

Abordando la era Exascale.

¿Qué limitaciones existen para hacerle frente al futuro de la computación?

Andrés Javier Cuadros Sanabria

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga, Colombia

andresjavier551@gmail.com

Cristian Yesid Fraija Castillo

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga, Colombia

cristian33x@gmail.com

Santiago Gómez Hernández

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga, Colombia

santgohe@gmail.com

Abstract — Application modernization in the Exascale era presumes a great commitment with sciences, this modernization involves a big leap in the model and treatment of problems due to the great computational power that this architecture suppose, however, at the same time developers must focus on bringing applications that run efficiently in these new systems. Centers of Excellence are already working on these, they are teams that simplify the long road remaining and also are developing some applications that have already made impact in our lives. Exascale era is one of the greatest things to come and will suppose the end of the actual supercomputers that limit us today.

Keywords—Application modernization; Exascale; Computational power; Architecture; Systems; Applications; Center of Excellence; Supercomputers

Resumen—La modernización de las aplicaciones en la era Exascale presume un compromiso grande con las ciencias, esta implicaría dar un salto grande en el tratamiento y modelamiento de muchos problemas debido al inmenso poder computacional que esta arquitectura supone, sin embargo, al mismo tiempo los desarrolladores deberán concentrarse en brindar aplicaciones que corran de manera eficiente en estos nuevos sistemas. En esto ya se encuentran trabajando los centros de excelencia que son equipos de trabajo que pretenden simplificar el camino largo que queda y que hoy se encuentran desarrollando algunas aplicaciones que ya han tenido un impacto grande en nuestra vida. La era Exascale es una de las cosas más grandes por venir ya que supondrá abandonar los supercomputadores actuales que son los que nos limitan hoy.

Palabras Clave—Modernización de las aplicaciones; Exascale; Poder computacional; Arquitectura; sistemas; Aplicaciones; Centros de Excelencia; Supercomputadores.

I. INTRODUCCIÓN

La computación Exascale se refiere a los sistemas de computación capaces de al menos un exaFLOP o un trillón de operaciones de punto flotante por segundo, esto claramente refleja un aumento considerable respecto a su predecesor Petascale capaz de al menos un petaFLOP o mil billones de

operaciones de punto flotante por segundo. Exascale generará un impacto grande en el día a día ya que esta es más realista a la hora de simular procesos y eficaz en el tratamiento masivo de datos debido a su inmenso poder computacional, lo cual es una herramienta vital que va de la mano con los descubrimientos científicos y asiste en el encuentro de soluciones para problemas de alta complejidad. Todo esto nos lleva a pensar en la dirección hacia la que las aplicaciones deberán evolucionar o modernizarse en esta nueva era para ser viables en la computación de alto rendimiento (HPC) debido al inminente cambio de paradigma.

Los desarrolladores HPC deben reconocer que descuidarse e ignorar la necesidad de una refactorización algorítmica supone un alto riesgo, para esto, se menciona en varios artículos la aparición de centros de excelencia o CoE por sus siglas en inglés, para servir como soporte o plantilla a equipos de aplicación y arquitectura, debido a que el desempeño Exascale requeriría más coordinación dentro del entorno HPC ya que tecnologías tan masivas como CPUs multicores y arquitecturas heterogéneas responden a la necesidad de velocidad, pero, requieren que los desarrolladores sean capaces de medir la complejidad del paralelismo de grano fino a una gran escala.

Dicho todo esto queda más que claro que los desarrolladores de aplicaciones deben entender a fondo diversas arquitecturas, mientras que los arquitectos del hardware y los estándares de los lenguajes de programación deben traer innovación que facilite esta transición.

