

10
7º CONGRESO LATINOAMERICANO DE CONTROL AUTOMATICO - LACC • IFAC
9 al 13 de Setiembre de 1996 - Buenos Aires - Argentina

CONTROL EN SISTEMAS DE POTENCIA (064)

JS
di
SISTEMA DE PROCESAMIENTO PARALELO Y SU APLICACION AL
DESPACHO ECONOMICO CON RESTRICCIONES AMBIENTALES

JS
S
S,
S
le
,
o
ir
,
S
S

Aldo Cipriano, María Ramos, René Vidal y Domingo Mery

*Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile
Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile
Tel: 56-2-6864281; fax: 56-2-5522563; e-mail: aciprian@ing.puc.cl*

Resumen: En este trabajo se describe el computador paralelo PowerXplorer de Parsytec, su sistema operativo PARIX, su sistema de comunicaciones y el software utilizado en los desarrollos. El trabajo presenta también las alternativas de solución en el sistema paralelo del problema despacho económico de generación de energía eléctrica con restricciones ambientales.

Abstract: In this paper, the parallel computer PowerXplorer of Parsytec, its operative system PARIX, its communications system and the software used are described. The work presents the solution alternatives of the economical dispatch problem with environmental constrains.

Keywords: Computación paralela; despacho económico; restricciones ambientales; optimización.

1. INTRODUCCION

La automatización y la optimización son tecnologías que al ser aplicadas en empresas productivas y de servicios permiten reducir costos y aumentar eficiencias. En estas aplicaciones se hace uso intensivo de modernas metodologías de diseño basadas, por ejemplo, en optimización dinámica, procesamiento de imágenes e ingeniería neuronal. Los requerimientos computacionales asociados a estas técnicas exceden en muchas oportunidades, y con creces, a las capacidades disponibles en computadores convencionales. En estos casos cabe considerar la posibilidad de utilizar equipos de procesamiento paralelo, que asignan partes del trabajo numérico a unidades que trabajan en forma simultánea e independiente, para luego intercambiar resultados, disminuyendo así los tiempos totales de ejecución (Bertsekas, 1989).

Una de las aplicaciones en el área de generación de energía eléctrica, cuya solución requiere de una gran capacidad computacional es el despacho económico con restricciones ambientales, problema que aumenta su importancia en la medida que las consideraciones ambientales adquieren más relevancia. Reducir la polución atmosférica será uno de los desafíos más importantes que deberán enfrentar las empresas eléctricas en las próximas décadas.

Entre las principales metas se destaca una reducción en las emisiones de óxido de nitrógeno y dióxido de azufre. Una de las alternativas para el control de estas emisiones es incluir en el problema de despacho económico, en el cual se minimizan los costos de generación, restricciones que mantengan las emisiones de contaminantes bajo un umbral establecido. La complejidad de este nuevo problema hace necesaria, para su solución, la utilización de

herramientas computacionales poderosas como lo es la computación paralela.

En este trabajo se describen las principales características de un sistema de procesamiento paralelo, en particular, de los equipos PowerXplorer de la empresa alemana Parsytec. A continuación se plantea el problema de despacho económico sujeto a restricciones ambientales y sus algoritmos de solución. Finalmente se proponen alternativas de paralelización de estos algoritmos.

2. EL SISTEMA POWERXPLOLER

2.1 Descripción de PowerXplorer

El sistema de computación paralela utilizado en este trabajo es comercializado por la empresa alemana Parsytec y está compuesto por 2 PowerXplorer, cada uno de 4 nodos conectados de la manera mostrada en la Figura 2 (Parsytec, 1994).

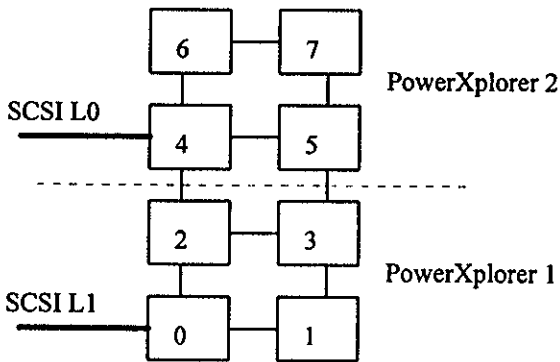


Figura 2. Conexión de procesadores.

