

CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS MEDIANTE HIGH PERFORMANCE COMPUTING

José Enrique Alvarez Estrada
Ricardo Armando Barrera Cámara
Sergio Isaac Torres Zamora*

Resumen

La demanda de servicios de cómputo para aplicaciones geofísicas, especialmente aquellas destinadas a la caracterización y simulación de yacimientos en la industria petrolera, va en constante alza. La tendencia hasta ahora ha sido a la adquisición o alquiler de equipos dedicados de muy alto rendimiento y costo proporcional. Este trabajo presenta un enfoque distinto, consistente en la creación de un cluster que aproveche la infraestructura de tecnologías de información (TI) existente en una universidad pública durante horas no lectivas. Se discuten los beneficios esperados en cuanto a Retorno de Inversión (RoI), know-how y transferencia tecnológica.

Palabras claves

Cluster, geofísica, Linux, retorno de inversión, transferencia tecnológica.

Introducción

La geofísica, especialmente aquella empleada en la industria petrolera, requiere de alto poder de cómputo para cumplir con su misión. Tradicionalmente ello ha significado el empleo de equipos de alto desempeño (súper cómputo) dedicados, como los ofrecidos por Cray Inc. (ahora Silicon Graphics Inc.[1]), Hewlett-Packard [2] ó Sun Microsystems [3], sólo por citar algunos.

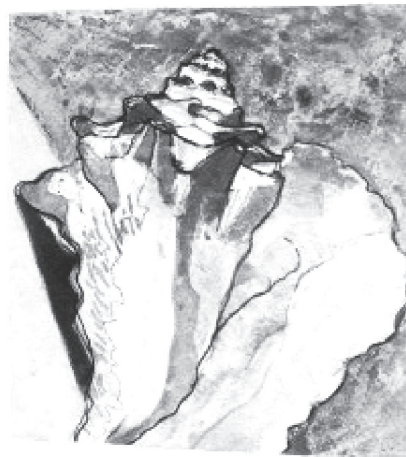
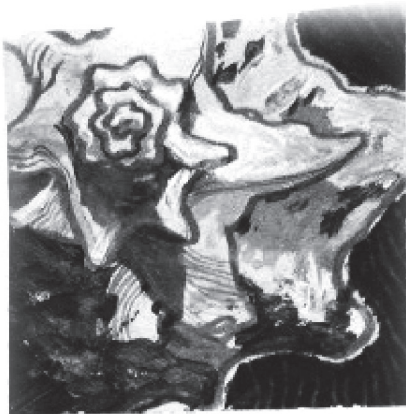
Pero dado que muchos de los algoritmos utilizados son altamente paralelizables en clusters debido a la granularidad intrínseca al problema, en los últimos años ha iniciado una tendencia al uso de cómputo paralelo débilmente acoplado, casi siempre mediante la adquisición o renta de clusters dedicados.

Clusters dedicados

Por ejemplo, el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) inició con la implantación de un clúster de 125 nodos esclavos –apilados en racks– junto con un nodo maestro, empleando procesadores Intel con sistema operativo Linux (distribución RedHat). Dicho clúster, que de acuerdo a [4] se emplea en labores de simulación molecular, medición de dispersión de contaminantes y yacimientos naturalmente fracturados, entre otras, ha conseguido rendimientos medidos mediante HPL de 160.9 GigaFlops, lo cual lo colocó en su momento en la posición 218 de la lista “Top 500” de súper cómputo.

Un caso más reciente y notorio de este tipo de clusters es el Kan Balam de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) [5]: El sistema HP Cluster Platform 4000, KanBalam, es la supercomputadora paralela más poderosa de México y América Latina con una capacidad de procesamiento de 7,113 Teraflops (7,113 billones de operaciones aritméticas por segundo). Cuenta con 1,368 procesadores (cores AMD Opteron de 2.6 GHz), una memoria RAM total de 3,000 Gbytes y un sistema de almacenamiento masivo de 160 Terabytes. Con todo ello [6] ocupa la 126ª posición en el “Top 500”, siendo la 44ª entre las académicas y de investigación y la 28ª entre las universidades del mundo, a un costo de aproximadamente 3 millones de dólares.

