
Capítulo 2

Elección de una herramienta de simulación

Hoy en día, las herramientas de simulación son un componente fundamental para el diseño, la implementación y el monitoreo de redes de comunicación, porque permiten predecir el comportamiento de diferentes eventos que pueden afectar el desempeño de la red y degradar la calidad de las aplicaciones y los servicios.

Como presenta Cuéllar (2011) las herramientas de simulación juegan un papel importante para evaluar el comportamiento de parámetros como el retardo y el *jitter* en una red, porque permiten la recreación de escenarios reales con el fin de analizar su desempeño, sin tener que implementar infraestructura física. Además, las simulaciones permiten tener en cuenta numerosas variables y son un método eficaz para la enseñanza y la investigación.

La simulación no es un concepto nuevo; siempre se ha buscado la manera de evaluar sistemas complejos y tal como define Phillips (2007), la simulación es la ejecución de un modelo representado por un programa de computadora que permite recrear entornos de red, ahorrando tiempo y dinero. Comercialmente existen simuladores de tiempo continuo y tiempo discreto; la simulación en tiempo discreto modela sistemas que cambian en el tiempo de acuerdo con los diferentes estados que una variable puede tener, algo muy útil para sistemas de comunicación. Los simuladores de tiempo continuo, por su parte, avanzan en el tiempo y constantemente revisan si ha ocurrido algún evento, con el fin de actualizar las variables correspondientes, para, solo en ese caso, realizar la modificación de valores.

En el área de investigación de redes es muy costoso desplegar una implementación completa, con múltiples computadores, dispositivos de interconectividad y enlaces para verificar los protocolos o algoritmos de red. La simulación en este sentido permite el ahorro de dinero y tiempo, y hace posible el diseño de redes complejas a partir de módulos simples. Sin embargo, no solo en el mundo de las redes de comunicaciones es útil simular, este concepto aplica a diferentes ciencias e ingenierías, entre otros campos (Pan, 2008).

Goldstein, Leisten, Stark, y Tickle (2005) por ejemplo, plantean el uso de herramientas de simulación de red como parte de un método pedagógico de enseñanza que permite a los estudiantes entender los diferentes conceptos de una manera más clara, sencilla y representada de una manera tangible, basándose en la premisa de que los estudiantes aprenden con mayor facilidad si disfrutan usando una herramienta educativa. Es así como Pérez-Hardy (2003) expone diferentes vías en las que un simulador de red puede ser usado para enseñar a los estudiantes tanto los conceptos básicos como los avanzados, el diseño y los principios de desempeño. De esta manera, aunque la simulación de red es una práctica que se utiliza en la academia, se busca su aplicación también en la industria, ya que ofrece los beneficios descritos por Breslau (2000), que se listan a continuación:

- » mejora la validación del comportamiento de protocolos existentes;

- » permite el desarrollo de nuevos protocolos;
- » brinda la oportunidad de estudiar protocolos a gran escala; y
- » permite comparar resultados entre diferentes implementaciones de red.

En la academia, diferentes autores abordan el tema. Vom Lehn, Weingartner, y Wehrle (2008) y Hlupic (2000) presentan los conceptos de simulación y hacen comparaciones entre varias herramientas. Los resultados obtenidos muestran tanto la experiencia de los usuarios con el uso de las herramientas, como también, si fue o no necesario realizar cambios en su código. Además, muestran como en la mayoría de los casos, usar las herramientas de simulación no constituye un proceso dispendioso, aunque algunas son limitadas para su uso en problemas muy complejos o no estandarizados. Uno de los factores cruciales en la elección de una herramienta es el costo de la licencia, cuando ésta es de tipo comercial.

A continuación, se presenta una serie de parámetros de comparación que sirve como guía para evaluar algunas de las herramientas de simulación más usadas en el ámbito investigativo; así el usuario final cuenta con la fundamentación necesaria para elegir la herramienta que mejor se adapte a sus necesidades, como han hecho Bragg (2000) y García, Escobar, Navarro y Vásquez (2011).

2.1. Parámetros para la selección de una herramienta de simulación

Los siguientes parámetros permiten elegir una herramienta de simulación para un uso específico, en determinada área de telecomunicaciones. En cada caso, se define el parámetro y la manera cualitativa para su medición.

2.1.1. Uso investigativo

Este parámetro tiene como finalidad establecer niveles para comparar el uso de las herramientas de simulación en áreas académicas e investigativas, con el fin de explorar los aportes que han logrado las diferentes comunidades respecto de su uso, y hacer un primer acercamiento que permita identificar las principales implementaciones de red en que son usadas.

Los niveles de medida para constituir puntos de comparación entre el uso investigativo de un simulador de red u otro son:

- » *Alto*. Indica que la herramienta ha sido utilizada en un alto número de referencias científicas y en proyectos de investigación.
- » *Medio*. Este nivel cataloga las herramientas que son usadas frecuentemente en la comunidad investigativa, pero que debido a algunas de sus características o especificaciones técnicas, no han logrado la proliferación deseada.
- » *Bajo*. Esta clasificación indica poco uso investigativo del simulador, debido a las

limitaciones de sus características, por lo cual las referencias en los grupos de investigación es mínima.

