

SISTEMA CAE APLICADO AL DISEÑO DE CONDUCCIONES DE AGUA POR GRAVEDAD EN CONDUCTOS CIRCULARES A PRESIÓN

GERMÁN EDUARDO GAVILÁN LEÓN
Profesor Asociado Universidad Industrial de Santander
e-mail ggavilan@uis.edu.co

JORGE ALBERTO GUZMÁN JAIMES
Profesor Asistente Universidad Industrial de Santander
e-mail jguzman@uis.edu.co

RESUMEN

Se explora el desarrollo y la implementación de un sistema CAE (Computer Aided Engineering) aplicado al diseño de conducciones de agua en conductos circulares a presión. Hoy en día las herramientas computacionales nos permiten integrar y manejar el gran volumen de información gráfica y no gráfica que implica el diseño en la ingeniería. Los sistemas CAE por su capacidad gráfica en el diseño de Ingeniería Civil permiten llevar la información topográfica directamente al sistema para ser procesada, analizada y finalmente representada mediante planos o archivos de intercambio. Se presenta la implementación de un sistema CAE que combina modelos físico matemáticos, técnicas y tecnologías informáticas para manejar, manipular, representar y analizar en forma dinámica e interactiva el problema a resolver.

PALABRAS CLAVE: CAE, conductos, pérdidas, conducciones, redes de distribución de agua.

INTRODUCCIÓN

La revolución informática ha producido grandes adelantos en los procesos de análisis y diseño en Ingeniería, llegando a revolucionar los métodos, la filosofía de diseño, la precisión de los cálculos, y en términos generales el control de todos los detalles que involucran el proyecto.

Los Ingenieros están abandonando métodos de diseño empíricos, o semi-analíticos para cambiarlos por métodos analíticos y dinámicos asistidos mediante herramientas computacionales. Muchos elementos gráficos de diseño y análisis (curvas, nomogramas, etc.) han vuelto a tomar su forma original (ecuaciones) para ser resueltas mediante la ayuda de computadoras en donde se utilizan técnicas Numéricas. Estas herramientas disponibles hoy, han permitido que el diseño en Ingeniería sea más dinámico, preciso y seguro, permitiendo crear modelos mas ajustados a la realidad que disminuyen los costos de diseño y ejecución.

El presente trabajo muestra el desarrollo e implementación de un prototipo CAE (Computer Aided Engineering) orientado al diseño de conducciones de Agua por Gravedad en el campo de la Ingeniería Civil.

LA INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR (CAE)

Los procesos de Diseño en Ingeniería Civil, involucran información proveniente de diferentes áreas, tales como la Topografía, Ing. de Materiales, Especificaciones Comerciales, Normas de Diseño, Recursos Disponibles, Reglamentaciones Gubernamentales, etc... que definen, limitan y normalizan el modelo usado para el Diseño. Los sistemas CAE son herramientas computacionales para ayudar en las tareas relacionadas en el proceso de transformar un concepto a un producto diseñado y detallado para su construcción.

La Ingeniería Asistida por computador es un Proceso Integral en el cual se incorpora información (Gráfica y/o no gráfica) a la cual se le aplica un modelo o conjunto de modelos físico matemáticos y técnicas computacionales con el fin de que nos permita analizar, visualizar, tomar decisiones, y representar el problema en todo el proceso de análisis y diseño (Figura 1).

A. Análisis en ingeniería

El análisis está relacionado con el establecimiento del modelo matemático que nos permita modelar el comportamiento del sistema cuando se encuentre en funcionamiento, determinando fuerzas, esfuerzos, pérdidas, parámetros físicos, etc., que definan el diseño geométrico y de materiales.

B. Diseño en ingeniería

El diseño está relacionado con el establecimiento de la forma geométrica de las partes del proyecto, los materiales y los procesos de ensamble que aseguren la integridad del sistema.

Los procesos de diseño los podemos dividir en tres etapas:

- Diseño conceptual
- Ingeniería de Diseño
- Diseño Detallado

Las herramientas básicas que un sistema CAE puede ofrecer en el proceso de diseño son:

- Representación Gráfica
- Bases de Datos
- Simulación
- Comunicación

El proceso empieza con el establecimiento de parámetros relacionados con la forma, el costo, la magnitud, y el funcionamiento dentro de los cuales se enmarca el diseño y termina con la entrega de la información que describe la forma de los elementos que constituyen el producto, los materiales, el proceso constructivo de manufactura, las instrucciones de ensamble, y las especificaciones técnicas.

