \frac{Q_o^m}{D^n}$$

Para estimar la integral se utiliza la función beta

$$B(z, w) = \int_0^1 t^{z-1} (1-t)^{w-1} dt = \frac{\Gamma(z)\Gamma(w)}{\Gamma(z+w)}$$

donde $\Gamma(x)$ es la función Gamma.

Para expresar la ecuación de pérdida de carga por función en la forma de la función beta, es necesario introducir una variable auxiliar $u=r/R$ en dicha ecuación con $du= d(r/R) = dr/R$, entonces

$$h_f = h_F \int_0^1 (1-u^2)^m du$$

Reescribiendo la ecuación:

$$h_f = h_F \int_0^1 (1-u^2)^m du = h_F \frac{1}{2} \int_0^1 r^{-1} (1-u^2)^m 2r dr$$

asumiendo $t=r$ y $z=1/2$, la ecuación anterior obtiene la forma de la función Beta, con $z=1/2$ y $w=m+1$:

$$h_f = \frac{h_F}{2} \int_0^1 T^{-1/2} (1-T)^m dT = \frac{h_F}{2} \beta(z, w) = \frac{h_F}{2} \beta(1/2, m+1)$$

VI.3.3.1 Hazen-Williams

La ecuación de Hazen –Williams es la más usada para estimar la pérdida por fricción en laterales de riego por aspersión con régimen turbulento (número de Reynolds mayor a 6.3×10^5) el parámetro m es igual a 1.852, entonces $\frac{1}{2} \beta(1/2, 2.85) = 0.5477$. La pérdida de carga en un lateral para pivote central puede entonces estimarse usando el factor de salidas múltiples de 0.5477

$$h_f = F_{sm} h_F = 0.5477 h_F$$

La siguiente ecuación permite estimar la pérdida de carga desde el punto pivote a un punto r sobre el lateral:

$$h_{f-r} = -K \frac{Q_o^m}{D^n} \int_0^r \left(1 - \left(\frac{\tau}{R} \right)^2 \right)^m d\tau$$

Donde τ es una variable auxiliar de integración

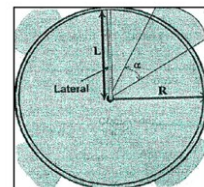
El binomio de la integral puede aproximarse usando una serie binomial (Scaloppi y Allen, 1992) de la forma siguiente

$$\left[1 - \left(\frac{\tau}{R} \right)^2 \right]^m = 1 - m \left(\frac{\tau}{R} \right)^2 + \frac{m(m-1)}{2!} \left(\frac{\tau}{R} \right)^4 - \frac{m(m-1)(m-2)}{3!} \left(\frac{\tau}{R} \right)^6 + \dots$$

Sustituyendo los primeros cuatro términos de la serie e integrando se tiene:

$$h_{f-r} = -K \frac{Q_o^m}{D^n} \int_0^r \left(1 - \left(\frac{\tau}{R} \right)^2 \right)^m d\tau = K_F \left\{ \frac{r}{R} - \frac{m}{3} \left(\frac{\tau}{R} \right)^3 + \frac{m(m-1)}{10} \left(\frac{\tau}{R} \right)^5 - \frac{m(m-1)(m-2)}{42} \left(\frac{\tau}{R} \right)^7 \right\}$$

Como la longitud del lateral (L) es menor que el radio efectivo de mojado (R), se usa una longitud hidráulica equivalente (L_h) para definir las pérdidas por fricción en un lateral con aspersores mojado fuera del radio L . Sustituyendo la ecuación para



un régimen turbulento (m=2), se obtiene:

$$h_{f-r} = h_f \left\{ \frac{r}{L_h} - \frac{2}{3} \left(\frac{r}{L_h} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{r}{L_h} \right)^5 \right\}, \quad L_h > R > L, r \leq L$$

Donde

L_h = longitud hidráulica equivalente

Una versión muy usada para estimar las pérdidas de carga por fricción, derivada y verificada por Chu Moe (1972), está dada por

$$h_{f-r} = h_f \frac{15}{8} \left\{ \frac{r}{L_h} - \frac{2}{3} \left(\frac{r}{L_h} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{r}{L_h} \right)^5 \right\}, \quad L_h > R > L, r \leq L$$

La distribución de presión a lo largo del lateral puede estimarse con la ecuación siguiente:

$$\frac{h_r - h_{Lh}}{h_o - h_{Lh}} = \frac{h_r - h_{Lh}}{F_{sm} h_f} = 1 - \frac{15}{8} \left\{ \frac{r}{L_h} - \frac{2}{3} \left(\frac{r}{L_h} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{r}{L_h} \right)^5 \right\}, \quad L_h > R > L, r \leq L$$

Donde

h_r = es la presión a una distancia r del pivote

h_o = es la presión inicial del pivote

h_{Lh} = es la presión al final del pivote

Para estimar las pérdidas de carga en tuberías sin salidas múltiples la ecuación de Hazen Williams es de la forma siguiente:

$$h_f = KL \frac{\left(\frac{Q_o}{C} \right)^{1.852}}{D^{4.87}}$$

donde:

L = longitud del lateral

C = Coeficiente de Hazen-Williams, usualmente se toma un valor de 140 para tubería de pivotes

D = diámetro interno

Q_o = gasto al inicio del lateral

K = coeficiente de conversión que depende de las unidades usadas

Valores del coeficiente K de la ecuación Hazen Williams para varias unidades de las variables involucradas

	unidades			
K	1.22×10^{10}	3163	4.6×10^{-7}	10.46
h_f	m	m	m	ft
L	m	m	m	ft
Q	lps	lpm	$m^3 s^{-1}$	gpm
D	mm	mm	m	in

VI.3.3.2 Recomendaciones del fabricante

Debido a que la Ecuación de Hazen Williams conduce a cálculos engorrosos, los fabricantes de equipos de pivotes, han desarrollado tablas para estimar rápidamente las pérdidas por fricción cuando se está diseñando un sistema de tuberías para un pivote central. Las tablas contienen la información siguiente:

Velocidad del agua (ft/seg.). Es la velocidad a la que las partículas de agua se mueven a través del tubo. Si el tubo es demasiado pequeño para un flujo dado, la pérdida de fricción es excesiva. Si el tubo es demasiado largo para un flujo dado, el costo implícito en la instalación del tubo no se justifica. Una regla sencilla en un sistema de tuberías es que la velocidad de agua este dentro del rango de 3 y 7 seg. En las tablas este rango esta sombreado.

