



UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERÍA
EN INFORMÁTICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

Un estudio completo del efecto de los parámetros de diseño en la
productividad de una red de interconexión

David Ortiz Parrilla

Diciembre, 2005



UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Sistemas Informáticos

PROYECTO FIN DE CARRERA

Un estudio completo del efecto de los parámetros de diseño en la
productividad de una red de interconexión

Autor: David Ortiz Parrilla

Directores: José Luis Sánchez García

Francisco José Alfaro Cortés

Diciembre, 2005

Reunido en la fecha el Tribunal evaluador, que más abajo se cita, del Proyecto Fin de Carrera titulado:

“Un estudio completo del efecto de los parámetros de diseño en la productividad de una red de interconexión”

presentado por D/D^a

David Ortiz Parrilla

y siendo su/s tutor/es

José Luis Sánchez García y Francisco José Alfaro Cortés

se otorga la calificación de _____

Y para que así conste, se firma la presente acta en

Albacete a de de 20.....

PRESIDENTE: _____

SECRETARIO: _____

VOCAL: _____

SECRETARIO

PRESIDENTE

VOCAL

RESUMEN

La red de interconexión está presente en un amplio rango de sistemas digitales, que van desde los grandes supercomputadores hasta los computadores personales, pasando por los servidores de cualquier gama o los propios chips en los que permiten transferir datos entre la memoria, los registros y las unidades aritméticas. Es lógico, por tanto, que el sistema de interconexión sea un elemento clave en la arquitectura de los computadores.

En los últimos años, los clusters de estaciones de trabajo o clusters de PCs se han consolidado como plataformas de procesamiento distribuido y paralelo de altas prestaciones. En ello ha tenido mucho que ver el desarrollo y utilización de nuevas tecnologías de interconexión. Muy abundantes son ya los estudios existentes sobre los diferentes aspectos que caracterizan a dichas tecnologías, evaluando técnicas novedosas sobre ellas u otras ya conocidas. En muchos de esos estudios se aplica una metodología tradicional de evaluación, mediante la cual se analiza el efecto de la técnica en cuestión sobre el rendimiento de la red de interconexión, fijando la mayoría de los restantes parámetros de diseño. Esto tiene el inconveniente de obtener resultados muy ligados a las condiciones fijadas, y no poder extraer posibles interacciones entre todos los parámetros.

Un adecuado diseño de experimentos permite obtener una gran cantidad de información con un número muy reducido de pruebas, incluso haciendo intervenir en el estudio a una gran cantidad de parámetros. Si a toda esa información obtenida se aplican técnicas estadísticas adecuadas, se puede alcanzar una mayor cantidad de conclusiones y de mucha más calidad.

Esta metodología es la que se ha aplicado en este proyecto para obtener información del efecto de un conjunto amplio de parámetros de diseño de la red de interconexión sobre la productividad de la misma. Este trabajo está relacionado con otro anterior (realizado por Raúl Martínez Moráis [Mar03]) en el que se realizó un estudio similar pero aplicado a una red simple formada por un único nodo. La novedad de la metodología usada y el valor de los resultados entonces obtenidos invitaban a darle continuidad. En este proyecto se realiza un estudio más completo en la medida en que se incorporan nuevos parámetros como la topología, el encaminamiento y el tamaño de la red, al considerar ahora una red completa y no sólo un nodo.

Dedicado a:

Mis padres **Antonio** y **Amparo**, por el apoyo que me han dado y el gran esfuerzo que han realizado.

A **Mari Carmen** por estar a mi lado en todo momento.

Agradecimientos:

A mis tutores **José Luis Sánchez García** y **Francisco José Alfaro Cortés** por toda la ayuda y conocimientos que me han ofrecido para la realización de este proyecto.

Quiero también agradecer la colaboración de **Vicente Chirivella** en el desarrollo de experimentos y tratamiento de datos, y la de **José Flich** por sus comentarios y habernos facilitado el simulador.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN.....	- 1 -
1.1 INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
1.2 MOTIVACIÓN	- 2 -
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	- 3 -
2.1 OBJETIVOS.....	- 3 -
2.2 METODOLOGÍA	- 4 -
CAPÍTULO 3. LA RED DE INTERCONEXIÓN Y LA EVALUACIÓN DE SUS PRESTACIONES	- 7 -
3.1 INFINIBAND.....	- 10 -
3.1.1 Arquitectura	- 11 -
3.1.1.1 Topología	- 12 -
3.1.1.2 Componentes de InfiniBand.....	- 12 -
3.1.1.3 Características de InfiniBand	- 14 -
3.1.2 Estructura arquitectónica	- 16 -
3.1.3 Infraestructura de gestión.....	- 17 -
3.2 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO	- 17 -
3.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	- 20 -
3.3.1 Tipos de diseños de experimentos	- 20 -
3.3.1.1 Diseños simples.....	- 20 -
3.3.1.2 Diseños totalmente factoriales	- 21 -
3.3.1.3 Diseños factoriales fraccionales	- 22 -
3.3.2 Conceptos básicos.....	- 22 -
3.3.2.1 Efectos simples. Interacciones	- 23 -
3.3.2.2 Ortogonalidad. Estimación de efectos.....	- 24 -
3.3.2.3 Planes factoriales equilibrados.....	- 25 -
3.3.2.4 Fracciones factoriales.....	- 25 -
3.3.3 Análisis de resultados	- 26 -
3.3.3.1 ANOVA. Test F	- 26 -
3.3.3.2 Comparación de medias. Intervalos LSD.....	- 28 -
3.3.3.3 Contrastes ortogonales	- 28 -
3.3.3.4 Modelos de regresión	- 29 -

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE PRESTACIONES DE LA RED DE INTERCONEXIÓN	- 31 -
4.1 APROXIMACIÓN SISTEMÁTICA A LA EVALUACIÓN DE PRESTACIONES	- 31 -
4.2 CONCRECIÓN AL CASO DE ESTUDIO	- 33 -
4.2.1 Definición de objetivos y concreción del sistema a estudiar.....	- 33 -
4.2.2 Listado de servicios y salidas	- 35 -
4.2.3 Selección de métricas	- 36 -
4.2.4 Listado de parámetros	- 36 -
4.2.5 Selección de factores a estudiar.....	- 38 -
4.2.6 Selección de la técnica de evaluación	- 40 -
4.2.7 Selección de la carga de trabajo	- 41 -
4.2.8 Diseño de experimentos	- 42 -
4.2.8.1 Diseño previo.....	- 42 -
4.2.8.2 Diseño final.....	- 52 -
CAPÍTULO 5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS FINALES	- 55 -
5.1 CARACTERÍSTICAS DEL SIMULADOR.....	- 55 -
5.1.1 Parámetros de entrada al simulador.....	- 55 -
5.1.2 Resultados ofrecidos por el simulador	- 57 -
5.1.3 Índices de prestaciones	- 57 -
5.3 RESULTADOS	- 57 -
5.3.1 Efecto del tamaño de la red	- 61 -
5.3.2 Efecto del algoritmo de encaminamiento	- 63 -
5.3.3 Efecto de la longitud de los paquetes	- 65 -
5.3.4 Efecto del tiempo de arbitraje	- 69 -
5.3.5 Efecto de los bytes por cruce.....	- 70 -
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	- 73 -
6.1 CONCLUSIONES	- 73 -
6.2 TRABAJO FUTURO	- 75 -
BIBLIOGRAFÍA	- 77 -
APÉNDICE A	- 83 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Visión funcional de una red de interconexión.....	- 7 -
Figura 3.2. SAN (Red de área de sistema) con InfiniBand.....	- 11 -
Figura 3.3. Modelo de comunicación de cuatro capas.....	- 16 -
Figura 4.1. Modelo de conmutador multiplexado a la entrada y salida.....	- 34 -
Figura 4.2. Curva típica de la productividad.....	- 36 -
Figura 4.3. Efecto simple del tamaño de la red.....	- 48 -
Figura 4.4. Efecto simple de la distribución de destinos.	- 48 -
Figura 4.6. Efecto simple de los bytes por cruce.	- 49 -
Figura 4.7. Efecto simple del tiempo de arbitraje.....	- 50 -
Figura 4.8. Efecto simple del algoritmo de encaminamiento.	- 50 -
Figura 4.9. Interacción DDEST:TRED.....	- 51 -
Figura 4.10. Interacción ALG:DDEST.....	- 51 -
Figura 4.11. Interacción LONGMEN:BCROSS.....	- 52 -
Figura 4.12. Interacción ALG:TRED.....	- 52 -
Figura 5.2. Interacción TRED:DDEST.....	- 62 -
Figura 5.3. Interacción TRED:ALG.....	- 63 -
Figura 5.4. Efecto simple del algoritmo de encaminamiento.	- 64 -
Figura 5.5. Interacción DDEST:ALG.....	- 65 -
Figura 5.6. Efecto simple de la longitud de los paquetes.....	- 65 -
Figura 5.7. Interacción LONGMEN:TARB.....	- 67 -
Figura 5.8. Interacción LONGMEN:BCROSS.....	- 68 -
Figura 5.9. Efecto simple del tiempo de arbitraje.....	- 69 -
Figura 5.10. Efecto simple de los bytes de cruce.....	- 70 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Factores y sus niveles.....	- 40 -
Tabla 4.2. Factores y niveles para el diseño previo.	- 43 -
Tabla 4.3. Estudio del ANOVA para el diseño previo.	- 46 -
Tabla 4.4. Factores relevantes del estudio del ANOVA para el diseño previo.....	- 46 -
Tabla 4.5. Factores y niveles del diseño final.	- 53 -
Tabla 5.2. Factores relevantes del estudio del ANOVA para el diseño definitivo.	- 59 -
Tabla 5.3. Tabla de factores con descomposición de suma de cuadrados.	- 60 -
Tabla A.1. Promedios.	- 86 -

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

En cualquier disciplina, y en particular en la Informática, una buena parte de los trabajos que se realizan, sean o no de investigación, surgen a partir de ideas nuevas o ideas que tienen poco que ver con lo hasta entonces existente. Sin embargo, muchos otros se basan o son clara continuación de trabajos previos, no siendo por ello de menor calidad. Al contrario, en bastantes de esos trabajos se obtienen mejores y más precisos resultados. Este proyecto es de alguna manera continuación de uno realizado meses atrás, y completa el estudio que en su día se realizó. Se indican en este capítulo tanto los antecedentes como las razones que han motivado el desarrollo de este proyecto.

1.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se vienen realizando importantes esfuerzos de investigación para consolidar a los clusters de estaciones de trabajo o clusters de PCs como plataformas de procesamiento distribuido y paralelo de altas prestaciones. Se trata con ello de dar soporte a multitud de aplicaciones a un coste considerablemente reducido, comparado con el de los grandes supercomputadores.

Muchos de los trabajos se han centrado en el estudio de las nuevas tecnologías de red que han aparecido recientemente para proporcionar las características necesarias que permitan conseguir el objetivo más arriba indicado. Ahora son InfiniBand o PCI Express Advanced Switching, como antes lo fueron Servernet o Myrinet, las tecnologías que han irrumpido con fuerza en escena, y es lógico que la comunidad científica les dedique su atención.

Desde la aparición de sus especificaciones, InfiniBand se ha convertido en el centro de atención de fabricantes e investigadores. Unos intentando sacar productos al mercado lo antes posible y los otros aportando propuestas para mejorar el rendimiento de aquellos. InfiniBand ha sido la tecnología de red seleccionada para realizar este trabajo, si bien es cierto que el estudio que aquí se hace podría haberse realizado igualmente para otra tecnología de red de similares características. La razón de haber elegido InfiniBand es doble: por un lado en el momento de iniciar el proyecto la experiencia acumulada sobre InfiniBand era mayor que la que se tenía con cualquier otra tecnología de interconexión, y en segundo lugar, y como consecuencia de la primera, se disponía de herramientas de simulación en un estado adecuado para realizar este trabajo.

1.2 MOTIVACIÓN

La motivación de este trabajo es clara y sencilla, y no es otra que la de completar un trabajo previo que dejó abiertas algunas cuestiones que invitaban a darle continuidad. Así se indicaba en las conclusiones de aquel estudio, esbozando incluso los aspectos y resultados entonces obtenidos que requerían de un estudio más detallado y pormenorizado.

En dicho trabajo se estudiaron los efectos de los parámetros de diseño en el rendimiento de una red de interconexión muy simple en el contexto de clusters de PCs o redes de estaciones de trabajo. El estudio fue amplio, implicando no a un único parámetro de diseño sino a una docena de ellos, y también fue rico en resultados. Se utilizó para ello una metodología de evaluación nada habitual en este contexto como es el diseño de experimentos.

La continuidad del trabajo se debe a varias razones. Por un lado, algunos de los resultados obtenidos no permitieron extraer conclusiones definitivas sobre el efecto en el rendimiento de la red de algunos de los parámetros estudiados. Las interrelaciones entre muchos de los parámetros de diseños y los niveles o valores usados para cada uno de ellos podrían ser las causas de ello. Por otra parte, y aunque en muy pocos casos, algunos de los resultados fueron un tanto sorprendentes, y parecía claro buscarles la explicación que no permitieron en su momento tanto el volumen de trabajo de aquel estudio como la falta de tiempo material para hacerlo. Finalmente, y a pesar de todo, aún se quedaron algunos aspectos sin tratar, debido al modelo de red entonces elegido. Dicha red estaba constituida por un único conmutador, y lógicamente ni el tamaño de la red, ni su topología, ni el encaminamiento pudieron ser incluidos en el conjunto de parámetros a estudiar.

Así pues, el objetivo principal de este proyecto es realizar un estudio de evaluación y análisis detallado de la influencia de ciertos aspectos de la red en su rendimiento. Esos aspectos, que se indicarán en el Capítulo 4, tienen que ver lógicamente con los que originaron los resultados antes citados o con los que no pudieron incluirse en el estudio anterior.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

En este capítulo se incluyen algunos comentarios relativos a los objetivos de este proyecto, así como los aspectos más relevantes de la metodología seguida en el desarrollo del trabajo que ha permitido alcanzar dichos objetivos.

2.1 OBJETIVOS

La razón que ha motivado la realización de este trabajo ha sido fundamentalmente, como se indicó en el capítulo anterior, los resultados que se obtuvieron en un trabajo anterior. En dicho trabajo se estudiaron los efectos de los parámetros de diseño en el rendimiento de una red de interconexión simple para clusters de PCs o redes de estaciones de trabajo, y de él se desprendieron algunas conclusiones que invitaban claramente a estudiar ciertos detalles con mayor detenimiento. Por tanto, el objetivo principal de este proyecto es realizar un estudio de evaluación y análisis más completo y detallado de la influencia de ciertos aspectos de la red de interconexión en su rendimiento.

Para lograr este objetivo principal se plantearon en un principio varios objetivos parciales. En las siguientes líneas se resume cada uno de ellos.

- **Revisión del trabajo previo en el cual se basa este estudio.** Se trata, por un lado de conocer la metodología de evaluación que se debe aplicar, y que está adecuadamente descrita en aquel trabajo; y por otro, determinar en base a lo que entonces se hizo las características del nuevo estudio.
- **Evaluación de la influencia de los parámetros de diseño en el rendimiento de la red.** Debe ser la labor más importante del trabajo, y debe consistir en la evaluación pormenorizada de la influencia de los parámetros seleccionados en la productividad de la red.

Por otra parte, y en la medida en que el estudio se ha particularizado a redes basadas en una determinada tecnología, como es InfiniBand, se han debido cubrir otros objetivos que aún pudiendo ser considerados complementarios no por ello son de poca importancia.

- **Revisión del estado del arte de la tecnología InfiniBand.** Básicamente se trata de conocer las principales características de InfiniBand, y sobre todo aquellas directamente relacionadas con los aspectos que se estudian en este trabajo.
- **Manejo de un simulador de InfiniBand.** Puesto que el proceso de evaluación se debe realizar mediante simulación, es imprescindible conocer, con un cierto nivel de detalle, el entorno de simulación que se va a utilizar. Más aún cuando el estudio realizado puede implicar la realización de ciertas modificaciones al código disponible.

2.2 METODOLOGÍA

El trabajo que ha conducido al proyecto correspondiente a esta memoria se ha desarrollado en base a una metodología debidamente programada y de acuerdo a las características de dicho trabajo. A continuación se resumen las etapas que se han seguido, teniendo en cuenta que algunas de ellas se han solapado en el tiempo:

- **Aprendizaje y manejo del entorno de trabajo.** Las características del trabajo han hecho que el análisis de las propuestas presentadas se haya efectuado por simulación. Para ello se ha dispuesto de un programa que permite simular una red de tipo InfiniBand. En la fase inicial del trabajo se ha revisado la gran mayoría del código para determinar su estructura y organización, para comprender su funcionamiento y para realizar modificaciones si fuera necesario. Posteriormente, una vez planteada la batería de pruebas y hasta el final del proyecto, lo que se ha hecho es usar este simulador.
- **Consulta de bibliografía referente al tema desarrollado.** Fundamentalmente ha habido dos tipos de consultas: por un lado las que tienen que ver con las características de InfiniBand, y por otro las que han permitido plantear este proyecto, esto es, los resultados de un trabajo anterior y la metodología utilizada en su desarrollo. En el primer caso se han consultado varios documentos sobre Infiniband, y en el segundo se ha revisado el correspondiente proyecto fin de carrera, y la bibliografía relacionada.

- **Selección de los resultados a revisar y los parámetros a incluir en el estudio.** A partir de las conclusiones del proyecto fin de carrera que motiva este trabajo, así como del trabajo futuro que en él se plantea, se han determinado las tareas principales que se deben llevar a cabo ahora. Estas tienen que ver, como se detallará en el Capítulo 4, por un lado con un estudio detallado de algunas cuestiones relacionadas con algunos parámetros y que podrá arrojar más luz a los resultados ya obtenidos en aquel estudio más general; y por otro con los nuevos parámetros considerados.
- **Revisión y aprendizaje de la metodología de evaluación.** Al tratarse de un método distinto y algo más complejo que el habitual, se ha tenido que dedicar cierto tiempo al aprendizaje del modelo de diseño de experimentos. Ante el gran número de pruebas que se tendrían que hacer para un estudio de las características del presentado en este trabajo, esta metodología permite seleccionar un número reducido de observaciones a realizar y a partir de las cuales se puede obtener el máximo de información.
- **Obtención y análisis de resultados.** Esta etapa ha ocupado una buena parte del tiempo invertido en el desarrollo del trabajo. A través de una densa batería de pruebas, muchos han sido los resultados obtenidos, aunque sólo un conjunto representativo de los mismos es el que finalmente se ha incluido en esta memoria.

CAPÍTULO 3

LA RED DE INTERCONEXIÓN Y LA EVALUACIÓN DE SUS PRESTACIONES

La red de interconexión es un sistema programable que permite transferir datos entre los dispositivos conectados a ella [Dal03]. Es un sistema porque está compuesto de varios componentes (buffers, cables, conmutadores, etc.) que operan conjuntamente, y es programable en la medida en que algunos de esos componentes permiten establecer diferentes conexiones entre diferentes puntos a lo largo del tiempo. En la Figura 3.1 se muestran varios dispositivos conectados a una red de interconexión. Cada uno de ellos puede enviar (recibir) información a (de) los demás a través de la red.

El de interconexión es un sistema que aparece en un amplio rango de sistemas digitales, que van desde los grandes supercomputadores hasta los computadores personales, pasando por los servidores de cualquier gama o los propios chips en los que permiten transferir datos entre la memoria, los registros y las unidades aritméticas. Es lógico, por tanto, que la red de interconexión sea un elemento clave en la arquitectura de los computadores.

Los sistemas de interconexión han evolucionado, y si hasta la década de los 80 el bus era el predominante, en la actualidad las redes de altas prestaciones están basadas en conexiones punto a punto, y también se han implantado en los sistemas basados en bus. Los procesadores y dispositivos de entrada/salida actuales demandan un ancho de banda mucho mayor que el que puede ofrecer un bus. La interconexión entre procesadores y memoria determina en buena medida la latencia y ancho de banda del sistema de memoria, aspectos clave en el rendimiento final del computador en su conjunto. De ahí que se esté optando por otras alternativas más eficientes, aunque eso sí más costosas. A pesar de los importantes avances, aún la demanda es mayor (la potencia de los procesadores aumenta a una frecuencia mayor que la de los sistemas de interconexión) lo que puede convertir todavía a la red en un cuello de botella.

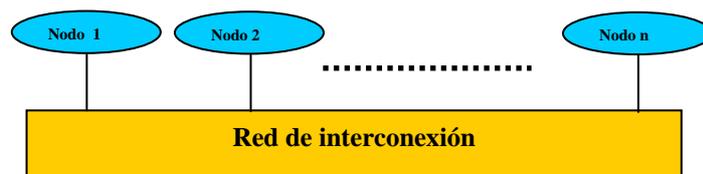


Figura 3.1. Visión funcional de una red de interconexión.

Para seleccionar la red de interconexión de un sistema dado se tienen en cuenta una serie de factores [Dua03, Dal03]. Algunos de ellos son:

- **Rendimiento.** Medido, tradicionalmente, en términos de latencia (tiempo necesario para hacer llegar un paquete desde un origen a un destino) y productividad (máximo número de paquetes por unidad de tiempo que la red es capaz de aceptar). Lo ideal sería tener gran ancho de banda y baja latencia, pero al margen de otras razones que lo impiden, la interacción entre ambas medidas lo hacen muy complicado. Un gran ancho de banda implica una alta utilización de los recursos, lo que provoca contención en la red (varios flujos de datos necesitan usar el mismo recurso) y eso a su vez hará aumentar la latencia.
- **Escalabilidad.** Indica la capacidad de la red para aumentar sus prestaciones al hacerlo el número de elementos de procesamiento. El ancho de banda de la memoria, de la entrada/salida y de la propia red debería incrementarse al hacerlo el número de procesadores. Si no fuese así, alguno de esos componentes podría ser la causa de una disminución de las prestaciones del sistema.
- **Fiabilidad y disponibilidad.** Capacidad de la red para hacer llegar la información a destino. Hay redes en las que no se puede contemplar la pérdida de datos, y por tanto se deben incluir los mecanismos adecuados para evitarlo. Estos aspectos también tienen que ver con la tolerancia a fallos, es decir, la capacidad que tiene la red para seguir funcionando correctamente en presencia de un determinado porcentaje de fallos en los elementos de la red. La información puede ser enviada por rutas alternativas que no tengan que usar los elementos que han fallado.
- **Coste y consumo.** La mejor red puede ser la más cara. Restricciones en cuanto al coste total o el consumo no tienen por qué tener consecuencias drásticas sobre el rendimiento. Muchos de los componentes de los computadores paralelos son los mismos que se usan en sistemas monoprocesadores y se encuentran en el mercado a precios muy económicos.
- **Calidad de servicio.** Algunas redes necesitan disponer de cierto soporte para calidad de servicio. Esto permite asegurar a ciertos flujos de datos los niveles de servicio que les han sido asignados. Así, por ejemplo, la latencia máxima requerida por un flujo de voz no es la misma que la de uno de vídeo.
- **Simplicidad.** Un diseño sencillo de la red ayuda a su manejo, y además puede repercutir positivamente en la frecuencia de reloj final y en el nivel de prestaciones.

La red de interconexión está formada básicamente por un conjunto de elementos o interfaces de comunicación y un conjunto de cables que los unen. Al patrón de conexión que se acaba formando con todos estos elementos se le denomina topología. La información viajará por la red a través de esos elementos, en general pasando por varios de ellos hasta alcanzar su destino final. Una buena topología debe aprovecharse de las propiedades que ofrece la tecnología utilizada para la realización última de la red, como el número de chips usados, el número de pines por chip, el número de cables y la longitud de los mismos, etc. Además, una elección adecuada de los parámetros de diseño de la topología (grado, diámetro, ancho de la bisección, etc.) permitirá obtener un elevado nivel de prestaciones.

Establecida la topología, se debe determinar la forma de hacer llegar la información a su destino y a ser posible en el menor tiempo posible. Para ello se han de seleccionar las rutas más adecuadas de entre todas las posibles. De ello se ocupa el mecanismo de encaminamiento. Realizar una buena elección del algoritmo de encaminamiento tendrá consecuencias importantes sobre, por ejemplo, la distancia que recorrerán los datos por la red y con ello el tiempo que permanecerán en la red. Igualmente, las prestaciones de la red serán mejores en la medida en que se haga un uso equilibrado de sus recursos. Hay también otros aspectos íntimamente relacionados con el encaminamiento.

Cuando se ha determinado la ruta que la información debe seguir desde un origen a un destino dado, se ha de considerar también la forma en la que dicha información debe avanzar por ella. Será necesario usar una serie de recursos de la red, como canales y buffers, y por tanto se debe establecer la manera en la que dichos recursos son reservados, y posteriormente liberados una vez que dejan de ser necesarios. Hay que decidir cuándo y cómo se produce esa reserva y liberación de recursos, así como qué hacer cuando no es posible llevarlas a cabo. Las técnicas de conmutación y control de flujo tienen que ver con estas decisiones y son especialmente importantes, sobre todo cuando el grado de utilización de los recursos es elevado.

Topología, encaminamiento, conmutación o control de flujo son aspectos fundamentales en el diseño de las redes de interconexión. Todos ellos, y algunos más, se tienen en cuenta a la hora de elaborar nuevas propuestas de tecnologías de interconexión. En la última década han aparecido tecnologías de redes de interconexión de altas prestaciones con anchos de banda del orden de varios Gb/seg, ofreciendo a su vez bajas latencias de transmisión. Ejemplos de estas tecnologías son Servernet [Gar97], Myrinet [Bod95], Gigabit Ethernet [She98], InfiniBand [IBA00] o PCI Express Advanced Switching [Asi05].

