

## UNIDAD 2: DIAGRAMAS DE FORRESTER

Nombre de la Unidad	Diagramas de Forrester
Introducción	Los diagramas de Forrester son los elementos de tipo conceptual que permiten el modelado estructural de la dinámica de sistemas.
Justificación	Es un paso previo del modelado cualitativo al modelado cuantitativo, que llevado a los software especializados posibilita la generación de las ecuaciones en diferencias.
Intencionalidades Formativas	Desarrollar la habilidad para la representación de fenómenos de diversa naturaleza a partir de las nociones de razón de cambio y acumulación, además de los retardos y la realimentación.
Denominación de capítulos	Capítulo 4: Elementos De Los Diagramas De Forrester Capítulo 5: Elaboración De Diagramas De Forrester Capítulo 6: Simulación

## **CAPÍTULO 4: ELEMENTOS DE LOS DIAGRAMAS DE FORRESTER**

### **Introducción**

Una vez construido el diagrama de influencias en el cuál se han graficado las variables y las relaciones constitutivas del problema modelado es preciso pasar a una segunda parte en la cual se deberá expresar dicho modelo en términos de acumulaciones y variaciones, fundamentalmente.

Ésta es una de las partes que demandan mayor cuidado pues de la correcta identificación de las variables, ya sean acumulaciones o razones de cambio, dependerá el éxito en el proceso de modelado.

Este capítulo se concentra especialmente en dar algunos elementos que guiarán al estudiante en la adquisición de habilidades que le permitan reconocer de manera adecuada cada una de estas variables.

Se recomienda al lector una práctica consciente y dedicada para que pueda lograr sus propósitos, pues como todo proceso de aprendizaje se da en la medida en que haya un genuino interés por aprender expresado este en la necesidad intrínseca del estudiante por hacerlo.

## Lección 16: La Noción de Razón de Cambio y Acumulación

### Nociones acerca del cambio

En el inicio de algunos artículos es común leer que “lo único que permanece constante es el cambio”, este hecho naturalmente genera en el hombre la urgente necesidad por determinar las variaciones ocurridas ya sea desde una descripción de las circunstancias o a partir de la medición de las mismas. Rendón (2009) citando a Lyotard (1984) muestra como ejemplo de las consecuencias del cambio que *“las condiciones socio-económicas y políticas de países o regiones guardan diversas relaciones entre sí, ya sea de similitud, subordinación- dominación o antagonismo, las cuales pueden favorecer ambientes de cooperación, competencia o incluso conflicto, determinando con ello las dinámicas de cambio propias del mundo contemporáneo”*.

Esta situación conduce a que el cambio se conciba de diferentes forma, es decir desde lo descriptivo o cualitativo y lo numérico o cuantitativo. En las siguientes secciones se describen estas concepciones.

### El cambio cualitativo

En este módulo se acepta que lo cualitativo es aquello que denota cualidad, es en este sentido que debe entenderse el cambio cualitativo que implica la posible comparación con otras situaciones similares, afines o de la misma especie. Es preciso indicar que la mayor de las veces este análisis depende de la percepción del observador, en este sentido, se podría afirmar que lo cualitativo, depende de quien lo percibe y, a diferencia de lo cuantitativo, es mucho más difícil de precisar con especificidad en distintos escenarios y de diversas perspectivas individuales.

Para Rendón (2009) el cambio cualitativo se caracteriza por:

- Distinguir las características necesarias para identificar modificaciones de un objeto, situación o acción propias de un contexto.
- Permitir representar una situación con una definición pobre (parcial, incierta y/o imprecisa), soportando el proceso de solución y proporcionando una interpretación de los resultados.
- Ser la forma más ampliamente utilizada para explicar las modificaciones ocurridas respecto a algo, desde el razonamiento por sentido común.

### Cambio cuantitativo

En Rendón (2009) se define el cambio cuantitativo como la noción de medida, es decir, el valor numérico, que deviene de la operación cotidiana de comparar conjuntos y no sólo se vincula con el número de elementos de un conjunto, sino también con la noción de extensión, por ejemplo; largo-corto.

En la evolución del conocimiento, el ser humano no solo se enfrentado con el hecho de medir, sino también con la necesidad de determinar la variación de dichas mediciones. Estas variaciones hacen referencia a los cambios de las medidas, es decir, se relaciona con los cambios cuantitativos. Además pretende definir un número asociado a las modificaciones ocurridas, es decir que, en cualquier circunstancia, sea posible enunciar la cantidad de aumento y/o disminución.

El cambio cuantitativo, según Rendón (2009), se describe con base a los factores que lo generan, matemáticamente son llamadas variables, las cuales son tomadas como causas, es decir, como relaciones de dependencia que dan cuenta de lo ocurrido. El modelado con dinámica de sistemas tiene útiles que pueden utilizarse para representar tanto el cambio cualitativo (diagramas de influencias) como cuantitativo (diagramas de Forrester).

### La razón de cambio

La razón de cambio junto con la noción de acumulación son centrales en el modelamiento con dinámica de sistemas. En términos elementales la razón de cambio es aquella que da cuenta o que es responsable de los procesos de acumulación. Con un sencillo ejemplo se pretende clarificar aún más esta idea. Supóngase que se tiene una alcancía en la cual cada mes se guarda una moneda de \$100 pesos; a esta cantidad de dinero guardada mensualmente se le denomina razón de cambio, pues es la responsable del aumento (cambio) de la cantidad de dinero que se irá almacenando (acumulando) en la alcancía.



*figura 27 Flujo de monedas que llena la alcancía<sup>22</sup>*

Matemáticamente la razón de cambio de una variable respecto a otra es la magnitud del cambio de una variable por unidad de cambio de la otra. También se le llama tasa de cambio. Si las variables no tienen ninguna dependencia la tasa de cambio es cero.

La comprensión del concepto de razón de cambio o razón de variación se considera de gran importancia dentro de las matemáticas, puesto que posibilita la comprensión de diversos fenómenos de la naturaleza lo cual posibilita que éstos sean modelados, entre otras cosas, con ecuaciones diferenciales.

<sup>22</sup> Tomado de <http://www.flickr.com/photos/rockdrigo68/3321611111/>

## Lección 17: Diagramas de Forrester

Una vez se ha construido el diagrama de influencias debe ser elaborado el diagrama de Forrester o diagrama de flujos y niveles. En este diagrama se deben ubicar los distintos elementos que constituyen el diagrama de influencias, teniendo especial cuidado de identificar cuando uno de estos elementos representa ya sea una acumulación, una razón de cambio o un simple cálculo intermedio entre una razón de cambio y una acumulación.

Las variables o elementos del diagrama de influencias, una vez identificados como acumulaciones, o razones de cambio o cálculos intermedios son representados mediante:

- variables de nivel o acumulaciones
- variables de flujo o razones de cambio
- variables auxiliares o de cálculo intermedio

Los diagramas de Forrester son la modelación en forma pictórica de la relación que existe entre los 3 tipos de variables con el fin de establecer una interface con el modelado de sistemas a través de una computadora. Los íconos que son usados para la elaboración de un diagrama de Forrester provienen del símil hidrodinámico que fuera usado en los comienzos de la dinámica de sistemas como metáfora para representar la evolución de los sistemas dinámicos.

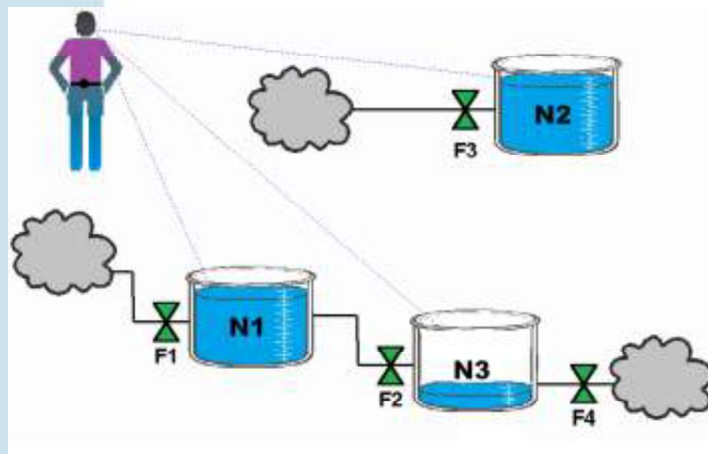


figura 28 Símil hidrodinámico<sup>23</sup>

El problema que implica el símil hidrodinámico tiene que ver con que un observador debe controlar el contenido de líquido en los niveles N1, N2 y N3 y para ello tiene la posibilidad de abrir o cerrar las llaves F1, F2, F3 y F4. Naturalmente el líquido se va acumulando en los tanques o niveles y es claro que tendrá que llenarse primero el tanque o nivel N1 antes de que comience a llenarse el nivel N3, una vez se vaya alcanzando el nivel deseado el observador deberá obturar las llaves, para evitar que se pierda el líquido.

<sup>23</sup> Figura tomada y modificada de <http://tgs7233.galeon.com/introdds.htm>



Es clave notar que el tanque o *nivel* N1 se llena si la llave F1 está abierta, es decir, si hay un *flujo* de líquido que entre y vaya llenando el tanque. También es cierto que el *nivel* N1 se desocupa o disminuye o se des-acumula si la llave F2 permite que el líquido de N1 *fluya* a N2 e igual sucede con el *nivel* 2 y el *nivel* 3.

A estas alturas el lector debe tener claro porqué el símil hidrodinámico sirve como metáfora de los diagramas de Forrester o de *flujos y niveles*. Según el símil los niveles se llenan o se desocupan mientras que los flujos provocan el incremento o decremento de los niveles. Aparece aquí implícita la idea de acumulación y razón de cambio respectivamente.

### Los elementos del diagrama de Forrester

Las variables de estado o "**niveles**" se definen como aquellos elementos que muestran en cada instante la situación del modelo, simulan una acumulación y varían solo en función de los "flujos". Los niveles se representan por medio de un rectángulo. Para el caso del símil hidrodinámico los niveles son N1, N2 y N3. El rectángulo representa la variable de nivel. La evolución de este tipo de variables resulta siendo muy significativa para el estudio del sistema. La variable de nivel al cambiar a través del tiempo alcanza lo que se conoce con nombre de estado del sistema. La elección de los elementos o variables que se pueden representar mediante niveles en un modelo determinado depende del problema específico que se esté considerando; sin embargo una característica común a todos los niveles es que cambian lenta o rápidamente en respuesta a variaciones de otras variables. A cada nivel se le puede asociar un flujo de entrada (FE) o un flujo de salida (FS) o una combinación de los dos. Un ejemplo de nivel podría ser la cantidad de personas que hay dentro de la sala de un teatro.

Los llamados "**canales de información**", transmiten, como su nombre indica, informaciones que por su naturaleza no se conservan. Las magnitudes físicas entre flujos y niveles se transmiten a través de los denominados "**canales de material**".

Las razones de cambio, válvulas o "**flujos**" son elementos que se definen como funciones temporales, pues recogen las acciones resultantes de las decisiones tomadas en el sistema, determinando las variaciones de los niveles. Las variables de flujo caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuales quedan acumuladas en los correspondientes niveles. Debido a su naturaleza se trata de variables que no son medibles en sí, sino que se miden por los efectos que se producen en las variables de nivel de tal forma que las variables de nivel se asocian con ecuaciones que definen el comportamiento del sistema. Un ejemplo de flujo podría ser la cantidad de personas que entran a un teatro por unidad de tiempo, 5 personas por minuto.

La “**nube**” representa una fuente o un sumidero de material que puede interpretarse como un nivel que no es importante para el modelador y es prácticamente inagotable.

Las “**constantes**” o parámetros se usan para representar aquellos valores que no cambian a través del tiempo. Son determinantes para calcular el valor de los flujos. Un ejemplo de constante es la tasa de natalidad de una población o la tasa de interés de un préstamo.

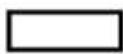
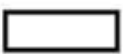
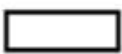












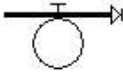



















Los “**retardos**”, que simulan el tiempo que demora la transmisión de los materiales o las informaciones. En los sistemas socioeconómicos es frecuente la existencia de retardos en la transmisión de material e información y tienen una gran importancia en la determinación del comportamiento del sistema. Ejemplo: si se siembra una semilla de maíz se esperaría que a los 90 días hubiera una mazorca, es decir, habría un retardo de 90 días desde el momento de la siembra hasta el momento de la cosecha.

Las variables “**exógenas**” son las influencias que afectan el sistema, pero lo que suceda en el sistema no la afecta. Un ejemplo puede ser la cantidad de agua lluvia que afecta a un cultivo.

Las “**variables auxiliares**” son cálculos intermedios y valores fijos, respectivamente, que permiten una visualización mejor de los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos.

Las “**tablas**” se usan para representar aquellas relaciones entre variables que son no lineales, este tipo de comportamientos se pueden observar por ejemplo entre la sensación de hambre y la cantidad de alimento consumido; a medida que se come la sensación de hambre disminuye, pero no proporcionalmente a la cantidad de alimento consumido. También se usan para representar multiplicadores que son las relaciones entre variables que no permanecen constantes a través del tiempo. Ejemplo de ello sería una tasa de interés variable.

En la figura 29 se pueden apreciar los íconos que se usan en diferentes software para representar los elementos de los diagramas de Forrester.

Nombre	Vensim	Dynamo	Stella, I'Think	EVOLUCION
Nivel				
Relación de información				
Relación de material				
Flujo				
Nube				
Parámetro	No Existe		No Existe	
Retardo				
Exógena			No Existe	
Variable auxiliar				
Tabla		No Existe	No Existe	

*figura 29 Elementos del diagrama de Forrester en distintos software<sup>24</sup>*

<sup>24</sup> Figura tomada y modificada de internet.



## Lección 18: Los Niveles y los flujos

### Construcción del diagrama de Forrester

Como se ha dicho en varias ocasiones los niveles son las variables que se acumulan o se des-acumulan, este hecho les permite mantener la memoria del sistema. Otro hecho que hay que tener presente es que siempre debe haber por lo menos un flujo relacionado con un nivel, en caso contrario ese nivel permanecerá invariable, es decir, parecerá más una constante o parámetro.

Una de las primeras variables que deben ser identificadas en un diagrama de influencias son las variables de nivel, para ello es necesario preguntarse, cuál de cada variable una de esas variables tendrá comportamientos relacionados con procesos de acumulación y des-acumulación, es decir, cuáles de ellas se llenan o se desocupan.

Volviendo sobre el símil hidrodinámico, de la figura 28, se puede apreciar que los tres tanques se pueden llenar o desocupar dependiendo de cuál de las 4 llaves esté abierta o cerrada. Es decir que la cantidad de líquido almacenada en el sistema dependerá de que tanto se manipulen las válvulas o llaves.

Una característica común a las variables de nivel es que cambian lentamente en respuesta a las variaciones de otras variables, en concreto de las variables de flujo. A cada nivel  $N(t)$  se le puede asociar un flujo de entrada  $F_e(t)$  y salida  $F_s(t)$ , de acuerdo con

$$N(t) = N(t_0) + \int_{t_0}^{t_f} F_e - F_s dt$$

O en forma de ecuación diferencial

$$\frac{dN}{dt} = F_e - F_s$$

La anterior ecuación se denomina ecuación de nivel diagrama se representa mediante el diagrama de Forrester que se muestra en la figura 30

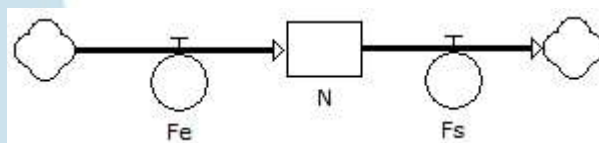


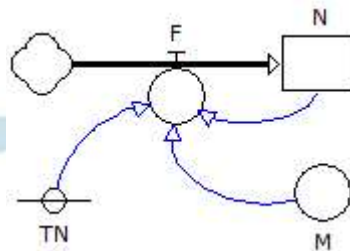
figura 30 Diagrama de Forrester

Las variables de flujo son aquellas variables que determinan los cambios en las variables de nivel del sistema y caracterizan las acciones que se toman en él, las cuales quedan acumuladas en los niveles correspondientes. Físicamente

expresan como se convierte la información disponible en el sistema en una acción y están asociadas a las válvulas o llaves del símil hidrodinámico. A cada flujo  $F(t)$  se le asocia una ecuación llamada ecuación de flujo o función de decisión que admite como variables de entrada los niveles, las variables auxiliares y las constantes, en términos generales.

$$F(t) = TN * M(t) * N(t)$$

EN donde TN es el flujo normal (constante),  $M(t)$  es el multiplicador del flujo normal (auxiliar) y  $N(t)$  (nivel). El diagrama de Forrester, de la ecuación de flujo, se presenta en la figura 31.