II. ¿POR QUÉ PERSEGUIR ESTA MODERNIZACIÓN?

Son diversas y muy validas razones por las cuales se debe buscar incansablemente la modernización de estas aplicaciones, ya que estas supondrían un incremento en la precisión del tratamiento de muchos problemas que involucran

distintas variables como lo son la cantidad de datos masiva que incrementa exponencialmente, y el modelamiento de algunas situaciones. Áreas como la física, energía, biología y aplicaciones de ciencias de la computación, entre otras, han unido esfuerzos en busca de esta modernización ya que este sería el siguiente paso en la ciencia debido a que hoy en día corremos al ritmo que nuestros supercomputadores lo permiten.

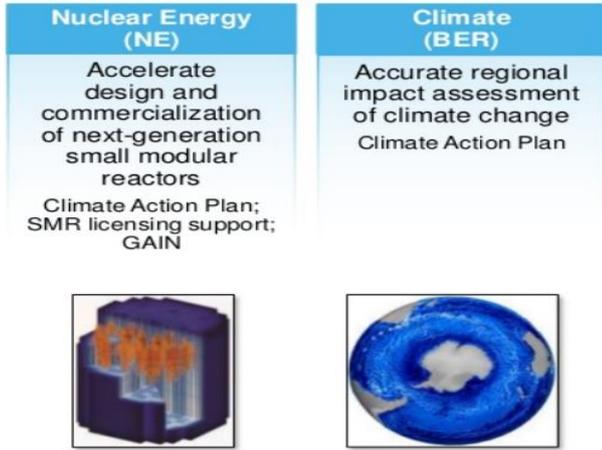


Figura 1

los supercomputadores de exascale simularán de forma más realista los procesos relacionados con la medicina de precisión, clima regional, fabricación aditiva, la conversión de plantas a biocombustibles, la relación entre energía y uso del agua, la física no vista en materiales descubrimiento y diseño, las fuerzas fundamentales del universo, y mucho más.

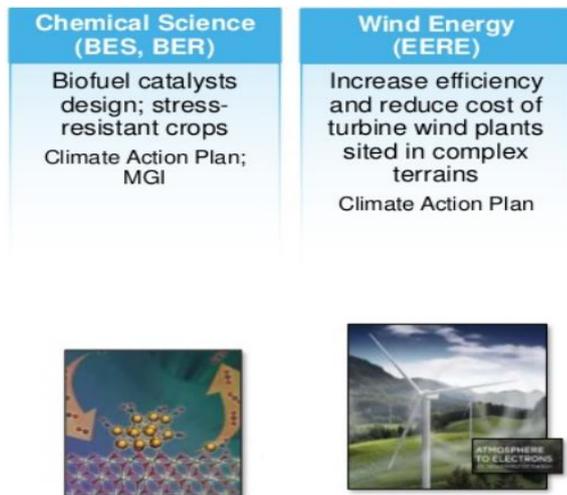


Figura 2

Una de las grandes aplicaciones y usos que se le podrá dar por parte de los planificadores urbanos será simular el crecimiento de una ciudad, pues el crecimiento exponencial de la población hace cada vez más difícil poder controlar y predecir consecuencias de la misma sobrepoblación como lo es

el cambio climático que ha variado drásticamente en los últimos años, y esto podría afectar seriamente a la población mundial, uno de los principales causantes de esta variación en el cambio climático es la gran cantidad de gases de efecto invernadero que son liberados cada año a la atmósfera; con simulaciones precisas de cómo sería el planeta en unos cuantos años si se continuase con el ritmo se está llevando en cuanto al consumo, se podría saber cuántos años de vida exactamente le quedan a la humanidad.

