

Metaheurísticas paralelas aplicadas al problema de explotación eficiente de energía eólica

**Pandolfi D., de San Pedro E., Villagra N.A., Bilbao C. M., Vidal P.,
Molina D., Valdez J.,**

LabTEM - Unidad Académica Caleta Olivia

Universidad Nacional de la Patagonia Austral

{dpandolfi, edesanpedro, avillagra, mbilbao, pvidal, dmolina, jcvaldez}@uaco.unpa.edu.ar

Leguizamón G.

Laboratório de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Computacional (LIDIC)

Departamento de Informática - Universidad Nacional de San Luis

legui@unsl.edu.ar

RESUMEN

Hoy en día el uso de energías renovables está creciendo en todas partes del mundo, ya que es una fuente de obtención de energía no contaminante e inagotable. El propósito más interesante es tratar de obtener la mayor cantidad de energía a un costo razonable, sabiendo que el parque eólico es un conjunto de molinos o aerogeneradores que se disponen estratégicamente para aprovechar al máximo el viento disponible en la zona.

Resolver problemas complejos (tanto problemas de optimización como de búsqueda) ha sido tradicionalmente uno de los aspectos más importantes en la investigación en el campo de la informática. El objetivo perseguido en este campo es fundamentalmente el desarrollo de nuevos métodos capaces de resolver problemas complejos con el menor esfuerzo computacional posible, mejorando así a los algoritmos existentes. En consecuencia, esto no sólo permite afrontar los problemas de forma más eficiente, sino afrontar tareas vedadas en el pasado debido a su alto costo computacional.

Aunque las metaheurísticas han demostrado su eficiencia, su uso para resolución problemas de instancias grandes provoca importantes incrementos en los tiempos de ejecución. Por esta razón, y basados en el aumento de posibilidades ofrecido por las arquitecturas de hardware modernas, la aplicación de estrategias de computación de alto desempeño y en particular la paralelización de metaheurísticas representan una opción interesante a la hora de reducir tiempos y tener algoritmos rápidos y eficientes.

En los últimos años, las unidades de procesamiento gráfico (GPUs) han sufrido un avance explosivo, pasando de ser dispositivos con una funcionalidad específica a ser verdaderos multiprocesadores de memoria compartida. En una primera etapa, el desarrollo del hardware gráfico no fue acompañado de un desarrollo equivalente de software. El rápido aumento en el rendimiento del hardware de gráficos junto con las recientes mejoras en su programación, han hecho que el hardware de gráficos sea una

plataforma atractiva para tareas que requieren de una gran intensidad de cómputo. Asimismo, la posibilidad de obtener este hardware a un coste relativamente bajo posibilita la aplicación en una amplia variedad de dominios de aplicación.

Palabras clave: Metaheurísticas, Paralelismo y Energía Eólica.

CONTEXTO

Este proyecto de investigación se desarrolla en el Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEM) en el marco del programa de Investigación en Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral.

1. INTRODUCCION

En la actualidad, la producción de energía basada en recursos no-renovables, como el petróleo, ha alcanzado importantes niveles de desarrollo, sin embargo, su continuidad está muy limitada por diversos factores que tienen que ver, por ejemplo, con el incremento de los costos para su explotación, efectos nocivos en el medio-ambiente y principalmente, por su agotamiento en un corto plazo. En consecuencia, diversas fuentes alternativas para la producción de energía vienen siendo consideradas. Una de ellas, la producción de energía eólica. En este caso particular, es importante poder realizar una explotación eficiente de su principal recurso (el viento) a los efectos de lograr niveles adecuados en cuanto a la relación del costo de la inversión para realizar la explotación y el beneficio obtenido en cuanto a la capacidad de energía producida.