Como se indicó en el capítulo de introducción, el estudio que se ha realizado es válido para un amplio abanico de tipos de sistema de interconexión. Ahora bien, buena parte del trabajo ha sido realizado mediante un simulador basado en la tecnología de interconexión InfiniBand, y algunos de los parámetros han tomado valores obtenidos con sus características. Por ello, se ha creído conveniente incluir una sección dedicada a dicha tecnología.

3.1 INFINIBAND

En esta sección se describirán las características más importantes de InfiniBand, pero sin entrar en excesivos detalles sobre las mismas. Para una información más detallada sobre cualquiera de los aspectos aquí expuestos, así como de todos aquellos que no se han incluido, se puede consultar las especificaciones de InfiniBand [IBA00] o alguno de los libros publicados [Wil01, Sha02].

InfiniBand, conocido inicialmente como System I/O, nació en 1999 de la fusión de los proyectos Future I/O (desarrollado por Compaq, IBM y Hewlett Packard) y Next Generation I/O (desarrollado por Dell, Hitachi, Intel, NEC, Siemens y Sun Microsystems). En octubre del año 2000 se publicó la primera versión, 1.0, de las especificaciones de InfiniBand [IBA00]. En junio del año 2001 se publicó la primera modificación a las especificaciones, 1.0a [IBA01], que consistió en corrección de errores e introducción de algunas anotaciones. En noviembre del año 2002 se publicó una versión con todas las características adicionales 1.1. En junio del año 2003 se publicaron las correcciones a erratas en la especificación 1.1.

En un principio, InfiniBand se perfiló como un posible sustituto del bus PCI, intentando salvar sus limitaciones (cuellos de botella, fiabilidad, escalabilidad, etc.). Sin embargo, InfiniBand está optimizado para ser utilizado en redes, y es innecesariamente complejo para una tecnología de entrada/salida local. InfiniBand incorpora características que hasta ahora sólo podían encontrarse en supercomputadores grandes y costosos. Estas características son importantes para la instalación de clusters de altas prestaciones y permiten aprovechar a la vez las posibilidades de la tecnología actual.

InfiniBand define un nuevo subsistema de interconexión a alta velocidad punto a punto basado en switches. Este sistema está diseñado para conectar nodos de procesador y de entrada/salida formando una red de área de sistema (SAN, System Area Network) (Fig. 3.2).

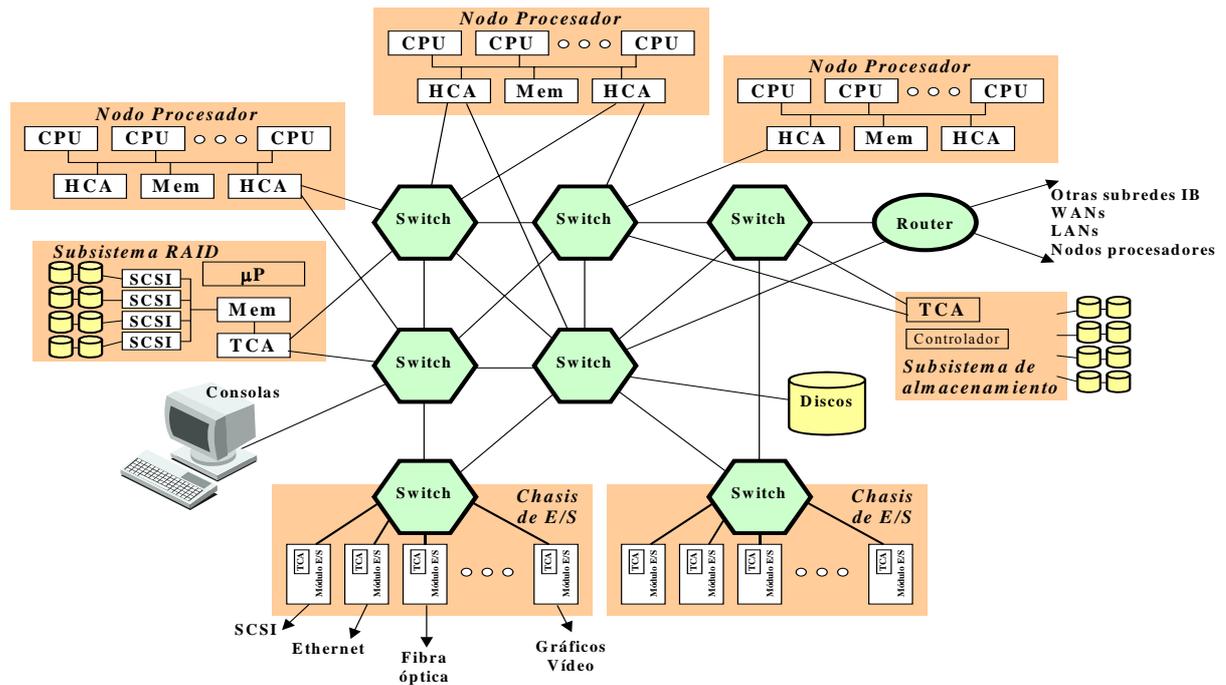


Figura 3.2. SAN (Red de área de sistema) con InfiniBand.

Este nuevo sistema de interconexión deja atrás el modelo de entrada/salida basado en transacciones locales a través de buses para implantar un nuevo modelo basado en el paso remoto de paquetes a través de canales. Esta arquitectura es independiente del sistema operativo y del procesador.

3.1.1 Arquitectura

InfiniBand define una red de área de sistema SAN (Fig. 3.2) para conectar ordenadores, sistemas de E/S y dispositivos de E/S. InfiniBand proporciona la infraestructura adecuada para comunicación y gestión, tanto para transacciones de E/S como para comunicación entre ordenadores. Un sistema InfiniBand puede variar desde un pequeño servidor formado por un procesador y unos cuantos dispositivos de E/S conectados, hasta un supercomputador masivamente paralelo con miles de procesadores y dispositivos de E/S que está conectado vía Internet a otras plataformas de procesamiento y/o sistemas de E/S.

InfiniBand define una interconexión conmutada que permite a muchos dispositivos intercambiar datos de forma simultánea, con gran ancho de banda y una baja latencia. Al ser un sistema conmutado, se pueden conseguir características como protección, fiabilidad, escalabilidad, seguridad, etc, que eran hasta ahora impensables en sistemas de E/S, e incluso en la mayoría de las redes habituales para conexión de computadores.

Un nodo final en red de área de sistema SAN InfiniBand puede comunicarse por medio de múltiples puertos del conmutador al que está conectado, pudiéndose habilitar de esta manera caminos alternativos. Así, se podría aprovechar la disponibilidad de caminos alternativos tanto para incrementar el ancho de banda real, como para permitir tolerancia a fallos.

InfiniBand permite a las unidades de E/S comunicarse entre ellas y con cualquier sistema de procesamiento en el sistema. Así, una unidad de E/S tiene la misma capacidad de comunicación que cualquier otro nodo de procesamiento.

3.1.1.1 Topología

Las conexiones punto a punto permiten establecer tanto topologías regulares como irregulares. El sistema de administración a partir de la topología construirá tablas de encaminamiento adecuadas para permitir el intercambio de información entre dos elementos cualquiera conectados a través de la red.

Desde un punto de vista de alto nivel, InfiniBand sólo es un medio para interconectar nodos entre sí, donde un nodo puede ser un sistema de procesamiento, una unidad de E/S o un encaminador hacia otra red.

Los nodos encaminadores están conectados a través de subredes, que a su vez están interconectadas por routers. Los nodos finales pueden estar conectados a una única subred o a varias por medio de distintas interfaces.

3.1.1.2 Componentes de InfiniBand

Los nodos de proceso, dispositivos de E/S, conmutadores, routers y el Subnet Manager, son los posibles componentes de una subred InfiniBand, todos ellos interconectados por enlaces.

Entre cualquiera de los componentes de la red pueden existir múltiples enlaces, consiguiendo de esta forma incrementar el ancho de banda, así como mejorar la tolerancia a fallos. Además, cualquiera de los componentes de la red InfiniBand puede estar conectado a un único conmutador, a varios, o directamente con cualquier otro dispositivo sin pasar por un conmutador.

Los dispositivos en un sistema InfiniBand se clasifican en:

- **Enlaces y repetidores.** Los enlaces interconectan channels adapters, switches, routers y repeaters (repetidores). Los enlaces son cables de cobre, de fibra óptica o impresos en circuitos. Los repetidores son dispositivos transparentes que extienden el alcance de los enlaces.
- **Channel adapters.** Un channel adapter (CA) es el componente en un nodo final que lo conecta a la red. Un CA es un dispositivo DMA programable con uno o varios puertos normalmente conectados a un puerto de un conmutador, aunque también es posible conectarlos entre sí directamente. Cada puerto del CA tiene su propia dirección local configurada por el Subnet Manager, que se comunica con la entidad local Subnet Management Agent (SMA). Por otra parte, cada puerto tiene su propio conjunto de buffers de envío y recepción distribuido en varios canales virtuales (VLs), y es capaz de estar enviando y recibiendo información al mismo tiempo.
- **Conmutadores (Switches).** Se conectan a los enlaces por una serie de puertos y son transparentes a los nodos finales. Su función no es ni generar ni consumir paquetes exceptuando los de la gestión de la subred. Su cometido es transmitir paquetes desde un puerto de entrada hacia uno de salida, en función de la dirección de destino que tenga el paquete. Esta información se encuentra en la cabecera del paquete, y puede ser alterada conforme los paquetes cruzan los conmutadores. Los conmutadores tienen unas tablas de encaminamiento que son cargadas en el momento del arranque, o tras un cambio en la topología, por el Subnet Manager. El conmutador, en base a esas tablas y a la dirección destino que viene especificada en la cabecera del paquete, debe decidir por qué puerto reenviar cada paquete que le llega.
- **Encaminadores (Routers).** El encaminador tiene características muy similares a los conmutadores, pero su cometido a diferencia del conmutador es comunicar distintas subredes entre sí. Tampoco generan ni consumen paquetes salvo los de gestión y tienen varios puertos con capacidad de recibir y transmitir de forma simultánea. Los encaminadores decidirán el puerto de salida del paquete en base a una dirección global (GID), la cual es única para todas las subredes mientras que la dirección local (LID) es propia de cada subred. A diferencia de los conmutadores, los encaminadores no son completamente transparentes, puesto que los nodos fuente deben especificar la dirección global (GID) del nodo destino y la dirección local (LID) del encaminador, que en la subred destino será la del nodo final.

3.1.1.3 Características de InfiniBand

Las características principales son:

- **Pares de colas.** Los pares de colas (queue pairs, o QPs) son la interfaz virtual que el hardware proporciona a un productor de información en InfiniBand, y el puerto de comunicación virtual que proporciona para el consumidor de dicha información. De esta forma, la comunicación tiene lugar entre un QP fuente y un QP destino. La arquitectura permite hasta 2^{24} QPs por CA, de forma que las operaciones en cada QP son independientes de las del resto de QPs.
- **Tipos de servicio.** Cada QP se configura para proporcionar un determinado tipo de servicio. Hay tres características que identifican a cada tipo de servicio. *Servicio orientado a conexión frente a no orientado a conexión* (también llamado datagrama), *servicio confirmado frente a sin confirmación*, *servicio de transporte de InfiniBand frente a otro tipo de transporte*. En un tipo de servicio orientado a conexión cada QP fuente está asociado con un único QP destino, y viceversa, en un tipo de servicio no orientado a conexión está permitido que un QP envíe/reciba paquetes a/desde cualquier otro QP en cualquier nodo. En un servicio confirmado, cuando un QP recibe un paquete debe confirmar al QP origen que lo ha recibido correctamente garantizando un envío sin errores y una entrega en orden. Estos paquetes de confirmación pueden ir integrados en otro paquete con información, o en un paquete ACK o NAK (negative acknowledged) propio. El servicio de transporte de InfiniBand permite transmitir paquetes en bruto encapsulando paquetes de otros protocolos de transporte.
- **Claves.** Las claves proporcionan un cierto nivel de aislamiento y protección del tráfico. Son valores asignados por las entidades de administración y que luego se insertarán en los paquetes según la función y destino al que vayan dirigidos. Las aplicaciones sólo podrán acceder a los paquetes que contengan claves para los que ellas estén habilitadas.
- **Dominios protegidos.** Los dominios protegidos (protection domain) permiten conceder distintos modos de acceso a las zonas de memoria registrada. Un consumidor establece el conjunto de QPs que pueden acceder a sus distintas zonas de memoria y los permisos que les da. Antes de que un consumidor reserve un QP o registre una zona de memoria, debe crear uno o más dominios protegidos. Tanto los QPs como las zonas de memoria registradas están asociadas a un dominio protegido.

- **Particiones.** Las particiones permiten aislar de forma virtual zonas de una subred InfiniBand. Este particionamiento no está ligado a límites establecidos por subredes, conmutadores o encaminadores. Cada puerto o interfaz de la subred es miembro de al menos una partición y puede pertenecer a varias de ellas.
- **Canales virtuales.** Los canales virtuales (VLs) constituyen un mecanismo para crear múltiples enlaces virtuales con un único enlace físico. Dependiendo de la implementación, un puerto puede tener 16, 8, 4 ó 2 canales virtuales implementados. Tanto el canal VL15 como el VL0 estarán presentes en todos los puertos, siendo el primero para control y el segundo para datos. El resto de VLs de datos (VL1 a VL14) son opcionales. El VL que en cada momento se usa viene configurado por el Subnet Manager, y esta decisión está basada en el campo nivel de servicio (Service Level, SL) que llevan los paquetes.
- **Control de la tasa de inyección.** InfiniBand define enlaces serie punto a punto full-duplex funcionando a una frecuencia de 2,5 GHz. La velocidad de transmisión que se obtiene es 2,5 Gb/seg, que se denomina 1x. InfiniBand permite alcanzar mayores velocidades usando varios de esos enlaces en paralelo. Así, otras velocidades que también están definidas en InfiniBand son 10 Gb/seg (4x) y 30 Gb/seg (12x).
- **Direccionamiento y encaminamiento.** En InfiniBand, el identificador local LID (16 bits) especifica la dirección única en la subred, y el identificador GID (128 bits) especifica la dirección global también única, en cualquier subred. Tanto el identificador LID como el GID serán asignados por el Subnet Manager a cada puerto de un CA, encaminador o al puerto 0 de un conmutador. Los paquetes que vayan a viajar por la subred llevarán incorporados la dirección del puerto fuente (SLID) y la dirección del puerto destino (DLID). Además, si el paquete va a viajar entre subredes deberá llevar incorporado también la dirección global fuente (SGID) y destino (DGID). La tabla de encaminamiento basada en los identificadores locales estará situada en los conmutadores y se usarán los identificadores (SGID) y (DGID) en los encaminadores intermedios. El encaminamiento en InfiniBand se realiza de forma distribuida y está basado en tablas de encaminamiento.
- **Verbos.** Los verbos son un conjunto de comportamientos que describen la interfaz entre el adaptador del host y el sistema operativo. Los verbos describen los parámetros necesarios para configurar y gestionar el adaptador, crear y liberar colas, configurar operaciones con las colas, hacer peticiones de envío a las colas, consultar el estado de las peticiones, etc.

3.1.2 Estructura arquitectónica

InfiniBand describe su funcionamiento mediante un modelo de interacción entre niveles, siendo el protocolo que gobierna cada nivel independiente del resto. Cada nivel usa los servicios que le proporciona el nivel inferior y a su vez proporciona una serie de servicios al nivel inmediatamente superior (Fig. 3.3).

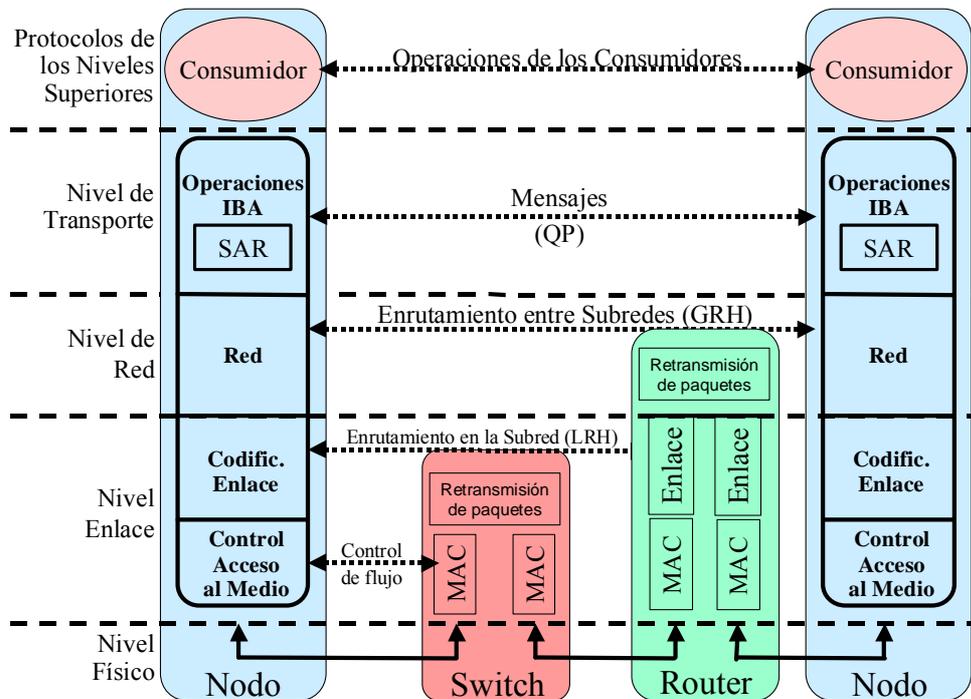


Figura 3.3. Modelo de comunicación de cuatro capas.

Los diferentes niveles son los siguientes:

- *Nivel físico*, depende del medio físico que se vaya a utilizar, par trenzado, fibra óptica o circuito en placa. Este nivel especifica cómo se trasladan los bits al cable y los símbolos usados para indicar principio y final de paquete, datos, espacio entre paquetes, el protocolo de señalización a utilizar, etc.
- *Nivel de enlace*, describe los formatos de paquete a usar, protocolos para operar con los paquetes, control de flujo y encaminamiento de paquetes dentro de la misma subred.
- *Nivel de red*, describe el protocolo para encaminar un paquete entre distintas subredes.

- *Nivel de transporte*, su función es la de entregar el paquete en la cola (QP) apropiada, indicar cómo procesar los datos contenidos en el paquete y si los datos a transmitir excedieran el tamaño máximo del paquete (MTU) también se encargará de segmentar la operación en varios paquetes, los cuales serían reensamblados por el QP en el extremo final.
- *Protocolos de los niveles superiores*, InfiniBand soporta cualquier número de protocolos de nivel superior utilizados por varios usuarios. También define los paquetes y protocolos para ciertas funciones de gestión.

3.1.3 Infraestructura de gestión

InfiniBand define los paquetes y protocolos para muchas de las tareas de gestión de la red. Estos protocolos de gestión se pueden agrupar en gestión de la subred y servicios de la subred, teniendo cada uno de esos grupos propiedades distintas.

En cada subred debe existir un Subnet Manager (SM) encargado de configurar la red y administrar la información necesaria para las operaciones de la subred. Cada nodo contiene un Agente de Gestión en la Subred (Subnet Management Agent, SMA) que responde a los paquetes de gestión enviados por el SM. InfiniBand define la infraestructura básica para permitir diversas clases de gestión (Management Classes). Cada clase de gestión permite gestionar diversos aspectos de la red de forma independiente siendo algunas obligatorias y otras opcionales. El Subnet Administrador (SA), será único en la subred y estará en el mismo nodo que el Subnet Manager Master, este SA proporciona a los clientes y aplicaciones de control los medios para obtener y enviar información de control además de ser el encargado de interactuar con el Subnet Manager Master. En cada adaptador hay un Communication Management (CM) accesible por cualquiera, éste especifica los protocolos y mecanismos para establecer, mantener y liberar conexiones. También se encarga de la resolución de identificadores, que permite a los usuarios del servicio no fiable y sin conexión identificar el QP que soporta un servicio en particular.

3.2 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO

Al comienzo de este capítulo se ha dado un breve repaso tanto a los diferentes elementos que componen una red de interconexión, como a diversos aspectos de su diseño. Es claro que la incorporación de componentes eficientes y la aplicación o

implementación de técnicas adecuadas son imprescindibles para alcanzar un buen nivel de prestaciones. En esta línea se trabaja intensamente, tanto desde la empresa como desde los laboratorios de investigación ajenos a ella. En muchos casos, los estudios se han centrado en aspectos o componentes concretos. Así, hay numerosos trabajos presentados en diferentes foros especializados en los que se propone alguna técnica particular sobre alguno de los aspectos que caracterizan a las redes de interconexión. Se analiza su comportamiento y en algunos casos se pone de manifiesto la influencia que sobre éste tienen otros parámetros. Suelen ser, por tanto, trabajos en los que se considera uno sólo de los componentes de la arquitectura, pero no estudios que hagan intervenir de una forma directa a todos o a la mayoría de ellos.

En lo que se refiere, por ejemplo, a técnicas de encaminamiento, son múltiples los trabajos elaborados para proponer nuevos mecanismos específicos para clusters o redes de estaciones de trabajo [Che95, Fli00, Pue01, Sil98a, Mar03b, Mar05b, Ske02, Ske04]. Buena parte de ellos han sido inspirados en metodologías de diseño de algoritmos de encaminamiento y/o trabajos anteriores propuestos en el entorno de sistemas multicomputadores [Dal87, Dua91, Dua93]. En esos trabajos en concreto el denominador común es que se trata de propuestas basadas en evitación de bloqueos. En otras, la idea subyacente es la recuperación de bloqueos [Anj96, Kim94, Ree89, Sil98b].

Algo parecido sucede con las propuestas que, para redes de interconexión de estaciones de trabajo o cluster de PCs, se han realizado en torno a diferentes cuestiones relacionadas con la conmutación y control de flujo. Así, hay trabajos en los que se analiza el uso de wormhole [Hor95, Hor96] o canales virtuales [Gal97, Sil98c] en este tipo de plataformas. También para estos casos se ha recurrido a trabajos anteriores, elaborados en otros entornos, y que sentaron las bases de su funcionamiento [Bod95, Dal87, Dal92].

Cubriendo un mayor conjunto de aspectos, han aparecido otros trabajos en los que se han propuesto tecnologías de red más rápidas para realizar los diferentes elementos de cómputo. Son, en la mayoría de los casos, propuestas que finalmente han tenido su reflejo en productos comerciales reales [Bod95, Gal97, Hor96, Gar97, Sch91].

En buena parte de los trabajos mencionados anteriormente se suele seguir una metodología muy similar. Una vez justificada y descrita la propuesta presentada, se incluyen los resultados de un estudio de evaluación, en la mayoría de los casos mediante simulación, que muestra la bondad de la técnica o mecanismo propuesto. La evaluación consiste en someter al modelo de red que incorpora dichos mecanismos a diferentes pruebas en las que suelen variar una serie de parámetros característicos (carga, tamaño de la red, topología, etc.). Sin embargo, el conjunto de parámetros considerados suele ser pequeño, como también suele serlo el rango de valores considerados entre los que se

mueven cada uno de ellos.

El segundo aspecto quizás no sea significativo pues en la mayoría de los casos aparecen tendencias muy marcadas en el comportamiento de los modelos estudiados que muestran que éstas se repiten a partir de un cierto valor de un determinado parámetro. No es necesario, por tanto, realizar un mayor número de pruebas cuando este comportamiento es detectado.

Sin embargo, que el conjunto de parámetros incluidos en el proceso de evaluación sea reducido en principio parece que sea una restricción importante. Sería interesante conocer la influencia de todos los aspectos en el comportamiento de la red, y no sólo de unos pocos. En estos trabajos lo habitual es elegir un valor determinado y fijo para aquellos aspectos o parámetros que no han sido considerados, con lo cual los resultados obtenidos y como consecuencia las conclusiones extraídas a partir de ellos, en principio, son sólo válidos para un conjunto de configuraciones concretas, en el que lógicamente no están incluidas todas las posibles. Se pierde con este sistema la información sobre la interacción entre los distintos parámetros, ya que la mejora aportada por un parámetro puede estar determinada significativamente por el valor de otro parámetro, y variando solamente uno esta información no se puede obtener.

En definitiva, es muy común encontrar trabajos en los que se presenta una determinada propuesta, que puede consistir en la presentación de una nueva técnica o la modificación de una ya existente, y se evalúa la idoneidad de la misma. El estudio, aunque hace intervenir a otros aspectos o componentes del sistema, analiza la contribución al nivel de prestaciones de dicho sistema únicamente del aspecto de diseño sobre el cual gira el estudio. Sin embargo, también sería interesante realizar estudios que fueran un poco más lejos e intentaran mostrar la contribución al rendimiento, en este caso de la red de interconexión de un cluster, de todos los elementos o componentes de la misma, o al menos de los más significativos.