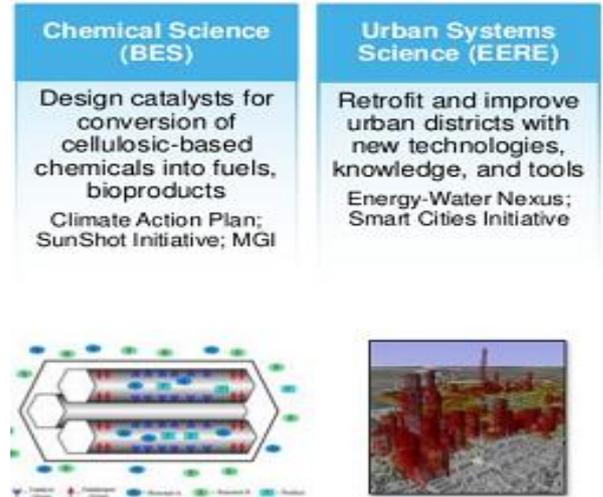


Figura 3

Además, también se espera que la computación Exascale empujará a la industria de Medios y Entretenimiento más allá de las técnicas actuales ya que a medida que el desarrollo y la accesibilidad de las computadoras de alto rendimiento explotan más allá de los límites actuales, también se encenderán las posibilidades creativas para el futuro de la animación.

III. ¿ENTONCES, QUÉ CAMINO DEBEMOS SEGUIR?

Actualmente tenemos varias limitaciones, pero haremos foco en una muy importante que es el software, el software que tenemos hoy en día está diseñado para correr en un número determinado de procesadores, lo cual, en vista hacia el futuro es algo grave ya que con Exascale el número de procesadores, núcleos se incrementará drásticamente llegando a cifras de millones de millones o más de estos. Todo esto supone un reto gigante para los programadores que deberán hacer foco en esta y muchas otras limitaciones para dar un salto mucho más adelante y salir del estándar de la lenta evolución tecnológica.

Un gran proyecto muy conocido es el proyecto exascale se dio en los estados unidos en el año 2015 que buscaba en principio ser 50 veces más rápido que los petaflops, con esto se podría llegar a simular por completo el funcionamiento cerebral, para conseguir esto se requiere de un nuevo integrado exascale y nuevo software que pueda ser ejecutado en estas

máquinas, uno de los mayores aportantes a la evolución de la tecnología es el departamento de energía de los estados unidos.

Las grandes potencias mundiales ya están a punto de poner en marcha sus primeras supercomputadoras de exascale, por ejemplo se espera que china y Japón las ponga a funcionar para el año 2020, también estados unidos tiene planeado tenerla para el año 2021, y en la india se invierte una gran cantidad de dinero para la investigación en la supercomputación de forma intensiva durante cinco años, los cuales termina en el 2017, a partir del 2018 se iniciaran proyectos para construir una supercomputadora con capacidad exascale antes de cinco años más.

Pero entonces se viene un gran desafío que es como crear aplicaciones y actualizar las que ya existen de tal forma que se de uso completo de estas supercomputadoras. pues ejecutar eficientemente en Exascale no solo requerirá portar y optimizar el código, sino también repensar el diseño de los algoritmos centrales para aprovechar el mayor paralelismo y las capacidades de cálculo más eficientes que ofrecerán los sistemas de exascale.

aplicaciones que evalúan si estas tecnologías representarían un cambio muy grande que no soportará las aplicaciones de hoy.

V. ¿QUÉ ES UN COE Y CUÁL ES SU IMPORTANCIA?

Son centros de excelencia que buscan evolucionar haciendo un trabajo conjunto entre ellos y que pretenden identificar mecanismos efectivos para traer conocimiento detallado y con anticipación de las arquitecturas para luego brindárselo a los desarrolladores de aplicaciones.

El termino es usado a través del sector industrial para definir un esfuerzo enfocado alrededor de un problema desafiante, este dentro del contexto de computación captura los esfuerzos organizados que incluyen entrenamiento, compartir prácticas, perseguir investigaciones de impacto y la transformación de nuestras grandes aplicaciones para nuevas y complejas plataformas que deben ser efectivas inmediatamente luego de ser aceptadas.

