

Manejo de Diversidad en CHC aplicado a la optimización del costo energético en parques eólicos

Martin Bilbao¹, Guillermo Leguizamón²

¹ Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Caleta Olivia, Argentina
mbilbao@uaco.unpa.edu.ar

² Universidad Nacional de San Luis, Argentina
legui@unsl.edu.ar

Resumen En este trabajo analizaremos diferentes mecanismos de manejo de diversidad para el algoritmo CHC (Crossover elitism population, Half uniform crossover combination, Cataclysm mutation) para resolver problemas de optimización en parques eólicos de energía. El algoritmo CHC convencional contiene un mecanismo de reinicio poblacional aleatorio, esto conlleva a la posibilidad de perder cierto conocimiento adquirido si no se maneja adecuadamente. Es por ello que estudiaremos otros mecanismos de reinicio poblacional que tengan en cuenta el conocimiento adquirido durante su evolución para intentar lograr mejor convergencia en los resultados. El objetivo final es minimizar el costo del KWh analizando tres variantes de reinicio poblacional y cómo impactan en los resultados finales con respecto a la versión de CHC convencional.

Keywords: Optimización, Energía eólica, Metaheurísticas, Inteligencia Artificial

1. Introducción

El viento es un recurso de la naturaleza que ha acompañado a la humanidad desde sus orígenes. Si bien el interés de utilizar el recurso del viento para producir energía se dio debido a la crisis de petróleo vivida en el 1973 [1], tiene grandes soportes para ser desarrollado e implementado. Uno de ellos es el aspecto económico ya que utilizamos un recurso natural para producir energía y el otro es una cuestión social y ambiental que están descritas en el protocolo de Kioto impulsado por las naciones unidas [2] y el libro blanco de energía impulsado por la unión europea [3].

Uno de los aspectos más importantes para la diseño de un parque eólico, es la forma de distribuir los molinos en diferentes tipos terreno, ya que deben ser ubicados de tal manera que no produzca interferencia con los demás y de forma que se obtenga la mayor eficiencia del mismo. Las cuestiones técnicas de distribución de molinos eólicos se pueden estudiar en los siguientes trabajos [4].

En el estado del arte se han desarrollado muchos trabajos relacionados a la temática en cuestión. Diversas propuestas han sido consideradas según las características de la función objetivo y la existencia de restricciones [6-7]. Por otro lado 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 [8-10] en donde aplicaron Algoritmos Genéticos para diferentes instancias de viento en un parque eólico.

Otros trabajos más recientes son los aportes de Kusiak et al. [12], Wanger et al. [13-14] y Wilson et al. [15-16] donde aplican enfoques multiobjetivos, estrategias evolutivas y modelos distribuidos de algoritmos genéticos para la resolución de instancias más complejas con restricciones. Para una reseña más completa de publicaciones relacionadas al diseño de parques eólicos de energía se recomienda el siguiente trabajo [17].

El resto del artículo se divide de la siguiente manera: en la sección 2 se explicará el modelo energético utilizado, así como los modelos de potencia, costos y función objetivo del problema, en la sección 3 se explicará el algoritmo CHC y las variantes de reinicio poblacional, en la sección 4 se mostrarán los experimentos realizados para los casos de estudios propuestos y en la sección 5 las conclusiones y trabajos futuros.

2. Modelado del problema de optimización de parques eólicos

El Wake Free Ratio es un parámetro determinante en el diseño de un parque eólico ya que nos permite saber la utilidad máxima obtenida del recurso eólico por n molinos en función al máximo teórico posible. Se sabe que, por el efecto estela [5] que produce un molino al estar próximo a otro, se genera automáticamente una reducción de la velocidad del viento, por ende una reducción de la energía producida (Wake Loss Energy). Para calcular el Wake Free Ratio se utiliza la Ecuación 1:

$$wfr = \frac{E_{tot}}{E_{wf} * n}, \quad (1)$$

siendo E_{tot} la energía total generada en el parque eólico teniendo en cuenta pérdidas por obstáculos e interferencias (Ecuación 5), E_{wf} la energía teórica posible que se puede obtener del parque eólico sin tener en cuenta pérdidas de ningún tipo y n es la cantidad de aerogeneradores que tiene instalado el parque eólico en el momento del cálculo.