Si bien este tipo de clusters logra en efecto altas tasas de desempeño, también supone para la institución que lo compra o renta un bajo retorno de inversión (RoI), puesto que: a) se trata de equipo nuevo que debe adquirirse, es decir, no se reutiliza equipo con el que cuenta la institución; y b) el único uso que se le da es como nodo del cluster, y no como estación de trabajo.



En cambio, en este trabajo se propone un esquema de reutilización de la infraestructura instalada en el Centro de Tecnologías de Información (CTI) de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), durante horas no lectivas, con el objeto de maquilar procesamiento de datos –primeramente geofísicos y de caracterización y simulación de yacimientos, posteriormente de cualquier otro tipo- a la industria petrolera, con beneficios tangibles:

1. El desarrollo de know-how en cómputo paralelo, mediante la programación de los algoritmos;
2. La obtención de ingresos económicos para las instituciones participantes, por concepto de alquiler de tiempo de procesamiento; y
3. El mejoramiento del Rol del CTI, a un costo residual.

Hay que señalar que no se pretende obtener beneficio alguno por concepto de venta o alquiler del software: éste se desarrollará mediante licencia GPL (GNU Public License) o similar, sino únicamente por el alquiler del tiempo de procesamiento.

La situación de las TI en las IES

La inversión en infraestructura de Tecnologías de Información (TI) en las Instituciones de Educación Superior (IES) ha ido en constante alza en los últimos años. Hoy no se concibe un plan de estudios de cualquier carrera sin la consiguiente formación en el uso de TI, bien sea como instrumento de cálculo, simulación, o como elemento integrador de telecomunicaciones y telemática.

Según un estudio realizado por [7], en promedio las IES tienen 2,284 PC's, 46 servidores, 9 ruteadores, 105 switches, 22 switches y 1,929 servicios de UTP; se trata de una PC por cada 9 personas (alumno o personal), y va en aumento.

Llama la atención que tal cifra es un 167% del número de procesadores de Kan Balam, y un 1,812% del cluster del IMP.

$$2,284 \text{ PCs por IES} / 1,368 \text{ procesadores Kan Balam} * 100 = 167\% \quad (1)$$

$$2,284 \text{ PCs por IES} / 126 \text{ procesadores cluster IMP} * 100 = 1,812\% \quad (2)$$

Aunque la infraestructura de telecomunicaciones de un cluster construido ex profeso sin duda supera en transferencia de datos al de una red universitaria, también es cierto que la diferencia en poder de cómputo expresada por las ecuaciones (1) y (2) no puede desestimarse, aun descartando las posibles diferencias de velocidad entre sus respectivos procesadores.

La vida útil de un equipo de cómputo es de unos 5 años, pero debido a la Ley de Moore, que afirma que el poder de cómputo se duplica y el costo se reduce a la mitad cada 18 meses, en general se reduce a este plazo de año y medio antes que las presiones por parte de la comunidad exijan su reemplazo por un equipo más reciente, argumentando su "obsolescencia".

En las universidades con dos turnos –matutino y vespertino- el uso del equipo es como máximo de 16 horas diarias (generalmente menos). Tomando en cuenta semanas de 5 días laborables, ello nos da un total de 80 horas semanales de uso. El calendario académico de las universidades, especialmente de aquellas que operan con plan de estudios semestral, es de unas 40 semanas anuales, ocupándose las 12 semanas estantes para vacaciones, periodos intersemestrales, etc. Por tanto, el tiempo total de uso de una computadora durante su vida útil es de:

$$(16 \text{ horas/día})(5 \text{ días/semana})(40 \text{ semanas/año})(1.5 \text{ años/equipo}) = 4800 \text{ horas/equipo} \quad (3)$$

Ahora bien, un equipo de cómputo moderno debidamente instalado –con suficiente refrigeración y protección contra fallas en el suministro eléctrico- puede trabajar toda su vida útil a 24x7 (24 horas/día, 7 días/semana). Si descontamos los breves lapsos de tiempo necesarios para el mantenimiento preventivo (fundamentalmente retirar el polvo atraído a las placas electrónicas por la electricidad estática) que en general no duran arriba de 20 minutos, podemos considerar un 99% de tiempo de funcionamiento:

$$(24 \text{ horas/día})(7 \text{ días/semana})(52 \text{ semanas/año})(1.5 \text{ años/equipo})(99\%) = 12,973 \text{ horas/equipo} \quad (4)$$

