

# **CONFECCIÓN DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA DESDE UN SIG Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES**

**Tesis doctoral**

**Hugo J. Bartolín Ayala**

## **ÍNDICE DE CONTENIDOS**

---

### **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

- 1.1 JUSTIFICACIÓN
- 1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS
- 1.3 CONTEXTO GENERAL
- 1.4 ANTECEDENTES
- 1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

### **CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SU APLICACIÓN A LA GESTIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

- 2.1 DEFINICIÓN DE SIG
- 2.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS
- 2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SIG
  - 2.3.1 Modelos de datos geográficos
  - 2.3.2 Funciones analíticas de un SIG
- 2.4 APLICACIÓN DE LOS SIG EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO URBANO DE AGUA 46
- 2.5 NECESIDAD DE INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS

### **CAPÍTULO 3. MODELOS HIDRÁULICOS. EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN EPANET 2**

- 3.1 LOS MODELOS MATEMÁTICOS HIDRÁULICOS
  - 3.1.1 Tipos de modelos
    - 3.1.1.1 Modelos Estáticos y Dinámicos
    - 3.1.1.2 Modelos de Calidad y Cantidad
  - 3.1.2 Componentes de un modelo. Ecuaciones de comportamiento
  - 3.1.3 Ecuaciones de equilibrio del sistema
  - 3.1.4 Simulaciones en periodo prolongado
    - 3.1.4.1 Simulación en régimen estacionario o permanente (Steady-state simulation)
    - 3.1.4.2 Simulación en período prolongado o extendido (Extended-period simulation, EPS)
- 3.2 EL SIMULADOR HIDRÁULICO PANET 2
  - 3.2.1 Introducción
  - 3.2.2 Características generales de EPANET 2
  - 3.2.3 El módulo de cálculo y la caja de herramientas
  - 3.2.4 Inconvenientes de EPANET 2

## **CAPÍTULO 4. CONFECCIÓN DE MODELOS. APLICACIONES**

- 4.1 TIPOS DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN
  - 4.1.1 Modelos Estratégicos
  - 4.1.2 Modelos de Detalle
  - 4.1.3 Modelos Operacionales
  
- 4.2 CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA
- 4.3 PASOS PARA LA CONFECCIÓN DE UN MODELO
  - 4.3.1 Recopilación de información
  - 4.3.2 Esqueletización de la red
  - 4.3.3 Medidas de campo
  - 4.3.4 Asignación de consumos
  - 4.3.5 Calibración del modelo
  - 4.3.6 Análisis y mantenimiento
  
- 4.4 EVOLUCIÓN Y TENDENCIA FUTURA DE LOS MODELOS
- 4.5 VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE LOS MODELOS EN UN ENTORNO SIG

## **CAPÍTULO 5. INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS EN UN SIG. LA APLICACIÓN GISRED**

- 5.1 INTRODUCCIÓN
- 5.2 LA APLICACIÓN GISRED
  - 5.2.1 Justificación del desarrollo de la aplicación GISRed
  - 5.2.2 Concepción general de la aplicación
  - 5.2.3 Principales prestaciones de la aplicación
  - 5.2.4 Diagrama del flujo de trabajo de la aplicación GISRed
  - 5.2.5 Estructura básica de datos de la aplicación
  - 5.2.6 Temáticas gráficas
  - 5.2.7 Descripción del procedimiento de construcción de un modelo con GISRed
    - 5.2.7.1 Creación de Proyectos. Importación de la Información
    - 5.2.7.2 Herramientas de Edición y Propiedades
    - 5.2.7.3 Herramientas de Depuración y Verificación
    - 5.2.7.4 Herramientas de simplificación de modelos
    - 5.2.7.5 Interpolación de Cotas
    - 5.2.7.6 Asignación de Demandas
    - 5.2.7.7 Calibración del modelo
    - 5.2.7.8 Cálculo y análisis de resultados
- 5.3 APLICACIONES
- 5.4 CONCLUSIONES

## **CAPÍTULO 6. CONCEPTOS DE LA TEORÍA DE GRAFOS**

- 6.1 INTRODUCCIÓN
- 6.2 DEFINICIONES
- 6.3 REPRESENTACIÓN DE GRAFOS
  - 6.3.1 Matriz de adyacencias
  - 6.3.2 Listas de adyacencias
  - 6.3.3 Grado de conectividad
- 6.4 ALGORITMOS DE BÚSQUEDA EN GRAFOS
  - 6.4.1 Búsqueda en profundidad (Depth-First Search, DFS)

