

## PARALELISMO FUNCIONAL EN EL WRF

**Rodrigo Bayá Crapuchett<sup>a</sup>, Claudio Porrini Buti<sup>b</sup>, Martín N. Pedemonte Quintas<sup>a</sup> y  
Pablo M. Ezzatti Infante<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Instituto de la Computación, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.*

<sup>b</sup>*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.*

**Palabras Clave:** WRF, HPC, Paralelismo funcional.

**Resumen.** En la última década, Uruguay ha comenzado a migrar su matriz energética hacia energías renovables de origen eólico y solar. Debido a que es difícil prever el comportamiento de los fenómenos atmosféricos asociados a dichas fuentes de generación de energía, desde la Facultad de Ingeniería se están desarrollando herramientas que permitan predecir la generación de la energía asociada en una ventana de corto plazo. Sin embargo, estas herramientas presentan tiempos de ejecución elevados, específicamente en lo que respecta al cálculo del modelo regional de tiempo y clima WRF, por las siglas Weather Research and Forecasting. En este trabajo se propone una arquitectura asincrónica del modelo WRF, buscando disminuir los tiempos de cálculo de la radiación solar. Esta novel propuesta alcanza una aceleración de 1.2 veces cuando se compara con la mejor configuración del WRF original, utilizando los mismos recursos de hardware para ambos casos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uruguay se encuentra en un proceso vertiginoso de modificación de su matriz de generación de energía eléctrica. En particular, en la última década se ha dado un importante impulso a la generación de energía eólica y de origen solar. Alineado con esta política, investigadores del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería (FING) de la Universidad de la República (UDELAR) desarrollaron una herramienta para la predicción de la generación de energía eléctrica de origen eólico en el territorio Uruguayo. La herramienta se basa en la ejecución de un modelo numérico de circulación regional de la atmósfera y su post-procesamiento estadístico, así como en la asimilación en tiempo real de la potencia generada por los parques eólicos en la última hora y produce, como salida, un estimativo de la potencia generada por los mismos. Para modelo de pronóstico del tiempo, la etapa más costosa en recursos de cómputo, se usa el Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock et al., 2001), uno de los modelos numéricos más populares a nivel mundial para dicho fin. Desde el año 2014, los planes de desarrollo se han focalizado en la generación de energía de origen solar fotovoltaica. En concordancia con el esfuerzo anterior, se ha comenzado a desarrollar una herramienta de predicción de la generación de energía solar fotovoltaica sobre el territorio del país. El proyecto reúne investigadores del IMFIA, del Instituto de Computación (INCO) y del Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE) de la FING. Esta herramienta también se basa en el WRF, pero buscando potenciar los cálculos referidos a la radiación solar para mejorar la precisión de dicha estimación. En resumen, ambas herramientas demandan importantes volúmenes de cálculos, lo que motiva estudiar la aceleración del WRF para disminuir su tiempo de ejecución (y/o mejorar la precisión numérica de los resultados).

Por otro lado, en los últimos años el área de computación de alto desempeño (HPC, del inglés High Performance Computing), ha cambiado radicalmente. Además de las grandes plataformas de hardware reservadas para centros de cómputo con acceso a grandes fuentes de financiamiento, ha cobrado impulso el uso de plataformas de hardware de bajo costo. En especial, aquellas que incluyen procesadores multi-core y aceleradores de hardware (como las GPUs y los procesadores Intel Xeon-Phi). Este tipo de hardware ofrece capacidades de cómputo importantes con costos económicos y niveles de consumo energéticos razonables (Padoin et al., 2013). Pero, como contrapartida, estas plataformas que son especialmente aptas para el paralelismo de datos, exigen enfoques donde se puedan abatir, o al menos acotar de manera importante, las dependencias entre datos. Si bien el WRF incluye el uso de técnicas de paralelismo mediante la aplicación de la API OpenMP, evaluaciones preliminares realizada sobre los casos de estudio de interés mostraron que la herramienta ofrece una escalabilidad pobre en este tipo de escenarios. Esta situación limita fuertemente el aprovechamiento de equipos con números elevados de cores y/o arquitecturas masivamente paralelas.