Por tanto, el uso real que se le da a cada equipo es de:

$$4800 \text{ horas} / 12973 \text{ horas} * 100 = 37\%$$

Las máquinas se emplean sólo el 37% del tiempo, sobre un ya recortado periodo de 1.5 años de los 5 años de vida útil posible. Y debido a que la inmensa mayoría de tales equipos se emplean únicamente para la docencia (impartir clases con ellos), durante este 37% del tiempo no proporcionan ningún ingreso económico a la IES. Su Rol es por tanto pésimo.

El CTI de la UNACAR

La Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR) cuenta con un Centro de Tecnologías de Información (CTI); se trata de un edificio de 3 plantas, con 382 computadoras distribuidas en 14 salas, interconectadas mediante infraestructura de red Fast Ethernet (100 Mbps). La Tabla 1 muestra un resumen del equipamiento, incluyendo las sumatorias totales de velocidad de procesamiento, memoria y almacenamiento en disco.

El CTI es, por tanto, un cluster en espera de ser ocupado. Si se realizan ciertos ajustes a su forma de operar, transparentes a alumnos y maestros, puede convertirse en una supercomputadora con un poder de cómputo que rivalice con algunas de las que integran la lista del "Top 500".

Retomando el cálculo realizado en las ecuaciones (1) y (2), pero ahora para el CTI:

$$382 \text{ PCs del CTI} / 1,368 \text{ procesadores Kan Balam} * 100 = 27.92\% \quad (6)$$

$$382 \text{ PCs del CTI} / 126 \text{ procesadores cluster IMP} * 100 = 303\% \quad (7)$$

Si bien el CTI aún no representa ni el 28% de Kan Balam, es 3 veces mayor que el cluster del IMP!

Tabla 1. Características del equipo de computo del CTI de la UNACAR

SALA	No. de Máquinas	Procesador	Velocidad por Unidad (Ghz)	Velocidad Total (Ghz)	RAM por Unidad (MB)	RAM Total (MB)	Disco Duro por Unidad (GB)	Disco Duro Total (GB)
213	100	Pentium 4	3.2	320.0	256	25,600	120	12,000
215	24	Pentium 4	3.2	76.8	512	12,288	120	2,880
216	24	Pentium 4	3.2	76.8	512	12,288	120	2,880
217	24	Pentium 4	3.2	76.8	512	12,288	120	2,880
218	24	Pentium 4	3.2	76.8	512	12,288	120	2,880
219	30	Pentium 4	3.2	96.0	512	15,360	120	3,600
316	24	Pentium 4	3.2	76.8	512	12,288	120	2,880
317	24	Pentium 4	3.2	76.8	512	12,288	120	2,880
318	24	Pentium 4	3.2	76.8	512	12,288	120	2,880
319	16	SPARC	0.5	8.0	512	8,192	80	1,280
319	2	SPARC	1.0	2.0	1024	2,048	120	240
320	30	Pentium 4	3.2	96.0	512	15,360	120	3,600
410	12	Pentium 3	0.5	6.0	256	3,072	40	480
416	24	Pentium 3	0.5	12.0	256	6,144	40	960
TOTAL	382			1,077.6		161,792		42,320

La geofísica

De acuerdo con [8], dentro de los objetivos de la geofísica se encuentran: a) obtener recursos naturales, fósiles y minerales, que sean estratégicos para la economía del país; y b) obtener información sobre la mecánica de los fenómenos terrestres que provocan catástrofes (sismos, huracanes, erupciones volcánicas, etc.) con el fin de generar modelos predictivos.