Carga de velocidad. La distancia vertical que el agua debe tener para alcanzar la velocidad de un flujo dado. Pérdida de carga causada por el flujo (ft de pérdida por 100ft de longitud de tubo). La pérdida por fricción calculada con la formula de Hazen Williams para un flujo y dimensión de un tubo y convertir de libras por pulgada cuadrada a pies de agua (1 ft de agua = 0.433 psi). Los cálculos se realizan para un longitud de tubo de 100ft y se deberá multiplicar por un factor de corrección para convertir esta longitud al valor de la longitud que se esté considerando (si la longitud total del tubo es de 500 ft, el valor obtenido en la tabla se multiplica por 5. de igual manera si la longitud del tubo es de 40 ft, se multiplica el valor obtenido de la tabla por el factor 0.40).

Pérdida de carga de velocidad causada por el flujo (psi de pérdida por 100 ft de longitud de tubo. La pérdida de fricción calculada con la formula de Hazen Williams para un tamaño de tubo y flujo dado. De igual manera se utiliza un factor de conversión para el valor de la longitud del tubo analizado.

Los valores de las tablas se determinaron con un valor de C=100. Para convertir la pérdida de fricción de este valor de referencia se emplea el factor de corrección dado en la tabla siguiente para obtener el valor de la pérdida por fricción para un valor diferente de C.

Valor de C	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60
Factor de corrección	0.47	0.54	0.62	0.71	0.84	1	1.22	1.5	1.93	2.57

En el Apéndice D se incluyen las tablas correspondientes a tuberías de 6 “, (Fig. D2 y D3) tomadas del Manual de diseño de Lindsay Zimmatic, a fin de ejemplificar el uso de las tablas. Para otros diámetros de tubería se deberá consultar el Manual.

Debido a que en general las líneas de conducción no son rectas y tienen cambios de dirección, se deberán estimar las pérdidas por fricción de las conexiones como codos “Tees”, válvulas. Las ecuaciones correspondientes para determinar las pérdidas de fricción en conexiones son muy complejas y por esta razón se emplea un método simple. Este método se basa en considerar que todas las pérdidas por fricción en las conexiones contribuyen a la pérdida total de presión y la pérdida de fricción de cada conexión, para

un cierto diámetro y un flujo dado, que se origina equivale a una pérdida por fricción de un tubo recto con la longitud que conduce a la misma pérdida de fricción que la conexión. Para determinar las longitudes equivalentes se han desarrollado tablas para diferentes tipos de conexiones como la que se muestra en la Fig. D4 del Apéndice D. En la Fig. D5 se presenta una tabla desarrollada para estimar las pérdidas por fricción originadas por las bombas.

Para determinar las pérdidas por fricción en la lateral de un pivote, formada por varios tramos con combinaciones de tubos con diámetros y longitudes diferentes, también se utilizan tablas proporcionadas por los fabricantes como las que se presentan en el Apéndice D para dos ejemplos.

VI.3.4 Consideraciones de diseño

Los Factores que se deben considerar

1. *Diseño del sistema de riego adecuado.* El sistema de riego debe: Adecuarse a las necesidades de agua de la cosecha y Optimizar la eficacia del riego. Dividir el área a regar en zonas con distintas necesidades de riego le ayudará a resolver esta situación. Puede elegir realizar una división por tipos de cosecha o quizá por la exposición al sol y al viento, si es posible. Para determinadas cosechas puede seleccionar zonas umbrías o en pendiente.
2. *Equipo de riego.* Distintos equipos de riego requieren distintas cantidades de agua y presión. Por ello, el equipo se deberá seleccionar antes que la bomba. No se debe pasar por alto el cuadro de control. Este dispositivo controla el rendimiento de la bomba, incluso encendiéndola y apagándola en periodos predeterminados. Si no riega en periodos con luz solar directa o con fuertes vientos ahorrará agua. Un cuadro de control puede programarse para optimizar el funcionamiento, respetando tanto la cosecha como el ahorro de agua. Apagando la bomba durante un tiempo se consigue que el suelo absorba el agua de riego. Encendiéndola más tarde mejorará la absorción y reducirá el consumo de agua.
3. *Fuente de suministro de agua.* El origen del agua de riego influye en la bomba que se va a seleccionar. Las bombas sumergibles en pozos profundos están especialmente diseñadas para bombear agua desde varios cientos de metros bajo tierra. Para bombear agua de superficie puede usar distintos modelos de bombas.
4. *Consumo energético.* Las bombas y los motores presentan eficacias diferentes, y la eficacia total se debe calcular siempre antes de realizar la selección final. La factura de la luz depende de cuántos KWH. absorbe el motor. Sólo tiene que comparar el caudal y el tope que produce la bomba con el consumo de KWH. del motor.