La Figura 3 muestra el sistema de computación paralela. Cada nodo está compuesto por un procesador PowerPC 601, de tecnología RISC, de 64 bits, que trabaja a una velocidad de 80 MFlops. El nodo cuenta además con una memoria RAM de 32 MB, 1 MB de memoria caché y un transputer Immos T805 para comunicaciones. Cada PowerXplorer está conectado, a través de un controlador SCSI, a una estación de trabajo SPARClassic 5 que actúa como servidor del sistema.

2.2 El sistema operativo Parix

Parix es el ambiente de operación desarrollado por Parsytec para sus sistemas de computación paralela (Parsytec, 1995). Parix está basado en el sistema operativo UNIX al que se han agregado las extensiones necesarias para satisfacer los requerimientos de operación de un computador paralelo. Parix se entiende, entonces, como "Parallel extensions to Unix".

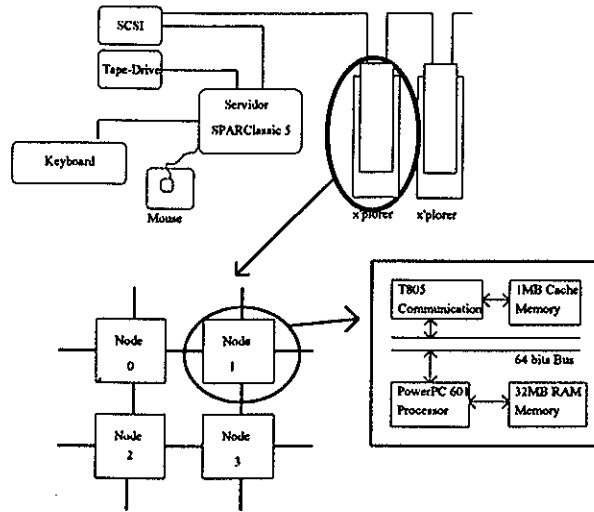


Figura 3. Sistema de computación paralela.

Parix provee las herramientas que permiten la administración del sistema y el desarrollo y ejecución de programas de aplicación. Desde este último punto de vista, Parix dispone de compiladores C y Fortran y de los respectivos depuradores de programa (debugger), así como herramientas para la programación, como librerías numéricas, funciones gráficas, rutinas de entrada-salida y de comunicaciones.

Parix es un ambiente MIMD (Multiple Instruction Multiple Data) para sistemas paralelos donde cada nodo consta de uno o más procesadores, una memoria local y una unidad de comunicaciones conectada a los nodos vecinos, estructura como la que poseen los PowerXplorer.

2.3 Otros ambientes de desarrollo

El sistema de computación paralela que se utilizará en este trabajo dispone también de otra herramienta de software para el desarrollo de código paralelo. Se trata de Parmacs, comercializado por la empresa alemana Pallas. Parmacs es un ambiente para la programación, depuración, ejecución y análisis de los programas de aplicación. Posee compiladores y depuradores C y Fortran, así como un conjunto de librerías para la organización del sistema paralelo y para comunicaciones (Pallas, 1994).

Entre las herramientas de análisis se cuentan TraceGenerator y ParaGraph+. La primera genera, durante la ejecución de un programa, un archivo que contiene información acerca de las tareas realizadas por cada procesador y los tiempos de ejecución. ParaGraph+, por su parte, utiliza esta información para analizar en forma gráfica el rendimiento del programa, principalmente en lo que dice relación con la comunicación entre procesadores.

