

## **Simulación de cambios estructurales y análisis de escenarios<sup>1</sup>**

*Simulation of structural changes and scenario analysis*

**Oswaldo Terán\* y Carlos Domingo\***

### **Resumen**

Se utiliza un ejemplo sencillo para lograr la simulación del cambio estructural con las herramientas que ofrece el lenguaje de simulación GLIDER desarrollado en la Universidad de los Andes. La experiencia lograda con el ejemplo permite determinar la información necesaria para lograr la simulación del Cambio Estructural. Finalmente se propone ampliaciones del lenguaje GLIDER para identificar una estructura, considerar la posibilidad de declarar e inicializar este tipo de variables, y permitir las instrucciones de dirección del Cambio Estructural, todo a fin de hacer posible para el usuario la simulación del cambio estructural.

### **1. Cambio estructural y técnica de los escenarios**

Desde hace varias décadas se han utilizado, de forma satisfactoria técnicas de la Investigación de Operaciones para ayudar a los estudiosos y administradores de sistemas sociales en la comprensión de los mismos, pero desde la década de los años 70 el ambiente de los sistemas sociales (en los países industrializados) se ha hecho bastante incierto dada la rapidez con que se han producido los cambios, lo que ha aumentado la incertidumbre y disminuido considerablemente la utilidad de estas técnicas. Surge entonces la técnica de los escenarios como una herramienta apropiada, por ejemplo, para orientar a la gerencia en la toma de decisiones en un ambiente empresarial incierto (Wack, 1985b).

---

\* Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales

Se entiende como escenario al conjunto de circunstancias tanto inciertas como predefinidas cuyas consecuencias pueden o no ser conocidas, que rodean al sistema social y conforman el medio ambiente del mismo. De manera más concreta, un escenario es una historia, una sucesión de acontecimientos que describe un supuesto destino del sistema bajo estudio. Tal historia es imaginada pero se apoya en un conocimiento lo más completo posible del sistema al cual se aplica, y en casos similares actuales o históricos. Pueden generarse múltiples escenarios aplicables al mismo sistema y puede asignárseles valores diferentes de probabilidad de ocurrencia.

Con el análisis de escenarios se pretende ayudar a quienes toman decisiones, construyendo un conjunto pertinente donde se consideren distintas posibilidades para elementos inciertos que influyen de manera significativa en el sistema. El estudio de los escenarios implica realizar simulaciones que contribuyen a familiarizar a quienes administran el sistema con los riesgos futuros y con las probables decisiones que tendrán que tomar en medio de tales circunstancias. También debe conducirlos a cuestionar las suposiciones acerca del medio ambiente del sistema, a la vez que les ayuda a reorganizar sus ideas (Wack, 1985b)

Por lo general dentro de este análisis es necesario considerar el cambio estructural. En un sistema hay cambio estructural cuando se agregan o eliminan elementos, hay cambio de las relaciones entre los elementos del sistema, o los parámetros cambian de manera que el comportamiento del sistema se modifica (Domingo, C, 1973).

La mayoría de los lenguajes de simulación existentes sólo permiten considerar la simulación de los cambios cuantitativos. En otras palabras, se logra simular solo aquellos cambios que implican aumento o disminución en los valores de variables, no así los cambios que implican variaciones cualitativas en un sistema como el agregado o eliminación de subsistemas o cambio de las relaciones entre estos. Una excepción es el lenguaje de simulación GLIDER. Este lenguaje presenta una serie de características que ayudan a la inclusión de nuevas facilidades para la simulación del cambio estructural, como lo son:

- Énfasis en la representación de un sistema como una red, siendo representados los subsistemas por nodos y las propiedades de los elementos por parámetros, mientras que las relaciones entre nodos se especifican al indicar los sucesores de cada uno de ellos y se hacen efectivas durante la simulación por la transferencia de mensajes entre nodos.
- Manipulación del tiempo libremente.
- Estructura modular
- Combinación de manera simultánea de la simulación continua y la simulación por eventos.
- Instrucciones para activación y desactivación de nodos.
- Flexibilidad en la sección de inicialización con el uso de instrucciones de programación.