Siguiendo una metodología parecida a la utilizada en los trabajos citados, eso significaría realizar una gran cantidad de pruebas, que en el caso de que el método elegido sea la simulación, se traduciría en un tiempo en muchos casos inabordable. Pensemos, por ejemplo, que se quiere hacer intervenir en el estudio al que nos referimos al tamaño de los buffers, número de canales virtuales, tiempo de encaminamiento, número de puertos (todos ellos parámetros relativos al conmutador), tiempo de vuelo por el canal, longitud de los cables, etc. Además, supongamos que por cada uno de ellos se quisieran considerar diferentes opciones. Es claro, entonces, que el número de pruebas a realizar sería muy elevado. Si el número de parámetros fuese mayor, las configuraciones a evaluar crecerían de una forma desmesurada. Habría que utilizar, por tanto, otras alternativas que permitieran obtener resultados en tiempos razonables. En la siguiente

sección se presenta un método dirigido en esa línea, y que ya fue usado en el trabajo en el cual se basa el que aquí se presenta [Mar03, Mar05].

3.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS *

El objetivo de un diseño de experimentos apropiado es determinar el número de observaciones que se deben realizar y los valores que tomarán los parámetros de cada una de ellas, de forma que con el mínimo número de pruebas se consiga que los datos contengan el máximo de información sobre el problema que se desea resolver. Un diseño apropiado de los experimentos permite separar los efectos de los distintos factores que puedan afectar al rendimiento, determinando así si un factor tiene un efecto significativo o si la diferencia observada es causada simplemente por la variación producida por errores en la medida o parámetros que no han sido controlados.

3.3.1 Tipos de diseños de experimentos

Hay numerosas variedades de diseño de experimentos. Los tres diseños más frecuentemente usados son los diseños simples, los diseños totalmente factoriales y los diseños factoriales fraccionales [Jai91]. Antes de pasar a una breve explicación de cada uno se definen los conceptos de factor y nivel. Se denomina factor a aquella característica o parámetro de los procesos o productos estudiados para el que se prueba dos o más variantes, con el fin de investigar su efecto sobre la variable estudiada. Nivel es cada uno de los valores que toma un factor.

3.3.1.1 Diseños simples

En un diseño simple se empieza con una configuración típica y se varía un factor cada vez para ver cómo afecta éste al rendimiento. Por ejemplo, en un estudio sobre un nuevo algoritmo de encaminamiento se fijarían todos los parámetros y se variaría el algoritmo empleado para comparar la propuesta realizada frente a las opciones existentes.

Dados k factores, con el i -ésimo factor teniendo n_i niveles, un diseño simple requeriría sólo n experimentos, donde

$$n = 1 + \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \quad (3.1)$$

* Esta sección ha sido extraída en su totalidad de [Mar03]. Se ha creído conveniente incluirla y además dejarla tal cual pues resume los aspectos principales de los diseños de experimentos.

Sin embargo, este tipo de diseños no hace el mejor uso del esfuerzo invertido, ya que no es estadísticamente eficiente. Además, si los factores tienen algún tipo de interacción, este estudio puede conducir a conclusiones erróneas. Si por ejemplo el efecto del algoritmo de encaminamiento depende del nivel de concurrencia en el acceso a la tabla de rutas, la combinación óptima no se puede determinar hasta que todas las posibilidades son estudiadas. Este tipo de diseños son por tanto poco recomendables.

3.3.1.2 Diseños totalmente factoriales

Un diseño totalmente factorial emplea todas las posibles combinaciones de todos los niveles de todos los factores. Un estudio con k factores, con el i -ésimo factor teniendo n_i niveles, un diseño totalmente factorial requeriría n experimentos, donde

$$n = \prod_{i=1}^k n_i \quad (3.2)$$

La ventaja de un diseño totalmente factorial es que todas las posibles combinaciones de configuraciones y carga de trabajo son examinadas. Se puede extraer el efecto de todos los factores incluyendo los *secundarios* (son aquellos que influyen en el rendimiento, pero que no interesa cuantificar en cuanto medida lo hacen) y sus interacciones. El problema principal es el coste del estudio. Requeriría mucho tiempo y esfuerzo el llevar a cabo tantos experimentos, especialmente teniendo en cuenta la posibilidad de que cada experimento puede tener que ser repetido varias veces. Hay tres formas de reducir el número de experimentos:

1. Reducir el número de niveles de cada factor.
2. Reducir el número de factores.
3. Usar diseños factoriales fraccionales.

La primera alternativa tiene como inconveniente el no poder estudiar todos los niveles deseados en un factor de tipo cualitativo, o el no poder estudiar la naturaleza (lineal, cuadrática,...) de la relación entre la variable respuesta estudiada y el correspondiente factor. Esta alternativa es recomendable en un estudio inicial del problema, en el que sólo se desea determinar la importancia relativa de cada uno. Un diseño factorial en el cual a cada uno de los k factores se le asignan dos niveles requiere 2^k experimentos. Este es un tipo muy usual de diseño denominado diseño 2^k . Después de que la lista de factores haya sido reducida, se pueden probar más niveles por factor.

La segunda alternativa requerirá el replanteamiento de los objetivos iniciales en la

resolución del problema, debido a que se debe renunciar al estudio del efecto de algunos factores, dejándolo incompleto. Esta forma de actuar puede no suponer una pérdida importante si se conoce previamente que los factores no considerados tienen poca importancia en la explicación de la variable respuesta.

La tercera alternativa, por su importancia, se describe en la siguiente sección.

3.3.1.3 Diseños factoriales fraccionales

Como se ha indicado anteriormente, en ocasiones el número de experimentos requeridos para un diseño totalmente factorial es excesivo. En estos casos se puede realizar sólo una fracción del diseño factorial completo. Los diseños factoriales fraccionales o fracciones factoriales, no son más que diseños factoriales de los cuales se ha eliminado un número importante de pruebas, a costa de no poder estudiar ciertas interacciones de orden superior entre los parámetros. Afortunadamente, las interacciones que incluyen a tres o más parámetros no suelen aparecer (existir) en la realidad, por lo que la eliminación de pruebas y el no estudio de estas interacciones de orden elevado no constituyen una pérdida apreciable.

Se tiene así que los diseños factoriales fraccionales ahorran tiempo y esfuerzo cuando se los compara con los diseños totalmente factoriales. Sin embargo, la información obtenida de un diseño fraccional es menor que la obtenida de uno total, por la suposición realizada sobre las interacciones de orden superior y por la disminución de la precisión en el cálculo del efecto de los factores. Por otra parte, si alguna de las interacciones se sabe de antemano que es despreciable, esto puede no ser considerado un problema, y el tiempo y el esfuerzo de un diseño totalmente factorial puede no estar justificado.

3.3.2 Conceptos básicos

Una vez vistas las diferentes aproximaciones al diseño de experimentos, se muestran a continuación los conceptos básicos en los que se basan los mismos [Rom93]. Se empieza describiendo los conceptos fundamentales de efecto simple e interacción. Tras estos se introduce el de ortogonalidad, que es la base para que un diseño de experimentos esté correctamente diseñado, de tal forma que se pueda extraer información útil y diferenciada del efecto de los diferentes factores. Por último, se comenta brevemente el concepto de plan factorial equilibrado.

3.3.2.1 Efectos simples. Interacciones

Para mostrar los distintos tipos de efectos que pueden considerarse en el análisis de un diseño factorial, considérese el estudio del efecto de dos factores, uno FI con I niveles o variantes y otro FJ con J niveles o variantes, sobre una determinada variable respuesta X.

A cada uno de los IxJ tratamientos posibles (combinaciones de los niveles de uno y otro factor) se le asocia una población en la que la variable X tiene una determinada distribución. Denominemos X_{ij} a la variable asociada a la utilización de la variable i del factor FI con la variante j del factor FJ. Se asume en general que X_{ij} sigue una distribución normal, que vendrá caracterizada por su media m_{ij} y su varianza σ^2_{ij} .

El **efecto simple** de un factor se define y estima sobre el promedio de las condiciones estudiadas para los otros factores. Así, si denominamos m_i al promedio de las m_{ij} , diremos que el efecto simple del factor FI es nulo si todas las m_i son iguales (para $i = 1 \dots I$).

$$m_i = \frac{m_{i1} + \dots + m_{iJ}}{J} \quad (3.3)$$

Denominando $m_{..}$ a la media aritmética de todas las m_{ij} (que es también la media de las m_i), se define el efecto simple α_i de la variante i del factor FI a la diferencia entre la media m_i correspondiente a dicha variante y la media general $m_{..}$. Obviamente, si el efecto simple del factor FI es nulo todas las α_i serán iguales a cero.

$$\alpha_i = m_i - m_{..} \quad (3.4)$$

Se dice que existe **interacción** entre dos factores si el efecto de uno de ellos se modifica al cambiar la variante considerada del otro factor. Si no existe interacción entre los dos factores la media m_{ij} correspondiente a la combinación de la variante i del primero con la j del segundo resulta igual a la suma de la media general más los dos efectos simples correspondientes

$$m_{ij} = m_{..} + \alpha_i + \beta_j \quad (3.5)$$

Si existe interacción, la anterior igualdad no se verifica para todo m_{ij} , definiéndose el efecto de la interacción entre ambas variantes, $\alpha\beta_{ij}$, como la diferencia entre los dos miembros de la ecuación anterior

$$\alpha\beta_{ij} = m_{ij} - (m_{..} + \alpha_i + \beta_j) \quad (3.6)$$

El concepto de interacción entre dos factores puede generalizarse para interacciones de orden superior. Así, se dice que existe una interacción triple entre tres factores FI, FJ y FK si los efectos asociados a la interacción doble entre dos de ellos varían según el nivel considerado del tercer factor. Dado que no es frecuente encontrar en la práctica interacciones de orden elevado, en general no trataremos este tipo de interacciones.

3.3.2.2 Ortogonalidad. Estimación de efectos

En principio podría pensarse que si se modifican simultáneamente varios factores no va a ser posible separar los efectos de cada uno de ellos sobre la variable estudiada. La idea básica que hace posible esta separación en los experimentos bien diseñados es la de ortogonalidad.

Dados dos factores, FI con I variantes y FJ con J variantes, se dice que en un diseño los efectos simples de ambos factores son ortogonales si en las pruebas del diseño en cada una de las variantes i de FI aparecen en idénticas proporciones las J variantes de FJ.

Cuando los efectos simples de todos los factores estudiados son ortogonales, la estimación a_i de cada efecto simple α_i de un factor se obtiene simplemente como la diferencia entre la media de los resultados obtenidos cuando el factor está al nivel i y la media general de todos los resultados. Las estimaciones así obtenidas para los efectos simples de un factor no vienen afectadas por los posibles efectos simples de los restantes factores, lo que permite por tanto “separar” los efectos simples de todos los factores estudiados.

Dados tres factores, FI, FJ y FK, la interacción $FI \times FJ$ entre los dos primeros se dice que es ortogonal al efecto simple del tercer factor FK si en cada una de las $I \times J$ posibles combinaciones entre los dos primeros factores aparecen en la misma proporción cada una de las K variantes de FK. Si se verifica esta condición es posible estimar los efectos $\alpha\beta_{ij}$ asociados a la interacción $FI \times FJ$ sin que dichas estimaciones vengan afectadas por la existencia de posibles efectos simples de FK.

Análogamente en un plan con 4 factores (FI , FJ , FK y FL) se dice que la interacción $FIx FJ$ es ortogonal a la interacción $FKx FL$ si en cada una de las IxJ posibles combinaciones entre las variantes de *la primera interacción* aparecen en las mismas proporciones cada una de KxL combinaciones entre variantes de *la segunda interacción*. En estas condiciones es posible estimar los efectos asociados a una de las interacciones sin que las estimaciones vengan afectadas por la existencia de una posible interacción entre los otros dos factores.

3.3.2.3 Planes factoriales equilibrados

Un diseño totalmente factorial en el que cada combinación se ensaya un mismo número de veces se denomina plan factorial equilibrado. Si el número de veces que se repite cada combinación es 1 entonces al plan se le denomina no replicado, frente a los planes replicados, en los que cada combinación se prueba más de una vez.

Los planes factoriales equilibrados tienen la importante propiedad de que todos los efectos son ortogonales entre sí (tanto los efectos simples como las interacciones de cualquier orden).

Debe apreciarse, sin embargo, que el carácter equilibrado de un diseño es una condición suficiente, pero no necesaria, para que los efectos sean ortogonales. Esta idea es la que se explota en los diseños factoriales fraccionales.

3.3.2.4 Fracciones factoriales

Cuando el número de factores que se considera no es reducido, los planes equilibrados permiten estudiar un elevado número de efectos (de hecho todas las interacciones de cualquier orden), la mayor parte de las cuales tienen potencialmente un interés reducido. Si bien es cierto que proporcionan una precisión muy elevada, el número de pruebas exigido puede ser excesivo. Por ejemplo, un plan equilibrado con 6 factores y dos niveles por factor requeriría $2^6 = 64$ observaciones, y permitiría estimar 5 efectos simples, 15 interacciones dobles, 20 triples, 15 cuádruples, 6 quintuples y 1 séxtuple (para un total de 62 efectos, que es el número de grados de libertad total). Cada efecto se estimará con gran precisión como la diferencia entre dos medias de 32 pruebas cada una. Muchos, por no decir gran parte, de los efectos contemplados serán posiblemente inexistentes. Además, la precisión puede ser en determinadas situaciones (como pueda serlo un estudio previo) innecesariamente elevada.

Los diseños factoriales fraccionales consisten en coger sólo ciertas combinaciones

de todas las posibles (diseños totalmente factoriales), pero de tal forma que siga guardándose la ortogonalidad. Se consigue así reducir sustancialmente el número de experimentos, pero a cambio de no poder estudiar ciertos efectos y “confundir” entre sí algunos de los que sí pueden estudiarse. Por ejemplo, un diseño 2^{k-1} sería un diseño 2^k (un diseño totalmente factorial con k factores y dos niveles por factor) en el que se han eliminado la mitad de las combinaciones. En general, se denominan 2^{k-p} a las fracciones que permiten estudiar k factores realizando 2^p pruebas.

Para simplificar la tarea de diseñar experimentos altamente fraccionales sin conocer los fundamentos teóricos de los mismos, Genini Taguchi propuso la utilización generalizada de ciertos diseños básicos, que agrupó en un conjunto de tablas y gráficos [Tag85]. Estos diseños no son más que planes factoriales altamente fraccionados, a los que se les da el nombre de **orthogonal arrays** porque en ellos (como en toda fracción factorial) los efectos simples de los factores son ortogonales. Cada diseño se identifica con las siglas L_x , donde x es un número que indica la cantidad de pruebas del diseño. Así, por ejemplo, el L16 de Taguchi se corresponde con la fracción factorial 2^{15-11} , fracción que está completamente saturada ya que los efectos simples de los factores “agotan” todos los grados de libertad del diseño. Ocurre lo mismo con el resto de diseños. Cuando el número de factores a ensayar es menor que el número de columnas del orthogonal array, el experimento puede organizarse de forma que los grados de libertad libres se utilicen para estudiar algunas interacciones dobles potencialmente interesantes sin que resulten confundidas entre sí ni con los efectos simples. Resulta por tanto de suma importancia la distribución de los factores entre las columnas del orthogonal array.

3.3.3 Análisis de resultados

Una vez diseñados los experimentos y llevados a cabo hay que extraer la información que pueda resultar útil. Para esta tarea se utiliza la técnica del Análisis de la Varianza (ANOVA) [Rom93], que determina el efecto significativo o no de cada factor e interacción de los mismos sobre el parámetro de rendimiento estudiado. Una vez determinada la importancia de un determinado factor es común usar los intervalos LSD y los contrastes ortogonales para analizar de qué manera afectan dichos factores a la variable estudiada. Por último, este tipo de estudios pueden servir para obtener estimador del valor de la variable estudiada bajo ciertos valores de los factores utilizados en el estudio, lo cual se consigue mediante un modelo de regresión.

3.3.3.1 ANOVA. Test F

El estudio de la significación de los diferentes efectos, y de sus posibles

interacciones, se realiza a partir de la elaboración del Cuadro Resumen del Análisis de la Varianza. La idea básica consiste en descomponer la variabilidad total observada en los resultados en una serie de términos, asociados a los efectos de los distintos factores estudiados y a sus interacciones, más un término residual que recoge el efecto conjunto de todos los otros factores que han influido en los resultados y que no han sido incluidos explícitamente en la experiencia, así como las interacciones de orden superior que no hayan sido contempladas.

La variabilidad total se cuantifica a partir de la **Suma de Cuadrados Total** (SC_{Total}), que no es más que la suma de los cuadrados de las diferencias entre cada dato observado y la media de todos ellos. Esta suma de cuadrados lleva asociados unos grados de libertad totales que son iguales al número total de datos menos 1.

Al efecto simple de cada factor se le asocia una **Suma de Cuadrados del Factor**, que se define como la suma de los cuadrados de las diferencias entre las medias de las distintas variantes del factor y la media general, multiplicadas por el número de datos a partir de los cuales se han obtenido dichas medias. Dicha suma de cuadrados lleva asociada unos grados de libertad iguales al número de variantes del factor menos 1.

A cada interacción entre dos factores se le asocia análogamente una Suma de Cuadrados, con unos grados de libertad que no son más que el producto de los grados de libertad de los factores considerados.

Por último se obtiene una **Suma de Cuadrados Residual** ($SC_{Residual}$) que no es más que la diferencia entre la SC_{Total} y la suma de todas las SC de los distintos factores y de sus interacciones, y cuyos grados de libertad se obtienen también por diferencia entre los totales y la suma de todos los efectos considerados.

Los cocientes entre cada Suma de Cuadrados y sus correspondientes Grados de Libertad se denominan **Cuadrados Medios (CM)**. El Cuadrado Medio Residual es una estimación de la varianza σ^2 existente en las poblaciones estudiadas.

Los cocientes entre los diferentes cuadrados medios y el cuadrado medio residual, denominados $F_{calculada}$ o F_{ratio} , se distribuyen como una F de *Snedecor* (con los grados de libertad correspondientes) si son ciertas las respectivas hipótesis nulas de que los efectos considerados son nulos. Por el contrario si un efecto (simple o interacción) no es nulo a nivel poblacional, la F_{ratio} correspondiente es en promedio mayor que una F de *Snedecor*. Por tanto se considerará que los efectos simples o las interacciones no son significativas si la F_{ratio} resulta mayor que el valor crítico $F(\alpha)$ que se obtiene en tablas para un riesgo de 1ª especie α predeterminado $F(\alpha)$ es el valor tal que la probabilidad de ser superado por un F de *Snedecor*, con los grados de libertad considerados, es igual a α . En el cuadro

resumen del ANOVA lo que se suele incluir no es el valor del umbral $F(\alpha)$, sino la probabilidad de que una F de Snedecor supere dicho valor. Por lo tanto la hipótesis nula se rechazará si dicha probabilidad resulta inferior al riesgo de 1ª especie α utilizado (cuyo valor se suele fijar al 0.05).

3.3.3.2 Comparación de medias. Intervalos LSD

Cuando el efecto de un factor cualitativo con más de dos niveles resulta significativo, es necesario continuar el análisis con el fin de precisar la naturaleza de dicho efecto. Por ejemplo, el efecto de un factor con tres variantes puede ser significativo porque las 3 variantes conducen a medias diferentes o porque una de ellas difiere de las otras dos, que son iguales entre sí.

Una forma sencilla de precisar esta cuestión es mediante el establecimiento de intervalos LSD (siglas de “Least Significant Difference”) para la media de cada tratamiento. Si una media muestral es \bar{x}_i y $S_{\bar{x}}$ es su desviación típica estimada, el intervalo LSD se obtiene por la fórmula:

$$\bar{x}_i \pm \frac{\sqrt{2}}{2} * t_{gdlr}(\alpha) * S_{\bar{x}_i} \quad (3.7)$$

(donde $gdlr$: grados de libertad del residuo, y t_{gdlr} viene en tablas)

La diferencia entre la media de los dos tratamientos será significativa si los respectivos intervalos LSD (que no es más que un intervalo de confianza a un determinado porcentaje α para el promedio) no se solapan.

3.3.3.3 Contrastes ortogonales

Si el factor cuyo efecto resulta significativo es de tipo cuantitativo no debe analizarse su efecto comparando los niveles por medio de intervalos LSD. En vez de ello conviene utilizar la técnica de los contrastes ortogonales que permite analizar por separado la significación de las componentes lineal, cuadrática, cúbica,... del efecto del factor.

En principio, si un factor se ha estudiado a I niveles es posible analizar hasta $I-1$ subefectos, es decir tantos como grados de libertad. Dichos subefectos corresponden a las

componentes lineal o de orden 1, cuadrática o de orden 2, cúbica o de orden 3, y así sucesivamente hasta el efecto de orden I-1. En la práctica rara vez resultan significativos efectos de orden superior al cuadrático, o a lo sumo al cúbico.

La Suma de Cuadrados del factor se descompone en términos, cada uno con un grado de libertad, asociados a cada una de las citadas componentes. La significación de cada componente se obtiene de la forma habitual a partir de la F_{ratio} hallada dividiendo el CM de la componente por el $CM_{Residual}$.

3.3.3.4 Modelos de regresión

Una vez analizados los factores que intervienen de manera significativa en el valor de la variable estudiada, y de qué forma lo hacen, es importante disponer de un modelo que permita un estudio más detallado de la relación existente entre la variable respuesta y los factores explicativos. Dicho modelo será útil para predecir cuál será el valor para dicha variable bajo ciertas condiciones (en concreto para ciertos niveles de los factores tenidos en cuenta) y para conocer los valores de los factores que optimizan la variable respuesta. Para esto se utiliza un modelo de regresión que relacione los valores de los factores con la media de la variable respuesta.

El modelo de regresión implícito en la técnica del ANOVA consiste en considerar que el valor de la variable estudiada es igual a la suma de los efectos simples de cada factor significativo, más los efectos de las interacciones significativas, más otro término que representa los efectos residuales de los factores e interacciones no significativos así como circunstancias no controladas.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE PRESTACIONES DE LA RED DE INTERCONEXIÓN

En este capítulo se presenta la metodología finalmente seguida para completar el proceso de evaluación del rendimiento de la red de interconexión. Para ello, en primer lugar se describe el método general, indicando con detalle cada una de las fases en las que consiste, para a continuación particularizar para el caso concreto objeto de estudio. Parte de los resultados y el análisis de los mismos se han llevado a un capítulo posterior.

4.1 APROXIMACIÓN SISTEMÁTICA A LA EVALUACIÓN DE PRESTACIONES

En general, las métricas, la carga de trabajo y las técnicas de evaluación utilizadas en un problema de rendimiento no pueden ser utilizadas en otro diferente. Lo que si se puede, como se indica en [Jai91] es seguir una misma metodología en muchos de ellos con el fin de conseguir resultados de una manera sistemática:

1. **Definir los objetivos y concretar el sistema a estudiar.** Lo primero que se debe hacer en cualquier estudio de evaluación de prestaciones es definir los límites del sistema en base a los objetivos, es decir qué queda fuera y dentro del mismo, delimitando así los aspectos que se van a considerar a la hora de hacer el estudio.
2. **Listar servicios y salidas.** El siguiente paso para analizar un sistema es listar los servicios que va a proporcionar, es decir lo que el sistema va a ofrecer.
3. **Seleccionar las métricas.** Se debe realizar una selección de las métricas que servirán para comparar las prestaciones. En general, las métricas están relacionadas con la velocidad, la precisión y con la disponibilidad de los servicios.
4. **Listar los parámetros.** La lista de parámetros que afectan a las prestaciones se podrá dividir en parámetros de sistema y parámetros de carga de trabajo. Los parámetros de sistema no suelen variar entre instalaciones de sistema, mientras que con los parámetros de carga de trabajo ocurre lo contrario, ya que son característicos de los requisitos de los usuarios. La lista de parámetros no se cierra en este punto, ya que se podrán añadir parámetros, que se hayan pasado por alto más adelante. La lista de parámetros puede dividirse en dos partes: los parámetros que varían durante la evaluación y los que no.

5. **Selección de factores a estudiar.** Los parámetros que variarán durante la evaluación son denominados factores y a sus posibles valores se les denomina niveles. Normalmente la lista de factores y sus posibles niveles será mayor de lo que los recursos disponibles puedan permitir, por lo que deben buscarse métodos para reducir el número de combinaciones.
6. **Seleccionar una técnica de evaluación.** La elección de la técnica de evaluación se basará en las características del estudio, así como en otros aspectos como pueden ser el tiempo y los recursos. Las tres técnicas más extendidas para la evaluación de prestaciones son el modelado analítico, la simulación, y la medida sobre un sistema real.
7. **Seleccionar la carga de trabajo.** La carga de trabajo será un conjunto de peticiones de servicio que se le harán al sistema, y dependiendo de la técnica de evaluación se expresará de diferentes maneras. Lo más importante a la hora de seleccionar la carga de trabajo es que sea representativa del uso del sistema en la vida real. En un modelo analítico la carga se expresa como probabilidades de distintas peticiones, en simulación se podría emplear una traza de peticiones realizadas sobre un sistema real, y si se están realizando medidas sobre un sistema real, la carga puede consistir en la ejecución sobre el sistema de aplicaciones de usuario.
8. **Diseñar los experimentos.** En base a los factores seleccionados y a sus niveles, se desarrollarán una serie de experimentos con el fin de obtener la máxima información con el mínimo esfuerzo. El diseño de experimentos suele realizarse en dos fases. En la primera fase, el objetivo es determinar el efecto relativo de varios factores, por lo que el número de factores puede ser grande, sin embargo el número de niveles es conveniente que sea pequeño. En la mayoría de los casos esto se puede realizar con un *diseño de experimentos factoriales fraccionados*. En la segunda fase, al contrario que en la primera, el número de factores es más reducido y el número de niveles de aquellos factores con un impacto significativo se aumenta.
9. **Analizar e interpretar los datos.** Se deben utilizar métodos estadísticos para analizar e interpretar los datos, ya que comparar de una forma simple las medidas conllevaría resultados poco precisos. Para el análisis de los resultados, a la hora de comparar dos alternativas, hay que tener en cuenta la variabilidad que sufren los resultados, tanto por la propia aleatoriedad de los experimentos, como por la influencia de parámetros no contemplados. Una vez obtenidos los resultados del análisis, se obtendrán las conclusiones del estudio.