2.
C
si
de
de
Ti
tra
lo
to
no
m
de
(v
inc
o
con
la

Me
la
lon
obt
que
con
sist
vel
con
enc
se
vel

Por
serv
alca
MB/
KBy
del s
la d
cum
duro
resul

Velocidad de comunicación (Mbytes/sag)
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0

Figura

2.4 Comunicaciones en el sistema PowerXplorer

Como se muestra en la Figura 3, cada nodo de un sistema PowerXplorer posee un transputer T805 dedicado exclusivamente a la tarea de transferencia de datos entre los nodos del sistema. Un transputer T805 puede enlazarse físicamente hasta con 4 transputers vecinos; sin embargo, la utilización de los enlaces lógicos, construidos a partir de topologías programadas, permite que todos los nodos del sistema puedan comunicarse entre sí de manera transparente para el programador. A manera de ejemplo, si el nodo 3 desea enviar datos al nodo 4 (ver figura 2), en la programación no es necesario indicar cuál será el nodo intermedio de paso, nodo 2 o nodo 5, que se utilizará para establecer la comunicación; el sistema se encargará de encontrar la mejor ruta.

Mediante pruebas realizadas en laboratorio se midió la velocidad de comunicación en función de la longitud en bytes del mensaje a transmitir. La curva obtenida se muestra en la Figura 4 donde se aprecia que a partir de mensajes de longitud de 5 KBytes se consigue una velocidad de 1 MB/seg. En los sistemas PowerXplorer se puede obtener esta velocidad entre dos nodos cualesquiera, bajo la condición de que el enlace seleccionado se encuentre libre. Si el enlace se encontrara ocupado, se originarán colas de espera, disminuyendo la velocidad de comunicación.

Por otra parte la velocidad de comunicación entre el servidor Sun y los procesadores es mucho menor, alcanzando en el mejor de los casos sólo los 0,25 MB/seg. para paquetes cuya longitud es mayor a 500 KBytes (ver Figura 5). Esta razón restringe la acción del servidor Sun sólo a la realización de tareas como la definición de las funciones que cada nodo debe cumplir, el control de los recursos del sistema (disco duro, monitor, etc.) y la recopilación de los resultados obtenidos por los nodos.

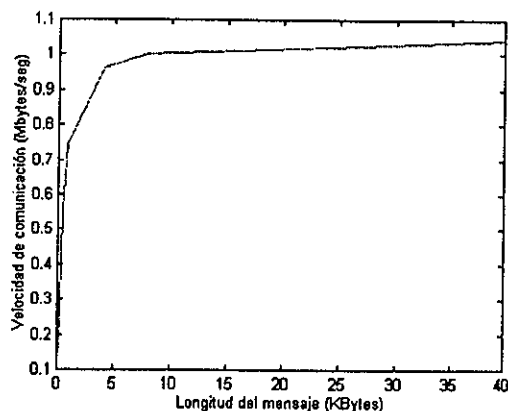


Figura 4. Velocidad de transmisión entre dos nodos.

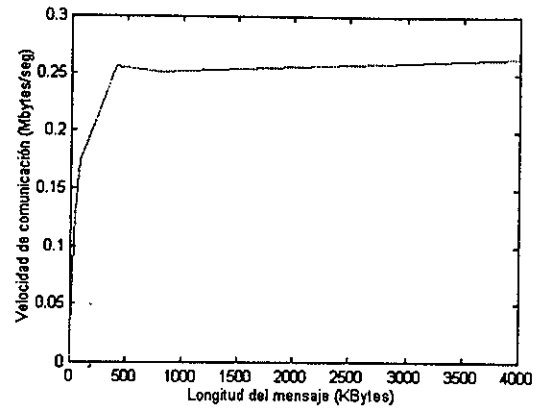


Figura 5. Velocidad de transmisión entre servidor y un nodo.

3. DESPACHO ECONOMICO CON RESTRICCIONES AMBIENTALES

El despacho económico de generación de energía eléctrica está orientado a minimizar los costos operacionales satisfaciendo las restricciones de igualdad y desigualdad determinadas por los requerimientos del sistema de potencia. Agregar aspectos ambientales a este problema incrementa la complejidad computacional y hace necesaria la utilización de técnicas más avanzadas de procesamiento como la computación paralela.

A continuación se describe el problema de despacho económico clásico, el problema de despacho con restricciones ambientales y los algoritmos de solución tanto seriales como paralelos aplicables en cada caso.

