

A new dynamic visualization technique for system dynamics simulations

Ricardo Sotaquirá-Gutiérrez^a

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad de La Sabana, Bogotá, Colombia. ricardosg@unisabana.edu.co*

Received: January 30th, de 2014. Received in revised form: September 10th, 2014. Accepted: September 29th, 2014

Abstract

This article addresses a main research question in System Dynamics, the correct understanding of the relationship between model structure and behavior, from a new perspective: the field of *Information Visualization*. We propose a new dynamic visualization technique that is different from the current static visualization techniques. The technique was applied to a classical case and tested through visual and interactive software built as proof of concept. The case illustrated the potential of the new technique to confront the problem by providing the user a visual experience in real time, so his/her understanding could be more direct and immediate. This visualization technique could be adapted and generalized to other simulation methodologies.

Keywords: information visualization, system dynamics, simulation, visual and interactive computing, human-computer interaction.

Una nueva técnica de visualización dinámica para simulaciones en dinámica de sistemas

Resumen

Se aborda un problema central de investigación en Dinámica de Sistemas, el de la correcta comprensión de la relación entre la estructura y el comportamiento de un modelo, a partir de un enfoque novedoso: el de *Visualización de información*. Se propone una nueva técnica de visualización que a diferencia de las existentes de naturaleza estática, ofrece un modo dinámico para representar resultados de simulación. Se aplica esta técnica para un modelo clásico mediante la creación de un software visual e interactivo como prueba de concepto. El caso ilustra el potencial de la técnica para atacar la problemática porque brinda al usuario una experiencia visual en tiempo real que facilita una comprensión más directa e inmediata. Esta técnica puede adaptarse y generalizarse para la visualización de datos de simulación obtenidos no solamente con Dinámica de Sistemas.

Palabras clave: visualización de información, dinámica de sistemas, simulación, computación visual e interactiva, interacción persona-computador.

1. Introducción

En un artículo clásico en simulación de fenómenos complejos, John Sterman muestra un experimento en el que personas que toman decisiones no comprenden adecuadamente cómo una estructura de relaciones causa-efecto genera un determinado comportamiento [1]. Esta es una de las dificultades más comunes a las que se enfrenta un usuario de la Dinámica de Sistemas (DS) y se hace evidente, por lo menos, en dos situaciones típicas: cuando nuevos usuarios de la metodología la están aprendiendo y cuando se comunican los resultados de un proyecto de simulación a beneficiarios e interesados que no son conocedores de la metodología. En ambos casos el usuario no experto se

enfrenta a un reto de comprensión. Por un lado tiene un modelo matemático con una red de relaciones causales cíclicas y, por el otro, un conjunto de resultados de simulación, pero no entiende de inmediato cuál es la unidad de estos dos aspectos del modelo. Tiene problemas para explicar crecimientos, decrecimientos y en general cambios que aprecia en las gráficas de simulación en términos de las relaciones causales y los ciclos de realimentación. Estos son obstáculos claves para el uso adecuado de la Dinámica de Sistemas y es por ello que han sido tema recurrente de investigación [1-3].

El presente artículo ofrece una perspectiva novedosa en el abordaje de esta limitación fundamental para el modelado y la simulación en Dinámica de Sistemas, al ubicar la

problemática dentro de un campo nuevo que ha surgido del encuentro entre la computación y el diseño visual: la *Visualización de información* o la *Visualización Científica* [4-7]. Desde esta perspectiva la función primordial de visualizar los resultados de una simulación consistiría en facilitar al usuario comprender los patrones de comportamiento de las variables allí representadas como productos emergentes de las relaciones causales. Si se ubica esta función dentro del marco conceptual de la *Visualización de información (VI)*, se puede decir que se trata de una tarea de visualización sinóptica [8]: lo que importa al usuario no son simplemente los datos individuales sino apreciar de manera comprensiva patrones de comportamiento en dichos datos.

Para lograr esta percepción sinóptica de los datos de una simulación se dispone de dos tipos generales de visualizaciones: estáticas y dinámicas [9]. Las primeras son más utilizadas, las más clásicas. En ellas tanto el tiempo como los datos de las variables son ubicados dentro de un mismo espacio de representación visual. Usualmente el tiempo es colocado sobre el eje X en una visualización cartesiana bidimensional. Se obtiene entonces la conocida gráfica de líneas para la evolución de cada variable en el tiempo. En cambio, en las visualizaciones dinámicas el tiempo no es convertido en una variable más dentro del espacio de visualización, no se “congela” sino que transcurre. Para ello se construye una serie de visualizaciones en un determinado espacio y se presentan sucesivamente una por una durante un intervalo de tiempo. Cada visualización que hace parte de este conjunto se denomina cuadro. Se obtiene entonces una visualización en forma de animación por computador.

En Dinámica de Sistemas han dominado las visualizaciones estáticas. En el primer libro de DS de Jay Forrester, "Industrial Dynamics" [11], se visualizan los resultados en gráficos de líneas producidos simplemente con caracteres ASCII. Esto resulta explicable por la tecnología computacional disponible en la década de 1960. Sin embargo, cincuenta años después estas curvas siguen siendo la forma dominante, y casi exclusiva, para representar los resultados de una simulación en las herramientas de software disponibles (Vensim, Powersim, Ithink, Evolución, entre otros).