El costo de producir un KWh es un factor importante para el mercado económico y la viabilidad del proyecto de construcción del parque eólico. El cálculo del KWh está asociado al Wake Free Ratio obtenido anteriormente y a la cantidad de molinos instalados, como se puede observar en la Ecuación 2:

$$costo_{kwh} = \frac{(c_t \cdot n + c_s \cdot \lfloor (\frac{n}{m}) \rfloor) (\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot e^{-0.00174n^2}) + c_{OM} \cdot n}{\frac{(1-(1+r)^y)}{r}} \cdot \frac{1}{8760 * E_{tot}} + \frac{0,1}{n} \quad (2)$$

En este caso, n y E_{tot} son las variables de la instancia, donde n es la cantidad de aerogeneradores de la configuración y E_{tot} es la cantidad de energía producida por el parque eólico, que despejada de la ecuación 3 se obtiene lo siguiente:

$$E_{tot} = wfr * E_{wf} * n. \quad (3)$$

Los demás parámetros son c_t , el costo de una turbina, desde la creación hasta su instalación, c_s , el costo de subestación, m , la cantidad de molinos que entran por subestación, r , la tasa de interés anual, c_{OM} , el costo de operación y mantenimiento anual por molino e y , el tiempo de vida del parque eólico en años.

2.1. Modelos eólicos utilizados

Los siguientes modelos eólicos reales serán utilizados para evaluar el comportamiento de las técnicas evolutivas. Dichos elementos se describen a continuación.

La distribución de Weibull o rosa de los vientos utilizada para el escenario se describe mediante la tabla 1 donde se encuentran los parámetros de forma (c) y escala (k), el factor de forma ω (probabilidad de que ocurra dicha velocidad de viento), como así también la dirección del viento en grados para todo el terreno.

$i-1$	θ_{i-1}	θ_i	k	c	ω_{i-1}	$i-1$	θ_{i-1}	θ_i	k	c	ω_{i-1}
0	0	15	2.0	7.0	0.0002	12	180	195	2.0	10.0	0.1839
1	15	30	2.0	5.0	0.0080	13	195	210	2.0	8.5	0.1115
2	30	45	2.0	5.0	0.0227	14	210	225	2.0	8.5	0.0765
3	45	60	2.0	5.0	0.0242	15	225	240	2.0	6.5	0.0080
4	60	75	2.0	5.0	0.0225	16	240	255	2.0	4.6	0.0051
5	75	90	2.0	4.0	0.0339	17	255	270	2.0	2.6	0.0019
6	90	105	2.0	5.0	0.0423	18	270	285	2.0	8.0	0.0012
7	105	120	2.0	6.0	0.0290	19	285	300	2.0	5.0	0.0010
8	120	135	2.0	7.0	0.0617	20	300	315	2.0	6.4	0.0017
9	135	150	2.0	7.0	0.0813	21	315	330	2.0	5.2	0.0031
10	150	165	2.0	8.0	0.0994	22	330	345	2.0	4.5	0.0097
11	165	180	2.0	9.5	0.1394	23	345	360	2.0	3.9	0.0317

Tabla 1. Distribución de vientos para el escenario de estudio

El modelo de obtención de energía está basado en la generación de energía de cada aerogenerador, la distribución de Weibull anteriormente descrita, el

modelo de estela y la interferencia con otros aerogeneradores y la orografía del terreno. Para un aerogenerador simple, la energía producida se calcula como muestra la ecuación 4:

$$E_{tot} = \int_{\theta} P(\theta) \int_v p_v(v(\theta), c(\theta), k(\theta)) \beta^i(v) \quad (4)$$

Donde $\beta^i(v)$ es la curva de potencia del aerogenerador utilizado en función a una velocidad de viento v dado, $p_v(v(\theta), c(\theta), k(\theta))$ es la distribución de probabilidad de Weibull (Tabla 1) en función a la velocidad del viento, el factor de forma y de escala, y $\int_{\theta} P(\theta)$ es la función de dirección del viento, el cual varía entre 0° y 360° .