3.1 El problema de despacho económico de generación

En el despacho económico clásico el objetivo es minimizar los costos totales de generación de energía eléctrica satisfaciendo restricciones de igualdad y desigualdad para la potencia generada por cada unidad generadora.

Típicamente los costos de la unidad i se asumen como una función cuadrática de la potencia activa, esto es:

$$F_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (1)$$

donde:

$F_i(P_i)$: Costo de generación de la unidad i

P_i : Potencia generada por la unidad i

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$: coeficientes obtenidos generalmente en forma empírica.

La formulación del despacho económico clásico es, entonces, la siguiente:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (2)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L$$

$$P_{i_{\min}} \leq P_i \leq P_{i_{\max}} \quad i = 1, \dots, n$$

donde:

- P_D : Potencia demandada
- P_L : Pérdidas de transmisión
- n : número de generadores conectados al sistema

Las pérdidas de transmisión pueden modelarse, en función de la potencia generada, mediante la siguiente expresión:

$$P_L = \sum_{i=1}^n l_i P_i^2 \quad (3)$$

con l_i coeficientes conocidos.

3.2 Incorporación de consideraciones ambientales

La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles genera muchos contaminantes tales como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono. Para reducir la polución atmosférica, las empresas generadoras plantean las siguientes alternativas: invertir en tecnologías que reducen la contaminación, cambiar de combustible o incluir las restricciones de emisión de contaminantes en la operación del sistema.

Para incluir las emisiones en el despacho de la generación se han propuesto diferentes métodos:

- a) Minimizar la emisión total de contaminantes producida por una planta, reemplazando en (2), el costo de generación por una función de emisión.
- b) Incluir el control de la emisión en el despacho económico convencional, agregando a (2) un costo medioambiental. Para ello es necesario expresar la emisión de los distintos contaminantes como un costo de generación.
- c) Resolver el problema de minimización con la función objetivo (2) pero incorporando las restricciones de emisión, lo cual conduce a:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (4)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L$$

$$P_{i_{\min}} \leq P_i \leq P_{i_{\max}} \quad i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n E_{ij}(P_i) \leq E_{j_{\max}} \quad j = 1, \dots, m$$

donde $E_{ij}(P_i)$ es la emisión de contaminante j , en la unidad i , la que puede expresarse en términos de la potencia generada:

$$E_{ij}(P_i) = a_{ij} + b_{ij} P_i + c_{ij} P_i^2 \quad (5)$$

Los coeficientes a_{ij} , b_{ij} y c_{ij} se obtienen generalmente en forma empírica, ajustando a datos experimentales un polinomio de segundo orden.

3.3 Algoritmo de solución

El problema de despacho económico con restricciones de emisión, planteado en (4-5), se resuelve mediante el uso del método de optimización basado en relajación lagrangeana (El-Keib, 1994). La función de Lagrange para el problema puede expresarse como:

$$L(P, \lambda, \mu) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_i - P_D - P_L \right) + \sum_{j=1}^m \mu_j \left(\sum_{i=1}^n E_{ij} - E_{j_{\max}} \right) \quad (6)$$

donde λ y μ_j son los multiplicadores respectivos, $P = \{P_i\}$ es el arreglo de potencias generadas y $\mu = \{\mu_j\}$ el arreglo de multiplicadores. La ecuación (6) puede reescribirse como:

$$L(P, \lambda, \mu) = \sum_{i=1}^n (F_i(P_i)) + \sum_{j=1}^m \mu_j E_{j_{\max}} + \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_i - P_D - P_L \right) - \sum_{j=1}^m \mu_j E_{j_{\max}} \quad (7)$$