- 6.4.2 Búsqueda en amplitud (Breadth-First Search, BFS)
- 6.5 ÁRBOLES GENERADORES O DE EXPANSIÓN Y ÁRBOLES DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE (MINIMUM SPANNING TREE)
  - 6.5.1 Algoritmo de Boruvka
  - 6.5.2 Algoritmo de Kruskal
  - 6.5.3 Algoritmo de Prim
  - 6.5.4 Árbol de trayectos mínimos. El algoritmo de Dijkstra
  - 6.5.5 Topología de árbol
  - 6.5.6 Ordenación topológica
- 6.6 MALLAS BÁSICAS O INDEPENDIENTES DE UN GRAFO
- 6.7 CONJUNTO DE CORTE (CUT-SET)
- 6.8 BOSQUES DE ÁRBOLES
- 6.9 GRAFOS DIRIGIDOS (DÍGRAFOS)

## **CAPÍTULO 7. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA GESTIÓN DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA**

- 7.1 INTRODUCCIÓN
- 7.2 APLICACIONES A LA GESTIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN
- 7.3 PROPIEDADES TOPOLÓGICAS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA
- 7.4 ALGORITMO DE VERIFICACIÓN DE LA CONECTIVIDAD DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA
- 7.5 ANÁLISIS DE LAS SUBREDES Y SUBSISTEMAS HIDRÁULICOS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA
- 7.6 ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE (MINIMUM SPANNING TREE)
  - 7.6.1 Criterios de ponderación de las líneas de una red
  - 7.6.2 Particularización de los algoritmos de búsqueda para clasificar los elementos del árbol de expansión
  - 7.6.3 Estructura de datos para albergar las propiedades topológicas de una red de distribución
  - 7.6.4 Identificación de ramas y cuerdas. Creación de la topología de árbol
    - 7.6.4.1 MST mediante el algoritmo de Kruskal
    - 7.6.4.2 MST mediante el algoritmo de Prim
    - 7.6.4.3 MST mediante el algoritmo de Prim apoyado en una caché de memoria
  - 7.6.5 Orden topológico de una red. Definición de trayectos y subárboles
  - 7.6.6 Conjunto de corte
  - 7.6.7 Generalización a redes con varias fuentes de suministro
  - 7.6.8 Mantenimiento actualizado del MST. Cambios en tiempo real
- 7.7 PROCEDIMIENTOS PARA ACUMULAR UNA PROPIEDAD ASIGNADA A LOS NUDOS O TUBERÍAS DE LA RED SITUADOS AGUAS ABAJO DE UNA RAMA
  - 7.7.1 Acumulación de propiedades asociadas a nudos situados aguas abajo de una rama
  - 7.7.2 Acumulación de propiedades asociadas a tuberías situadas aguas abajo de una rama

## **CAPÍTULO 8. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS AL ANÁLISIS DE FLUJOS Y LA SECTORIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA**

### **8.1 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE LA RED. DETECCIÓN DE CUELLOS DE BOTELLA Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE SUMINISTRO**