- **Diseño Conceptual:** Es el establecimiento de la forma geométrica básica del sistema y/o de los elementos que permitan tomar una decisión.

- **Ingeniería de Diseño:** Actividad principal del diseño.

Se identifican conjuntos, subconjuntos y componentes.

Se inician bases de datos de información existente y se obtiene una geometría nominal.

- **Diseño Detallado:** Se analizan y especifican detalladamente los componentes para su construcción y/o manufactura.

- **Representación Gráfica:** El sistema debe permitir al usuario la posibilidad de representar gráficamente el modelo, en forma fácil, amigable, lógica y rápida en dos y/o tres dimensiones.

- **Bases de Datos:** La relación entre la información gráfica y no gráfica se realiza a través de una Base de Datos que puede ser sencilla o compleja. La decisión sobre el nivel de complejidad en el manejo de esta información depende del modelo necesario para la representación gráfica, el análisis y la información necesaria para llevar a cabo el diseño.

- **Simulación:** Permite analizar y observar un modelo dinámicamente, preferiblemente de una forma gráfica.

- **Comunicación:** Se entiende la capacidad de comunicación como la compatibilidad en la forma de registrar

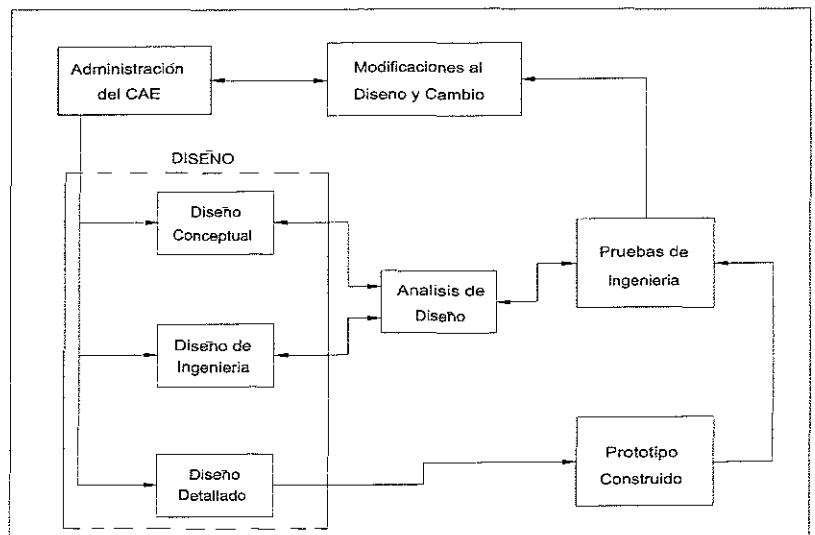


Figura 1. Modelo de desarrollo del sistema CAE

(migrar) la información y no la tecnología para transmitirla o transferirla. El soporte de estándares de formatos de intercambio gráfico (DXF, IGES, etc.) o texto (ASCII) permite la unión con el resto de los sistemas, para intercambiar información o para utilizar la propia en sistemas dedicados en funciones específicas de análisis o producción.

DISEÑO DE CONDUCCIONES DE AGUA POR GRAVEDAD

El abastecimiento de Asentamientos Humanos en sus diferentes campos (Agua, salud, vivienda, etc.), requiere que se diseñen sistemas complejos que satisfagan las necesidades de la comunidad. La necesidad de agua de las comunidades demandan estudios y soluciones que dependiendo de la región, topografía, disponibilidad y seguridad del recurso agua, varían en su complejidad y costo.

En los sistemas de abastecimiento de agua los subconjuntos básicos de diseño son:

- Sistema de captación (Captación, Aducción, Desarenador)
- Sistema de conducción (Gravedad, Bombeo, Mixta)
- Almacenamiento
- Tratamiento
- Distribución del agua para su consumo.