El problema relajado consiste en hacer μ constante en la expresión anterior, de tal manera que L pueda minimizarse como si se tratara de un problema de despacho económico clásico, introduciendo los cambios necesarios en la función objetivo. Se obtiene entonces:

$$\text{Mín } L(P, \lambda, \mu) \quad (8)$$

$\mu \geq 0$ y constante

sujeto a:

$$P_{\text{mín}} \leq P_i \leq P_{\text{máx}} \quad i = 1, \dots, n$$

Resolviendo (8) se obtiene la solución óptima $P^*(\mu)$ y $\lambda^*(\mu)$. Dada esta solución, μ^* se encuentra resolviendo el problema dual dado por:

$$\text{Máx } L(P^*(\mu), \lambda^*(\mu), \mu) \quad (9)$$

sujeto a:

$$\mu \geq 0$$

Para aplicar el método descrito a la solución del problema de despacho económico con restricciones de emisión, deben seguirse los siguientes pasos:

1. Hacer $\mu_j = 0$ para $j = 1, \dots, m$
2. Hacer $\lambda = \lambda^{(0)}$
3. Resolver (8) para λ dado y determinar $\{P_j\}$
4. Actualizar λ . Si se alcanzó convergencia, ir a 5. En caso contrario, volver a 3.
5. Determinar las emisiones y analizar si se satisfacen las restricciones. Si es así, se alcanzó la solución óptima.
6. En caso contrario, resolver (9) para la restricción de emisión más insatisfecha, encontrando un nuevo μ_j (con j correspondiente a la restricción más insatisfecha) y volver a 2.

La Figura 6 muestra el diagrama de flujo correspondiente.

3.4 Paralelización de los algoritmos de solución

La Figura 6 destaca la existencia de varias tareas secuenciales y una tarea paralelizable, el cálculo de las potencias óptimas de cada unidad generadora.

Para el análisis siguiente se considerará un sistema paralelo con p procesadores y n unidades generadoras; por simplicidad se asumirá que n es un múltiplo de p ($n = pq$).

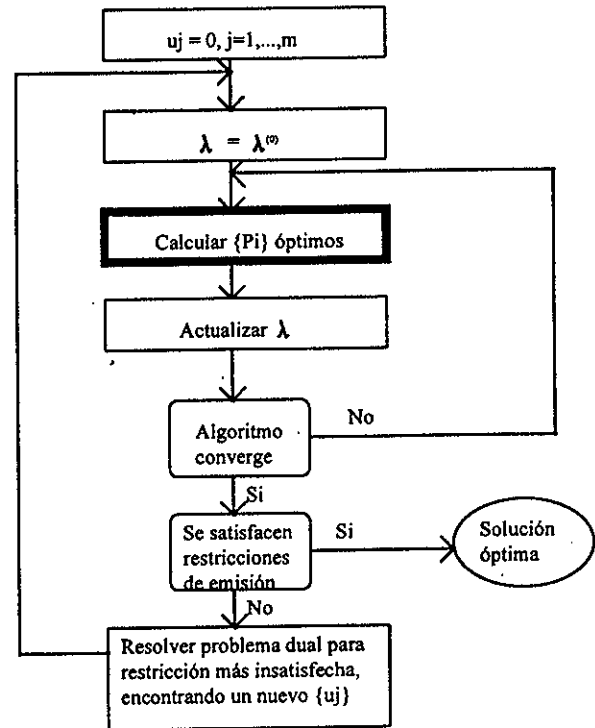


Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo.

El diagrama de la Figura 6 sugiere asignar al procesador k la tarea de determinar la potencia generada óptima de las unidades $h = kq - q + 1, \dots, kq$, lo cual es posible ya que el problema relajado es separable. Esto significa que si μ es constante e introduciendo (1), (3) y (5), la ecuación (7) se convierte en una expresión de la siguiente forma:

$$L(P, \lambda) = \sum_{i=1}^n L_i(P, \lambda) = \sum_{k=1}^p \sum_{h=kq-q+1}^{kq} L_h(P, \lambda) \quad (10)$$

con

$$L_h(P, \lambda) = A_h + (B_h + \lambda)P_h + (C_h - \lambda I_h)P_h^2 \quad (11)$$

y A_h , B_h y C_h son constantes dependientes de los parámetros α , β , γ , a , b , c , μ y $E_{\text{máx}}$

Dados el arreglo μ y un valor de λ , el procesador k determinará los P_h óptimos minimizando L_h sujeto a las condiciones de borde dadas por:

$$P_{h_{\text{mín}}} \leq P_h \leq P_{h_{\text{máx}}}$$

con $h = kq - q + 1, \dots, kq$.