Considerando lo expuesto en los párrafos anteriores, nuestra propuesta se centra en el desarrollo de una variante del WRF capaz de ejecutar módulos de forma concurrente. Logrando así, sacar partido del paralelismo de datos y de tareas al mismo tiempo. En particular, se desarrolló un prototipo que permite desacoplar los cálculos de radiación del modelo siguiendo un paradigma de *pipeline*, donde en un paso de tiempo se están calculando los cómputos del modelo en general y al mismo tiempo el módulo de radiación, cuya salida será entrada en pasos futuros del modelo general. Los resultados preliminares alcanzados muestran reducciones en los tiempos de ejecución de alrededor de un 20 % utilizando los mismos recursos de hardware.

El resto del documento se estructura de la siguiente forma. En la Sección 2 se describe someramente la herramienta para predecir la generación de energía solar fotovoltaica, prestando

especial atención en el modelo WRF. Luego, en la Sección 3 se presenta la propuesta, seguida de la evaluación experimental de la misma en la Sección 4. Finalmente, en la Sección 5, se ofrece un resumen de las principales conclusiones arribadas durante el trabajo y posibles líneas de trabajo futuro.

## 2. PREDICCIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La herramienta de predicción de la generación de energía de origen solar fotovoltaico desarrollada incluye diferentes componentes, como se resumen en la Figura 1. En la primera etapa, se toman los datos del modelo global de circulación de la atmósfera, Global Forecast System (GFS) (con una resolución de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ) y estos son utilizados para establecer las condiciones de borde e iniciales del modelo regional WRF (Numerical Weather Prediction, NWP). Luego, basado en estos datos, se ejecuta el WRF utilizando diferentes esquemas de parametrización. En la tercera etapa, se aplica un Model Output Statistics –MOS– (MOS1 en la Figura 1) para corregir la radiación solar horizontal. Posteriormente, la radiación es proyectada según la inclinación de los paneles fotovoltaicos, utilizando la información de plano de inclinación definida en cada planta. En la última etapa, se aplica un segundo MOS (MOS2 en la Figura 1), que consiste en aplicar una regresión lineal utilizando datos específicos de cada planta solar (como por ejemplo, índice de claridad, ajuste territorial, etc.) de forma de estimar finalmente la producción de energía de la planta fotovoltaica.

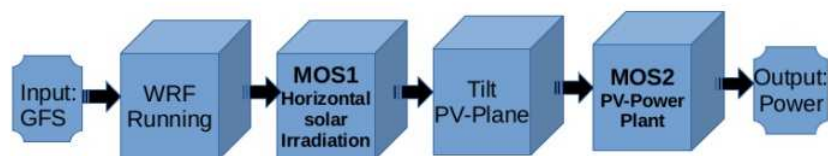


Figura 1: Módulos de la herramienta de predicción de la generación de energía de origen solar fotovoltaico propuesta.

Si se analiza esta herramienta desde el punto de vista del costo computacional, la mayor parte del tiempo de ejecución necesario para realizar la estimación de la planta es consumido por el modelo numérico de pronóstico del tiempo, el WRF. En particular, como se está estudiando el fenómeno de radiación, se utilizan módulos que permitan calcular esta propiedad de forma precisa. Cuando se analiza el funcionamiento del WRF en lo que respecta al cálculo de la radiación (y como se verá en profundidad más adelante), el modelo computa la radiación y utiliza estos valores por un lapso de tiempo posterior, configurable según una variable inicial. Si bien esta característica busca espaciar el cálculo de la radiación y así disminuir el tiempo de cálculo asociado, al momento de actualizar estos datos, el modelo debe detenerse y realizar los cálculos del pronóstico de la radiación nuevamente para el siguiente lapso temporal. La necesidad de una buena frecuencia de cálculo para este caso y el uso de un módulo de alta precisión para el cálculo de la radiación, inciden en que el WRF sea la etapa más costosa de la herramienta.