En este sentido, un gran número de factores deberán ser considerados al momento de diseñar una estrategia que genere importantes beneficios a un costo razonable. Por ejemplo, factores como la intensidad y regularidad del viento, las características topográficas de la región en donde se

instalará el parque, tipo y cantidad de máquinas eólicas (aerogeneradores), y su respectiva distribución, entre muchos otros factores. Desde un punto de vista global y vinculado con la presente propuesta, podemos diferenciar varias etapas en el desarrollo de un plan de explotación eólica:

a) Recolección de datos sobre las características del viento (mediciones a través de anemómetros). Esta etapa también implica la definición de una estrategia adecuada para la selección de la ubicación y tipo de los equipos de medición a utilizar en función de al menos los siguientes aspectos: velocidad media y máxima del viento, distribución de frecuencias en las diferentes direcciones, variación del viento con respecto a la altura y posición, estadística de ráfagas, etc. [Escudero 2003].

b) Inferencia de posibles modelos del comportamiento del viento según los datos recolectados. En este caso, el estudio se puede complementar con aproximaciones basadas en la distribución de Weibull [Weibull 1951] la cual puede ser usada para caracterizar los datos asociados a la velocidad del viento.

c) Determinación del número y distribución óptima de las máquinas eólicas en lo que se denomina conformación del parque eólico o “wind farm” (por su término en Inglés). Más precisamente un parque eólico es una agrupación de máquinas eólicas o aerogeneradores, usadas para producir energía eléctrica y las cuales se distribuyen sobre una región generalmente extensa.

d) Uso de los modelos encontrados para realizar predicciones sobre el comportamiento del viento y por lo tanto, lograr un uso más eficientemente del equipamiento instalado.

Los puntos a), b) y d) se enmarcan, dentro de nuestra propuesta, en el contexto del proceso conocido como KDD (knowledge Discovering in Databases) [Fayyad et al. 1996]. Si bien el término KDD fue utilizado originalmente sobre datos almacenados en bases de datos, hoy en día, se lo considera un proceso que permite la extracción automática de conocimiento a partir de volúmenes de datos estadísticamente significativos (no necesariamente almacenados en bases de datos tradicionales o estructuradas).

2. LINEAS DE INVESTIGACION y DESARROLLO

En el contexto de construcción y mantenimiento de plantas productoras de energía, es indudable que a medida que los costos de los equipos para captura de diversos datos disminuyen y por ende se

expande su utilización, la cantidad de datos recolectados se incrementa proporcionalmente. En la actualidad existe un término (Energy Data Mining) que identifica a todos aquellos procesos de búsqueda automática en grandes volúmenes de datos, derivados de observaciones vinculadas a plantas productoras de energía, que intentan descubrir patrones ocultos, correlaciones entre diferentes atributos y modos operacionales sostenidos. Por lo tanto, tareas típicas de minería de datos, tal como clustering, regresión, clasificación, reglas de asociación, etc., pueden ser aplicadas sobre esos datos que ayuden a la toma de decisiones para un adecuado diseño y/o funcionamiento de una planta productora de energía.

En el caso de la energía eólica y desde la perspectiva del proyecto propuesto, estamos ante al siguiente situación: por un lado es importante tratar de ajustar los modelos del comportamiento del viento en ciertas regiones de la Patagonia a través del análisis de datos que permitan por un lado, describir o explicar el comportamiento de los datos; y por otro lado poder realizar ciertas predicciones para mejorar el aprovechamiento de los recursos disponibles cuando la planta se encuentre en proceso de producción de energía (<http://www.osdpd.noaa.gov/ml/index.html>).

Sin embargo, existen otras decisiones importantes antes de poner en funcionamiento un parque eólico de manera tal que pueda aprovechar al máximo las condiciones climáticas (comportamiento del viento en la zona elegida). En este caso es de vital importancia la distribución de las máquinas eólicas ya que este tipo de decisiones no son tan simples (es decir, no se trata solamente de distribuir aerogeneradores en una región ventosa). Cabe aclarar, que hay otro aspecto de fundamental importancia (fuera del alcance de nuestra propuesta) vinculado al tipo y diseño de los aerogeneradores a ser usados en la instalación.