Realizada esta tarea simultáneamente por los p procesadores, el procesador 1 actualizará λ , mediante un criterio tipo gradiente, y enviará este valor a los $(p-1)$ procesadores restantes. A continuación se efectúa una nueva etapa de procesamiento paralelo y

una nueva determinación de λ , hasta que el algoritmo converja.

El servidor del sistema inicializará el algoritmo y enviará al procesador 1 los parámetros requeridos. También evaluará las restricciones de emisión y resolverá el problema dual, dado por (9), para luego transferir un nuevo μ al procesador 1 y determinar finalmente la solución óptima después de un número limitado de iteraciones.

La Figura 7 muestra un diagrama temporal de la ejecución del algoritmo paralelo; en ella se destacan las siguientes actividades en el servidor y en los procesadores p_1, \dots, p_p :

- 1: Servidor inicializa el sistema
- 2: Servidor envía parámetros a p_1
- 3: p_1 recibe parámetros del servidor
- 4: p_1 envía λ a p_2, \dots, p_p
- 5: p_2, \dots, p_p reciben datos de p_1
- 6: p_2, \dots, p_p calculan P_h óptimos
- 7: p_2, \dots, p_p envían P_h a p_1
- 8: p_1 recibe P_h de p_2, \dots, p_p
- 9: p_1 evalúa convergencia
- 10: p_1 actualiza λ

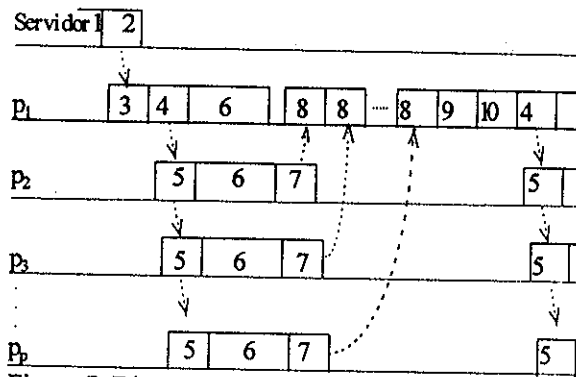


Figura 7. Diagrama de ejecución temporal.

3.5 Eficiencia del computador paralelo

El desempeño del computador paralelo puede evaluarse calculando su ganancia de velocidad y eficiencia para un determinado algoritmo. La ganancia de velocidad G_v se define como:

$$G_v = \frac{T_{serial}}{T_{paralelo}} \quad (12)$$

en que T_{serial} es el tiempo de ejecución del algoritmo en un procesador y $T_{paralelo}$ el tiempo de ejecución del algoritmo en p procesadores trabajando en paralelo. Por su parte, la eficiencia η está dada por:

$$\eta = \frac{G_v}{p} \times 100 \quad (13)$$

Para el problema tratado en este trabajo, si T_1 es el tiempo requerido para el cálculo de la potencia óptima de una unidad generadora y T_o el tiempo requerido para evaluar la convergencia, entonces, para $n=pq$ generadores se tiene:

$$T_{serial} = p q T_1 + T_o \quad (14)$$

El tiempo de ejecución del algoritmo paralelo con p procesadores y n unidades generadoras será:

$$T_{paralelo} = q T_1 + T_o + T_{com} \quad (15)$$

donde T_{com} es el tiempo que requiere la transferencia de datos. A partir de la Figura 4 y considerando que un dato corresponde a 8 Bytes, se obtuvo la siguiente relación entre el tiempo de comunicación entre dos nodos y el número N de datos a transmitir:

$$T_{com} = 76,2 N + 3636,6 \quad (16)$$

con T_{com} en μseg .