10. **Presentación de resultados.** El objetivo final del estudio de evaluación de prestaciones es que las conclusiones obtenidas se muestren de tal forma que puedan ser entendidas y que el conocimiento que transmiten pueda ser utilizado. Para entender mejor los resultados se utilizan gráficas y se suele omitir la jerga estadística.

4.2 CONCRECIÓN AL CASO DE ESTUDIO

A continuación se indican las acciones llevadas a cabo, para cada punto de la metodología presentada en el apartado 4.1. Dichas acciones se ajustan al caso particular que nos ocupa y motiva este proyecto. Los pasos se muestran ya terminados, teniendo en cuenta los ciclos dados a la metodología y por tanto las decisiones tomadas en apartados posteriores. Los puntos 9 y 10 han sido trasladados al Capítulo 5.

4.2.1 Definición de objetivos y concreción del sistema a estudiar

Como se mencionó en el Capítulo 1, el objetivo es realizar un estudio de evaluación y análisis detallado de la influencia de ciertos aspectos de una red completa de interconexión en su rendimiento. Este trabajo es continuación de un estudio previo realizado meses atrás. En el estudio anterior sólo se consideraba un único conmutador, por lo que el tamaño de red, la topología y el encaminamiento no pudieron ser incluidos dentro de los parámetros a estudiar. En el trabajo actual se consideran redes con varios conmutadores (hasta 128), posibilitando así el estudio de los parámetros anteriormente citados.

El modelo de red elegido usa virtual cut-through como técnica de conmutación, control de flujo basado en créditos, y en él se pueden distinguir los siguientes elementos:

- **Nodos.** Los nodos, en función de una tasa de inyección, irán generando paquetes que tendrán como destinatarios otros nodos de la red. Dependiendo de que la red sea capaz de aceptar el paquete recién generado, empezará inmediatamente la transmisión del paquete, en caso contrario se esperará a que la red esté disponible, almacenando el paquete en una cola de paquetes generados.
- **Enlaces.** Los enlaces son las conexiones físicas entre los elementos del sistema. Se definen enlaces serie punto a punto full-duplex funcionando a una frecuencia de 2,5 GHz, es decir la información puede fluir simultáneamente en ambos sentidos.

- **Conmutadores.** El conmutador es el elemento de la red que permite que los paquetes enviados se transmitan desde su origen a su destino siguiendo la ruta correcta. Disponen de varios puertos de entrada y de salida a los que están conectados nodos, y uno o varios conmutadores dependiendo de la topología de la red. Su complejidad requiere el empleo de un modelo por sí mismo.

El modelo de conmutador empleado, típico en redes de interconexión de clusters o redes de estaciones de trabajo, es el que incorpora un crossbar multiplexado tanto a la entrada como en la salida (Fig. 4.1).

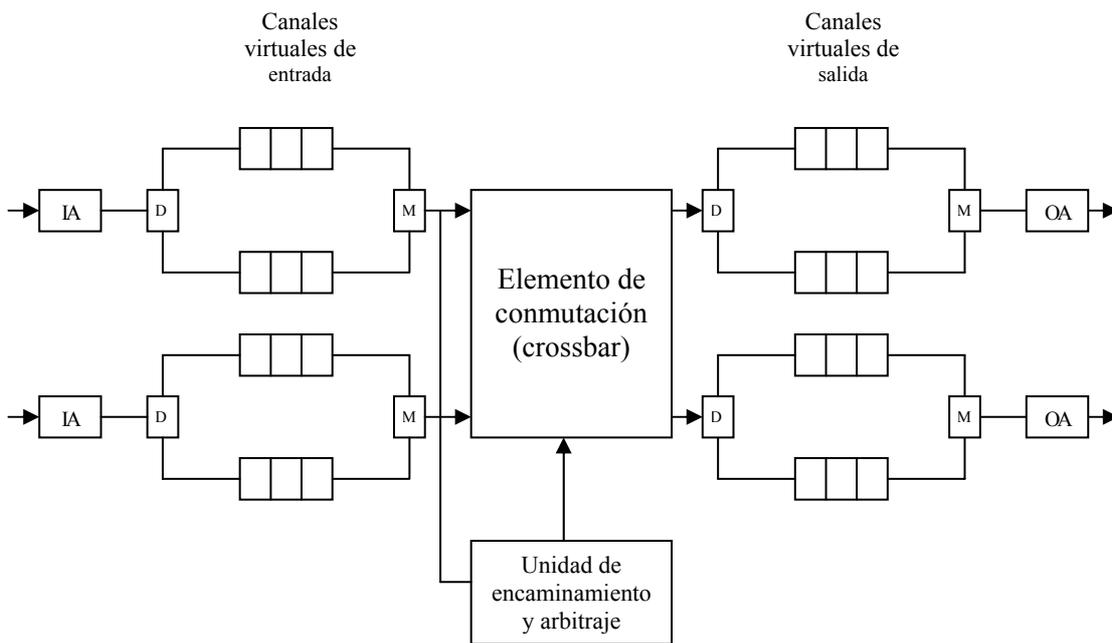


Figura 4.1. Modelo de conmutador multiplexado a la entrada y salida.

- **Input adapter.** Se encarga de tres tareas, fundamentalmente: sincroniza la comunicación con el conmutador al que está conectado a través del enlace físico, convierte las señales que viajan por el enlace físico en paquetes de datos comprensibles por el conmutador y cuando hay más de un canal virtual por puerto físico del conmutador, se encarga de asignar a cada paquete entrante a algún canal virtual.
- **Output adapter.** Es el equivalente del input adapter pero en la salida del conmutador, encargándose de sincronizar y adecuar la salida de los datos del conmutador, así como de decidir en qué orden y cuándo abandonan los paquetes el conmutador.

- **Buffers de almacenamiento.** Almacenan los flits de los paquetes mientras esperan su procesamiento y transmisión. Debido a la técnica de conmutación utilizada (virtual cut-through), deben tener espacio para almacenar al menos un paquete completo.
- **Canales virtuales.** Son buffers de almacenamiento gestionados de manera independiente, constituyen un mecanismo para crear múltiples enlaces virtuales con un único enlace físico.
- **Unidad de mutiplexión/demultiplexación.** El flujo de paquetes, cuando hay canales virtuales, tiene que ser demultiplexado a la entrada, para pasar del input adapter a uno de los canales virtuales y multiplexado a la salida, para pasar de uno de los canales virtuales al output adapter.
- **Unidad de encaminamiento.** Decidirá cuál será el puerto de salida del conmutador por el que debe encaminarse cada paquete. Esta tarea la realizará tras la ejecución del algoritmo de encaminamiento.
- **Unidad de arbitraje.** Permite especificar la prioridad que tendrá cada canal virtual a la hora de enviar paquetes a través del correspondiente puerto de salida.
- **Elemento de conmutación.** Se encarga de dirigir los paquetes desde los canales de entrada a los de salida. En este modelo todas las conexiones desde los puertos de entrada del mismo a los de salida se pueden realizar simultáneamente, ya que se ha considerado un crossbar.

4.2.2 Listado de servicios y salidas

La red de interconexión tiene como objetivo el transferir información, paquetes, de unos nodos a otros. Además, esta comunicación debe llevarse a cabo de una forma eficiente, ofreciendo unas ciertas prestaciones. Así, una red de interconexión debe proporcionar, por ejemplo, una baja latencia (es decir, que transcurra un periodo de tiempo reducido entre que se envía el paquete hasta que se recibe en su destino) y una alta productividad (que sea capaz de transportar gran cantidad de información entre los orígenes y los destinos por unidad de tiempo).

4.2.3 Selección de métricas

En el presente proyecto se ha usado la productividad como parámetro para caracterizar las prestaciones de una red de interconexión. La productividad es el máximo tráfico aceptado por la red. Suele expresarse como el número total de paquetes recibidos o como el número de paquetes recibidos por nodo y unidad de tiempo. El tráfico indica la cantidad de información que la red puede transmitir por unidad de tiempo. En la Figura 4.2 se muestra la curva típica de la productividad frente a la tasa de inyección. Como se puede observar la productividad varía dependiendo de la carga del sistema, por tanto, para obtener la productividad será necesario obtener el valor del tráfico aceptado bajo distintos niveles de carga. Si la tasa de inyección supera la productividad de la red, ésta se satura y la latencia se dispara.

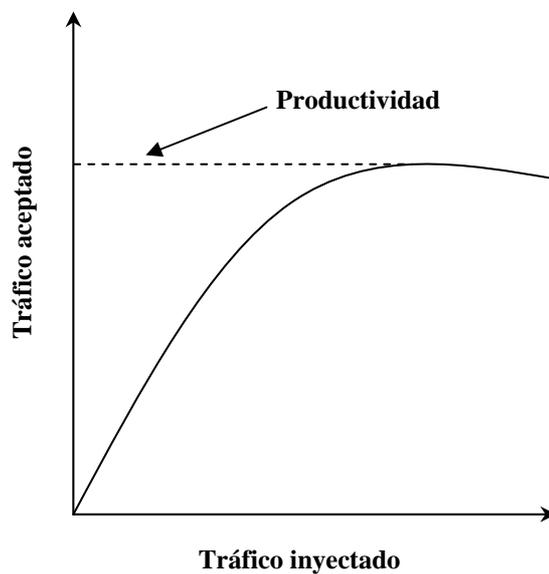


Figura 4.2. Curva típica de la productividad.

4.2.4 Listado de parámetros

Los parámetros que caracterizan los elementos de la red modelada son los que se explican brevemente a continuación. Entre paréntesis, y sólo para los factores considerados en el estudio, se indica el término que se usará en adelante para referenciarlos. Los tiempos se manejan en ciclos y la longitud de los paquetes en flits (donde 1 flit = 1 byte)

- **Tiempo de vuelo (TFLY):** Tiempo que tarda en llegar un flit desde un host al conmutador, o viceversa. Es el retardo de propagación del enlace.

- **Tiempo de enlace:** Indica la velocidad a la que se pueden inyectar flits en los enlaces. Determina el máximo tráfico que los enlaces de la red pueden aceptar.
- **Tamaño de red (TRED):** Número de conmutadores o nodos de que consta la red.
- **Topología:** Es el patrón de conexión entre los nodos, es decir, la forma en que están interconectados los distintos nodos que forman la red.
- **Algoritmo de encaminamiento (ALG):** Método para calcular la ruta que trazará un paquete desde el origen a su destino.
- **Organización del crossbar:** Es posible tener multiplexados tanto los canales virtuales de los puertos de entrada como los de salida. Existen por tanto 4 combinaciones posibles (entrada y salida sin multiplexar, entrada y salida multiplexadas, entrada multiplexada y salida sin multiplexar, y entrada sin multiplexar y salida multiplexada).
- **Acceso a la tabla de encaminamiento (TABLA):** Para implementar el algoritmo de encaminamiento es habitual tener una tabla de encaminamiento con un cierto número de puertos, que establecen los accesos simultáneos que se pueden hacer a la misma. Si no hay restricción respecto al número de accesos simultáneos, se dice que el acceso es paralelo. Este último se trata de un caso ideal, en el que cualquier acceso, en cualquier instante, se considera posible.
- **Bytes por cruce (BCROSS):** Son los bytes (flits) que son capaces de cruzar simultáneamente por una conexión realizada en el crossbar en un número de ciclos indicado por el tiempo de cruce.
- **Tiempo de cruce:** Es el tiempo que tarda en cruzar el crossbar el número de bytes indicado por el parámetro bytes por cruce.
- **Tiempo de encaminamiento (TROUT):** Es el tiempo que tarda en ejecutarse el algoritmo de encaminamiento, y por tanto el tiempo en determinar el canal de salida del paquete que está siendo encaminado.
- **Tiempo de arbitraje (TARB):** Es el tiempo que tarda en ejecutarse la política de arbitraje cuando hay un conflicto con los puertos de salida del crossbar.
- **Tamaño de las colas de entrada y salida (TAMCOLA):** Es el tamaño de los buffers de almacenamiento de cada canal virtual, tanto de entrada como de salida.

Los parámetros de carga, además de la tasa de inyección, son:

- **Longitud de los paquetes (LONGMEN):** Los paquetes o mensajes pueden tener diferentes longitudes, que se miden en flits.
- **Distribución de destinos (DDEST):** Este parámetro indica qué modelo se emplea para generar el host o nodo destino de cada paquete generado. En la sección 4.2.5 se muestran las distintas posibilidades existentes, así como las que se tendrán en cuenta para el estudio.

4.2.5 Selección de factores a estudiar

En la Tabla 4.1 se muestran los factores (parámetros) que se han seleccionado para el estudio, así como sus distintos niveles. Hay que señalar que para estudiar la componente lineal de un parámetro es necesario considerar dos valores, si se quiere estudiar la componente cuadrática se deberán tomar tres, cuatro si se quiere estudiar hasta la cúbica, y así sucesivamente. La decisión sobre la mayor componente a estudiar fija el número de valores de cada parámetro. Para los parámetros cuantitativos se han considerado tres niveles, pues conocer la componente cuadrática suele ser una aproximación bastante buena a la relación lineal parámetro de prestaciones-parámetro de diseño.

En la Tabla 4.1 se indica también si cada factor se considera de diseño o de ruido (D/R). Los factores de diseño son aquellos que deben decidirse cuando el elemento de la red se construye físicamente. Los factores de ruido son aquellos sobre los que no se tiene un control real y que dependen del funcionamiento del sistema. Sin embargo, estos parámetros deben también incluirse en el estudio y decidir sus valores (aunque no puedan fijarse en la realidad). Con esto se consigue una mayor generalidad en las conclusiones. Las características de la carga son claramente factores de ruido, y de ahí que así se hayan considerado tanto la distribución de los destinos de los paquetes como la longitud de los mismos. También se ha considerado un factor de ruido el tamaño de la red. Esta decisión está basada en el hecho de que la red suele estar diseñada para un número máximo de nodos, y es normal que se monten configuraciones con menor número de nodos. El diseño se plantea para que la red se comporte de forma adecuada independientemente del número de nodos.

También se indica en la Tabla 4.1 si los factores seleccionados se consideran cualitativos o cuantitativos (CL/CN). Algunos factores, como TABLA y DDEST, se han considerado cualitativos para una mayor simplicidad, aún teniendo cierta componente cuantitativa. Así, para el factor TABLA se tienen 3 posibles niveles, dos de ellos se

corresponden con un tipo de acceso a la tabla de encaminamiento que llamaremos secuencial, en un caso con un puerto y en el otro con cuatro puertos, mientras que la tercera opción es el acceso paralelo, que se puede interpretar como secuencial pero con un número de puertos ilimitado. En cuanto a DDEST se tiene un nivel que se corresponde con la distribución de destinos uniforme, que es claramente cualitativo, mientras que en los otros 2 niveles se considera un punto caliente y variará el porcentaje de paquetes que van dirigidos a dicho punto caliente (en un caso el 5% y en el otro el 15%). Decir que en el caso de la distribución de destinos uniforme, todos los destinos tienen una misma probabilidad de ser seleccionados para un paquete dado, mientras que para la *hot-spot* hay destinos (puntos calientes) que tienen mayor probabilidad que otros de ser elegidos.

La organización del crossbar, permanecerá fija con los canales virtuales de los puertos de entrada y salida multiplexados. Esta decisión está basada en los resultados del anterior estudio.

Los parámetros tiempo de enlace y tiempo de cruce no se variarán durante el estudio, fijándose a 12 ciclos. Se ha considerado la velocidad 1x de InfiniBand, es decir ancho de banda de 2,5 Gbs. Como la transmisión se produce con codificación 8/10 (10 bits para enviar un byte), la tasa de inyección en el enlace es de 1 byte cada 4 ns ($1/2,5 \text{ Gbs} * 10$). Se ha establecido la relación 1 ciclo = 0,33 ns, para tener siempre ciclos enteros incluso con cables 12x. De acuerdo con esto, se tiene un tiempo de 12 ciclos para el tiempo de enlace. Para que no haya cuellos de botella en la red se ha establecido también 12 ciclos para el tiempo de cruce por el crossbar interno. Por otra parte, se han considerado cables de unos 5 metros y 7 ns/m de retardo para ellos. Con esto se obtienen aproximadamente 100 ciclos para el tiempo de vuelo. Tiempo que también se ha considerado para el tiempo de arbitraje y de encaminamiento.

En cuanto a la topología, y a pesar de ser uno de los parámetros nuevos de este estudio con respecto al anterior, hay que decir que también se ha dejado fijo. La razón es doble: por un lado sólo se disponía de algoritmos de encaminamiento para redes toroidales, y por otro, todos los algoritmos considerados se comportan mejor para los toros que para las mallas, la otra topología que podía haber sido considerada en este estudio. En cualquier caso, no se descarta realizar nuevamente el estudio considerando más topologías cuando se disponga de los ficheros de rutas para ellas.

En cuanto a la longitud de los paquetes, los de 256 flits pueden considerarse paquetes de datos, mientras que los de 32 flits podrían ser de control. En cuanto a los paquetes de 190 flits son la longitud media si hubiera un 70% de paquetes largos y un 30% de paquetes cortos, que es una proporción habitualmente considerada en este tipo de estudios.

Finalmente, y por lo que se refiere al algoritmo de encaminamiento, indicar que se ha querido aprovechar este estudio para hacer una comparativa entre algunos de ellos. Es por esta razón que se ha escogido un número mayor de niveles. Los algoritmos son: up*/down* [Sch91] con un canal virtual (UD1CV), smart routing [Che95] con un canal virtual (SMART1CV), LASH-TOR [Ske04] con dos y tres canales virtuales (LASH2CV y LASH3CV) y TOR también con dos y tres canales virtuales (TOR2CV y TOR3CV). La idea era comparar algoritmos deterministas, y para dos casos comprobar el efecto de usar un canal virtual más.

Factor	Valores posibles	D/R	CN/CL
ALG	1, 2, 3, 4, 5, 6	D	CL
BCROSS	1, 2, 4	D	CN
DDEST	Uniforme 1 punto caliente y 5% 1 punto caliente y 15%	R	CL
LONGMEN	32, 190, 256	R	CN
TABLA	Secuencial con 1 puerto Secuencial con 4 puertos Paralelo	D	CL
TRED	16, 64, 128	R	CN
TAMCOLA	1, 4, 16 (paquetes)	D	CN
TARB	100, 300, 500	D	CN
TFLY	100, 300, 500	D	CN
TROUT	100, 300, 500	D	CN

Tabla 4.1. Factores y sus niveles.

4.2.6 Selección de la técnica de evaluación

Como ya se ha dicho anteriormente, para evaluar las prestaciones de un sistema se pueden emplear varios métodos, entre los que cabe destacar los siguientes:

- **Mediciones reales.** Esta técnica resulta inviable en nuestro caso, ya que para realizar las mediciones reales, requeriría variar características estructurales del sistema incluyendo el conmutador. Para poder abordar esta técnica se necesitaría abundantes recursos hardware y poder modificar su comportamiento.
- **Modelos analíticos.** Proporcionan la alternativa más económica y rápida. Sin embargo, estas herramientas aumentan su complejidad conforme se requiere mayor detalle del modelo analizado. El aumento de complejidad conlleva a simplificar el sistema, perdiendo así precisión. Esta técnica resulta inapropiada dada la gran cantidad de parámetros a estudiar.
- **Simulaciones.** Un simulador puede modelar el comportamiento de un sistema con todo el nivel de detalle requerido, además, como es parametrizable, no es necesario realizar cambios estructurales. La potencia de un simulador puede estar limitada por el tiempo de ejecución requerido para obtener los resultados. Aún así, se ha escogido esta vía, dado que se dispone de la herramienta adecuada, y puesto que para este tipo de estudios proporciona más precisión.

4.2.7 Selección de la carga de trabajo

El simulador requiere que se le introduzca una carga de trabajo para poder obtener resultados. En los simuladores (en particular, de redes de interconexión) se pueden emplear diferentes aproximaciones para proporcionar dicha carga:

- **Trazas.** Se obtienen a partir de los paquetes obtenidos de ejecuciones de aplicaciones sobre sistemas reales. Se inyectan al simulador con el fin de emular el tráfico real. Esta aproximación tiene el inconveniente de que el tráfico registrado por la traza es muy dependiente del sistema en el que fue obtenida.
- **Carga real de aplicaciones.** Esta aproximación se basa en modelar la ejecución de una aplicación real sobre el sistema simulado. Esta opción es bastante compleja, ya que se requiere modelar no solo el sistema a estudiar, sino varias capas por encima de éste para poder generar el tráfico.
- **Carga sintética.** El tiempo que tarda un host en generar un paquete, su tamaño, y su destino son generados siguiendo una distribución estadística. La carga sintética tiene la ventaja de tener una mayor independencia frente a las trazas, pero sin embargo pueden no ajustarse a la carga real de un sistema en funcionamiento. Para este estudio, como se ha indicado anteriormente, se han considerado dos tipos de distribuciones: uniforme y hot-spot.

4.2.8 Diseño de experimentos

Dado el número de factores y niveles que se han tenido en cuenta (Tabla 4.1), un diseño totalmente factorial nos llevaría a un número de pruebas, n , muy elevado, según se obtiene al aplicar la ecuación 3.2:

$$n = 6 \times 3 = 118.098 \text{ simulaciones}$$

De acuerdo con esto, se hace imprescindible la utilización de las *fracciones factoriales*.

Las fracciones factoriales más reducidas suelen permitir el estudio de unas pocas interacciones en los casos más favorables, por lo que conocer las interacciones dobles existentes se convierte en una prioridad (antes de lanzarse a escoger un diseño sencillo y con pocas pruebas, que muy posiblemente será inútil). Para ello se ha realizado un diseño previo que permita determinar la existencia de interacciones dobles. En este diseño se utilizan solamente dos valores por cada parámetro (es un diseño 2^k). En este diseño se asegura el poder estudiar todas las interacciones dobles entre todos los parámetros de diseño del conmutador. Una vez hecho esto, es cuando se puede pasar a proponer un diseño que con el mínimo número de pruebas permita estudiar aquellos parámetros de diseño e interacciones que se deseen.

4.2.8.1 Diseño previo

Para el diseño previo se han empleado dos niveles para cada factor introducido en el mismo, escogiéndose los 2 niveles extremos de entre los indicados en la Tabla 4.1, excepto para el parámetro ALG para el cual se han seleccionado todos los niveles, y el parámetro TAMCOLA para el que se han utilizado los niveles intermedio y más alto. Los parámetros, así como los valores de sus niveles aparecen reflejados en la Tabla 4.2.

En este análisis previo se necesita determinar si existen interacciones triples que podrían resultar relevantes para explicar la productividad. Dados los factores de diseño y ruido se pensó que podría existir más de una interacción triple relevante. Por ese motivo se propuso una fracción factorial modificada $2^{(9-1)} * 6 = 1536$ (esto es, 9 factores a dos niveles y un décimo a 6, el algoritmo de encaminamiento).

Factor	Valor "1"	Valor "2"
ALG	1, 2, 3, 4, 5, 6	
BCROSS	1	4
DDEST	Uniforme	1 punto caliente y 15%
LONGMEN	32	256
TABLA	Secuencial con 1 puerto	Paralelo
TRED	16	128
TAMCOLA	4 paquetes	16 paquetes
TARB	100	500
TFLY	100	500
TROUT	100	500

Tabla 4.2. Factores y niveles para el diseño previo.

Una vez determinadas las pruebas a realizar indicando para cada una de ellas el valor de los distintos parámetros, se han realizado las pertinentes simulaciones, obteniéndose la productividad para cada combinación. Con los datos obtenidos se ha elaborado la tabla de ANOVA (Tabla 4.3). Con ella se determinan los factores e interacciones que resultan ser significativos. Todos aquellos efectos simples e interacciones cuyo P-Value sea menor a un 5% son significativos, es decir, explican la productividad.

Habría que destacar que para admitir la normalidad de los residuos, indispensable para aceptar como válida la prueba ANOVA, ha sido necesario trabajar con el logaritmo de la productividad. Esto es algo habitual cuando la variable tiene un cero natural y los resultados son próximos a ese cero.