Considerando lo expresado anteriormente, nuestro esfuerzo se centra en modificar el paradigma de cómputo del WRF, por esta razón en el siguiente apartado se profundiza en la descripción del modelo.

## 2.1. El WRF

El programa WRF [Michalakes et al. \(2001\)](#) fue creado a principios de la década de los 90 por distintos centros de estudio relacionados a la investigación de los fenómenos de la atmósfera, principalmente ubicados en América del Norte. El WRF es un modelo numérico mesoescala, no hidrostático, euleriano y compresible, que permite predecir el clima orientado tanto al ámbito de la investigación atmosférica como al pronóstico del tiempo diario. Esta herramienta, permite pronosticar diversas propiedades físicas y químicas de la atmósfera, como el movimiento de masas de aire, humedad, formación de nubes y radiación emitida hacia y desde la superficie terrestre, entre otras.

Desde el punto de vista computacional, el WRF es un programa estructurado en capas y módulos, donde cada módulo presenta un solver de alguna propiedad química o física de la atmósfera. Para cada una de estas propiedades existen distintos módulos, donde varía la precisión del cálculo y en consecuencia el tiempo de ejecución del mismo. Para lograr la correcta simulación de la atmósfera, estos módulos son llamados por capas superiores del programa, siguiendo un orden en particular, debido a que la información de ciertas propiedades atmosféricas son utilizadas para los cálculos de otras. En particular, la radiación es una propiedad importante en el modelo y es utilizada por diversos módulos.



Figura 2: Funcionamiento de la arquitectura sincrónica del modelo WRF, cuando se lo divide según la porción de código que ejecuta la radiación y el resto de los módulos.

En la Figura 2, se muestra el comportamiento presente entre el módulo de la radiación y el resto de los cálculos del modelo, observándose dos características interesantes. La primera es, como se dijo anteriormente, que la radiación no se ejecuta en todos los pasos de simulación, sino que se calcula según una frecuencia determinada por una variable inicial. Esta variable le indica al código cada cuanto se ejecuta este módulo y a su vez cuanto tiempo se reutiliza el dato calculado. Este parámetro de configuración le permite al modelo definir la precisión de las variables relacionadas a la radiación independientemente del modelo que se ejecutó para su cálculo. Lo segundo a observar, es que para actualizar los datos de la radiación, el modelo

“se detiene” y ejecuta únicamente el módulo asociado a este fenómeno. Esto implica que los tiempos del modelo se ven fuertemente afectados por el tiempo que implican dichos cálculos, y más aún si se quiere que el modelo realice un cálculo preciso de esta propiedad.

En busca de disminuir los tiempos de ejecución, el modelo incluye estrategias de computación de alto desempeño, en particular permite emplear el paradigma Single Program Multiple Data (SPMD), es decir que el mismo programa computa en paralelo diferentes secciones de los datos (Foster, 1995). Sobre esta técnica, el modelo ofrece implementaciones con herramientas de memoria distribuida utilizando el estándar MPI (Snir, 1998; Gabriel et al., 2004) y memoria compartida utilizando la API OpenMP (Quinn, 2003). Específicamente, el WRF procede primero dividiendo los datos de entrada (el dominio de simulación) en sub-dominios (tantos como unidades de cómputo se especifiquen), para luego, ejecutar los cálculos de predicción sobre cada uno de los subdominios por separado. A pesar de este esfuerzo, cuando se requiere ejecutar la simulación sobre un dominio de dimensiones reducidas, como los dominios utilizados para las ejecuciones dentro del territorio Uruguayo, el paradigma se encuentra rápidamente limitado y resulta en que la herramienta no alcance altos niveles de eficiencia (Silva et al., 2014; Michalakes y Vachharajani, 2008; Skamarock et al., 2005). En la Sección 4 se estudia experimentalmente este comportamiento.