El objetivo del presente trabajo es mostrar algunas ideas preliminares de cómo se puede simular el cambio estructural con el lenguaje GLIDER. En la próxima sección se da un ejemplo de simulación de cambios estructurales. Luego en la sección 3 se indican los aspectos que deben ser considerados al simular el cambio estructural con el GLIDER. En la sección 4 se mencionan algunos casos más complicados de cambio estructural que pueden ser simulados con la técnica seguida en el ejemplo. Seguidamente en la sección 5 se sugiere agregar al GLIDER algunas facilidades que permitirían la simulación del cambio estructural al usuario común. Y finalmente, en la sección 6, se presentan algunas conclusiones.

## **2. Ejemplo de simulación del cambio estructural**

Se supone una empresa que produce y vende su producto en tres ciudades. No se toma en cuenta la competencia. La empresa transporta el producto desde la(s) fábrica(s) hasta las ciudades. Dichas fábricas pueden estar ubicadas en cualquiera de las ciudades. Se consideran dos tipos de camiones en los cuales se puede transportar el producto, con capacidades de 3.500 (camión liviano) y de 10.000 Kg (camión pesado).

Se asume que la empresa no posee camiones pero puede disponer de ellos pagando un flete o alquiler. En las ciudades donde no se tiene fábrica se podrá o no tener depósitos para el producto. Si la ciudad tiene depósito, lo más apropiado en términos de costo será hacer el transporte desde la fábrica (ubicada en otra ciudad) hasta el depósito en camiones pesados y desde el depósito hasta los distribuidores de la ciudad en camiones livianos. De existir fábrica en la ciudad se usarían solo los camiones livianos. Pero si en una ciudad no existe ni fábrica ni depósito, será necesario utilizar los camiones pesados tanto para el transporte desde la fábrica hasta la ciudad como para el reparto a los distribuidores de la ciudad. Respecto a la demanda en cada ciudad se asume un crecimiento lineal y una distribución descrita por una variable aleatoria normal cuya desviación estándar se toma como el 10% de la media.

Se considera que la empresa pueda estar en una de las cuatro posibles estructuras siguientes:

- 1) La primera estructura supone la existencia de una sola fábrica, ubicada en la ciudad de mayor población (no existiendo depósitos en las ciudades vecinas).
- 2) Una segunda estructura es básicamente como la primera pero se asume la existencia de sendos depósitos en las ciudades donde no existe fábrica. Comparando con la primera estructura, habrá un costo adicional dado por la depreciación de los depósitos pero también un ahorro en gastos de transporte.
- 3) En una tercera estructura se asume la existencia de dos fábricas, existiendo depósito en la ciudad donde no se tiene fábrica. Ahora, comparando con la segunda estructura, se tiene el costo adicional de la depreciación de la nueva fábrica y un ahorro aún mayor en gastos de transporte.
- 4) Por último se considera la existencia de una fábrica en cada ciudad. Como en el caso anterior existen costos adicionales por depreciación y posibles ahorros en transporte.

Se consideran cuatro posibles estrategias de cómo la empresa pasa de la estructura 1 a otras estructuras. Estas se pueden ver de manera

esquemática en la red de la Figura 1. Las ramas representan estructuras y los nodos bifurcaciones a partir de las cuales se pueden seguir varias estructuras. Los números sobre las ramas indican la estructura que se está siguiendo y los números en los nodos indican la secuencia de estructuras seguidas hasta el nodo.

Se puede notar en la red dos tipos de nodos: los nodos de cambio estructural y los nodos terminales o nodos de fin de un camino seguido.