Se puede calcular como sigue:

$$\text{Rendimiento \%} = Q \times H \times 100 / (365 \times P1)$$

Q = caudal en m³/h

H = head (pressure from pump in meters)

H = altura (presión desde la bomba en metros)

P1 = Kw. requeridos por el motor. No deben confundirse con la salida en Kw. que aparece

estampada en la placa del motor. La mayoría de los fabricantes de bombas pueden suministrar todos los datos relevantes, para poder calcular la eficacia con precisión.

5. *Caudal*. Hay dos elementos básicos que son cruciales:

- La disponibilidad de agua
- Las necesidades de agua del cultivo

Al utilizar agua subterránea, solemos recomendar usar más de un pozo para minimizar el descenso de nivel del agua. También se recomienda emplear varias bombas pequeñas en lugar de una grande. Algunas ventajas son:

- Fácil activación/desactivación de las bombas en función de la demanda de caudal
- Minimización de las fugas producidas por la presión excesiva del sistema
- Se reduce el consumo energético, al limitar la altura
- Se evitan las influencias negativas en el acuífero

6. *Presión*. La presión del sistema debe mantenerse lo más baja posible. Los motivos son: Se reducen las fugas. Se conserva el agua. Se reduce el consumo energético, no obstante, se suele necesitar una presión mínima específica para un funcionamiento correcto. Sin ella, el rendimiento que anuncia el fabricante no será posible.

7. *Consideraciones adicionales*. Las bombas sumergibles ofrecen dos ventajas principales al obtener agua de un embalse o lago:

- Se mejora la protección antirrobo cuando las bombas están sumergidas
- Se reduce el ruido únicamente al ruido de los tubos y las válvulas
- Se puede bombear prácticamente desde cualquier profundidad
- No hay riesgo de vaporización del agua

8. Rendimiento variable de la bomba. La regulación de la velocidad es el modo más eficaz de adaptar. Existe la disponibilidad de una serie de bombas con control de velocidad variable, y puede suministrar bombas de presión embaladas con controles simples. Algunos fabricantes de equipos de riego también diseñan controladores, que están optimizados para bombas y equipos de riego por separado.

9. *Protección de la bomba*. Hay disponibilidad en el mercado de dispositivos para riego, de una amplia gama de dispositivos de protección frente a los problemas más comunes como la sobrecarga, el exceso o la falta de tensión, el desequilibrio de fases, y la refrigeración insuficiente.

10. *Evaluación del impacto ambiental*. Una parte importante de la planificación de los sistemas de riego consiste en analizar los problemas ambientales potenciales al operarlos, como son: migración de agroquímicos aplicados con el sistema, escurrimiento y erosión potencial por altas intensidades de aplicación, excesiva filtración por sobre riego o mal diseño. En el Apéndice B se presenta un apartado sobre el impacto ambiental de los sistemas de riego y en el Apéndice C sobre saturación y salinización de los suelos.

Los equipos deben ser diseñados adecuados a cada sitio y optimizar costos directos e indirectos con base en la información colectada que incluye la caracterización de suelos (física y química), infiltración, disponibilidad de agua (cantidad y calidad), microclima, requerimientos de agua del cultivo e identificación de cualquier otra restricción potencial. La pendiente a lo largo de la huella puede afectar el desempeño y la vida útil del equipo. Pérdidas potenciales como arrastre por viento, evaporación, escorrentías y percolación profunda, deben ser estimadas. Los aspersores y patrones de distribución deben ser adecuados al tipo de suelo y criterios de operación deben ser entregados al productor. La determinación de costos directos: recaen sobre el productor o inversionista ya que son los que materializan los objetivos del proyecto y se dividen, a su vez, en: Costos de inversión que incluyen el costo del equipo y las inversiones necesarias para la elaboración del proyecto, tales como: construcciones e instalaciones y los costos de Operación.

Por lo que respecta a costos indirectos incluyen aquellos provocados por especulación del capital, de terrenos y de los activos en general; por la contaminación del aire, del suelo y del agua, casos concretos son las emisiones de la maquinaria y los fumigadores al aire, los agroquímicos aplicados al suelo y al agua, las descargas de aguas residuales a los drenes por lavado de suelos en drenajes parcelarios, y el creciente desecho de plásticos utilizados en la agricultura. El evaluador de proyectos debe tener clara conciencia de los efectos y sus costos aún difíciles de cuantificar, en vez de disfrazar con justificaciones la ignorancia actual y reconocer los efectos negativos que pueden tener en las actividades y en la sociedad, por lo tanto, debe tomar en consideración las valoraciones cualitativas de sus efectos.

Otro grupo de indirectos generalmente son los relativos a gastos de administración como son: nómina, papelería, luz, agua, teléfono, fax, mensajería, arrendamientos, etc., que por lo general no se cuantifican en los proyectos agropecuarios, porque los usuarios no se constituyen como empresa; no obstante, son gastos que acaban siendo asumidos por ellos y con cargo al proyecto. Por otra parte, cada vez más las fronteras que separan a la empresa agropecuaria o agroindustrial con el productor del sector primario se diluyen y se integran en un ambiente más formal de la administración empresarial, donde aspectos como los activos, el valor agregado, los impuestos y en general los estados financieros que caracterizan a la empresa formalmente constituida cobran sentido.

VI.3.4.1 Costo del Equipo.

Como con todos los equipos de riego, para reducir los costos por unidad de área regada, es ventajoso regar la mayor superficie posible con una mínima cantidad de equipamiento. En el caso del Pivote Central, el costo del equipo es proporcional al radio del círculo regado, pero el área regada es proporcional al cuadrado de este radio. Esta es básicamente la razón de que el equipo se recomienda para superficies por mayores las 30 ha.