Analysis of Variance for LOG(PRODUCTIVIDAD) - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:TROUT	1,22398	1	1,22398	272,68	0,0000
B:TARB	7,18212	1	7,18212	1600,03	0,0000
C:TFLY	0,0256709	1	0,0256709	5,72	0,0168
D:BCROSS	43,1477	1	43,1477	9612,41	0,0000
E:TABLA	1,05124	1	1,05124	234,20	0,0000

F:LONGMEN	284,108	1	284,108	63293,41	0,0000
G:DDEST	639,227	1	639,227	142406,60	0,0000
H:TRED	939,051	1	939,051	209201,05	0,0000
I:TAMCOLA	1,91198	1	1,91198	425,95	0,0000
J:ALG	39,7915	5	7,95829	1772,94	0,0000

INTERACTIONS

AB	0,194193	1	0,194193	43,26	0,0000
AC	0,0000836089	1	0,0000836089	0,02	0,8914
AD	0,437299	1	0,437299	97,42	0,0000
AE	1,04199	1	1,04199	232,13	0,0000
AF	1,11889	1	1,11889	249,27	0,0000
AG	1,00693	1	1,00693	224,32	0,0000
AH	0,0118254	1	0,0118254	2,63	0,1046
AI	0,00804976	1	0,00804976	1,79	0,1805
AJ	0,00850954	5	0,00170191	0,38	0,8633
BC	0,00676318	1	0,00676318	1,51	0,2196
BD	0,51591	1	0,51591	114,93	0,0000
BE	0,148014	1	0,148014	32,97	0,0000
BF	3,06847	1	3,06847	683,59	0,0000
BG	0,00405949	1	0,00405949	0,90	0,3416
BH	0,0529431	1	0,0529431	11,79	0,0006
BI	0,00033294	1	0,00033294	0,07	0,7854
BJ	0,0336087	5	0,00672174	1,50	0,1878
CD	0,00237495	1	0,00237495	0,53	0,4670
CE	0,00330271	1	0,00330271	0,74	0,3910
CF	0,00528887	1	0,00528887	1,18	0,2777
CG	0,0112501	1	0,0112501	2,51	0,1134
CH	0,00519507	1	0,00519507	1,16	0,2820
CI	0,00282408	1	0,00282408	0,63	0,4277
CJ	0,00886201	5	0,0017724	0,39	0,8526
DE	0,435482	1	0,435482	97,02	0,0000
DF	4,72458	1	4,72458	1052,54	0,0000
DG	0,00195786	1	0,00195786	0,44	0,5090
DH	0,00936256	1	0,00936256	2,09	0,1487
DI	0,0460585	1	0,0460585	10,26	0,0014
DJ	0,0627236	5	0,0125447	2,79	0,0162
EF	1,0062	1	1,0062	224,16	0,0000
EG	0,853235	1	0,853235	190,08	0,0000
EH	0,0490927	1	0,0490927	10,94	0,0009
EI	0,0104746	1	0,0104746	2,33	0,1266
EJ	0,0305306	5	0,00610612	1,36	0,2367
FG	2,42969	1	2,42969	541,28	0,0000
FH	0,185533	1	0,185533	41,33	0,0000
FI	0,0136321	1	0,0136321	3,04	0,0814
FJ	0,0985	5	0,0197	4,39	0,0006
GH	45,9407	1	45,9407	10234,63	0,0000
GI	2,04941	1	2,04941	456,57	0,0000
GJ	36,4946	5	7,29893	1626,05	0,0000
HI	0,464709	1	0,464709	103,53	0,0000
HJ	18,3777	5	3,67555	818,84	0,0000
IJ	0,232614	5	0,0465228	10,36	0,0000
ABC	0,0000989768	1	0,0000989768	0,02	0,8819
ABD	0,0161069	1	0,0161069	3,59	0,0582
ABE	0,103431	1	0,103431	23,04	0,0000
ABF	0,182307	1	0,182307	40,61	0,0000
ABG	0,0807696	1	0,0807696	17,99	0,0000
ABH	0,00000216406	1	0,00000216406	0,00	0,9825
ABI	0,00000168553	1	0,00000168553	0,00	0,9845
ABJ	0,00756885	5	0,00151377	0,34	0,8905
ACD	0,00124246	1	0,00124246	0,28	0,5988
ACE	0,00343556	1	0,00343556	0,77	0,3817
ACF	0,00141583	1	0,00141583	0,32	0,5744
ACG	0,00164873	1	0,00164873	0,37	0,5445
ACH	0,0000740454	1	0,0000740454	0,02	0,8978
ACI	0,001409	1	0,001409	0,31	0,5753
ACJ	0,003431	5	0,000686199	0,15	0,9792
ADE	0,403116	1	0,403116	89,81	0,0000
ADF	0,431898	1	0,431898	96,22	0,0000
ADG	0,394654	1	0,394654	87,92	0,0000
ADH	0,000864534	1	0,000864534	0,19	0,6608
ADI	0,000124857	1	0,000124857	0,03	0,8675
ADJ	0,00676551	5	0,0013531	0,30	0,9121
AEF	1,09563	1	1,09563	244,08	0,0000
AEG	0,908333	1	0,908333	202,36	0,0000
AEH	0,0332126	1	0,0332126	7,40	0,0065
AEI	0,0180909	1	0,0180909	4,03	0,0447

AEJ	0,0112794	5	0,00225588	0,50	0,7745
AFG	1,0036	1	1,0036	223,58	0,0000
AFH	0,0255651	1	0,0255651	5,70	0,0170
AFI	0,00488236	1	0,00488236	1,09	0,2970
AFJ	0,0139259	5	0,00278517	0,62	0,6842
AGH	0,00983378	1	0,00983378	2,19	0,1388
AGI	0,0035596	1	0,0035596	0,79	0,3732
AGJ	0,0217172	5	0,00434345	0,97	0,4364
AHI	0,000113554	1	0,000113554	0,03	0,8736
AHJ	0,00278983	5	0,000557966	0,12	0,9870
AIJ	0,00527449	5	0,0010549	0,24	0,9472
BCD	0,00318124	1	0,00318124	0,71	0,3999
BCE	0,00257624	1	0,00257624	0,57	0,4487
BCF	0,0017758	1	0,0017758	0,40	0,5294
BCG	0,000538363	1	0,000538363	0,12	0,7291
BCH	0,0062058	1	0,0062058	1,38	0,2397
BCI	0,00262615	1	0,00262615	0,59	0,4443
BCJ	0,000654832	5	0,000130966	0,03	0,9996
BDE	0,00270486	1	0,00270486	0,60	0,4376
BDF	0,00865	1	0,00865	1,93	0,1651
BDG	0,10309	1	0,10309	22,97	0,0000
BDH	0,0295717	1	0,0295717	6,59	0,0103
BDI	0,00116773	1	0,00116773	0,26	0,6100
BDJ	0,0145015	5	0,00290029	0,65	0,6645
BEF	0,143984	1	0,143984	32,08	0,0000
BEG	0,064357	1	0,064357	14,34	0,0002
BEH	0,00112538	1	0,00112538	0,25	0,6166
BEI	0,000432781	1	0,000432781	0,10	0,7562
BEJ	0,00549895	5	0,00109979	0,25	0,9424
BFG	0,0186429	1	0,0186429	4,15	0,0416
BFH	0,0731128	1	0,0731128	16,29	0,0001
BFI	0,00157024	1	0,00157024	0,35	0,5542
BFJ	0,0424184	5	0,00848367	1,89	0,0933
BGH	0,0532783	1	0,0532783	11,87	0,0006
BGI	0,0158576	1	0,0158576	3,53	0,0602
BGJ	0,0329349	5	0,00658697	1,47	0,1977
BHI	0,0032334	1	0,0032334	0,72	0,3960
BHJ	0,0134863	5	0,00269726	0,60	0,6993
BIJ	0,0114838	5	0,00229676	0,51	0,7676
CDE	0,00250101	1	0,00250101	0,56	0,4554
CDF	0,00207867	1	0,00207867	0,46	0,4962
CDG	0,00233713	1	0,00233713	0,52	0,4706
CDH	0,00186339	1	0,00186339	0,42	0,5194
CDI	0,000495439	1	0,000495439	0,11	0,7397
CDJ	0,00615169	5	0,00123034	0,27	0,9274
CEF	0,00126626	1	0,00126626	0,28	0,5953
CEG	0,00460318	1	0,00460318	1,03	0,3112
CEH	0,00129535	1	0,00129535	0,29	0,5911
CEI	0,00207975	1	0,00207975	0,46	0,4961
CEJ	0,00385972	5	0,000771943	0,17	0,9730
CFG	0,00466536	1	0,00466536	1,04	0,3080
CFH	0,00683791	1	0,00683791	1,52	0,2171
CFI	0,00279849	1	0,00279849	0,62	0,4298
CFJ	0,00290991	5	0,000581983	0,13	0,9857
CGH	0,00280323	1	0,00280323	0,62	0,4294
CGI	0,00958922	1	0,00958922	2,14	0,1438
CGJ	0,00103638	5	0,000207275	0,05	0,9987
CHI	0,00823356	1	0,00823356	1,83	0,1756
CHJ	0,0051098	5	0,00102196	0,23	0,9506
CIJ	0,00495979	5	0,000991959	0,22	0,9536
DEF	0,485544	1	0,485544	108,17	0,0000
DEG	0,265351	1	0,265351	59,11	0,0000
DEH	0,00113421	1	0,00113421	0,25	0,6152
DEI	0,000513486	1	0,000513486	0,11	0,7352
DEJ	0,00131374	5	0,000262748	0,06	0,9978
DFG	1,58763	1	1,58763	353,69	0,0000
DFH	0,0350111	1	0,0350111	7,80	0,0052
DFI	0,0355411	1	0,0355411	7,92	0,0049
DFJ	0,109454	5	0,0218907	4,88	0,0002
DGH	0,000538149	1	0,000538149	0,12	0,7292
DGI	0,00511706	1	0,00511706	1,14	0,2857
DGJ	0,0274551	5	0,00549103	1,22	0,2958
DHI	0,00655422	1	0,00655422	1,46	0,2269
DHJ	0,0324743	5	0,00649485	1,45	0,2047
DIJ	0,0165128	5	0,00330256	0,74	0,5967
EFG	0,941686	1	0,941686	209,79	0,0000
EFH	0,0217536	1	0,0217536	4,85	0,0277

EFI	0,0074165	1	0,0074165	1,65	0,1987
EFJ	0,0181157	5	0,00362313	0,81	0,5445
EGH	0,0154148	1	0,0154148	3,43	0,0639
EGI	0,0173028	1	0,0173028	3,85	0,0496
EGJ	0,0303598	5	0,00607197	1,35	0,2397
EHI	0,00815927	1	0,00815927	1,82	0,1776
EHJ	0,00324777	5	0,000649555	0,14	0,9816
EIJ	0,00682045	5	0,00136409	0,30	0,9107
FGH	0,0270946	1	0,0270946	6,04	0,0140
FGI	0,00739431	1	0,00739431	1,65	0,1993
FGJ	0,0319706	5	0,00639412	1,42	0,2126
FHI	0,00475473	1	0,00475473	1,06	0,3034
FHJ	0,0531708	5	0,0106342	2,37	0,0376
FIJ	0,00495267	5	0,000990533	0,22	0,9537
GHI	0,660664	1	0,660664	147,18	0,0000
GHJ	16,327	5	3,2654	727,46	0,0000
GIJ	0,177084	5	0,0354168	7,89	0,0000
HIJ	0,282864	5	0,0565728	12,60	0,0000
RESIDUAL	5,27877	1176	0,00448875		

TOTAL (CORRECTED)	2110,0	1535			

Tabla 4.3. Estudio del ANOVA para el diseño previo.

Hay que resaltar que hay muchos factores e interacciones significativas, pero sólo unas pocas pueden considerarse relevantes (Tabla 4.4), las que tienen un valor elevado del F-Ratio. El F-Ratio es el cociente entre la variabilidad de cada factor (CM) y la variabilidad residual. Cuanto mayor es el cociente, mayor es la importancia del efecto, y hay ciertos valores que son considerablemente mayores que otros.

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
TRED	939,051	1	939,051	209201,05	0,0000
DDEST	639,227	1	639,227	142406,60	0,0000
LONGMEN	284,108	1	284,108	63293,41	0,0000
DDEST*TRED	45,9407	1	45,9407	10234,63	0,0000
BCROSS	43,1477	1	43,1477	9612,41	0,0000
ALG	39,7915	5	7,95829	1772,94	0,0000
DDEST*ALG	36,4946	5	7,29893	1626,05	0,0000
TARB	7,18212	1	7,18212	1600,03	0,0000
BCROSS*LONGMEN	4,72458	1	4,72458	1052,54	0,0000
TRED*ALG	18,3777	5	3,67555	818,84	0,0000
RESIDUAL	5,27877	1176	0,004488		
TOTAL	2110,0	1535			

Tabla 4.4. Factores relevantes del estudio del ANOVA para el diseño previo.

Los factores e interacciones dobles están ordenados según su importancia para explicar la productividad, siendo la primera la más importante. Hay que destacar que los

factores segundo y tercero son los de ruido, los elegidos para introducir variabilidad en el estudio de la productividad. Luego vienen los factores de diseño y algunas interacciones dobles, efectos conjuntos de los factores.

Con este análisis se puede ver que los factores relevantes son TRED, DDEST, LONGMEN, BCROSS, ALG y TARB. Sólo estos factores formarán parte del modelo final. El resto de los factores de diseño explican la productividad, pero su aportación es tan pequeña que pueden despreciarse en el análisis final. También se concluye que las interacciones triples entre los factores existen, pero su importancia es muy pequeña comparada con los efectos simples y algunas interacciones dobles. La más importante de las interacciones triples es TRED*DDEST*ALG, por lo que los algoritmos se comportan de forma diferente según la distribución de destinos y el tamaño de la red; si bien las diferencias son apreciables, son poco importantes.

Lo relevante del diseño previo es conocer los factores e interacciones más relevantes. Sin embargo, los resultados, aún siendo correctos estadísticamente, deben ser examinados para comprobar si son correctos desde el punto de vista del comportamiento de la red. Con este propósito se han elaborado las gráficas basadas en intervalos LSD. En ellas, incluidas a continuación, se observan unos comportamientos razonables y que permiten continuar el estudio.

Así, se obtiene mayor productividad para redes pequeñas que para redes grandes (Fig. 4.3). Con una distribución de destinos uniforme se obtiene mayor productividad que con una distribución que no balancea la carga como es la hot-spot (Fig. 4.4). Para paquetes cortos la productividad es menor que para paquetes largos (Fig. 4.5), y también es menor cuando se pueden cruzar menos bytes por el crossbar que cuando se permite cruzar a más (Fig. 4.6). Cuando los tiempos de arbitraje en el crossbar son pequeños se alcanza una mayor productividad (Fig. 4.7), y claramente, para los algoritmos evaluados, aquellos que usan dos y tres canales virtuales permiten obtener mayor productividad que los que usan sólo uno (Fig. 4.8).

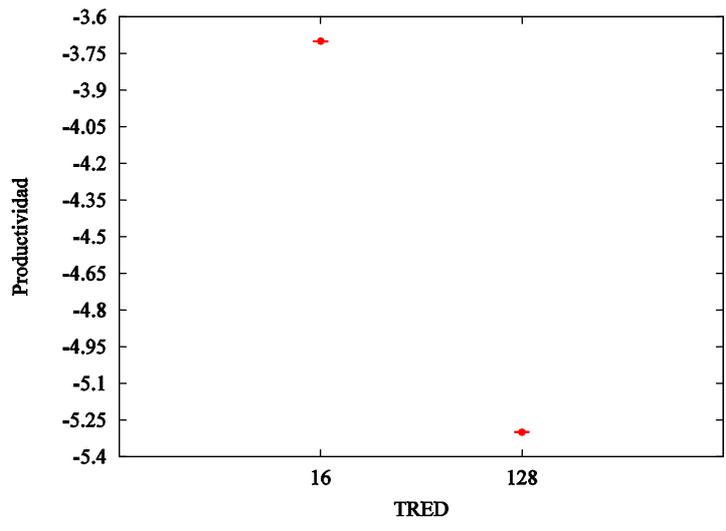


Figura 4.3. Efecto simple del tamaño de la red.

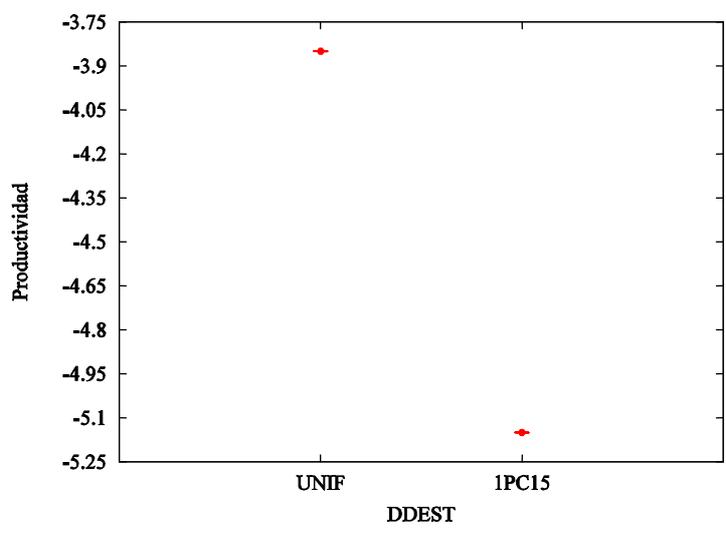


Figura 4.4. Efecto simple de la distribución de destinos.

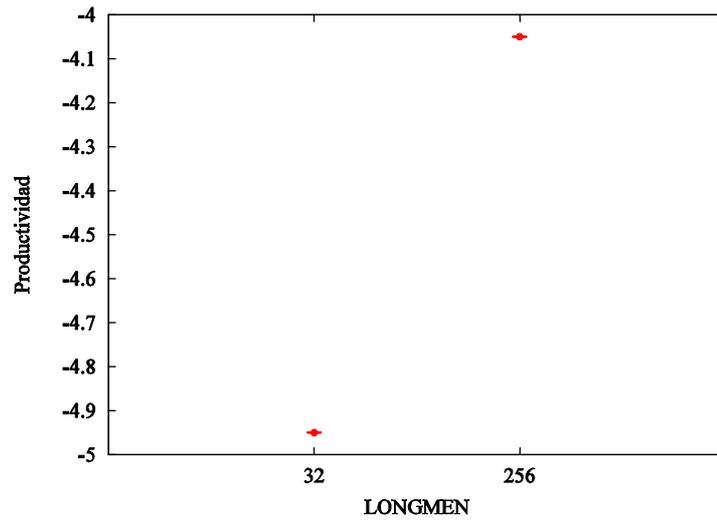


Figura 4.5. Efecto simple de la longitud de los paquetes.

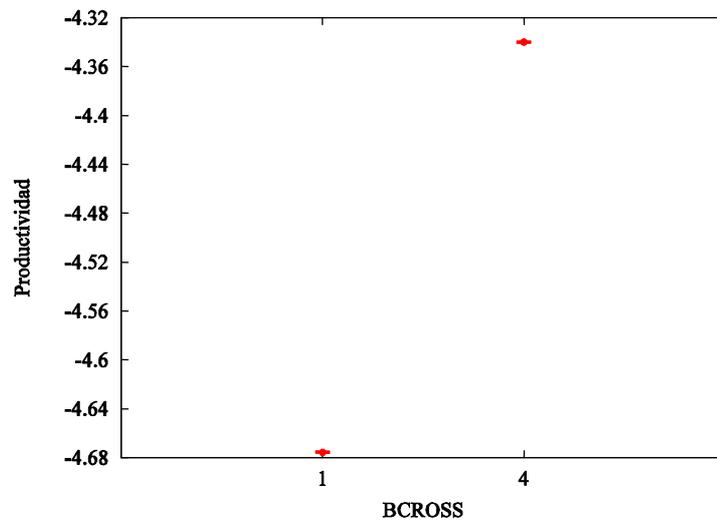


Figura 4.6. Efecto simple de los bytes por cruce.

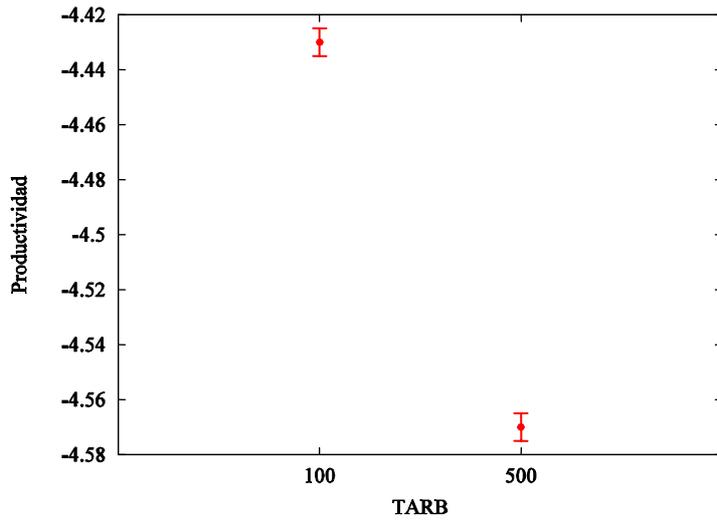


Figura 4.7. Efecto simple del tiempo de arbitraje.

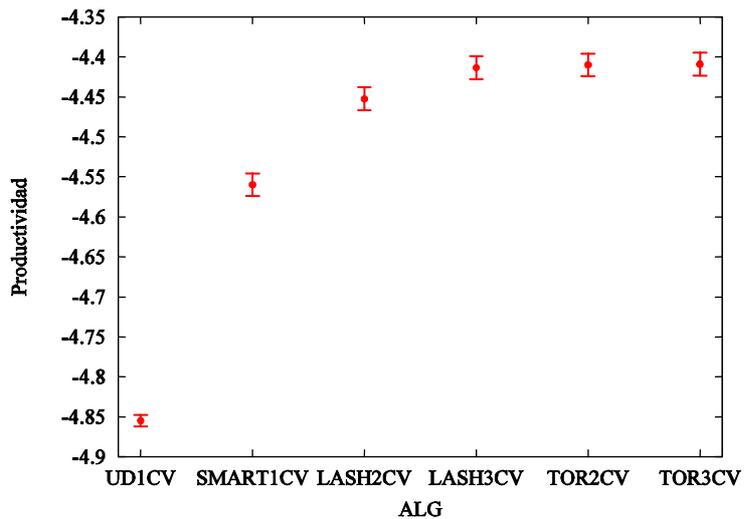


Figura 4.8. Efecto simple del algoritmo de encaminamiento.

En cuanto a las interacciones:

- La productividad disminuye mucho más en una red grande que en una pequeña cuando se utiliza un hot-spot en vez de una distribución uniforme (Fig. 4.9).

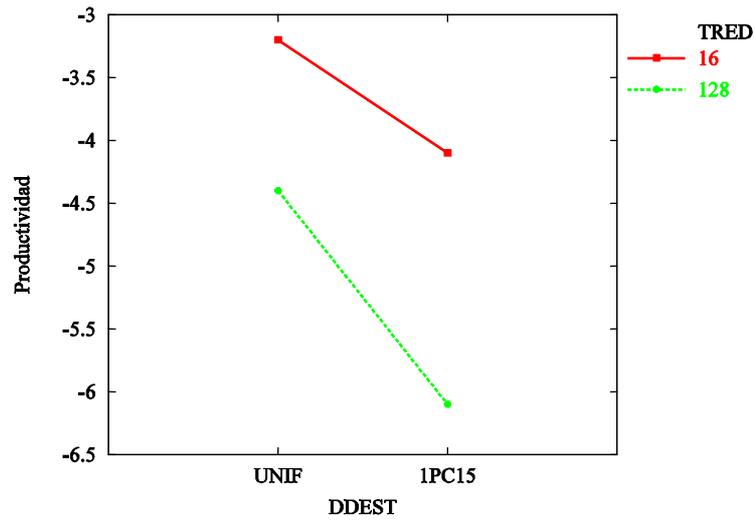


Figura 4.9. Interacción DDEST:TRED.

- La productividad de los algoritmos es similar cuando se utiliza un hot-spot, mientras que si se utiliza una distribución uniforme la productividad es mayor en general pero mucho menor para el algoritmo de encaminamiento up*/down* y algo menor para Smart, y alta y similar en el resto (Fig. 4.10).

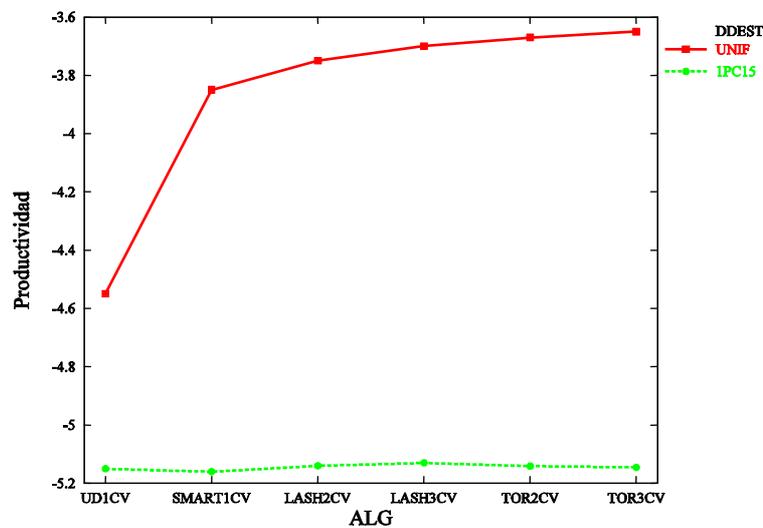


Figura 4.10. Interacción ALG:DDEST.

- El aumento de la productividad al aumentar los bytes por cruce es más importante con los paquetes cortos que con los largos. O el aumento de la productividad al utilizar paquetes largos es mayor cuando hay pocos bytes por cruce (Fig. 4.11).