Un proyecto bien encarado para la explotación eólica debe cuidadosamente definir la locación en donde se ubicarán las máquinas eólicas considerando, entre otras cosas, dirección y velocidad del viento en conjunción con otros aspectos específicos como por ejemplo, tener en cuenta que la velocidad del viento se incrementa con la altitud en regiones abiertas y que los sitios más adecuados son aquellos en la cima de cerros lisos y redondeados, en praderas y líneas costeras abiertas o entre montañas cercanas. En este último caso, por la posibilidad de la ocurrencia del efecto “embudo”.

Claramente, el problema de la distribución de las máquinas eólicas puede ser representado como un problema de optimización en donde la función objetivo podría representar la energía eléctrica producida (un problema de maximización de beneficios). Siendo éste además, un problema de

alta complejidad, puede existir más de un objetivo a optimizar e inclusive varias restricciones (lineales y no-lineales) asociadas al problema. En este sentido, diversas propuestas han sido consideradas para resolver el problema de distribución de las máquinas eólicas según las características de la función objetivo y la existencia de restricciones [Donovan 2007], [Donovan 2008], [Eliknton 2008].

Sin embargo, hay situaciones en que en los métodos tradicionales están limitados en su aplicación y por ende, los enfoques metaheurísticos se presentan como una alternativa altamente viable, no sólo por su robustez y flexibilidad, sino por la calidad de los resultados encontrados en tiempos razonables [Mora et al. 2007][Grady et al. 2005]. Más precisamente, las metaheurísticas proveen de un marco general que permite crear nuevos híbridos a través de la combinación de conceptos derivados de: heurísticas clásicas, inteligencia artificial, evolución biológica, sistemas naturales, mecánica estadística, etc. Esta familia de enfoques incluyen, pero no están limitados, a algoritmos evolutivos (AEs), optimización basada en colonia de hormigas (ACO), búsqueda local, búsqueda local guiada, búsqueda local iterada, simulated annealing (SA), tabu search (TS), scatter search (SS), greedy randomized adaptive search process (GRASP), redes neuronales, etc. [Glover et al. 2003]. En su evolución, estos métodos han incorporado diferentes estrategias para evitar la convergencia a óptimos locales, especialmente en espacios de búsqueda complejos.

En la actualidad es indiscutible el gran impacto que el desarrollo de las metaheurísticas ha tenido en muchos campos de aplicación, tanto en el ámbito académico como en problemas del mundo real. Además, varias de las metaheurísticas mencionadas anteriormente se caracterizan por ser poblacionales y por llevar a cabo un proceso de búsqueda altamente distribuido. Esto, en términos de mejoras en la eficiencia computacional, ha derivado en desarrollos de modelos y algoritmos paralelos, que no sólo se traduce en el aprovechamiento de las capacidades de cómputo existentes en la actualidad, sino que además, un incremento en la calidad de los resultados esperados [JH 2002, Alba 2005].

Hoy en día, los investigadores y desarrolladores han comenzado a aprovechar las GPUs para el cómputo de propósito general [Luebke 2004]. Además de su bajo costo y la disponibilidad en todas partes, las GPU exhiben una arquitectura de procesamiento superior en comparación con las CPU modernas, y por lo tanto presentan una gran oportunidad para el desarrollo de líneas de investigación en algoritmos de optimización, especialmente dirigido para las GPU.

Uno de los primeros trabajos en el área de GPU relacionado con meta-heurísticas es el de [Wong et al. 2005], en el que se estudiaron estrategias de

paralelismo tipo maestro-esclavo para aplicaciones de Programación Evolutiva (EP) aplicadas a la resolución de problemas de test simples.