Otra herramienta que ofrece el WRF para reducir los tiempos de ejecución del modelo es el uso de dominios encajados. Esto permite realizar simulaciones de forma concurrente de varias grillas, que se contienen una dentro de la otra. De esta forma, el modelo permite aplicar los cálculos de una grilla como condición de frontera de otra, de forma de mejorar los cálculos de aquellas que son más interiores y poseen mayor precisión. En este esfuerzo no se considera el uso de dominios encajados por lo cual no se profundiza en la técnica.

### 3. PROPUESTA

Debido al alto costo computacional que el WRF presenta en las configuraciones necesarias para obtener un buen pronóstico de la radiación solar, resulta de interés analizar la herramienta e intentar introducir alguna técnica que permita disminuir los costos asociados. En particular, debido al pronunciado crecimiento de las arquitecturas multi-core y many-core en los últimos años, es útil introducir al modelo alguna técnica de computación de alto desempeño que permita aprovechar el poder de cómputo que estas arquitecturas ofrecen.

Como se vio en la Sección 2, el WRF presenta un sincronismo entre el cálculo de la radiación y el resto de los cálculos asociados al modelo general. Además, tiene implementado un paralelismo de datos utilizando OpenMP, que para los casos utilizados para Uruguay, no ofrece buenos niveles de escalabilidad. Por esta razón, parece interesante abordar en este contexto una propuesta basada en cambiar la arquitectura de cómputo del modelo WRF por un paradigma asíncrono, que no sólo permita realizar el cálculo en paralelo, sino que además no incurra en los problemas que surgen del paralelismo de datos ya presente en la herramienta. Específicamente, como se muestra en la Figura 3, resulta interesante implementar una técnica de paralelismo funcional que permita desacoplar los cálculos de la radiación solar y el resto del modelo, para poder ejecutar estos cálculos en forma solapada.

Este cambio en el modelo WRF permitirá hacer un uso eficiente de plataformas de hardware multi-core y many-core, aún con dominios de dimensiones modestas (como las discretizaciones usadas para representar nuestro país en los modelos numéricos implicados). En especial, el nuevo paradigma propuesto en este trabajo permite que el gestor de radiación se compute al mismo tiempo que otros módulos, disminuyendo e incluso evitando las esperas por la actualización de

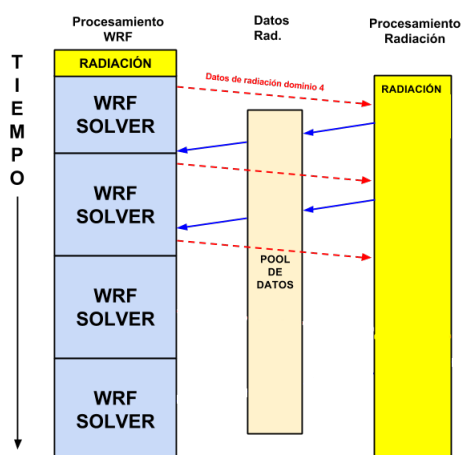


Figura 3: Funcionamiento de la arquitectura asincrónica del WRF.

los datos de este fenómeno.

Lo primero que se hizo fue desacoplar el código del cálculo de radiación del resto del modelo, que debido a la estructura en capas del modelo, no fue una tarea de alta dificultad. Luego, se estudiaron las variables involucradas en el cálculo de la radiación y se las clasificó de acuerdo a si eran de entrada al módulo o de salida de éste (o ambas). Posteriormente a esta etapa, se pasó a desarrollar el módulo de comunicación, una de las partes críticas para el funcionamiento correcto y eficiente de esta propuesta. Para ello, este módulo presenta dos *buffers*, uno dónde se almacenan temporalmente los datos a ser procesados por el módulo de radiación y otro, dónde se almacenan los datos de la última radiación calculada. Estos buffers son de interés para la implementación, ya que permiten reducir al máximo los tiempos de sincronización, los cuales se presentan solamente al momento de actualizar u obtener los datos. Por otro lado, este módulo presenta cuatro funciones, dos que le permiten a las partes actualizar los datos en los buffers correspondientes y dos que le permiten a estas partes obtener los datos que necesitan para continuar su ejecución. Además, el módulo maneja variables de mutuo exclusión, que sirven para avisar a ambas partes si pueden actualizar u obtener los datos pertinentes.

