



*II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010*

ASPECTOS BÁSICOS DEL DISEÑO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN DE AVANCE FRONTAL

Dean Raúl A., Maglione Livio S., Pianucci Agustín

*Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Río Cuarto
Ruta Nac. 36 km. 601 - X5804BYA Río Cuarto (Cba) - E-mail: rdean@ing.unrc.edu.ar*

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo para el análisis hidráulico de un sistema de riego por aspersión de avance frontal. Se consideran aspectos básicos contenidos en una secuencia de diseño descrita por Saldarriaga (2008). En el diseño de un sistema de riego los cálculos hidráulicos se realizan posteriormente al diseño agronómico. El comportamiento hidráulico de aspersores, la tolerancia de caudales y de presiones, el coeficiente de uniformidad de riego, la eficiencia de aplicación, son conceptos importantes en los aspectos básicos relacionados al diseño hidráulico. Una descripción del método de cálculo de descargas (caudales) y presiones en el sistema de tuberías correspondiente a la modelización realizada es presentada. El modelo y secuencia de cálculo descriptos son conducentes a la selección de un programa de computación adecuado o bien a su desarrollo, para la obtención de caudales y presiones en este tipo de sistema de riego por aspersión. El trabajo se desarrolla en el marco de un programa de investigación, organizado por la Facultad de Ingeniería de la U.N.R.C, donde participan docentes investigadores de tres facultades de la UNRC: Ingeniería, Agronomía y Veterinaria, y Ciencias Económicas, a fin de proponer recomendaciones científico-técnicas para incrementar el uso eficiente de sistemas de riego complementarios por aspersión en los departamentos Río Cuarto y Juárez Celman de la provincia de Córdoba.

Palabras Claves: Diseño hidráulico, riego, aspersión, avance frontal.

1. INTRODUCCIÓN

El riego es el requerimiento para compensar la pérdida de agua por evapotranspiración cuando la lluvia es insuficiente, y el objetivo primario es aplicar la cantidad de agua adecuada en el momento oportuno. El riego por aspersión es una técnica de riego donde el agua es aplicada en forma de lluvia sobre la superficie a regar, distribuyéndose por el aire y produciendo un círculo de suelo humedecido. El riego complementario por aspersión se aplica cuando las lluvias no son lo suficientemente abundantes como para llenar las reservas del suelo. Esta técnica se caracteriza por poseer una alta eficiencia de riego y no requerir prácticamente mano de obra para su funcionamiento. Los sistemas presurizados de riego, que incluye al sistema de aspersión, constituyen una alternativa viable para el uso eficiente del agua. Consideramos que un sistema de riego por aspersión es un conjunto de elementos que se emplean para abastecer, conducir, controlar y distribuir el agua a presión hasta los puntos de emisión y aplicarla en forma de lluvia artificial [1]. En la actualidad los equipos de aspersión constituyen una importante innovación tecnológica introducida en la producción agropecuaria del sur de Córdoba (Argentina) [2]. Se ha comprobado que con su empleo es posible aumentar la productividad, ya que aumentan los rendimientos de los cultivos. Entre los equipos de riego por aspersión de movimiento continuo existen dos tipos principales, el pivot (avance radial) y el lateral móvil (avance frontal). Un equipo de avance frontal o movimiento lateral es definido por la norma ISO11545 como una máquina de riego automatizada que consiste de una tubería principal soportada por un número de torres autopropulsadas, donde la unidad entera se mueve en forma tal que la tubería permanece generalmente en una línea recta, atravesando el campo en camino recto e irrigando básicamente un área rectangular; el agua puede ser suministrada a la máquina en cualquier punto a lo largo de la cañería y es distribuida por emisores individuales localizados a lo largo de la tubería [3]. El desplazamiento del ala de riego se realiza a velocidad constante y la misma puede variarse con lo cual se puede ajustar la pluviometría según el tipo de terreno. En este trabajo se presentan consideraciones de diseño, un modelo para el análisis hidráulico de un sistema de riego por aspersión de avance frontal, y una descripción de la secuencia de cálculo de los caudales de descarga y distribución de presiones en el sistema de tuberías.