Previamente hemos mencionado algunos de estos como el Sierra CoE cuyos planes con el tiempo han ido cambiando y ajustando su plan de la siguiente manera:

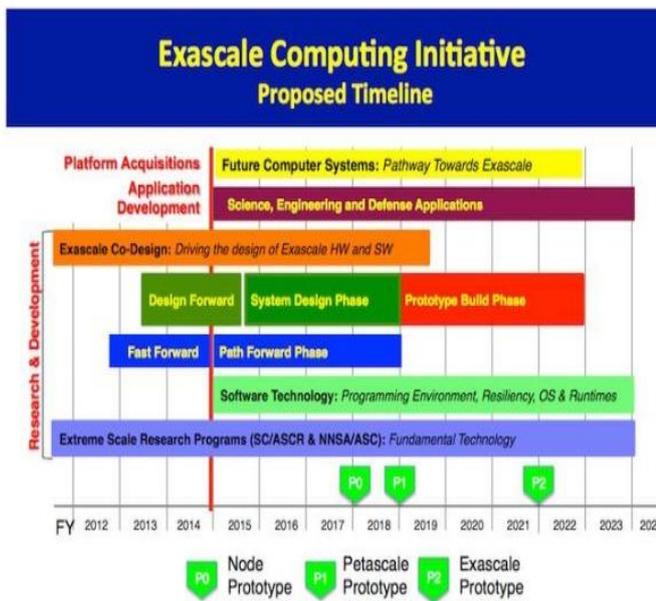


Figura 1: Cronograma ECP

IV. ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE TRATAR DE MODERNIZAR LAS APLICACIONES?

La modernización de aplicaciones no solamente implica prepararse para los siguientes sistemas, esta pretende también reducir el esfuerzo de prepararse para los siguientes. Todo este proceso reduce el costo requerido para completar un trabajo en un futuro lejano mientras aseguramos su éxito. La NNSA (National Nuclear Security Administration) y el DOE (Department of Energy) de Estados Unidos pretenden definir lo que viene en la era Exascale junto con desarrolladores de

- Entender cómo se escribirá el código utilizando modelos de programación GPU establecidos como CUDA (Compute Inicial Device Architecture) que hace referencia a una plataforma de computación en paralelo y un conjunto de herramientas de desarrollo creadas por Nvidia. Este paso establece una base para el desempeño deseado e informa sobre estructuras de datos y cambios en algoritmos que mejoraran la utilización de la GPU.
- Implementar el código utilizando una aproximación portable como RAJA, OpenMP 4.x o un dominio específico de abstracción para la aplicación.
- Implementar el código utilizando una aproximación portable como RAJA, OpenMP 4.x o un dominio específico de abstracción para la aplicación.
- Probar y genéricamente optimizar el rendimiento en plataformas alternativas como CPUs estándar y arquitecturas de muchos núcleos como Xeon Phi. Esta ultima fase obtiene una verdadera solución al desempeño portable.

Para facilitar aspectos contractuales estos CoE como el Sierra definen planes de trabajo. El plan define objetivos con reportes escritos que IBM y Nvidia entregan para documentar los esfuerzos para ese periodo y para dar lecciones a otros que no están directamente involucrados en esto.

VI. MODERNIZACIÓN EN LA ERA EXASCALE

Reemplazar una aplicación de producción con una totalmente nueva, es un proceso largo que debe producir un nivel similar de confiabilidad, es por esto por lo que en ASC (Advanced Simulation and Computing) y LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) están trabajando para correr efectivamente las aplicaciones existentes en futuros sistemas más avanzados, ya que estas deberán permanecer estables para el uso, sobre todo en asuntos como la seguridad nacional durante la transición.

Existen sistemas ejemplares, ASC, por ejemplo, resalta la estrategia de adquisición de plataforma que despliega dos clases de sistemas. Commodity Technology (CT) que provee un poder computacional significativo para la carga del día a día mientras minimiza los cambios en el software. Estos sistemas, típicamente basados en clusters Linux x86, corren un software familiar y soportan trabajos de media y baja escala. Alternativamente los sistemas AT representan la vanguardia del mercado HPC, estas plataformas corren las más desafiantes simulaciones ASC de larga escala y proveen liderazgo nacional en el desarrollo de hardware y software. Las tecnologías AT de vez en cuando muestran un poco el futuro cuando estas están bien entendidas, son asequibles y no son más un desafío para la mayoría de aplicaciones.