2.1.2. Tipo de licencia

Para efectos prácticos, dependiendo del tipo de licencia de la herramienta, ella puede tener habilitadas todas sus funciones o solo un grupo de ellas; esto también puede ir ligado con el valor que se cobre por la licencia. Con base en lo anterior, la forma de categorizar los tipos de licencias es:

Libre. A partir de esta forma de cuantificación se busca evaluar si las diferentes herramientas de simulación cumplen con las características definidas en Free Software Foundation (2012) para software libre, donde se plantea que el software libre no es necesariamente una herramienta gratuita, sino que, en realidad, lo que la hace libre es la posibilidad que ofrece a los usuarios para editarla, copiarla, ejecutarla, distribuirla, estudiarla y mejorarla. Desde la perspectiva de la *Free Software Fundation* y la *GNU Operation System*, los usuarios de programas libres tienen cuatro *libertades* esenciales:

- » ejecutar el programa para cualquier propósito;
- » estudiar cómo funciona el programa y adecuarlo a la forma que se desee;
- » distribuir el código de un usuario a otro; y
- » distribuir el código modificado a otros.

El software libre debe contar con estas cuatro libertades; el hecho de que se cobre algún valor por un programa no inhibe que el programa pueda ser libre o utilizado según las mismas pautas.

Comercial. Se refiere a las licencias que tienen restricciones para el usuario, teniendo en cuenta que su comercialización, costo, duración de uso, edición y libertad de permisos, son controlados y definidos por los propietarios de la herramienta. Este tipo de licencia también es conocida como licencia propietaria, en contrapartida al licenciamiento libre o software libre.

2.1.3. Curva de aprendizaje

Por medio de este parámetro, se busca catalogar el nivel de exigencia de la herramienta para lograr su manejo adecuado. Es un parámetro de suma importancia. Su medición considera diversos aspectos esenciales:

Conocimientos previos. Puesto que el contexto son las redes de comunicación, es de vital importancia conocer aspectos básicos en lo referente a protocolos y estándares de red para enfrentarse a una herramienta potente. Por otra parte, dado que las herramientas de alto rendimiento permiten la introducción de código, es importante tener conceptos básicos de programación.

Uso didáctico de la herramienta. Existe una gran variedad de simuladores que, en términos de interacción, son sumamente amigables con el usuario, ya que permiten

configurar elementos de red de una manera intuitiva, permitiendo observar solo las características básicas del contexto de red; por esta razón, son usados como herramientas didácticas para la iniciación de los estudiantes en los cursos de redes.

De acuerdo con las características planteadas, los niveles definidos para efectuar la medición de este parámetro en cada uno de los simuladores que se presentarán son:

- » *Alto*. Herramienta en la que es muy importante una fundamentación sólida. Conocimientos avanzados en redes y programación, puesto que el manejo de la herramienta exige programación de los dispositivos por modificación de su código fuente.
- » *Medio*. A este nivel se encuentran las herramientas que no requieren una gran cantidad de conocimientos previos en programación o redes y donde toda la carga de aprendizaje se centra en la configuración de los dispositivos de red mediante comandos de consola.
- » *Bajo*. Esta categoría corresponde a las herramientas de uso didáctico, en las que la interacción con el usuario hace que la configuración de simulaciones de red se realice de manera intuitiva.

2.1.4. Plataformas que lo soportan

Este parámetro es descriptivo. Lista los diferentes sistemas operativos en los cuales la herramienta puede correr sin ningún problema. Los sistemas operativos que se tendrán en cuenta son: Windows, Linux, Mac OS y Solaris.

2.1.5 Interfaz gráfica

Con este parámetro se busca definir la cercanía que tiene la herramienta con el usuario y las facilidades que le presta. La medida de este parámetro tendrá en cuenta tres rangos:

- » *Alto*. Requiere un nivel de programación mínimo, ya que la herramienta tiene la disposición de trabajar desde todas sus perspectivas con una interfaz gráfica.
- » *Medio*. Implementa una interfaz gráfica que facilita su uso, pero lo hace de forma limitada; algunas de sus implementaciones deben definirse mediante programación.
- » *Bajo*. La herramienta no cuenta con interfaz gráfica o ella no es muy amigable con el usuario, lo cual implica la programación de cada elemento dentro de una simulación para su ejecución final.

2.1.6. Graficación de resultados

Las herramientas de simulación se utilizan para recrear el funcionamiento de la red de la manera más real posible. Para ello es necesario realizar medidas de ciertas variables de red, con el fin de realizar un análisis posterior de los datos y comprender así el comportamiento de la red ante diferentes eventos o posibles configuraciones. Una manera de interpretar y analizar los datos de las variables medidas es graficándolos

de diversas formas. Dependiendo qué tan potente o amigable sea la herramienta de simulación para realizar esta tarea se han definido los siguientes rangos:

- » *Buena*. La herramienta posee extensiones o módulos propios para la generación graficas estadísticas las cuales pueden ser manipuladas desde el mismo simulador o ser exportadas a un procesador especializado.
- » *Aceptable*. Aquellos simuladores que pueden generar datos estadísticos, pero que necesitan de una herramienta externa, para generarlos, procesarlos adecuadamente y presentar la información ordenada al usuario.
- » *Limitada*. Aquellas herramientas que no cuentan con un módulo propio o extensión para la generación de gráficos; la información estadística puede estar representada en archivos de texto que necesitan de herramientas diferentes a la de simulación para su organización y presentación.