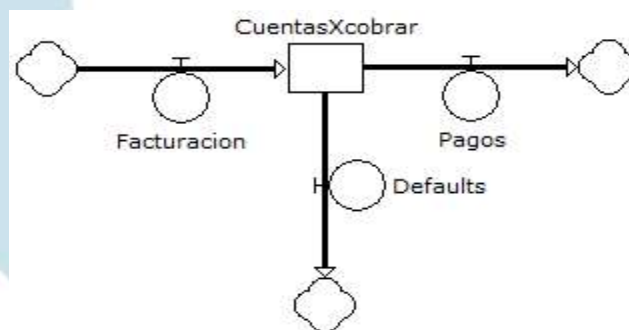


*figura 31 Diagrama de Forrester*

### Algunas recomendaciones para reconocer los niveles y los flujos

Lo primero que hay que tener en cuenta es que los niveles son generalmente una cantidad mientras que los flujos son medidos en las mismas unidades del nivel por unidad de tiempo. Por ejemplo: si el nivel es la población las unidades serán las personas y los flujos asociados a ese nivel estarán dados como personas/año; si la unidad de tiempo es el año.

Una metáfora que contribuye en la caracterización de las variables de flujo y niveles es la “prueba de la foto” en tanto que los niveles caracterizan el estado de un sistema. Imagine usted lector que se congela el sistema como en una foto; los niveles serían las cosas que se pueden contar.



*figura 32 Diagrama de Forrester*

Otra recomendación importante tiene que ver con que se debe respetar la ley de la conservación de la materia, en este sentido, los contenidos de las redes de niveles y flujos se deben conservar. Por ejemplo, las cosas, (cuentas por cobrar) en el nivel permanecen ahí hasta que salen por pagos o por defaults. Ver la figura 32.

Sólo los flujos deben estar relacionados directamente con los niveles, es decir, que un nivel únicamente cambia por flujos de entrada y salida. Los niveles a su vez determinan los flujos. Ver la figura 33.



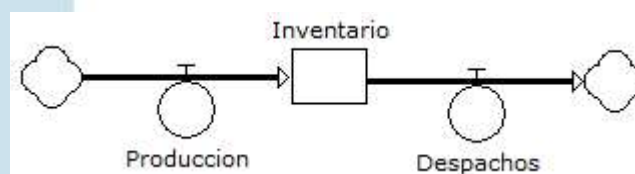
*figura 33 Relación entre nivel y flujo*

### Ejemplos de niveles:

- El inventario en una bodega, (números de objetos)
- Empleados en un negocio, (número de personas)
- La cuenta de ahorros, (Cantidad de dinero)
- Computadores en una empresa, (cantidad de computadores)
- Usuarios de un servicio (la cantidad de suscriptores )

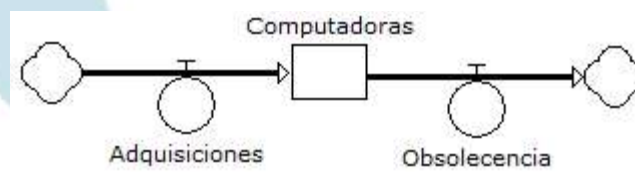
### Flujos asociados a los niveles

El inventario se incrementa por el flujo de producción y decrece por el flujo de despachos.



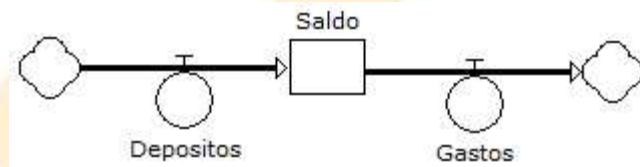
*figura 34 Diagrama de Forrester*

El número de computadoras en una empresa se incrementa con nuevas adquisiciones y se reduce por obsolescencia.



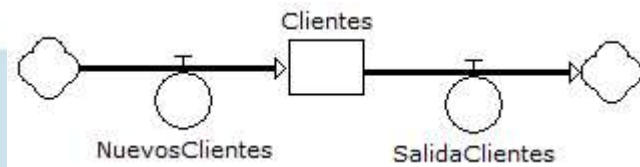
*figura 35 Diagrama de Forrester*

El saldo de la cuenta de ahorros se incrementa con los depósitos y decrece con los gastos.



*figura 36 Diagrama de Forrester*

El número de usuarios de un servicio se incrementa con nuevos clientes y se reduce por los clientes que cambian de proveedor o cambian de servicios.



*figura 37 Diagrama de Forrester*

Se invita al lector para que proponga nuevos ejemplos de niveles y flujos propios de su dominio de conocimiento. Se insiste mucho en que los niveles son acumuladores y los flujos aquellos responsables de la acumulación.

## Lección 19: Las variables Auxiliares, los Multiplicadores y las No Linealidades

### Variables auxiliares

Las variables auxiliares representan pasos en los que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por los niveles y de otras variables. El propósito del uso de las variables auxiliares está en facilitar la comprensión y definición de las variables de flujo, aunque no es exclusiva esta tarea, ya que las variables auxiliares suelen representar en sí mismas conceptos individuales.

Si se hace un modelo del símil hidrodinámico aparecen allí variables auxiliares que son definitivas para determinar los flujos. Se sugiere al lector que revise de nuevo la figura 28.

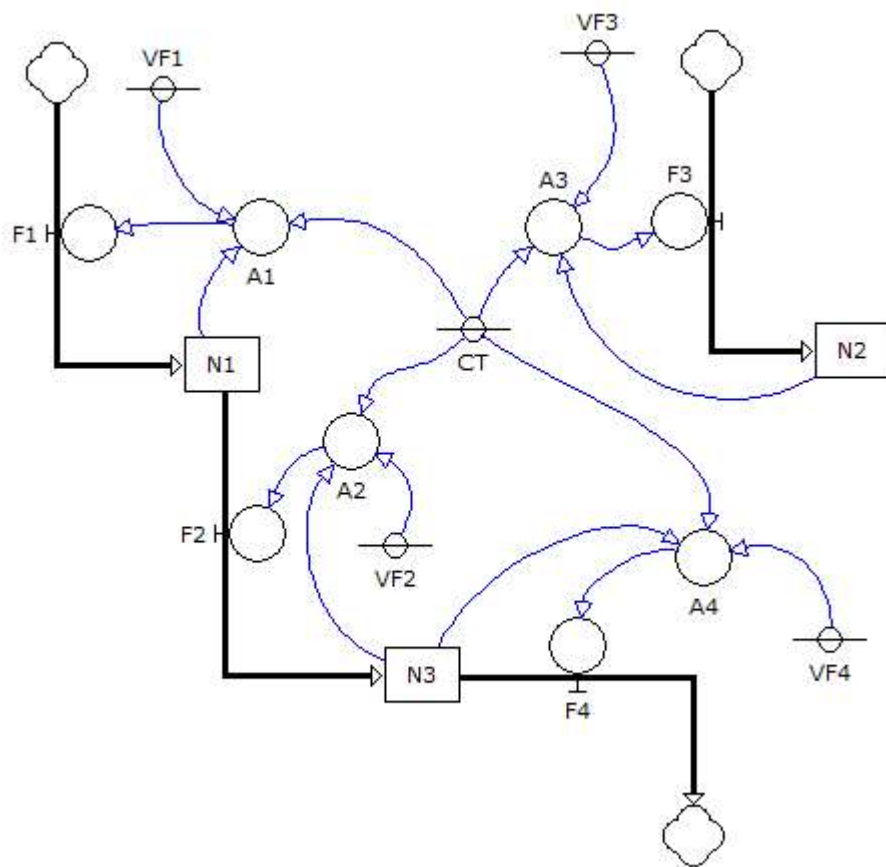


figura 38 Diagrama de Forrester del símil hidrodinámico

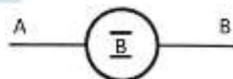
Nótese en el modelo, figura 38, que se requieren 4 variables Auxiliares y cinco parámetros para modelar la información que permite al observador actuar sobre las llaves. Los parámetros indican el valor del flujo en cada caso y el parámetro CT



se usa para indicar la capacidad total de los niveles. Las variables auxiliares toman información de los niveles y del parámetro CT y determinan si aún es posible adicionar más líquido. Como se puede intuir, las variables auxiliares son variables de decisión. En el caso de la variable auxiliar A1 se define como:  $IF(CT - N1 > 0, VF1, 0)$ , es decir, que si al restar de la capacidad total el contenido del nivel 1 es mayor que cero, quiere decir que no está lleno, en tal caso F1 permite que el líquido fluya, en otro caso la llave (F1) se cierra. Se deja como trabajo para el lector que deduzca cuáles han de ser las ecuaciones que corresponden a las otras tres variables auxiliares.

### **No linealidades**

Si dos variables A y B están relacionadas por  $B = f(A)$  siendo f no lineal, B una variable auxiliar y A una variable de nivel, se emplea el símbolo de la figura 39 en el diagrama de Forrester. Esta es una representación que dependiendo del software usado puede cambiar. Se invita al lector a repasar la figura 29, la parte correspondiente a tabla.



*figura 39 No linealidad*

Las no-linealidades se usan para representar aquellas relaciones entre variables que son no lineales, este tipo de comportamientos se pueden observar por ejemplo entre la sensación de hambre y la cantidad de alimento consumido; a medida que se come la sensación de hambre disminuye, pero no proporcionalmente a la cantidad de alimento consumido.

### **Los Multiplicadores**

Los multiplicadores son tasas cambiantes que afectan una variable. Un efecto multiplicador es el que ocurre cuando una persona aumenta la ingesta de alimentos, eso tiene un efecto sobre el valor nominal del peso, aunque la persona siga siendo la misma. Es importante advertir que las personas no suben de peso a un mismo ritmo consecuencia de la misma ingesta sostenida de alimentos. Otro ejemplo que ilustra la idea de multiplicador es el efecto que tiene sobre una población la disponibilidad de recursos. A medida que crece la población, si hay suficiente recursos, crecerá a una tasa natural y mostrando un comportamiento exponencial. Una vez los recursos empiecen a escasear tendrán un efecto sobre los nacimientos haciendo que estos decrezcan.

En figura 40 es posible observar como sobre la variable nacimientos tiene efecto la tasa de nacimientos, pero además la disponibilidad de recursos también tiene su efecto limitante. La estrella en el diagrama muestra que habría un efecto multiplicador sobre la cantidad de nacimientos producto de la escasez de recursos. En este caso la multiplicación reduce el valor nominal de los nacimientos teniendo un comportamiento no-lineal, es decir, a medida que comienza a

escasear el recurso la tasa de nacimientos se irá haciendo cada vez más pequeña al punto de que se igualen los nacimientos y las muertes y se estabilice el sistema.

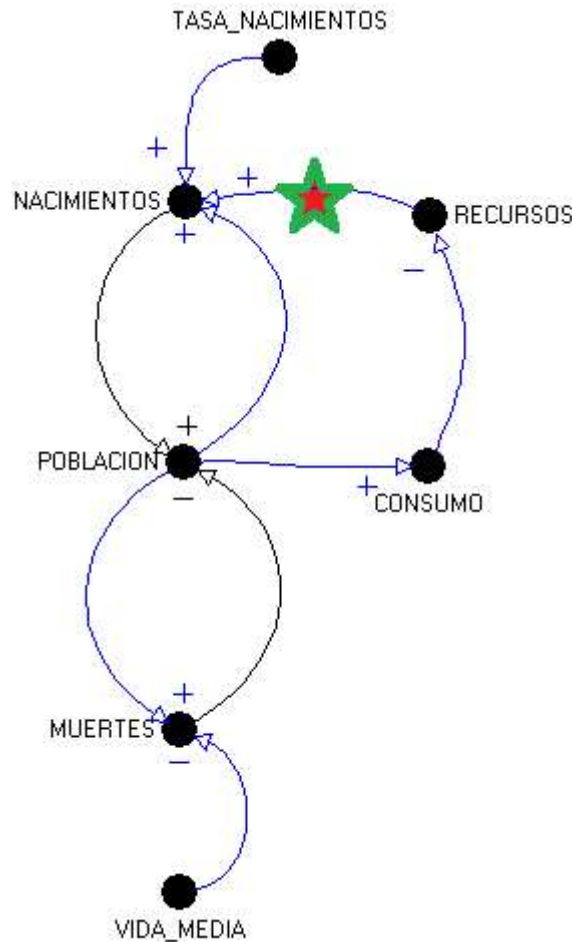


figura 40 Multiplicador

Finalmente el modelador deberá diseñar numéricamente los multiplicadores para que surtan el efecto observado en el fenómeno.

Tanto los multiplicadores como las no linealidades son tratadas de forma similar por la mayoría de los software disponibles, la diferencia subyace a la definición de cada uno de ellos. No olvidar que una no-linealidad es una función que transforma una entrada en una salida relacionadas ambas de forma no lineal; mientras que un multiplicador altera el valor nominal de una variable, la aumenta o disminuye, pero no hay cambio de unidades.

## Lección 20: Caracterización de los Retardos

Una característica que debe ser considerada al modelar sistemas dinámicos es el retardo producido, en la transmisión de material o en la transmisión de información, esto ya se revisó en la lección 5 del capítulo 3. En lo que sigue se revisa la formulación matemática del mismo.

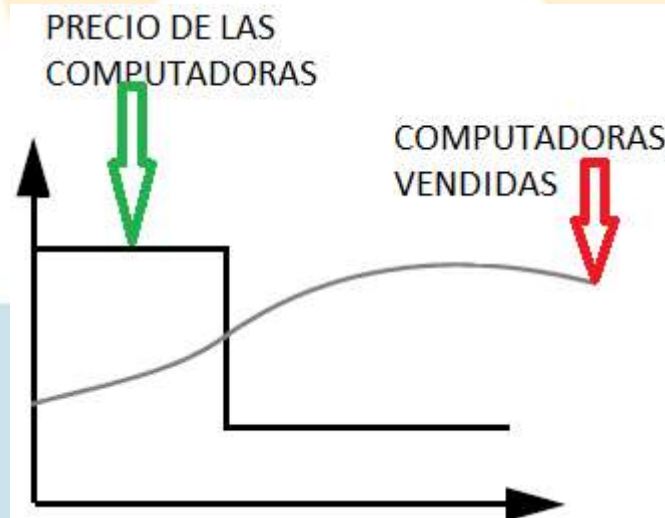


figura 41 Retardo en las ventas consecuencia del precio

Al revisar la figura 41 se puede verificar que si el precio de los computadores disminuye súbitamente, el número de ellos vendidos no aumenta de la misma forma si no que lo hace de manera gradual, lo cual se debe al retardo de información en la medida en que se necesita de un cierto tiempo para que los compradores perciban el cambio en el precio.

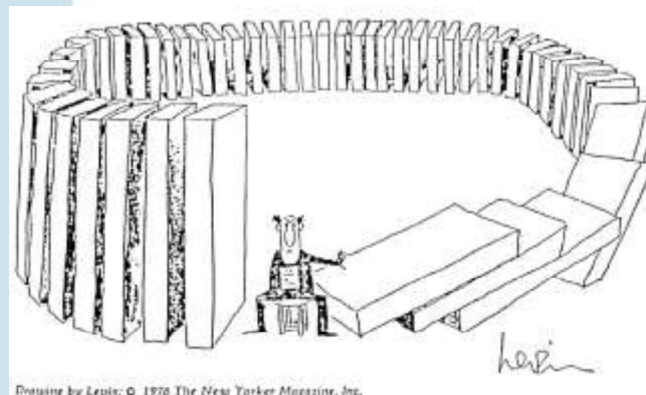


figura 42 Ilustración de un retardo

La figura 42 recrea la idea de retardo, si se sigue la secuencia se podrá inferir las consecuencias.

Seguidamente se hace una presentación gráfica del concepto de retardo tanto de material como de información.