En 2014 LLNL se unió a Oak Ridge National Laboratories (ORNL) y Argonne National Laboratories (ANL) en una petición conjunta para propuestas de un sistema dirigido por Collaboration of Oak Ridge, Argonne, and Livermore (CORAL). Cada uno de estos laboratorios planeo desplegar sistemas en el periodo comprendido por el presente año (2017) y el proceso de CORAL selecciono el par de sistemas que daban un mejor valor general al departamento de energía DOE.

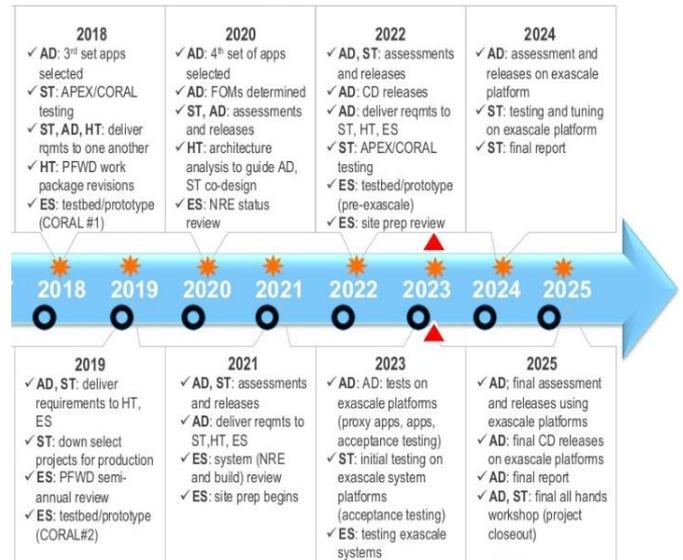
La obtención de un sistema AT comienza años antes de su distribución, lo cual trajo bastante incertidumbre, sin embargo, esto suministro el tiempo necesario para prepararse para estos innovadores sistemas.

Un componente clave es la inclusión al CoE Sierra de expertos de IBM y Nvidia en el efectivo uso de sus sistemas. Este modelo final compartido permite a la gente del laboratorio con profunda experiencia en algoritmos y aplicaciones, aprovechar alianzas con los proveedores y su extenso conocimiento del hardware y entornos de programación, por otro lado, los proveedores obtienen una vista previa de cómo sus sistemas serán usados años antes de venderse. Todo esto desemboca en un conocimiento que puede impactar directamente la calidad de un sistema y su software debido al acceso de hardware y presencia de ingenieros dentro de las organizaciones. Todo esto permite trazar una mejor planificación de desarrollo con objetivos a corto y largo plazo.

Muchos detalles de futuros sistemas permanecen bajo un acuerdo de no divulgación (NDA) como por ejemplo un paper llamado "Programming Strategies for Sierra, Summit, and

Beyond." desarrollado en conjunto por IBM, Nvidia y el ORNL Summit CoE.

La única forma de mantener la evolución de la tecnología es por medio de la modernización de las aplicaciones que incluyan en sus actualizaciones nuevos estándares lingüísticos, esta modernización de las aplicaciones es estrictamente necesario pues el hardware evoluciona constantemente, y con el paso que se espera dar de pasar de la capacidad petascale a exascale con más razón es necesario una preparación en la modernización de las aplicaciones que serán soportadas en estos sistemas.



¿CUALES SON LOS PRINCIPALES RETOS EN LA COMPUTACION EXASCALE?