2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La importancia de un modelo para el diseño y análisis hidráulico se relaciona con predecir el comportamiento del equipo frente a diferentes condiciones de operación que pueden resultar a consecuencia de: mejorar la uniformidad de distribución de agua en la parcela regada, operar a menor presión a fin de ahorrar energía, ajustar el caudal a los requerimientos del suelo y los cultivos, cambiar emisores y boquillas desgastadas, agregar reguladores de presión a fin de compensar cambios de presión y estabilizar el caudal, evaluar las pérdidas de energía a fin de maximizar la economía en una uniformidad de riego elegida.

En la palabra "emisor" incluimos todos aquellos dispositivos que distribuyen el agua a la superficie regada, tales como aspersores, difusores, etc ([4], p.200). Un aspersor es definido como un dispositivo diseñado para distribuir el agua de riego sobre el suelo en forma de lluvia artificial [1].

En el diseño de un equipo de riego los cálculos hidráulicos se realizan posteriormente al diseño agronómico. Lo agronómico comprende lo relativo a las relaciones suelo, agua, cultivo, clima [1].

Componentes de la secuencia del diseño hidráulico y su relación con el diseño agronómico y otros datos son presentadas por Saldarriaga para el caso de un sistema de riego localizado. Suponemos válida esta secuencia de diseño y sus respectivas relaciones y la adaptamos para considerar a los sistemas de riego por aspersión como se muestra en la figura 1. A tal fin se han incluido conceptos de importancia para un sistema de aspersión.

Figura 1 Diagrama de secuencia del diseño hidráulico (Adaptado de Saldarriaga [5], p.623)

Datos del Diseño Agronómico	Datos del Diseño Hidráulico	Datos Estructurales, Físicos y Leyes de Comportamiento
Coeficiente de Uniformidad (C_{uC}) Uniformidad de Distribución Eficiencia de Aplicación (E_A) Uniformidad de emisión Caudal medio del emisor	Tolerancia de Caudales	Variaciones de fabricación del emisor Estabilidad en el tiempo de la relación caudal-presión
	Tolerancia de presiones	Ecuación del emisor (Q-h)
Estimación de las necesidades de agua de los cultivos. Área a irrigar. Parámetros de Riego: Lámina de riego Tiempo de operación - Frecuencia Caudal - Número de emisores	Distribución de la red Caudal total Caudal en bajantes	Topografía del terreno Velocidad de desplazamiento
Espaciamiento entre Emisores	Diámetros y Distribución de Presiones. Cabezal	Longitud del ala de riego Punto de suministro de agua Leyes físicas Ecuaciones de diseño de tuberías Conexiones - Accesorios

2.1 Datos del diseño agronómico

De acuerdo a Carrión *et al.*, en la tarea de describir el comportamiento del riego a nivel de parcela se utilizan habitualmente los términos de *eficiencia* y *uniformidad*. La uniformidad brinda una idea de la homogeneidad con la que se ha repartido el agua por la parcela, mientras que la eficiencia se entiende como el porcentaje del total de agua que es aplicada y aprovechada para satisfacer las necesidades del cultivo y las de lavado, ya que el resto se pierde por evaporación, escorrentía y percolación profunda [6]. La uniformidad es una magnitud que caracteriza a todo sistema de riego e interviene en su diseño, tanto en el agronómico como en el hidráulico. Niveles altos de uniformidad tendrán incidencia notable en la eficiencia de riego, lo que repercutirá en los rendimientos de manera significativa. El coeficiente de uniformidad se ve afectado por diversos factores: constructivos, hidráulicos, envejecimiento, obturaciones, diferencias de temperaturas. El coeficiente de uniformidad para una máquina de irrigación de movimiento lateral o frontal se calcula mediante la fórmula de Christiansen [3]:

$$C_{uC} = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - \bar{V}|}{\sum_{i=1}^n V_i} \right] \quad (1)$$

Donde C_{uC} es el coeficiente de uniformidad de Christiansen, n es el número de colectores utilizados en el análisis de datos, V_i es el volumen (o alternatively la masa o la profundidad) de agua recolectada en el contenedor i -ésimo, y \bar{V} es el promedio aritmético del volumen (masa o profundidad) de la captura de todos los colectores utilizados en el análisis, el cual es calculado como