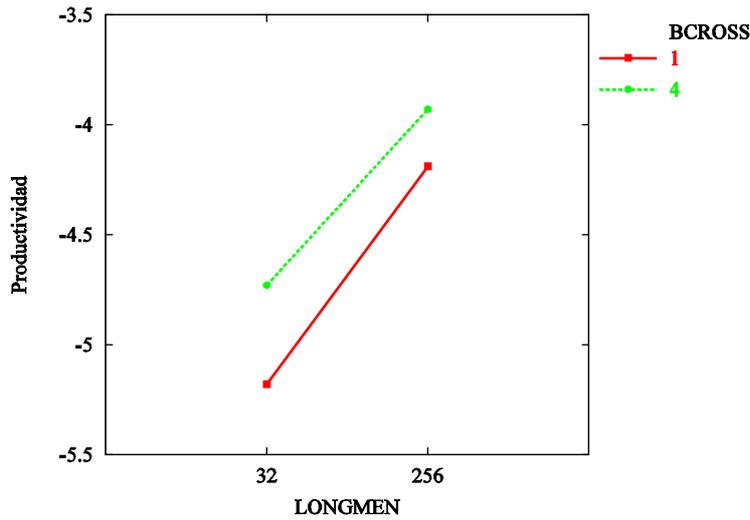


Figura 4.11. Interacción LONGMEN:BCROSS.

- La productividad de los algoritmos es mayor en redes pequeñas que en grandes, y los de peor comportamiento en redes grandes (menor productividad) son up*/down* y el Smart (Fig. 4.12).

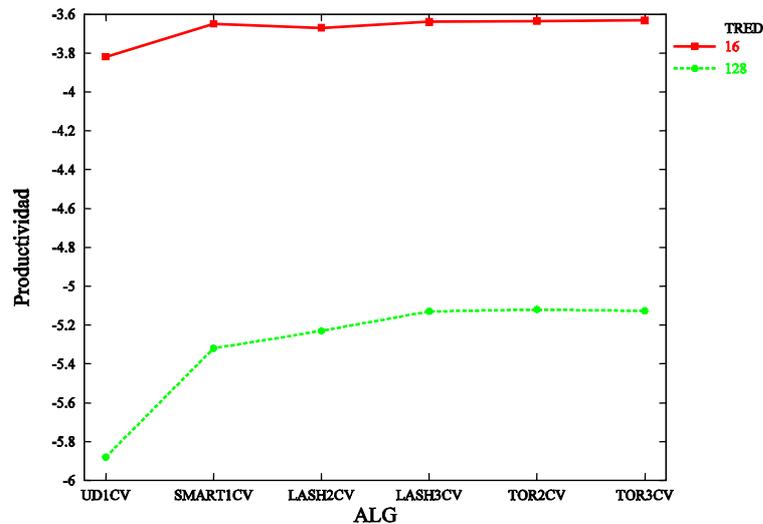


Figura 4.12. Interacción ALG:TRED.

4.2.8.2 Diseño final

Con la información obtenida en el diseño previo se está en condiciones de proponer un diseño para estudiar finalmente los parámetros de prestaciones en función de los parámetros de diseño y ruido.

Los factores finalmente seleccionados vienen reflejados en la Tabla 4.5. Los resultados y análisis del diseño definitivo se dejan para el Capítulo 5.

Factor	Valor “1”	Valor “2”	Valor “3”
ALG	1, 2, 3, 4, 5, 6		
BCROSS	1	2	4
DDEST	Uniforme	1 punto caliente y 5%	1 punto caliente y 15%
LONGMEN	32	190	256
TRED	16	64	128
TARB	100	300	500

Tabla 4.5. Factores y niveles del diseño final.

Dado que sólo hay 6 factores influyentes en el análisis final y que el número de simulaciones resultantes (1458) se pueden terminar en un tiempo razonable, se decide realizar un *diseño completo*, en el que cada nivel de cada factor se cruza con el resto de los niveles de los factores. Realizar una fracción factorial tendría sentido si hubiese muchos factores significativos importantes y no es el caso. Además, al realizar el diseño completo se pueden estudiar más interacciones dobles y triples, que no siendo muy relevantes, sí pueden “dar juego” en la explicación de lo que ocurre con los algoritmos y las diferencias que hay entre ellos.

Antes de concluir este capítulo y pasar a comentar los resultados del diseño final, es interesante destacar algunos resultados en comparación con los que se obtuvieron en el trabajo anterior en el que se basa el que aquí se está presentando. Los hechos más significativos son, por un lado, que hay un par de parámetros que en aquel estudio fueron considerados significativos y ahora no lo son tanto. Es el caso del tiempo de vuelo y del número de operaciones de encaminamiento simultáneas (o número de puertos de acceso a la tabla de encaminamiento). Por otra parte, el hecho de que el resto de parámetros mantiene un comportamiento parecido. En cualquier caso, esto se debe acabar de confirmar con el diseño final.

CAPÍTULO 5

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS FINALES

En este capítulo se incluyen los resultados obtenidos a partir del diseño final. Antes de mostrar estos resultados, se incluye una sección en la que se describen las características de la herramienta de simulación utilizada. Hay que recordar que todas las pruebas, las cuales han sido muy numerosas, se han llevado a cabo mediante simulación y de ahí que nos parezca obligado al menos indicar dichas características.

5.1 CARACTERÍSTICAS DEL SIMULADOR

El simulador que se ha utilizado en este proyecto modela una red de interconexión de acuerdo con las características básicas de InfiniBand, aunque con pocos cambios podría ser adaptado a otras tecnologías de interconexión. La red puede ser configurada mediante el ajuste de una serie de parámetros. A continuación se describen estos parámetros y se indican los diversos tipos de resultados que ofrece.

5.1.1 Parámetros de entrada al simulador

Los parámetros de entrada tienen que ver con el diseño de la topología y de la red, la carga de la red y aspectos específicos del simulador. A continuación se describen todos estos parámetros.

- **Parámetros de diseño de la topología:** Detallan la estructura de la red en cuanto a los nodos, su interconexión y cómo se deben mover los paquetes entre ellos. En concreto, se pueden distinguir:
 - **Definición de la topología.** El simulador trabaja con cualquier topología definida a partir de un fichero de configuración. En dicho fichero se incluye información para indicar el número de nodos, así como los enlaces entre los nodos, o número de canales virtuales.
 - **Algoritmo de encaminamiento.** La información relativa a las rutas permitidas también es proporcionada al simulador a través de un fichero. El fichero se crea a partir de programas externos que calculan las rutas en función del mismo fichero de topología que se va a usar para la simulación y del algoritmo de encaminamiento empleado.

- **Parámetros de diseño de la red:** En este grupo podemos distinguir los parámetros más importantes de los elementos que forman la red. En concreto, se incluyen aquí los parámetros de los nodos y del propio canal de interconexión:
 - **Nodo.** Los parámetros principales para estos elementos son los retardos (tiempo de encaminamiento, de transferencia a través del crossbar interno y de arbitraje de las salidas del crossbar), velocidad del crossbar, número de puertos de acceso a la tabla de encaminamiento y los tamaños de los buffers de entrada y salida.
 - **Canal.** Sus parámetros más importantes son el tiempo de vuelo de los enlaces (número de ciclos que tarda un flit desde que sale de un puerto hasta que llega al puerto vecino) y el tiempo por flit (indica la velocidad con que se introduce un flit en el canal) que es la inversa de la tasa de transferencia por el canal.

Con respecto a los tiempos hay que indicar que todos ellos se miden en ciclos, y que conocidas las características concretas de la red simulada se puede obtener su equivalente en segundos.

- **Parámetros que definen la carga de la red:** Para definir la carga existen los siguientes parámetros:
 - Distribución de destinos de los paquetes. El simulador tiene varias posibilidades en este sentido: uniforme, uniforme con radio de localidad, bit-reversal, hot-spot, etc).
 - Longitud de los paquetes. El simulador permite que coexistan paquetes cortos y largos en la red.
 - Tasa de generación de paquetes. Es el tiempo medio entre envío de paquetes, estando estos envíos uniformemente distribuidos entre dos valores introducidos al simulador.
- **Parámetros específicos del simulador:** El parámetro de este tipo más importante es el número de paquetes durante la simulación. Se trata de la cantidad total de paquetes que han llegado a su destino, y que marca el final de la simulación. Hay que indicar que en realidad son dos cantidades de paquetes distintas las que hay que especificar al simulador: una de ellas se refiere a la cantidad de paquetes que determinan el período transitorio (que sirve exclusivamente para dejar a la red en un estado estacionario) y la otra la que se usa para fijar el período estacionario (durante el cual se tomarán medidas fiables de los índices de prestaciones).

5.1.2 Resultados ofrecidos por el simulador

Algunos de los resultados más importantes ofrecidos por el simulador son:

- Número de ciclos simulados.
- Número de paquetes recibidos y pendientes de envío.
- Latencia media de la cabecera de los paquetes y su desviación típica.
- Latencia media total de los paquetes y su desviación típica.
- Latencia media desde la generación de los paquetes y su desviación típica.
- Distribución del número de paquetes enviados en función de la distancia recorrida.
- Número de paquetes locales inyectados en la red y número de paquetes locales pendientes de inyección en la red por cada nodo.

5.1.3 Índices de prestaciones

La latencia y la productividad son las medidas de prestaciones más importantes de este tipo de redes de interconexión. La latencia es el tiempo requerido para entregar un paquete en el host destino y es medida en *ciclos*. La productividad es la máxima cantidad de información entregada por unidad de tiempo, se mide en *flits/nodo/ciclo*. El tráfico es la tasa de generación de flits. Una vez la red alcanza un estado estacionario, la tasa de generación de flits coincide con la tasa de recepción, a no ser que la red se sature. Por eso, el tráfico no es una variable independiente. En el caso de saturación de la red, ambas tasas difieren y el número de paquetes pendientes de envío crece.

En este proyecto se ha utilizado, como ya se ha venido indicando, la productividad como índice de prestaciones para evaluar el efecto de los parámetros de diseño.

5.3 RESULTADOS

Una vez completadas todas las simulaciones (1458) se pasa a analizar los resultados mediante una tabla ANOVA, cuyos datos se incluyen en la Tabla 5.1. En la prueba se ha tenido en cuenta el efecto simple de cada factor, así como las interacciones dobles y triples. Pueden considerarse interacciones de orden superior, pero lo más seguro es que no sean significativas, o si lo son, que no sean relevantes para explicar la productividad.

Como se describió en el estudio previo, todos aquellos efectos simples e interacciones cuyo P-Value sea menor a un 5% son significativos, es decir, explican la productividad.

Analysis of Variance for LOG(PRODUCTIVIDAD) - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:TARB	4,30701	2	2,15351	670,07	0,0000
B:BCROSS	31,3446	2	15,6723	4876,50	0,0000
C:LONGMEN	214,728	2	107,364	33406,66	0,0000
D:DDEST	416,729	2	208,365	64833,50	0,0000
E:TRED	696,289	2	348,144	108326,53	0,0000
F:ALG	20,4327	5	4,08654	1271,54	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,304863	4	0,0762159	23,71	0,0000
AC	4,84053	4	1,21013	376,54	0,0000
AD	0,0646782	4	0,0161695	5,03	0,0005
AE	0,0186841	4	0,00467104	1,45	0,2143
AF	0,0487137	10	0,00487137	1,52	0,1282
BC	3,85758	4	0,964396	300,08	0,0000
BD	0,759867	4	0,189967	59,11	0,0000
BE	0,119934	4	0,0299835	9,33	0,0000
BF	0,061075	10	0,0061075	1,90	0,0415
CD	0,950418	4	0,237605	73,93	0,0000
CE	0,484933	4	0,121233	37,72	0,0000
CF	0,160896	10	0,0160896	5,01	0,0000
DE	15,3464	4	3,83661	1193,78	0,0000
DF	23,9478	10	2,39478	745,15	0,0000
EF	7,39079	10	0,739079	229,97	0,0000
ABC	0,261014	8	0,0326268	10,15	0,0000
ABD	0,0246294	8	0,00307867	0,96	0,4676
ABE	0,0206856	8	0,0025857	0,80	0,5986
ABF	0,0681598	20	0,00340799	1,06	0,3868
ACD	0,0514009	8	0,00642511	2,00	0,0435
ACE	0,0545886	8	0,00682358	2,12	0,0312
ACF	0,0340996	20	0,00170498	0,53	0,9549
ADE	0,0412252	8	0,00515315	1,60	0,1194
ADF	0,059082	20	0,0029541	0,92	0,5624
AEF	0,0647134	20	0,00323567	1,01	0,4507
BCD	0,165264	8	0,020658	6,43	0,0000
BCE	0,0660533	8	0,00825666	2,57	0,0089
BCF	0,103086	20	0,0051543	1,60	0,0447
BDE	0,0930999	8	0,0116375	3,62	0,0004
BDF	0,0894113	20	0,00447057	1,39	0,1168
BEF	0,176236	20	0,00881179	2,74	0,0001
CDE	0,1316	8	0,01645	5,12	0,0000
CDF	0,129858	20	0,00649288	2,02	0,0050
CEF	0,138801	20	0,00694007	2,16	0,0022
DEF	7,96618	20	0,398309	123,94	0,0000
RESIDUAL	3,44524	1072	0,00321384		
TOTAL (CORRECTED)	1455,37	1457			

Tabla 5.1 Estudio del ANOVA para el diseño definitivo.

Al igual que en el diseño previo, se seleccionan los factores e interacciones más relevantes, que son los que tienen un valor elevado de F-Ratio y un P-Value menor del 5% (Tabla 5.2). Lo que aporta este estudio final es el efecto cuadrático sobre la productividad de los factores cuantitativos.

Hay que recordar que el F-Ratio es el cociente entre la variabilidad de cada factor (CM) y la variabilidad residual. Cuanto mayor es el cociente, mayor es la importancia del efecto, y hay ciertos valores que son considerablemente mayores que otros.

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
TRED	696,289000	2	348,144000	108326,53	0,0000
DDEST	416,729000	2	208,365000	64833,50	0,0000
LONGMEN	214,728000	2	107,364000	33406,66	0,0000
BCROSS	31,344600	2	15,672300	4876,50	0,0000
ALG	20,432700	5	4,086540	1271,54	0,0000
DDEST*TRED	15,346400	4	3,836610	1193,78	0,0000
DDEST*ALG	23,947800	10	2,394780	745,15	0,0000
TARB	4,307010	2	2,153510	670,07	0,0000
TARB*LONGMEN	4,840530	4	1,210130	376,54	0,0000
BCROSS*LONGMEN	3,857580	4	0,964396	300,08	0,0000
TRED*ALG	7,390790	10	0,739079	229,97	0,0000
DDEST*TRED*ALG	7,966180	20	0,398309	123,94	0,0000
LONGMEN*DDEST	0,950418	4	0,237605	73,93	0,0000
BCROSS*DDEST	0,759867	4	0,189967	59,11	0,0000
LONGMEN*TRED	0,484933	4	0,121233	37,72	0,0000
TARB*BCROSS	0,304863	4	0,076216	23,71	0,0000
TARB*BCROSS*LONGMEN	0,261014	8	0,032627	10,15	0,0000

Tabla 5.2. Factores relevantes del estudio del ANOVA para el diseño definitivo.

Para los factores de tipo cualitativo se representarán los intervalos LSD y se observará el nivel que produce mayor/menor productividad, y los niveles que son diferentes entre sí. Para los factores de tipo cuantitativo se realiza una prueba para determinar si su efecto sobre la productividad es lineal o cuadrático.

La Tabla 5.3 contiene los datos con la descomposición de la suma de cuadrados y las pruebas para determinar si el efecto es lineal o cuadrático. Una vez realizada la prueba se puede utilizar el gráfico LSD para interpretar mejor la relación entre el factor cuantitativo y la productividad (efecto lineal y cuadrático).

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
TRED	696,289000	2	348,144500	108326,64	0,0000
TRED	669,894	1	669,894000	208440,37	0,0000
TRED^2	26,3946	1	26,394600	8212,79	0,0000
DDEST	416,729000	2	208,364500	64833,50	0,0000
LONGMEN	214,728000	2	107,364000	33406,77	0,0000
LONGMEN	202,791	1	202,791000	63099,28	0,0000
LONGMEN^2	11,9367	1	11,936700	3714,16	0,0000
BCROSS	31,344600	2	15,672300	4876,50	0,0000
BCROSS	22,9675	1	22,967500	7146,44	0,0000
BCROSS^2	8,37706	1	8,377060	2606,56	0,0000
ALG	20,432700	5	4,086540	1271,54	0,0000
DDEST*TRED	15,346400	4	3,836600	1193,77	0,0000
DDEST*TRED	12,02335	2	6,011675	1870,56	0,0000
DDEST*TRED^2	3,323091	2	1,661546	517,00	0,0000
DDEST*ALG	23,947800	10	2,394780	745,15	0,0000
TARB	4,307010	2	2,153505	670,07	0,0000
TARB	4,2916	1	4,291600	1335,35	0,0000
TARB^2	0,0154116	1	0,015412	4,80	0,0288
TARB*LONGMEN	4,840530	4	1,210133	376,54	0,0000
TARB*LONGMEN	4,52318	1	4,523180	1407,41	0,0000
TARB*LONGMEN^2	0,300253	1	0,300253	93,42	0,0000
TARB^2*LONGMEN	0,00532695	1	0,005327	1,66	0,1982
TARB^2*LONGMEN^2	0,0117703	1	0,011770	3,66	0,0559
BCROSS*LONGMEN	3,857580	4	0,964395	300,08	0,0000
BCROSS*LONGMEN	3,72895	1	3,728950	1160,28	0,0000
BCROSS*LONGMEN^2	0,113568	1	0,113568	35,34	0,0000
BCROSS^2*LONGMEN	0,00013587	1	0,000136	0,04	0,8371
BCROSS^2*LONGMEN^2	0,0149345	1	0,014935	4,65	0,0313
ALG*TRED	7,390790	10	0,739079	229,97	0,0000
ALG*TRED	6,994789	5	1,398958	435,29	0,0000
ALG*TRED^2	0,396001	5	0,079200	24,64	0,0000

Tabla 5.3. Tabla de factores con descomposición de suma de cuadrados.

En lo que resta, se presentarán los resultados y gráficas agrupadas por secciones, cada una de las cuales se corresponde con uno de los parámetros que han resultado significativos en la explicación de la productividad. Dadas las interacciones existentes, la agrupación podía haber sido también de alguna otra forma. Indicar también que productividad se ha medido en flits/ciclo/nodo y que está en escala logarítmica.

5.3.1 Efecto del tamaño de la red

El tamaño de la red influye en la productividad (Fig. 5.1), dado que el P-Value es de 0,0000 (primera fila de la tabla), y tras realizar la descomposición de la suma de cuadrados, existe un efecto lineal (TRED de la segunda fila, P-Value 0,0000) y un efecto cuadrático (TRED² tercera fila, P-Value 0,0000).

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
TRED	696,289000	2	348,144500	108326,64	0,0000
TRED	669,894	1	669,894000	208440,37	0,0000
TRED ²	26,3946	1	26,394600	8212,79	0,0000

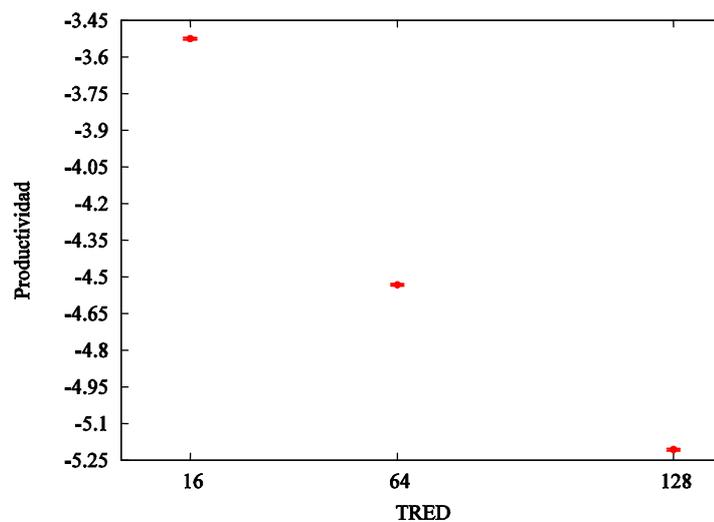


Figura 5.1. Efecto simple del tamaño de la red.

La productividad disminuye con el tamaño de la red, primero de forma rápida, para tener decrementos menores con el aumento del tamaño de la red. El decremento de la productividad es mayor en el tramo 16 a 64 que en el tramo 64 a 128. Al aumentar el número de nodos de la red se está aumentando el número de nodos en cada dimensión (hay que recordar que la topología de la red es un toro de dos dimensiones), y con ello la distancia media recorrida por los paquetes. Además, el ancho de la bisección, aunque aumenta, lo hace en menor medida que el número de nodos que enviarán paquetes a través de ella. Todo esto se traduce en una caída de la productividad máxima.

Existe un efecto conjunto de la distribución de destinos y el tamaño de la red (Fig. 5.2), dado que el P-Value es de 0,0000 (primera fila de la tabla), y tras realizar la descomposición de la suma de cuadrados, existe un efecto lineal (DDEST*TRED de la segunda fila, P-Value 0,0000) y las pendientes de la relación entre la productividad y el tamaño de la red serán diferentes según la distribución de destinos, y un efecto cuadrático (DDEST*TRED² tercera fila, P-Value 0,0000), lo cual quiere decir que la curvatura de la relación entre la productividad y el tamaño de la red será diferente según sea la distribución de destinos.

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
DDEST*TRED	15,346400	4	3,836600	1193,77	0,0000
DDEST*TRED	12,02335	2	6,011675	1870,56	0,0000
DDEST*TRED ²	3,323091	2	1,661546	517,00	0,0000

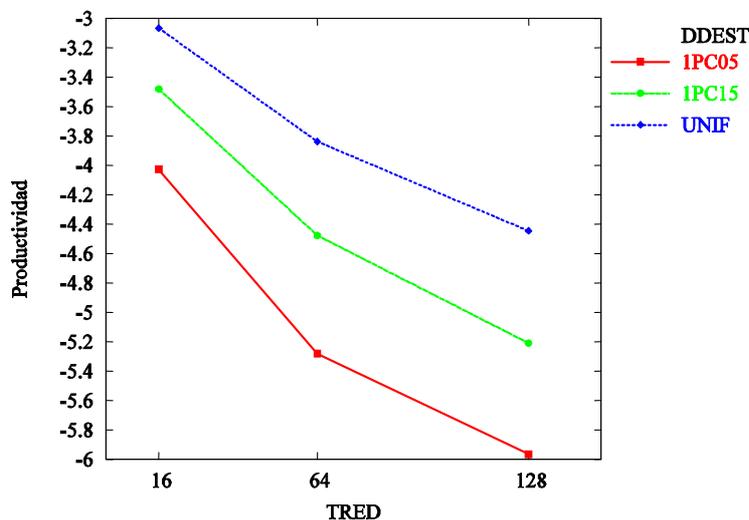


Figura 5.2. Interacción TRED:DDEST.

La evolución de la productividad con el tamaño de la red debe matizarse de acuerdo a la distribución de destinos. La mayor productividad se produce con la distribución uniforme, seguida de la hot-spot-15% y después la hot-spot-5%. La tendencia a disminuir es menor en el caso de la distribución uniforme, y aumenta con la disminución del porcentaje de paquetes dirigidos al hot-spot. La curvatura es menor para la distribución uniforme, y aumenta con la disminución del porcentaje del hot-spot. En resumen, en el caso de la distribución de destinos uniforme la evolución de la productividad con el tamaño de la red tiene una pendiente más suave que en el resto, y menor curvatura. La disminución de la productividad es más pronunciada con la distribución del tipo hot-spot, pero la disminución no se mantiene constante con el tamaño de la red, y el decremento de la productividad se hace más pequeño cuanto menor es el porcentaje del hot-spot.

Los algoritmos de encaminamiento también tienen un comportamiento diferente según el tamaño de la red (Fig. 5.3). Las pendientes de la relación entre la productividad y el tamaño de la red serán diferentes según el algoritmo utilizado. Hay un efecto cuadrático, lo cual quiere decir que la curvatura de la relación entre la productividad y el tamaño de la red será diferente según sea el algoritmo.

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
ALG*TRED	7,390790	10	0,739079	229,97	0,0000
ALG*TRED	6,994789	5	1,398958	435,29	0,0000
ALG*TRED^2	0,396001	5	0,079200	24,64	0,0000

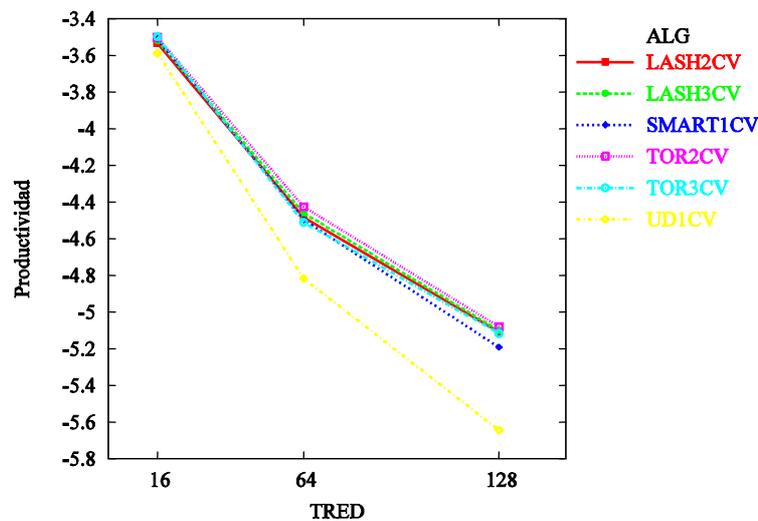


Figura 5.3. Interacción TRED:ALG.