#### **8.1.1 Ejemplo. Análisis de los cuellos de botella en una red de transporte**

### **8.2 ANÁLISIS DE CERRADAS EN UNA RED (POLÍGONOS DE CORTE)**

#### **8.2.1 Exploración e identificación de cerradas**

#### **8.2.2 Detección de zonas aisladas tras la identificación de la cerrada**

#### **8.2.3 Análisis de criticidad en la red**

### **8.3 APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA SECTORIZACIÓN**

#### **8.3.1 Introducción**

#### **8.3.2 Identificación de sectores hidrométricos básicos**

#### **8.3.3 Agrupación de sectores hidrométricos básicos. Sectores hidrométricos de modulación**

#### **8.3.4 Ejemplo de identificación de sectores básicos y sectores de modulación**

#### **8.3.5 Ayudas a la sectorización**

##### **8.3.5.1 Ejemplo de sectorización automática de una red**

## **CAPÍTULO 9. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA ESQUELETIZACIÓN DE MODELOS DE REDES**

### **9.1 INTRODUCCIÓN**

### **9.2 METODOLOGÍA DE ESQUELETIZACIÓN DE UN MODELO**

### **9.3 ELIMINACIÓN DE RAMAS TERMINALES**

#### **9.3.1 Procedimiento implementado en ordenador**

##### **9.3.1.1 Observaciones**

### **9.4 ELIMINACIÓN DE NUDOS INTERMEDIOS**

#### **9.4.1 Criterios para llevar a cabo la simplificación**

##### **9.4.1.1 Traslado de la demanda en el nudo intermedio (si existe)**

##### **9.4.1.2 Obtención de las características físicas de la tubería equivalente**

#### **9.4.2 Procedimiento implementado en ordenador**

##### **9.4.2.1 Observaciones**

### **9.5 REDUCCIÓN DE MALLAS SIMPLES**

#### **9.5.1 Criterios prácticos para la identificación y eliminación de mallas simples**

##### **9.5.1.1 Identificación de las mallas simples y sus líneas de mayor y menor resistencia**

##### **9.5.1.2 Obtención de las características físicas de la tubería equivalente**

#### **9.5.2 Procedimiento implementado en ordenador**

##### **9.5.2.1 Observaciones**

##### **9.5.2.2 Caso particular de mallas aparentemente simples formadas dos cuerdas**

### **9.6 REDUCCIÓN DE MALLAS COMPLEJAS**

#### **9.6.1 Criterios prácticos para llevar a cabo la simplificación**

##### **9.6.1.1 Identificación de las mallas básicas candidatas a ser abiertas**

##### **9.6.1.2 Identificación del subtrayecto de la malla a reforzar**

##### **9.6.1.3 Refuerzo de las tuberías del subtrayecto**

##### **9.6.1.4 Estrangulamiento de las tuberías del subtrayecto complementario**

- 9.6.2 Procedimiento implementado en ordenador
- 9.6.2.1 Observaciones

- 9.7 PROCEDIMIENTO GENERAL IMPLEMENTADO DE SIMPLIFICACIÓN DE UNA RED COMPLEJA
- 9.8 PARÁMETROS LÍMITES Y PRECISIÓN DEL MODELO SIMPLIFICADO
- 9.9 EJEMPLO DE ESQUELETIZACIÓN DEL MODELO DE UNA RED

## **CAPÍTULO 10. PROBLEMÁTICA DE LOS MODELOS REALES**

- 10.1 INTRODUCCIÓN
- 10.2 ALMACENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA LA CONFECCIÓN DE ARCHIVOS HISTÓRICOS
- 10.3 NUEVAS FUNCIONALIDADES PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE LA INFORMACIÓN DE LA RED
- 10.4 NUEVAS FUNCIONALIDADES PARA LA GESTIÓN DE LA DEMANDA AUTORIZADA
  - 10.4.1 Introducción
  - 10.4.2 Cálculo de la demanda por acometidas
  - 10.4.3 Agrupación de las demandas por sectores hidrométricos de consumo (DMAs)
  - 10.4.4 Modelo conceptual del sistema de suministro a una red urbana de distribución de agua orientado a la Gestión de la Demanda
    - 10.4.4.1 Entidades
    - 10.4.4.2 Puntos de suministro (individual, parcial y totalizador)
    - 10.4.4.3 Relaciones

## **CAPÍTULO 11. BALANCES HÍDRICOS EN LOS SECTORES HIDROMÉTRICOS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA**

- 11.1 INTRODUCCIÓN
- 11.2 JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO ADOPTADO
- 11.3 CÁLCULO DEL VOLUMEN INYECTADO A CADA DISTRITO HIDROMÉTRICO
  - 11.3.1 Introducción
  - 11.3.2 Tratamiento de los datos en tiempo real
  - 11.3.3 Datos de partida
  - 11.3.4 Procedimiento básico para el cálculo del volumen inyectado a cada DMA
  - 11.3.5 Procedimiento implementado para el cálculo del volumen inyectado a cada DMA
    - 11.3.5.1 Identificación de los subperíodos de agrupación
    - 11.3.5.2 Cálculo de los volúmenes acumulados por los caudalímetros en cada subperíodo
    - 11.3.5.3 Cálculo de los volúmenes acumulados por cada asociación DMA-Caudalímetro en cada subperíodo
    - 11.3.5.4 Cálculo del volumen suministrado / almacenado en los depósitos en cada subperíodo
    - 11.3.5.5 Cálculo de los volúmenes inyectados a cada DMA
  - 11.3.6 Resumen de tablas de resultados generadas durante el proceso de cálculo del volumen inyectado a cada DMA
- 11.4 CÁLCULO DEL VOLUMEN AUTORIZADO EN LOS PUNTOS DE SUMINISTRO
  - 11.4.1 Introducción
  - 11.4.2 Procedimiento para llevar a cabo la corrección del consumo