2.1.7. Tecnologías y protocolos de niveles 2 y 3 que soporta

Parámetro de índole descriptivo en el cual se listan las tecnologías y protocolos de nivel 2 y 3 del Modelo OSI que soporta. Algunas herramientas no soportan todos los protocolos, lo que hace necesaria su implementación generando código o adaptando componentes preexistentes. De este modo se quiere clasificar los simuladores de acuerdo con la variedad de protocolos que permiten simular, con base en los siguientes criterios:

- » *Alto*. Que permite la implementación de gran cantidad de tecnologías/protocolos de red, ya que posee módulos propios con la arquitectura necesaria para que sean soportados y desplegados de manera correcta, con el fin de acercarse a implementaciones reales.
- » *Medio*. Simuladores que no permiten realizar implementaciones de un gran número de tecnologías/protocolos, puesto que no poseen los módulos necesarios o en su defecto es necesario modificar el código fuente de alguno de sus módulos para lograr simular el protocolo deseado.
- » *Bajo*. Aquellas herramientas que no poseen los módulos de las tecnologías/protocolos desarrollados o en su defecto es necesario conseguir los módulos por separado.

2.1.8. Tráfico que permite modelar

Este es un parámetro muy importante porque permite establecer los tipos de aplicaciones, servicios o protocolos que la herramienta está en capacidad de simular. Esto va muy ligado con el comportamiento de la aplicación, en el sentido de cómo genera los datos a utilizar en la simulación, lo cual está ligado a una distribución estadística que se puede parametrizar en la herramienta, tanto para las aplicaciones que ella dispone, como para aplicaciones que el usuario pueda ajustar dependiendo de sus necesidades. Este aspecto puede ser medido de acuerdo con los siguientes criterios:

- » *Alto*. Herramientas con la capacidad de generar tráfico de gran variedad de aplicaciones de acuerdo con diferentes distribuciones estadísticas y la capacidad de recibir la inyección de tráfico proveniente de analizadores de tráfico (*Sniffers*) para realizar análisis estadísticos.
- » *Medio*. Herramientas que permiten generar tráfico de las aplicaciones más comunes, donde las distribuciones estadísticas se pueden configurar de manera básica.
- » *Nulo*. Herramientas en las que no es posible configurar distribuciones de tráfico que permitan análisis académicos profundos o, en su defecto, que no cuentan con módulos o extensiones para realizar esta labor.

2.2. Herramientas de simulación

Una vez definidos los parámetros de comparación, se procede a su evaluación en las diferentes herramientas de simulación, con el fin de establecer un cuadro comparativo que le permita al usuario visualizar, de una manera clara, las ventajas y desventajas de elegir una herramienta u otra.

2.2.1 NS-2

Como presenta Mahasweta (2008), NS2 es una de las herramientas de código abierto más confiables y de mayor uso para la implementación de proyectos en simulación, tal como se muestra en los trabajos de Mehta, Ullah, Kabir, Sultana, y Sup (2009), Bateman y Bhatti (2010) y Fan y Taoshen (2009), ya que sus posibilidades de uso, su disponibilidad al público y, adicional a esto, sus características, permiten que una gran cantidad de usuarios puedan realizar diversos tipos de trabajo sobre ella.

En relación con la libertad de disposición que tiene el simulador, en Bateman y Bhatti (2010), se argumenta la disponibilidad del código fuente tanto para su inspección y modificación, como la libertad para la aplicación por parte de cualquier usuario. Esto ha promovido la generación de módulos, al interior de la comunidad, que permiten la creación de nuevos protocolos y sistemas para ser simulados. A su vez, su característica de licencia libre ha permitido expresar tanto las preocupaciones sobre la herramienta, como sobre su influencia positiva.

Para enfocar una característica más del simulador NS2, es preciso divisar los dos niveles de simulación posibles, explicados por Fan y Taoshen (2009) y Qun y Wang-Jun (2008); uno se basa en la configuración y construcción de Otcl –en referencia a la programación orientada a Objetos con extensión tcl– opción en la cual, es posible utilizar algunos elementos de redes existentes en la herramienta, para realizar una simulación escribiendo scripts en Otcl, sin la necesidad de modificar NS2; el otro, se refiere a la programación en lenguaje C++ y Otcl, utilizada cuando los módulos requeridos para las implementaciones no existen, lo que obliga a actualizar la herramienta con los nuevos elementos y, en ciertas circunstancias, agregar una clase

programada en C++ y una clase en Otel y luego programar un script Otel para la implementación de la simulación; esto, genera la necesidad de un gran conocimiento previo para el uso de la herramienta. Adicionalmente, como muestran Marquez, Placido y Sampaio (2009), es necesario, para la correcta ejecución de la herramienta, tener experiencia, lo que conlleva a la necesidad de usar la herramienta por largos periodos de tiempo para lograr su implementación eficaz. NS2, en consecuencia, se cataloga con un nivel alto en su curva de aprendizaje.