Actualmente existe un proyecto de exascale conocido como ECP que se ha propuesto poner en funcionamiento su supercomputadora en el año 2023 o 2025, inicialmente se esperaba tenerlo listo para unos años antes, pero debido a la gran cantidad de desafíos que conlleva la creación de este sistema ha sido necesario postergar este plazo; el principal problema siempre ha sido y será el consumo energético que estos sistemas pueden llegar a generar. Los dos grandes objetivos de este proyecto es la creación tanto de hardware como de software al mismo nivel, para con esto poder desarrollar aplicaciones exascale que le den sentido a este proyecto, es decir aplicaciones que realmente requieran y den un máximo provecho de estos sistemas, ya hemos mencionado muchas de las áreas en las cuales se pueda dar un uso de este tipo de sistemas como lo es la astrofísica, la química, la medicina, estudio de las energías, entre otras, lo único que deben tener estas áreas es que todas requieran la manipulación de volúmenes gigantes de datos.

En cuanto a hardware se identifican los siguientes retos, el paralelismo pues ara poder ejecutar un trillón de operaciones por segundo, el sistema exascale deberá poseer la capacidad de

distribuir eficientemente tareas entre diferentes hilos en un mismo nodo, además de tener una mayor cantidad de nodos en un sistema, a fin de reducir un problema complejo a varios problemas más simples que puedan ser resueltos simultáneamente. Esto representa un desafío en los departamentos de algoritmos, sistemas operativos y compiladores.

Otro parte para tener en cuenta para la creación de este sistema es la memoria y el almacenamiento, ya que los materiales con lo que se construye actualmente estos componentes podría no proveer el rendimiento adecuado, por lo que se están considerando nuevas alternativas en materia de tecnologías de memoria, como la STT-RAM, PCRAM O R-RAM, que podrían solventar algunos de los problemas inherentes al almacenamiento en memoria.

Además un reto muy importante a superar, ya mencionado se encuentra en qué hacer para que el consumo energético a la hora de transmitir los datos y poner en funcionamiento la gran cantidad de hardware sea lo más pequeña posible, esto solo podrá ser posible cambiando los materiales con lo que se ha estado construyendo las partes encargadas de estas tareas y rediseñando los circuitos, pues incluso los sistemas petascale ya consumen una gran cantidad de energía, es de esperarse que los exascale lo hagan también y con un gasto mayor.

PORTABILIDAD

Esto indica o invita a que las aplicaciones puedan correr en todas las plataformas incluyendo sistemas AT y CT, lo cual indicaría que es un factor muy importante y por lo tanto para tener en cuenta como requerimiento para estas aplicaciones. En abril de 2016 seis laboratorios DOE y cuatro proveedores participaron en este tema y presentaron propuestas para llegar a esta característica. Más de 100 expertos de DOEs hicieron parte de este encuentro.

VII. APLICACIONES DE ALTO IMPACTO

TOWARD EXASCALE EARTHQUAKE GROUND MOTION SIMULATIONS FOR NEAR-FAULT ENGINEERING ANALYSIS

Esta es una de las aplicaciones visibles y de alto impacto desarrollada por el CoE LLNL y LBNL que pretende modelar un riesgo siempre presente en estructuras de ingeniería que podría potencialmente dañar componentes de la construcción y la infraestructura de la que la vida moderna depende. Los terremotos son especialmente peligrosos y fuertes cuando se encuentran cerca de la superficie, es decir, menos de 10 km y cuando su magnitud es igual o superior a 7 en la escala de Richter o escala de magnitud local.

Las estimaciones tradicionales de riesgos de terremotos dependen de las ecuaciones de predicción de movimiento del

suelo (GMPEs), las cuales son modelos de regresión derivados de información empírica que estima la intensidad del movimiento de la tierra como una función de magnitud, distancia, fallas, camino y parámetros del sitio. Cuando no existe esta información empírica para terremotos grandes en una región, los sismólogos hacen uso de la computación de alto rendimiento HPC para simular los movimientos de la tierra para representar el camino y efectos del sitio causados por la heterogeneidad debida a la estructura geológica. Estos métodos deben hacer una descripción precisa de la onda de propagación 3D.

Estos GMPEs en algunos casos no nos brindan información de la variedad observada en el campo cercano, como resultado de esto, tendremos pocas observaciones valiosas de terremotos de grandes terremotos dentro de una región crítica. Existen dos modelos para la medición del movimiento de la tierra, estos son el ASK14 y BSSA14.