### Retardos de material.

El retardo de material se produce cuando existen elementos en el sistema que almacenan temporalmente y luego fluyen. En la figura 43 se muestra la estructura de un retardo de orden uno y tiempo de ajuste 3 con un valor inicial, que va a ser retardado, de 100. El orden de un retardo viene dado por el número de niveles que tenga la estructura que lo determina. Al revisar el cuadro rojo se percibe allí un nivel identificado con el nombre N1, este es el elemento que almacena el material que se va retardar, un flujo F1 que representa el valor del retardo, es decir, el valor que se va liberando del nivel N1, un parámetro TA que es el tiempo de ajuste o tiempo promedio que permanece un elemento en el sistema. La cantidad retardada está representada por el valor del flujo Fe.

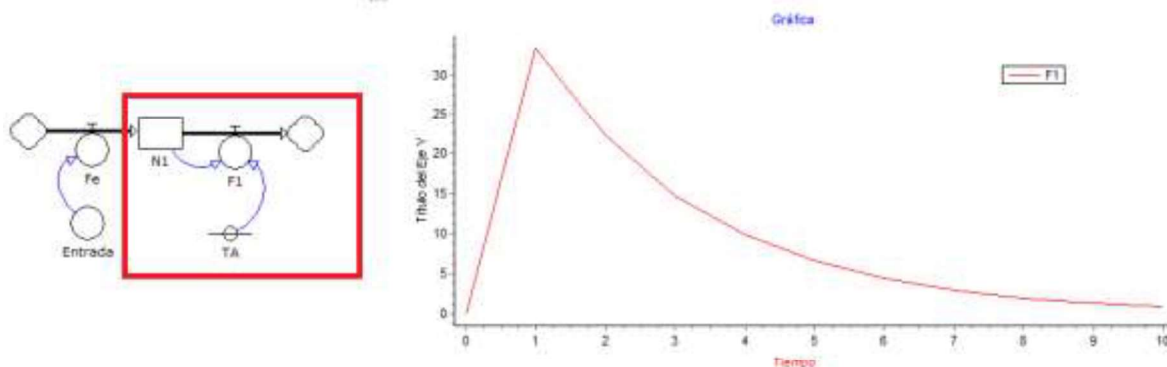


figura 43 Retardo de orden uno de material

En donde el Fe es un valor único que en  $t=0$  es de 100, N1 en  $t=0$  es 100,  $F1(t) = N1(t)/TA$  y finalmente  $TA=3$ , es decir, el tiempo de retardo.

La figura 43 muestra la gráfica característica de un retardo de material de orden uno (1) y tiempo de ajuste de tres (3). El tiempo de ajuste siempre debe cumplir que sea mayor o igual que el orden. Se invita al lector que como práctica demuestre mediante los resultados de simulación que efectivamente el promedio de permanencia de una unidad en el sistema es igual al TA.

Matemáticamente el retardo se representa mediante la siguiente ecuación

$$N1(t) = N1(t_0) + \int_{t_0}^{t_f} Fe - F1(t) dt$$

$$F1(t) = \frac{N1(t)}{TA}$$

$$\text{en donde: } \frac{dN1}{dt} + \frac{N1}{TA} = FE$$

Algunos ejemplos de retardo de material podría ser, por ejemplo, las órdenes de material, los tiempo de construcción, La demora en la entrega de algún pedido, etc.

### **Retardo de información**

Este retardo se produce cuando es necesario conservar y almacenar la información del sistema antes de tomar una decisión. Los retardos de información representan un mecanismo de filtro cuya principal virtud consiste en suavizar los picos que presenta la evolución de una variable teniendo un valor promedio de la misma como punto de referencia. En este proceso la información más reciente influye en el promedio de forma más significativa que la antigua.

Al igual que el retardo de material en este retardo, la información toma tiempo en fluir de un punto a otro en el sistema, por lo que habitualmente se usa este tipo de retardo para representar el ajuste gradual de las percepciones o las creencias.

El hecho de que las creencias, expectativas y proyecciones de los seres humanos estén basadas en la información disponible hasta el momento y que las personas no cambian su forma de pensar inmediatamente, frente al arribo de nueva información, son consideradas como las principales razones por las cuales se provocan retardos en la transmisión de la información en un sistema.

Los retardos de información no pueden ser modelados de la misma forma que se modelan los retardos de material, básicamente porque no hay entrada ni salida física o de material. En los retardos de material tanto las entradas como las salidas se deben conservar, por ejemplo, si se envía un cierto número de cartas, el mismo número de cartas ha de llegar a sus destinatarios o en caso extremo, deben volver a la oficina de correos aquellas que no pudieron entregarse para devolverlas al remitente. A diferencia de los materiales las percepciones o las creencias no se conservan, es decir, si alguien conoce una información y la comparte a otra persona, este hecho no implica que la primera persona ya no tenga la información y la segunda sí, como sucede cuando el cartero entrega una carta.

Como se dijo al comienzo de esta sección el retardo de información también se denomina como suavizador de la entrada. La estructura general de un retardo de información de primer orden es como se muestra en la siguiente gráfica.



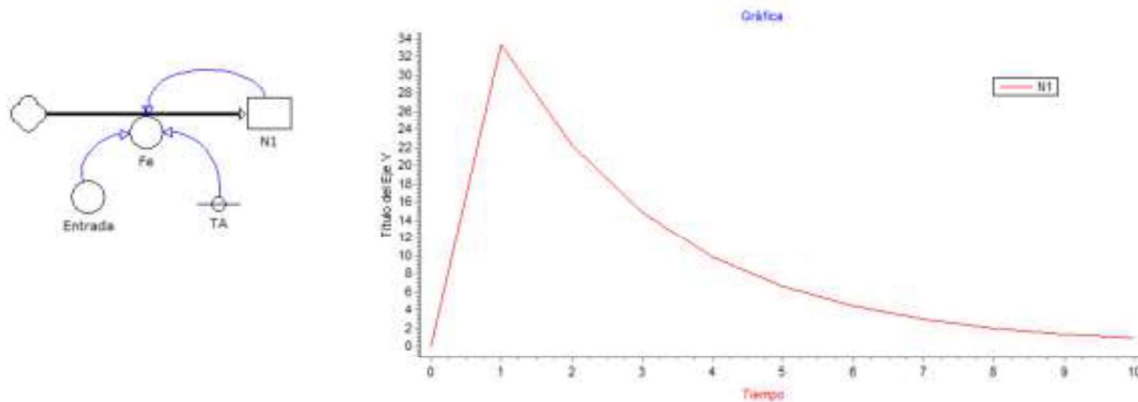


figura 44 Retardo de orden uno de información

En este caso La Entrada asume un valor de 100 en  $t=0$ , TA tiene un valor de tres (3), N1 (que es la salida) en  $T=0$  es 0 y  $Fe = (Entrada - N1)/TA$ .

$$\text{en donde: } \left( \frac{dN1}{dt} * TA \right) + N1 = FE$$

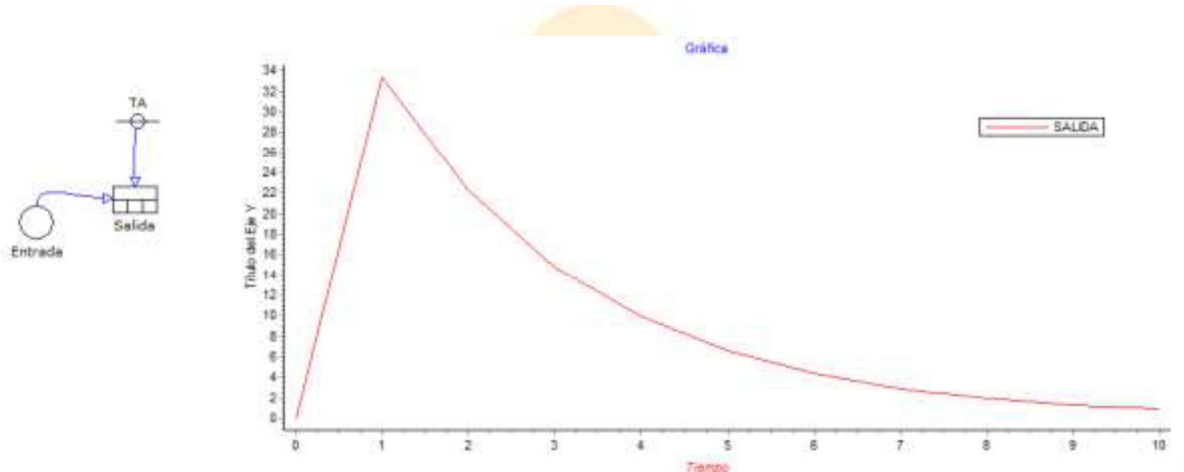
Como se puede inferir, tanto el comportamiento de un retardo de información como uno de material son cuantitativamente iguales, la diferencia radica en la forma en que éstos se conceptualizan matemáticamente hablando y naturalmente la estructura en términos de los elementos de dinámica de sistemas.

Se presentan retardos de información cuando, por ejemplo, los economistas no saben el valor nominal del PIB hoy, y no lo pueden saber porque los trabajos disponibles no se informan inmediatamente a las personas que los están buscando, es decir, hoy el PIB tiene un valor, pero éste sólo podrá calcularse un tiempo después una vez se recolecte los datos necesarios para calcularlo, este tiempo será el tiempo de retardo. Otro ejemplo se presenta cuando se toman decisiones sobre, por ejemplo, qué tanto producir basado únicamente en la información de las ventas; en este caso las ventas promedio pueden ser utilizadas como expectativas de venta real.

Es importante que el lector recuerde que el orden de un retardo viene dado por el número interno de niveles que tenga la estructura que lo representa y que el tiempo de ajuste TA es el tiempo promedio que una unidad permanece dentro del retardo.

En la siguiente figura se muestra como se implementa un retardo en *Evolucion*®. La variable auxiliar Entrada se define como  $Entrada = IF(t=0, 100, 0)$ , es decir, que para  $t=0$ , tendrá un valor de 100, en cualquier otro tiempo su valor será 0. El retardo se define como  $Salida = RETARDO(Entrada, TA, 1, 0)$ , en donde *Entrada* representa el origen de los datos, TA es el tiempo de ajuste o tiempo de retardo, 1

indica el orden y 0 el valor inicial del retardo. Se invita al lector para que observe cuidadosamente la figura 45 y establezca la relación con la figura 44.



**figura 45**      *Retardo de orden uno de información*

Tanto el retardo de información, como el retardo de material se representan con la misma función en *Evolucion*®, la diferencia debe estar clara en la mente del modelador.

## CAPÍTULO 5: ELABORACIÓN DE DIAGRAMAS DE FORRESTER

### Introducción

Este capítulo retoma los referentes teóricos que han sido planteados desde un comienzo del curso, referidos especialmente a la teoría general de sistemas, el pensamiento sistémico, la elaboración de diagramas de influencias y los elementos de los diagramas de Forrester.

Para conseguir mostrar la forma en que se elabora un diagrama de Forrester se llevará a cabo el modelado del fenómeno relacionado con la dinámica de la presa predador que fuera presentado formalmente por Lotka y Volterra<sup>25</sup>. Los autores referenciados plantearon un modelo en ecuaciones diferenciales para representar la evolución de dos tipos de especies diferentes que están unidas por un fuerte vínculo enmarcado en el más puro darwinismo (*Las especies que sobreviven no son las especies más fuertes, ni las más inteligentes, sino aquellas que se adaptan mejor a los cambios*); una especie presa, por ejemplo conejos, y otra especie predadora, para el caso, los zorros que conforman un mismo ecosistema.

---

<sup>25</sup> Se invita al lector a consultar esta página web: <http://jmonzo.blogspot.com/2008/09/lotka-volterra-interdependencia.html>

## Lección 21: Leyendo el Diagrama de Influencias

Una de las primeras tareas que hay que llevar a cabo para construir los diagramas de Forrester es asegurarse de que el fenómeno que se está modelando ya existe en nuestra mente, (no olvidar la dinámica del ser al existir de la lección 1, del capítulo 2, de la unidad 1) y una vez que el fenómeno exista lo podamos representar mediante un diagrama de influencias. En lo que sigue se mostrará una manera en la que se evidencia que el fenómeno existe, luego se muestra cómo se modela mediante el diagrama de influencias y el de Forrester.

Se sigue con la solución propuesta por Lotka y Volterra (1978) a la dinámica que se desarrolla en el espacio de un ecosistema cuando dos especies conviven siendo una de ellas la presa y el otro el predador. Se invita al lector a revisar esta dirección web <http://forio.com/simulate/billy/predator-prey-dynamics/run/>

### Del ser al existir de la dinámica conejo-zorro

Se hará aquí una descripción de la dinámica propia del fenómeno en estudio. Para ello se definirán unos supuestos iniciales, los cuales en las primeras versiones de un modelo deben ser lo más simples posible. Para este caso el primer supuesto es que la especie presa se desenvuelve en un medio sin escasez de alimento, el segundo supuesto es que la especie presa no tiene otro predador adicional; el tercer supuesto es que la especie predatora únicamente consume la especie presa, es decir, sólo existe competencia inter-específica y no competencia intra-específica o canibalismo.

Es preciso señalar que los supuestos simplifican el fenómeno, pero se requiere hacerlo para poder iniciar el proceso de modelado, ahora bien, en la medida en que sea necesario incrementar el poder explicativo del modelo habrá que incluir más variables y replantear los supuestos. Lo antes expuesto implica que el modelo parte de la hipótesis de que se trata de un sistema cerrado, es decir que ambas especies están encerradas en un espacio con las condiciones de una isla como si se tratara de un *reality show* al estilo del “*big brother*”.



figura 46      Modelo Presa Predador<sup>26</sup>

<sup>26</sup> Fotografía tomada de:  
[http://sakshat.amrita.ac.in/VirtualLab/?sub=BIOTECH&brch=POE&sim=lotka\\_volta\\_simulator&cnt=theory](http://sakshat.amrita.ac.in/VirtualLab/?sub=BIOTECH&brch=POE&sim=lotka_volta_simulator&cnt=theory)

Para elaborar el diagrama de influencias se procede a identificar las variables importantes para la descripción del sistema.

### El diagrama de influencias del modelo presa predador

Recordando los supuestos iniciales de que sólo hay una especie predatora y una presa, que no hay problemas de alimentos para los conejos y que se trata de un sistema cerrado, las variables a considerar son las siguientes:

El número de conejos, el número de zorros, la necesidad alimenticia de los zorros, la tasa de natalidad de los zorros y los conejos, la vida promedio de los zorros y conejos, la densidad poblacional de los zorros y conejos.

Cada una de estas variables se relaciona mediante arcos entre ellas formando el diagrama de influencias que se muestra en la figura 47. Se invita al lector a revisar el capítulo tres de la Unidad Uno.