Los costos por hectárea del equipo entonces dependen directamente de la superficie que se quiera dejar bajo riego. Pivotes Centrales diseñados para regar entre 20 a 30 ha., tienen valores que fluctúan entre los 1500 a 2500 \$US/ha, en cambio Pivotes capaces de regar unas 100 ha., poseen valores entre 800-1000 \$US/ha.

El costo total de un proyecto de riego por Pivote Central no tan sólo considera la inversión de la

adquisición del equipo, que corresponde entre el 40% a un 60% del costo total del proyecto, sino que además debe considerar otros costos del proyecto como son: el sistema de bombeo, red hidráulica, sub-estación y red eléctrica, equipo de fertirrigación, sistema de filtraje y las obras de captación.

VI.3.4.2 Costos de operación

Los costos de operación incluyen los costos necesarios para operar el proyecto, como son: materias primas, mano de obra, energía, materiales, seguros, conservación y mantenimiento y sus respectivos impuestos.

Un mantenimiento regular del Pivote Central permite prevenir roturas y pérdidas de tiempo y obtener un funcionamiento más prolongado y eficiente a lo largo del tiempo, lo cual se traduce, finalmente, en ahorro de dinero.

Según datos de los expertos, se coincide en que los ítems más importantes para el mantenimiento son:

1. Anualmente.
 - Verificar la presión de aire en los neumáticos,
 - Eliminar el agua que pueda existir en las cajas de transmisión y volver a llenarlas con aceite,
 - Verificar que las juntas estén en el lugar correcto,
 - Asegurar que las trampas de arena estén funcionando correctamente para evitar la acumulación de este tipo de partículas. De ser necesario, lavar estas trampas con agua a presión.
 - La presión debe ser monitoreada cada año y a lo largo de cada estación. Si la presión comienza a disminuir a lo largo del tiempo, esto puede ser un signo de problemas en el equipo de bombeo o en el sistema de suministro de agua.
2. Antes de la estación de riego
 - Verificar el funcionamiento de las boquillas al momento de arranque asegurando que estén asperjando correctamente.
 - Procurar que el equipo de riego quede apoyado correctamente sobre el suelo.
3. Al final de la estación de riego
 - Eliminar el agua del Pivote y de todas las conexiones que van hacia el mismo.
4. De manera poco frecuente
 - A partir del primer año de operación, reemplazar el aceite de las cajas de transmisión de las ruedas, utilizando el tipo de aceite aconsejado por el fabricante.
 - Cambiar el aceite de las cajas de transmisión, una vez cada 3 años en caso de operar en condiciones normales o una vez cada 2 años si el equipo se usa más de 1000 horas al año.
 - Cambiar aspersores en el caso de notar un incremento en el consumo de combustible o energía, es importante tener en cuenta que el mismo puede deberse a un sistema de aspersores dañado o gastado. Con el correr del tiempo, el tamaño de las boquillas en los

sistemas de aspersión tiende a incrementarse y con ello el caudal, lo que conlleva a un aumento en el consumo de electricidad (o combustible) por parte de la bomba. El productor puede obtener un importante ahorro de agua y energía al adoptar los nuevos modelos de aspersores de baja presión.

En el Apéndice C, se muestran fotografías y láminas ilustrativas relativas al mantenimiento del Pivote Central.

Los puntos anteriores (mantenimiento esmerado, elección de los aspersores correctos, trabajar a la presión adecuada, evitar la formación de huellas de neumáticos profundas y emplear la fertirrigación), pueden ser medidas insuficientes si El sistema no es manejado correctamente.

Para ello, como en cualquier sistema de riego, lo importante es monitorear los niveles de humedad del suelo y aplicar El riego en el momento adecuado.

VI.3.5 Diseño del paquete de aspersores.

La selección y localización de los emisores es una parte importante del proceso de planificación del sistema. En esta fase se recomienda obtener varias alternativas de paquetes de aspersores que cumplan con las restricciones hidráulicas impuestas por el sistema.

Las principales variables que se consideran para seleccionar un paquete de aspersores son: el espaciamiento entre aspersores y el tipo de aspersor.

La selección del tipo de emisor entre las diferentes opciones comerciales disponibles, depende de los siguientes factores:

- Velocidad del viento
- Potencial ambiental evaporativo
- Tipo de cultivo
- Requerimientos hídricos del cultivo
- Topografía del terreno
- Costos de bombeo
- Practicas de quimigación requeridas
- Uniformidad deseada
- Capacidad de infiltración y almacenamiento del suelo
- Longitud del lateral

Existen los siguientes tipos hidráulicos de aspersores usados en pivotes centrales

- Aspersores de impacto o giratório
- Roçadores o pulverizadores (spray)
- Emisores LEPA
- Cañon

En la tabla siguiente se presentan las principales características de los tipos de aspersores más usados en los sistemas de pivote central, donde se observa un amplio rango de diámetros de mojado y presiones de operación.