Para calcular la interferencia entre molinos utilizaremos el modelo de estela propuesto por Park [11] que calcula las velocidades de viento en los puntos interiores a la estela y los nuevos parámetros de forma y escala, ya que ellos también se ven afectados, es por ello que la fórmula para la obtención de energía debe adaptarse al modelo de estela como muestra la siguiente ecuación 5:

$$E^{farm} = \left(\sum_i \int_{\theta} P(\theta) \int_v p_v^\theta(v, c_i(\theta), k_i(\theta), x_i, y_i, X, Y) \beta^i(v) \right) \quad (5)$$

El procedimiento para calcular el efecto del modelo estela entre los aerogeneradores utilizando el modelo Park se muestra en el Algoritmo 1

Algoritmo 1 Modelo de estela Park

Require: dado X, Y la posición de un aerogenerador, C_t thrust coefficient y k el factor de escala;

$a \leftarrow 1 - \sqrt{1 - C_t}$;

$b \leftarrow \frac{k}{R}$; /* R es el rotor del aerogenerador */

$u \leftarrow \text{unitstepfunction}$;

$o \leftarrow (x_i - x_j) \cos(\theta) + (y_i - y_j) \sin \theta$;

$d_{i,j} \leftarrow \|o\|$;

$\alpha \leftarrow \tan^{-1} k$;

para $i = 1$ hasta n **hacer**

para $\theta = 0^\circ$ hasta 360° **hacer**

para $j = 1$ hasta $n - 1$ and $j \neq i$ **hacer**

$\delta_{i,j} \leftarrow \cos^{-1} \left(\frac{o + \frac{R}{k}}{\sqrt{(x_i - x_j + \frac{R}{k} \cos(\theta))^2 + (y_i - y_j + \frac{R}{k} \sin(\theta))^2}} \right)$;

$Vdef_{i,j} \leftarrow u(\delta_{i,j} - \alpha) \frac{a}{(1 + b d_{i,j})^2}$;

fin para

$Vdef_i^\theta \leftarrow \sqrt{\sum_j (Vdef_{i,j})^2}$;

$c_i(\theta) \leftarrow c_i(\theta) \times (1 - Vdef_i)$;

fin para

fin para

La curva de potencia del aerogenerador es una función que muestra la salida de potencia obtenida en función a la velocidad del viento incidente en el aerogenerador. La misma consta de tres parámetros importantes como la velocidad inicial v_{in} , la velocidad nominal v_{rated} y la velocidad de corte v_{cut} . La fórmula que determina la obtención de energía del aerogenerador se puede observar en la Ecuación 6:

$$P_i(kW) = \begin{cases} 0 & \text{si } v_x < v_{in}, \\ \lambda \cdot v + \eta & \text{si } v_{in} \leq v_x \leq v_{rated}, \\ P_{rated} & \text{si } v_{rated} \leq v_x \leq v_{cut}, \\ 0 & \text{si } v_{cut} < v_x \end{cases} \quad (6)$$

Para esta instancia se ha dispuesto resolver el problema de optimización, que tiene como característica a considerar, la cantidad de aerogeneradores máximos posibles a utilizar (100 en este caso), la energía máxima posible que se puede obtener (7315.27 kw), las dimensiones ancho y largo en metros del terreno (3000 x 3000 metros) sin obstáculos considerados y la distribución de vientos considerada en la Tabla 1.

- Objetivo: Minimizar el costo de producción del Kw
 1. Maximizar el número de aerogeneradores dados por la instancia.
 2. Minimizar el costo de producción del Kw (fitness).