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (2)$$

El coeficiente de uniformidad es un indicativo del desempeño del conjunto de emisores en las condiciones de campo, ambiente y presión. Para equipos de riego por aspersión de avance frontal o movimiento lateral, es recomendado un valor de 90-95% para el coeficiente de uniformidad de Christiansen ([7], p.39). Como resultado de la no perfecta distribución del agua sobre toda el área regada y de las pérdidas producidas, sólo un porcentaje del total de agua suministrada para el riego queda a disposición de las plantas. Se han podido deducir diferentes rendimientos o eficiencias de riego, pero resulta útil usar el rendimiento de aplicación el cual representa el cociente entre el agua recibida por el suelo y el total del agua empleada en el riego. La eficiencia de aplicación E_a da cuenta del almacenamiento real de agua en la zona de la raíz para satisfacer las necesidades de agua del cultivo en relación al agua aplicada al campo. Es definida como:

$$E_a = 100 \frac{V_s}{V_f} \quad (3)$$

donde V_s es la irrigación que necesita el cultivo (m^3), y V_f es el agua entregada al campo (m^3). Para un riego por aspersión la eficiencia o rendimiento de aplicación puede variar entre el 75% y el 80%. Un valor típico de E_a para los sistemas de avance lateral es del 80% [8]. Mediante el cálculo del balance diario del agua en el suelo, en la zona de las raíces, pueden ser planificadas las láminas a aplicar y sus frecuencias [9]. En resumen, los requerimientos de irrigación en relación al cultivo, suelo y clima, se constituyen en datos necesarios para el diseño hidráulico. Estos datos, entre otros, son la eficiencia de aplicación, el coeficiente de uniformidad, el caudal medio del emisor, el espaciamiento entre emisores, lámina de riego, tiempo y frecuencia.

2.2 Datos del Diseño hidráulico

En el diseño hidráulico del equipo de riego se consideran datos estructurales, datos físicos y leyes de comportamiento. Por ejemplo: el tipo de conexión del sistema de tuberías, accesorios, tipo de emisor, ecuación de operación del emisor, tolerancia de caudales, tolerancia de presiones, velocidades recomendadas del flujo, caudal total. Los cálculos hidráulicos consisten en determinar los caudales de los bajantes dentro de una tolerancia preestablecida, los caudales de la tubería principal y el régimen de presiones. Los resultados del diseño deben presentar las características hidráulicas de lo siguiente: tubería de conducción (longitud, diámetro interno, caudal, pérdida de carga); bajantes (número de salidas, diámetro

interno, presión requerida en la conexión en la tubería principal); emisor (presión y caudal de trabajo); accesorios, válvulas de seccionamiento; componentes del cabezal de riego; presión (carga dinámica) y caudal de proyecto.

2.2.1 Hidráulica de los emisores

Un emisor representa un punto de demanda y está siempre asociado a un nodo. El diseño hidráulico de un emisor se relaciona al modo de circulación del agua (régimen) dentro del mismo, el cual es caracterizado por el número de Reynolds [10]. La relación caudal –presión en los emisores para riego, se representa en forma genérica por la función:

$$Q_e = K h_e^x \quad (4)$$

Donde

Q_e caudal del emisor en L/h

K coeficiente de descarga

x : exponente característico del régimen de flujo del emisor

h_e altura de presión hidráulica a la entrada del emisor en m

Las presiones de operación de los emisores son específicas para cada tipo de ellos. Los valores de K y x son característicos de cada tipo de emisor, los proporciona el fabricante o bien se obtienen a partir de la curva experimental $Q - h$ utilizando dos pares de valores de la misma, de lo cual resulta:

$$x = \frac{\ln(q_1/q_2)}{\ln(h_1/h_2)} ; \quad K = \frac{q_1}{h_1^x} \quad (5)$$