El diseño de conducciones de agua es el elemento que permite abastecer asentamientos humanos, en regiones en donde el recurso es inconstante, escaso o requiere llevarse a zonas específicas para su distribución y/o tratamiento. Son las condiciones topográficas los factores más preponderantes que limitan y definen el diseño de conducciones. Se designa como conducción al medio de transportar el caudal de agua de la bocatoma o desarenador al tanque regulador o a la planta de purificación. Los sistemas de conducción de agua para el abastecimiento de asentamientos humanos pueden ser de los siguientes tipos:

- Canales Abiertos
- Conductos Cerrados sin Presión
- Conductos Cerrados a Presión, en los cuales el agua se impulsa por gravedad o mediante estaciones de bombeo.

- Conducciones Mixtas.

Las diferentes macro etapas en el diseño de conductos a presión son (Figura 2):

- Selección de diferentes rutas de conducción
- Levantamiento Topográfico
- Fijación de la línea de conducción
- Análisis y diseño detallado de componentes
- Análisis y diseño de anclajes y accesorios
- Análisis y diseño de estructuras especiales.
- Planos, Informes, especificaciones, presupuesto

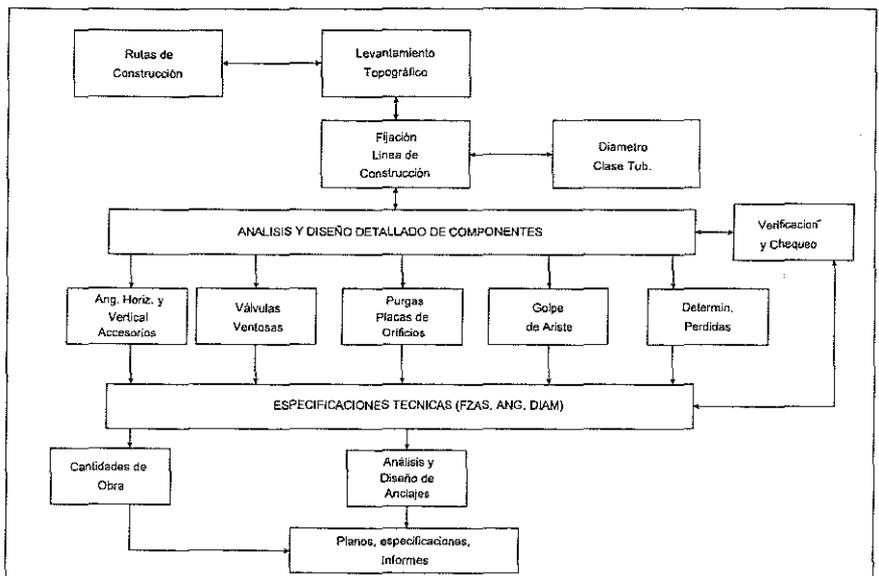


Figura 2. Modelo de diseño de conducciones a presión

MODELIZACIÓN DE LA RED

Los elementos básicos necesarios para describir la geometría de un sistema de red abierta son los tubos y los nodos. Un tubo es una sección de diámetro constante la cual no puede ser curva. Los nodos son los extremos de los tubos y se clasifican como nodos de unión (NU) y nodos limite (NL). Un sistema de red debe contener al menos un nodo limite.

Nodo de Unión (NU) : Es un punto en donde dos o mas tubos se unen y del cual se conoce su ubicación geográfica (Norte, Este, Cota). Los NU interconectan dos tubos cuando se presenta un cambio en el diámetro del tubo, rugosidad, existe salida de flujo a otra línea o se presenta un accesorio (Válvulas, codos, ventosas, purgas, etc). La propiedades (presiones y pérdidas) físicas del fluido son calculadas únicamente en los nodos.

Nodo Limite (NL): Es un punto en donde las propiedades hidráulicas son conocidas (Presión, velocidad) e interconectan o inician un tubo y se conoce la ubicación geográfica. Los NL representan los Tanques de almacenamiento, las tanquillas o las bombas de impulsión. Los NL pueden ser estáticos o dinámicos. Los Tanques o Tanquillas presenta una condición hidráulica conocida en su nivel de agua mientras que en las bombas se conoce la cabeza de impulsión, sin embargo estas condiciones varían en el tiempo de servicio del sistema, los niveles de agua de los tanques de almacenamiento son función del caudal de entrada y el de consumo.