NS2 es un simulador con limitadas características gráficas. Como se planteó, está orientado a programación (Márquez, Placido, & Sampaio, 2009), aunque se han hecho intentos de simulación gráfica para aprovechar la potencia de la herramienta, intentando graficar las rutas de los paquetes, como explican Qun y Wang-Jun (2008), implementando la herramienta NAM. Para realizar la simulación de un escenario como el que se plantea en la página oficial de la herramienta –y se observa en la Figura 2– se debe realizar un *script* similar al fragmento que presenta la Figura 3. Por esta razón, NS2 es una herramienta catalogada con un bajo nivel de características gráficas.

Aunque el software no contiene una herramienta que retorne gráficas de una manera eficiente, existen otras herramientas que permiten hacerlo, lo cual minimiza el problema y permite aprovechar todos los valores que arroja el simulador de las tecnologías manejadas a nivel 2 y 3 de OSI, como lo describen las prácticas presentadas por Shin, Jang y Kim (2009), quienes definen tecnologías que la herramienta puede simular (i.e.,TCP/IP, UDP, FTP, RTP, SRN, GPRS, mobile IPv6, RSRV, MPLS), así como redes Ah Hoc, WLAN, Mobile-IP, UMTS y Wireless. Un aspecto a favor de la herramienta de simulación según ISI (2011) y Bateman y Bhatti (2010) es su capacidad

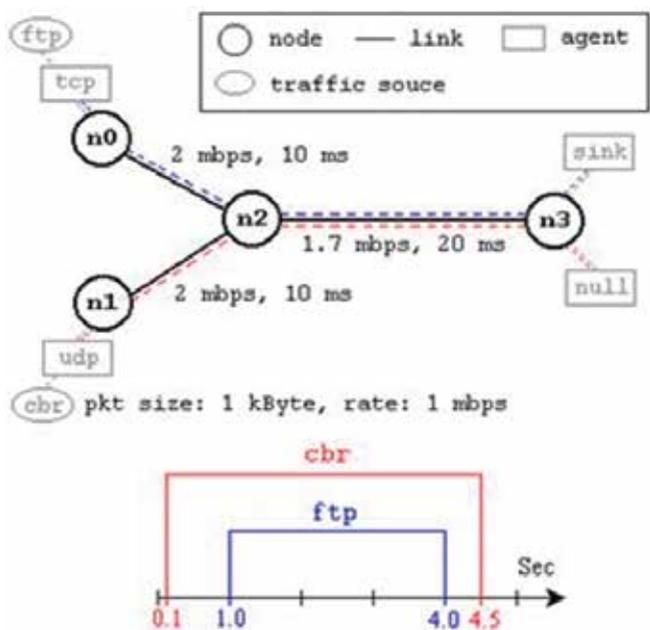


Figura 2. Escenario - Simulación en NS-2

```

#Create a simulator object
set ns [new Simulator]

#Define different colors for data flows (for NAM)
$ns color 1 Blue
$ns color 2 Red

#Open the NAM trace file
set nf [open out.nam w]
$ns namtrace-all $nf

#Define a 'finish' procedure
proc finish () {
    global ns nf
    $ns flush-trace
    #Close the NAM trace file
    close $nf
    #Execute NAM on the trace file
    exec nam out.nam &
    exit 0
}
    
```

Figura 3. Fragmento de Script - Simulación en NS-2

de instalación en los diversos entornos y plataformas (i.e., FreeBSD, Linux, SunOs, Solaris, Windows y Mac OS X).

2.2.2. NC-TUNS

National Chiao Tung University Network Simulator, es un simulador altamente usado como lo presentan NSTU (2010) y Wang & Chou (2009); en la comunidad investigativa y en la documentación de la IEEE Xplore se puede encontrar gran diversidad de *papers* realizados sobre este simulador. La Figura 4 muestra la interfaz gráfica de la versión 4 del software.

La herramienta de simulación NCTUns se comercializa en la actualidad con el nombre EstiNet 7.0. Esta versión implementa todas las mejores aplicaciones de NCTUns 6.0. Esta herramienta es open-source y se plantea como uno de los mejores simuladores en las comunidades networking en cuanto a su alta fiabilidad, como se presenta en Wang, Chou, Lin, & Huang (2010).