Una de las principales actividades que PEMEX Exploración y Producción (PEP) realiza en Ciudad del Carmen, Campeche, es la búsqueda de nuevas reservas de petróleo en el subsuelo y lecho marino nacionales. Para ello recurre a diversas técnicas de exploración [8][9]:

- **Sísmico de reflexión:** indica el tiempo que tarda en ir y regresar una onda sísmica, una vez que se ha reflejado en las diferentes formaciones geológicas del suelo. Para ello se utilizan geófonos y sismógrafos. Reporta la profundidad y el comportamiento geológico de horizontes reflectores. Permite estudios geológicos de alta resolución, por lo cual se utiliza preferentemente en la exploración petrolera y la geotermia.
- **Gravitacional:** se cuantifican las variaciones del campo gravitacional terrestre, atribuidas a estructuras geológicas sepultadas. Se efectúa mediante gravímetros, y muestra contrastes de densidad de materiales así como la profundidad de zonas de densidad distinta a la común. Tiene aplicaciones para

estudios geológicos de reconocimiento, para minería y geotermia.

- **Magnético:** este método cuantifica variaciones del campo magnético terrestre atribuibles a estructuras geológicas sepultadas. Pone en relieve contrastes de susceptibilidad de las rocas y las zonas de anomalía magnética. Se efectúa mediante magnetómetros, y se emplea en la exploración petrolera, minería y geotermia.

- **Eléctrico:** mediante la medición del potencial natural, campos eléctricos inducidos, campos eléctricos y magnéticos naturales, se puede inferir la resistividad del subsuelo y la profundidad de la interfase. Se lleva a cabo mediante electrodos, potenciómetros y bobinas.

- **Muestreo de pozos:** se registra todo aquello que la barrena va atravesando durante la perforación de un pozo petrolero. Este muestreo puede ser directo -estudiando muestras de la formación-, o bien mediante el análisis continuo del fluido de perforación, o por la introducción mediante cables con conductores eléctricos de dispositivos medidores de los distintos parámetros característicos de las formaciones atravesadas y su contenido.

En todos los casos referidos, la información obtenida pasa por un procesamiento más o menos similar, consistente en las fases señaladas en la Figura 1.

Como puede observarse, el último paso consiste en almacenar la información en una cinta de 4 mm. de grosor y 9 pistas, estructurada en formato LIS (Log Information Standard). De acuerdo a [9], existen aproximadamente 5,047 de tales cintas con información de todos los pozos de la zona marina de la Sonda de Campeche perforados desde 1977. El formato LIS en cuestión fue diseñado y propuesto por la compañía Schlumberger en 1976, y se ha convertido en el estándar de la industria para esta aplicación. Sin entrar en detalles acerca del formato, la cinta está compuesta de marcos (frames) que deben contener 10 curvas, cada una de ellas con muestras de 2, 4 ó 6 bytes de longitud, siendo común el uso de números de 16 bits de punto flotante, que representan lecturas espaciadas cada 6 pulgadas de profundidad. Si tomamos en cuenta que

el primer pozo perforado por PEMEX en 1938, llamado "El Plan No 55", llegó a una profundidad de 845 metros (hoy en día se perfora a profundidades mucho mayores, y conforme se agoten las reservas probadas irá en aumento), se trata de un gran volumen de datos en cada cinta. Cabe señalar que inmediatamente después de la perforación, el pozo se entuba, lo cuál impide repetir la toma de lecturas en el mismo.

Los algoritmos

La información en cinta es luego enviada a los centros de procesamiento, donde

Fig. 1. Procesamiento y almacenamiento de la información obtenida durante la exploración.



generalmente es remuestreada a menor tamaño -8 bits/muestra - y filtrada antes de su uso; es decir, que deben retirarse los ruidos debidos a estimulaciones artificiales del medio ambiente, provenientes de: a) una señal con muchos picos; ó b) la presencia de componentes ajenos a la estimulación efectuada. El primero de los defectos se remedia suavizando la función mediante una convolución de la señal con una función cuyo comportamiento asintótico la "aplane" -un filtro pasabajas. El segundo se supera si se conocen los componentes que deben eliminarse, o cuando menos la acción que los generó, para inferir la componente ruidosa que debe filtrarse [8].