Fig. 38. Tipos de aspersores para pivote central

Tipo	Material	Angulo trayectoria (°)	Tamaño gota	Presión aspersor (psi)	Diámetro de mojado (ft)
Borboteador	Plástico	Baja	G	5 – 10	1
Spray 180	Plástico o bronce	-10 a 10	P	10 – 30	10 – 20
Spray 360					
Plato liso	Plástico	0	P	10 – 30	10 – 20
Plato fino	Plástico	-5 a 10	P – M	10 – 30	20 – 40
Plato estriado	Plástico	0 a 15	M – G	15 – 40	40 – 60
Plato combinado	Plástico	Combinación	P – M	10 – 40	40 – 50
Plato rotatorio	Plástico	-5 a 30	M – G	15 – 45	40 – 70
Impacto					
Alta presión	Plástico o bronce	0 a 15	M – G	25 – 50	50 – 70
Baja presión	Plástico o bronce	10 a 27	M – G	40 – 80	60 – 100
Cañón	Variado	18 a 27	M – G	40 – 100	100 – 550

NOTA: La simbología del tamaño de gota es: G–Grande, M–Media, P–Pequeña

Tipos de aspersores para pivote central

Los espaciamientos más utilizados son:

- Espaciamiento uniforme. Los aspersores se espacian entre 9 y 12 m y su gasto se incrementa en proporción directa con la distancia de este al punto pivote. El diámetro de mojado también aumenta pero no en proporción a su descarga.
- Espaciamiento Semi uniforme. La línea regante es dividida en tres segmentos para utilizar diferentes espaciamientos.
- Descarga uniforme de los aspersores. El espaciamiento es de 12 m cerca del pivote y decreciendo a 1.5 m en las orillas. El espaciamiento del aspersor esta en proporción inversa a la distancia radial del pivote, por lo que el espaciamiento por la distancia radial es constante.

El espaciamiento uniforme es el más utilizado por su facilidad de fabricación e instalación, pero requiere de aspersores más grandes. Con el fin de evitar problemas con los aspersores grandes, frecuentemente se utiliza el espaciamiento Semi uniforme, siendo común el espaciamiento de los aspersores a 12 m en la primera tercera parte. A 6 m en la segunda y a 3 m al final.

La estrategia general para seleccionar el aspersor y el tamaño de sus boquillas es:

- Determinar la distribución del gasto, considerando el gasto requerido por cada aspersor con el fin

de lograr una buena uniformidad.

- Determinar la carga mínima de operación del aspersor.
- Determinar la distribución de presión o cargas a lo largo de la línea regante.
- Con la presión y el gasto seleccionar el diámetro de la boquilla.

La presión de operación de un aspersor define en gran parte su comportamiento hidráulico: descarga, tamaño de gota y radio de mojado. Al incrementar la presión disminuye el tamaño de la gota, incrementa el gasto y radio de mojado.

Durante el diseño hidráulico del sistema se busca el aspersor que proporcione el gasto deseado, con base en las características de los modelos de aspersores comerciales.

En lo referente al gasto de aplicación de un aspersor, se puede estimar en función de la presión mediante la siguiente expresión algebraica

$$q_a = C_d A \sqrt{2 g H}$$

Donde

C_d es el coeficiente adimensional de descarga del aspersor que depende del tipo de boquilla y configuración con un rango de variación de 0.90 a 1 para la mayoría de los modelos comerciales

g es la constante gravitacional

H es la presión de operación del aspersor en metros o pies de columna de agua

A es el área equivalente de los orificios de las boquillas del aspersor

$$A = \pi \frac{(D_p^2 + D_s^2)}{4}$$

D_p es el diámetro de la boquilla principal

D_s es el diámetro de la boquilla secundaria

Aunque es posible obtener el coeficiente C_d en forma experimental, una forma alternativa es obtenerla por medio de un análisis de regresión ajustando datos de H y D proveniente de catálogos comerciales usando el modelo siguiente:

$$C_d = \alpha_0 + \alpha_1 D^2 + \alpha_2 H$$

Donde

D es el radio equivalente

$$D^2 = \frac{(D_p^2 + D_s^2)}{4}$$

α_0 , α_1 y α_2 Son los coeficientes de regresión obtenidos al ajustar el modelo a datos experimentales

C_d es el coeficiente de descarga obtenido de datos experimentales de q_a y H obtenidos usualmente de

catálogos del fabricante con la relación:

$$C_d = \frac{q_d}{A\sqrt{2gH}}$$

El radio de mojado de un aspersor, es el máximo alcance de mojado del aspersor y cuyo valor es importante conocer para estimar el área de mojado y determinar el espaciamiento máximo entre aspersores para obtener máxima uniformidad. La selección del paquete de aspersores para el pivote central dependerá de los modelos disponibles en el mercado que cumplan con los requerimientos hidráulicos de presión, gasto y radio de mojado para obtener una alta uniformidad.

La altura del emisor tiene una relación con el diámetro de mojado. Los aspersores de baja presión usualmente se colocan cerca del follaje o suelo para reducir pérdidas por evaporación o acarreo de gotas.

Para incrementar el área de riego se pueden colocar uno o más cañones con una o varias boquillas al final del lateral. Sin embargo, por las altas presiones requeridas por estos cañones, se requiere una bomba de sobre presión, a fin de incrementar la presión al final de la lateral.

Los aspersores de baja presión tienen un radio de mojado pequeño, por lo que su espaciamiento es angosto. Sin embargo, al final del lateral pueden requerirse espaciamientos cortos y altas intensidades que son imprácticos de instalar y operar. Para resolver esta limitante con aspersores de baja presión se instalan tubos horizontales perpendiculares al lateral con tres o más emisores que pueden incrementar la superficie de mojado y reducir la intensidad de aplicación. Los tubos horizontales son usualmente usados en el tercio o mitad final del lateral en longitudes que varían de 3 a 6 m.

Para mantener alta uniformidad en terrenos con pendiente se requieren reguladores de presión o gasto en los puntos de los emisores, principalmente para los de baja presión.

Una vez que se ha seleccionado hidráulicamente varios paquetes de aspersores, estos deben evaluarse en términos de eficiencia y uniformidad del riego, para tener una visión global de su funcionamiento y corregir o mejorar parte o la totalidad del sistema. Uno de los problemas que surgen en la selección de un paquete de aspersores es que las intensidades de aplicación producidas a lo largo de la lateral son mayores que la infiltración del suelo, generando un escurrimiento que reduce la uniformidad del riego. El gasto de aplicación de los emisores se incrementa a mayor distancia del punto del pivote debido a la mayor superficie de riego por cubrir.