Un exponente de descarga de 0.5 representa típicamente un flujo turbulento. Además de la relación $Q-h$ interesa conocer el entorno de funcionamiento dentro del cual se cumple la ecuación del emisor. Los fabricantes suelen indicar un caudal nominal, que es el punto que define al emisor. La elección del emisor comprende la determinación de la presión nominal de trabajo y de la pluviometría media. Los fabricantes deben brindar, para cada tipo de emisor y para todas las presiones de trabajo, los valores de la pluviometría y de los coeficientes de uniformidad de distribución que corresponden a los diferentes marcos de uso. Las características del emisor y su comportamiento físico determinarán el éxito en la uniformidad de aplicación del agua. Cada emisor se caracteriza básicamente por la presión de funcionamiento o por la altura de presión necesaria para proporcionar la mejor distribución de agua, por el caudal correspondiente a una presión dada, y por el diámetro del círculo mojado correspondiente a cada par (h,Q) .

2.2.2 Tolerancia de caudales y presión

El cálculo hidráulico en un sistema presurizado de riego por aspersión es de importancia fundamental, ya que las diferencias de caudal que existan en los emisores se transmitirán a las intensidades de aplicación del agua (mm/h) sobre la superficie del suelo, con la correspondiente repercusión sobre la eficiencia de uniformidad del riego [4]. Las diferencias de caudal entre los emisores se deben, principalmente, a tres causas. En primer lugar, existen variaciones en la fabricación para un determinado tipo de emisor, lo que conduce a que para una misma presión, el caudal de unas unidades sea distinto al de otras. Esto se tiene

en cuenta, a efectos del diseño de las instalaciones, mediante un coeficiente de variación, que se define, para una determinada presión, como la relación entre la desviación típica y el valor medio del caudal. En segundo lugar las obturaciones de los emisores en el campo, que pueden deberse a muy diferentes causas y al envejecimiento de los mismos. Finalmente la existencia de pérdidas de carga, como consecuencia del flujo de agua en las conducciones, da lugar a variaciones de presión debido a las cuales se producen cambios de caudal ([4], p.204).

En general, la uniformidad del riego exigida por el diseño agronómico se logra admitiendo una determinada variación de caudal en los emisores. Una norma de diseño frecuentemente admitida, es la que consiste en dimensionar las tuberías de una unidad de riego para que, en el conjunto de ellas funcionando simultáneamente, la variación del caudal en los emisores sea igual o inferior a un 10% del caudal nominal [4]. Una vez establecida esta tolerancia, mediante la ecuación del emisor se determina el rango admisible de presiones, esto es, la tolerancia de presiones. La pérdida de carga permitida para producir la variación de caudal admisible, dependerá del tipo de emisor y de su régimen de flujo. Para una tolerancia en el caudal de un 10%, en régimen laminar (emisor con exponente $x=1$) la pérdida de carga máxima será del orden del 10%, y en emisores de flujo turbulento (emisor con exponente $x=0.5$) la pérdida de carga máxima puede llegar al 20% de la presión de trabajo.

2.2.3 Criterios de Diseño

El flujo teórico que ingresa a la tubería principal es un dato obtenido a partir del diseño agronómico. Básicamente, la descarga total requerida para el sistema en una aplicación de riego en particular es

$$Q_T = \frac{10A \times d}{T} \quad (6)$$

Donde Q_T = caudal total teórico en m^3/h , A = superficie a regar en ha; T = tiempo de operación para la irrigación en h; d = lámina de agua a aplicar, en mm.

El caudal teórico por emisor $Q_{e \text{ teor}}$ puede ser obtenido considerando que en los laterales de movimiento lineal el espaciamiento entre emisores es constante y éstos deben tener las mismas características a lo largo de toda la tubería para que la pluviometría sea constante. Entonces, siendo N el número de emisores, resulta:

$$Q_{e \text{ teor}} = \frac{Q_T}{N} \quad (7)$$

A los fines del diseño hidráulico y de acuerdo a lo expuesto previamente, se adoptan como criterios los siguientes [4] [7]:

$$\Delta Q \leq 0.1 Q_{e \text{ nominal}} \quad (8)$$

$$\Delta p \leq 0.2 p_{e \text{ nominal}} \quad (9)$$

El sistema de tuberías se diseña de manera que en su funcionamiento los caudales erogados por los diferentes emisores no deben variar en más de un 10% del caudal nominal. En consecuencia, para emisores con flujo turbulento ($x=0.5$) la tolerancia a cambios en la presión es del orden del 20%.