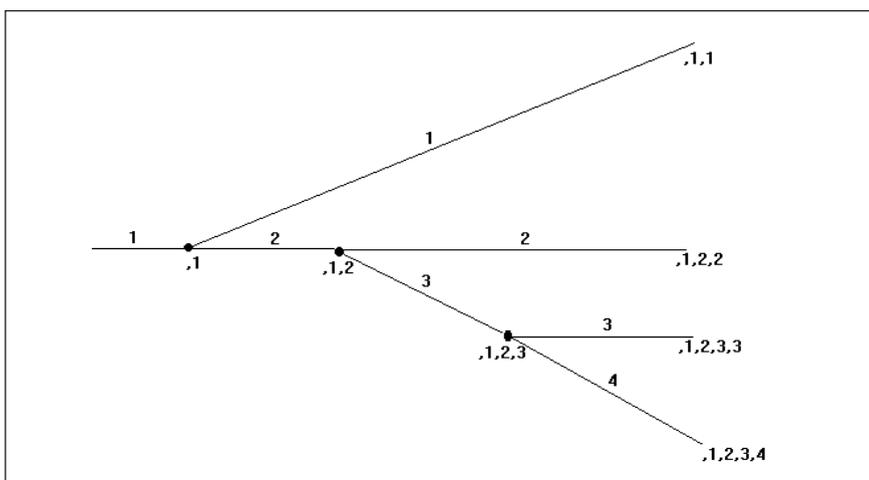


Figura 1. Posibles estrategias de cómo la empresa pasa de la estructura 1 a otras estructuras

Observando esta red se diferencian las 4 estrategias mencionadas arriba, es decir:

- Estrategia 1: tener sólo la fábrica en la ciudad 1.
- Estrategia 2: tener sólo la fábrica 1 hasta cierto momento, y luego adquirir los depósitos en las otras dos ciudades.
- Estrategia 3: tener fábrica en ciudad 1, luego comprar depósitos en las ciudades 2 y 3, y finalmente construir una nueva fabrica en la ciudad 2.

- Estrategia 4: como la estrategia 3 hasta cierto momento, y luego construir una nueva fábrica en la ciudad 3.

Las condiciones para los cambios estructurales están dadas en función del tiempo de simulación y del capital disponible para la empresa.

También se consideran 4 posibilidades para la tasa de crecimiento de la demanda en las ciudades, es decir, estas se duplican en 4 años, en 7 años, en 10 años ó en 15 años.

### **3. Cómo realizar la simulación del cambio estructural**

En algunos lenguajes de simulación se usa una red para representar al modelo. Es decir, a arcos y nodos con funciones específicas. Este es el caso del lenguaje de simulación GLIDER. En este, el control de los cambios estructurales puede hacerse utilizando un nodo que permita controlar los cambios de estructura. Tales cambios de estructura requieren almacenar el estado del sistema en un primer momento y luego restaurar tal estado, a la vez que se hace cambio de parámetros, se desactiva el conjunto de nodos que forman la vieja estructura y se activan nuevos nodos que definen la nueva estructura.

Se puede definir un árbol o red de cambio estructural como la mostrada en la sección anterior, donde los nodos de cambio estructural son los momentos cuando se satisfacen las condiciones de cambio de estructura, y las ramas cada una de las estructuras que pueden seguirse a partir de estos nodos.

Para la descripción de la red de cambio estructural se necesita la siguiente información:

1. Definición de cada estructura o red, es decir, especificación de los nodos que componen la red, de las relaciones entre ellos e iniciación de parámetros.
2. Condiciones que deben satisfacerse para hacer el cambio de estructura. Estas estarán dadas en función del tiempo de simulación,

- parámetros o variables de la estructura que esté activa, estructuras seguidas hasta ese instante, etc.
3. Posibles estructuras que pueden seguirse cada vez que se satisfagan las condiciones anteriores.
  4. Instrucciones a ser ejecutadas antes de activar cada estructura (cada se puede incluir por ejemplo iniciación de variables).
  5. Condiciones de nodo terminal; es decir, condiciones que indican la finalización de un camino en la red de cambio estructural y la consiguiente búsqueda de otro camino aún no explorado desde un nodo de cambio estructural (de no existir este camino sería el fin de la simulación).