Otra técnica muy estudiada sobre GPUs ha resultado ser la programación genética (GP) [Langdon 2010, Robilliard et al. 2009, Cano et al. 2010], sobre la cual se han hecho múltiples estudios de robustez y eficiencia de las implementaciones sobre problemas de optimización académicos y reales. Un trabajo pionero en utilizar GPUs para aplicar estrategias de paralelismo celular es el de [Yu et al 2005], en el que se propuso una implementación de un Algoritmo Evolutivo Celular (cEA) completamente sobre GPU para resolver el problema de minimización de Colille. Otro trabajo sobre celulares es la propuesta de [Li et al. 2007]. Su propuesta presenta como argumentos más interesantes la codificación binaria, texturas para almacenar la población y una textura extra con números aleatorios para la utilización durante todo el proceso.

Asimismo existen pocos trabajos que abordan el uso de estrategias multi-objetivos (MO) sobre GPUs [Kannas et al. 2009, Luong 2011]. En ellos se analiza el rendimiento de algoritmos evolutivos multi-objetivos canónicos comparando versiones secuenciales en CPU y en GPU respectivamente. También sucede lo mismo en el caso del Particle Swarm Optimization (PSO), trabajos tales como [Mussi et al. 2011] realizan un estudio básico del algoritmo en secuencial versus el implementado en GPU analizando el comportamiento de este último sobre una instancia de problemas académicos, obteniendo diferencias de tiempo entre las dos implementaciones de hasta 270 veces.

En síntesis, el presente proyecto tiene dos objetivos principales, uno de ellos, destinado al análisis inteligente de datos obtenidos a través de diversas mediciones in situ (provisas por diferentes fuentes) que permitan inferir modelos descriptivos y predictivos del comportamiento del viento. La otra parte, orientada a la investigación y desarrollo de metaheurísticas paralelas para resolver uno de los problemas claves (distribución) asociados al proceso de instalación de aerogeneradores en un parque eólico.

3. RESULTADOS OBTENIDOS/ESPERADOS

La mayoría de los integrantes del grupo tiene una amplia experiencia y capacidad en el desarrollo y conocimiento de los diferentes enfoques relacionados al campo de la inteligencia computacional. El grupo viene desarrollando tareas de investigación en el área desde el año 1998 mostrada a través de un importante número de publicaciones nacionales e internacionales

[Pandolfi et al. 2009a], [Pandolfi et al. 2009b] [Pandolfi et al. 2010a], [Pandolfi et al. 2010b], [de San Pedro et al. 2009], [de San Pedro et al. 2010],

[de San Pedro et al. 2011], [Valdez et al. 2009], [Villagra et al. 2009], [Villagra et al. 2010a], [Villagra et al. 2010b]

En la línea de paralelismo, hasta el momento se han desarrollado actividades de evaluación de la GPU mediante algoritmos genéticos celulares (cGAs) sobre instancias de problemas discretos y continuos. El algoritmo implementado [Vidal y Alba 2010a] ha valuado en tiempo y eficiencia, logrando encontrar el óptimo del problema en la mayoría de casos y en el resto quedando muy cerca del óptimo en un tiempo menor que el cGA secuencial. Asimismo se evaluó una implementación multi-GPU [Vidal y Alba 2010b], en la cual un cGA dividía su población sobre dos GPU. En este caso, los resultados obtenidos indicaban que el secuencial realizaba su ejecución más rápido, posiblemente debido al overhead que existía al comunicarse el algoritmo multi-GPU. No obstante, la eficiencia numérica no sigue presentando diferencia respecto del secuencial. Actualmente se ha desarrollado un nuevo algoritmo llamado Systolic Neighborhood Search (SNS) [Alba y Vidal 2010], buscando aprovechar el paralelismo que ofrece este tipo de arquitectura.

