

CAPÍTULO III: EL MÉTODO DE SIMULACIÓN POR REDES (MESIR)

III.1. Descripción

El método de simulación por redes es una técnica numérica para la solución de muchos tipos de procesos físicos que pueden formularse mediante un conjunto de ecuaciones, o modelo matemático. Partiendo de éstas el procedimiento consiste, en primer lugar, en elaborar un "modelo red" o circuito eléctrico equivalente al proceso, y en segundo lugar, en simular dicho proceso obteniendo la solución numérica mediante un programa adecuado para la resolución de circuitos eléctricos.

Un modelo en red se considera equivalente a un determinado proceso cuando, en su descripción, las ecuaciones del modelo matemático discretizadas y las ecuaciones del modelo en red para un elemento del volumen o celda elemental, correspondientes a variables análogas, coinciden.

¿Cómo se elabora el modelo en red? La técnica consiste en reticular el espacio en elementos de volumen o celdas elementales; al aplicar a estas reticulaciones las ecuaciones diferenciales o las ecuaciones de balance, se obtienen un conjunto de ecuaciones en diferencias finitas que se constituyen en el punto de partida para la obtención del modelo en red. Una adecuada correspondencia entre variables dependiente del problema y variables eléctricas (resistencias, condensadores), tensiones e

intensidades, permite interpretar los resultados de la simulación en términos del proceso que se modela. La asociación de celdas, de acuerdo con la geometría del problema, configura el modelo en red correspondiente a todo medio finito. El método es tanto más preciso cuanto mayor sea el número de celdas. Las condiciones de contorno e iniciales se incorporan al modelo mediante cambios sencillos en la programación introducida en el programa de simulación de circuitos eléctricos.

En el caso de los procesos de infiltración de humedad en el suelo, la posibilidad de elaborar modelos en red representativos de los mismos, es decir, el hecho de que admitan redes eléctricas equivalentes, supone no sólo la equivalencia matemática sino, también, la equivalencia física entre las variables características de unos y otros procesos (infiltración y eléctricos).

Los dispositivos o componentes característicos que representan el modelo en red, llamados monpuertas, pueden ser de los siguientes tipos:

a- Monopuertas pasivas. En función de la relación expresada entre las variables de flujo de calor y temperatura que obedecen a la ley de corrientes de Kirchhoff, LCK, y a la ley de voltajes de Kirchhoff, LVK, las monopuertas pasivas tienen nombres específicos:

Monopuerta resistiva. En esta simulación estas monopuertas son únicamente usadas como elementos auxiliares, los cuales se usan en situaciones de capas impermeables, al ponerlas va a limitar el paso del flujo de agua a través del suelo. Una monopuerta resistiva es lineal.

Monopuertas resistivas no lineales, se definen a través de las funciones que las caracterizan, $J(t) = F_R^{-1}(X)$. Constituyen, en definitiva fuentes controladas de corriente o tensión respectivamente.

La representación simbólica de una monopuerta resistiva se muestra en la figura 3.1. La traducción al modelo en red es una resistencia de valor R ohmio para el caso lineal o una fuente controlada por tensión para el caso no lineal.

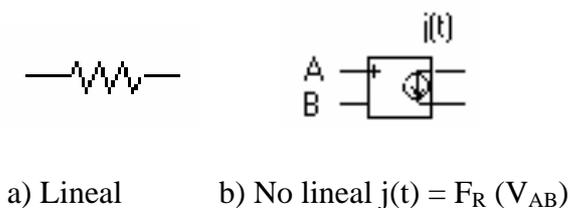


Figura 3.1 Representación simbólica de monopuertas resistivas

Monopuertas capacitivas. Es un elemento de circuito asociado a una relación entre la variable flujo de agua y la derivada temporal de la variable contenido volumétrico de agua en una misma profundidad de suelo, mediante una función no dependiente del tiempo que designaremos como capacidad, C .

$$\theta(t) = C di(t) / d(t)$$

En estas monopuertas se producen algún tipo de almacenamiento, sin pérdidas (no hay disipación energética), y su estado que no cambia instantáneamente, tiene en cuenta todas las operaciones llevadas a cabo en el pasado (se trata de elementos con memoria)-

La representación simbólica de la monopuerta capacitiva lineal se muestra en la figura 3.2. La traducción en red es un condensador eléctrico de valor C Faradio.