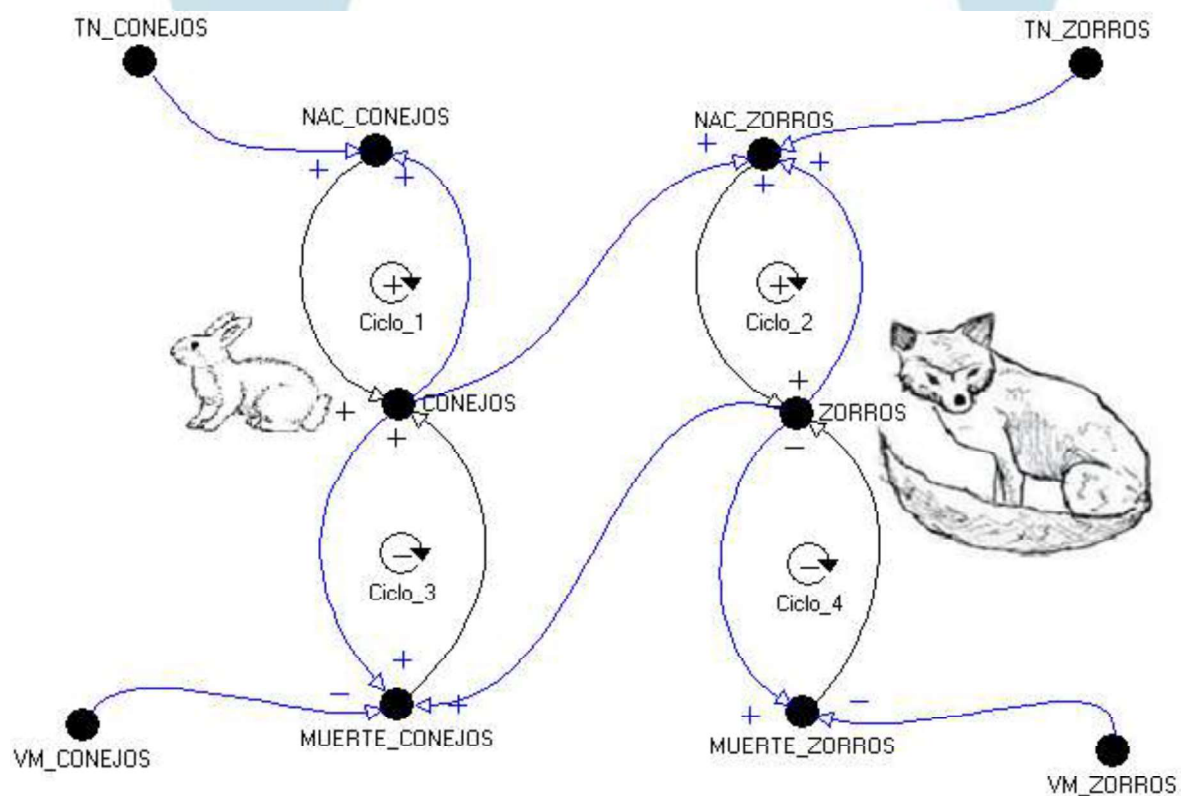


figura 47 Diagramas de Influencias Presa Predador

Del gráfico es posible observar que la cantidad de conejos aumenta consecuencia de los nacimientos y éstos a su vez aumentan consecuencia de la tasa de natalidad y la cantidad actual de conejos. Igual análisis se aplica con los zorros,



sólo que los nacimientos, en el caso de éstos, depende de la cantidad de conejos, su fuente de alimento.

Es importante que el lector note el signo en la punta de cada fecha, por ejemplo de nacimientos de conejos a conejos la flecha tiene un signo más “+”, esto indica que al haber nacimientos se incrementa el número de conejos y a su vez si el número de conejos aumenta, los nacimientos de conejos también aumentan, es decir, aparece una relación circular o ciclo de realimentación, en este caso, positivo. Se invita al lector a revisar los ciclos de realimentación 2, 3 y 4 y después que identifique un ciclo adicional en el gráfico.

Es importante señalar que la metodología de dinámica de sistemas plantea la elaboración de una hipótesis dinámica, la cual, como se ha dicho antes, se presenta mediante un diagrama de influencias el cual debe capturar las relaciones básicas de realimentación que dan cuenta del fenómeno estudiado. No obstante, el diagrama de influencias no recoge otras características útiles del sistema: no se tiene información sobre el tiempo de simulación, ni se explica si una variable está describiendo el estado del sistema, o la magnitud de las relaciones que se dan en su interior, así como la relación funcional entre las variables, es decir, no informa claramente sobre los niveles, los flujos o las variables auxiliares, respectivamente.

Es importante señalar que no se debe confiar plenamente en la versión final de un diagrama causal a menos que se haya hecho un diagrama de flujos y niveles a partir de él, pues la construcción del diagrama de Forrester permite corregir relaciones que se pasan por alto cuando se hace un diagrama de influencias.

## Lección 22: Definiendo los Niveles

Esta lección mostrará algunas prácticas que son convenientes de llevar a cabo a la hora de identificar los niveles a partir del diagrama de influencias.

Inicialmente se debe recordar que los niveles son acumulaciones, que caracterizan el estado del sistema, que generan información para la toma de decisiones, que son la memoria del sistema y además que crean retardos al acumular la diferencia entre lo que entra y lo que sale. De otra parte se debe tener en cuenta que los niveles son generalmente una cantidad y que son los flujos los que causan las variaciones de dicha cantidad.

Así mismo es importante tener en cuenta que se debe cumplir con el principio de conservación de la materia, es decir, que los contenidos de los niveles y de los retardos de material se conservan, es decir, que las cosas deben permanecer en los niveles o retardos hasta que salen.

Otro aspecto importante a considerar es que los sistemas dinámicos modelados con dinámica de sistemas son de estado determinado, esto es, que un nivel únicamente cambia por flujos de entrada y salida, y estos a su vez son determinados por los niveles.

### Manos a la obra.

Inicialmente hay que hacerse la siguiente pregunta: ¿qué cosas se acumulan o se van disminuyendo en el fenómeno? Para el caso de la isla y teniendo en cuenta los supuestos es claro que tanto los conejos como los zorros se acumulan, es decir, la cantidad de zorros que se tiene hoy en la isla será igual a la cantidad que había ayer más los que nacen entre ayer y hoy, menos los que mueren en el mismo intervalo de tiempo. Igual análisis opera con los conejos, se invita al lector para que lo realice por su propia cuenta.

Si lo anterior se expresa en términos de ecuaciones en diferencias se tiene que:

$$Z(t) = Z(t-1) + \text{Nac}Z(t-1) - \text{Mue}Z(t-1),$$

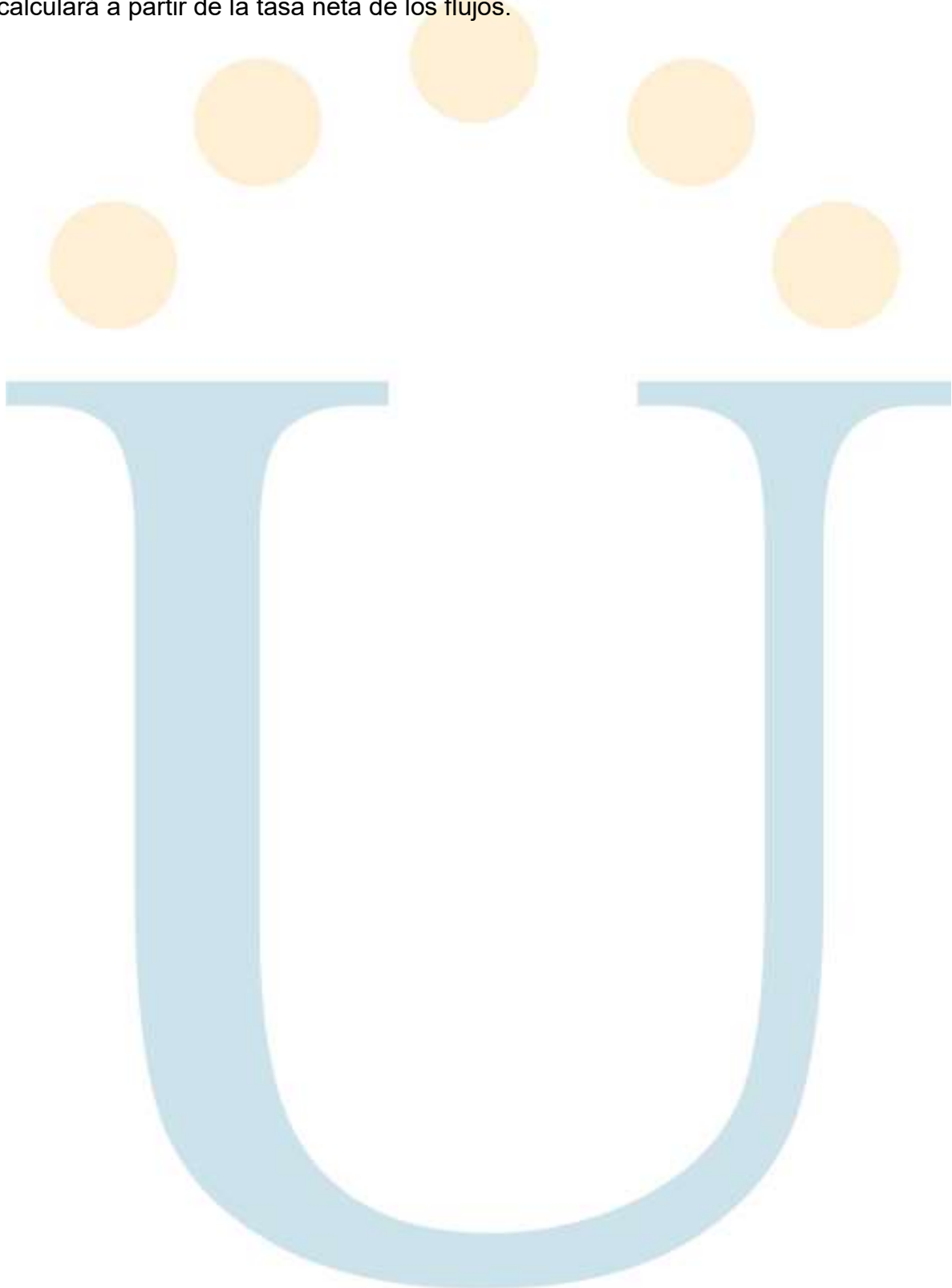
En donde  $Z(t)$  es la cantidad de zorros en el tiempo  $t$ ,  $\text{Nac}Z(t-1)$  es la cantidad de zorros nacidos entre  $t$  y  $t-1$  y  $\text{Mue}Z(t-1)$  es la cantidad de zorros que mueren entre  $t$  y  $t-1$ .

Nótese que  $Z(t)$  es el resultado de una suma algebraica.

Al revisar las demás variables, ninguna de ellas tiene un comportamiento que implique acumulación. Se sugiere revisar el símil hidrodinámico.

Solamente las variables de nivel pueden ser incrementadas o disminuidas por variables de flujo. Si un parámetro o una variable auxiliar, está conectada a una

variable de nivel, es porque es la condición inicial de la variable de nivel, y depende de ese parámetro o variable auxiliar. Después del tiempo cero, el nivel se calculará a partir de la tasa neta de los flujos.



### Lección 23: Identificando los Flujos

Una vez se han identificado los niveles la tarea de identificar los flujos resulta más sencilla pues los flujos siempre estarán relacionados con los niveles.

Se debe recordar que el tiempo en dinámica de sistemas es continuo, pero los flujos deben ser necesariamente instantáneos. La Dinámica de Sistemas representa el tiempo como continuo, básicamente porque los eventos ocurren en cualquier momento y el tiempo puede ser dividido en finos intervalos de tiempo ( $\Delta t$ ). De otra parte nadie podrá medir el valor instantáneo de ningún flujo, pues siempre el flujo se dará entre dos instantes de tiempo, a ese espacio temporal se le denomina  $\Delta t$  y en cálculo infinitesimal es  $dt$ .

Las unidades que fluyen hacia y desde un nivel pueden ser o continuamente divisibles como es el caso de las fracciones de pesos o un número discreto de cosas, por ejemplo, cantidad de personas.

En el caso de los conejos y los zorros de la isla es claro que si un nivel está determinado por el número de Conejos, habrá dos cosas que lo afectan, de un lado los nacimientos y de otro las muertes. Se sugiere revisar figura 47.

Fíjese señor lector que la cantidad de conejos se incrementa con los conejos que nacen. Así mismo la cantidad de conejos se disminuye con las muertes. De esta manera se identifica un par de flujos que afectan al nivel. En la siguiente gráfica se ilustra esta situación.

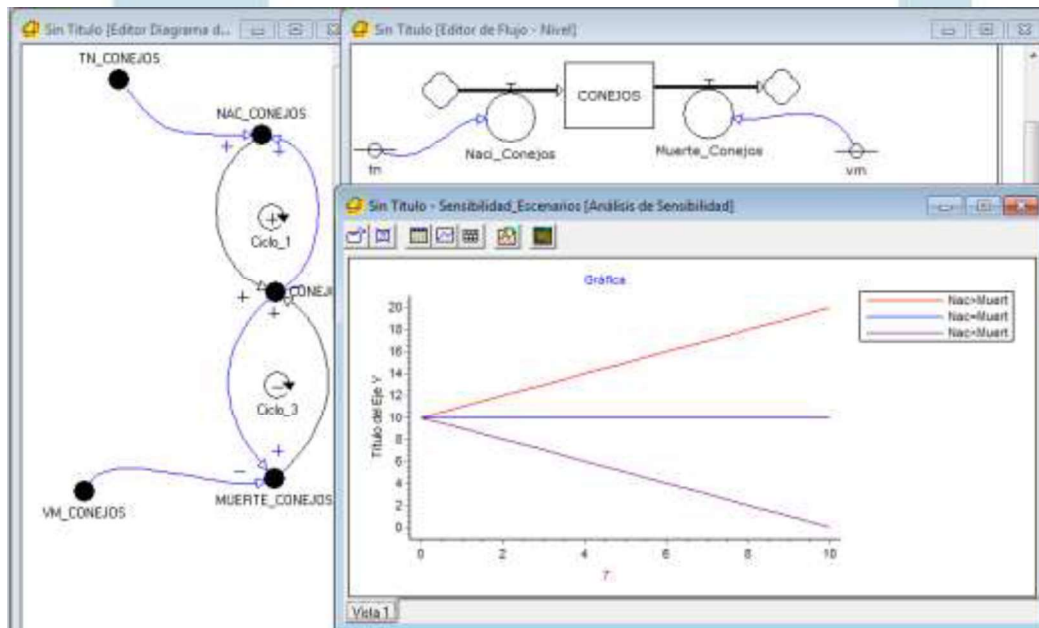
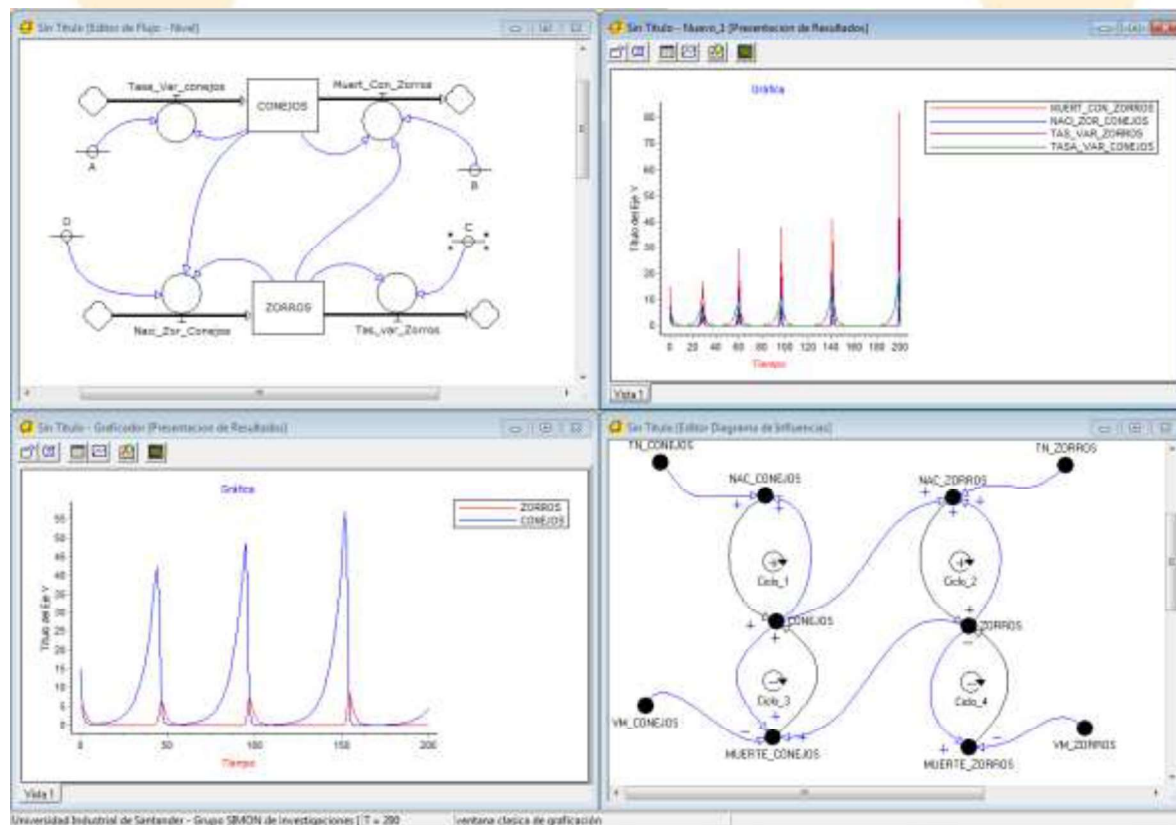


figura 48 Nivel y Flujos asociados a los conejos

La figura 48 muestra el diagrama de influencias, el diagrama de Forrester y una gráfica de comportamiento, asociados a la dinámica propia de los Conejos. En dicha gráfica es posible observar el nivel Conejos y los flujos Naci\_Conejos y Muerte\_Conejos responsables de las variaciones de éste. Si los nacimientos son mayores a las muertes se espera lógicamente un crecimiento de la cantidad de conejos; si las muertes son mayores a los nacimientos se producirá una disminución de la cantidad de conejos a tal punto de llevarlos a la extinción; si ambos flujos son iguales el nivel se mantendrá con el mismo valor inicial.