Una vez cubierta la separación de las secciones de código y la comunicación entre dichas partes, se pasó a diseñar el uso de paralelismo mediante *pipeline* que es la técnica elegida para explotar el asincronismo. Como se discutió anteriormente, el modelo necesita los datos de la radiación actualizados cada cierto período de tiempo, por esta razón, el prototipo presentado respeta este comportamiento, de forma de preservar la coherencia de datos original. Es decir, la propuesta no modifica el paso fijo seleccionado en la variable inicial, ya que el estudio del comportamiento de los valores de la radiación en este caso, requiere indagar más profundamente el efecto en el solver de usar un paradigma completamente asincrónico. Para cumplir con esta restricción, se utilizaron dos variables de mutuo-exclusión, que permiten, en caso de que no esté el dato necesario, retrasar la ejecución del modelo, de forma de no comprometer la precisión y coherencia de los datos, pero asegurando el comportamiento asincrónico deseado. En otras palabras, las variables en cuestión no permiten que los datos de la radiación se desactualicen más allá del intervalo que se indica como aceptable en las variables iniciales del modelo.

Es importante destacar, que la técnica introducida no afecta el paralelismo de datos presente en la herramienta, por lo que tanto el módulo de radiación desacoplado como el resto del modelo mantienen el uso de dicha estrategia.



## 4. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

En esta sección se resume la evaluación experimental realizada sobre la propuesta. En este sentido, se describen primero los casos de prueba considerados, luego la plataforma de hardware empleada y, por último, los resultados experimentales obtenidos propiamente dichos.

### 4.1. Casos de prueba

Para la evaluación experimental se usó como caso de estudio un dominio que comprende la zona sur y sur-este de Uruguay, discretizado en 243.756 puntos (74 en el eje este-oeste, 61 en el norte-sur y 54 en el vertical). Se utilizan como datos de entrada los registros ofrecidos por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) para el día 15/07/2012, haciendo una simulación total de 3 horas a partir de las 9 de la mañana de esa fecha, con un paso temporal de 15 segundos. El caso usado es representativo, en cuanto a exigencias computacionales, del tipo de simulación realizada para la predicción de la generación de energía solar con la herramienta desarrollada para el territorio nacional.

### 4.2. Plataforma de hardware

Las ejecuciones se realizaron sobre un equipo con un procesador AMD Opteron 6272 de 64 núcleos a 2.09GHz y con 48GB de RAM.

El sistema operativo es CentOS 6 y el compilador GNU C/FORTRAN v4.4.7. Como banderas de optimización se utilizó “-O3” y las banderas de empaquetado de estructuras en memoria “-fpack-arrays -fpack-derived”.

### 4.3. Resultados experimentales

En primera instancia se estudió el desempeño computacional de la variante original del WRF sobre el caso de estudio definido. El objetivo del estudio se centró en identificar la mejor configuración para la variante original y, al mismo tiempo, validar la premisa de la pobre escalabilidad del modelo. En este sentido la Tabla 1 presenta los tiempos de ejecución, medidos en segundos, que implica el WRF original al variar la cantidad de hilos utilizados, además de los valores de eficiencia ( $\frac{Tiempo_{paralelo} \times \#hilos}{Tiempo_{secuencial}}$ ) conseguida. La Figura 4 presenta la misma información previa en forma gráfica. De los datos de la tabla<sup>1</sup> se puede deducir que la configuración que requiere menor tiempo de ejecución es utilizando 32 hilos. Además, como se puede ver en las gráficas, el paralelismo de datos disponible en la herramienta (para el caso abordado) no ofrece una escalabilidad buena. Notar que no sólo el menor tiempo de ejecución es con 32 hilos sino que la eficiencia decae fuertemente al aumentar la cantidad de hilos.