3. Algoritmo CHC y Variantes Propuestas

El algoritmo CHC [18] se ha comportado de manera eficiente en trabajos presentados anteriormente [19-21], es por ello que resulta interesante observar su desempeño en instancias reales obtenidas de simuladores de parques eólicos y analizar en terrenos complejos con funciones objetivos realísticas.

CHC es un algoritmo elitista que al seleccionar los padres mediante algún mecanismo, genera el cruzamiento siempre y cuando los individuos sean lo suficientemente diferentes. Para ello se mide la distancia de Hamming entre ellos y si es mayor a un umbral definido, se efectúa el cruce mediante un mecanismo llamado HUX (Heterogeneous Uniform Crossover), que consiste en mantener en sus descendientes las posiciones comunes entre los padres y a las posiciones diferentes, asignársela de manera equitativa, intentando mantener la diferencia entre ellos (diversidad). Esto es importante ya que CHC no tiene mecanismo de mutación directo, sino que mantiene en parte la diversidad generando hijos diferentes en la cruce.

En caso de que la población no logre mejorar porque se produce un estancamiento ante la falta de diversidad, dada una serie de iteraciones consecutivas, se produce un cataclismo en la población con el objetivo de introducir nuevos individuos y así lograr la diversidad necesaria para salir del estancamiento. En

su versión canónica, dicho reinicio poblacional consta de mantener el mejor individuo y formar la población restante tomando como plantilla la mejor solución encontrada y perturbarla bit a bit con una probabilidad de 35 %.

En nuestro caso hemos propuesto tres variantes al mecanismo de reinicio poblacional dado a que en estudios previos se ha observado que este mecanismo es muy importante para la convergencia del algoritmo ya que controla y mantiene el conocimiento adquirido por el problema durante su etapa de exploración.

- **MACHC (Modelo Aleatorio CHC)**: Reinicio Poblacional preservando el mejor individuo y los demás se generan en forma aleatoria.
- **MSCHC (Modelo Sesgado CHC)**: Reinicio Poblacional con probabilidad de mutación estática equivalente al sesgo de la distribución de energía en las posiciones factibles del parque eólico.
- **MECHC (Modelo Enriquecido CHC)**: Reinicio Poblacional con probabilidad dinámica equivalente a la diversidad genética de cada bit en función al mejor individuo, es decir que cada bit del mejor individuo se mantiene en los siguientes individuos con una probabilidad equivalente a la diversidad genética de ese bit a nivel poblacional.

La propuesta es resolver el escenario con cada una de las variantes mencionadas anteriormente y luego analizar la influencia del manejo de diversidad en los resultados obtenidos.

4. Experimentos realizados

En la siguiente sección, se resolverá una instancia real diseñada con un simulador comercial de diseño de parques eólicos, donde se estudian varios mecanismos de reinicio poblacional con el objetivo de minimizar el costo de kWh. Para comparar los resultados obtenidos con el algoritmo CHC se ha utilizado un algoritmo genético canónico, que resolverá las mismas instancias con los mismos parámetros para que sean totalmente comparables y poder realizar luego un análisis estadístico de los resultados. Para ello se han definido los siguientes parámetros de configuración para el aerogenerador: Potencia nominal = 1500 Kw, R (diámetro Rotor) = 38,5 metros, λ (pendiente) = 140,86, $\eta = -500$, $v_{in} = 3,5$ m/s, $v_{out} = 20$ m/s y $v_{rated} = 14$ m/s.

Para este escenario, se han realizado 2.000 evaluaciones que corresponden a 100 iteraciones sobre el algoritmo, y se ejecutaron 30 corridas independientes para luego comparar cada una de las instancias mediante un análisis estadístico.