La intención de este trabajo fue explorar las potencialidades de una forma alternativa para representar las simulaciones: la visualización dinámica. Con referencia a este tipo de visualización Aigner y colegas afirman que: "En la propia percepción humana hay una comprensión intrínseca del tiempo, en especial del transcurrir del tiempo, y la visualización puede aprovechar esta cualidad si esa dimensión del tiempo es transformada en la dinámica de una representación visual" [9]. En consecuencia, sería de esperar que una visualización dinámica resulte más coherente con nuestra percepción humana que los gráficos estáticos tradicionales. Adicionalmente estos autores sugieren que "la mejor manera de representar numerosos datos de procesos fuertemente dinámicos es a través de animaciones, puesto que ellas comunican muy bien la dinámica subyacente en los datos" [9]. La idea de que la animación puede facilitar los procesos de aprendizaje con herramientas de simulación

en Ingeniería también ha sido planteada previamente por Valencia y otros [10].

De modo que una visualización dinámica podría servir mejor a la función primordial de la visualización en DS: el descubrimiento de patrones de comportamiento que emergen de una red causal. El artículo presenta entonces una aplicación de la VI a un conjunto de datos obtenidos por simulación con Dinámica de Sistemas.

Primero se examina el estado del arte en la visualización dinámica. Luego se reseñan los antecedentes de visualización de información en el campo de la DS y se ponderan sus limitaciones. Posteriormente se presenta el diseño de la nueva técnica de visualización dinámica, así como una prueba de concepto a nivel de software. La técnica propuesta fue aplicada y probada con un caso clásico de modelado con DS: el modelo Bass de difusión de tecnología [13]. Por último, se discuten los resultados obtenidos con este ejemplo de aplicación y se plantean las conclusiones del trabajo.

2. Técnicas de Visualización de Información

En el campo de *Visualización de Información* se denominan "time-oriented data" (datos orientados en el tiempo) al tipo de datos que se producen en simulaciones en donde la variable independiente es el tiempo. En una cuidadosa revisión Aigner y colegas recopilaron 101 técnicas de visualización de datos orientados en el tiempo [9], de las cuales solamente 11 ofrecen formas de visualización dinámica. De acuerdo con este marco, los datos que se obtienen en simulaciones en Dinámica de Sistemas tienen las siguientes características: corresponden a múltiples variables dependientes del tiempo; no son georeferenciados sino abstractos; corresponden a instantes más que a intervalos; y por último son datos discretos. Dentro de la revisión de Aigner se encuentran entonces tres técnicas de visualización afines a este tipo de datos: Trendalyzer [14], TimeRider [15] y Virtual Instruments [16].

Las visualizaciones creadas con Trendalyzer se han hecho bien conocidas a través una presentación de Rosling en una conferencia TED [14]. Esta herramienta permite analizar indicadores demográficos, socioeconómicos y de salud de múltiples países. Utiliza una representación cartesiana bidimensional, en cada eje se ubica una variable. El cambio de estas variables en el tiempo se representa mediante animación. Otras características distintivas del software son: utiliza el tamaño del punto como variable visual para representar qué tan grande es la población de los países; el cambio en el tiempo de los valores de una variable determinada para un país deja un rastro visual; el usuario maneja a voluntad el paso del tiempo mediante una barra de deslizamiento. Es decir, a diferencia de las visualizaciones de simulación donde el tiempo simplemente avanza, en esta el usuario puede explorar los resultados también en dirección opuesta o repasar intervalos claves del comportamiento de las variables. Ninguna de estas características están presentes en las herramientas software actuales en Dinámica de Sistemas.

TimeRider [15] es un software orientado a VI sobre

pacientes con diabetes. Su espacio de representación es cartesiano bidimensional y como Trendalyzer el tiempo aparece en la animación y los datos dejan rastro visual. Dado el interés que tienen los médicos en comparar conjuntos de datos de múltiples pacientes, el software ofrece interactividad para seleccionar y resaltar los datos de uno o varios pacientes en particular. Esta última característica podría ser útil para análisis de sensibilidad en DS, pero no es el caso que se aborda en este artículo.

Por último Matkovic y colegas aplican conceptos de VI al diseño de indicadores visuales en la industria automotriz, en el formato de tacómetros [16]. Se trata de variables continuas de desempeño de un automóvil en un laboratorio de pruebas. El tacómetro virtual no solamente indica la velocidad actual mediante una manecilla sino que muestra el rastro de las velocidades recientes. Lo mismo ocurre con los demás indicadores.

Ninguno de estos tres casos de visualización dinámica trabaja con conjuntos de datos obtenidos a partir de una simulación, su información es obtenida por observación o experimentación. Sin embargo, a partir de ellos se formularon los siguientes principios de diseño para ser aplicados en una visualización dinámica en DS:

- Utilizar las variables visuales de *color*, *tamaño* y *posición* para representar cambios en los datos.
- Aplicar una gama de tonos de un mismo color para dejar un rastro visual de los valores anteriores de cada variable.
- Facilitar al usuario opciones de interacción que le permitan manejar a voluntad el tiempo de la animación: avanzar, retroceder y cambiar la velocidad.

