



**Universitat  
Autònoma  
de Barcelona**

# **Cómputo Paralelo en Redes Locales de Computadoras**

Departament d'Informàtica  
Unitat d'Arquitectura d'Ordinadors  
i Sistemes Operatius

**Memoria presentada por Fernando  
G. Tinetti para optar al grado de  
Doctor por la Universitat  
Autònoma de Barcelona.**

Barcelona, 9 de Diciembre de 2003

# **Cómputo Paralelo en Redes Locales de Computadoras**

Memoria presentada por Fernando G. Tinetti para optar al grado de Doctor por la Universitat Autònoma de Barcelona. Este trabajo se ha realizado en el Departamento de Informàtica de la Universitat Autònoma de Barcelona bajo la direcci3n del Dr. Emilio Luque Fad3n.

El Director de la Tesis

Emilio Luque Fad3n

Barcelona, 9 de Diciembre de 2003

# Agradecimientos

A mi director, Emilio Luque, por su soporte durante el tiempo de desarrollo de este trabajo.

A los laboratorios involucrados y sus integrantes, a quienes de alguna manera u otra he afectado con este trabajo (en orden cronológico):

- Unidad de Arquitectura de Ordenadores y Sistemas Operativos, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España.
- Centro de Técnicas Analógico-Digitales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Informática, Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Laboratorio de Química Teórica, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.

A los profesores Alicia Jubert y Reinaldo Pis Diez, por su aporte desinteresado a este trabajo.

A los profesores Antonio Quijano y Armando De Giusti, por sus múltiples aportes, en múltiples áreas de este trabajo.

# Tabla de Contenido

<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Aplicaciones y Arquitecturas Paralelas.....	2
1.2 Costos de Cómputo Paralelo en las Redes Locales Instaladas.....	9
1.3 Resumen de Objetivos y Aportes de la Tesis y Organización del Contenido.....	13
<b>Capítulo 2: Multiplicación de Matrices.....</b>	<b>17</b>
2.1 Definición de la Multiplicación de Matrices.....	18
2.2 Operaciones de Algebra Lineal.....	19
2.2.1 BLAS: Basic Linear Algebra Subprograms y Rendimiento.....	20
2.2.2 L3 BLAS y Multiplicación de Matrices.....	21
2.3 La Multiplicación de Matrices como Benchmark.....	23
2.3.1 “Benchmark” del Nivel 3 de BLAS.....	24
2.3.2 Como Benchmark “General”.....	25
2.4 Paralelización de la Multiplicación de Matrices.....	25
2.4.1 Algoritmos Paralelos para Multiprocesadores.....	26
2.4.2 Algoritmos Paralelos para Multicomputadoras.....	32
2.5 Resumen del Capítulo.....	40
<b>Capítulo 3: Clusters Heterogéneos.....</b>	<b>42</b>
3.1 Características de los Clusters.....	43
3.1.1 Características de la Red de Interconexión de Procesadores.....	44
3.1.2 Cluster Homogéneo como Máquina Paralela.....	47
3.1.3 Cluster Heterogéneo como Máquina Paralela.....	50
3.2 Cómputo Paralelo en Clusters Heterogéneos.....	52
3.2.1 Multicomputadora Débilmente Acoplada.....	52
3.2.2 Red Ethernet para Interconexión de Procesadores.....	53
3.2.3 Bajo Rendimiento de la Red de Interconexión.....	55
3.2.4 Heterogeneidad de procesamiento.....	58
3.3 Principios de Paralelización de Aplicaciones en Clusters.....	60
3.4 Multiplicación de Matrices en Paralelo.....	61
3.4.1 Distribución de Datos.....	61
3.4.2 Cómputo .....	66
3.4.3 Cómputo Solapado con Comunicación.....	69

3.4.4 Reducción de Requerimientos de Memoria para Mensajes.....	71
3.4.5 Características Generales.....	72
3.4.6 Otras Formas de Distribuir Datos.....	73
3.5 Resumen del Capítulo.....	76
<b>Capítulo 4: Experimentación.....</b>	<b>77</b>
4.1 Características de las Redes Locales Utilizadas.....	78
4.1.1 Red Local del CeTAD.....	78
4.1.2 Red Local del LQT.....	80
4.1.3 Red Local del LIDI.....	81
4.2 Rendimiento Secuencial de las Computadoras.....	82
4.2.1 Tamaños de Matrices Utilizados.....	82
4.2.2 Red Local del CeTAD.....	84
4.2.3 Red Local del LQT.....	85
4.2.4 Red Local del LIDI.....	87
4.3 Análisis de Rendimiento Paralelo de las Redes Locales.....	88
4.3.1 Cálculo del Speedup Real.....	89
4.3.2 Cálculo del Speedup Optimo.....	89
4.4 Análisis de Rendimiento de los Algoritmos.....	96
4.4.1 SeqMsg: Cómputo y Comunicaciones Secuenciales.....	97
4.4.2 OverMsg: Cómputo y Comunicaciones Solapadas.....	98
4.5 Redes Locales y Algoritmos.....	98
4.5.1 Red Local del CeTAD.....	98
4.5.2 Red Local del LQT.....	101
4.5.3 Red Local del LIDI.....	103
4.6 Rendimiento Real de las Redes Locales Utilizando PVM.....	105
4.6.1 Red Local del CeTAD.....	106
4.6.2 Red Local del LQT.....	108
4.6.3 Red Local del LIDI.....	110
4.7 Perfiles de Ejecución en las Redes Locales Utilizando PVM.....	112
4.7.1 Red Local del CeTAD.....	112
4.7.2 Red Local del LQT.....	119
4.7.3 Red Local del LIDI.....	123
4.8 Rendimiento Real de las Redes Locales Utilizando “UDP”.....	128
4.8.1 Red Local del CeTAD.....	131
4.8.1.1 Matrices de 2000×2000 Elementos.....	131
4.8.1.2 Matrices de 3200×3200 Elementos.....	140
4.8.1.3 Conclusiones Generales de la Experimentación en CeTAD.....	143