La evolución de la productividad con el tamaño de la red es diferente según el algoritmo de encaminamiento utilizado. El peor caso se da para el algoritmo up*/down* donde se produce la mayor caída de productividad. También es diferente el caso del algoritmo Smart, que para redes pequeñas tiene un comportamiento similar a los restantes, pero que acelera la caída con el aumento del tamaño de la red. El resto de los algoritmos tienen un comportamiento muy similar, si bien la caída de productividad es menor.

5.3.2 Efecto del algoritmo de encaminamiento

El algoritmo utilizado influye claramente en la productividad (Fig. 5.4), dado que su P-Value es 0,0000. La productividad promedio depende del algoritmo de encaminamiento. El de menor productividad es el up*/down*, el siguiente pero mucho mayor es el Smart, le sigue el LASH2CV y el TOR3CV que son iguales, luego el LASH2CV y el de mayor productividad es TOR2CV. Como se puede ver, para el

algoritmo TOR, se obtiene mayor productividad cuando se usan dos canales virtuales en lugar de tres.

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
ALG	20,432700	5	4,086540	1271,54	0,0000

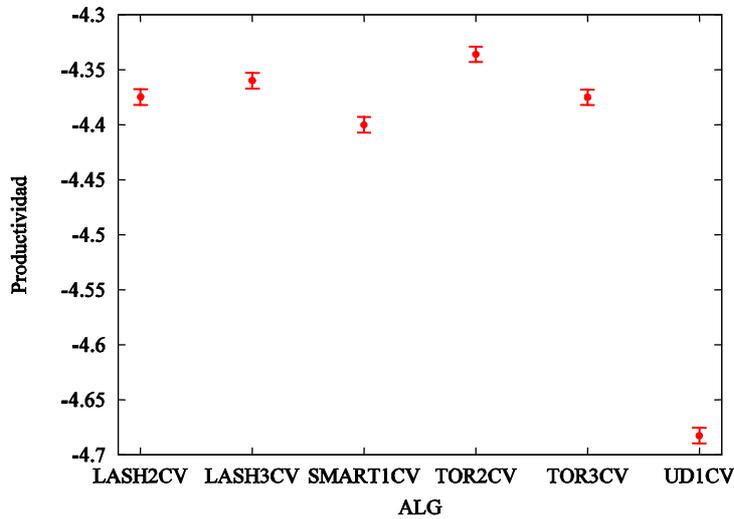


Figura 5.4. Efecto simple del algoritmo de encaminamiento.

Otro resultado a considerar es que las productividades de todos los algoritmos son semejantes cuando se tiene una distribución de destinos hot-spot-5%, pero son diferentes en el caso de una del tipo hot-spot-15%, siendo la más diferente y menor cuando el algoritmo es up*/down* (Fig. 5.5). Los algoritmos de encaminamiento considerados se comportan también de forma diferente cuando la distribución de destinos es uniforme. Para descubrir las diferencias entre todos, excepto para up*/down* para el que se aprecia suficientemente, hay que acudir a la tabla de medias.

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
DDEST*ALG	23,947800	10	2,394780	745,15	0,0000

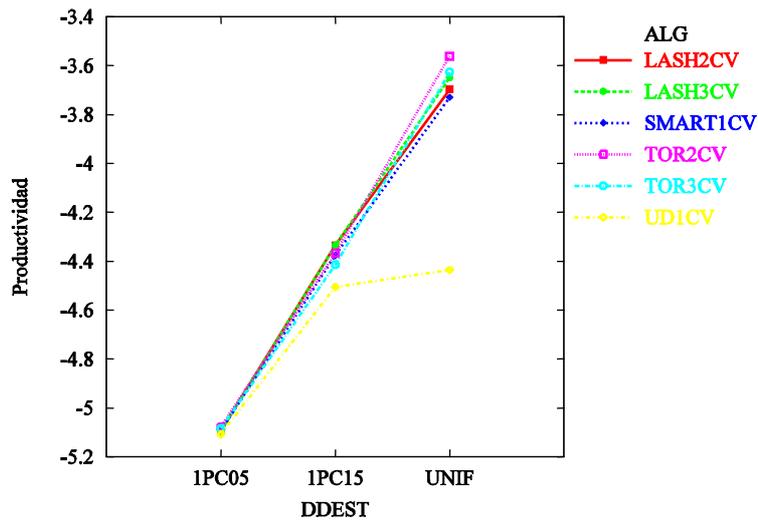


Figura 5.5. Interacción DDEST:ALG.

5.3.3 Efecto de la longitud de los paquetes

La longitud de los paquetes que circulan por la red también influye en su productividad (Fig. 5.6), y tras realizar la descomposición de la suma de cuadrados, existe tanto un efecto lineal como un efecto cuadrático.

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
LONGMEN	214,728000	2	107,364000	33406,77	0,0000
LONGMEN	202,791	1	202,791000	63099,28	0,0000
LONGMEN^2	11,9367	1	11,936700	3714,16	0,0000

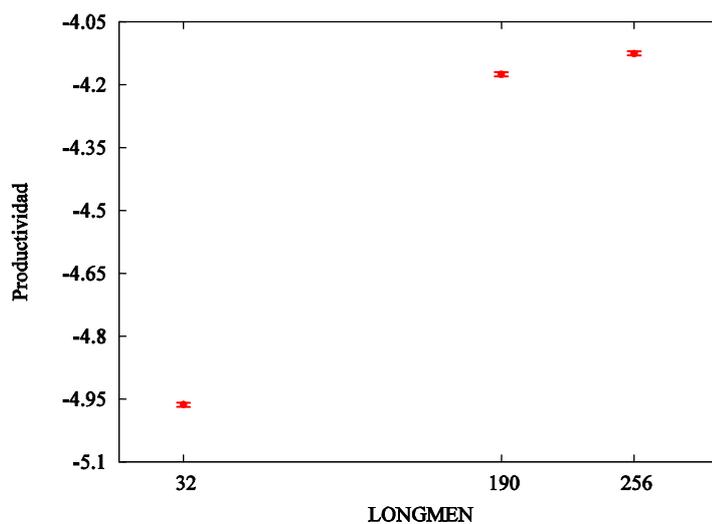


Figura 5.6. Efecto simple de la longitud de los paquetes.

La productividad aumenta con el tamaño de los paquetes pero llega un momento en el que aumentar el tamaño no produce una mayor productividad, y parece estabilizarse para redes cercanas a los 256 nodos. Los paquetes avanzan de forma segmentada, y como consecuencia, el tener paquetes más largos aprovecha mejor esta característica. El tiempo de establecimiento de la ruta es amortizado mejor entre más flits, y por tanto, cuanto más largo es el paquete.

Las interacciones entre factores cuantitativos son más difíciles de explicar. Veamos qué ocurre con el tiempo de arbitraje (Fig. 5.7). En este caso la interacción existe, dado que el P-Value es de 0,0000 (primera fila). En el resto de las filas de la tabla se presenta la variación conjunta de las pendientes y curvaturas de la relación con la productividad. Las dos primeras existen al tener un P-Valor de 0,0000, y las dos últimas no por tener un P-Value superior a 0,05.

Veamos un intento de explicar esto. La longitud del paquete afecta a la productividad, de forma que se tiene una pendiente (la productividad aumenta con la longitud del paquete, en promedio o a grandes rasgos), y una curvatura (la productividad no mantiene un aumento estable al aumentar la longitud del paquete, en este caso disminuye el aumento de la productividad al aumentar la longitud del paquete).

Tanto la pendiente como la curvatura de la relación anterior se ven afectadas por el tiempo de arbitraje y por la variación del tiempo de arbitraje. La pendiente de la relación PROD-LONGMEN aumenta al aumentar el tiempo de arbitraje (TARB*LONGMEN). El aumento es proporcional al tiempo de arbitraje (TARB*LONGMEN significativa) y esa proporcionalidad se mantiene (TARB^2*LONGMEN no significativa).

El aumento de la curvatura es proporcional al TARB (TARB*LONGMEN^2), y el aumento se mantiene estable y no cambia al aumentar más el TARB (TARB^2*LONGMEN^2 no significativo).

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
TARB*LONGMEN	4,840530	4	1,210133	376,54	0,0000
TARB*LONGMEN	4,52318	1	4,523180	1407,41	0,0000
TARB*LONGMEN^2	0,300253	1	0,300253	93,42	0,0000
TARB^2*LONGMEN	0,005326	1	0,005327	1,66	0,1982
TARB^2*LONGMEN^2	0,011770	1	0,011770	3,66	0,0559

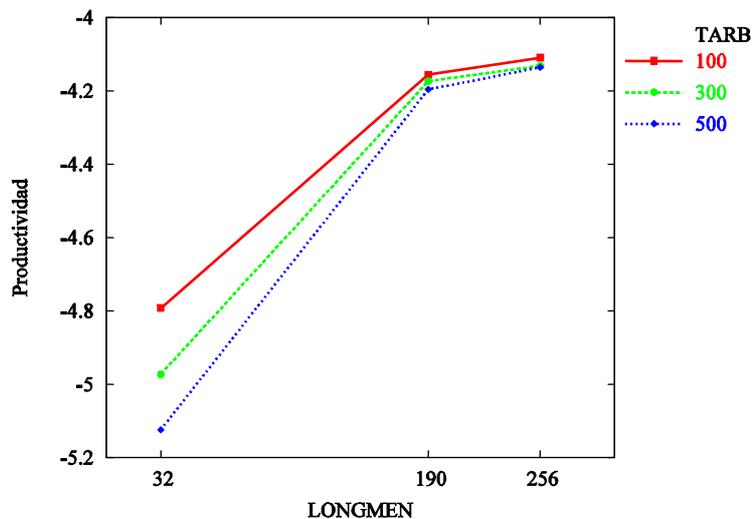


Figura 5.7. Interacción LONGMEN:TARB.

Por tanto, el aumento de la productividad con la longitud de los paquetes debe matizarse con el tiempo de arbitraje. Las diferencias de productividad entre tiempos de arbitraje son relevantes en el caso de paquetes cortos. Las productividades, en ese caso, son mayores cuanto menor es el tiempo de arbitraje. Esta diferencia tan clara no se aprecia en el caso de longitudes de paquete medianas o grandes. En el caso de paquetes medianos sólo el tiempo de arbitraje produce elevada productividad, y aumentarlo tiende a disminuir levemente la productividad. En el caso de longitudes de paquete grandes las productividades son más similares.

En general, se puede decir que aumentar el tamaño de los paquetes enmascara otros tiempos, los debidos por ejemplo al encaminamiento o al arbitraje, pues estas acciones hay que realizarlas un menor número de veces que si hubiese más paquetes más pequeños.

Para la interacción con el parámetro “bytes por cruce” sucede algo parecido (Fig. 5.8). La explicación de esta interacción no es fácil de explicar. En este otro caso la interacción también existe, dado que el P-Value es de 0,0000 en la primera fila. En el resto de las filas se presenta la variación conjunta de las pendientes y curvaturas de la relación con la productividad. Sólo el caso de la tercera, $BCROSS^2 * LONGMEN$, se puede ver que no es significativa por tener un P-Valor superior a 0,05.

De nuevo se tiene que la longitud del paquete afecta a la productividad, de forma que la productividad aumenta con el tamaño del paquete, pero el aumento no se mantiene estable y disminuye al aumentar la longitud del paquete.

Tanto la pendiente como la curvatura de la relación anterior se ven afectadas por los bytes por cruce y por la variación de los bytes por cruce. La pendiente de la relación PROD-LONGMEN disminuye al aumentar los bytes por cruce, y esa disminución se mantiene constante cuando se sigue aumentando los bytes por cruce (BCROSS²*LONGMEN no significativo).

Ahora toca la curvatura, interpretada de nuevo como ángulo del valor central 190. El ángulo va a disminuir con los bytes por cruce (BCROSS*DDEST²). Esa disminución no se mantiene con el aumento de los bytes por cruce y de ahí la existencia de la interacción BCROSS²*DDEST².

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
BCROSS*LONGMEN	3,857580	4	0,964395	300,08	0,0000
BCROSS*LONGMEN	3,72895	1	3,728950	1160,28	0,0000
BCROSS*LONGMEN ²	0,113568	1	0,113568	35,34	0,0000
BCROSS ² *LONGMEN	0,00013587	1	0,000136	0,04	0,8371

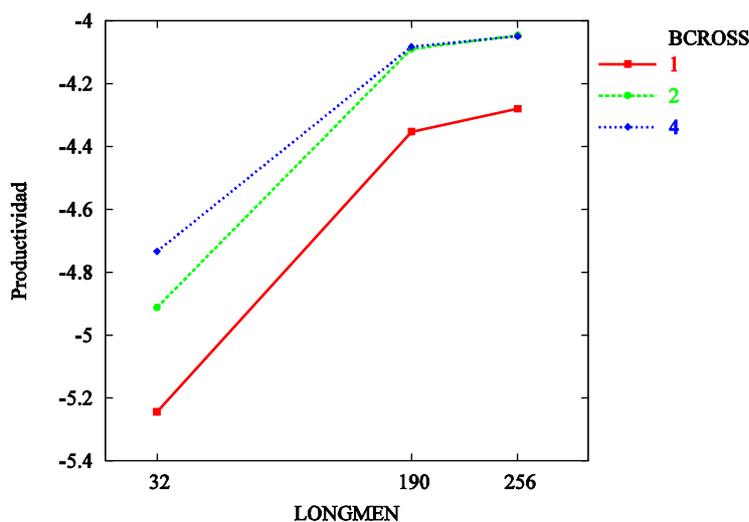


Figura 5.8. Interacción LONGMEN:BCROSS.

De nuevo la evolución de la productividad con la longitud del paquete se matiza por el número de bytes por cruce. Si el paquete es corto hay mucha diferencia de productividad al aumentar los bytes por cruce. El aumento de los bytes por cruce hace que la productividad aumente, pero ese aumento sea menor cuanto mayor es el número de bytes por cruce. Al aumentar el tamaño del paquete sólo hay diferencia entre que haya 1 byte por cruce o más, sin importar cuántos más haya.

5.3.4 Efecto del tiempo de arbitraje

El tiempo de arbitraje influye en la productividad (Fig. 5.9), dado que el P-Value es de 0,0000 (primera fila de la tabla), y tras realizar la descomposición de la suma de cuadrados, existe un efecto lineal (TARB de la segunda fila, P-Value 0,0000) y un efecto cuadrático (TARB² tercera fila, P-Value 0,0288), si bien este último es muy poco importante como muestra la comparación de los F-Ratio.

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
TARB	4,307010	2	2,153505	670,07	0,0000
TARB	4,2916	1	4,291600	1335,35	0,0000
TARB ²	0,0154116	1	0,015412	4,80	0,0288

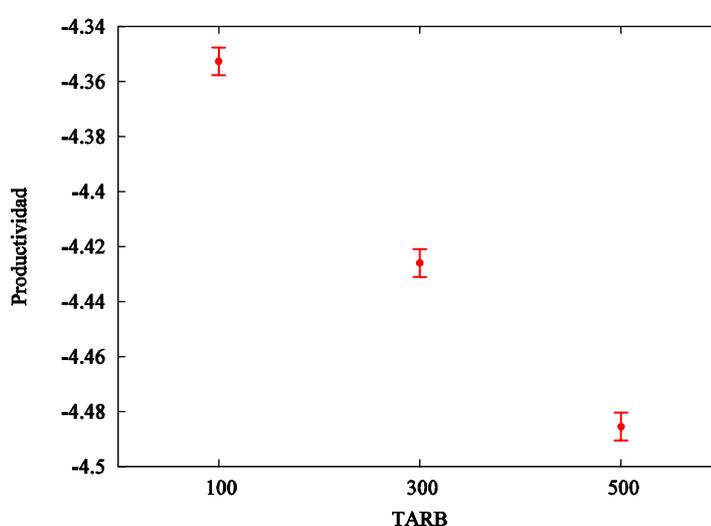


Figura 5.9. Efecto simple del tiempo de arbitraje.

La productividad promedio disminuye al aumentar el tiempo de arbitraje. Se puede apreciar que, en esencia, el comportamiento es lineal, pero el decremento de la productividad es menor con el aumento del tiempo de arbitraje.

Este resultado es importante, no tanto por el resultado en sí pues parece lógico, sino porque permite arrojar luz sobre este mismo resultado en el estudio anterior. Entonces, para el caso de una red con un solo nodo, la productividad disminuía al aumentar el tiempo de arbitraje pero hasta un punto a partir del cual dicha productividad empezaba a aumentar. En su momento no se supo interpretar ese resultado, y se planteó realizar pruebas adicionales para aclararlo. Con estos nuevos resultados, el comportamiento parece quedar más claro, y de acuerdo con ellos un mayor aumento del tiempo de arbitraje supone una mayor disminución de la productividad. El retraso en tomar la decisión sobre qué paquetes deben o no cruzar por el crossbar interno creará

mayor contención en la red y como consecuencia no permitirá obtener productividades más altas.

5.3.5 Efecto de los bytes por cruce

El número de bytes por cruce influye en la productividad (Fig. 5.10), dado que el P-Value es de 0,0000 (primera fila de la tabla), y tras realizar la descomposición de la suma de cuadrados, existe un efecto lineal y un efecto cuadrático.

FACTOR	SC	GDL	CM	F-Ratio	P-Value
BCROSS	31,344600	2	15,672300	4876,50	0,0000
BCROSS	22,9675	1	22,967500	7146,44	0,0000
BCROSS^2	8,37706	1	8,377060	2606,56	0,0000

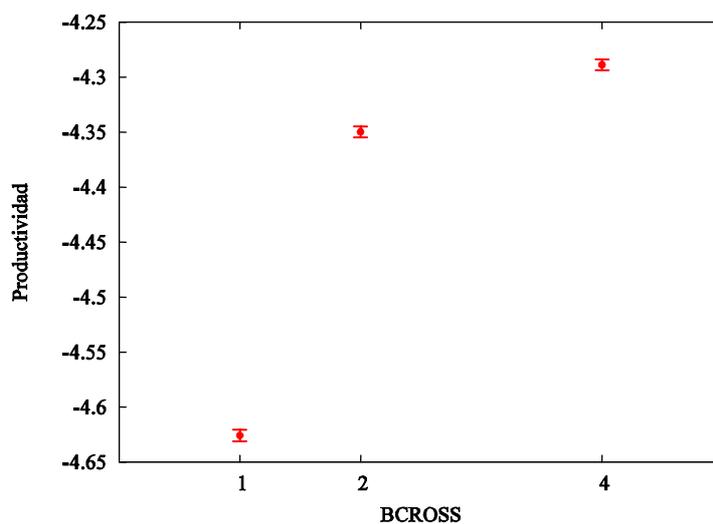


Figura 5.10. Efecto simple de los bytes de cruce.

La productividad aumenta con los bytes por cruce, pero el aumento no se mantiene constante y es menor conforme aumenta el número de bytes por cruce. Este resultado también parece lógico. Cuando el crossbar es capaz de cruzar más información por unidad de tiempo, la red acabará por conducir los paquetes hacia su destino a mayor velocidad, haciendo así aumentar la cantidad de datos que la red puede manejar. Además, como se ha indicado antes, este parámetro permite explicar algunos otros comportamientos dadas las interacciones que ha mostrado con otros parámetros.

Además de todos los resultados anteriores, cabe resaltar lo ya comentado a partir de los resultados del diseño previo: algunos parámetros que en el estudio anterior (del

que es continuación el que aquí se está presentando) mostraron influencia sobre la productividad de la red, ahora parecen no ser tan importantes a la hora de explicarla. Parece que al tener una red completa, y no sólo un nodo, el efecto de algunos aspectos es enmascarado por el de otros. Es el caso, por ejemplo, del tiempo de vuelo o del número de puertos de la tabla de encaminamiento, es decir, el número de operaciones de encaminamiento que se pueden realizar de forma simultánea.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este último capítulo se indican las conclusiones más interesantes del trabajo realizado. El objetivo principal ha sido cubierto puesto que se ha completado el estudio de evaluación que se había inicialmente planteado, y que en buena medida era la continuación de otro de similares características realizado meses atrás. Respecto a esto, hay que resaltar que aunque se trata efectivamente de la continuación de un estudio previo, no por ello ha supuesto menos trabajo. Se ha tenido que repetir el estudio por completo, pero añadiendo más parámetros al mismo. Además, la metodología seguida no es la habitual, lo que se ha traducido en una mayor dificultad para el autor, aunque, eso sí, algo mitigada por la ayuda que ha supuesto aquel trabajo anterior que ha servido de referencia.

Al margen de la dificultad que haya podido entrañar su aprendizaje y manejo, la elección de la metodología nuevamente ha resultado ser totalmente acertada y ha permitido, además de alcanzar el principal objetivo del trabajo, encontrar una serie de datos de gran interés, con un número reducido de pruebas.

6.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones del trabajo realizado tienen que ver tanto con las características de la metodología utilizada, como con los resultados obtenidos al aplicar dicha metodología al caso concreto de este estudio. Las primeras, a pesar de que pueden ser obvias y ya fueron apuntadas en el trabajo anterior, merece la pena recordarlas dado su interés. En cuanto a las segundas, son las verdaderamente importantes para este trabajo.

- Se confirma que existen interacciones y dependencias entre distintos parámetros que se han considerado en el estudio. Se muestran así las carencias de los trabajos que se centran en aspectos muy reducidos, fijando arbitrariamente el resto de parámetros de diseño.
- Con un número reducido de pruebas se pueden conseguir muchos datos en relativamente poco tiempo. Para realizar este estudio se ha tenido en cuenta un número importante de parámetros, y para poder realizar el trabajo en un tiempo razonable se han tenido que aplicar ciertas técnicas estadísticas para reducir el número de simulaciones a realizar, pero perdiendo la mínima información posible.

- No es necesario explorar un gran número de valores para los parámetros. Se ha mostrado como con sólo tres es posible detectar la tendencia en el comportamiento de los parámetros.

En definitiva, y como primer resumen, resaltar que un buen diseño de experimentos, formando parte de una adecuada metodología, se hace imprescindible para encontrar la máxima información con el menor número de pruebas, y como consecuencia en el menor tiempo posible.

Por lo que se refiere a los resultados propiamente dichos del estudio hay que indicar que algunos de ellos eran totalmente esperados, simplemente por conocimiento previo o incluso por pura lógica. Otros, los menos, necesitan quizás de algún estudio adicional para ser totalmente explicados pues chocan un tanto con lo que se podía esperar. Se indican a continuación algunas de estas conclusiones:

- Los efectos simples de los parámetros sobre la productividad no tienen un comportamiento lineal, o aumentan muy rápido al aumentar el valor del parámetro para luego hacerlo más lentamente, o lo contrario.
- La productividad disminuye al tener redes más grandes, aunque la tendencia a disminuir es menor cuando se tiene tráfico uniformemente distribuido en lugar de concentrado en una determina zona.
- Los algoritmos de encaminamiento examinados tienen un comportamiento normal: los que usan 2 y 3 canales virtuales permiten obtener una productividad mayor que los que usan sólo 1. Además, el algoritmo Smart se comporta mucho mejor que el up*/down*, ambos usando un canal virtual.
- El algoritmo Smart se comporta de forma muy parecida a los algoritmos que usan más canales virtuales que él para redes pequeñas, pero tiende a hacerlo peor que aquellos según la red incrementa su tamaño.
- Como ya se observó con redes simples (un solo nodo), para paquetes grandes la productividad es mayor que para paquetes cortos. Pero ahora se aprecia mucho más claramente que entonces que en el caso de los paquetes cortos, la productividad es mayor cuanto menor es el tiempo de arbitraje, hecho que no se observa para los paquetes largos.
- También parece evidente que a mayor velocidad del crossbar mayor productividad se obtiene.

- Uno de los resultados más importantes, en tanto en cuanto sirve para aclarar alguno de los resultados del estudio previo, es que se observa un comportamiento más lógico para el caso del tiempo de arbitraje. Ahora se aprecia claramente una disminución de la productividad según se aumenta el tiempo de arbitraje. Esto no se obtuvo entonces (pues se modelaba un único nodo), observando una bajada inicial de la productividad seguida de una subida a partir de un cierto valor del tiempo de arbitraje. El que la red estuviera formada únicamente por un solo nodo pudo ser la causa de aquellos resultados.
- Otro resultado diferente con respecto al anterior estudio es el hecho de que el número de puertos en la tabla de encaminamiento, es decir el número de encaminamientos simultáneos, no haya resultado relevante para la productividad. Quizás al considerar una red completa, en algunos casos con un gran número de nodos, ya no ocurre el que se tengan que encaminar muchos paquetes al mismo tiempo, como claramente ocurre con un único nodo. Es, de todas formas, uno de los resultados que quizás merezca un estudio adicional.

6.2 TRABAJO FUTURO

La metodología seguida para el desarrollo de este trabajo, así como las características de los resultados obtenidos han permitido observar detalles que invitan a plantear una continuidad al mismo. Se indican a continuación algunas de esas líneas de trabajo que podrían dar continuidad al estudio que aquí se ha presentado:

- Añadir nuevos parámetros no considerados, o realizar estudios más precisos sobre los mismos o un conjunto más reducido.
- Repetir el estudio para otros índices de prestaciones como puedan ser la latencia media en la red o la latencia media desde la generación.
- El estudio realizado se ha centrado en una red con virtual cut-through y control de flujo basado en créditos. Se podría plantear un estudio similar con otra técnica de conmutación y control de flujo.
- Realizar una ampliación del estudio para encontrar respuesta a algunas dudas que se han planteado a raíz de los resultados. En concreto, el relativo al número de accesos simultáneos a la tabla de encaminamiento mencionado más arriba. O también, algunos resultados de uno de los algoritmos de encaminamiento cuyo comportamiento es mejor con dos canales virtuales que con tres.