Tubos : Son elementos que poseen un diámetro, longitud y coeficiente de rugosidad, en concordancia a productos comerciales existentes.

Tanques, Tanquillas : Son NL los cuales se analizan como un nodo con condiciones de presión conocidas. (Cota de elevación del nivel del agua).

Bombas : Son NL los cuales se analizan como un nodo que introduce energía al sistema (Cabeza de energía de impulsión).

Accesorios : Son NU (codos, derivaciones, expansiones, reducciones, válvulas, purgas, ventosas, etc.) que producen pérdidas de energía en el sistema.

MODELO HIDRÁULICO

El comportamiento de flujos en conductos cerrados a presión de redes abiertas (estructuras de gran longitud) esta descrito mediante las ecuaciones que gobiernan el flujo uniforme en tuberías conocidas comúnmente como ecuaciones de fricción (relacionan la energía perdida en el proceso del movimiento del fluido, Figura 3).

Flujo Uniforme : El flujo uniforme es aquel en el cual las características del flujo (presión y velocidad) en una tubería permanecen constantes en el espacio y en el tiempo. En un sistema de tuberías que describe una red abierta las fuerzas que actúan son tres: fuerzas de presión y fuerzas gravitacionales (Tratando de acelerar el flujo) y fuerzas de fricción (tratando de frenar el flujo). En el caso de flujo uniforme existe un equilibrio entre las fuerzas gravitacionales y de presión por un lado y las fuerzas de fricción por el otro.

Perdidas de energía : Cuando un fluido avanza a través de un conducto parte de la energía útil de que este dispone se transforma en calor. La energía transformada en calor deja de ser útil para el movimiento ya que el proceso es irreversible. La fricción que se genera entre partículas y entre estas y las paredes del conducto, choque de pequeños grupos de partículas debido a la turbulencia, choque de grandes masas con formación de remolinos debido a cambios súbitos de la geometría del conducto, generan pérdidas de energía localizadas a la largo del conducto. Las pérdidas por fricción y turbulencia se denominan 'pérdidas por fricción' ("Pérdidas mayores") y las pérdidas debidas a modificaciones súbitas de la geometría (válvulas, ampliaciones, contracciones, derivaciones, etc.) se llaman 'pérdidas locales' ("Pérdidas menores")

En el caso de conductos cerrados el único tipo de energía que puede perderse por razón del movimiento del fluido es la energía de presión, ya que la energía cinética debe permanecer constante si el área es constante y la energía potencial solo depende de la posición.

Perdidas por fricción: En 1850 Darcy, Weisbach y otros, dedujeron experimentalmente una formula, que posteriormente se derivaría por medio del análisis dimensional para determinar en un tubo la pérdida por fricción:

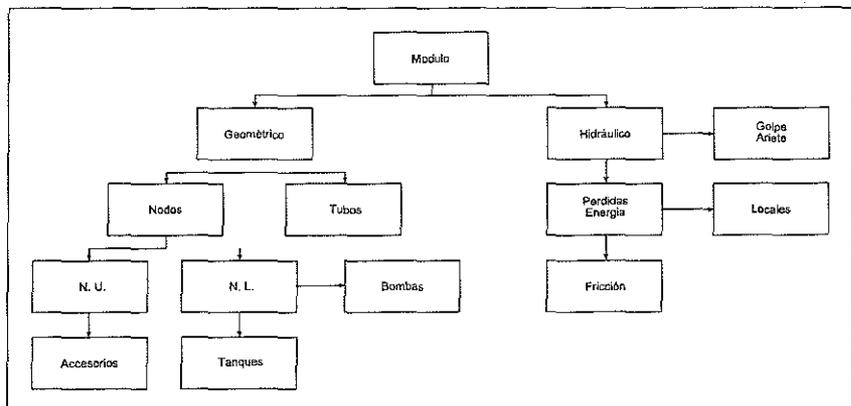


Figura 3. Modelo hidráulico

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

- h_f : Pérdidas por fricción en mts.
 D : Diámetro en mts
 f : Coeficiente de fricción, adimensional
 g : Aceleración de la gravedad, en mts/seg²
 L : Longitud del tubo en mts
 v : Velocidad media en mts/seg

El factor de fricción es adimensional y es función de la velocidad media del fluido, rugosidad absoluta de las paredes del tubo, el diámetro del tubo y la viscosidad del fluido. La ecuación anterior se conoce como ecuación racional para el calculo del flujo en tuberías. Esta ecuación tuvo gran aplicación a fines del siglo pasado y comienzos del presente, pero fue sustituida por ecuaciones empíricas en las primeras décadas debido a que no se conocían con exactitud las características del coeficiente de fricción 'f'. Estudios teórico experimentales han permitido en los últimos años conocer con exactitud las variables que afectan el coeficiente 'f' y han permitido regresar al uso de la ecuación racional para el calculo del flujo en tuberías.