4.8.2 Red Local del LQT.....	143
4.8.3 Red Local del LIDI.....	146
4.9 Conclusiones-Resumen de la Experimentación.....	148
<b>Capítulo 5: Comparación con ScaLAPACK.....</b>	<b>150</b>
5.1 Características Generales de ScaLAPACK.....	151
5.2 Paralelización de la Factorización LU.....	152
5.2.1 Algoritmo Secuencial de Factorización LU por Bloques.....	152
5.2.2 Algoritmo Paralelo de Factorización LU para Multicomputadoras.....	154
5.2.3 Algoritmo Paralelo de Factorización LU para Clusters.....	155
5.3 Experimentación.....	158
5.3.1 Conjunto de Experimentos.....	159
5.3.2 Resultados: ScaLAPACK-PVM.....	162
5.3.3 Resultados: ScaLAPACK-MPICH.....	166
5.3.4 ScaLAPACK-MPICH y Escalabilidad.....	169
5.4 Resumen de la Comparación con ScaLAPACK.....	171
<b>Capítulo 6: Conclusiones y Trabajo Futuro.....</b>	<b>173</b>
6.1 Conclusiones.....	174
6.2 Resumen de Aportes y Publicaciones Relacionadas con Esta Tesis.....	182
6.3 Trabajo Futuro.....	186
<b>Bibliografía.....</b>	<b>189</b>
<b>Apéndice A: Características de las Redes Locales.....</b>	<b>202</b>
A.1 Introducción: Características de Hardware y Software.....	203
A.2 Redes Locales.....	204
A.2.1 Red Local del CeTAD.....	205
A.2.2 Red Local del LQT.....	206
A.2.3 Red Local del LIDI.....	206
A.3 Detalle de las Computadoras.....	207
A.3.1 Computadoras de la Red Local del CeTAD.....	207
A.3.2 Computadoras de la Red Local del LQT.....	209
A.3.3 Computadoras de la Red Local del LIDI.....	211

**Apéndice B: Rendimiento de Procesamiento Secuencial de las**

<b>Computadoras.....</b>	<b>212</b>
B.1 Introducción.....	213
B.2 Computadoras Utilizadas.....	214
B.3 Descripción de los Experimentos.....	215
B.3.1 Código sin Optimización.....	216
B.3.2 Optimizaciones del Compilador.....	216
B.3.3 Optimización del Código Fuente.....	217
B.3.4 Tamaños de Matrices a Multiplicar.....	218
B.4 Rendimiento de la Multiplicación de Matrices.....	220
B.4.1 Rendimiento sin Optimización.....	220
B.4.2 Rendimiento con Optimizaciones del Compilador.....	223
B.4.3 Rendimiento con Optimización del Código Fuente.....	225
B.4.4 Matrices Mayores en las Computadoras Con Mayor Capacidad de Cómputo .....	229
B.5 Rendimiento en las Computadoras del LIDI.....	231
B.6 Conclusiones.....	232
Referencias.....	233

**Apéndice C: Comunicaciones en la Red Local del CeTAD.....235**

C.1 Introducción.....	236
C.2 Redes Ethernet.....	237
C.3 Evaluación del Rendimiento.....	239
C.4 Evaluación con el Método de ping-pong.....	240
C.5 Distintas Formas de Transmisión de Mensajes con PVM.....	241
C.5.1 Codificación de los Datos de un Mensaje en PVM.....	242
C.5.2 Traducción Directa de Representación de Datos.....	245
C.5.3 Ruteo de los Datos de un Mensaje en PVM .....	246
C.6 Distintas Formas de Transmisión de Mensajes con MPI.....	247
C.7 Experimentación Inicial con PVM.....	248
C.7.1 Rendimiento con Ruteo entre pvmds y con Codificación.....	249
C.7.2 Rendimiento con Ruteo entre pvmds y con Traducción de Representación..	251
C.7.3 Rendimiento con Ruteo entre Tareas de Usuario y con Codificación.....	252
C.7.4 Rendimiento con Ruteo entre Tareas de Usuario y con Traducción de Representación.....	254
C.7.5 Conclusiones de la experimentación con PVM.....	255

C.8 Experimentación con el Comando ping de Linux.....	256
C.9 Conclusiones de la Experimentación de PVM y ping de Linux.....	258
C.10 Broadcasts Basados en UDP.....	260
C.10.1 Un Unico Receptor (Mensajes Punto a Punto).....	263
C.10.2 Mensajes Broadcasts.....	265
C.11 Broadcasts en la Red Local del LQT.....	266
C.12 Broadcasts en la Red Local del LIDI.....	267
Referencias.....	268
<b>Indice Alfabético.....</b>	<b>269</b>