Para seguir todas las estructuras posibles a partir de un nodo de cambio estructural, se hace necesario guardar las variables de estado del modelo en un archivo, ya que es necesario restaurar el estado del sistema cada vez que se regresa al nodo para activar una nueva estructura. Esto presenta una serie de dificultades debido a que tales variables no siempre son fáciles de identificar, a parte del esfuerzo en computación que esto exige. El trabajo computacional sería difícil y debe realizarse con mucho cuidado. Implicaría guardar información acerca de la lista de eventos futuros, colas y listas del modelo, semillas de los generadores de números aleatorios entre otras variables descriptivas del modelo.

Las dificultades señaladas en cuanto a salvar sólo el estado del modelo llevaron a obviar tal procedimiento, optando por guardar todas las variables descriptivas del sistema. En realidad se guardan todas las variables y constantes globales (incluyendo parámetros), la pila (Stack), el sector de "Overlay Buffer", y la memoria dinámica (Heap) (Borland 1990). Al guardar la memoria dinámica se almacenan entre otras variables y estructuras de datos: las listas internas (IL) y listas externas (EL)<sup>1</sup> de los nodos, y la lista de eventos futuros. Por otra parte, almacenando el "Stack" se están guardando las variables locales de todos los procedimientos y funciones.

Los estados del sistema se manipulan como una pila: cada vez que se satisfagan las condiciones de cambio estructural se almacena un estado

del sistema en la pila, pero cuando se satisfacen algunas condiciones de nodo terminal se debe extraer de la pila hasta encontrar un estado del sistema referido a un nodo de cambio estructural para el cual no se hayan explorado aún todas las posibilidades. Cuando se llegue a un nodo terminal y no haya ramas por explorar significa que la simulación ha concluido.

#### **4. Carácter general de la técnica adoptada**

Aunque el ejemplo utilizado es muy simple y particular se ve que la técnica adoptada podría fácilmente manejar procesos más complicados. Por ejemplo:

- a) Más de un sistema en funcionamiento simultáneo. Por ejemplo, en vez de una empresa tener varias que compitan en el mercado, cada una con un sistema de escenarios, de manera que los cambios estructurales de cada una tengan en cuenta el estado del mercado, la situación de las otras empresas, el estado de la tecnología, posibilidades de financiamiento, etc.
- b) Más de un sistema de escenarios dentro de una misma estructura. Por ejemplo, dentro de una empresa se podrían simular grupos con proyectos competitivos que tratan de convencer a la gerencia acerca de las bondades y ventajas de sus proyectos respecto a cierto sistema de escenarios. Se hace necesario entonces considerar cada uno de estos sistemas de escenarios a la vez que se prueban los diferentes proyectos como estrategias para enfrentar el futuro predefinido por estos escenarios.
- c) Incorporación de un sistema a otro para simular por ejemplo fusiones de empresas, o de partes de un sistema a otro para simular que una empresa adopta funciones que tiene otra.
- d) Aparición de nuevas empresas o desaparición de algunas existentes.

También se puede hacer el recorrido del árbol de cambios estructurales con diferentes criterios. Por ejemplo, se podría considerar cada rama de la red de cambio estructural como un posible camino, pero al encontrar una bifurcación seleccionar solo una de las ramas. Dicha decisión puede hacerse depender de las condiciones para el cambio estructural o de heurísticos predefinidos que incluirían el logro de objetivos globales. En el ejemplo presentado en la sección 2, se consideró el recorrido de todo el árbol de estructuras, y por tanto se examinaron todas las posibilidades.

## **5. Ampliaciones del glider para la simulación del cambio estructural**

Se hacen algunas propuestas para la inclusión del cambio estructural en el GLIDER, tomando en consideración los numerales 1 a 5 especificados en la sección 3.

