



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL**  
FACULTAD REGIONAL ROSARIO

## **Cátedra: Algoritmos Genéticos**

### **Proyecto de investigación**

**Tema: Parque Eólico**

Integrantes del grupo:

| <b>Nombre</b>          | <b>Legajo</b> | <b>Correo</b>                  |
|------------------------|---------------|--------------------------------|
| Bassi, Danilo          | 43725         | danilo-bassi@hotmail.com       |
| Bella, Sebastián       | 43784         | sebastian.o.bella.it@gmail.com |
| Garello, Iván          | 43804         | ivangarello@gmail.com          |
| Vacchino, Lucas Nehuén | 43870         | lnvacchino@gmail.com           |
| Zilli, Joel Matías     | 44107         | joelz97@outlook.com            |

Ciclo lectivo: 2020

---

Profesores:  
Daniela Diaz y Victor Lombardo

## Índice

|  |          |
|--|----------|
| <b>1. Introducción</b>   | <b>1</b> |
| <b>2. Consideraciones principales</b>  | <b>1</b> |
| <b>3. Elementos de trabajo y metodología</b>                                   | <b>2</b> |
| 3.1. Herramientas de trabajo . . . . .   | 2        |
| 3.2. Metodología: algoritmo genético . . . . .                                 | 2        |
| 3.2.1. Cromosomas y genes . . . . .  | 2        |
| 3.2.2. Población Inicial . . . . .   | 2        |
| 3.2.3. Selección . . . . .   | 2        |
| 3.2.4. Crossover . . . . .   | 3        |
| 3.2.5. Mutación . . . . .  | 3        |
| 3.2.6. Elitismo . . . . .  | 4        |
| <b>4. Resultados</b>   | <b>4</b> |
| 4.1. Caso 1 . . . . .  | 4        |
| 4.2. Caso 2 . . . . .  | 4        |
| 4.3. Caso 3 . . . . .  | 4        |
| <b>5. Discusión</b>  | <b>4</b> |
| <b>6. Posibles mejoras a implementar</b>                                       | <b>5</b> |
| 6.1. Variabilidad de la velocidad del vientos . . . . .                        | 5        |
| 6.2. Variabilidad de la direcciones del viento . . . . .                       | 6        |
| 6.3. Costo de implementación de cada molino . . . . .                          | 6        |
| 6.4. Especificación de características del terreno . . . . .                   | 6        |
| <b>7. Conclusión</b>   | <b>6</b> |
| <b>8. Agradecimientos</b>  | <b>6</b> |
| <b>9. Referencias</b>  | <b>7</b> |
| <b>10. Anexo</b>   | <b>7</b> |
| 10.1. Código fuente . . . . .  | 7        |
| 10.2. Tabla de rugosidades típicas . . . . .                                   | 7        |
| 10.3. Curvas de potencias para distintos modelos de turbinas eólicas . . . . . | 7        |

# Optimización en la generación de energía en un parque eólico

---

## Resumen

El presente documento tiene como finalidad presentar una posible solución ante el problema de cómo distribuir de la mejor manera posible un conjunto de generadores eólicos sobre un terreno determinado. Esta propuesta espera aportar como mejor solución aquella que indique la distribución de los generadores que produzca la mayor cantidad de potencia eléctrica, teniendo en cuenta varios factores como la rugosidad del terreno, la velocidad y dirección del viento, el efecto estela simple, el tipo de modelo del aerogenerador, entre otras consideraciones que serán posteriormente detalladas. Para esto, se ha desarrollado un algoritmo genético que, partiendo de un conjunto de posibles soluciones generadas al azar, intente obtener, a partir de los operadores utilizados (selección, cruce y mutación) la mejor solución posible, aunque esta pueda no ser la óptima del problema planteado. En los capítulos siguientes se explicará el contexto del problema abordado, las consideraciones principales, la descripción del algoritmo genético abordado (además del aporte libre del código fuente desarrollado), la muestra y discusión de los resultados obtenidos y el planteo de posibles mejoras que se podrían dar al planteo dado.

Palabras clave: Algoritmos Genéticos, Parque Eólico, Aerogeneradores, Maximizar Potencia Generada.

---

## 1. Introducción

Ya es de público conocimiento que las emisiones de Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) en el ambiente van en crecimiento año tras año, produciendo cambios en las condiciones climáticas del planeta. Una de las formas de evitar las emisiones de este tipo de gas es la generación (y utilización) de energías provenientes de fuentes renovables, como la energía solar, energía eólica, energía hidráulica, energía marina, entre otras más.

En el presente trabajo, se hará mención particular a la generación de energía eólica, haciendo un enfoque detallado a la localización y distribución de la totalidad de los aerogeneradores disponibles. En primer lugar se describirá la ubicación propuesta del parque eólico.