Por otro lado, al interior del campo de la Dinámica de Sistemas no solamente se utilizan las formas de visualización indicadas en la sección anterior y hay antecedentes de innovación en la visualización de los resultados de simulación. Además de los gráficos de líneas utilizados desde los primeros trabajos en DS hasta la actualidad, ocasionalmente puede ser necesario comparar resultados de simulaciones sucesivas en un análisis de sensibilidad [13]. En tal caso se superponen bidimensionalmente o tridimensionalmente los gráficos de líneas en el tiempo. También para casos específicos, como por ejemplo el análisis de la estabilidad de algunos sistemas, se utilizan los diagramas de fase o diagramas de plano de fase propios del campo del cálculo diferencial no-lineal [17]. Ambos casos completan el repertorio de alternativas de visualización de tipo estático usadas en Dinámica de Sistemas.

En cuanto a innovaciones en la visualización en DS hay que resaltar el proyecto pionero de Howie y colegas para mejorar la interfaz de usuario de un micromundo gerencial y facilitar a los usuarios una mejor comprensión del sistema simulado [18]. Aunque esta experiencia no acude específicamente a principios de VI, que para la fecha estaban hasta ahora consolidándose, sí se pueden interpretar algunos cambios de la interfaz como mejoras en la visualización. Buena parte de los datos de las variables claves que le eran suministrados al jugador simplemente de manera numérica son reemplazados por gráficos de barras

que además muestran los posibles límites superior e inferior de cada variable.

Por otro lado las interfaces de los micromundos de DS se han visto mejoradas con las nuevas tecnologías visuales e interactivas [19-21]. En la actualidad lo usual es que cualquiera de estos simuladores incluya algunas visualizaciones estáticas de los datos. Sin embargo, este no es el tipo de simulaciones que interesan en el presente artículo. En los micromundos no se despliega el comportamiento completo de una variable de una sola vez sino que se van mostrando sus estados turno por turno del juego. En consecuencia aquí resultan pertinentes los conceptos de visualización estática más que los de visualización dinámica.

Por último, un tipo de visualización ciertamente dinámica usada en DS fue la planteada por Davidsen bajo la denominación “diagramas de comportamiento” [22]. Cada una de las variables de un modelo se acompaña de una miniatura que contiene una gráfica de líneas de la evolución de esta variable en el tiempo. En su momento esta forma de visualización se introdujo en el software Powersim, pero hoy está presente en otras herramientas de simulación con DS. Estas visualizaciones en miniatura no son dinámicas en sentido estricto. Se despliegan en pantalla en menos de dos segundos, para la percepción del usuario es tan breve la animación que solo termina apreciando el estado final, es decir una gráfica estática.

En resumen, en el campo de la DS solamente se encuentran técnicas de visualización estática y, por otro lado, en el área de *Visualización de información* hay casos pertinentes de visualización dinámica que brindan un punto de partida para el diseño de una nueva técnica de visualización para la DS.

3. Diseño de la técnica de Visualización Dinámica

En síntesis, para el caso de la Dinámica de Sistemas se requiere una técnica que ofrezca una visualización de carácter dinámico que facilite a un usuario, especialmente al no-experto, “ver” cómo una estructura de relaciones causales cíclicas entre variables produce un determinado comportamiento apreciable en cada una de estas variables. Para lograr este propósito se creó una técnica de visualización sustentada en tres principios de diseño, que incorporarán los enunciados en la sección anterior, y que se explican con detalle:

- Composición visual soportada en diagramas usados tradicionalmente.
- Simplicidad en el cambio visual.
- Alto grado de control del tiempo.

3.1. Composición visual soportada en diagramas

Un primer aspecto que es necesario definir es la composición visual de la información. Para ello es necesario recordar dos características de los datos de simulación de DS según la tipología de Aigner [9]: son abstractos y multivariados. Aunque puede que haya casos específicos de modelos en DS con información georeferenciada o que corresponde a un fenómeno espacial real, este no es el caso

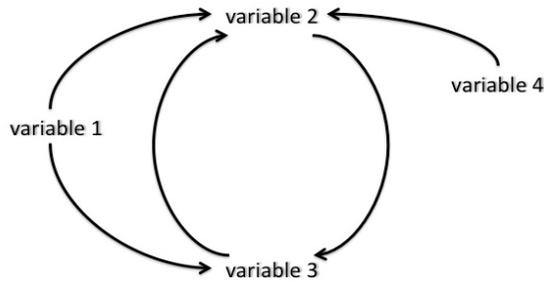


Figura 1. Ejemplo de un mapa de influencias.
Fuente: Autor.

general. Para datos georeferenciados o espaciales la composición la ofrecería el propio mapa al que pertenecen los datos. No es este el caso para los datos de simulación en DS, en este sentido son abstractos. En segundo lugar, dado que interesa la estructura de causas-efectos se requiere entonces que la visualización incluya información de múltiples variables que están relacionadas entre sí, por esto se afirma que se trata de datos multivariados.

Establecidas estas dos características entonces ¿Cómo ubicar en un espacio visual los datos de estas múltiples variables? Un diagrama utilizado tradicionalmente en DS ofrece un principio apropiado para la solución de este problema visual: el conocido diagrama causal o mapa de influencias [13] que muestra las variables del modelo, sus relaciones y los ciclos de realimentación (Fig. 1).

Para empezar se pueden disponer los elementos de la visualización dinámica de una manera similar. Con ello se resuelve el problema de la composición y se acude a una distribución que es común en DS.

En síntesis la información que aparecerá en la composición visual consiste en un conjunto limitado de variables, para cada una de ellas debe aparecer un nombre o una identificación distintiva, así como sus valores a través del tiempo (fig. 2).