El numeral 1, es decir, la definición de cada estructura, puede resolverse agregando en la parte de declaraciones del GLIDER un tipo especial donde puedan ser declaradas cada una de las redes o estructuras, indicando los nodos que la conforman y sus sucesores e inicializando parámetros. Se puede identificar este tipo de declaración con la palabra especial DGRIDS. Acá el usuario debe además, poder indicar la estructura con la cual se dará inicio a la simulación. Para ésto se puede usar una variable global, llamémosla ACTIVEGRID (podría comenzarse por defecto con la primera estructura declarada). Esto implica que debe haber un nuevo tipo de variables en el GLIDER: la variable tipo GRID (red o estructura). La variable ACTIVEGRID será igual en cada momento de la simulación, a alguna de las variables definidas en DGRIDS (para ser más específicos, a la red activa).

Los numerales 2, 3, 4, y 5 es decir, condiciones para hacer cambios de estructura, estructuras a seguir cuando estas condiciones se satisfacen, instrucciones a ejecutar antes de activar cada estructura y condiciones de nodo terminal, pueden ser especificados en un nodo que represente el cambio estructural. Este nodo además debe exigir un intervalo de tiempo entre revisiones para detectar si las condiciones se satisfacen

(puede asumirse un valor por defecto). Dicho nodo no contendrá lista externa (EL), ni lista interna (IL); no tendrá nodos sucesores ni será sucesor de otro, es decir, no estará enlazado con otros nodos. Tampoco podrá pertenecer a la lista de nodos definidos como parte de una variable tipo GRID, en otras palabras, no formará parte de la lista de nodos de una estructura particular. Esto lo hace idéntico al nodo predefinido A (*Autonomous*) del GLIDER. La estructura de tal nodo podría ser algo similar a la que se muestra en el Cuadro 1.

La instrucción IT indica el intervalo entre activaciones del nodo. La primera activación puede ser especificada utilizando la instrucción ACT del GLIDER. Con cada IF se señala un conjunto de condiciones que deben satisfacerse para generar un nodo de cambio estructural o uno terminal. Para los de cambio estructural se especifica cada una de las posibles estructuras a seguir luego de la palabra ESTRUCTURE, indicándose a la vez para cada una de estas ramas un conjunto de instrucciones que deben ejecutarse antes de activar esta estructura (podrían ser inicializaciones, etc.). En las instrucciones declarativas<sup>2</sup> se hace la declaración de las estructuras (véase Cuadro 2).

**Cuadro 1.** Diseño del nodo tipo a para el cambio estructural

---

```
<nombre del nodo> (A):: IT := tiempo entre activaciones del nodo;
  IF (condiciones para cambiar de estructura) THEN
    ESTRUCTURE < variable tipo GRID o estructura a seguir >;
    BEGIN < instrucciones >; END;
    ESTRUCTURE < variable tipo GRID o estructura a seguir >;
    BEGIN < instrucciones >; END;
    .....
  ELSE
    IF <condiciones para nodo terminal> THEN
      BEGIN <instrucciones>; END;
      .....
```

---

**Cuadro 2.** Diseño de la declaración de estructuras

```
DECL
.....
DGRIDS
  [nombre de la red ó estructura];
  nodo [nombre de nodo] [lista de sucesores] [inicialización de parámetros];
  .....
  nodo [nombre de nodo] [lista de sucesores] [inicialización de parámetros];
ENDGRID;
.....
```

Con la palabra reservada **ENDGRID** se indica que ha finalizado la declaración de una red.

Finalmente, en las inicializaciones se debe especificar la estructura con la cual se debe comenzar la simulación (por defecto sería la primera declarada):

**Cuadro 3.** Diseño de la inicialización de la variable global tipo grid

```
INIT
ACTIVEGRID: = yy;
```

Para iniciar la simulación con la red de nombre yy.

**6. Conclusión**

El Análisis de Escenarios es una técnica cuyo uso se hace cada vez más popular. Esta es una de las razones por las que la simulación del cambio estructural se ha convertido en una necesidad para quienes administran o estudian sistemas sociales a partir de la década de los 70.