Durante el siglo pasado y comienzos del presente se obtuvieron muchas formulas empíricas basadas en resultados experimentales de flujo de agua en tubos de diversos materiales. Una de las ecuaciones empíricas mas exitosas fue la de Hazen-Williams (1933), la forma original de esta ecuación fue la siguiente:

$$V = 0.8492 C R^{0.63} S_f^{0.54}$$

- V : Velocidad media en mts/seg
- C : Coeficiente de rugosidad del tubo (Coef. de Hazen-Williams)
- R : Radio hidráulico del tubo en mts
- Sf : Pendiente de la línea de energía

El coeficiente C depende solamente del material del tubo y no del diámetro, en estas condiciones C parece representar la rugosidad relativa del material. La ecuación de Hazen-Williams esta limitada a ciertas características del fluido y del flujo:

- El fluido debe ser agua a temperaturas normales
- El diámetro debe ser superior o igual a 2 pulgadas
- La velocidad en las tuberías se debe limitar a 3 mts/seg

Perdidas locales: Las tuberías de conducción que se utilizan en la practica están compuestas, generalmente, por tramos rectos y curvos para ajustarse a los accidentes topográficos del terreno, así como a los cambios que se presentan en la geometría de la sección y de los distintos dispositivos para el control de las descargas. Estos cambios originan perdidas de energía, distintas a las de fricción, localizadas en el mismo sitio del cambio de geometría o de la alteración del flujo.

El cambio fuerte en la forma geométrica del conducto, puede generar los fenómenos denominados separación y flujo secundario. En la separación debido al cambio fuerte en las paredes del conducto, la corriente del fluido se aparta de estas y la zona comprendida entre la corriente de fluido llamada 'vena viva' y las paredes se llena con fluido de baja velocidad. En la superficie de contacto entre la vena viva y el flujo de baja velocidad se produce un fuerte gradiente de velocidad con desarrollo de altos esfuerzos de fricción. Estos esfuerzos generan remolinos dentro de la zona de baja velocidad o zona muerta. La generación de remolinos consume energía lo cual se manifiesta como una perdida adicional.

La separación y el flujo secundario son las causas de las perdidas locales. Se acostumbra a calcular estas perdidas con una ecuación de la forma :

$$h_f = k \frac{v^2}{2g}$$

- v : Velocidad media del flujo
- k : Coeficiente de perdidas, que depende de la variación de la forma geométrica de en el conducto
- g : Gravedad (9.82 m/seg² ó 32.2 ft/seg²)

MODELAMIENTO DEL SISTEMA

En el análisis de sistemas de redes abiertas el principio usado es que en cada una de las uniones (nodos de las red) se debe cumplir la ecuación de continuidad y conservación de la energía. La energía total que posee un fluido en movimiento se compone de dos partes principales: cinética y potencial. La energía potencial a su vez se descompone en: energía de presión y energía de posición. Debido a la presión P existente en un punto la masa de fluido puede ascender hasta la altura sobre ese punto si tiene la libertad para hacerlo (es el peso por unidad de volumen del fluido).

Entre dos nodos (Ni,Nj) de la red correspondientes a un tubo del sistema se debe cumplir la ecuación de continuidad y :

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{i-j}$$

donde hi-j son las perdidas por fricción que se presentan en el tubo. En los nodos en donde se presenten perdidas locales, estas estarán de acuerdo a la ecuacion descrita y dependiendo del elemento que interaccione con el flujo.

DESARROLLO DEL PROTOTIPO

El prototipo desarrollado e implementado esta enmarcado dentro de la filosofía CAD y de forma iterativa permite el análisis y diseño de sistemas de conducción de agua en un entorno gráfico. PERDCOND permite al usuario el análisis y representación gráfica de una red abierta (Conducción) para su posterior modelización (Figuras 4, 5).