En cada iteración del algoritmo paralelizado, el procesador 1 envía el valor actual de λ a cada uno de los restantes $p-1$ procesadores y, luego de realizado el cálculo en paralelo, recibe de cada uno de ellos las q potencias calculadas. Entonces, el número de transferencias de datos por iteración, será:

$$N = (p-1) + q(p-1) \quad (17)$$

Ya que $T_o \ll T_1$, la ganancia de velocidad estará dada entonces por:

$$G_v(p) = \frac{p q T_1}{q T_1 + 76,2(p-1)(q+1) + 3636,6} \quad (18)$$

y la eficiencia:

$$\eta(p) = \frac{q T_1}{q T_1 + 76,2(p-1)(q+1) + 3636,6} \times 100 \quad (19)$$

El tiempo T_1 se evaluó ejecutando el algoritmo en un procesador obteniendo $T_1 = 1500 \mu\text{seg}$. Con este valor es posible graficar las curvas de ganancia de velocidad y eficiencia en función del número de procesadores, las que se muestran en las Figuras 8 y 9, parametrizadas en el número de generadores por procesador (q).

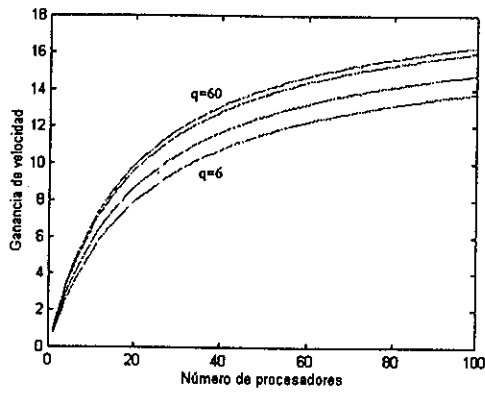


Figura 8. Ganancia de velocidad.

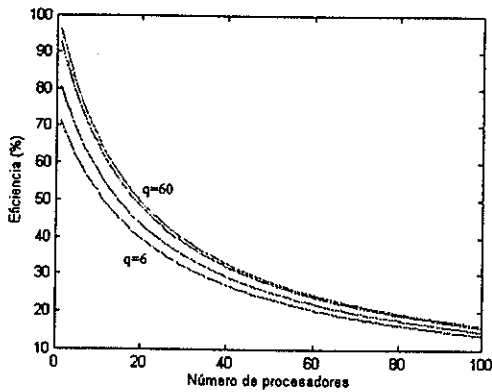


Figura 9. Eficiencia del computador paralelo.

La Tabla 1 muestra la ganancia de velocidad y la eficiencia determinada para un sistema PowerXplorer de 8 procesadores, para diferentes valores de q .

Tabla 1 Ganancia de velocidad y eficiencia

q	Gv	$\eta(\%)$
6	4,4	55,0
10	4,9	61,2
15	5,2	64,9
30	5,5	69,0
60	5,7	71,3

4. CONCLUSIONES

El estudio realizado muestra que el sistema Parsytec es especialmente adecuado en problemas con fuertes requerimientos computacionales como el despacho económico con restricciones ambientales, debido a que:

- el algoritmo de solución presenta la posibilidad de paralelizar la tarea de mayor significación, que es el cálculo de las potencias óptimas para cada unidad generadora.

- la estructura de comunicación del computador paralelo permite realizar transferencias de resultados entre procesadores en tiempos cortos comparados con los tiempos de ejecución de las tareas de cálculo.

En la actualidad se avanza en la programación de la solución paralela al problema de despacho económico, y de otras aplicaciones relacionadas con optimización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Europea por el financiamiento otorgado para el proyecto ITDC 118 Parallel Computing on Industrial Automation and Dynamic Optimization y a la Dirección de Investigación y Postgrado de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DIPUC) por su apoyo económico.

REFERENCIAS

- Bertsekas, D., Tsitsiklis, J. (1989). Parallel and distributed computation. *Prentice-Hall, Inc.* New Jersey.
- El-Keib, A., Ma, H., Hart, J. (1994). Environmentally constrained economic dispatch using the Lagrangian relaxation method. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 9, N° 4, November 1994, pp. 1723-1729.
- Pallas Parmacs 6.0. (1994). Reference Manual.
- Parsytec Parix 1.3.1 for Power PC. (1995). Software Documentation.
- Parsytec PowerXplorer. (1994). Hardware user guide.