Resultó engorrosa y poco práctica la forma como se realizó la simulación del cambio estructural en el ejemplo, a pesar de que el control de la misma se logró hacer utilizando un nodo GLIDER ya existente, dada la necesidad de utilizar directamente el lenguaje PASCAL para manipular la memoria dinámica del computador y controlar el manejo de las estructuras activas y estructuras por activarse. Sin embargo, se logró realizar simulación de cambios estructurales, pero se hace recomendable el agregar facilidades para este tipo de simulación.

Algunas características de las ampliaciones propuestas son explicadas abajo:

- a) El control del cambio estructural se hace a través de un nodo, lo que permite separar la simulación de los cambios cualitativos de la simulación de los cambios cuantitativos (o simulación del cambio estructural). Esto se traduce en una gran flexibilidad. Se podrían tener varios nodos de cambio estructural donde cada uno represente un ente decisor diferente como por ejemplo: el gobierno, una empresa, un grupo dentro de una empresa, etc.
- b) El uso de una variable tipo red o estructura, definida como un conjunto de nodos cada uno con un grupo de nodos sucesores y algunos parámetros, ofrece la posibilidad de definir diferentes estructuras utilizando nodos comunes, lo que permite un ahorro en código de programación.

Aunque se ha simulado solo para un caso particular, el procedimiento propuesto es válido para casos más generales ya que los aspectos operativos relacionados con el cambio de estructura no dependen en absoluto de la forma de las estructuras simuladas. Ejemplos de casos de sistemas más complejos son los mencionados en sección 4: más de un sistema en funcionamiento simultáneo, más de un sistema de escenarios dentro de una misma estructura, incorporación de un sistema a otro, o de partes de un sistema a otro para simular que una empresa adopta funciones que tiene otra, aparición de nuevas empresas o desaparición de algunas existentes.

## 7. Notas

- 1 Este trabajo presenta algunos de los resultados de la tesis de Maestría “Simulación de Cambios Estructurales y Análisis de Escenarios”, realizada por O. Terán bajo la tutoría del profesor C. Domingo en el Instituto de Estadística Aplicada y Computación de la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad de los Andes.
- 2 En el lenguaje GLIDER los nodos pueden tener lista externa (EL) donde los mensajes esperan para ser servidos y lista interna (IL) donde permanecen mientras están siendo servidos.
- 3 Un programa en el lenguaje GLIDER está compuesto por cuatro subsecciones:
  - Sección introductoria que inicializa la palabra TITLE, donde se puede escribir un pequeño resumen del sistema simulado.
  - Sección de la red después de la palabra NETWORK. En esta sección se coloca la estructura del modelo que representa al sistema. Esta estructura esta representada por una red compuesta por un conjunto de nodos interconectados a través de mensajes. Cada nodo tiene una función específica y representa un elemento o subsistema del sistema completo.
  - Sección de inicialización de variables y activación de algunos nodos, después de la palabra INIT.

## 7. Referencias

- Domingo C. (1973). “El Cambio Estructural”. Edición mimeo, Departamento de Computación, Universidad Central. Caracas.
- Domingo C. (1991). Simulación del Cambio Estructural. XVII Conferencia Latinoamericana de Informática. Caracas.
- Domingo C.; M. Hernández; G. Tonella y M. Sananes (1994). *Lenguaje de Simulación GLIDER: Guía de Referencia* (Versión 3.0), Universidad de los Andes. CESIMO & IEAC, Mérida.
- Borland, (1990). *Turbo Pascal. Versión 6.0. Programmer's Guide*, Scotts Valley, CA, USA.

Wack, P. (1985a). "Scenarios: Uncharted Waters Ahead", *Harvard Business Review*, 63(5), September-October, pp. 73-89.

Wack P. (1985b). "Scenarios: Shooting the Rapids", *Harvard Business Review*, 3(6), November-December, pp. 139-150.