VII. Diseño del cabezal de bombeo y línea de distribución.

Los cabezales de control se componen de equipo de control como medidores de gasto, dispositivos reguladores de presión, válvulas de control y seguridad, y manómetros; también cuentan con dosificadores de agroquímicos, filtros y accesorios.

VII.1 Longitud de la línea de distribución

La red de conducción y de distribución constituye el conjunto de tuberías que llevan el agua desde la fuente de abastecimiento o unidad de bombeo hasta la entrada del sistema de riego y la longitud de la línea dependerá de la posición de la fuente de abastecimiento y del punto pivote. La red está compuesta por tuberías generalmente de PVC o aluminio con sus diferentes accesorios tales como conectores, válvulas de control, válvulas de admisión y expulsión de aire, válvulas de alivio de presión, válvulas de desfogue. El material de fabricación de las tuberías utilizado comúnmente en redes de distribución de agua de riego, es el PVC (cloruro de polivinilo) o de polietileno de baja y alta densidad. Los diámetros comerciales varían desde 50 hasta 600 mm. Diámetros superiores a 600 mm pueden resultar redes de distribución costosas.

Fig. 39. Ubicación de las válvulas de aire en una sección de riego



Fig. 40. Válvula de admisión y expulsión de aire, junto a una válvula de



Para el diseño hidráulico de la red conducción y distribución se tiene:

- a) Se selecciona o determina el gasto modular que un usuario puede manejar en forma práctica para obtener tiempos de riego aceptables. En redes entubadas estos gastos varían entre 20 y 40 l/s. Un gasto modular de 30 l/s es recomendado en redes a baja presión. Gastos modulares mayores conducen a costos más altos de la red de distribución.
- b) Se determina un coeficiente unitario de riego (CUR) ponderado en función de las necesidades hídricas del patrón de cultivos y superficies por establecer en la zona de proyecto. En general, estos coeficientes CUR pueden variar entre 0.5 y 1.5 l/s/ha en los periodos de máxima demanda.
- c) Se determinan las superficies dominadas por tramo y línea de conducción de la red de distribución, iniciando desde aguas abajo hacia aguas arriba de cada línea de conducción.
- d) Las capacidades o caudales demandados por tramo de red se calculan mediante la siguiente expresión:

$$Q_{\text{tramo}} = \text{CUR} \times A_{\text{dominada}}$$

Donde Q_{tramo} es el gasto demandado por tramo, en l/s; CUR es el coeficiente unitario de riego en l/s/ha y A_{dominada} es la superficie dominada por tramo en ha. Los gastos se redondean al entero próximo mayor considerando múltiplos del gasto modular. Por ejemplo si un tramo tiene un gasto de 18 l/s y el gasto modular seleccionado es de 25 l/s, entonces el gasto del tramo se redondea a 25 l/s. Si el gasto del tramo es 134 l/s y el gasto modular seleccionado es de 30 l/s, entonces se adopta un gasto del tramo de 150 l/s para aplicar aguas abajo del tramo cinco riegos simultáneos de 30 litros por segundo.

VII.2 Conexiones y válvulas

Las conexiones son un conjunto de elementos accesorios que se intercalan con el objeto de resolver los problemas singulares que presenta la conexión entre tubos, tales como: reducciones (para hacer un cambio de diámetro), las Tes., cruces, yés (para realizar ramificaciones y derivaciones), los codos (para realizar cambio de dirección), tapones finales (para cerrar las terminales de las líneas de conducción), juntas flexibles y rígidas que sirven para absorber los esfuerzos por cambios de temperatura y evitar los deslizamientos longitudinales entre las uniones de tubería.

A continuación se describen algunos e equipo de control como medidores de gasto, dispositivos reguladores de presión, válvulas de control y seguridad, y manómetros; también cuentan con dosificadores de agroquímicos, filtros y accesorios.

1. Los medidores de gasto son dispositivos que relacionan la velocidad del agua en la tubería y el área de paso con el gasto hidráulico que pasa por ella. Cuentan con indicador numérico del gasto que pasa por la tubería y pueden tener un totalizador volumétrico integrado. Estos medidores pueden ser de propala y ultrasónicos.

Fig. 41. Medidor volumétrico de pro pela



2. Válvulas de seguridad y control del agua. Sirven para cerrar o abrir conductos. Puede regularse el gasto o la presión en una tubería cerrándolas y abriéndolas. Existen válvulas reguladoras automáticas, que se usan generalmente en sistemas de riego localizado.
3. Válvulas de seguridad. Son dispositivos que permiten evitar riesgos o daños en el sistema. Las válvulas check, evitan que el golpe de ariete afecte al sistema de bombeo, cuando se cierra el paso del agua en una tubería. Las válvulas de alivio permiten la expulsión del agua o del aire cuando aumenta la presión sobre un límite preestablecido. Las válvulas de entrada de aire en la sección de riego disminuyen el taponamiento de los emisores, al evitar la succión (de aire y lodo) por parte de los emisores al momento de interrumpir la operación del sistema de riego.
4. Válvulas de control. Son válvulas de apertura y cierre parcial o total. Las válvulas de compuerta tienen un mecanismo de tornillo para abrir y cerrar, por lo que puede regularse su operación. Las válvulas de mariposa y de cuadro se usan para operar en posiciones fijas.
5. Los manómetros son dispositivos que sirven para medir la presión. Tienen sensores que indican las presiones de operación y pueden ser de mercurio o mecánicos con carátula. No generan pérdidas de carga en las tuberías.
6. Inyectores. Son equipos que sirven para aplicar fertilizantes, fungicidas, herbicidas y soluciones para prevenir taponamientos en los goteros y en las tuberías. Pueden ser: bombas inyectoras, inyectores por succión e inyectores por dilución. Utilizan para su funcionamiento energía eléctrica o hidráulica.
7. Válvulas de seguridad y control del agua. Sirven para cerrar o abrir conductos. Puede regularse el gasto o la presión en una tubería cerrándolas y abriéndolas. Existen válvulas reguladoras automáticas, que se usan generalmente en sistemas de riego localizado.
8. Válvulas de seguridad. Son dispositivos que permiten evitar riesgos o daños en el sistema. Las válvulas check, evitan que el golpe de ariete afecte al sistema de bombeo, cuando se cierra el paso del agua en una tubería. Las válvulas de alivio permiten la expulsión del agua o del aire cuando