Revisemos en lo que sigue la manera como se desarrolla el modelo de los conejos y los zorros.



*figura 49      Modelo presa - predador*

En este modelo tanto la variable Conejos y como Zorros son los niveles o variables de estado y representan el número de conejos y zorros respectivamente. A, B, C y D son constantes positivas, para el caso de la dinámica de sistemas son parámetros. Los cuatro términos tienen el siguiente significado: A y C reflejan las condiciones de crecimiento de las especies, es decir, A es igual a la tasa de natalidad de conejos menos la tasa de mortalidad de conejos y C refleja la misma relación pero con respecto de los zorros. Para el caso de B y D estos parámetros reflejan las interacciones entre los zorros y conejos, es decir, B establece la



relación condicionante de existencia de conejos para la reproducción de los zorros y D representa la relación de depredación de los conejos por parte de los zorros.

En ausencia de zorros la población de conejos, (la velocidad de variación del número de conejos), aumenta con el tiempo de forma proporcional al número de conejos. El crecimiento es exponencial (ley de crecimiento malthusiana) y A es su ritmo o tasa de crecimiento, es decir, su tasa de reproducción; en el modelo esta situación es modelada con el flujo Nacimientos de conejos.

En ausencia de conejos el número de zorros (su velocidad de variación) disminuye exponencialmente y de forma proporcional (con ritmo C) al número de zorros presentes; en el modelo éste efecto se simula con el flujo muerte de zorros. Se supone que resulta esencial la existencia de conejos suficientes para poder crecer o, al menos, mantener la población actual.

En presencia de los zorros el número de conejos disminuye como consecuencia de los posibles encuentros entre presa-predador y este efecto se supone proporcional al producto de ambas poblaciones ( $-B \cdot \text{Conejos} \cdot \text{Zorros}$ ), esto se refleja en el modelo mediante el flujo de muertes de conejos; mientras que la población de zorros aumenta como consecuencia de estos encuentros en una forma similar ( $D \cdot \text{Zorros} \cdot \text{Conejos}$ ); en el modelo esto se representa en el flujo Nacimiento de zorros.

Es preciso que el lector reconozca lo dicho en los párrafos anteriores en el modelo.

## Lección 24: Usando las variables auxiliares

Las lecciones previas han dado algunas ideas para identificar niveles y flujos; en lo que sigue se darán expondrán algunas ideas acerca de cómo usar adecuadamente las variables auxiliares.

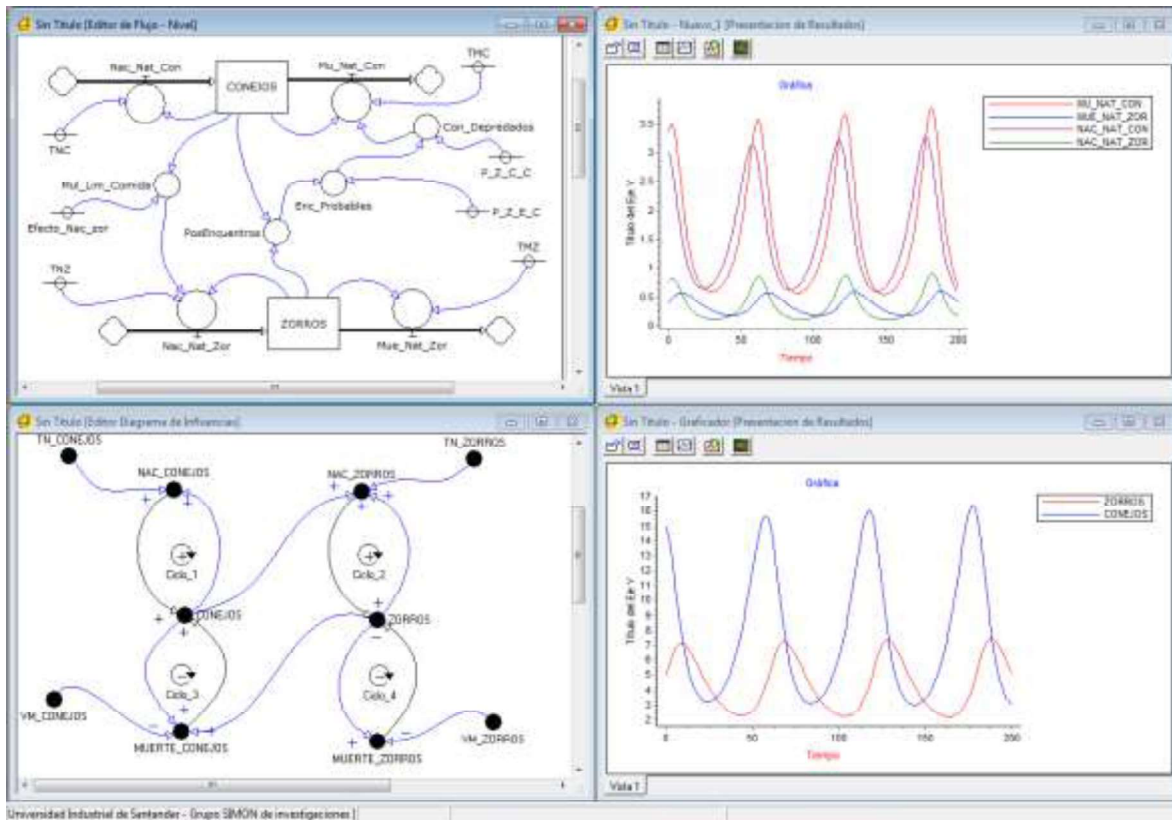
Las variables auxiliares representan pasos o etapas en que puede llegar a estar el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores representados por los estados de la variable de nivel. Las variables auxiliares unen los canales de información entre las variables de nivel y las de flujo, aunque en realidad son parte de las variables de flujo. Sin embargo se distinguen de ellas en la medida en que su significado real sea más explícito. Las variables auxiliares de pueden emplear para mostrar relaciones no lineales.

Si se revisa el modelo de conejos-zorros, allí aún no hacen aparición las variables auxiliares, básicamente por no ser necesarias, pero podrían ser incluidas para aumentar el poder explicativo del modelo.

La manera en que se deben usar las variables auxiliares se ilustra en la figura 50. Si se observa con detenimiento es posible percatarse de como aparecen las variables `Mul_Lim_Comida`, `Enc_Probables` y `Con-Depredados`. La primera variable considera el efecto que sobre los nacimientos de los predadores tiene la presencia o no de presas; esta variable (`Mul_Lim_Comida`) se determina a partir de un parámetro (`Efecto_nac_zor`) y la cantidad de conejos, expresando finalmente el efecto que la abundancia o escasez de comida tiene sobre los nacimientos de los predadores. La variable auxiliar `Enc_Probables` calcula de manera instantánea la cantidad de encuentros entre zorros y conejos, variable que resulta determinada por la cantidad de zorros, la de conejos y por la probabilidad de que ocurra un encuentro entre miembros de las poblaciones. Finalmente la variable `Con-Depredados` calcula la cantidad de conejos que son depredados consecuencia de la cantidad de zorros existentes. La importancia de esta variable auxiliar consiste en que logra separar de un lado a los conejos que mueren de forma natural y de otra a aquellos que mueren en las fauces de los zorros. No olvidar, en todo caso, que el modelo de Locka-Volterra del cual se partió no hace esta distinción.

Los parámetros utilizados representan cantidades que no cambian a través del tiempo y permanecen constantes o su tasa de cambio es tan lenta que en el horizonte temporal considerado no logra un cambio significativo que produzca sesgos importantes en los resultados del modelo.

Se invita al lector para que revise detenidamente el modelo y logre identificar allí las nuevas variables auxiliares que se incluyeron en el modelo al igual que los parámetros que fue necesario incluir.



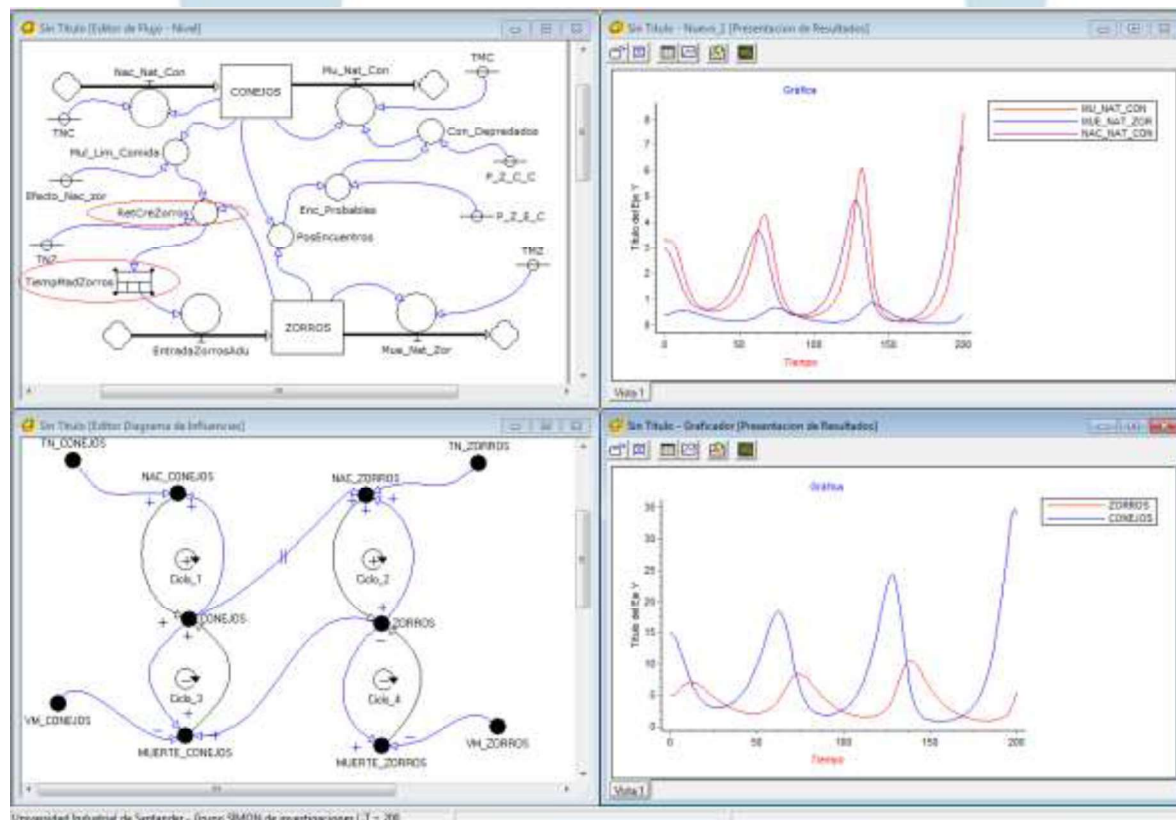
*figura 50      Modelo presa – predador con variables auxiliares*

Nótese también que los valores de las curvas lo mismo que los aspectos cualitativos han cambiado, pero mostrando un comportamiento más suave que podría ser más cercano a la realidad.

## Lección 25: Usando los retardos y tablas

Cuando se incluye un retardo en un modelo, éste puede producir alteraciones en el comportamiento observado. Si se revisa el modelo es claro que los nacimientos de zorros aumenta la cantidad de zorros, pero también es cierto que todos los zorros no van a cazar conejos, ya sea porque están muy pequeños o porque estén muy viejos, en cuyo caso o comen las sobras o simplemente mueren.

Si al modelo de zorros y conejos se le adiciona un retardo que represente el tiempo que le lleva a un zorro cachorro convertirse en adulto se ganaría en capacidad explicativa del modelo, pues el supuesto de que todos los zorros cazan sería más real; en este caso habría que calcular los nacimientos con una nueva variable auxiliar (NacZorros) y luego retardar su inclusión en el nivel de zorros un cierto tiempo equivalente al necesario para que el cachorro se convierta en adulto. La variable de flujo ahora se llama EntradaZorrosAdu, es decir, que sólo se considera al flujo como entrada de zorros a la isla, o en otras palabras, zorros que abandonan a la madre y se convierten en potenciales cazadores. Se invita al lector a revisar la siguiente figura.



*figura 51      Modelo Presa Predador con Retardo*

Nótese las elipses rojas que indican los cambios antes descritos, obsérvese el efecto sobre, los zorros y los conejos, luego de haber incluido un retardo. Los



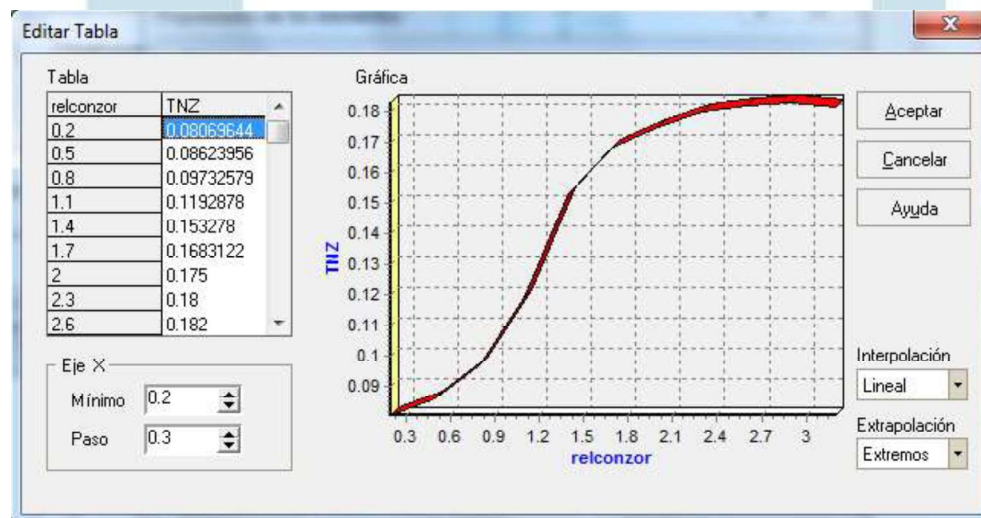
retardos en los sistemas son los responsables de los cambios, en la mayoría de los casos, contra-intuitivos por lo que son difíciles de identificar en el fenómeno modelado. Cuando se usan retardos, éstos se deben indicar en el diagrama de influencias con un par de barras paralelas, ver el diagrama de influencias de la figura 51. Conviene repasar la lección 5 del capítulo 4: Caracterización de los Retardos.

Las tablas se usan en dinámica de sistemas para representar ya sea no linealidades o multiplicadores.

En el actual modelo se ha considerado que la relación entre conejos y zorros, para garantizar la supervivencia de los últimos es de 0.17, (que equivale a decir que un zorro se come dos conejos en promedio en cada intervalo de tiempo, en las condiciones iniciales del modelo) este valor es constante sin importar la relación entre unos y otros que suele cambiar a través del tiempo, lo que haría que se incrementaran o disminuyeran los nacimientos por la consideración básica de la densidad poblacional.

Si en el modelo se cambia la tasa natural de nacimiento de zorros por una relación cambiante según se explicó arriba, se tendría que usar un multiplicador que recogería el efecto del cambio en la densidad poblacional y lo aplicaría a la variable nacimientos de zorros. Este hecho naturalmente cambia de nuevo la dinámica del comportamiento, pero sigue mostrando una cualitativamente semejante.