3.2. Simplicidad en el cambio visual

Uno de los principios fundamentales del diseño visual e interactivo formulado por Maeda [23] es el de obtener simplicidad mediante la “selección cuidadosa” de los elementos visuales. En el caso de la visualización dinámica es necesario ser cuidadoso con aquello que cambia de un cuadro a otro en la animación. Una animación sobrecargada de cambios se hará menos comprensible para el usuario y esto estropearía el objetivo de la misma. En este sentido, la técnica propuesta limita este cambio entre cuadros únicamente a dos variables visuales: *tamaño de punto* y *color*. Para cada variable aparecerá un círculo cuyo diámetro será directamente proporcional al valor que esta variable tenga en cada instante de la simulación. En la animación sus valores son transformados entonces en un círculo de diámetro cambiante. La composición visual será entonces la de un conjunto de círculos que crecen o decrecen cada uno según la dinámica que emerge de las relaciones entre las variables. La segunda variable visual, *color*, se utiliza para dejar rastro del crecimiento o

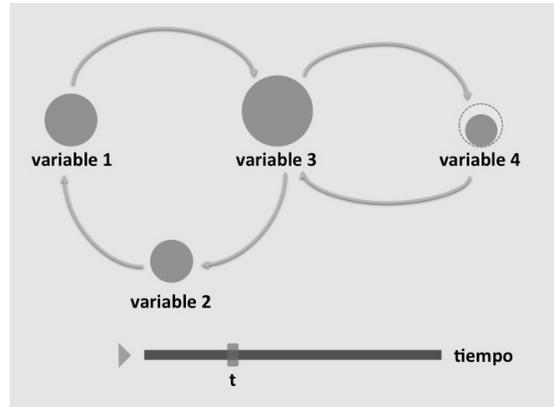


Figura 2. Diseño visual de la técnica propuesta
Fuente: Autor.

decrecimiento de un círculo, es decir, de los valores de una variable, mediante atenuaciones (Fig. 2).

3.3. Alto grado de control del tiempo

Para mejorar la comprensión de la relación entre estructura y comportamiento en los modelos en DS resultan claves tanto la duración total de la animación como el grado de control que pueda tener el usuario de la variable tiempo. Si la duración de la animación es muy breve el usuario no-experto puede pasar por alto cambios claves en los valores de las variables. Si es muy prolongada el usuario puede perder concentración o enfoque. Por otro lado, si la animación aparece solamente una sola vez seguramente no bastará para que además de observar los cambios en valores el usuario también comprenda la relación de estos con la estructura causal, que es lo que interesa de fondo. Esto se resuelve brindando al usuario un control completo del tiempo de visualización. Para ello el usuario cuenta con dos posibilidades, similares a las que incluye la reseñada técnica de Trendalyzer [14]: ejecutar la visualización durante un tiempo fijo adecuado (20 segundos); o interactuar mediante un control sobre una barra deslizante del tiempo que le permita avanzar o retroceder a voluntad y a la velocidad deseada, de modo que pueda repetir la visualización cuantas veces necesite.

La Fig. 2 integra los tres principios de diseño de la técnica de visualización dinámica propuesta para DS.

Se muestra un ejemplo genérico de un modelo con cuatro variables relacionadas a través de dos ciclos de realimentación. Se ilustran diferentes tamaños para cada variable según sean sus datos en un momento dado. Sobre la variable cuatro se dibuja su tamaño actual así como el rastro de un tamaño mayor que tenía previamente. Por último aparecen las dos opciones de control de la animación, automática (el botón triangular de reproducción) o manejada a voluntad (barra de deslizamiento).

4. Aplicación a un modelo en Dinámica de Sistemas

4.1. Modelo seleccionado

El modelo seleccionado cumple dos requisitos, el primero con respecto a su estructura causal, se trata de un

modelo sencillo en cuanto al número de variables y de ciclos de realimentación. Esto con el fin de que sea viable que un usuario no-experto de la DS pueda comprender la relación entre estructura y comportamiento. En segundo lugar, con respecto a su comportamiento éste no debe ser trivial sino que debe retar al usuario en cuanto a su comprensión.

El modelo escogido es denominado en la literatura “modelo Bass de difusión de tecnología” [24]. Se trata de un modelo clásico en Dinámica de Sistemas y citado frecuentemente [13]. Como se muestra a continuación cumple con los dos requisitos establecidos: una estructura causal sencilla unida a un comportamiento no trivial.

El modelo Bass describe un proceso de difusión de un producto tecnológicamente novedoso dentro de una población objetivo. Para ello se definen dos variables de nivel: el número de personas que potencialmente puede adquirir el producto pero que aún no lo tienen (p); y la cantidad de personas que adquirieron y ya están usando el producto (a). Estas variables se conectan a través de una variable de flujo: el número de nuevos usuarios en un período de tiempo definido (n). Estos adoptan la tecnología impulsados por dos dinámicas: por la difusión o el mercadeo del producto a través de propaganda, o por el proceso de voz a voz, es decir, la referencia que hace un usuario a un no usuario. Esta es la representación matemática discreta del modelo:

$$a(t + \Delta t) = a(t) + n(t, t + \Delta t) * \Delta t$$

$$p(t + \Delta t) = p(t) - n(t, t + \Delta t) * \Delta t$$

$$n(t, t + \Delta t) = \alpha * p(t) + \beta * p(t) * (a(t) / (a(t)+p(t)))$$

Siendo α y β los coeficientes de innovación (por propaganda) y de imitación (por voz a voz).