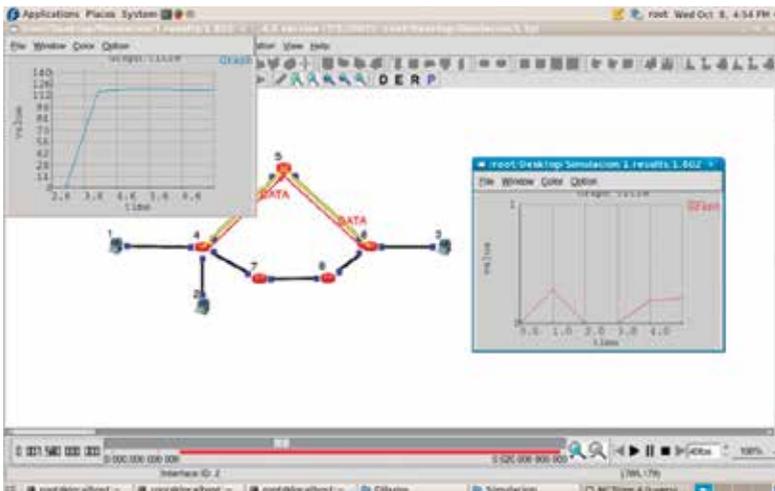


Figura 4. Interfaz gráfica NCTUns

Wang, Wang, Li, y Lau (2011) describen el alto potencial que se encuentra en la herramienta, ya que utilizan la implementación de VANET y describen como la herramienta permite, por medio de una interfaz gráfica, hacer un esquema de simulación muy fácilmente. Por otro lado, Khan, Zaman, y Reddy (2008) indican que el software de simulación NCTUns provee una interfaz de usuario integrada y profesional; por todo ello, la herramienta es catalogada con un alto nivel de interfaz gráfica.

Respecto del manejo que requiere la herramienta de simulación, se debe precisar que es necesario un conocimiento previo de tecnologías de red, ya que las implementaciones a las que está enfocada se orientan a comunicaciones en movimiento (e.g., VANETs y MANETs).

Por otro lado, la herramienta de simulación NCTUns, con todas sus propiedades, tiene una limitante: sólo se puede implementar en Linux (Wang, Chou, Lin, & Huang, 2010), y esto ocurre, como se muestra en Belzarena y González-Barbone (2006), porque el simulador aprovecha la pila de protocolos TCP/IP de Linux para lograr alta confiabilidad en la respuesta de las simulaciones.

Gracias a la facilidad de utilización y al gran desarrollo que ha tenido la herramienta, según Cruz, Camara, y Guardia (2009), Wang y Chou (2009), Khan, Zaman, Reddy, Reddy, y Harsha (2008), y Wang y Bao (2005)], el software tiene la posibilidad de simular Wimax, VANET, MANET, Internet, Wireless LANS, GPRS Networks, Optical Networks, Personal AP, Real TCP/IP, UDP/IP. También, tiene la característica especial de simular CBR TCP, aplicaciones reales (generando datos reales) como presenta Abusubaih (2010).

2.2.3. OPNET Modeler

Esta es una herramienta de simulación que permite flexibilidad y escalabilidad en modelos jerárquicos – los cuales representan estructuras de redes reales– y puede ser implementada en sistemas operativos tipo Unix o Windows. Dichos modelos, están divididos en tres dominios, denominados Red, Nodo y Procesos, los cuales están escritos en C++ y poseen su propio editor, como explican Guo y Zeng (2009).

Gracias a sus numerosas ventajas y a su poderosa interfaz gráfica (Figura 5), su uso, por parte de grupos académicos es alto, puesto que la manera de simular es muy intuitiva; sin embargo, necesita de gran cantidad de conocimientos previos en redes y programación, por lo que su curva de aprendizaje es alta. De otro lado, aunque la licencia del simulador es comercial, existe una versión de este software que no genera cargos económicos, aunque su uso está limitado a actividades netamente académicas.

Puesto que OPNET proporciona los mecanismos necesarios para el desarrollo fluido de una simulación, permitiendo arrastrar componentes para conformar topologías de red, Xia, Li, y Wan (2008) configuraron una solución de MPLS VPN activando los diferentes parámetros desde un cuadro de diálogo que ofrece una lista de ellos. Adicionalmente Xia, Li, y Wan (2008) hicieron uso de la herramienta de

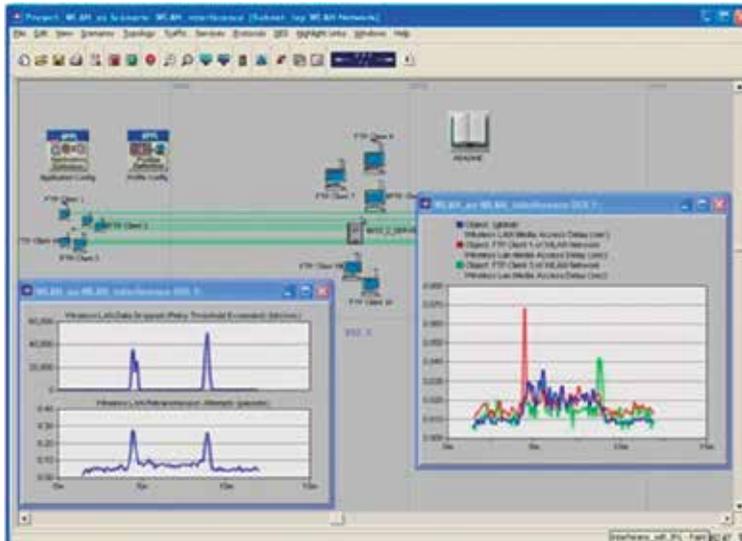


Figura 5. Interfaz gráfica OPNET (Aranud, 2012)

depuración de procesos, la cual representa un componente importante para el trabajo con OPNET.