Como objetivo principal, lo que se intenta optimizar es el costo de producción del Kw. Dicha función depende del Wake Free Ratio calculado anteriormente y de ciertos parámetros económicos que fueron tenidos en cuenta en la viabilidad del proyecto. La función tiene dos variables confrontadas: cantidad de turbinas

y costo del kWh. La ecuación 2 se utilizará como función de fitness a minimizar. En este caso se utilizarán los tres modelos de reinicio poblacional al momento de detectar un estancamiento en la población. Todas las propuestas serán comparadas con un algoritmo genético.

Los demás parámetros son constantes y pertenecen a diferentes costos en dólares del modelado del parque eólico, c_t es el costo de una turbina = 750.000, c_s el costo de la subestación = 8.000.000, m la cantidad de turbinas por subestación = 30, r la tasa de interés anual = 0,03, c_{OM} el costo de operación y mantenimiento por turbina = 20.000 e y el tiempo de vida útil del campo (años) = 20.

Los resultados más relevantes se muestran en la tabla 2 donde podemos observar los valores promedios de las 30 ejecuciones del escenario analizado. Como se puede ver MECHC obtuvo un costo promedio de 0,0020 dólares con un esfuerzo computacional de aproximadamente un cuarto del total de evaluaciones. La cantidad de molinos de la configuración encontrada es de 89 molinos.

Algoritmo	Costo	DvSt.	Evaluaciones	Generaciones	Cant.Turbinas
AG	0,0024122	+/- 0,001	1.968	98,50	79,15
MACHC	0,0022446	+/- 1,67E-05	1.468	67,90	80,10
MSCHC	0,0021946	+/- 0,0002	1.839	94,46	85,93
MECHC	0,0020505	+/- 1,65E-05	487	10,66	89

Tabla 2. Resultados Escenario Propuesto

En la figura 1 se puede ver cómo varía el costo energético de la mejor solución encontrada para ambos algoritmos. Se visualizan grandes mejoras en la función al inicio de la ejecución, luego de forma escalonada se logran avances importantes luego de la mitad de evaluaciones. Para el caso de ME-CHC la mejora fue continua inclusive al final de las evaluaciones. AG logró una mejora importante hasta la mitad de evaluaciones y luego no logró converger a una solución mejor. Tanto MACHC como MSCHC tuvieron un comportamiento similar, un poco inferior a MECHC.

En la figura 2 se puede observar la variación de energía a medida que avanzan las evaluaciones de todos los algoritmos. El análisis realizado es interesante ya que se puede ver que hay una variación importante en la energía producida manteniendo la misma cantidad de molinos, esto es debido a que existen muchas maneras de distribuir la misma cantidad de molinos en el parque y cada una de ellas tendrá un efecto importante en el Wake Free Ratio, por ende variará la energía real obtenida. En el caso de MECHC y MSCHC se ha obtenido un valor de energía de 499.560, 35kW, para MACHC se obtuvo 498.186, 14kW y GA 496.128, 57kW. Se puede observar la variación energética a medida que avanzan

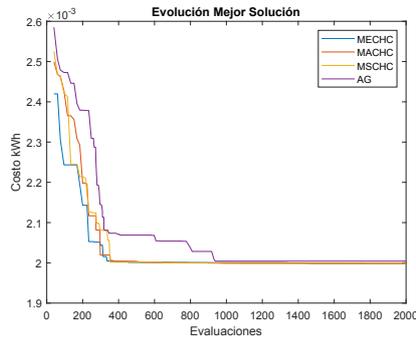


Figura 1. Evolución del costo energético Kwh para los 4 algoritmos

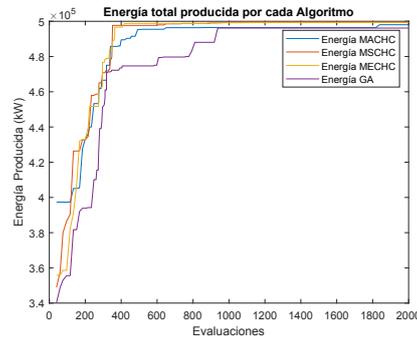


Figura 2. Energía Producida para los 4 algoritmos

las evaluaciones sin modificar la cantidad de molinos. Es muy importante tener en cuenta la relación que existe entre el Wake Free Ratio y la cantidad de energía producida.