¿POR QUÉ ES NECESARIO EXASCALE EN ESTA APLICACIÓN?

Este método pretende obtener los movimientos de la tierra a frecuencias comparables a observaciones de 5 a 10 Hz. Estos modelos requieren una discretización tan pequeña como de 2 a 10 metros sobre los dominios que incluyen longitud de la ruptura total de un terremoto de magnitud 7 a 8, es decir, 100 a 500 km. Por ejemplo, una simulación sísmica que abarca la ruptura de un terremoto de magnitud 7 en la escala de Richter requiere de diez mil a cien mil millones de puntos de grilla o red y las simulaciones numéricas de propagación de onda en esta escala requieren una cantidad grande de computadores trabajando en paralelo. Si queremos doblar la frecuencia, requeriría dividir esta cuadrícula o grilla a la mitad en tres dimensiones lo cual requeriría 8 veces más puntos respecto al caso previamente explicado y el doble de pasos para simular el movimiento.

De esta manera el esfuerzo computacional incrementará dieciséis veces para computar el mismo movimiento doblando la frecuencia. Esto representa una limitación a la hora de simular los movimientos de la tierra causados por terremotos de alta frecuencia.

¿QUÉ SE PROPONE?

Los CoE LLNL y LBNL proponen un sistema llamado Seismic waves 4th order (SW4) el cual en palabras simples es un código que realiza una sumatoria por partes para simulaciones en paralelo de la propagación de ondas sísmicas.

Estos CoE describen como SW4 está mejorando para correr simulaciones en la siguiente generación de sistemas HPC y como el refinamiento de la malla proporciona una

notable reducción en el esfuerzo computacional requerido para simular un terremoto dado.

CONSIDERACIONES PARA SW4

REFINAMIENTO DE LA MALLA

SW4 tiene varios desafíos a los cuales hacerle frente, uno de estos es el refinamiento o mejoramiento de la malla en donde se pretende pedir al usuario que especifique la profundidad en las que el espaciado de la cuadrícula se duplica en relación con la región. Esto permite a la simulación mantener un número estable de puntos por longitud de onda pequeña a través del dominio computacional e incrementar el salto de tiempo relacionado con la grilla más fina. Ambos de estos factores hacen el cálculo mucho más eficiente que la malla estándar y uniforme. SW4 genera la malla automáticamente basado en la topografía de la superficie ingresada y en las especificaciones más avanzadas del usuario.

TRANSFORMANDO PELIGRO A RIESGO.

Un objetivo principal del desarrollo de esta aplicación es, por primera vez, desarrollar estimaciones del movimiento de la tierra basadas en computación con suficiente frecuencia para dar evaluaciones de riesgo de ingeniería para un espectro de infraestructura crítica. Esto se llega utilizando un acoplamiento directo de simulaciones del movimiento de la tierra a simulaciones de infraestructura de modelos de elementos no lineales, incluyendo los efectos del rendimiento estructural y el daño

Esto nos daría vistas sobre la variación de riesgos a escala regional para terremotos muy grandes y podría ser usada para investigar la relación entre los parámetros geofísicos y la respuesta de la infraestructura.

El objetivo principal es llevar el código SW4 a otras plataformas y arquitecturas, para de esta manera realizar las optimizaciones necesarias y tomar provecho en las mejoras de desempeño

ALGORITMO Y KERNEL COMPUTACIONAL

SW4 consiste en varios kernels de doble precisión computacional (loops) para simular ondas sísmicas en escenarios geológicos realistas, esto aplica lo siguiente:

- Una función que simula la fuente del terremoto en espacio y tiempo.
- Un cálculo de tensión que aplica plantillas compactas a los desplazamientos y propiedades del material para calcular la divergencia del tensor.

- Una supergrid o rejilla que amortigua los límites del dominio.
- Condiciones del entorno en la superficie libre y límites del campo
- Un corrector que actualice los desplazamientos en el tiempo.