En particular en la aplicación de técnicas Metaheurísticas en problemas de optimización de la distribución de Máquinas Eólicas, LabTem ha trabajado en proyectos anteriores con éstas técnicas considerando diferentes situaciones del entorno eólico de estudio estudiando las siguientes cuestiones:

Estudio de diseño de parques eólicos considerando vientos constantes, y dirección variable con un solo tipo de molino. [Bilbao y Alba 2009a] Estudio de diseño de parques eólicos considerando diferentes vientos con un solo tipo de molino. [Bilbao y Alba 2009b]

Estudio de diseño de parques eólicos considerando datos reales de vientos con un solo tipo de molino. [Bilbao y Alba 2010a]

Estudio de diseño de parques eólicos considerando datos reales de viento con un solo tipo de molino y considerando terrenos irregulares. [Bilbao y Alba 2010b]

Estudio de diseño de parques eólicos considerando datos reales de viento con un solo tipo de molino, considerando terrenos irregulares y con diferentes costos de cimentación. [Bilbao y Alba 2011]

Estudio de diseño de parques eólicos considerando algoritmos paralelos para problemas de mayor dimensión. [Bilbao y Alba 2010c]

A continuación se mencionan los resultados esperados del proyecto:

1) Organización de los datos provenientes de mediciones in situ (de la región patagónica o de otras fuentes disponibles para uso de la comunidad científica) y aplicación de técnicas de Minería de Datos (tareas descriptivas).

2) Investigación, desarrollo y aplicación de Metaheurísticas para la distribución eficiente de los aerogeneradores o máquinas eólicas.

3) Paralelización de las Metaheurísticas desarrolladas (aprovechamiento de sus características inherentes para acelerar el proceso de búsqueda y mejorar la calidad de las soluciones).

4. FORMACION DE RECURSOS HUMANOS

Tres integrantes de esta línea de investigación están desarrollando su Tesis de Doctorado en temáticas afines.

Tres integrantes han comenzado su Maestría orientando sus cursos y trabajos a esta línea de investigación.

Se dirigen dos Trabajos Finales de Ingeniería en Sistemas y se cuenta con un Becario de Investigación, alumno de la carrera Ingeniería en Sistemas.

5. BIBLIOGRAFIA

[Alba 2005] E. Alba - Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms, Wiley-Interscience, 2005.

[Alba y Vidal 2011] Alba E., Vidal P., "Systolic Optimization on GPU Platforms". Eurocast 2011.

[Bilbao y Alba 2009a] M. Bilbao, E. Alba, Simulated Annealing for Optimization of Wind Farm Annual Profit, LINDI 2009, Linz, Austria.

[Bilbao y Alba 2009b] M. Bilbao, E. Alba, GA and PSO Applied to Wind Energy Optimization, CACIC 2009, Jujuy, Argentina.

[Bilbao y Alba 2010a] M. Bilbao, E. Alba, CHC and SA Applied to Wind Energy Optimization Using Real Data, CEC 2010, Barcelona, España.

[Bilbao y Alba 2010b] M. Bilbao, E. Alba, CHC and SA Applied To The Distribution of Wind Turbines on Irregular Fields, CACIC 2010, Buenos Aires, Argentina.

[Bilbao y Alba 2010c] M. Bilbao, E. Alba, Designing Optimal Wind Farms with Parallel CHC, ALIO-INFORMS Join International Meeting 2010, Buenos Aires, Argentina.

[Bilbao y Alba 2011] M. Bilbao, E. Alba, Algoritmos Evolutivos Aplicados al Diseño Inteligente de Parques Eólicos, CACIC 2011, La Plata, Argentina.

[Cano et al. 2010] Cano, A., Zafra, A. & Ventura, S. Solving Classification Problems Using Genetic

Programming Algorithms on GPUs. Hybrid Artificial Intelligence Systems 6077, 17-26 (2010).

[de San Pedro et al. 2009] de San Pedro M., Pandolfi D., Lasso M., Villagra A., Lorenzetti D., Fernandez C., Valdez J., Varas V., Vidal P., Bilbao M., Leguizamón G.; Técnicas de Minería de Datos y Metaheurísticas aplicadas a la explotación eficiente de energía eólica; XI Workshop de Investigadores de Ciencias de la Computación WICC'09; San Juan, Argentina; Mayo 2009.; Pág. 136-140; ISBN 978-950-605-570-7.