MECHC ha tenido el mejor comportamiento en esta instancia. La forma de manipular el reinicio poblacional generando diversidad con conocimiento del problema fue clave para una mejor convergencia. En la figura 3 se observan los promedios del mejor fitness, los valores máximos y mínimos de las 30 ejecuciones.

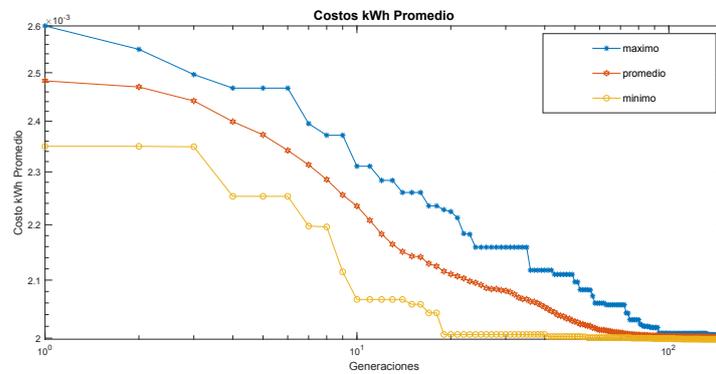


Figura 3. Valores promedios para las 30 ejecuciones de MECHC

Para poder comprobar si existen diferencias significativas entre cada una de las instancias evaluadas, realizaremos el análisis estadístico *Kruskal Wallis*, con un $\alpha = 0,05$, para determinar si existen diferencias entre todas las instancias. Luego utilizaremos *Wilcoxon de a pares* para analizar en grupos donde existe

tal diferencia. De esta manera podremos realizar un ranking para determinar un orden de mayor a menor en cuanto al desempeño del operador de reinicio poblacional. Para este análisis se utilizará la función objetivo costo como hipótesis. Al realizar el test de kruskal wallis, el p-value da un valor igual a 0,0028, como es menor al valor de significancia α , existen diferencias significativas en el desempeño de los tres casos analizados. Aplicando wilcoxon de a pares se obtiene lo siguiente:

- MACHC-MSCHC: p-value = 0,10 por lo tanto no existe diferencia significativa en sus desempeños
- MSCHC-MECHC: p-value = 0,021 por lo tanto existe diferencia significativa en sus desempeños, en este caso MECHC tuvo mejor desempeño
- MECHC-MACHC: p-value = 0,018 por lo tanto existe diferencia significativa en sus desempeños, en este caso MECHC tuvo mejor desempeño

Por lo tanto, se concluye que, en función al análisis estadístico, el mecanismo de reinicio poblacional MECHC ha mejorado el desempeño del algoritmo CHC, ya que los nuevos individuos, luego de un reinicio poblacional, se crean en función al conocimiento que tiene de cada una de las posiciones en particular dentro del campo eólico. Si es una posición interesante, tendrá una diversidad mayor en esa posición a nivel poblacional.

5. Conclusiones

Se puede observar que CHC se ha comportado correctamente ante instancias más realistas, pudiendo inclusive superar al algoritmo genético propuesto. Se observó que al manipular de forma eficiente la diversidad utilizando el conocimiento adquirido del problema mejoró notablemente los resultados obtenidos. MECHC utiliza la matriz energética del modelo teórico como base para la adquisición del conocimiento en las posiciones de mayor potencial eólico, dado que existen mejores vientos para aprovechar lo que se traduce en mayor concentración de energía capturable en la zona. Como trabajo futuro se propone trabajar con un dominio continuo en el espacio de búsqueda donde los molinos puedan ser ubicados en cualquier posición factible del campo eólico.