- 11.4.2.1 FASE 1: Determinación del volumen registrado en las acometidas
- 11.4.2.2 FASE 2: Distribución del volumen de las acometidas entre los puntos de suministro terminales
- 11.4.3 Ejemplo gráfico de aplicación del procedimiento

## 11.5 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO HÍDRICO

- 11.5.1 Introducción
- 11.5.2 Procedimiento básico para el cálculo del rendimiento
- 11.5.3 Ejemplo gráfico de aplicación del procedimiento

## 11.6 CONCLUSIONES

## **CAPÍTULO 12. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS**

- 12.1 CONCLUSIONES
- 12.2 APORTACIONES ORIGINALES DE LA TESIS
- 12.3 DESARROLLOS FUTUROS

# ANEXOS

## **ANEXO 1. MODELO LÓGICO DE LA GEODATABASE DE LA EXTENSIÓN GISRED**

- A1.1 MODELO LÓGICO DE LA GEODATABASE PRINCIPAL DE LA EXTENSIÓN GISRED
  - A1.1.1 Tablas de Declaraciones
  - A1.1.2 Tablas de Usuarios
  - A1.1.3 Tablas de Cartografía de Red
  - A1.1.4 Tablas de Operaciones
  - A1.1.5 Tablas de Mediciones
  - A1.1.6 Tablas de Sectores
  - A1.1.7 Tablas de Suministros
  - A1.1.8 Tablas de Consumos
  - A1.1.9 Auditoría
- A1.2 INCORPORACIÓN DE INFORMACIÓN A LA GDB

## **ANEXO 2. CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA A PRESIÓN MEDIANTE LA EXTENSIÓN GISRED**

- A2.1 INTRODUCCIÓN
- A2.2 INSTALACIÓN DE LA EXTENSIÓN GISRED
- A2.3 CARGA DE LA EXTENSIÓN
- A2.4 CONFIGURACIÓN DE UN PROYECTO GISRed
- A2.5 VALORES POR DEFECTO DEL PROYECTO
- A2.6 AGREGAR ARCHIVOS CAD AL ESCENARIO Y FIJAR PROPIEDADES
  - A2.6.1 Fijar las propiedades de los temas procedentes de dibujos CAD
- A2.7 IMPORTAR LA CAPA DE TUBERÍAS
- A2.8 DETECCIÓN Y DEPURACIÓN DE ERRORES
  - A2.8.1 Comprobación de la conectividad de la red
  - A2.8.2 Herramientas de edición
  - A2.8.3 Añadir elementos
  - A2.8.4 Edición de propiedades
- A2.9 INTERPOLACIÓN DE COTAS
  - A2.9.1 Generación de un temático de cotas
- A2.10 ASIGNACIÓN DE CONSUMOS
  - A2.10.1 Reparto de consumos por calles
  - A2.10.2 Definición de una curva de modulación
  - A2.10.3 Asignación de consumos registrados por calles
  - A2.10.4 Asignación del consumo no registrado
- A2.11 LEYES DE CONTROL
  - A2.11.1 Definir leyes de control simples para la válvula reductora de presión
- A2.12 OPCIONES DE CÁLCULO
- A2.13 SIMULACIÓN
  - A2.13.1 Exportación del modelo a Epanet 2
  - A2.13.2 Simulación desde GISRed

## **ANEXO 3. EXAMPLE OF A NETWORK MODEL CALIBRATION**

- A3.1 INTRODUCTION
- A3.2 NETWORK PROPERTIES
- A3.3 CALIBRATION PROCESS
- A3.4 GROUPING THE NETWORK

- A3.5 CALIBRATION INPUT FILES
- A3.6 RUNNING A CALIBRATION AND IMPORTING RESULTS
- A3.7 VIEWING CALIBRATION RESULTS
  - A3.7.1 STATISTICS

#### **ANEXO 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**