Para el dimensionado inicial de las tuberías, un criterio general es considerar las velocidades máximas permisibles recomendadas para el diseño hidráulico. De acuerdo a norma, se debe diseñar con velocidades de agua en la tubería, superiores a 1,0 m/s y menores a 2m/s para diámetros internos de 0,1 m a 0,2 m [1].

3. MODELO PARA EL ANÁLISIS HIDRÁULICO

Básicamente el sistema de tuberías de un equipo de riego por aspersión de avance frontal se modela como es representado en figura 2:

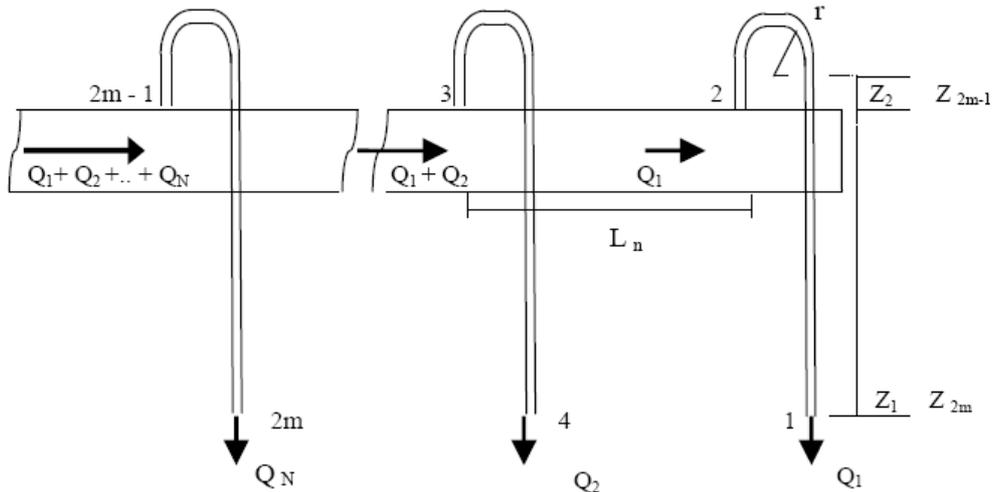


Figura 2 Esquema de conexión del sistema de tuberías para equipo de riego de avance frontal

Consta de una tubería principal de diámetro constante a la cual se adicionan bajantes que conducen el agua hasta el punto donde es emitida en forma de lluvia al cultivo. La tubería principal, si bien constructivamente tiene una pequeña curvatura por razones estructurales, se considera en posición horizontal (pendiente nula) y conformada con fines de análisis con tramos de longitud L_n constante entre nodos de bajantes sucesivos. Los nodos siguientes al primero (nodo 2) se indican con los valores correspondientes al índice $(2m-1)$, con $m = \{2,3,4,\dots,N\}$, siendo N el número total de emisores. En estos nodos se conectan los sucesivos bajantes, los cuales constan de un cuello de cisne y una extensión de tubería PVC en cuyo extremo (identificado el primero con el número 1 y los sucesivos por los valores que tome el índice $2m$, se conecta el emisor correspondiente quedando a una altura Z_i con respecto al plano de la superficie regada. Durante el riego la velocidad del agua varía a lo largo de la tubería principal, puesto que al actuar simultáneamente todos los emisores, cada uno de ellos descarga su correspondiente caudal de riego a distancias constantes, constituyendo de esta manera una tubería de caudal variable. Las ecuaciones básicas de conservación de la masa y de energía, bajo los supuestos de flujo estacionario – unidimensional – incompresible - viscoso, rigen el comportamiento del modelo [11].

A fin de que los emisores funcionen correctamente, el sistema debe tener en su entrada un valor de presión tal que, luego de producirse las disminuciones de presión debido a la fricción por la conducción del agua, los mismos tengan disponible en su entrada la presión de trabajo que indica el fabricante. La presión de proyecto o diseño, es la presión del agua a la entrada del cabezal de riego para lograr entonces un correcto funcionamiento del sistema. La presión P_0 a la entrada se define como la necesaria para que la presión media de los emisores sea la que vierta el caudal de diseño. La misma se calcula teniendo en cuenta la altura de presión nominal del aspersor, la altura de pérdida total y el desnivel en el conducto.