4.2. Conjunto de datos de simulación

El escenario de simulación para el modelo Bass es el siguiente:

- t : [0-100]. $\Delta t = 1$.
- $a(0) = 2$
- $p(0) = 998$
- $\alpha = 0.0025$ $\beta = 0.007$

El comportamiento generado se aprecia en la Fig. 3.

Las variables de nivel exhiben el típico comportamiento en S, creciente para los “usuarios actuales” y decreciente para los “potenciales”. Del mismo modo se muestra la curva de campana de la variable de flujo “nuevos usuarios”. La escala de la izquierda aplica para las variables de nivel y la de la derecha para la variable de flujo.

El máximo del flujo así como el punto de inflexión de las curvas de los niveles están ubicados en el centro de la gráfica (más precisamente en el periodo 46). Al finalizar los 100 periodos los niveles terminan con 19 usuarios potenciales y 981 usuarios actuales, es decir, una difusión prácticamente completa de la tecnología. Lo que se espera

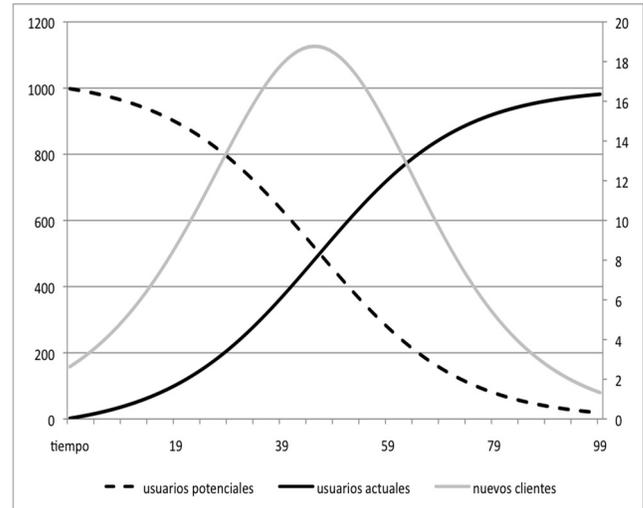


Figura 3. Curvas de comportamiento del modelo Bass.
Fuente: Autor.

que un usuario interprete de estos resultados es que, en primer lugar, el crecimiento en “usuarios actuales” no es ilimitado sino que tiene una cota superior. En segundo lugar, que este crecimiento no es gradual sino que hay un cambio pronunciado e intempestivo ubicado en el intervalo 30-50. Estos cambios súbitos en los comportamientos usualmente no son advertidos por usuarios no-expertos.

Con lo anterior puede verse que el conjunto de datos de simulación del modelo Bass ofrece un reto a la intuición de un usuario no-experto. Se trata entonces de un conjunto de datos idóneo para aplicar la técnica de visualización dinámica propuesta.

4.3. Software para la técnica de visualización dinámica

Para lograr una visión completa de la técnica de visualización animada aplicada al caso del modelo Bass se desarrolló un software. No se trata de una herramienta completa o de uso general para simular en DS. Es solamente una prueba de concepto aplicada al modelo específico con el fin de observar en acción la técnica de visualización diseñada. Para esto se utilizó Processing [12], un lenguaje de programación creado por el Medialab de MIT especialmente para desarrollar software de visualización e interacción. Processing combina la programación orientada a objetos con facilidades específicas para construir animaciones sobre las cuales pueda interactuar un usuario.

El modelo matemático es programado en el software mediante la declaración de cada una de sus variables y luego con un método denominado *simulate()* que en cada paso de simulación calcula los nuevos valores de las variables de acuerdo al método de Euler. Estos datos son entonces visualizados en el formato de una animación. Processing ofrece un método, denominado *draw()*, que permite componer los distintos elementos visuales de cada cuadro de la animación. Se siguieron las pautas definidas en el diseño visual de la sección anterior, es decir, se utilizaron círculos para representar los valores de las variables en un momento dado. Adicionalmente se dibujan las flechas que

indican la relación de causalidad y los ciclos de realimentación propios del mapa de influencias del modelo.

Finalmente se implementaron los dos modos de interacción del usuario, el de reproducción automática y el de desplazamiento a voluntad de un indicador del tiempo. Para ello se programaron métodos que se ejecutan de acuerdo con los movimientos y los eventos de selección del mouse. En la sección de resultados del artículo se incluye un conjunto de imágenes que muestran el software en funcionamiento.

Como se observa se trata de una herramienta de software independiente (stand-alone) y específica para el modelo Bass. Sobre la base de esta herramienta podrían hacerse adaptaciones para otros modelos. En tal caso habría que introducir en el código el modelo correspondiente, sus variables y modificar el método *simulate()*. Pero además habría que ajustar el diseño visual, aplicando la técnica presentada al conjunto de variables que se deseen mostrar.

Si se quisiera generalizar la aplicación de la técnica de visualización sería necesario que las herramientas de modelado existentes o algunas de las más usadas (como Ithink, Vensim y Powersim) tuviesen formatos de almacenamiento de los modelos que fuesen abiertos. Este es un asunto que ha sido objeto de discusión en la comunidad de DS por buen tiempo. Pero solo muy recientemente se observan avances en la posibilidad de un lenguaje común para intercambiar modelos entre herramientas de software, denominado XMILE [25]. Una primera y preliminar especificación se ha puesto en discusión en 2014. Posiblemente en unos años algunas de las herramientas usuales de modelado incluyan esta especificación y esto haga posible “fomentar la innovación permitiendo a proveedores no comerciales ofrecer utilidades adicionales” [25].