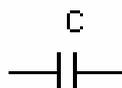


Figura 3.2 Representación simbólica de una monopuerta capacitiva

Los procesos de almacenamiento y disipación de energía, bajo la hipótesis de continuidad del medio, se originan en todos los puntos del sistema. Los elementos R y C se identifican sin embargo con regiones pequeñas y finitas del medio y sus conexiones con las otras puertas se realizan con enlaces ideales de energía, es decir, con conductores de resistencia nula. El que cada elemento pueda ser caracterizado por un par de variables conjugadas con una única ecuación constitutiva entre ellas es una hipótesis básica en el MESIR que deriva de la teoría de redes. Físicamente equivalente a decir que es posible elegir un elemento de volumen lo suficientemente pequeño como para que su tiempo de relajación interna sea mucho menor que el del sistema global, pero suficientemente grande como para que las fluctuaciones de las variables que describe el sistema en él sean despreciables.

b- Monopuertas activas. En éstas se produce una aportación o extracción de energía al sistema. Entre éstas cabe distinguir:

Fuentes constantes. Son monopuertas definidas de acuerdo con las expresiones $F_j(J) = 0$ y $F_x(X) = 0$ para fuentes de flujo o fuerza respectivamente. Tienen asignado un sentido (o signo) que

indica la dirección en que fluye la energía. La representación simbólica es la figura 3.3a; eléctricamente se corresponde a pilas o generadores de corriente constante.

Fuentes controladas. Se trata de monpuertas especiales asociadas a relaciones constitutivas entre variables, conjugadas o no, expresadas mediante cualquier función que no contiene explícitamente el tiempo. Se trata de elementos de entrada múltiples con una única salida que corresponde a un flujo o una fuerza que depende funcionalmente de otros flujos o fuerza de distintas ramas o nudos del mismo circuito. En ocasiones las fuentes controladas no aportan energía desde el exterior sino desde un punto u otro del circuito. Estas fuentes van a permitir especificar acoplamientos energéticos de distinto tipo.

Existen cuatro tipos de fuentes controladas por una sola variable:

$X = F_x(X_c)$, fuente de tensión controlada por tensión.

$X = FJ(J_c)$, fuente de tensión controlada por corriente.

$J = FJ(J_c)$, fuente de corriente controlada por corriente.

$J = FX(X_c)$, fuente de corriente controlada por tensión.

F designa una función arbitraria de la variable de control.

La acción de control puede ser ejercida por una o mas variables y las funciones de control pueden ser complejas.

Aunque las funciones que especifican el control de estas fuentes cubren un espectro suficientemente grande, en ocasiones es necesario recurrir a la implementación de circuitos auxiliares en el modelo en red para conseguir su equivalencia con el modelo matemático.

La representación simbólica de estas fuentes se muestran en la figura 3.3b.