El filtrado de la señal puede llevarse a cabo tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Si se opta por este último debe aplicarse alguna transformada, generalmente la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Sea como fuere, el volumen de datos que deben procesarse es inmenso, aun cuando el orden del algoritmo sea manejable $-O(N\log N)-$. Para obtener resultados en tiempos aceptables, es necesario contar con un inmenso poder de cómputo.

Posterior a este pre-procesamiento, la información se combina con los otros tipos de registros disponibles -sísmicos, sonar, etc.- y se representa gráficamente, comúnmente empleando el método de spline al dibujar la traza, para que los geólogos puedan interpretarla. En algunos casos se recurre a técnicas de reconocimiento automático de patrones para determinar la ubicación de los posibles yacimientos, así como estimar su volumen. Nuevamente se necesita de poderosos procesadores para realizarlo.



Fig. 2. Un diagrama de flujo de datos (DFD) del procesamiento típico de las señales geofísicas para su explotación petrolera.

El software

El software empleado para todo este procesamiento es, en general, producido por empresas extranjeras que lo rentan a las compañías petroleras de todo el mundo, entre ellas PEMEX: se trata de productos altamente optimizados, que implementan diversos algoritmos protegidos por el secreto industrial, de los cuales se conoce su funcionamiento general -o cuando menos es posible inferirlo-, pero cuyos detalles de implementación concretos permanecen ocultos.

Ahora bien, en los tiempos en que el poder de cómputo era escaso, y cada segundo de procesamiento resultaba muy caro, la renta de tales software optimizados se justificaba plenamente. Pero en la actualidad la situación es muy distinta: aún una implementación deficiente de la FFT sobre un cluster de 2 mil procesadores, logrará un rendimiento muy superior al obtenido mediante una excelente implementación del mismo algoritmo sobre un único equipo de súper cómputo, por muy reconocida que sea la compañía que lo produce.

Además, la aplicación del concepto de open source bajo licencia GPL al código producido, permitirá que diversos desarrolladores de software e investigadores mejoren paulatinamente el producto, basado en los principios expuestos en La Catedral y el Bazar por Eric. S. Raymond [10].

La orientación de proyectos de investigación y desarrollo a nivel maestría y doctorado de las IES participantes, logrará en un corto plazo de tiempo redescubrir muchos de los algoritmos secretos empleados por el software actual, haciendo al nuevo producto completamente competitivo con las ediciones comerciales.

El cluster UNACAR

Por ello se pretende convertir el CTI de la UNACAR en un cluster a tiempo compartido, que procese en horario nocturno y de fin de semana información de caracterización y simulación de yacimientos para PEMEX. En este apartado se explicarán los ajustes necesarios para tal fin.

Instalación y configuración

Como primer paso, se requiere la repartición de todos los discos duros de las PC's que se emplearán como nodos del cluster. Ello significa:

- La defragmentación de la partición Windows actual, mediante la herramienta DEFRAG que incluye el propio sistema operativo.
- El arranque desde Linux y el reparticionamiento no destructivo del disco duro, mediante la herramienta QPARTED ó similar.

Posteriormente se realizará la instalación del nuevo sistema operativo. Para ello se eligió una distribución totalmente open source de Linux, Slackware, que presenta varias ventajas respecto de otras:

1. No presenta algunas de las restricciones que las compañías distribuidoras de Linux, como RedHat, imponen a sus productos;
2. Está formada por paquetes en formato.tar.gz (formato de cinta comprimida), compatible en todo el mundo UN*X;
3. Los paquetes tienen tamaños que no superan los 1.44MB cada uno, por lo cuál se pueden copiar en disquetes;
4. El tamaño es razonable: un Slackware 10.x ocupa cuando mucho 2 CD's y la versión 11 un solo DVD;
5. Se puede instalar completo en tan sólo 4GB de espacio;
6. El proceso de instalación se basa scripts programados en Bash (Bourne Again Shell), completamente personalizables y que no necesitan de la interfaz gráfica de usuario Xwindow;
7. Utiliza scripts de arranque independientes, al estilo System V, programados en Bash y ubicados en la ruta /etc/rc.d/;
8. Recurre al arrancador LILO (Linux Loader), que es fácil de personalizar y que ofrece entre otras opciones la de no instalarse, permaneciendo así completamente invisible para los usuarios Windows diurnos.