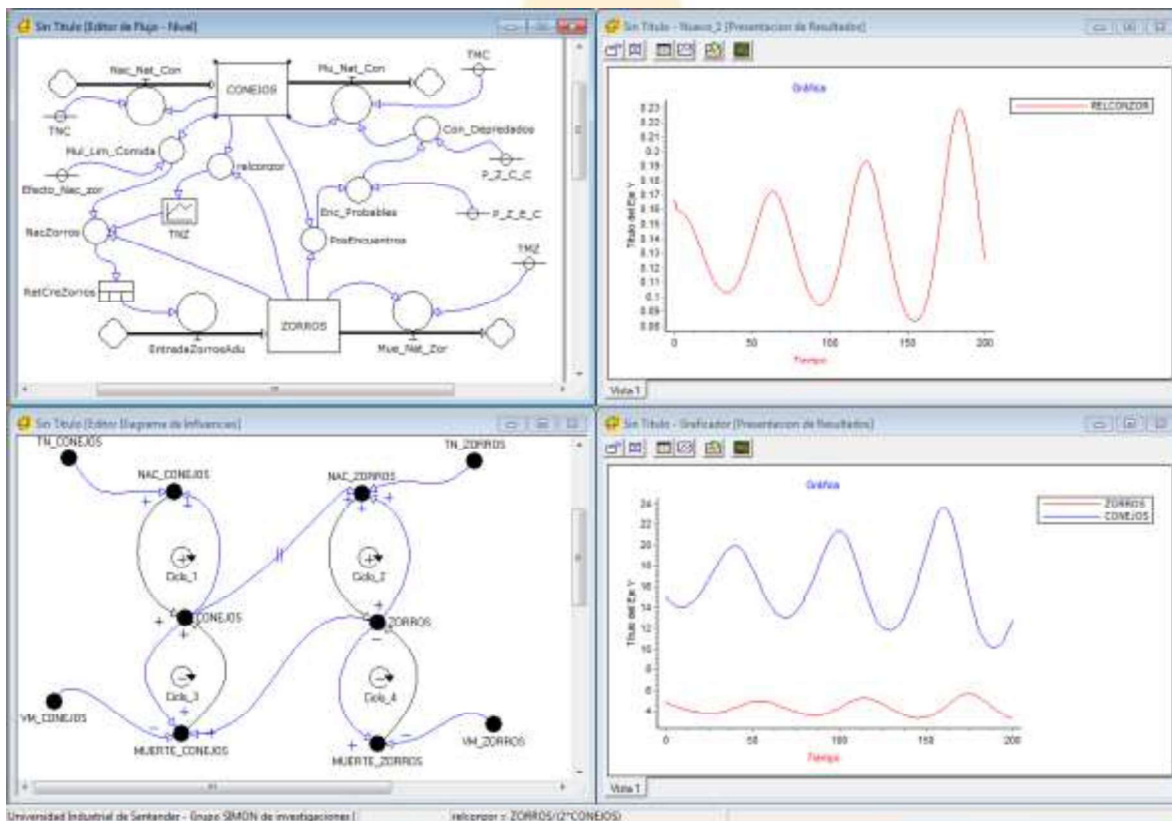
La figura 53 se muestra cómo queda el modelo después de hacer los cambios indicados y en la siguiente el multiplicador diseñado para reemplazar la tasa TNZ.



*figura 52      Multiplicador*



Nótese que la salida TNZ varía entre 0.080 y 0.182, es decir que esos valores están por encima y por debajo de 0.17 que era el valor del parámetro anterior llamado TNZ.



**figura 53      Modelo Presa Predador con Retardo y Multiplicador**

Es importante ver que la entrada del multiplicador es la variable auxiliar relconzor que se calcula a partir de la relación número de zorros dividido por el doble del número de conejos. Es importante señalar que este cambio nos muestra en el modelo un comportamiento que se aproxima a la solución teórica de Locka-Voletra.

Para elaborar el modelo tenga en cuenta las siguientes ecuaciones.

Nombre = CONEJOS :Nivel\_  
 Definición = 15  
 Descripción =

Nombre = Con\_Depredados :Auxiliar\_  
 Definición =  $\bar{Enc\_Probables} * P\_Z\_C\_C$   
 Descripción =

Nombre = Efecto\_Nac\_zor :Parametro\_  
Definición = 0.06  
Descripción =

Nombre = Enc\_Probables :Auxiliar\_  
Definición = PosEncuentros\*P\_Z\_E\_C  
Descripción =

Nombre = EntradaZorrosAdu :Flujo\_  
Definición = RetCreZorros  
Descripción =

Nombre = Mu\_Nat\_Con :Flujo\_  
Definición =  $(TMC * CONEJOS) + Con\_Depredados$   
Descripción =

Nombre = Mue\_Nat\_Zor :Flujo\_  
Definición =  $TMZ * ZORROS$   
Descripción =

Nombre = Mul\_Lim\_Comida :Auxiliar\_  
Definición =  $CONEJOS * Efecto\_Nac\_zor$   
Descripción =

Nombre = NacZorros :Auxiliar\_  
Definición =  $(TNZ * ZORROS) * Mul\_Lim\_Comida$   
Descripción =

Nombre = Nac\_Nat\_Con :Flujo\_  
Definición =  $TNC * CONEJOS$   
Descripción =

Nombre = P\_Z\_C\_C :Parametro\_  
Definición = 0.7  
Descripción =

Nombre = P\_Z\_E\_C :Parametro\_  
Definición = 0.05  
Descripción =

Nombre = PosEncuentros :Auxiliar\_  
Definición =  $CONEJOS * ZORROS$   
Descripción =

Nombre = RetCreZorros :Retardo\_  
Definición =  $RETARDO(NacZorros, 1, 1, 0)$

Descripción =

Nombre = TMC :Parametro\_

Definición = 0.05

Descripción =

Nombre = TMZ :Parametro\_

Definición = 0.08

Descripción =

Nombre = TNC :Parametro\_

Definición = 0.2

Descripción =

Nombre = TNZ :Tabla\_

Definición =

INTLINEAL(2,0.2,0.3,0.08069644,0.08623956,0.09732579,0.1192878,0.153278,0.1683122,0.175,0.18,0.182,0.183,0.1815029)

Descripción =

Nombre = ZORROS :Nivel\_

Definición = 5

Descripción =

Nombre = relconzor :Auxiliar\_

Definición =  $ZORROS / (2 * CONEJOS)$

Descripción =

## CAPÍTULO 6: SIMULACIÓN

### Introducción

Se acepta comúnmente que la simulación es la experimentación que se lleva a cabo usando un modelo de una hipótesis o de un conjunto de hipótesis que dan cuenta de un sistema o de la solución a un problema simulado.

Shannon (1976) define la simulación como "el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos - para el funcionamiento del sistema".

Para Naylor (1971) la simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo.

En adelante se puede asumir que la simulación es la generación de posibles estados de un sistema con el concurso de las matemáticas y las computadoras dentro del contexto de un lenguaje de modelado.

## Lección 26: Escenarios de Simulación

Los escenarios de simulación son el equivalente a las condiciones iniciales que se usan en la resolución de ecuaciones diferenciales. Se definen a partir de los valores de los parámetros y las variables de estado o niveles y las formas particulares de las no-linealidades y los multiplicadores.

Hasta acá debe ser claro que la simulación permite tomar decisiones de manera virtual, aprender de los errores y de los aciertos, y luego volver atrás como si nada hubiese ocurrido, es decir, que con un buen modelo, se pueden evaluar diferentes estrategias y estudiar sus efectos en el entorno para extrapolar conclusiones. Se adquiere experiencia con costos bajos y evitando el riesgo de enfrentar potenciales consecuencias adversas.

Mediante un plan de pruebas, se evaluarán los beneficios y los riesgos asociados a cada alternativa en los escenarios simulados; así podrá identificarse la estrategia más conveniente en cada caso.

Una situación común en los albores del siglo XXI es la prisa o el ansia por obtener resultados en el corto plazo, la falta de planificación y elaboración de soluciones. Por este motivo una de las tareas a las que todo individuo con poder de decisión debería dedicarse es al modelado y diseño de escenarios de simulación.

Pensar los escenarios de simulación es una tarea pesada y que la mayoría prefiere dejar para otros, pero sin esta base las decisiones no serán tomadas de forma acertada debido básicamente a la falta de dirección, estrategia, visión y planificación, y mucho más en un entorno cambiante.

Algunos teóricos como Peter Schwartz (1991), proponen algunas estrategias para llevar a cabo de forma exitosa “*simulaciones de escenarios*”, definiendo posibles situaciones futuras para determinar las acciones a desarrollar. No es una receta infalible, sino de una técnica mediante la cual se trata de definir cómo será el entorno en el medio y largo plazo (con varios escenarios) y definir las acciones a desarrollar para lograr los objetivos propuestos.

La técnica de Schwartz, adecuada al modelado dinámico sistémico, tiene 5 pasos.

1. Realizar un modelo: procurando identificar las variables relevantes del sistema.
2. Definir un mapa con dos ejes; los ejes vendrán determinados por las dos variables más inciertas que se haya identificado.
3. Imaginar futuros posibles. A veces definir escenarios es muy frío, de forma que puedes tratar de transformar cada escenario en una historia de futuro.



4. Pensar en implicaciones y acciones. Para cada escenario pensar en implicaciones y acciones a desarrollar
5. Finalmente será necesario definir indicadores de seguimiento. Definidos los escenarios y las actuaciones es imprescindible realizar un seguimiento de los mismos con la finalidad de poder ir modulando las acciones.

Este ejercicio no dará el escenario futuro exacto pero si ayudará a:

- Analizar la situación actual
- Analizar el entorno
- Reelaborar los modelos mentales acerca de la realidad
- Mantenerse atento a los cambios
- Disponer de un plan de actuación a medio y largo plazo
- Huir de la coyuntura de un momento

En lo que sigue se hacen un par de aclaraciones que es preciso que el lector domine conceptualmente. Un escenario debe ser entendido como la descripción de una situación que pudiese presentarse como resultado de una acción o por una dinámica evolutiva en el tiempo. Así mismo la construcción de escenarios implica el diseño y elaboración de un número de visiones consistentes internamente de futuros posibles, combinando la información disponible y las posibilidades de futuro.

El diseño de escenarios de simulación permiten en esencia visualizar el futuro, y es especialmente útil cuando éste no puede ser visto como una simple prolongación del pasado, es decir, cuando una mera extrapolación generada por una regresión es suficiente. Tal visualización consiste en tener un panorama de futuros posibles, representados cada uno de ellos en un escenario determinado.

#### **Algunas características del diseño de escenarios:**

- Ejercicio colectivo, es decir, se debe desarrollar un proceso de reflexión compartida.
- Se proyecta al largo plazo, esto es, 10, 15 o 20 años son los horizontes temporales habituales.
- Se valoran las proyecciones en el marco del fenómeno determinado por sus efectos sociales, políticos y económicos.
- Se analizan y valoran los obstáculos que se oponen a la materialización de las proyecciones o comportamientos esperados y se revisan las fuerzas que pueden facilitarlas. Alta dependencia con la realidad modelada.

### **Escenarios y pronósticos**

Los escenarios tienen que ver con los procesos relativos a “precisar” lo que va a pasar, como consecuencia de una acción determinada o de una dinámica evolutiva de un proceso de naturaleza esencialmente incierto.

El pronosticar es en esencia un sinónimo de predecir y el resultado de un buen proceso de simulación de escenarios ha de ser cuál de un conjunto posible de “escenarios” es más probable, es decir, cuál será el escenario que ha de ser pronosticado.

### **Los escenarios y la toma de decisiones**

La inteligencia en la toma de decisiones se entiende como la capacidad de reunir y analizar datos para la difusión de información relevante que permita crear conocimiento apto, empleando para ello la simulación mediante escenarios como herramienta de estudio de los pronósticos o de los futuros plausibles, con el fin de determinar entre todos los escenarios posibles el más favorable y probable.

Tanto la cobertura como el tipo de simulación a seguir la debe definir el usuario final del modelo, esto se justifica en la medida en que la simulación de escenarios puede ser aplicada a cualquier problema que pueda ser modelado y que requiera de una solución estratégica.

### **Cómo construir o Simular escenarios.**

Adicional a la propuesta de Peter Schwartz (1991), en términos generales se puede proponer como etapas para la construcción y simulación de escenarios las siguientes:

#### **Etapas**

1. Identificar el tema focal, los objetivos del análisis, el horizonte temporal, el problema a modelar y a resolver.
2. Seleccionar el grupo de trabajo que puede ser mediante la aplicación de:
  - 2.1. Técnicas prospectivas, es decir: seleccionar un grupo con un nivel lo más homogéneo posible; realizar trabajo individual; que haya anonimato entre los integrantes del grupo y que los datos se den a partir de juicios de valor basados en conocimiento, experiencia, imaginación, sentido común e intuición.
  - 2.2. aplicando la inteligencia empresarial, mediante el aporte de especialistas en Inteligencia empresarial más un grupo pequeño de expertos (con iguales características). El grupo de expertos apoya el trabajo y lo complementa, pero los datos principales, parten de los productos de inteligencia previamente realizados, ej: estudios de tendencias.

3. Analizar el entorno, que consiste básicamente en identificar el contexto dentro del cual se desarrolla el problema procurando identificar variables exógenas determinantes o determinadas por el problema en cuestión.
4. Identificar y caracterizar las variables claves predecibles, construir el modelo, para ello se siguen los lineamientos previamente presentados en las lecciones precedentes, pero vale la pena recordar que es conveniente la determinación:
  - 4.1. de varios indicadores que caractericen el futuro de una variable.
  - 4.2. de las variables o indicadores que caractericen un escenario o situación.
  - 4.3. y de las variables considerando las tendencias y eventos que permitan construir todos los escenarios posibles: Tendencias: variables continuas importantes en la descripción del estado de un escenario, basadas en consideraciones políticas, económicas, sociales y técnicas. Eventos: cambios repentinos que pueden ocurrir en el futuro, donde la ocurrencia de un evento puede alterar la estructura de los escenarios y por tanto de una o más tendencias.
5. Recopilación de los datos. Esta fase consiste básicamente en la caracterización de una o varias variables a partir de fuentes confiables como opiniones de expertos o datos medidos por otras fuentes. Cada variable debe quedar expresada en su escala natural de medición y todos los resultados deben ser expresados en una sola escala de medición, la más factible, esto redundará en la homogeneidad de los resultados.
6. Procesamiento y análisis de los resultados. Para este propósito se pueden realizar desde dos perspectivas ya sea la sintética o la analítica. En el primer caso se obtiene un escenario con los valores síntesis de cada variable y en el segundo se construyen escenarios posibles, tomando en consideración todas las relaciones entre los eventos y las tendencias.
7. Construcción del escenario futuro o de todos los posibles, con la determinación de los más probables y favorables. Para lograrlo se propone:
  - 7.1. Determinación del escenario más probable. Empleo de Evolución o Vensim o cualquier otro software.
  - 7.2. En el grupo de trabajo se determinan los escenarios: más optimista y pesimista entre los más probables.
  - 7.3. Elaboración de un plan de acción para cada escenario seleccionado, que permita, en la medida de la variación de las circunstancias, tomar medidas con la previsión adecuada. Interacción con el futuro
8. Evaluación de las implicaciones de los escenarios al planeamiento estratégico que pueden ser de alcance:

Nacional o regional, por ejemplo en la:

- Determinación del futuro socioeconómico de una región o país.
- Identificar campos de desarrollo y aplicación de la tecnología.
- Caracterización de las tecnologías futuras en un sector determinado.
- Futuro del comercio internacional: nuevas modalidades.
- Caracterización de escenarios futuros de sectores industriales.

Empresarial en el análisis y comprensión de las fuerzas que operan en el entorno y que determinan o determinarán los escenarios en los que deben o deberán gestionar las empresas. Algunos ejemplos:

- Estrategia para la comercialización de un producto o servicio.
- Evaluación de la factibilidad de un proceso de transferencia de tecnología.
- Evaluación de la factibilidad de una fusión o alianza.

9. Toma de decisiones. Interacción con el futuro, acciones dirigidas al escenario más favorable. Para lograr una efectiva toma de decisiones se debe:

- Partir de un conocimiento profundo de las realidades del espacio a caracterizar y de las herramientas y metodologías a emplear.
- Manejar tanto la inteligencia organizacional, como la prospectiva, los pronósticos y la simulación de escenarios, consideradas éstas como herramientas estratégicas.
- Emplear la simulación de escenarios para predecir o generar futuros plausibles posibilitando la interacción con éste, permitiendo alcanzar una mayor competitividad.
- Simular escenarios teniendo en cuenta que se trata de una de las herramientas claves para la realización de pronósticos y la práctica de la prospectiva contribuyendo directamente en la reducción del nivel de incertidumbre.