5. Resultados y Discusión

5.1. Resultados: Visualización dinámica del modelo Bass

A continuación se presentan imágenes de la visualización dinámica que se obtuvo con el software implementado (Fig. 4). De izquierda a derecha aparecen tres círculos correspondientes a las tres variables principales del modelo: usuarios potenciales (variable de nivel), nuevos usuarios (variable de flujo) y usuarios actuales (variable de nivel). Dentro de cada círculo aparece el valor de la variable en cada momento. Se muestran además los dos ciclos de realimentación correspondientes. Por último en el área inferior del cuadro aparecen los elementos visuales e interactivos relacionados con el tiempo.

Como el resultado es una animación, se capturaron varios cuadros sucesivos de la misma y se dispusieron cronológicamente para registrarlos en la Fig. 5. La duración total de la animación es de 20 segundos y se muestran cuadros cada 4 segundos. Para evitar confusiones, se denominará *tiempo real* a este tiempo en el que ocurre la animación, mientras que la variable tiempo propia del modelo y la simulación se le denominará *tiempo de simulación*. En la parte inferior derecha de cada cuadro se muestra su correspondiente *tiempo real*.

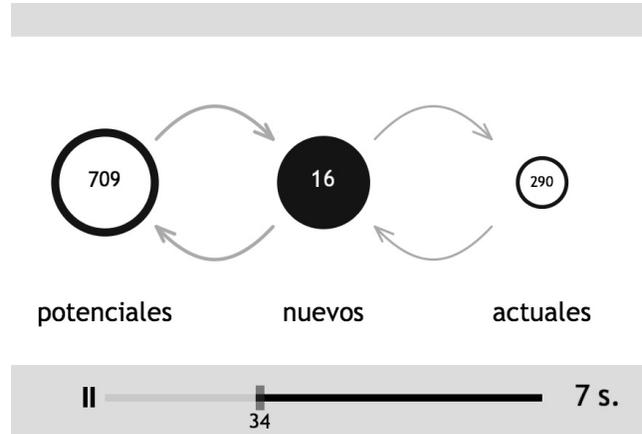


Figura 4. Imagen de pantalla del software de visualización dinámica. Fuente: Autor.

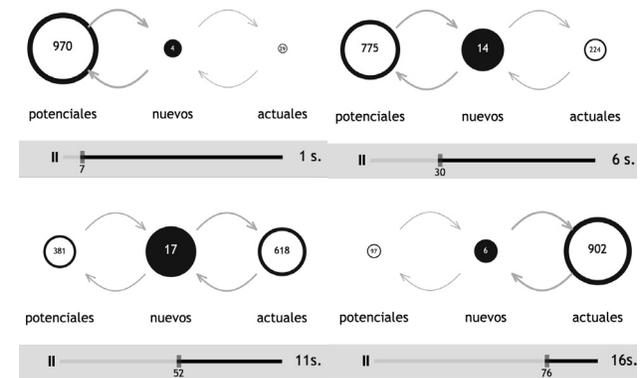


Figura 5. Primera serie. Visualización en tiempo real, segundos 1, 6, 11 y 16. Fuente: Autor.

Si se sigue cada imagen se pueden observar los cambios en los tamaños de los círculos de cada variable. El círculo del nivel de usuarios actuales (tercero) exhibe de manera animada un comportamiento que depende de la curva en S. Es creciente en todos los cuadros, pero es acotado, su tamaño al final de la animación se va estabilizando, como puede apreciarse en las últimas imágenes de la pantalla. La otra característica que se hace visible en esta técnica es que el cambio es más pronunciado en los cuadros intermedios (en los segundos 6 y 11). Este evento que ocurre en el *tiempo real* del usuario es el que precisamente produce la percepción de súbito y acentuado crecimiento y genera una experiencia visual significativa sobre un crecimiento en S.

El círculo de usuarios potenciales exhibe un proceso animado inverso, decrecimiento lento, luego disminución acelerada y termina en su estabilización. Por último, el flujo describe una dinámica de lento aumento, súbito crecimiento hasta un máximo y luego gradual decrecimiento prácticamente hasta desaparecer.

Para examinar con mayor detalle las diferentes velocidades de cambio en la animación se comparan dos

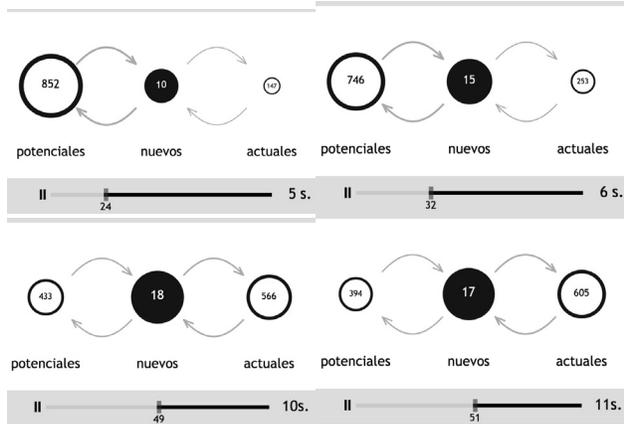


Figura 6. Segunda serie. Comparación de dos intervalos de visualización. Fuente: Autor.

intervalos de un segundo cada uno (Fig. 6). Entre el segundo 5 y el 6 el cambio es pronunciado, en cambio entre los segundos 10 y 11 el cambio es mínimo. Es así como el comportamiento en forma de “campana” que tiene el flujo (Fig. 3) se convierte a través de la animación en un momento de crecimiento acelerado seguido por un estancamiento y luego un decrecimiento acentuado. Esta es la experiencia que “vive” el usuario con el software. Para percibir este cambio repentino no requiere interpretar una visualización estática y transformarla mentalmente. Es una experiencia visual directa e inmediata. Aquí radica el poder de esta técnica de visualización dinámica para transmitir a cualquier usuario, incluso al no experto, el comportamiento del modelo.