A la instalación básica de Slackware se le agregarán posteriormente las bibliotecas de programación paralela:

- Parallel Virtual Machine (PVM), la de uso más extendido en la academia;
- Message Passing Interface (MPI), la favorita de la industria.
- MOSIX, un kernel especial que presenta un superconjunto paralelizado de POSIX, capaz entre otras cosas de

administrar la memoria de manera unificada y migrar procesos entre nodos de forma transparente.

La instalación completa se realizará en una única PC, que será probada exhaustivamente, para después clonarse mediante red ó cinta a todas las demás. La partición en cuestión está preinstalada con las siguientes características:

- Un kernel 2.6.x
- Soporte para montaje de volúmenes Network File System (NFS)
- Ejecución remota de procesos mediante rsh, telnet ó ssh
- Biblioteca Parallel Virtual Machine (PVM)
- Biblioteca Message Passing Interface (MPI)
- openMOSIX.

Los salones que ya cuentan con tecnología UN*X, como el Laboratorio Solaris Sun SPARC, no requerirán de la instalación de un nuevo sistema operativo, sólo agregar las bibliotecas de programación. Todo el proceso quedará a cargo de un equipo de personas, compuesto por becarios

universitarios supervisados por líderes de proyecto (profesores de las IES y empresas participantes). El pago por el tiempo de procesamiento permitirá remunerar económicamente a los miembros de tal equipo.

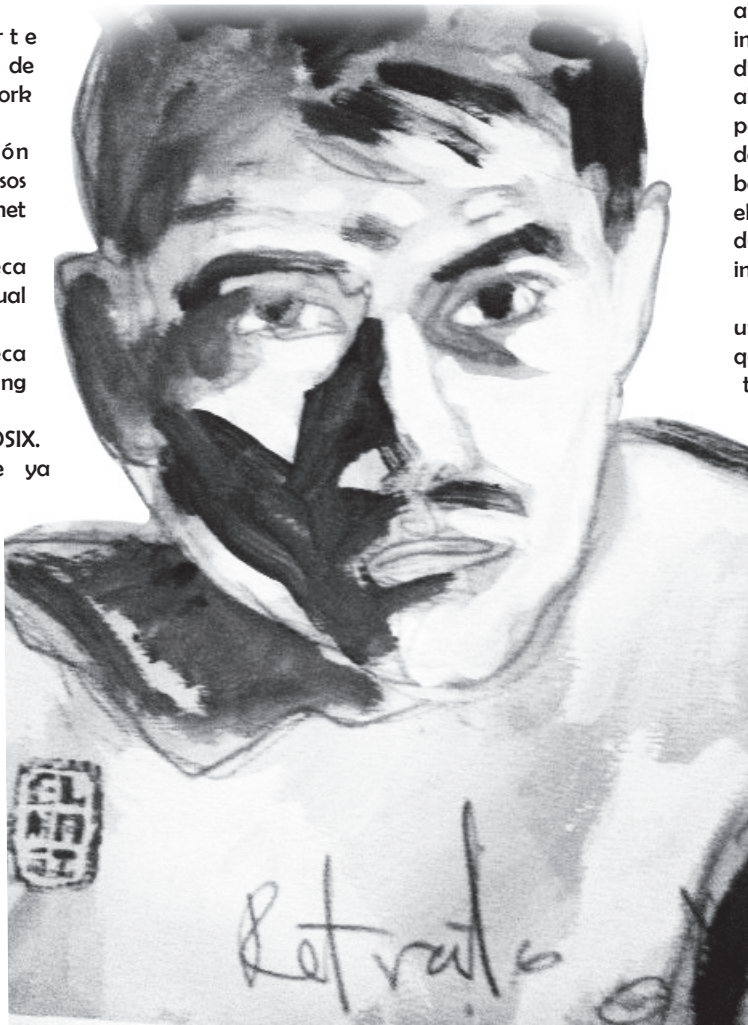
Operación

En días lectivos, a las 22:00 horas, los miembros del equipo de becarios recorrerán cada salón de cómputo, iniciando las computadoras mediante un LiveCD ó un

disquete de Linux, mismo que arrancará el sistema desde la partición oculta en el disco duro de la máquina.