BIBLIOGRAFÍA

- [Anj95] K. V. Anjan y T. M. Pinkston, “DISHA: A deadlock recovery scheme for fully adaptive routing”, En Proceedings of the 9th International Parallel Processing Symposium, Abril 1995.
- [Anj96] K. V. Anjan, T. M. Pinkston, y J. Duato, “Generalized theory for deadlock free adaptive routing and its application to disha concurrent”. En Proceedings of the 10nd International Parallel Processing Symposium, Abril 1996.
- [Asi05] Advanced Switching Interconnect Special Interest Group. Advanced Switching core architecture specification. Revision 1.1, March 2005
- [Bod95] N. J. Boden, D. Cohen, R. E. Felderman, et al., “Myrinet – A gigabit per second local area network”, IEEE Micro, pp. 29-36, Abril 1995.
- [Che95] L. Cherkasova, V. Kotov, y T. Rockiki, “Fibre channel fabrics: Evaluation and design”, Proceedings og the 29th Hawaii International Symposium on Computer Architecture, Mayo 1995.
- [Dal03] Dally, W.J. and Towles, B. Principles and Practices of Interconnection Networks Morgan Kaufmann, 2003
- [Dal87] W. J. Dally y C. L. Seitz, “Deadlock-free message routing in multiprocessor interconnection networks”, IEEE Transaction on Computers, vol. C-36, no.5, pp. 547-553, mayo 1987.
- [Dal92] W. J. Dally, “Virtual-channel flow control”, IEEE Transactions on Parallel Distributed Systems, vol. 3. no 2, pp. 140-142, Morgan Kaufmann Publishers, 1990.

- [Dua03] Duato, J. and Yalamanchili, S. and Ni, L. Interconnection Networks. An Engineering Approach Morgan Kaufmann, 2003
- [Dua91] J. Duato, "On the design of deadlockfree adaptive routing algorithms for multicomputers: Design methodologies". En Proceedings of parallel Architectures and Languages Europe 91, Junio 1991.
- [Dua93] J. Duato, "A new theory of deadlockfree adaptive routing in wormhole networks", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 4(12):1320--1331, Diciembre 1993.
- [Gal97] M. Galles, "Spider: a highspeed network interconnect", IEEE Micro, 17(1):34--39, Enero 1997.
- [Gar97] D. García y W. Watson, "ServeNet II", Proceeding of the 1997 Parallel Computer, Routing, and Communication Workshop, pp. 119-135, Junio 1997.
- [Hor95] R. W. Horst, "TNet: a reliable system area network". IEEE Micro, pages 37--45, Febero 1995.
- [Hor96] Robert W. Horst, "ServerNet deadlock avoidance and fractahedral topologies", En Proceedings of the International Parallel Processing Symposium, pages 274--280, Abril 1996.
- [IBA00] InfiniBand Trade Association. "InfiniBand Architecture Specification Volume 1. Release 1.0", Octubre 2000.
- [IBA01] InfiniBand Trade Association. "InfiniBand Architecture Specification Volume 1. Release 1.0.a", Junio 2001.
- [Jai91] R. Jain, "The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation and modeling", John Wiley &

Sons, Inc. 1991.

- [Kim94] J. H. Kim, Z. Liu, y A. A. Chien, “Compresionless routing: a frame work for adaptive and fault tolerant routing”. En Proceedings of the 21st International Symposium on Computer Architecture, Abril 1994.
- [Mar03] R. Martínez. “Estudio del efecto de los parámetros de diseño en el rendimiento de la red de interconexión en NOWs”, Proyecto fin de carrera, Universidad de Castilla la Mancha, Escuela Politécnica Superior de Albacete, Septiembre 2003.
- [Mar03b] J.C. Martínez, J. Flich, A. Robles, P. López and J.Duato "Supporting Adaptive Routing in InfiniBand Networks" Proceedings of the 11th Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing (11th EWPDP) ,IEEE Computer Society Press, Genoa, Italy, 2003
- [Mar05] R. Martínez, J.L. Sánchez, F.J. Alfaro, V. Chirivella, J. Flich Studying the effect of the design parameters on the interconnection network performance in NOWs In proceedings of the 13th Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing (PDP) IEEE Computer Society Press, pp. 102-109, ISBN 0-7695-2280-7, 2005
- [Mar05b] J.C. Martínez, Jose Flich, Antonio Robles, Pedro López, Jose Duato and Michihiro Koibuchi "In-Order Packet Delivery in Interconnection Networks using Adaptive Routing" Proceedings of the 2005 International Parallel and Distributed Processing Symposium ,IEEE Computer Society Press., Denver, Colorado, USA , 2005
- [Pue01] V. Puente, J. A. Gregorio, R. Beivide, F. Vallejo, y A. Ibáñez, “A new routing mechanism for netwoks with irregular topology”, Proceedings of the International Conference on SuperComputing, Mayo 2001.
- [Ree89] D. S. Reeves, E. F. Gehringer, y A. Chandiramani, “Adaptive routing and deadlock recovery: A simulation study”, En Proceedings of the 4th

Conference on Hypercube Concurrent Computers and Applications, Marzo 1989.

- [Rom93] R. Romero, L. R. Zúnica Ramajo, “Estadística (Proyecto de Innovación Educativa)”, Universidad Politécnica de Valencia, 1993.

- [Sch91] M. D. Schroeder, Andrew D. Birrel, Michael Burrows, Hal Murray, et al, “Autonet: A highspeed, selfconfiguring local area network using pointto point links”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 9(8):1318-1335, Octubre 1991.

- [Sha02] T. Shanley. “InfiniBand Network Architecture”. Addison Wesley Professional, 2002.

- [She98] P. Sheifert, “Gigabit Ethernet”, Addison-Wesley, 1998.

- [Sil98a] F. Silla, M. P. Malumbres, J. Duato, D. Dai, y D. K. Panda, “Impact of adaptativity on the behavior of networks of workstations under bursty traffic”, En Proceeding of the 10th International Conference on Parallel processing, Agosto1998.

- [Sil98b] F. Silla, A. Robles, y J. Duato, “Improving performance of networks of workstations by using disha concurrent”, En Proceedings of the 10th International Conference on Parallel Processing, Agosto 1998.

- [Sil98c] F. Silla, J. Duato, A. Sivasubramaniam, y C. R. Das, Virtual channel multiplexing in networks of workstations with irregular topology”, En Proceedings of the 1998 International Conference on High Performance Computing, Diciembre 1998.

- [Ske02] T. Skeie, O. Lysne and I. Theiss, Layered Shortest Path (LASH) Routing in Irregular System Area Networks, In: Proceedings of Communication Architecture for Clusters (CAC'02). IEEE Computer Society, 2002.

- [Ske04] Tor Skeie, Olav Lysne, J. Flich, P. López, A. Robles and J. Duato "LASH-TOR: A generic transition-oriented routing algorithm" 10th International Conference on Parallel and Distributed Systems2004 (ICPADS'2004)
- [Tag85] G. Taguchi, "System of Experimental Design. White Plañís", New York. Ed. UNIPUB/Kraus International Publications; Dearborn, Michigan, Ed. American Supplier Institute, Inc, 1985.
- [Wil01] W. T. Futral. "InfiniBand Architecture: Development and Deployment—A Strategic Guide to Server I/O Solutions", Intel Press, 2001.

APÉNDICE A

La Tabla A.1 recoge los promedios de la productividad para cada uno de los valores de los parámetros e interacciones entre ellos. En primer lugar se tiene el número de observaciones para cada valor, luego el promedio y el error estándar (desviación típica), y con ellos se construye un intervalo de confianza al 95% para el promedio, indicando los límites inferior y superior. El intervalo en cuestión contiene al valor verdadero de la media para ese valor del parámetro, en contraposición al valor estimado (aproximado) que hay en la segunda columna. Con estos promedios se construyen los gráficos que se han visto en el Capítulo 5.

Indicar que los valores correspondientes a media, límite superior y límite inferior están en escala logarítmica ya que la variable tiene un cero natural y los resultados son próximos a ese cero.

Table of Least Squares Means for LOG(PRODUCTIVIDAD)
with 95,0 Percent Confidence Intervals

Level	Count	Mean	Std. Error	Lower Limit	Upper Limit
GRAND MEAN	1458	-4,42134			
TARB					
100	486	-4,3526	0,00257155	-4,35764	-4,34756
300	486	-4,42594	0,00257155	-4,43098	-4,4209
500	486	-4,48549	0,00257155	-4,49053	-4,48045
BCROSS					
1	486	-4,62569	0,00257155	-4,63073	-4,62065
2	486	-4,34962	0,00257155	-4,35466	-4,34458
4	486	-4,28871	0,00257155	-4,29375	-4,28367
LONGMEN					
32	486	-4,96331	0,00257155	-4,96835	-4,95827
190	486	-4,17514	0,00257155	-4,18018	-4,1701
256	486	-4,12557	0,00257155	-4,13061	-4,12053
DDEST					
HOT-SPOT05	486	-5,09172	0,00257155	-5,09676	-5,08668
HOT-SPOT15	486	-4,38894	0,00257155	-4,39398	-4,3839
UNIFORME	486	-3,78337	0,00257155	-3,78841	-3,77833
TRED					
16	486	-3,52501	0,00257155	-3,53005	-3,51997
64	486	-4,53218	0,00257155	-4,53722	-4,52714
128	486	-5,20683	0,00257155	-5,21187	-5,20179
ALG					
LASH2CV	243	-4,37478	0,00363671	-4,38191	-4,36765
LASH3CV	243	-4,35978	0,00363671	-4,36691	-4,35266
SMART1CV	243	-4,39999	0,00363671	-4,40712	-4,39286
TOR2CV	243	-4,33596	0,00363671	-4,34308	-4,32883
TOR3CV	243	-4,37498	0,00363671	-4,38211	-4,36786
UD1CV	243	-4,68255	0,00363671	-4,68968	-4,67543
TARB by BCROSS					
100 1	162	-4,53415	0,00445405	-4,54288	-4,52542
100 2	162	-4,28344	0,00445405	-4,29217	-4,27471
100 4	162	-4,24021	0,00445405	-4,24894	-4,23148
300 1	162	-4,63047	0,00445405	-4,6392	-4,62174
300 2	162	-4,35357	0,00445405	-4,3623	-4,34484

300	4	162	-4,29379	0,00445405	-4,30251	-4,28506
500	1	162	-4,71247	0,00445405	-4,7212	-4,70374
500	2	162	-4,41186	0,00445405	-4,42059	-4,40313
500	4	162	-4,33214	0,00445405	-4,34087	-4,32341
TARB by LONGMEN						
100	32	162	-4,79237	0,00445405	-4,8011	-4,78364
100	190	162	-4,15604	0,00445405	-4,16477	-4,14732
100	256	162	-4,10937	0,00445405	-4,1181	-4,10064
300	32	162	-4,9732	0,00445405	-4,98193	-4,96447
300	190	162	-4,17333	0,00445405	-4,18206	-4,1646
300	256	162	-4,13129	0,00445405	-4,14002	-4,12256
500	32	162	-5,12436	0,00445405	-5,13309	-5,11563
500	190	162	-4,19605	0,00445405	-4,20478	-4,18732
500	256	162	-4,13606	0,00445405	-4,14478	-4,12733
TARB by DDEST						
100	HOT-SPOT05	162	-5,02325	0,00445405	-5,03198	-5,01452
100	HOT-SPOT15	162	-4,32853	0,00445405	-4,33726	-4,3198
100	UNIFORME	162	-3,70601	0,00445405	-3,71474	-3,69728
300	HOT-SPOT05	162	-5,09253	0,00445405	-5,10126	-5,0838
300	HOT-SPOT15	162	-4,39719	0,00445405	-4,40592	-4,38846
300	UNIFORME	162	-3,78809	0,00445405	-3,79682	-3,77936
500	HOT-SPOT05	162	-5,15937	0,00445405	-5,1681	-5,15064
500	HOT-SPOT15	162	-4,4411	0,00445405	-4,44983	-4,43237
500	UNIFORME	162	-3,856	0,00445405	-3,86473	-3,84727
TARB by TRED						
100	16	162	-3,45848	0,00445405	-3,46721	-3,44975
100	64	162	-4,46731	0,00445405	-4,47604	-4,45858
100	128	162	-5,132	0,00445405	-5,14072	-5,12327
300	16	162	-3,53133	0,00445405	-3,54006	-3,5226
300	64	162	-4,53462	0,00445405	-4,54335	-4,52589
300	128	162	-5,21187	0,00445405	-5,2206	-5,20314
500	16	162	-3,58522	0,00445405	-3,59395	-3,57649
500	64	162	-4,59461	0,00445405	-4,60334	-4,58588
500	128	162	-5,27664	0,00445405	-5,28537	-5,26791
TARB by ALG						
100	LASH2CV	81	-4,29433	0,00629897	-4,30667	-4,28198
100	LASH3CV	81	-4,29888	0,00629897	-4,31123	-4,28653
100	SMART1CV	81	-4,33943	0,00629897	-4,35177	-4,32708
100	TOR2CV	81	-4,26994	0,00629897	-4,28229	-4,2576
100	TOR3CV	81	-4,30666	0,00629897	-4,31901	-4,29432
100	UD1CV	81	-4,60633	0,00629897	-4,61868	-4,59398
300	LASH2CV	81	-4,38687	0,00629897	-4,39922	-4,37453
300	LASH3CV	81	-4,35936	0,00629897	-4,37171	-4,34702
300	SMART1CV	81	-4,3995	0,00629897	-4,41185	-4,38716
300	TOR2CV	81	-4,33763	0,00629897	-4,34997	-4,32528
300	TOR3CV	81	-4,38509	0,00629897	-4,39744	-4,37275
300	UD1CV	81	-4,68718	0,00629897	-4,69952	-4,67483
500	LASH2CV	81	-4,44314	0,00629897	-4,45548	-4,43079
500	LASH3CV	81	-4,42111	0,00629897	-4,43346	-4,40876
500	SMART1CV	81	-4,46104	0,00629897	-4,47339	-4,44869
500	TOR2CV	81	-4,4003	0,00629897	-4,41265	-4,38796
500	TOR3CV	81	-4,43319	0,00629897	-4,44554	-4,42085
500	UD1CV	81	-4,75416	0,00629897	-4,7665	-4,74181
BCROSS by LONGMEN						
1	32	162	-5,24392	0,00445405	-5,25265	-5,23519
1	190	162	-4,35286	0,00445405	-4,36158	-4,34413
1	256	162	-4,28031	0,00445405	-4,28904	-4,27158
2	32	162	-4,91209	0,00445405	-4,92082	-4,90336
2	190	162	-4,08979	0,00445405	-4,09852	-4,08106
2	256	162	-4,04699	0,00445405	-4,05572	-4,03826
4	32	162	-4,73393	0,00445405	-4,74266	-4,7252
4	190	162	-4,08278	0,00445405	-4,09151	-4,07405
4	256	162	-4,04942	0,00445405	-4,05815	-4,04069
BCROSS by DDEST						
1	HOT-SPOT05	162	-5,26532	0,00445405	-5,27405	-5,25659
1	HOT-SPOT15	162	-4,57972	0,00445405	-4,58845	-4,57099
1	UNIFORME	162	-4,03204	0,00445405	-4,04077	-4,02331
2	HOT-SPOT05	162	-5,0329	0,00445405	-5,04163	-5,02417

2	HOT-SPOT15	162	-4,32248	0,00445405	-4,33121	-4,31375
2	UNIFORME	162	-3,69348	0,00445405	-3,70221	-3,68475
4	HOT-SPOT05	162	-4,97693	0,00445405	-4,98566	-4,9682
4	HOT-SPOT15	162	-4,26462	0,00445405	-4,27335	-4,25589
4	UNIFORME	162	-3,62457	0,00445405	-3,6333	-3,61584
BCROSS by TRED						
1	16	162	-3,71175	0,00445405	-3,72048	-3,70302
1	64	162	-4,74496	0,00445405	-4,75369	-4,73623
1	128	162	-5,42037	0,00445405	-5,4291	-5,41164
2	16	162	-3,46324	0,00445405	-3,47197	-3,45451
2	64	162	-4,45877	0,00445405	-4,4675	-4,45004
2	128	162	-5,12685	0,00445405	-5,13558	-5,11812
4	16	162	-3,40004	0,00445405	-3,40877	-3,39131
4	64	162	-4,39281	0,00445405	-4,40154	-4,38409
4	128	162	-5,07328	0,00445405	-5,08201	-5,06455
BCROSS by ALG						
1	LASH2CV	81	-4,58624	0,00629897	-4,59858	-4,57389
1	LASH3CV	81	-4,55254	0,00629897	-4,56489	-4,5402
1	SMART1CV	81	-4,61223	0,00629897	-4,62458	-4,59989
1	TOR2CV	81	-4,53535	0,00629897	-4,5477	-4,52301
1	TOR3CV	81	-4,57059	0,00629897	-4,58294	-4,55825
1	UD1CV	81	-4,89721	0,00629897	-4,90956	-4,88486
2	LASH2CV	81	-4,29991	0,00629897	-4,31226	-4,28757
2	LASH3CV	81	-4,28921	0,00629897	-4,30156	-4,27687
2	SMART1CV	81	-4,3275	0,00629897	-4,33985	-4,31516
2	TOR2CV	81	-4,26603	0,00629897	-4,27837	-4,25368
2	TOR3CV	81	-4,30959	0,00629897	-4,32194	-4,29725
2	UD1CV	81	-4,60547	0,00629897	-4,61782	-4,59313
4	LASH2CV	81	-4,23819	0,00629897	-4,25053	-4,22584
4	LASH3CV	81	-4,2376	0,00629897	-4,24994	-4,22525
4	SMART1CV	81	-4,26024	0,00629897	-4,27258	-4,24789
4	TOR2CV	81	-4,20649	0,00629897	-4,21884	-4,19415
4	TOR3CV	81	-4,24477	0,00629897	-4,25711	-4,23242
4	UD1CV	81	-4,54498	0,00629897	-4,55733	-4,53264
LONGMEN by DDEST						
32	HOT-SPOT05	162	-5,60421	0,00445405	-5,61294	-5,59548
32	HOT-SPOT15	162	-4,90965	0,00445405	-4,91838	-4,90092
32	UNIFORME	162	-4,37607	0,00445405	-4,3848	-4,36734
190	HOT-SPOT05	162	-4,85879	0,00445405	-4,86752	-4,85006
190	HOT-SPOT15	162	-4,15202	0,00445405	-4,16075	-4,14329
190	UNIFORME	162	-3,51461	0,00445405	-3,52334	-3,50588
256	HOT-SPOT05	162	-4,81215	0,00445405	-4,82088	-4,80342
256	HOT-SPOT15	162	-4,10514	0,00445405	-4,11387	-4,09641
256	UNIFORME	162	-3,45942	0,00445405	-3,46815	-3,45069
LONGMEN by TRED						
32	16	162	-4,03114	0,00445405	-4,03987	-4,02241
32	64	162	-5,08653	0,00445405	-5,09526	-5,0778
32	128	162	-5,77227	0,00445405	-5,781	-5,76354
190	16	162	-3,29479	0,00445405	-3,30352	-3,28606
190	64	162	-4,28086	0,00445405	-4,28959	-4,27213
190	128	162	-4,94977	0,00445405	-4,9585	-4,94104
256	16	162	-3,2491	0,00445405	-3,25783	-3,24037
256	64	162	-4,22916	0,00445405	-4,23789	-4,22043
256	128	162	-4,89846	0,00445405	-4,90719	-4,88973
LONGMEN by ALG						
32	LASH2CV	81	-4,9095	0,00629897	-4,92184	-4,89715
32	LASH3CV	81	-4,88095	0,00629897	-4,89329	-4,8686
32	SMART1CV	81	-4,96137	0,00629897	-4,97371	-4,94902
32	TOR2CV	81	-4,86819	0,00629897	-4,88054	-4,85585
32	TOR3CV	81	-4,91832	0,00629897	-4,93067	-4,90598
32	UD1CV	81	-5,24155	0,00629897	-5,25389	-5,2292
190	LASH2CV	81	-4,13294	0,00629897	-4,14528	-4,12059
190	LASH3CV	81	-4,12991	0,00629897	-4,14225	-4,11756
190	SMART1CV	81	-4,14042	0,00629897	-4,15277	-4,12807
190	TOR2CV	81	-4,09458	0,00629897	-4,10692	-4,08223
190	TOR3CV	81	-4,12532	0,00629897	-4,13766	-4,11297
190	UD1CV	81	-4,42769	0,00629897	-4,44004	-4,41535
256	LASH2CV	81	-4,08191	0,00629897	-4,09425	-4,06956

256	LASH3CV	81	-4,0685	0,00629897	-4,08085	-4,05616
256	SMART1CV	81	-4,09818	0,00629897	-4,11053	-4,08584
256	TOR2CV	81	-4,0451	0,00629897	-4,05745	-4,03276
256	TOR3CV	81	-4,08131	0,00629897	-4,09366	-4,06897
256	UD1CV	81	-4,37842	0,00629897	-4,39077	-4,36608
DDEST by TRED						
HOT-SPOT05	16	162	-4,02753	0,00445405	-4,03626	-4,0188
HOT-SPOT05	64	162	-5,28178	0,00445405	-5,29051	-5,27305
HOT-SPOT05	128	162	-5,96585	0,00445405	-5,97458	-5,95712
HOT-SPOT15	16	162	-3,48105	0,00445405	-3,48978	-3,47232
HOT-SPOT15	64	162	-4,47663	0,00445405	-4,48536	-4,4679
HOT-SPOT15	128	162	-5,20913	0,00445405	-5,21786	-5,2004
UNIFORME	16	162	-3,06645	0,00445405	-3,07518	-3,05772
UNIFORME	64	162	-3,83813	0,00445405	-3,84686	-3,8294
UNIFORME	128	162	-4,44552	0,00445405	-4,45425	-4,43679
DDEST by ALG						
HOT-SPOT05	LASH2CV	81	-5,09193	0,00629897	-5,10428	-5,07959
HOT-SPOT05	LASH3CV	81	-5,09505	0,00629897	-5,10739	-5,0827
HOT-SPOT05	SMART1CV	81	-5,09378	0,00629897	-5,10613	-5,08143
HOT-SPOT05	TOR2CV	81	-5,07842	0,00629897	-5,09077	-5,06608
HOT-SPOT05	TOR3CV	81	-5,08413	0,00629897	-5,09648	-5,07179
HOT-SPOT05	UD1CV	81	-5,107	0,00629897	-5,11934	-5,09465
HOT-SPOT15	LASH2CV	81	-4,33516	0,00629897	-4,34751	-4,32282
HOT-SPOT15	LASH3CV	81	-4,33539	0,00629897	-4,34774	-4,32305
HOT-SPOT15	SMART1CV	81	-4,37597	0,00629897	-4,38832	-4,36363
HOT-SPOT15	TOR2CV	81	-4,3677	0,00629897	-4,38004	-4,35535
HOT-SPOT15	TOR3CV	81	-4,41397	0,00629897	-4,42631	-4,40162
HOT-SPOT15	UD1CV	81	-4,50545	0,00629897	-4,51779	-4,4931
UNIFORME	LASH2CV	81	-3,69724	0,00629897	-3,70959	-3,6849
UNIFORME	LASH3CV	81	-3,64892	0,00629897	-3,66126	-3,63657
UNIFORME	SMART1CV	81	-3,73022	0,00629897	-3,74256	-3,71787
UNIFORME	TOR2CV	81	-3,56175	0,00629897	-3,57409	-3,5494
UNIFORME	TOR3CV	81	-3,62685	0,00629897	-3,6392	-3,6145
UNIFORME	UD1CV	81	-4,43522	0,00629897	-4,44757	-4,42288
TRED by ALG						
16	LASH2CV	81	-3,53323	0,00629897	-3,54558	-3,52089
16	LASH3CV	81	-3,51907	0,00629897	-3,53141	-3,50672
16	SMART1CV	81	-3,51105	0,00629897	-3,5234	-3,49871
16	TOR2CV	81	-3,50198	0,00629897	-3,51433	-3,48964
16	TOR3CV	81	-3,49721	0,00629897	-3,50955	-3,48486
16	UD1CV	81	-3,58752	0,00629897	-3,59986	-3,57517
64	LASH2CV	81	-4,48364	0,00629897	-4,49598	-4,47129
64	LASH3CV	81	-4,45982	0,00629897	-4,47217	-4,44748
64	SMART1CV	81	-4,49707	0,00629897	-4,50942	-4,48473
64	TOR2CV	81	-4,42571	0,00629897	-4,43806	-4,41337
64	TOR3CV	81	-4,51093	0,00629897	-4,52327	-4,49858
64	UD1CV	81	-4,81592	0,00629897	-4,82826	-4,80357
128	LASH2CV	81	-5,10747	0,00629897	-5,11982	-5,09512
128	LASH3CV	81	-5,10046	0,00629897	-5,11281	-5,08812
128	SMART1CV	81	-5,19184	0,00629897	-5,20419	-5,1795
128	TOR2CV	81	-5,08018	0,00629897	-5,09252	-5,06783
128	TOR3CV	81	-5,11682	0,00629897	-5,12916	-5,10447
128	UD1CV	81	-5,64423	0,00629897	-5,65657	-5,63188

Tabla A.1. Promedios.