El programa esta organizado por medio de un conjunto de menús fáciles de usar, que permiten la construcción, importación, modelización y mantenimiento de la red. La primera versión de el software 'PERDCOND' fue desarrollado e implementado en el lenguaje Turbo Pascal V7.0 bajo el sistema operacional DOS. En una segunda versión se amplio su capacidad de análisis a sistemas de redes abiertas y su implementacion se realizo en un ambiente Windows mediante el lenguaje C++ de Borland. Su uso en condiciones minimas esta limitado a sistemas PC 486 o mayores con un mínimo de 4Mb de RAM y 10Mb libres de almacenamiento en Disco Duro, Tarjeta graficadora y mouse.

El prototipo desarrollado se comunica con otros sistemas mediante archivos de intercambio ASCII, DXF, TXT. La informacion topografica se lee desde hojas de calculo (EXCEL o QuatroPro) mediante un archivo con formato texto. El sistema se encarga de la representación en planta o en perfil y a los niveles de detalle que sean necesarios para la modelizacion de la red y los accesorios. Se modela hidraulicamente y permite la representación de gráficas piezometricas. La generación de planos de detalle se lleva a cabo mediante archivos de intercambio DXF y el detalle hidráulico y geométrico se puede manipular en archivos ASCII.

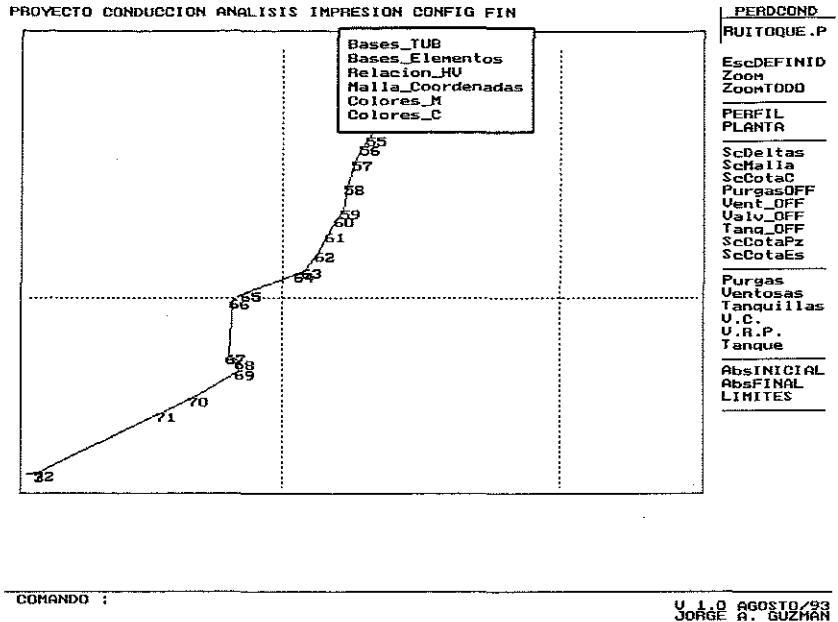


Figura 4. Pantalla de diseño Planimetrico (Planta)