3.1 Procedimiento de cálculo

El modelo matemático de cálculo responde al modelo físico simplificado de la figura 2. La pérdida de altura causada por fricción a través de la tubería principal o múltiple se determina por un método de análisis paso a paso computando la pérdida de altura en todos los tramos corriente arriba, comenzando el análisis desde el emisor más alejado de la bomba hidráulica. Se supone que el caudal Q_1 que pasa por este emisor es igual al mínimo admisible dado por la tolerancia de caudales:

$$Q_1 = \frac{Q_e \text{ teor.}}{100} \cdot \left(100 - \frac{\%Tol}{2}\right) \quad (10)$$

Con la ecuación del emisor (4) se determina la altura de presión correspondiente a la entrada del emisor:

$$h_1 = \left(\frac{Q_1}{K}\right)^{1/x} \quad (11)$$

Siendo
$$h_1 = \frac{p_1}{\gamma} \quad (12)$$

donde h_1 es la altura de presión en m, p_1 es la presión estática en la entrada del emisor en kPa, γ es el peso específico del agua en kN/m^3 , K es el coeficiente de descarga del emisor.

Establecido según (10) el caudal Q del emisor más alejado, queda definido el caudal que debe transportar el bajante correspondiente. Adoptando un valor recomendado de velocidad para la circulación del agua, se determina su diámetro D por la ecuación de la continuidad, seleccionándose el diámetro comercial superior más próximo.

Aplicando la ecuación de conservación de la energía entre la entrada al emisor en el nivel Z_1 y el nodo de conexión a la tubería principal del correspondiente bajante, (nodo 2), en el nivel Z_2 , se obtiene la altura de presión h_2 necesaria en este nodo:

$$h_2 + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + Z_2 = h_1 + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + Z_1 + h_f + h_{fm} \quad (13)$$

Donde \bar{V}_1 y \bar{V}_2 son velocidades promedio en las secciones 1 y 2, α_1 y α_2 son los factores de corrección de energía cinética, que para el caso de flujo turbulento totalmente desarrollado su valor es aproximadamente 1.05 [12, p.331], h_f es la pérdida de carga mayor y h_{fm} es la pérdida de carga menor. Siendo el bajante un tramo de área constante con flujo completamente desarrollado, la altura de presión h_2 resulta:

$$h_2 = h_1 - (Z_2 - Z_1) + h_f + h_{fm} \quad (14)$$

Las pérdidas de carga mayores y menores se calculan según (15) de acuerdo con la ecuación de Darcy – Weisbach, donde \bar{V} es velocidad media, L es la longitud y D el diámetro del tramo en el cual se evalúa la pérdida, f un factor de fricción, k coeficiente de pérdidas menores y L_e es una longitud equivalente.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}_1^2}{2g}; \quad h_{fm} = \left(k + f \frac{L_e}{D}\right) \frac{\bar{V}_1^2}{2g} \quad (15)$$

Se aprecia que las pérdidas se incrementan con la velocidad y disminuyen con el aumento del diámetro. El diámetro permanece constante a lo largo de la tubería principal, pero el caudal aumenta progresivamente cuando recorremos el sistema corriente arriba y por ende la velocidad también aumenta. Para el cálculo de las pérdidas de carga es necesario conocer el régimen hidráulico que viene caracterizado por el número de Reynolds. Para flujo turbulento, ($R_e \geq 4000$) el factor de fricción f puede ser estimado por la ecuación (16) de Colebrook – White, donde ϵ es la rugosidad absoluta del material y ϵ/D la rugosidad relativa.:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (16)$$

De esta manera, como se conoce el caudal circulante en el tramo final de la tubería principal comprendido entre los nodos 2 y 3, la misma secuencia de cálculo nos permite obtener el valor de la altura de presión h_3 en el nodo 3 de conexión del segundo bajante.