OPNET cuenta con características que permiten el estudio de los resultados de simulación. Como especifica Chang (1999), el servicio de análisis consiste en mostrar la información de los resultados de simulación en forma de grafos, presentados dentro de áreas rectangulares llamadas paneles de análisis, los cuales tienen propósitos específicos para presentar o transformar la información. Estos paneles, básicamente, contienen gráficas cartesianas que describen la relación entre diferentes variables, como lo efectuaron para su implementación David, Sanmartin, y Marquez (2010).

En cuanto a las tecnologías de nivel 2 y 3, hay varias que la herramienta soporta. Guo y Zeng (2009) usaron la herramienta para comparar el desempeño de varios algoritmos de encolamiento (i.e., WF2Q, WFQ, PGPS y SCFQ) y Hammoodi, Stewart, Kocian, y McMeekin (2009) realizaron las implementaciones de tecnologías WSN (*Wireless Network Sensor*), aunque el simulador no soporta modelos de energía, importantes para este tipo de redes. Adicionalmente, en su trabajo, Kulgachev y Jasani (2010), evalúan el desempeño del protocolo RTS/CTS en redes con tecnologías como 802.11g y 802.11b.

2.2.4. OMNET++

Esta es una herramienta de simulación de eventos discretos. Tal como especifican Varga y Hornig (2008), la motivación para el desarrollo de OMNET fue producir una herramienta *open-source* poderosa que pudiera ser usada por la academia, en educación o investigación, y que fuera una alternativa a las herramientas comerciales, para ser implementada en sistemas tipo Unix, MAC y Windows; incluso, haciendo uso de Cygwin o el compilador de Microsoft Visual C++, es posible portar la herramienta en otros sistemas con menor esfuerzo.

Esta herramienta se conforma por módulos escritos en C++ que se comunican entre sí a través de mensajes, donde módulos simples pueden conformar módulos compuestos y los niveles jerárquicos no tienen límites.

Este software ha estado disponible desde septiembre de 1997 y, fuera de las descargas anónimas, alrededor de cuarenta universidades a nivel mundial han obtenido la herramienta para su uso, indicando áreas de aplicación que van desde tecnologías móviles, inalámbricas hasta ATM y redes ópticas, realizando proyectos relacionados con el desarrollo de modelos de TCP/IP en la universidad Karlsruhe (Alemania).

Se debe tener en cuenta que, a pesar de que la herramienta de simulación presenta muchos beneficios, los módulos que la conforman no están del todo desarrollados, lo cual implica que los programadores deben modificar el código existente o realizar implementaciones de módulos nuevos para cubrir componentes de red que aún no están especificados dentro del paquete OMNET; esto hace que la curva de aprendizaje de la herramienta sea alta, pues modificar el código fuente de los componentes de red no es una tarea sencilla.

La interfaz gráfica que ofrece la herramienta (ver Figura 6), como ya se mencionó, presenta características de depuración superiores al de otras herramientas; adicional a esto, Lessmann, Janacik, Lachev, y Orfanus (2008) destacan que OMNET es un simulador con visualización en línea, lo que permite que los usuarios puedan pausar la simulación e inspeccionar –o cambiar– los valores de los módulos que conforman una red, incluso cambiar la apariencia de los nodos y datos que arroja como resultado, para ser analizados con herramientas estadísticas que se pueden encontrar en el repositorio de OMNET en la Web. Sin embargo, si el módulo no está desarrollado en alguna librería de OMNET, será necesario generarlo mediante código; la interfaz gráfica, en ese caso, se reduce a un editor de texto.

Respecto de la graficación de resultados, el análisis realizado por Sameh, Wagih, y Salama (2010) permite apreciar que las opciones de graficación de parámetros son adecuadas para mostrar los resultados obtenidos de manera clara.

Con relación a las tecnologías de nivel 2 y nivel 3 que soporta la herramienta, diversas publicaciones muestran diferentes protocolos e implementaciones realizadas. En primera instancia, Rhee, Cho, Xianshu, y Han (2009) presentan el diseño de un esquema de enrutamiento específico que pueda proporcionar los niveles de calidad de servicio [QoS] con base en los acuerdos de servicio y administración de recursos con el suscriptor. Por otra parte, El-Dariby, Petriu y Rolia (2012), proponen un nuevo protocolo de distribución jerárquica para proporcionar túneles basados en MPLS, permitiendo mecanismos para QoS e ingeniería de tráfico. Finalmente, Zhu, Dreiholz Rathgeb y Zhou (2008), presentan el diseño de un dispositivo de QoS para descartar paquetes de flujos que no se vean *tan* alterados por la pérdida de los mismos, evitando así que el descarte se haga aleatoriamente, sobre cualquier flujo, inyectando para esto tráfico MPEG, H323 y MP3, midiendo el retardo de la transmisión de cada