[de San Pedro et al. 2010] de San Pedro M., Pandolfi D., Lasso M., Villagra A., Lorenzetti D., Fernandez C., Valdez J., Varas V., Vidal P., Bilbao M. Metaheurísticas Poblacionales y Técnicas de Minería de datos aplicadas a problemas de optimización en energía eólica. El Calafate, XII Workshop de Investigadores de Ciencias de la Computación - WICC 2010; Argentina; Mayo 2010. Pág. 105-110.

[de San Pedro et al. 2011] de San Pedro M., Pandolfi D., Lasso M., Villagra A., Lorenzetti D., Fernandez C., Valdez J., Varas V., Vidal P., Bilbao M. Diseño óptimo de Parques Eólicos con Metaheurísticas poblacionales y técnicas de minería de datos utilizando procesamiento paralelo, XIII Workshop de Investigadores de Ciencias de la Computación - WICC 2011; Rosario, Argentina; Mayo 2011.

[Donovan 2007] S. Donovan, H. Waterer, R. Archer - Mixed Integer Programming Models for Wind Farm Design. Department of Engineering Science, The University of Auckland, Electric Power Optimization Centre, Winter Workshop 2007.

[Donovan 2008] S. Donovan - An improved mixed integer programming model for wind farm layout optimization. YPP entry, 2008.

[Elkinton 2008] C.N. Elkinton J.F. Manwell & J.G. McGowan - Algorithms for Offshore Wind Farm Layout Optimization. Wind Engineering, Volume 32, Number 1, January 2008, pp. 67-84(18). Multi-Science Publishing Co Ltd.

[Escudero 2003] J.M. Escudero López – Manual de Energía Eólica. Ediciones Mundi Prensa, 2003.

[Glover et al. 2003] F. Glover, G.H. Kochenberger (editors)- Handbook of Metaheuristics, Kluwer Academic Publishers, 2003.

[Grady et al. 2005] S. A. Grady, M. Y. Hussaini, M. M. Abdullah - Placement of wind turbines using

genetic algorithms Renewable Energy, Volume 30, Issue 2, February 2005, pp. 259-270.

[JH 2002] Journal of Heuristics - Special Issue: Parallel Meta-Heuristics. Volume 8, Number 3, Springer Netherlands, 2002.

[Kannas et al. 2009] Kannas, C.C.; Nicolaou, C.A.; Pattichis, C.S.; , "A Parallel implementation of a Multi-objective Evolutionary Algorithm, " Information Technology and Applications in Biomedicine, 2009. ITAB 2009. 9th International Conference on , vol., no., pp.1-6, 4-7 Nov. 2009

[Langdon 2010] Langdon, W.B. Large Scale Bioinformatics Data Mining with Parallel Genetic Programming on Graphics Processing Units. Parallel and Distributed Computational Intelligence 279, 113-141 (2010).

[Li et al. 2007] Jian Ming Li, Xiao Jing Wang, Rong Sheng He, and Zhong Xian Chi. An efficient fine-grained parallel genetic algorithm based on GPU-Accelerated. In Network and Parallel Computing Workshops, 2007. NPC Workshops. IFIP International Conference on, pages 855–862, 2007.

[Luebke 2004] Luebke, D. et al. GPGPU: general purpose computation on graphics hardware. SIGGRAPH 04 ACM SIGGRAPH 2004 Course Notes 121-121 (2004).

[Luong 2011] Luong T.V., Melab N., Talbi E.-G. GPU-based Approaches for Multiobjective Local Search Algorithms. A Case Study: the Flowshop Scheduling Problem. EVOCOP conference (2011).

[Mora et al. 2007] J.C. Mora, J.M. Calero Barón, J.M. Riquelme Santos, M. Burgos Payán - An evolutive algorithm for wind farm optimal design. Neurocomputing, Volume 70, Issue 16-18, pp. 2651-2658, October 2007.