Como el caudal erogado por cada uno de los emisores subsiguientes al primero constituye una incógnita, se lo determina en forma iterativa. Se supone, como primera aproximación, que por cada uno de ellos pasa un caudal igual al del emisor anterior. Se deduce que el mismo será de igual o mayor magnitud, puesto que al realizar el recorrido corriente arriba las presiones van en aumento. Entonces, con $m = 2, 3, \dots, N$, resulta

$$Q_m = Q_{m-1} \quad (17)$$

Con el valor de Q_m , de la ecuación (18) se obtiene la altura de presión en la entrada del emisor:

$$h_{2m} = \left(\frac{Q_m}{K} \right)^{1/x} \quad (18)$$

Luego, aplicando la ecuación de la energía se obtiene la altura de presión, $h_{(2m-1)}$, en el nodo $2m - 1$:

$$h_{(2m-1)} = h_{2m} - (Z_{2m-1} - Z_{2m}) + h_f + h_{fm} \quad (19)$$

La comparación del resultado de (19) con la altura de presión obtenida en ese mismo nodo cuando se avanzó corriente arriba desde el punto de conexión del bajante inmediatamente anterior, nos permite determinar si el caudal supuesto fue correcto. Si la diferencia de alturas de presión es menor que un valor δ admisible lo consideramos correcto, caso contrario se varía el caudal supuesto en (17) y se repite el proceso. De esta manera, avanzando corriente arriba en el sistema de tuberías y procediendo de la misma manera, se obtiene el caudal y la altura de presión en la entrada de cada uno de los emisores. Estos resultados nos permiten determinar la tolerancia de caudales y de presiones resultantes del cálculo.

$$\%TolQ = \frac{Q_{m\acute{a}x} - Q_{m\acute{i}n}}{Q_{Teor}} \times 100 \quad (20)$$

$$\%Tol h = \frac{h_{2m(m\acute{a}x)} - h_{2m(m\acute{i}n)}}{h_{teorico}} \times 100 \quad (21)$$

Si estas tolerancias están dentro de los valores asumidos como criterio de diseño, concluimos que los emisores funcionarán uniformemente sin variaciones considerables de caudal. Si no lo están, el diseño no fue adecuado y existe la necesidad de realizar un redimensionado proponiendo cambios en el mismo.

Finalmente se determina la altura manométrica total necesaria, a fin de establecer la potencia hidráulica necesaria a la salida de la bomba que alimentará el cabezal de riego.

3.2 Aspectos de la validación del modelo

Entendemos por validación al proceso por el cual determinamos el cumplimiento de los requisitos especificados, mediante el examen y aporte de evidencia objetiva. En este sentido la validación del modelo se cumplirá con pruebas hidráulicas que se puedan realizar sobre un prototipo o bien sobre un equipo ya construido cuyo funcionamiento pueda ser simulado, para de esta manera contrastar los resultados predichos por la simulación con los experimentales. En la etapa de validación así como en la de evaluación y control del equipo desde el punto de vista hidráulico, el coeficiente de uniformidad de Christiansen cumple un rol fundamental como un indicador del comportamiento del conjunto de los emisores, con respecto al campo, al entorno ambiental, a las condiciones de presión y a las variaciones de presión que prevalecen durante la prueba. También, el coeficiente de uniformidad de un nuevo conjunto de emisores puede ser utilizado para la comparación de diferentes conjuntos, y como una referencia para máquinas de riego similares que han sido utilizadas por un período de tiempo. Si el coeficiente de uniformidad para una máquina instalada se desvía sustancialmente del valor especificado en el diseño inicial, esto indica que se deben realizar investigaciones para determinar las causas. Por ejemplo, un coeficiente de uniformidad con un valor menor que el de diseño podría indicar desgastes, roturas o mal funcionamiento de los dispositivos de aplicación del agua [3]. Si bien el coeficiente de uniformidad C_{uc} es una herramienta valuable tanto en el diseño como en la evaluación del conjunto de emisores, debe destacarse que es un valor promedio de medición, el cual no indica cuán mala podría ser la irrigación en un sector particular de la parcela, y además, al considerar un valor absoluto, toma con la misma importancia tanto una deficiencia de riego como un exceso de riego sobre el valor medio. Un método el cual enfatiza las áreas de bajo riego y observa en las regiones críticas es la "uniformidad de distribución".