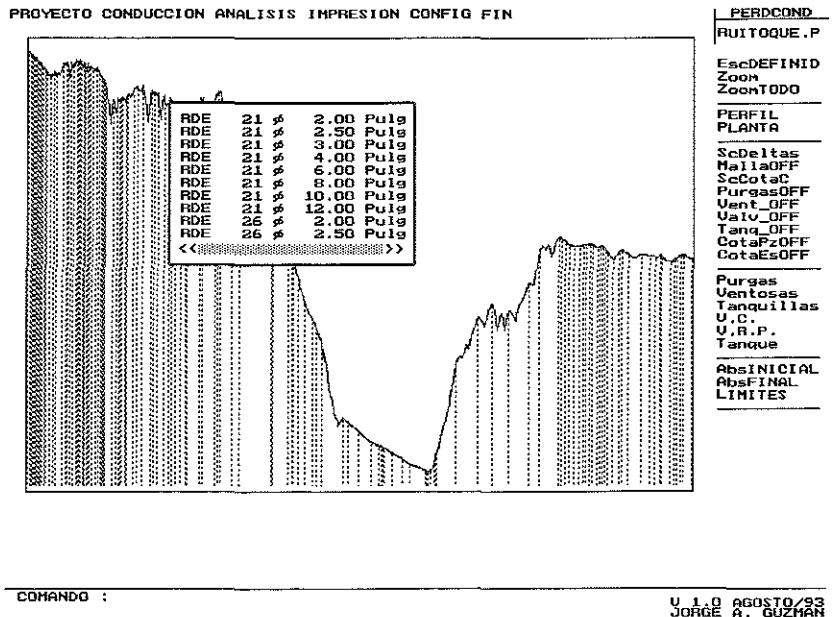


Figura 5. Pantalla de diseño altimetrico (perfil)

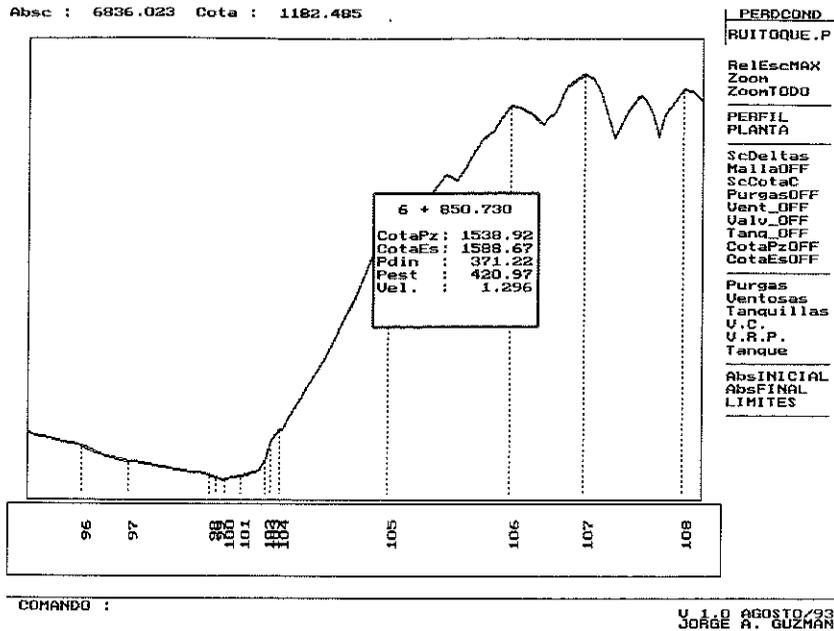


Figura 6. Pantalla de diseño de accesorios

CONCLUSIONES

El objetivo del presente paper fue presentar un sistema de diseño asistido por computador para el diseño de conducciones de agua por gravedad en tuberías circulares a presión. El modelo se implementó en ambiente WINDOWS en lenguaje C++. El usuario de este software podrá importar archivos de entrada en formato DXF (ACAD) ASCII o TXT (texto). El sistema se encarga de la representación en planta o en perfil y a los niveles de detalle que sean necesarios para la modelización de la red y los accesorios. Se modela hidráulicamente y permite la representación de gráficas piezométricas. La generación de planos de detalle se lleva a cabo mediante archivos de intercambio DXF y el detalle hidráulico y geométrico se puede en archivos ASCII. El modelo presentado forma parte de los resultados de la investigación "Sistemas de abastecimiento de agua asistidos por computador" financiado por la Universidad Industrial de Santander.

[3] GARAVITO, Luis Felipe. Diseño de Acueductos y Alcantarillado. Bogotá. 1987.

[4] CANO GALLEGO, Rodrigo. Flujos en Tuberías y Canales. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 1985.

[5] ETERNIT. Cálculos de Tubería de Fibrocemento. Bogotá. 1981.

[6] AUTOCAD MANUAL DE REFERENCIA. Autodesk, Inc. 1989.

[7] TURBO PASCAL MANUAL DE REFERENCIA. Borland, Inc. 1989.

BIBLIOGRAFÍA

[1] AROCHA R., Simon. Abastecimientos de Agua. Ediciones Vega. Venezuela 1980.

[2] RIVAS MIJARES, Gustavo. Abastecimiento de Agua y Alcantarillado. Segunda Edición. Ediciones Vega. Venezuela. 1976.