Además, esta animación puede ser repetida por el usuario las veces que se necesite a través del botón y del deslizamiento del marcador del tiempo. Del mismo modo el usuario puede a voluntad repetir un intervalo cualquiera, por ejemplo el de cambios súbitos, arrastrando el marcador del tiempo entre el momento inicial y el final de este periodo. Esta experimentación interactiva con la visualización dinámica permite reforzar su entendimiento de la dinámica del modelo.

5.2. Discusión de resultados

El caso de aplicación de la técnica de visualización muestra con claridad la tarea a la que se enfrenta un usuario al interpretar una simulación hecha con DS. Como se indicó en la introducción se requiere una visualización sinóptica [8], es decir, que permita comprender un patrón de comportamiento global y no simplemente datos individuales. Para ello el usuario debe lograr un doble grado de integración de información. En primer lugar, necesita entender que los diferentes valores que toman las variables son resultado de la interrelación entre ellas. En el caso presentado se trata de entender que el nivel de usuarios potenciales se ve afectado por el flujo de nuevos usuarios, que este flujo incide sobre el nivel de usuarios actuales y que depende de ambos niveles. Esta estructura es la que produce los valores observados. Y en segundo lugar, el usuario debe integrar lo anterior con el paso del tiempo. Es

decir, estos valores corresponden a la evolución de la variables a través del tiempo.

En la visualización estática dominante (fig. 3) estos conjuntos de valores, incluido el tiempo, aparecen mezclados en una misma imagen. Para un usuario no experto esta visualización plantea un importante desafío interpretativo.

Por otro lado, la animación presentada en la sección anterior facilita la visualización sinóptica y supera el doble reto de integración de información. En cuanto a observar las relaciones entre las variables, la visualización dinámica en todo momento muestra solamente tres valores correspondientes a cada variable y hace visible las relaciones existente entre ellas, así promueve el primer grado de integración. Además, en la visualización dinámica el tiempo no es simplemente un dato numérico presentado en el espacio de visualización, sino que el tiempo pasa, el tiempo ocurre, es decir el usuario vive una experiencia temporal de visualización de datos. De esta manera se facilita el segundo grado de integración: entre estructura, comportamiento y tiempo. Se consigue en mayor medida una visualización sinóptica de la simulación. Esto es lo que se obtiene en el caso de aplicación cuando, por ejemplo, el usuario puede apreciar los cambios súbitos en los valores de las variables gracias a una visualización dinámica en tiempo real.

6. Conclusiones

La técnica de visualización dinámica propuesta ofrece una sencilla alternativa al problema de comprensión estructura-comportamiento que tienen los usuarios no expertos en Dinámica de Sistemas. Se mostró que prácticamente la totalidad de visualizaciones disponibles en DS son estáticas. Ahora puede apreciarse por contraste con la visualización dinámica, que los gráficos estáticos imponen una barrera de comprensión al usuario. El ser humano tiene una capacidad intrínseca de percepción del tiempo que solo se utiliza si la simulación es una experiencia temporal, es decir dinámica.

La nueva técnica suministra un espacio visual en donde el usuario puede observar durante un período significativo los cambios en el comportamiento de las variables del modelo. Proporciona así una experiencia visual en tiempo real que le resulta inmediata y por tanto más directamente significativa que la interpretación secundaria de un gráfico estático. De modo que se introdujo al proceso de modelado y simulación una etapa o un momento específicamente diseñado para que el usuario realice la comprensión de los resultados de simulación con base en la estructura causal. Se brindó una técnica de visualización y un software para esta etapa, a nivel de prueba de concepto. Con ello se ataca de una nueva manera la problemática de falta de comprensión señalada.

Aun cuando el software se creó particularmente para un caso de aplicación, ofrece una visión completa de lo que podría llegar a ser una herramienta software general para visualización dinámica en DS. Para su uso generalizado habría que desarrollar una versión que incluyese algún tipo de editor del modelo o si llega a hacerse realidad el lenguaje

de intercambio común de modelos (XMILE) entonces se podría tener como una utilidad que se enlace con modelos contruidos con otras herramientas existentes.

Por último, cabe resaltar que esta técnica puede aplicarse prácticamente sin modificaciones a otras metodologías de simulación, tanto discreta como continua, que se utilizan en Ciencias, Ingeniería y Administración.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a la Universidad de La Sabana por el sostenimiento del proyecto de investigación que hizo posible estos resultados.