4. CONSIDERACIONES FINALES

Distintos aspectos básicos referentes al diseño hidráulico de un sistema de riego por aspersión de avance frontal fueron presentados. El principal aporte efectuado fue referido al diagrama de secuencia del diseño hidráulico de Saldarriaga (2008). El mismo fue adaptado, incluyendo diferentes conceptos de importancia y sus relaciones, para analizar conceptualmente el diseño hidráulico de estos equipos.

En una próxima etapa de la investigación, con el modelo se simulará el comportamiento hidráulico de un equipo de riego de avance lateral o frontal localizado en el predio de la UNRC, provincia de Córdoba. Los resultados serán utilizados para el proceso de validación del modelo.

Resultados preliminares de una simulación se muestran acordes a valores de operación. Los resultados finales serán un aporte en el marco de un programa de investigación interdisciplinario, organizado por la Facultad de Ingeniería de la U.N.R.C, donde participan docentes investigadores de tres facultades: Ingeniería, Agronomía y Veterinaria, y Ciencias Económicas, a fin de proponer recomendaciones científico-técnicas para incrementar el uso eficiente de sistemas de riego complementarios por aspersión en los departamentos Río Cuarto y Juárez Celman de la provincia de Córdoba [13].

5. REFERENCIAS

- [1] NMX-O-180-SCFI-2003. Lineamientos generales para proyectos de sistemas de riego por aspersión.
- [2] Puiatti J.M.P., Crespi R.J., Rivetti A.R. Riego con equipos presurizados, Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo. Tomo XXXIV. N°2, pp.27-33, 2002.
- [3] International Standard ISO/DIS 11545: 2007 - Agricultural irrigation equipment –Center–pivot and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles – Determination of Uniformity of water distribution
- [4] Paco López – Sánchez, J.L. Fundamentos del cálculo hidráulico en los sistemas de riego y drenaje. Centro Nacional de Tecnología de regadíos. Edit. Mapa-Iryda. España. 1992.
- [5] Saldarriaga, J. *Hidráulica de tuberías*. Edit Alfaomega, 2008.
- [6] Carrión P., Montero J., Tarjuelo J.M. “Aplicación de la simulación al diseño de los sistemas de riego por aspersión”. *Métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería: Rev. Intern.*, **17** (3): 347-362, 2001.
- [7] Irrigation Code of Practice and Irrigation Design Standards, Irrigation New Zealand Inc. Sustainable Farming Fund, 2007. www.maf.govt.nz/sff
- [8] Howell T.A., Irrigation System Efficiencies. Pp. 80-92
- [9] Puiatti, J.M.P.; A. R. Rivetti y J. H. Schmalz, *Riego complementario en maíz (zea mays l.) en la región de Río Cuarto empleando el pronóstico climático extendido de 72 horas*.
- [10] Crespi, R.J., Rivetti, A.R. Riego por goteo. Edi. Blanco y Barchiessi. Río Cuarto. Cba. 1987
- [11] Lisiuk F.G., Zabalo P.A., Elaskar S.A.. “Análisis teórico y por elementos finitos de las pérdidas de carga en un sistema de riego de pivote central” En: *Mecánica Computacional XXVI*, Cba, pp1977-1996, 2007.
- [12] Çengel Y.A., Cimbala J.M. *Mecánica de Fluidos*. McGraw Hill. 2006
- [13] Dean R.A.; Maglione L.S.; Elaskar S.A. “Una perspectiva transdisciplinaria de un programa de investigación sobre riego complementario por aspersión.” En: *Avances en ingeniería rural 2007-2009*. Edición N. Di Leo, S. Montico, G. Nardón. 1ª ed. Rosario: UNR Editora, pp.477-483, 2009.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la SECyT de la Universidad Nacional de Río Cuarto por el apoyo brindado en el proyecto, al Ing. Mateo Puiatti y a la Ing. Ana Rivetti por las consultas brindadas.