En la lección que sigue se construirá un par de escenarios con el modelo de los conejos y los zorros y se procederá con el análisis de sensibilidad.

## Lección 27: Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad tiene como propósito, a partir del diseño de un escenario, identificar los lugares en los que el sistema es más sensible, es decir, aquellos lugares en que con poco esfuerzo se logran resultados importantes.

### El análisis de sensibilidad permite:

- Estimar la sensibilidad de los resultados del modelo a cambios de un parámetro, realizando análisis del tipo “que pasa si”.
- Conocer qué variables de riesgo son importante y están asociadas al manejo de incertidumbre, por ejemplo, una variable es importante dependiendo de su participación porcentual en los beneficios o costos y de su rango de valores probables.
- Determinar la dirección del cambio en las variables. En el caso de un proyecto de inversión el análisis de punto de quiebre permite determinar cuánto una variable puede cambiar hasta que su VAN se vuelva negativo.

### Limitaciones del Análisis de Sensibilidad

Rango y distribución de probabilidad de variables.

- El Análisis de Sensibilidad típicamente no representa el posible rango de valores.
- El Análisis de Sensibilidad no representa las probabilidades para cada rango. Generalmente hay una pequeña probabilidad de estar en el extremo.
- Dirección de los efectos.

Para la mayoría de variables, la dirección es obvia

Conejos aumentan → Los zorros aumentan

Las muertes de conejos aumentan → La cantidad de conejos baja

Si los lobos aumentan → No es tan obvio cuando comienzan a disminuir los conejos

Un análisis basado en el cambio de una sola variable no es realista porque las variables están interconectadas.

- Si el número de conejos aumenta, la cantidad de zorros aumentará.
- Si se acabara la comida de los conejos, todos, conejos y zorros se disminuirían.

Siguiendo con el modelo de zorros y conejos se proponen dos escenarios y se realiza el análisis de sensibilidad con cambios en los parámetros del modelo y se observa el efecto sobre algunas variables del modelo.



Supóngase que se tiene el siguiente escenario, en el que se va a modificar la TNC (tasa natural de nacimiento de conejos sin presencia de depredadores) desde el 20 % al 16 % disminuyendo en cada caso un 1%. Ver la siguiente tabla.

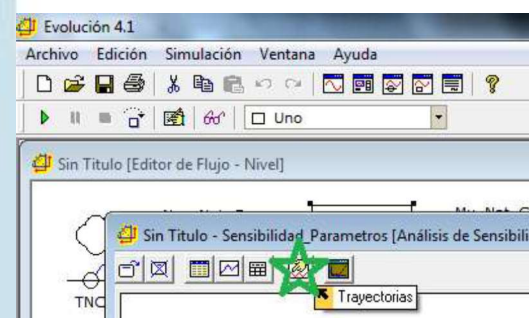
Escenario 1					
Variables	TMC	TNC	Conejos	TMZ	Zorros
Var 1	0,05	0,20	15	0,08	5
Var 2	0,05	0,19	15	0,08	5
Var 3	0,05	0,18	15	0,08	5
Var 4	0,05	0,17	15	0,08	5
Var 5	0,05	0,16	15	0,08	5

Este escenario permite ver qué sucede si hay cambios en la tasa de natalidad natural de los conejos, obsérvese que puede ser un parámetro controlable por el modelador mediante algún tipo de medicamento o mediante la disminución de machos en la isla.

Para hacer esto en Evolucion 4.1 inicialmente se escoge la opción “nuevo análisis de sensibilidad con variación de parámetros”, vea en la siguiente figura el círculo verde.

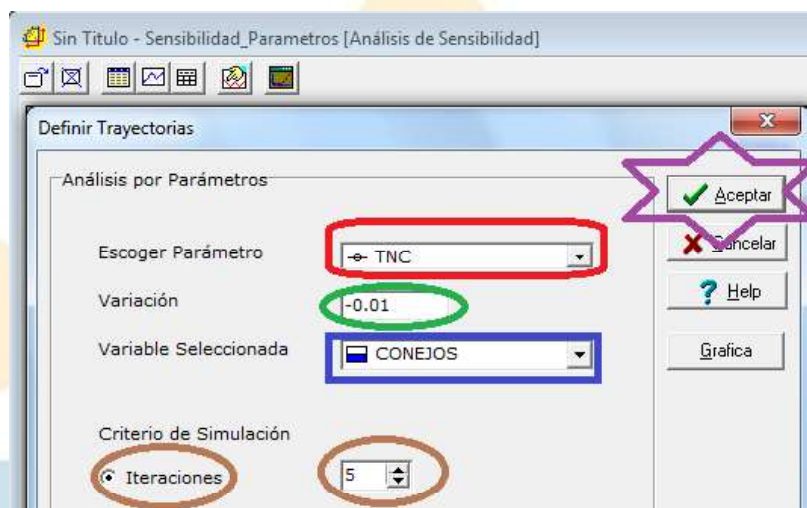


*figura 54      Análisis de Sensibilidad*



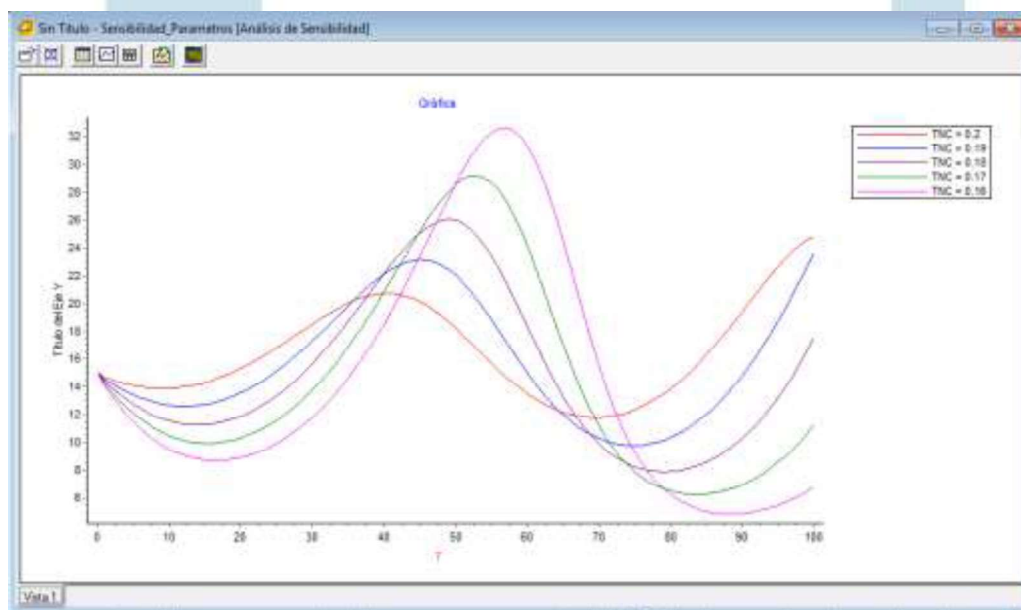
*figura 55      Análisis de Sensibilidad*

Se selecciona donde indica la estrella verde la opción de trayectorias y se incluyen los escenarios, ver la siguiente gráfica.



*figura 56      Análisis de Sensibilidad*

Para el caso que nos ocupa se selecciona el parámetro, ver gráfico rojo. Luego se escoge la variación, recuerden que variamos de 20% a 16%, la TNC por eso se escoge -0.01, óvalo verde. Luego se escoge la variable que se quiere observar, es decir, qué pasa con la cantidad de conejos, cuadrado azul. Luego se selecciona el número de iteraciones, óvalo marrón y finalmente se da clic en Aceptar, estrella morada. El resultado es el siguiente.



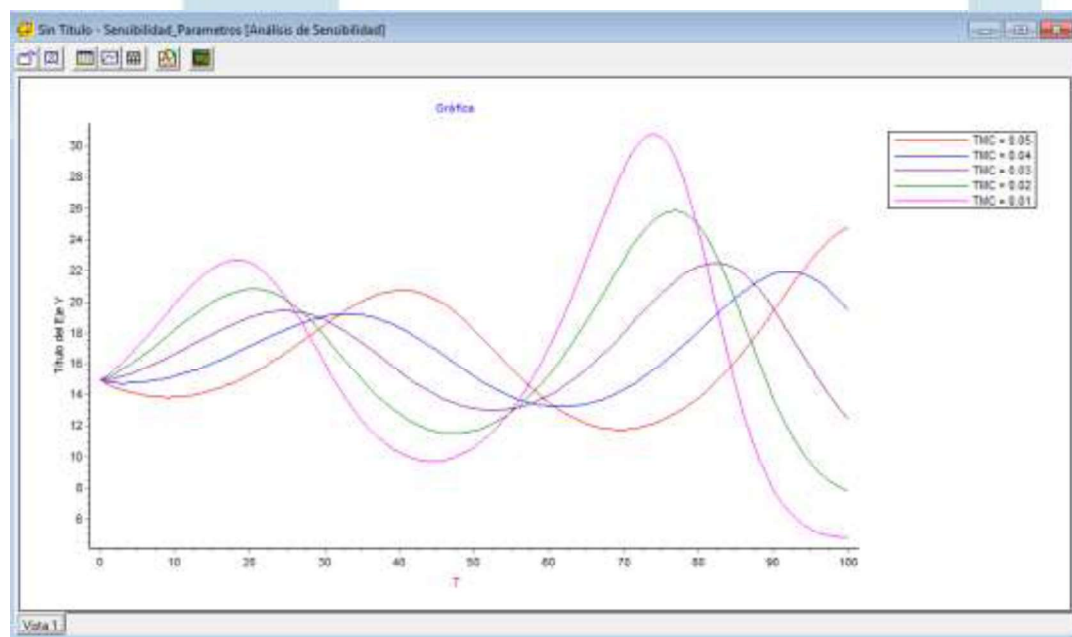
*figura 57      Resultado del Análisis de Sensibilidad Escenario 1*

Obsérvese como una baja en la tasa de natalidad natural provoca oscilaciones en la cantidad de conejos, parece que hay en el modelo un comportamiento contra-intuitivo explicado básicamente por el efecto látigo que se produce en el retardo y posiblemente el efecto amplificador que tiene la no-linealidad.

Se invita al lector para que diseñe nuevos escenarios de simulación teniendo en cuenta qué variable desea observar y bajo qué condiciones. Suponga este nuevo escenario en que se analiza los cambios en la TMC y su efecto en los zorros.

Escenario 2					
Variables	TMC	TNC	Conejos	TMZ	Zorros
Var 1	0,05	0,2	15	0,08	5
Var 2	0,04	0,2	15	0,08	5
Var 3	0,03	0,2	15	0,08	5
Var 4	0,02	0,2	15	0,08	5
Var 5	0,01	0,2	15	0,08	5

Y observar que sucede con el número de zorros en el sistema. Debería suceder algo como lo que se muestra en la siguiente gráfica.



*figura 58      Resultado del Análisis de Sensibilidad Escenario 2*

El lector deberá interpretar las variaciones a partir de las relaciones de las variables del sistema y dar una explicación plausible.

## Lección 28: Validación de Modelos

El modelamiento es un proceso iterativo en la medida en que no hay un proceso secuencial que lo soporte, por ello los resultados de cada paso pueden llevar a mejorar la comprensión del problema y revisiones de pasos previos, como se indica en el centro del diagrama que sigue. Cada línea implica un ir de vuelta desde una etapa a otra, por ejemplo, se va de la etapa 1 a la 2, pero igualmente es posible regresar de la cinco a cualquiera de las demás fases.

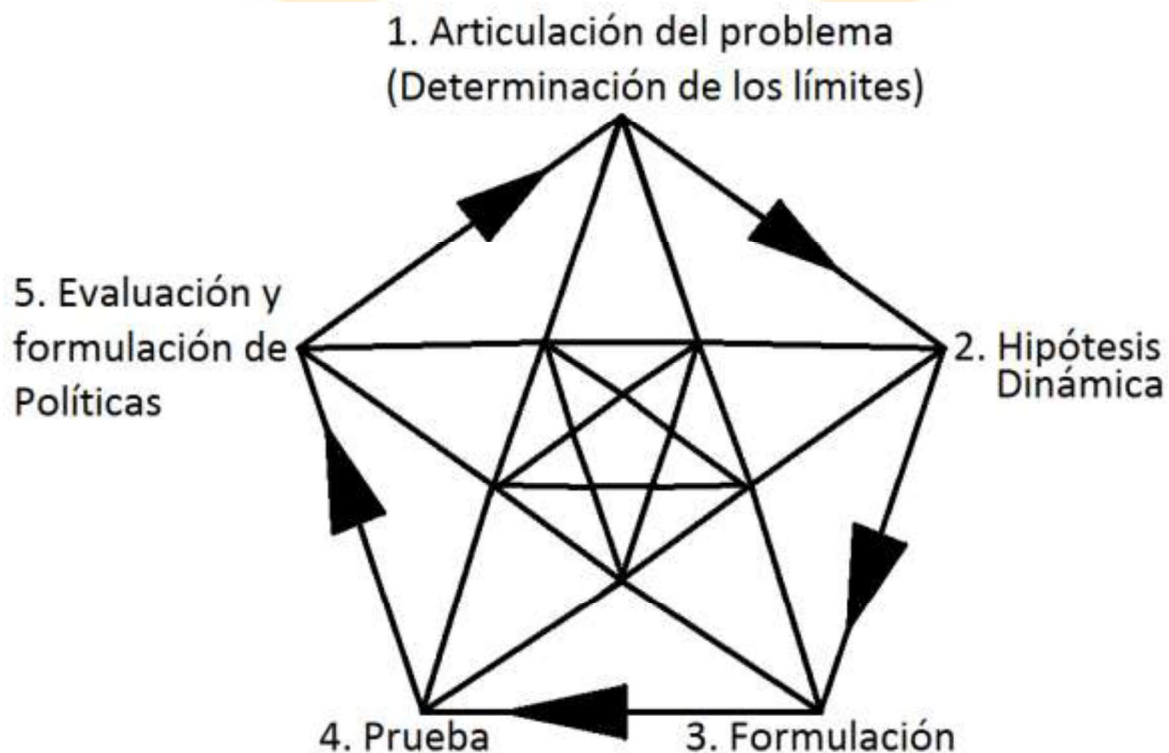


figura 59 Proceso de modelado según Sterman<sup>27</sup>

### Introducción a la validación de modelos

En los procesos de toma de decisiones en los que se usan modelos, ya sean formales o mentales, es preciso que éstos sean adecuadamente validados dado que es una eficaz manera de garantizar que el modelo sea una representación adecuada de la realidad y que esté acorde con el propósito para el cual fue hecho.

Este proceso presupone la pregunta acerca de si realmente importan los supuestos y específicamente a quién, además de la consideración asociada a la documentación, la cual es frecuentemente ignorada, que debe conducir hacia una

<sup>27</sup> Gráfica adaptada de Sterman, 2000. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Cap. 21.



adecuada comprensión, evidenciable ésta en la réplica y la crítica, expresadas ya sea por otros o por el mismo modelador.

Para el desarrollo de esta actividad se cuenta con una amplia gama de pruebas, que determinan la robustez y las limitaciones del modelo; es un proceso de construir confianza en el modelo. La validación debe iniciarse desde la primera ecuación del modelo velando porque desde un comienzo haya consistencia en las unidades usadas. Al validar el modelo lo que se pretende es verificar que representa la realidad modelada y no meramente la realización de réplicas, no se trata de que se repliquen comportamientos funcionales si no que éstos se deriven de la estructura del modelo.

Es importante asegurarse que cada variable tiene una relación con la realidad, es decir, debe ser factible establecer para cada variable, el triángulo de la significación.

No se debe perder de vista que el hecho de que las variables se clasifican en suaves y duras. Las variables suaves son aquellas que representan metas, expectativas o percepciones. Al respecto Forrester (1961) dice “...omitir tales variables (las suaves) es equivalente a decir que ellas tienen efecto cero, probablemente el único valor que se conozca sea equivocado (traducción libre)<sup>28</sup>”, pero en todo caso hay que considerarlas.