Referencias

- [1] Sterman, J.D., Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science*, 35 (3), pp. 321-339, 1989. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.35.3.321>
- [2] Moxnes, E., Not only the tragedy of the commons: Misperceptions of feedback and policies for sustainable development. *System Dynamics Review*, 16 (4), pp. 325-348, 2000. <http://dx.doi.org/10.1002/sdr.201>
<http://dx.doi.org/10.1002/sdr.201.abs>
- [3] Sterman, J.D., Does formal system dynamics training improve people's understanding of accumulation?. *System Dynamics Review*, 26 (4), pp. 316-334, 2010. <http://dx.doi.org/10.1002/sdr.447>
- [4] McCormick, B.H., DeFanti, T.A. and Brown, M.D., Visualization in scientific computing. *Computer Graphics*, 21 (6), 1987.
- [5] Card, S.K., Mackinlay, J.D. and Shneiderman, B., *Readings in information visualization*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999.
- [6] Tufte, E.R., *The visual display of quantitative information*. Connecticut: Graphics Press, 1983.
- [7] Spence, R., *Information visualization: Design for interaction*. New York: Addison-Wesley, 2001.
- [8] Andrienko, G., Andrienko, N., Bak, P., Keim, D., Kisilevich, S. and Wrobel, S., A conceptual framework and taxonomy of techniques for analyzing movement. *Journal of Visual Languages and Computing*, 22 (3), pp. 213-232, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvlc.2011.02.003>
- [9] Aigner, W., Miksch, S., Schumann, H. and Tominski, C., *Visualization of time-oriented data*. London: Springer, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-85729-079-3>
- [10] Valencia, A.L., Ramírez J.M., Gómez, D. and Thomson, P., Aplicación interactiva para la educación en dinámica estructural. *DYNA*, 78 (165), pp. 72-83, 2011.
- [11] Forrester, J.W., *Industrial dynamics*. Waltham: Pegasus Communications, 1961.
- [12] Reas, C. and Fry, B., *Processing: A programming handbook for visual designers and artists*. Cambridge: The MIT Press, 2007, 736 P.
- [13] Sterman, J.D., *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [14] Rosling, H., Making data dance. *Economist*, 397 (8712), pp. 1-5, 2010.
- [15] Rind, A., Aigner, W., Miksch, S., Wiltner, S., Pohl, M., Drexler, F., Neubauer, B. and Suchy, N., Visually exploring multivariate trends in patient cohorts using animated scatter plots. *HCI International*, pp. 139-148, 2011.
- [16] Matkovic, K., Hauser, H., Sainitzer, R. and Groller, M., Process visualization with levels of detail. *IEEE Symposium on Information Visualization*, pp. 67-70, 2002.
- [17] Kemal, S. and Barlas, Y., Verifying system dynamics simulation results by analytical phase plane tools. *2006 International System Dynamics Conference*, 110 P, 2006.
- [18] Howie, E., Sy, S., Ford, L. and Vicente, K.J., Human – computer interface design can reduce misperceptions of feedback. *System Dynamics Review*, 16 (3), pp. 151-171, 2000. [http://dx.doi.org/10.1002/1099-1727\(200023\)16:3<151::AID-SDR191>3.0.CO;2-0](http://dx.doi.org/10.1002/1099-1727(200023)16:3<151::AID-SDR191>3.0.CO;2-0)
- [19] Sweeney, L.B. and Sterman, J.D., Bathtub dynamics: Initial results of a systems thinking inventory. *System Dynamics Review*, 16 (4), pp. 249-286, 2000. <http://dx.doi.org/10.1002/sdr.198>
- [20] Meadows, D., A brief and incomplete history of operational gaming in system dynamics. *System Dynamics Review*, 23 (2), pp. 199-203, 2007. <http://dx.doi.org/10.1002/sdr.372>
- [21] Forio Business Simulation, Forio Corporation. [en línea]. [Consulta: 25 de septiembre de 2014]. Available at: <http://www.forio.com/services/training-simulations>.
- [22] Davidsen, P., Perspectives on teaching system dynamics. *1994 International System Dynamics Conference*, pp. 10-21, 1994.
- [23] Maeda, J., *The laws of simplicity*. Cambridge: MIT Press, 120 P, 2006.
- [24] Bass, F.M., A new product growth for model consumer durables. *Management Science*, 15 (5), pp. 215-227, 1969. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.15.5.215>
- [25] Chichakly, K., Baxter, G., Eberlein, R., Glass-Husain, W., Powers, R. and Schoenberg, W., XML Interchange language for system dynamics (XMILE) Version 1.0. OASIS Committee Specification Draft 01, 88 P, 2014 [en línea], [Consulta: 25 de septiembre de 2014]. Available at: <http://docs.oasis-open.org/xmle/xmle/v1.0/csd01/xmle-v1.0-csd01.pdf>

R. Sotaquirá-Gutiérrez, es Ing. de Sistemas y MaSc. en Informática en 1994 y 1999 respectivamente, de la Universidad Industrial de Santander, Colombia; y Dr. en Ciencias Aplicadas mención Sistemología Interpretativa en 2008, de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Es miembro fundador del capítulo Colombiano de Dinámica de Sistemas y de la Escuela Latinoamericana de Pensamiento Sistémico y coautor de un libro en el área. Actualmente es profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Sabana, director del programa de Ingeniería Informática y miembro del grupo de investigación en Human-Centered Design. Sus intereses de investigación incluyen: la dinámica de sistemas, el pensamiento sistémico aplicado a problemáticas organizacionales y sociales, la interacción persona-computador y el diseño de experiencias de usuario.