- aumenta la presión sobre un límite preestablecido. Las válvulas de entrada de aire en la sección de riego disminuyen el taponamiento de los emisores, al evitar la succión (de aire y lodo) por parte de los emisores al momento de interrumpir la operación del sistema de riego.
9. Válvulas de control. Son válvulas de apertura y cierre parcial o total. Las válvulas de compuerta tienen un mecanismo de tornillo para abrir y cerrar, por lo que puede regularse su operación. Las válvulas de mariposa y de cuadro se usan para operar en posiciones fijas.
 10. Los manómetros son dispositivos que sirven para medir la presión. Tienen sensores que indican las presiones de operación y pueden ser de mercurio o mecánicos con carátula. No generan pérdidas de carga en las tuberías.
 11. Inyectores. Son equipos que sirven para aplicar fertilizantes, fungicidas, herbicidas y soluciones para prevenir taponamientos en los goteros y en las tuberías. Pueden ser: bombas inyectoras, inyectores por succión e inyectores por dilución. Utilizan para su funcionamiento energía eléctrica o hidráulica.
 12. Decantadores. Son equipos o estructuras que permiten separar las partículas sólidas dispersas en un líquido, siempre que sean de mayor densidad que el líquido.
 13. Decantador de tanque. Los tanques decantadores aprovechan la energía gravitacional para que las partículas se depositen. Los tanques reciben el agua de la fuente de abastecimiento con sólidos en suspensión; al entrar el agua en el tanque, se reduce su velocidad dando tiempo a que se depositen las partículas en el fondo. Estos sistemas permiten prevenir taponamientos.
 14. El hidrociclón aprovecha la fuerza centrífuga para separar las partículas más densas que el agua. El agua entra en el cuerpo del hidrociclón por una orilla de la parte superior y forma un remolino de manera que las partículas más densas que el agua siguen una trayectoria tangencial a las líneas de corriente, por lo que se friccionan con la pared del hidrociclón, reduciendo su velocidad y, por la acción gravitacional, caen hasta un recipiente de almacenamiento de sólidos; el agua sale por el centro en la parte superior con un mínimo de sólidos en suspensión. Estos decantadores se usan para eliminar arenas.
 15. Filtros. Son dispositivos que sirven para retener partículas en suspensión que pueden taponar el sistema de riego. Consisten en una pared separadora cuyos poros o áreas de paso son más pequeños que las partículas que se deben separar. El agua, al pasar por el filtro, genera una pérdida de carga. Conforme se ensucia o se va acumulando material que no pasa por el filtro, se reduce el área de paso del agua y se aumenta la pérdida de carga, por lo que deben lavarse con frecuencia. En el riego por aspersión, puede o no existir un sistema de filtrado, el cual generalmente es del tipo hidrociclón, sobre todo donde existan muchos sólidos en suspensión. Aunque también pueden existir filtros de anillos o mallas para protección de las boquillas de los aspersores. El tipo de filtrado depende en gran medida de la calidad del agua de riego.

VII.3 Determinación de pérdidas

Cuando no se dispone de software para el diseño hidráulico de la red de conducción y distribución para

seleccionar el diámetro de la tubería, se pueden utilizar tablas y gráficos que para un gasto y un diámetro dado proporcionen el valor del gradiente unitario o pérdida de carga unitaria (m/m). Este valor se compara con la pérdida de carga permisible por unidad de longitud para cada tramo.

Con la pérdida de carga permisible por unidad de longitud se obtiene el diámetro teórico, sin embargo, sólo en caso de que este diámetro coincida con un diámetro comercial será susceptible de utilizarse; de lo contrario el tramo en cuestión resulta de la combinación de dos diámetros comerciales.

Para facilitar la selección de los diámetros comerciales, Villamil (1999) propone la utilización un gráfico con curvas de gasto contra pérdida de carga unitaria, para un rango de diámetros internos de 200 a 600 mm. Este gráfico fue elaborado con la fórmula de Hazen-Williams, para tubería de PVC, con un coeficiente $C=140$.