Referencias

1. D. Andersen, *Review of historical and modern utilization of wind power*, Risø-R-1205, 2007, disponible online en <http://www.risoe.dk/rispubl/VEA/dannemand.htm>
2. Naciones Unidas, *Protocolo de Kioto*, disponible online en <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
3. Comisión de la Unión Europea, *Libro blanco de la energía*, disponible online en <http://europa.eu.int/coo/of/white/>

4. J.F. Walker, N. Jenkins, *Wind energy technology*, John Wiley and Sons, Ltd./Inc., New York, 1997.
5. I. Katic, J. Hojstrup and N. O. Jensen, *A Simple Model for Cluster Efficiency*, European Wind Energy Association Conference and Exhibition, Rome-Italy, pp. 407-410, 7-9 October 1986.
6. S. Donovan *An improved mixed integer programming model for wind farm layout optimization*. YPP entry, 2008.
7. C.N. Elkinton J.F. Manwell & J.G.McGowan, *Algorithms for Offshore Wind Farm-Layout Optimization*. Wind Engineering, Volume32, Number 1, pp. 67-84(18). MultiScience Publishing Co Ltd. 2008.
8. S. A. Grady, M. Y. Hussaini, M.M. Abdullah *Placement of wind turbines using genetic algorithms Renewable Energy*, Volume 30, Issue 2, pp. 259-270. 2005.
9. 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.
10. H.S. Huang, *Distributed Genetic Algorithm for Optimization of Wind Farm Annual Profits*. Intelligent Systems Applications to Power Systems, International Conference on Volume , Issue , 5-8 ,Page(s):1 - 6. 2007.
11. S. Frandsen, *On the wind speed reduction in the center of large clusters of wind turbines*, Proceedings of the European Wind Energy Association Conference and Exhibition EWEC 91 Amsterdam, Netherlands. pp. 375-80. 1991.
12. A.Kusiak and Z.Song. *Design of wind farm layout for maximum wind energy capture*. Renewable Energy,35(3):685-694, 2010.
13. M.Wagner, K.Veeramachaneni, F.Neumann, and Una-May O'Reilly. *Optimization the Layout of 1000 Wind Turbines*. In European Wind Energy Association Annual Event, 2011.
14. M.Wagner, J.Day, F.Neumann. *A Fast and Effective Local Search Algorithm form Optimization the Placement of Wind Turbines*. Renewable Energy, 51(0):64-70,2013
15. D.Wilson, S.Cussat-Blanc, K.Veeramachaneni, Una-May O'Reilly and E.Awa. *On Learning to generate wind farm layouts*. In Proceedings of the fifteenth Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation Conference, ACM,2013
16. D.Wilson, S.Cussat-Blanc, K.Veeramachaneni, Una-May O'Reilly and Hervé Luga. *A Continuous developmental model for wind farm layout optimization*. In Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, pages 745-752, ACM,2014.
17. J. Serrano González, M. Burgos Payán, J. M. Riquelme Santos, F. González-Longattb *A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro-siting problem*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.027>, 2014.
18. L.J. Eshelman. *The CHC Adaptive Search Algorithm: How to Have Safe Search When Engaging in Nontraditional Genetic Recombination*. In Foundations of Genetic Algorithms,1, pages 265-283. Morgan Kaufmann, 1991.
19. M. Bilbao, E. Alba, *CHC and SA applied to wind energy optimization using real data*, CEC 2010, Barcelona-España, DOI: 10.1109/CEC.2010.5586395. 2010.
20. M. Bilbao, E. Alba, D. Pandolfi, *Metaheurísticas aplicadas al diseño de parques eólicos de energía*, SELASI,Venezuela, p. 35-42, ISBN: 978-980-7630-00-9. 2013.
21. M. Bilbao, G. Leguizamón , *Multicore Parallelization of CHC for Optimal Aerogenerator Placement in Wind Farms*, CACIC, Córdoba, Argentina, p. 85-94.ISBN: 978-987-688-377-1. 2019.