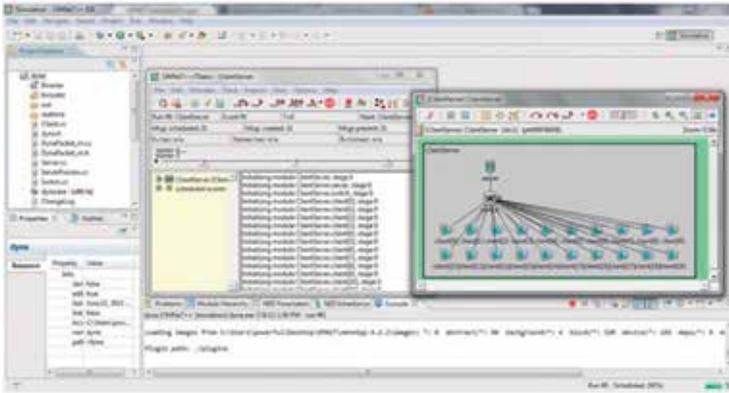


Figura 6. Interfaz gráfica OMNET++

flujo y la tasa de paquetes perdidos, generando, por medio de gráficas, estadísticas detalladas.

Adicionalmente, Chen, Li y Chen (2010) presentan un caso interesante de televisión digital para usuarios residenciales con conexiones a Internet de manera asíncrona y usando NAT, con el fin de que compartan datos directamente con otro. La simulación realizada en OMNET contó con 1000 *peers*, los cuales, al iniciar, se unieron a un pseudo sistema P2PTV en tan sólo 5 minutos, obteniendo resultados que mostraron que la implementación incrementa la tasa de compartimiento entre *peers* que usan NAT en un 50 %, lo cual hace más escalable la arquitectura y reduce alrededor de 20 a 24 % el tiempo de descarga de paquetes.

2.2.5. NS-3

Esta herramienta es un simulador de eventos discretos de red, que tiene como principales objetivos lograr un mayor énfasis en los niveles 2 y 4 del OSI y que su uso sea principalmente educativo; cabe mencionar que no se encuentran publicaciones referentes a la herramienta tan fácilmente. En un principio la compatibilidad con NS-2 no es un objetivo del proyecto, por lo que NS-3 no es una actualización de NS-2 sino un proyecto diferente. Esta herramienta es *open-source* y permite la inclusión de otro software *open-source*; es escalable, modular y emulador (ns-3, 2012).

En relación con la usabilidad y adaptabilidad, NS-3 está escrito solo en C++ lo que lo hace más fácil de depurar (Brugge, Paquereau y Heegaard, 2010). Las plataformas que soporta esta herramienta, tanto de escritorio como de servidor, son: i386, x86-64, Linux, OS X, freeBSD, Solaris y Windows.

La interfaz gráfica de esta herramienta (Figura 7), como indican Henderson, Roy, Floyd, y Riley (2006), soporta algunas formas de animación visual para todo o parte de una simulación. Es una herramienta útil para depurar y mostrar la simulación a terceros. Usa NAM para la animación del escenario de red, que es parte de NS-2 desde el principio, y ha logrado hacer un extendido en ambientes Wireless. Para la generación de resultados, Henderson et al., (2006) indican que NS-3 proporciona objetos de

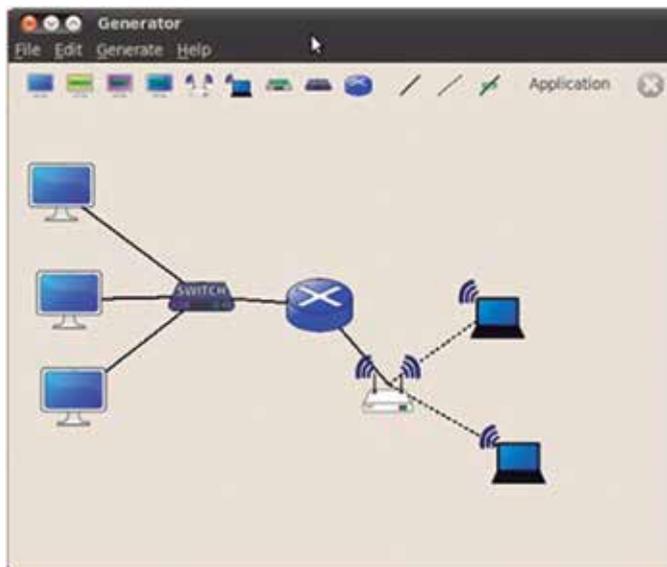


Figura 7. Interfaz gráfica NS3 (ns3, 2010)

soporte para facilitar la recolección de datos durante la ejecución de la simulación, una característica también incluida desde NS-2. NS-3 se extiende incluyendo objetos para histogramas, rastreo, funciones de distribución y secuencias versus tiempo.

Respecto a las tecnologías, NS-3 permite simulaciones sobre IPv4 e IPv6, Wireless (e.g., WiFi, Wimax) y algoritmos de enrutamiento (e.g., OLSR y AODV) (Wang & Liu, 2010).

2.2.6. GNS3

Software gráfico de simulación de red que permite la emulación de redes complejas. Trabaja de manera similar a reconocidos emuladores como Vmware o Virtual Box, emulando los IOS de los dispositivos de interconectividad de Cisco. *Dynamips*, el *core* de este software, es el que permite esta tarea. La herramienta corre en ambientes Linux, Windows y Mac.