El proceso de validación de un modelo<sup>29</sup>

Un modelo en dinámica de sistemas ha de ser validado tanto en lo que a su estructura como a su comportamiento se refiere, aunque valga decir, finalmente resulta en que se valida la estructura de forma directa o indirecta.

La validación de la estructura del modelo consiste en establecer que las relaciones usadas en un modelo son una representación adecuada de la realidad o relaciones reales, y están acordes con los propósitos del modelamiento. Este tipo de evaluación puede ser hecha de dos maneras: directa o indirecta.

La prueba de la estructura directa evalúa la validez de la estructura del modelo comparándola directamente con el conocimiento cierto acerca de la estructura real del fenómeno modelado. Esto implica evaluar cada relación en el modelo mientras haya conocimiento verificado del sistema modelado. Estas pruebas son cualitativas por naturaleza, no involucran la simulación.

<sup>28</sup> FORRESTER, J. W. (1961) Industrial Dynamics. Waltham, MA: Pegasus Communications.

<sup>29</sup> Basado en el texto de BARLAS, Y. and KANAR, K. (2000), Structure-oriented Behavior Tests in Model Validation, disponible on line en <http://www.systemdynamics.org/conferences/2000/PDFs/barlas43.pdf>, consultado el 2 de mayo de 2011



La prueba de estructura indirecta o de comportamiento evalúa la validez de la estructura indirectamente al aplicar ciertas pruebas de comportamiento sobre los patrones de comportamiento generados por el modelo. Por ejemplo, la prueba de las condiciones extremas implica asignar valores extremos a parámetros seleccionados y comparar el comportamiento generado por el modelo con el comportamiento esperado o el observado en el sistema real bajo la misma condición extrema. Éstas son pruebas extremas de comportamiento que pueden proporcionar información indirecta sobre las posibles fallas estructurales.

En una prueba típica de comportamiento orientada a la estructura, el modelador hace una afirmación de la forma: "*si el sistema funciona bajo la condición C, entonces daría como resultado el comportamiento (s) B.*" El modelo se ejecuta bajo la condición C y se dice que éste "pasa" la prueba comportamiento orientada a la estructura, si el comportamiento resultante es similar al comportamiento esperado.

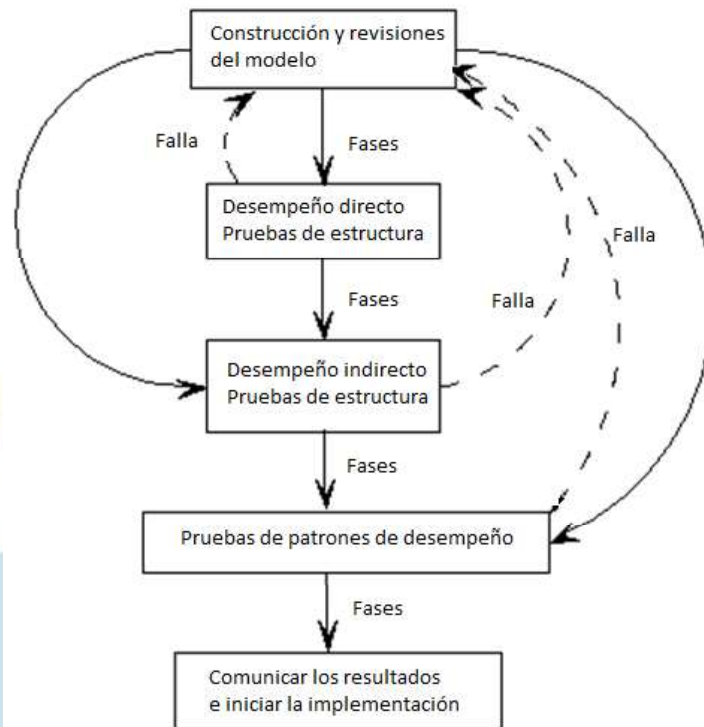
Para estos modelos, la validez significa en última instancia la validez de la estructura interna del modelo.

Aunque la validación estructural es crucial, la mayoría de la literatura sobre investigación técnica sobre la validación de los modelos se ocupa sólo de lo que se conoce como la validación del comportamiento. Puede haber dos razones principales por las que la validación de la estructura ha sido ignorada tanto tiempo en la literatura sobre modelos. El primero se deriva de una falta de reconocimiento de la importancia filosófica de la validación de la estructura en los modelos de caja transparente (a diferencia de modelos de caja negra). La segunda razón tiene que ver con la dificultad técnica para diseñar formalmente herramientas estadísticas orientadas a determinar la validez estructural.

### **Fases en la validación de un modelo**

En el siguiente gráfico se muestran las fases, como un proceso iterativo, para lograr la validación de un modelo.

Inicia con la construcción del modelo y sus posteriores revisiones a partir de los fallos en el intento por pasar alguna de las pruebas. Después se harán las pruebas de desempeño directo, es decir, las pruebas sobre la estructura del modelo. Si no pasa la prueba se ha de devolver a la fase uno. La siguiente fase evalúa la estructura a partir de los comportamientos simulados versus los observados u esperados. Si hay fallo en esta prueba, se ha de revisar de nuevo el modelo. La cuarta fase se concentra en validar los resultados del modelo frente a patrones de desempeño. De nuevo si falla en estas pruebas deberá ir a revisión el modelo. Finalmente se comunican los resultados de la validación a los interesados quienes proceden a su implementación.



*figura 60      Proceso de validación de un modelo*

En las lecciones que siguen se enuncian los distintos tipos de pruebas según lo que se ha presentado en esta lección.

## **Lección 29: Pruebas de modelos en la práctica**

Se ha venido insistiendo en la importancia que tiene el proceso de validación de modelos, en lo que sigue se hará una descripción de las pruebas comúnmente usadas.

Los modelos de dinámica de sistemas son causales y descriptivos, esto quiere decir que están orientados al diseño en vez del propósito, por lo tanto, los que es esencial en la validación de un modelo es la estructura interna. "Resultado correcto por las razones correctas".

### **Prueba de límites del modelo**

Esta prueba busca determinar cuáles son los límites que fueron considerados a la hora de definir las variables del sistema y permite deducir si tales límites son apropiados para el problema en cuestión, es decir, permite verificar que los límites del modelo se correspondan con su propósito. Para ello es necesario construir un límite inicial y a partir del mismo estudiar las variables exógenas que podrían ser endógenas y las variables exógenas que podrían variar en el tiempo de acuerdo con el horizonte temporal.

La prueba de los límites del sistema tienen como propósito determinar qué variables son exógenas y cuáles son endógenas, es decir, cuales son influenciadas e influyen el sistema o cuales son influenciadas o influyen, el sistema, pero no ambas a la vez.

Otro aspecto a considerar es el límite temporal, es decir, el horizonte de tiempo, en el cual se da la evolución del sistema a partir de las condiciones iniciales.

### **Pruebas de evaluación de la estructura**

Las pruebas aplicadas a la estructura tienen como propósito verificar la consistencia de la estructura con el sistema real, es decir, que busca establecer una correlación alta entre los elementos constitutivos de la realidad modelada y las variables del modelo.

Entre los elementos a considerar están el nivel de agregación, la topología del sistema físico y las reglas de decisión. Por ejemplo, sería inconsistente tener un modelo que admita un "nivel de agua negativo". Además se debe tener en cuenta que haya consistencia dimensional, es decir, no es coherente que los flujos asociados a un nivel sean de unidades diferentes a lo contenido en el nivel, es decir, si hay un nivel que contiene agua, sería incoherente que hubiere un flujo de vino y que lo que sigue estando contenido en el nivel sea agua. Concluyendo, esta prueba verifica que en el modelo se haya considerado las características del sistema real relevantes para su propósito.

### **Evaluación de parámetros**

Esas pruebas deben determinar qué tanto los parámetros tienen un significado claro y evidenciable con respecto del fenómeno modelado. Estas pruebas son realizadas con el concurso de herramientas estadísticas o con la opinión de los expertos en el dominio de conocimiento al cual pertenece la realidad modelada.

### **Pruebas de condiciones extremas**

Esta prueba tiene como propósito probar la robustez del modelo bajo condiciones extremas, es decir, permite analizar si el modelo se comporta apropiadamente cuando las entradas toman valores extremos, por ejemplo:

Ante la pregunta de ¿cuántos nacimientos habrían si no hay conejas en la isla? y si la pregunta fuera ¿cuánto sería el número de carros vendidos si el precio se incrementa a 300 millones por carro? El lector puede estar pensando que son obvias las repuestas...es decir, debería ser obvio que el modelo debería pasar las pruebas de condiciones extremas.

### **Pruebas de reproducción de comportamiento**

Para evaluar la habilidad de reproducir el comportamiento en un modelo puede usarse estadísticas comunes, por ejemplo, el  $R^2$ , coeficiente de determinación, por ejemplo, la fracción de la varianza en los datos que es explicada por el modelo, esto es, una predicción perfecta.

También se puede usar el MAE: Mean Absolute Error, el MAPE: Mean Absolute Percent Error, la MAE/Mean, el (R)MSE: (Root) Mean Square Error, que pone mayor peso en los errores grandes que en los pequeños.

Si se desea evaluar matemáticamente el nivel de ajuste de los resultados del modelo con respecto a los datos reales, se usa el Estadístico de Theil, que permite obtener una medida del nivel de ajuste de un modelo conforme a la realidad y consiste en dividir el cuadrado medio del error en tres componentes: sesgo ( $U_m$ ), variación desigual ( $U_s$ , unequal variation) y covariación desigual ( $U_c$ , unequal covariation). El sesgo crece cuando la salida del modelo y los datos reales difieren en su media. La variación desigual indica que la varianza de las dos series difiere. La covariación desigual indica que el modelo y los datos reales no están bien correlacionados, es decir, que difieren punto por punto.

Para un ejemplo completo se invita al lector a revisar el artículo titulado “Un modelo de simulación de la Producción de quesos madurados”<sup>30</sup>.

---

<sup>30</sup> MARQUEZ, Renny y RAMIREZ, Vicente. **Un modelo de simulación de la Producción de quesos madurados**. *Agroalim*, jun. 2009, vol.15, no.28, p.107-122. ISSN 1316-0354.

### Lección 30: Experimentación Simulada<sup>31</sup>

Forrester (1961) enuncia una situación problemática en la organización: el proceso de aprendizaje organizacional es costoso, ineficiente, por ensayo y error. Luego propone la correspondiente mejora: experimentar con laboratorios administrativos.

Estos laboratorios, como lo menciona en su libro, tienen como instrumento principal de experimentación un modelo simulable en el computador construido mediante la dinámica de sistemas. La argumentación de Forrester inicia caracterizando ciertas limitaciones del proceso "natural" de aprendizaje organizacional que ocasionan ineficiencias en el mismo. Como solución plantea la constitución de un proceso "artificial", en laboratorio, de aprendizaje organizacional. La DS es la metodología para el diseño del laboratorio y de sus instrumentos, y para la experimentación simulada. Este proceso "artificial" debe de cierta manera superar algunas de las ineficiencias de su contraparte "natural" y de este modo debe hacer más eficiente el aprendizaje en la organización.

A partir de este esquema interpretativo sobre los planteamientos de Forrester, la pregunta por las razones que hacen a la dinámica de sistemas adecuada para aplicaciones de AO puede ser desagregada en tres grupos de interrogantes particulares:

¿Cómo sucede el proceso "natural" de aprendizaje organizacional? y ¿Cuáles son sus limitaciones?

¿Cómo sucede el proceso "artificial" de aprendizaje organizacional? y ¿Por qué la dinámica de sistemas es la metodología guía para ejercitar este proceso?

¿De qué manera el proceso "artificial" al ser "implantado" sobre el proceso "natural" mejora la eficiencia del aprendizaje organizacional?

A continuación se abordan en este orden cada uno de los interrogantes.

#### Aprendizaje organizacional "natural"

Sotaquirá et al (1996) indican que Forrester caracterizó este proceso "natural" de aprendizaje como la constitución progresiva de una capacidad de juicio como resultado de experiencias de decisión y de acción en situaciones organizacionales. A su vez, esta capacidad de juicio actúa como orientadora de las decisiones y acciones en situaciones futuras. En consecuencia, el aprendizaje organizacional "natural" es un proceso cíclico. Cabe recordar que en dinámica de sistemas el concepto de ciclo de realimentación es fundamental porque es considerado el

<sup>31</sup> Tomado parcialmente de RICARDO SOTAQUIRA GUTIERREZ, LILIA NAYIBE GELVEZ PINTO, "Una revisión crítica del Aprendizaje organizacional Dinámica de Sistemas" En: Colombia. 1996. *Evento*: Coloquio Latinoamericano sobre aplicaciones del Pensamiento Sistémico y la Investigación-Acción Participativa *Ponencia: Libro*: Memorias del Coloquio Latinoamericano sobre aplicaciones del Pensamiento Sistémico y la Investigación-Acción Participativa, Universidad De Los Andes , p.1 - 10



elemento estructural básico de los sistemas. Finalmente hay que señalar que esta visión del aprendizaje organizacional, como un solo ciclo de realimentación, es incompleta, por cuanto no presenta la manera como se va constituyendo y modificando la capacidad de juicio para decidir.

### **Mundos virtuales para el aprendizaje organizacional "artificial"**

Con el fin de superar o atenuar esas limitaciones sobre el proceso “natural” de aprendizaje organizacional, los investigadores dinámico-sistémicos, como lo señaló Forrester, sugieren un proceso “artificial”. Este último, como todo proceso de aprendizaje a la luz de la dinámica de sistemas, también está constituido por un ciclo doble de realimentación. Pero a diferencia del “natural”, no se sucede sobre la cotidianidad de la organización sino que ocurre en laboratorio.

Para hacer posible un proceso de aprendizaje organizacional en laboratorio, es necesario disponer de un modelo de la realidad organizacional sobre el cual se pueda experimentar. Es decir, de manera análoga al aprendizaje “natural” que sucede en la organización, el aprendizaje “artificial” ocurre alrededor de un modelo de la organización, que se denomina micromundo o mundo virtual.

El aprendizaje “artificial” en la organización es semejante al “natural”, lo que cambia es el objeto de aprendizaje y acción, ahora es un mundo virtual. No cualquier modelo de la organización sirve como mundo virtual para el aprendizaje en laboratorio. Sobre el mundo virtual debe ser posible experimentar la toma de decisiones y, seguidamente, recibir información de realimentación sobre sus consecuencias. El mundo virtual debe ser entonces un modelo que simule el comportamiento dinámico de la organización ante diferentes alternativas de acción y bajo diferentes escenarios organizacionales y ambientales.

### **Incrementando la eficiencia del aprendizaje organizacional**

Habiéndose presentado la dinámica de sistemas como una metodología adecuada para la creación del laboratorio para el aprendizaje “artificial” en la organización, surge una pregunta. ¿Cómo sería un proceso eficiente de aprendizaje en la organización? Un aprendizaje organizacional eficiente sería aquel que, en primer lugar, cumpla con el objetivo principal de hacer explícitos y modificar los modelos mentales individuales y colectivos, lo cual sucede de manera espontánea y esporádica en situaciones naturales; y que, en segundo lugar, permita el cumplimiento del objetivo de una manera más rápida, mediante la superación de los obstáculos naturales citados, inherentes a la realidad organizacional. En consecuencia, se deben satisfacer estas dos condiciones para sustentar que el aprendizaje “artificial” acoplado al proceso natural da como resultado un incremento en la eficiencia del aprendizaje organizacional.

La segunda condición implica el vencer las complejidades y limitaciones propias de la situación organizacional real que es objeto de aprendizaje. Esta dificultad se

hace patente durante la construcción del modelo y por este motivo el modelo solo puede ser una representación simplificada de tal realidad, con mayor razón un modelo en dinámica de sistemas por cuanto implica lograr una formalización matemática del fenómeno. Este modelo, el mundo virtual, es el objeto de aprendizaje y experimentación en el espacio del laboratorio. Sobre el mundo virtual se tiene información perfecta acerca de su estructura, expresada en el modelo en dinámica de sistemas, y de su comportamiento, debido a la posibilidad de simulación.