<sup>1</sup>Notar que si bien, por cuestión de espacio, en la tabla se resumen los tiempos de ejecución para cantidad de hilos múltiplo de 8, la evaluación se realizó para todas las cantidades múltiplo de 2 (como se presenta en la Figura 4) y los tiempos al utilizar 30 y 34 hilos fue superior a utilizar 32.

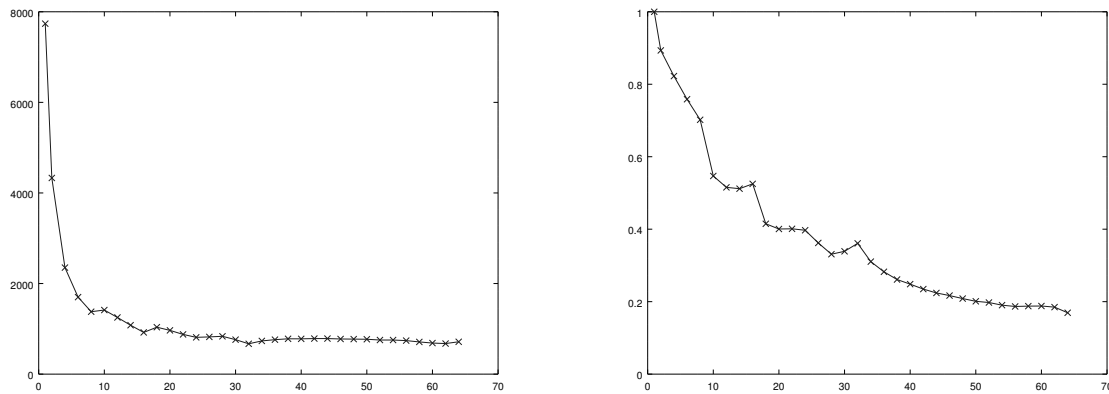


Figura 4: A la izquierda, progresión de los tiempos de ejecución (en segundos). A la derecha progresión de la eficiencia del modelo WRF en su versión original al cambiar la cantidad de hilos.

<i># Hilos</i>	<i>Tiempo (s)</i>	<i>Eficiencia</i>
1	7738	-
2	4331	0.89
4	2352	0.82
8	1378	0.70
16	921	0.53
24	812	0.40
32	670	0.36
40	779	0.25
48	773	0.21
56	740	0.19
64	714	0.17

Tabla 1: Tiempos de ejecución (en segundos) y eficiencia del modelo WRF en su versión original.

Los resultados obtenidos, en lo que respecta al desempeño computacional, por la variante propuesta se resumen en la Tabla 2. La tabla incluye la configuración de la propuesta, es decir la cantidad de hilos para el modelo en general y del módulo de radiación, que implicó menores tiempos de ejecución. Además es importante destacar que se configuró la propuesta para que realice una cantidad de cálculos de radiación comparable con la cantidad que realiza la variante original.

<i>Versión</i>	<i># Hilos</i>	<i>Tiempo (s)</i>	<i>Aceleración</i>
Original	32	670	-
Propuesta	30+30	564	1.19x

Tabla 2: Tiempos de ejecución (en segundos) de la mejor configuración del modelo original y de la propuesta asincrónica.

Si se considera la mejor configuración para cada versión, o sea la que minimiza el tiempo de ejecución del modelo, que en este caso son la de 32 hilos para el caso original (670s) y para la variante propuesta 30 hilos para el núcleo del WRF y 30 hilos para el cálculo de la radiación



(564s), los resultados muestran una mejora del orden de  $1.2\times$ . Estos resultados, conseguidos utilizando la misma plataforma de hardware, permiten afirmar que el cálculo asincrónico de la radiación logra aprovechar de mejor manera los recursos de cálculo de la plataforma.