[Mussi et al. 2011] Luca Mussi, Youssef S.G. Nashed, and Stefano Cagnoni. 2011. GPU-based asynchronous particle swarm optimization. In Proceedings of the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO '11), Natalio Krasnogor (Ed.). ACM.

[Pandolfi et al. 2009a] Pandolfi D., Villagra A, Leguizamón G.; Hibridización con Búsqueda Local de un algoritmo de estimación de distribución para la resolución del problema de secuenciamiento de Flow Shop, XV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación – CACIC 2009, Jujuy; octubre 2009.

[Pandolfi et al. 2009b] Pandolfi D., Villagra A, Leguizamón G.; Hibridización entre un Algoritmo Evolutivo y un Algoritmo de Estimación de Distribuciones para la solución de FSSP, Congreso de Inteligencia Computacional Aplicada (CICA), en la ciudad de Buenos Aires.; Julio 2009.

[Pandolfi et al. 2010a] Pandolfi D., Villagra A., de San Pedro E., Lasso M., Leguizamon G. An experimental study of an evolutionary tool for scheduling in oil wells, (IEA-AIE 2010), Trends in Applied Intelligent Systems; Cap Soft Computing Methods for Environmental and Industrial Applications Cordoba, España, Junio 2010.; pp 576-585.

[Pandolfi et al. 2010b] Pandolfi D., Villagra A, Rasjido J., Valdez J., Leguizamón G., Constraints-Handling in an Evolutionary Tool for Scheduling in Oil Wells, JAIIO (Jornadas Argentinas de Informática), Ciudad de Buenos Aires, Agosto 2010.

[Robilliard et al. 2009] Robilliard, D., Marion-Poty, V. & Fonlupt, C. Genetic programming on graphics processing units. Genetic Programming and Evolvable Machines 10, 447-471 (2009).

[Valdez et al. 2009] Valdez J., Pandolfi d., Varas V., Villagra A., Social Evolution Algorithm to solve Flow Shop Scheduling Problem, Jornadas Chilenas de Computación. Chile, Noviembre 2009.

[Vidal y Alba 2010a] Vidal, P., Alba, E.: Cellular genetic algorithm on graphic processing units. In: et al., J.G., ed.: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010). SCI, vol. 284, pp. 223–232. Springer, Heidelberg (2010).

[Vidal y Alba 2010b] Vidal, P.; Alba, E.; , "A multi-GPU implementation of a Cellular Genetic Algorithm," Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE Congress on , vol., no., pp.1-7, 18-23 July 2010.

[Villagra et al. 2009] Villagra A., Guzmán A., Pandolfi D., Leguizamón G.; Análisis de medidas no-supervisadas de calidad en clusters obtenidos por K-means y Particle Swarm Optimization; Congreso de Inteligencia Computacional Aplicada (CICA), ciudad de Buenos Aires.; Julio 2009.

[Villagra et al. 2010a] Villagra A., Pandolfi D., Leguizamon G." Hybrid PSO Algorithms for Dynamic Clustering. The International Conference on Data Mining (DMIN'10). 2010. Las Vegas, USA, Julio 2010.

[Villagra et al. 2010b] Villagra A, Pandolfi D., Rasjido J., Montenegro C, Seron N., Leguizamón

G.; Repair Algorithms and Penalty Functions to Handling Constraints in an Evolutionary, XVI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación. Universidad Moron. Octubre 2010.

[Weibull 1951] W. Weibull - A statistical distribution function of wide applicability. Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME 18(3), 293-297, 1951.

[Wong et al. 2005] Man Wong, Tien Wong, and Ka Fok. Parallel evolutionary algorithms on graphics processing unit. In Evolutionary Computation, 2005. The 2005 IEEE Congress on, volume 3, pages 2286–2293 Vol. 3, 2005.

[Yu et al 2005] Qizhi Yu, Chongcheng Chen, and Zhigeng Pan. Parallel genetic algorithms on programmable graphics hardware. In Advances in Natural Computation, pages 1051–1059. 2005.