Procedimiento de diseño

1. Se define el gasto de diseño del tramo.
2. Se determina la pérdida de carga permisible por unidad de longitud del tramo.
3. Con esta información obtenida previamente, se ingresa al gráfico y se obtiene un punto en el plano conformado por un eje vertical que representa la pérdida de carga permisible, y un eje horizontal que representa al gasto de diseño del tramo.
4. Si el punto interceptado cae dentro de una curva, toda la longitud del tramo será del diámetro comercial al que pertenece la curva.
5. Si el punto interceptado se localiza entre dos curvas, la longitud total del tramo será compartida por los dos diámetros comerciales de las curvas respectivas. Para determinar la longitud correspondiente al diámetro mayor, se utiliza la siguiente ecuación

$$X_1 = L \frac{hf_p - hf_2}{hf_1 - hf_2}$$

Donde:

X1 es la longitud del diámetro mayor L es la longitud total del tramo

h_{fp} es la pérdida de carga permisible por unidad de longitud del tramo

h_f es la pérdida de carga por unidad de longitud de la tubería del diámetro mayor

h_{f2} es la pérdida de carga por unidad de longitud de la tubería del diámetro menor

Por lo que la longitud del diámetro menor (X2), se obtiene por diferencia, es decir: X2 = L – X1

VII.4 Presión total requerida

Para hacer referencia a la energía o a la carga hidráulica de los fluidos en movimiento, se definen tres tipos diferentes de carga: (a) de posición, (b) de presión y (c) de velocidad; que representan gráficamente la energía del fluido. Dependiendo de que se relacionen una, dos o tres de las cargas consideradas se obtienen las líneas geométricas, piezométricas y de energía.

- Línea geométrica. La línea geométrica (LG) corresponde al eje central longitudinal de la tubería y representa en cada punto la carga de posición con respecto a cierto punto de referencia; se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$LG = h_z = Z$$

Donde h_z es la carga de posición y se mide como la cota o elevación Z con respecto a la línea base o nivel de referencia.

- Línea piezométrica. La línea piezométrica (LP) se determina uniendo los puntos que alcanzaría el fluido circulante en distintos piezómetros conectados a lo largo de la tubería. Analíticamente es la suma de las cargas de posición y de presión (h_p), se expresa mediante la ecuación

$$LP = h_z + h_p$$

Línea de energía. La línea de energía (LE) expresa en cada punto la carga total del fluido, se obtiene al sumar en cada punto de la tubería, las alturas piezométricas y la carga de velocidad (h_v), se determina con la ecuación

$$LE = h_z + h_p + h_v$$

En donde:

$$h_v = \frac{v^2}{2g}$$

VII.5 Selección del equipo de bombeo

La unidad de bombeo generalmente está compuesta por un sistema de bombeo, el sistema eléctrico y la obra civil complementaria.

El sistema de bombeo está compuesto por el cárcamo y el equipo de bombeo. El cárcamo es un depósito enterrado, donde se instala el equipo de bombeo para extraer el agua que viene del abastecimiento ya sea

superficial o de un pozo. Las partes básicas del cárcamo son: el foso, el colector de basura, el fondo, las escaleras y la plataforma.

El equipo de bombeo consiste de una bomba y su motor. En las plantas de bombeo, para los sistemas de riego, se emplean los siguientes tipos de bombas: centrifugas de eje horizontal, las de eje vertical, conocidas como bomba turbina vertical; y las sumergibles que son utilizadas principalmente para bombear agua de pozos.

El sistema eléctrico completo consta de una subestación eléctrica que incluya postes, apartarrayos, cuchillas, transformador, tuberías y acometidas. Incluye también arrancadores y su estructura de montaje junto con los cables hasta el interruptor y un medidor de voltaje. En el caso de motores a combustión interna ninguno de los materiales anteriores es necesario, pero sí es necesario tener un tanque de almacenamiento temporal de combustible.

La obra civil complementaria consta de un sistema de prefiltrado o un estanque decantador, una losa de apoyo, una caseta y un nicho de motores. En algunos casos es conveniente acondicionar un patio de maniobras y una malla cerca para proteger la unidad de bombeo y la unidad de control general.

El costo de operación y mantenimiento de un sistema de riego depende en gran medida de la selección de los componentes de la unidad de bombeo. El consumo energético de los sistemas de riego depende de los siguientes factores:

- Cantidad total bombeada
- Profundidad de bombeo.
- Tipo de fuente de poder
- Presión del sistema de riego
- Eficiencia electromecánica de la planta de bombeo.

Las partes que requieren diseñarse en una planta de bombeo con fines de riego parcelario son: la obra de toma, el canal de llamada, el cárcamo de bombeo y los bastidores o las losas de apoyo de los equipos de bombeo. Otros componentes, como el gabinete de arrancadores y la caseta de protección de los equipos se proporcionan como estructuras tipo. La planta de bombeo en aprovechamiento subterráneo no requiere obra de toma ni cárcamo.

Es muy importante señalar que para el diseño estructural se parte del dimensionamiento realizado en el diseño hidráulico, quedando por definir únicamente los espesores y armados de los elementos estructurales que componen la planta de bombeo.

La Obra de toma permite tomar el agua del canal de llamada o de abastecimiento para conducirla hasta el cárcamo. Las partes de la obra de toma son: el acceso, la estructura de entrada, el desarenador, las rejillas, el mecanismo de control y el conducto.

Las dimensiones del acceso serán aquellas que permitan una velocidad de entrada a la toma de 0.4 a 0.8 m/s. Por otro lado, conviene diseñar la plantilla en contra pendiente, disminuyendo su ancho hacia la toma hasta tener la dimensión horizontal de la rejilla.

Las rejillas se construyen generalmente de soleras o barrotes que se sueldan a un marco formado con

ángulos o también con soleras. La separación máxima de los barrotos está determinada por el "paso de esfera" que se refiere a la medida mayor de un cuerpo que puede pasar por los impulsores.

El mecanismo de control tiene por objeto cerrar el paso de agua para cuando se necesite limpiar el conducto o el cárcamo o cuando se requiera una reparación. También es conveniente impedir el flujo cuando las bombas no están trabajando, ya que se evita la acumulación de arenas y lodos en el interior de las estructuras.

Equipo de bombeo



Motor eléctrico

- menor costo operacional
- menor costo de inversión
- mayor durabilidad
- menor mantenimiento



Motor combustión interna

Se torna mas económico para sistemas con menos de 500 horas de uso por año