LO QUE SE ESPERA

Mientras la capacidad computacional avanza, la habilidad para realizar simulaciones basadas en peligros y riesgos reflejará con precisión la física del problema y las especificaciones del sitio de los fenómenos sísmicos, todo esto permitirá garantizar la seguridad de la infraestructura.

¿COMO SE ATACARÍAN DESDE LA EISI PROBLEMAS COMO EL ANTERIORMENTE EXPUESTO? ¿ES IMPORTANTE HACERLO PARA SANTANDER Y EL PAÍS?

La EISI cuenta con diversos grupos de investigación, al presentarse algún problema con una magnitud como el anteriormente planteado, estos se reunirían, plantearían el problema, objetivos y como llegar a cumplir estos objetivos y que puede aportar cada uno de estos grupos para cumplirlos.

En el caso de que alguno de los objetivos se salga del área de investigación de la EISI, la EISI puede recurrir a otras escuelas de la universidad y así obtener la información necesaria para resolver el problema.

Si el problema a resolver necesita un manejo de datos elevado, a nivel de la exascale, la EISI necesitaría a personas capacitadas en el tema las cuales pueden ser contratadas de otros países o pueden seleccionar a personas de los diferentes grupos a capacitarse en el exterior o crear un nuevo grupo de investigación dedicado exclusivamente a el tema de la exascale. luego de esto el conocimiento sobre el tema y las capacidades

que este puede abarcar, ya se puede abordar el problema de una manera más efectiva.

Santander es un departamento con alta actividad sísmica, la exascale sería de mucha utilidad por lo visto en el problema anterior y más aún Colombia si pudiese llegar a contar con esta tecnología, las investigaciones científicas y la producción de conocimiento aumentarían considerablemente, pero desde el punto de vista económico, se requiere una inversión desmedida para llegar a esta tecnología además se debería invertir en la eficiencia computacional.

CONCLUSION

Se puede decir que la modernización de las aplicaciones para la era exascale es indispensable para poder sacarle el máximo provecho a este tipo de sistema, también que para lograr conseguir esta capacidad computacional primero se deben superar una gran variedad de retos para tener el mejor desempeño, además de que una vez superados estos retos y con el sistema de supercomputo exascale en marcha se podrá dar un gran avance en la mayoría de las ramas de la ciencia, logrando así el siguiente paso para la evolución de la humanidad. Por último se puede decir la EISI con la creación de grupos de investigación y la complementación con los que ya existen se puede afrontar este tipo de problemas y que en cuanto a la importancia que tiene en Colombia o Santander el aprender sobre estos sistemas y poseer unos cuantos sería de gran utilidad pues ayudaría a prevenir desastres y mejorar el desarrollo científico y a su vez económico del país.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Johansen, A. Rodgers, N. Petersson, D. McCallen, B. Sjogreen and M. Miah, "Toward Exascale Earthquake Ground Motion Simulations for Near-Fault Engineering Analysis", *Computing in Science & Engineering*, vol. 19, no. 5, pp. 27-37, 2017.
- [2] J. Neely, B. de Supinski and C. Still, "Application Modernization for the Exascale Era", *Computing in Science & Engineering*, vol. 19, no. 5, pp. 6-8, 2017.
- [3] J. Neely and B. de Supinski, "Application Modernization at LLNL and the Sierra Center of Excellence", *Computing in Science & Engineering*, vol. 19, no. 5, pp. 9-18, 2017.
- [4] Proyecto de computación exascale. Disponible en www.exascaleproject.org
- [5] (Lawrence Livermore National Laboratory) S. Hemmert et al. "Exascale Hardware Architectures Working Group." Disponible en:

<https://asc.llnl.gov/content/assets/docs/exascale-hwaWG.pdf>
- [6] The ECP Exascale Computing Project

Disponible en:

<https://www.slideshare.net/insideHPC/the-ecp-exascale-computing-project>