Casi simultáneamente, PEMEX transferirá al CTI, mediante un enlace de microondas dedicado, la información que deberá procesarse.

Durante las siguientes 9 horas, es decir, hasta las 7:00 AM del día siguiente, el cluster procesará la información recibida.



En ese instante se usará el enlace en el sentido inverso para retornar los resultados a las oficinas de PEMEX.

Durante los fines de semana la operación podrá realizarse ininterrumpidamente desde el sábado a las 14:00 horas hasta el lunes a las 7:00 horas. Al menos inicialmente se dejará libre el horario matutino de los sábados, ante la eventualidad de cursos u otras actividades en los salones de clase.

Conclusiones

La paralelización se ha convertido en el paradigma fundamental sobre el que descansará el cómputo en los próximos años. En particular, el uso de cómputo débilmente acoplado –clusters– parece estar consolidándose como la alternativa más viable a los elevadísimos costos de supercomputadoras paralelas de diseño especial.

Pero hasta ahora la tendencia, al menos en las IES y centros de investigación de México, parece haberse dirigido hacia la adquisición de clusters de alto desempeño, en vez de construirlos a partir de la infraestructura de tecnologías de información existente. Ello soslaya los beneficios de Rol que se pueden lograr por el simple hecho de aprovechar el equipo durante las horas en que no se usa para impartir clases.

Tampoco se ha buscado un cliente potencial o una aplicación que asegure ingresos económicos para tales clusters, pensando que su simple adquisición y posesión se justifica en términos de las aplicaciones científicas que eventualmente correrá, así como en lo atractivo que resultará para los investigadores laborar en la institución que lo tiene.

La industria petrolera mexicana, más necesitada que nunca de soluciones creativas para encontrar y probar la existencia de reservas, es sin duda un cliente potencial interesante. El know how que se puede lograr en la creación de software paralelo para ella es otra área interesante que no debe hacerse a un lado.

Desde el punto de vista práctico, si el proyecto se consolida será necesario dotar al CTI con un sistema de suministro ininterrumpido de energía, de modo que una interrupción del abasto no perjudique al procesamiento que se esté llevando a cabo: el tiempo es dinero.

Referencias

- 1.Silicon Graphics Inc. High Performance Computing. <http://www.sgi.com/products/servers/>
- 2.Hewlett-Packard Co. High Performance Computing. http://h20311.www2.hp.com/HPC/cache/274276-0-0-225-121.html?jumpid=reg_Rto02_USEN
- 3.Sun Microsystems Inc. High Performance Computing. <http://www.sun.com/servers/hpc/index.jsp>
- 4.Intel Corporation Inc. Casos de estudio de Clusters. <http://www.intel.com/espanol/business/casestudies/snapshots/irmp.htm>
- 5.Supercomputo en la UNAM. <http://www.super.unam.mx/index.php?op=eghw>
- 6.Galán, José. La Kan Balam puede realizar 71 billones de operaciones matemáticas por segundo. Sección Sociedad y Justicia del Diario La Jornada, miércoles 17 de enero de 2007. <http://www.jornada.unam.mx/2007/01/17/index.php?section=sociedad&article=039n2oc>
- 7.Morfin Otero, María y Victor Manuel González Romero. Infraestructura de Tecnologías de Información en Universidades Mexicanas. Primer Congreso Virtual Latinoamericano de Educación a Distancia. Abril de 2004.
8. Cantoral U. Ricardo, Francisco Cordero O., Rosa María Farfán M. y Carlos Imaz V. La Transformada Rápida de Fourier: Un Ejemplo en Geofísica. Serie "Lecturas de Cálculo para Docentes de Ingeniería", Nº 5, septiembre de 2003, CINVESTAV-IPN.
9. León Durán, José Oswaldo. Aplicación de la Tecnología Web a la Información Geofísica de Pozos Petroleros. Tesis de Maestría, 1 de marzo del 2000, Fundación Arturo Rosenblueth.
10. Raymond, Erick. La Catedral y el Bazar. Libro electrónico. <http://biblioweb.sindominio.net/tematica/catedral.html>