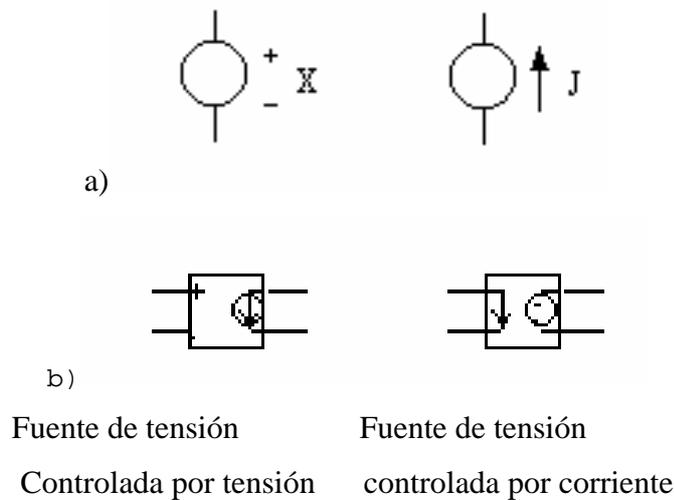


Figura 3.3 representación simbólica de las monpuertas activas

a) fuentes constante b) fuentes controladas por una variable

<p>Elementos lineales:</p> <ul style="list-style-type: none"> Resistencias (R) Condensadores (C) Fuentes constantes de tensión y corriente
<p>Elementos no lineales:</p> <ul style="list-style-type: none"> Fuentes controladas no lineales de tensión y corriente

Tabla 3.1. Elementos de circuito

En términos de componentes el software elegido en esta memoria para la simulación, PSPICE [PSPICE, 1994], es capaz de reconocer un largo catálogo de componentes eléctricos. La tabla 3.1 lista los que van a ser utilizados en esta memoria.

III.2. El MESIR, un método numérico

En el Método de simulación por redes, el punto de partida es siempre el modelo matemático de un cierto proceso, esto es, un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales (EDP) espacio temporales;

la discretización de la variable espacial permite establecer el modelo en red equivalente. Ésta es la única manipulación directa que se hace de las ecuaciones.

El modelo en red es el formato que se da al modelo matemático para que pueda ser utilizado como entrada (fichero) en un programa de resolución de circuitos eléctricos como PSPICE [Nagel, 1975; PSPICE, 1994]. Este software es el que resuelve las ecuaciones numéricamente. A continuación exponemos las diferencias de estrategias más notables, propias de este método, el compararlo con otros métodos clásicos.

Cuando en una ecuación en derivadas parciales se hace una doble reticulación, espacial y temporal, se reemplazan de hecho las derivadas parciales por aproximaciones algebraicas, lo que conduce a un conjunto de ecuaciones algebraicas que aproximan las EDP; para la solución numérica de estas se utiliza un software adecuado, generalmente un software de lenguaje propiamente matemático. Este procedimiento es la base de los bien conocidos métodos numéricos de diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos.

Como ya se a comentado, la elaboración del modelo en red pasa por la reticulación espacial, pero no temporal; la variable independiente tiempo se mantiene como variable continua. Se parte, pues, de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales cuya reticulación espacial las convierte en ecuaciones diferenciales ordinarias en el tiempo, que son las del circuito correspondiente a una celda elemental. En el MESIR (al igual que en el llamado método de líneas) la reticulación es sucesiva; una primera etapa de reticulación espacial de la que se obtiene el modelo en red y una segunda etapa, de reticulación temporal, realizada por el propio software de resolución de circuitos en el proceso de simulación.

III.3. Simulación

Una vez traducido el modelo en un lenguaje interpretable por Pspice, se ejecuta (simula) en este software el cual proporciona toda la información solicitada. De esta forma se obtienen los datos correspondientes a medidas típicas de laboratorio con un margen de error despreciable y sin afectar al circuito; más aún, pueden alterarse las condiciones iniciales de contorno, y las características de humedad del medio con sencillos cambios en el programa, y el análisis puede aportar datos sobre el

comportamiento del circuito más allá de los límites virtuales que se pueden obtener con medidas reales de laboratorio.

Además es posible la parametrización de alguna de las características a estudiar y solicitar un barrido de la misma para un determinado rango de valores. Esto permite observar directamente la influencia de cada uno de los parámetros del proceso en la solución.

El conjunto de tareas que componen el proceso de simulación puede ser agrupado en los tópicos (o algoritmos de computación).