Finalmente, es importante mencionar que para todas las ejecuciones de la nueva arquitectura, los resultados numéricos obtenidos se asemejan a los que arroja el modelo original. En particular, los resultados obtenidos en esta propuesta no presentan variaciones significativas a su par en el modelo original cuando se realizan la misma cantidad de pasos de radiación.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el trabajo se presenta una primera aproximación al desarrollo de una variante asincrónica del WRF. Este esfuerzo se centró en modificar el paradigma de cálculo de los módulos de radiación, permitiendo obtener un prototipo que computa de manera solapada los módulos de radiación con los módulos de cómputo del modelo general. La propuesta realizada permite utilizar paralelismo de datos en cada una de las secciones del modelo, módulos de radiación y modelo general, y a su vez paralelismo funcional entre las secciones al explotar la técnica de pipeline.

Los resultados obtenidos, si bien son preliminares, permiten vislumbrar que esta estrategia permitirá explotar de manera más eficiente las plataformas de hardware masivamente paralelas. Es conveniente señalar que se alcanzaron mejoras del entorno de un 20 % al utilizar la variante propuesta sobre una misma plataforma de hardware.

El desarrollo del trabajo no permitió dar una respuesta completa a varios desafíos y, además, se detectaron varias líneas potenciales para extender la propuesta. Algunos de estos desafíos están siendo abordados actualmente y otros se espera estudiarlos en trabajos futuros. Las líneas principales de trabajo son:

- Modificar la restricción de paso de tiempo fijo, esto permitiría mejorar los tiempos de ejecución al solapar en forma menos restringida.
- Abordar la aplicación de técnicas de dominios encajados.
- Evaluar el uso de plataformas de hardware híbridas, por ejemplo equipos que incluyan tarjetas gráficas (GPUs).
- Estudiar el impacto de la variante propuesta en el consumo eléctrico de la herramienta.

## AGRADECIMIENTOS

R. Bayá agradece el financiamiento parcial del centro ICT4V (Information and Communication Technologies for Verticals) mediante la beca POS\_ICT4V\_2016\_1 02. Además, los autores quieren agradecer al PEDECIBA (Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas) y a la ANII (Agencia Nacional de Investigación e Innovación), por la financiación recibida a través del proyecto FSE\_2013\_10975.

## REFERENCIAS

- Foster I. Designing and building parallel programs. 1995.
- Gabriel E., Fagg G.E., Bosilca G., Angskun T., Dongarra J.J., Squyres J.M., Sahay V., Kam-badur P., Barrett B., Lumsdaine A., et al. Open mpi: Goals, concept, and design of a next generation mpi implementation. En *European Parallel Virtual Machine/Message Passing Interface Users' Group Meeting*, páginas 97–104. Springer, 2004.

- Michalakes J., Chen S., Dudhia J., Hart L., Klemp J., Middlecoff J., y Skamarock W. Development of a next generation regional weather research and forecast model. En *Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the use of high performance computing in meteorology*, volumen 1, páginas 269–276. World Scientific, 2001.
- Michalakes J. y Vachharajani M. Gpu acceleration of numerical weather prediction. *Parallel Processing Letters*, 18(04):531–548, 2008.
- Padoin E.L., Pilla L.L., Boito F.Z., Kassick R.V., Velho P., y Navaux P.O. Evaluating application performance and energy consumption on hybrid cpu+ gpu architecture. *Cluster Computing*, 16(3):511–525, 2013.
- Quinn M.J. *Parallel Programming*, volumen 526. TMH CSE, 2003.
- Silva J.P., Hagopian J., Burdiat M., Dufrechou E., Pedemonte M., Gutiérrez A., Cazes G., y Ezzatti P. Another step to the full gpu implementation of the weather research and forecasting model. *The Journal of Supercomputing*, 70(2):746–755, 2014.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., y Dudhia J. Prototypes for the wrf (weather research and forecasting) model. En *Preprints, Ninth Conf. Mesoscale Processes, J11–J15, Amer. Meteorol. Soc., Fort Lauderdale, FL*. 2001.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., y Powers J.G. A description of the advanced research wrf version 2. Informe Técnico, DTIC Document, 2005.
- Snir M. *MPI—the Complete Reference: The MPI core*, volumen 1. MIT press, 1998.