GNS3 no toma el lugar de un *router* real, pero es una herramienta para el aprendizaje y preparación para certificaciones Cisco como CCNA, CCNP y CCIE. Su interfaz gráfica es muy intuitiva para el usuario, como se observa en la Figura 8.

La licencia de esta herramienta es de libre descarga, pero necesita de las imágenes de los dispositivos Cisco para emular su comportamiento, imágenes que se deben adquirir directamente con el fabricante (GNS3, 2012b).

En cuanto a las tecnologías que soporta el software, el caso que presentan Djenane, Benaouda y Harous (2009) muestra la configuración de la red de Algeria Telecom para la simulación de VPN sobre MPLS usando IOS de enrutadores Cisco, advirtiendo que, de no usar este tipo de dispositivos en la implementación real, el principio de funcionamiento es básicamente el mismo. La configuración de los dispositivos incluye los protocolos RIP, BGP, OSPF.

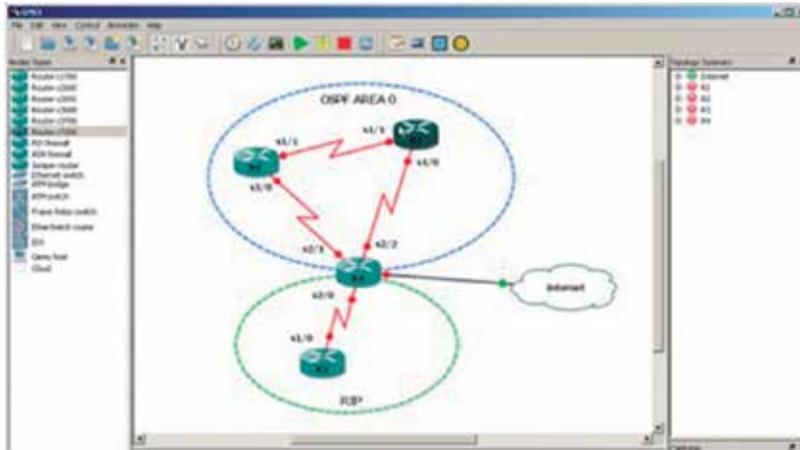


Figura 8. Interfaz gráfica GNS3 (GNS3, 2012a)

2.3. Recomendaciones para la elección de la herramienta

En la realización de proyectos donde esté involucrado el uso de simuladores de red, es de gran importancia invertir tiempo y estudio en la elección de la herramienta adecuada; para hacerlo se debe tener claro cuáles son las características más relevantes que dicho software debe proporcionar, ya que de una adecuada selección depende la efectividad de la realización de las pruebas en el proyecto. La Tabla 4 muestra la comparación entre las diferentes herramientas de simulación, teniendo en cuenta los parámetros definidos y permite guiar al usuario en el proceso de selección y toma de la decisión que mejor se ajuste a sus requerimientos.

Aunque todos los parámetros presentados en la Tabla 4 son importantes en el proceso de selección, el tipo de licencia de las herramientas es determinante, puesto que, aquellas con licencia libre generalmente son la primera opción para los usuarios que no tienen la posibilidad de costear una. Sin embargo, el hecho de que una herramienta posea licencia libre se debe valorar con respecto a la documentación y soporte, para asegurar el apoyo de la comunidad académica, acudiendo a la revisión de errores o problemas a los que otros autores se han enfrentado y han corregido. Diferente a lo que ocurre con los simuladores de licencia comercial, que brindan el soporte durante el tiempo de validez de la licencia.

Otro parámetro importante a tener en cuenta es el uso específico que se le ha dado a cada simulador. Aunque la mayoría son capaces de simular diferentes tipos de redes, las referencias en un tema específico hacen que la cantidad de información, módulos y desarrollo en el tema sea mayor, lo cual permite establecer, en un primer análisis, si la herramienta se ajusta a los requerimientos del usuario o no.

Finalmente, lo referente a la generación y presentación de resultados estadísticos en una herramienta de simulación es vital, puesto que, con base en ellos, el investigador puede hacer aportes a las comunidades investigativa o académica. Algunas

Tabla 4. Parametrización de las herramientas de simulación

	OPNET	OMNET	NS-3	GNS3	NS-2	NC-TUNS
Uso investigativo	Alto	Alto	Medio	Bajo	Alto	Alto
Tipo de licencia	Comercial	Libre	Libre	Libre/ Comercial	Libre	Libre
Curva de aprendizaje	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto
Plataformas que soporta	Windows, Unix	Windows, Unix	Windows, Mac, Unix	Linux, Mac Windows.	Windows, Mac, Unix.	Linux
Interfaz gráfica	Alto	Medio	Medio	Alto	Bajo	Alto
Graficación de resultados	Buena	Aceptable	Aceptable	Limitada	No tiene	Aceptable
Tecnologías de nivel 2 y nivel 3 que soporta	Alto	Alto	Medio	Bajo	Alto	Alto
Tráfico que permite modelar	Alto	Medio	Medio	Nulo	Alto	Alto

herramientas poseen mejores especificaciones que otras en este aspecto y permiten generar este tipo de resultados sin la necesidad de usar aplicaciones externas o realizar procesamientos extensos para la presentación de los datos.