- a) Formulación de ecuaciones
- b) Solución de ecuaciones lineales
- c) Solución de ecuaciones no lineales
- d) Integración numérica

PSPICE es miembro de la familia de programas de simulación de circuitos SPICE2 (Nagel, 1975); mucho más potente y rápido que sus predecesores, fue desarrollado en la universidad de California en los años setenta y utiliza algoritmos numéricos más refinados con formatos de entrada y salida idénticos. El uso extendido de PSPICE da fe de su capacidad para el tratamiento de una extensa variedad de problemas en simulación de circuitos, resolviendo:

- a) Respuesta en corriente continua
- b) Respuesta transitoria y análisis de Fourier en el dominio de la frecuencia
- c) Análisis de pequeña señal en corriente alterna y distorsión

De estas posibilidades nuestro interés se ciñe al estudio de transitorios y estacionarios.

En el análisis de continua PSPICE determina el punto de trabajo, es decir, los valores de polarización de sus componentes en ausencia de excitaciones alternas. Para el análisis transitorio PSPICE parte del intervalo de tiempo $(0,t)$ solicitado, que puede ser menor o mayor que la duración del transitorio, y facilita los datos en forma de listado o mediante gráficas. Si los resultados se quieren en forma tabular el usuario debe indicar el instante inicial, el final, el paso temporal y el número de

variables listadas; si se solicitan en forma gráfica, una simple sentencia de programa permite organizarlos y almacenarlos para ser utilizados con ese propósito en cada momento.

Los algoritmos utilizados en PSPICE, que se documenta en la tesis de Nagel son el resultado de implementaciones, modificaciones y comparaciones cuidadosas de los métodos numéricos existentes en el contexto especial de la simulación especial de circuitos. El objeto de la tesis es seleccionar los métodos de simulación de circuitos más exactos y eficaces, con una mínima interacción por parte del usuario.

La síntesis de entrada no requiere especiales disposiciones ordenadas de datos, su estilo puede catalogarse más bien como libre y dispone de una razonable fuente de datos que se adjudican por omisión a los componentes cuando estos no se especifican en detalle. También realiza un buen número de chequeos para asegurar que el circuito a sido introducido correctamente y que el resto de las sentencias de programa están bien escritas, advirtiendo al programador de posibles errores mediante mensajes previos a la ejecución.

En definitiva, un usuario principalmente necesita especificar un número mínimo de parámetros y controles de simulación para extraer unos resultados de simulación aceptables.

El programa se estructura como un listado que contiene todos los componentes eléctricos del circuito (aunque existe la posibilidad de organizar el programa mediante subcircuitos), resistencias, condensadores, fuentes, interruptores, etc., que se introducen uno a uno indicando el nombre, valor, nudos de conexión y otros parámetros característicos.

La simulación está estructurada en cinco subprogramas principales, que interaccionan entre ellos a través de una estructura de datos que es almacenada en un área común del programa. Estos subprogramas son: *entrada, organización, análisis, salida y utilidades*.

III.4. Ventajas e inconvenientes del MESIR

Una de las ventajas del método es que permite una visualización casi inmediata del proceso de infiltración de agua (representado esencialmente en las variables corriente eléctrica y potencial), obscurecida en los métodos numéricos clásicos debido al complejo aparato matemático utilizado.

Cabe señalar la ventaja que supone un buen conocimiento de la teoría de circuitos a la hora de implementar el modelo en red; no obstante podemos afirmar que se precisa poco esfuerzo para familiarizarse con el método, ya que son bastante reducidas las agrupaciones de términos de las expresiones matemáticas que se convierten en elementos diferenciados (dispositivos eléctricos individuales) o en partes del circuito (subcircuitos).

En cuanto a la manipulación y elaboración del programa podemos afirmar que las dificultades son mínimas. Su presentación bajo entorno Windows (tanto para PC como para estación de trabajo) se constituye en una guía constante para el programador, y la nomenclatura utilizada, organizada mediante una ordenación de sus nudos y componentes eléctricos, permiten el acceso inmediato a las tensiones y corrientes en toda la red, magnitudes equivalentes al contenido volumétrico de agua y a la infiltración, respectivamente.