En Argentina, un proyecto basado en la instalación de un parque eólico es factible si tomamos la variable más importante: el viento. "Desde este punto de vista, Argentina se destaca por contar con la Patagonia, una de las zonas con mayor potencial eólico del planeta, pero además cuenta con recursos eólicos adecuados en otros sitios específicos de todo el país, como la Puna, la precordillera y en la costa atlántica de la provincia de Buenos Aires." (Educ.ar, 2020). Lo dicho se puede presenciar también en el mapa aportado por la Secretaría de Energía de la Nación (Secretaría de Energía, 2020). Otra de las variables a tener en cuenta, según se enuncia en la nota de Educ.ar (2020), es la "existencia de grandes espacios alejados de los núcleos de población". Es allí donde hacemos mayor hincapié, ya que este documento plantea la posibilidad de plantar un parque eólico en el sur de Santa Fe que, aunque no posea un promedio de vientos alto en comparación con otras regiones, sus espacios amplios sin núcleos urbanos sumado a la mínima rugosidad que presenta el relieve pampeano son suficientes para considerarlo como una opción.

Se plantea la posibilidad de realizar un parque eólico en el departamento General López (Santa Fe). Esto se basa en la investigación desarrollada por GENERFE (2018) donde muestra

la dirección y velocidad de los vientos de las ciudades de Venado Tuerto y Rufino, observando allí un promedio de velocidad de viento de casi 7 m/s, llegando a presentar máximos cercanos entre 26 y 30 metros por segundo con una orientación predominantemente proveniente desde el norte (medidas tomadas a 60 metros respecto a la altura del suelo). El parque eólico se dividirá en 10 casilleros, donde cada celda ocupará un área de  $4r$  metros cuadrados, siendo  $r$  el radio del rotor del modelo de la turbina eólica utilizada. Cada celda contendrá como mucho un único generador y esta, junto con las demás, se conectarán a la red eléctrica para así poder aportar la energía obtenida a partir del viento.

En nuestro estudio, tratamos específicamente una forma de definir la distribución de los aerogeneradores a instalar, siendo el principal objetivo lograr la obtención de una forma de distribuir los aerogeneradores que resulte ser la más óptima y eficaz, teniendo en cuenta la potencia total generada por el parque eólico. Esta técnica se apoya con la implementación de un algoritmo genético, técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución que utiliza los mecanismos de selección, cruce y mutación de las distintas posibles soluciones generadas.

Por lo tanto, en este trabajo se encontrarán con las siguientes temáticas abordadas en detalle: las consideraciones principales sobre la implementación de un parque eólico, la descripción minuciosa del algoritmo genético desarrollado para la definición de la distribución de los aerogeneradores, los resultados obtenidos a partir de los parámetros de entrada previamente definidos y las posibles mejoras que se podría sumar al algoritmo desarrollado para que el contexto planteado se asemeje más a la realidad.

## 2. Consideraciones principales

- El viento sin perturbar se mantiene constante y proviene de una sola dirección (norte).

- La rugosidad del terreno  $Z_0$  es de 0.0024 en todos los casilleros. Pero se deja la posibilidad de cambiarla en los parámetros del programa (Para referencias ver Anexo, Tabla 1).
- Efecto estela simple.
- Para evitar que dos molinos adyacentes interfieran mutuamente con su funcionamiento la distancia entre los mismos será cuatro veces el radio del rotor.
- Modelo de aerogenerador: A elección. Los resultados que mostremos serán en su mayoría con el GAMESA G47.
- Cantidad máxima de turbinas eólicas: 25

### 3. Elementos de trabajo y metodología

#### 3.1. Herramientas de trabajo

Para el desarrollo del modelo se utilizó el lenguaje de programación Python, en su versión 3.7.2. Como IDE de desarrollo se utilizó Visual Studio Code, con la extensión Live Share, lo cual permitió que el equipo de trabajo pueda editar de manera grupal y en tiempo real el código del programa.

Los diferentes modelos de Aerogeneradores con sus respectivas curvas de potencia se obtienen de una tabla de Excel que se adjunta en el repositorio junto con el código fuente (ver Anexo).

Las librerías utilizadas fueron:

- random: Librería muy robusta para la generación de números aleatorios. En nuestro caso fue utilizada para generar números aleatorios con distribución uniforme.
- pygame: Conjunto de módulos de Python orientados a la aplicaciones 2D orientadas a sprites. Se utilizó para representar gráficamente la salida del programa.
- pandas: Librería que proporciona múltiples herramientas de análisis de datos. En nuestro caso, se utilizó para obtener los datos de los generadores desde la tabla de Excel.
- curses: Módulo de Python que nos sirve para poder crear interfaces gráficas y control de teclado en aplicaciones de consola.
- matplotlib: Es una librería de trazado 2D que produce gráficas de buena calidad en una variedad de formatos. Se utilizó para mostrar la evolución de la función objetivo a través de las diferentes generaciones.

#### 3.2. Metodología: algoritmo genético

Un Algoritmo Genético es una metodología de búsqueda dirigida basada en probabilidad que tiene como fin encontrar una buena solución a un problema, aunque esta pueda no ser la solución óptima. Los algoritmos genéticos tienen como característica principal el uso de operaciones modeladas que modifican objetos denominados cromosomas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto. En esta subsección se especifica la definición de los cromosomas y genes, se señala la conformación de la población de cromosomas y se detallan los operadores principales del algoritmo: selección, cruce (crossover), mutación y elitismo.

##### 3.2.1. Cromosomas y genes

En los algoritmos genéticos, un cromosoma es un conjunto de genes que representan una posible solución. Para este problema, se define al cromosoma como una matriz de  $10 \times 10$ , donde cada posición de la matriz representa un gen, que contiene la información de cómo estarán distribuidos los aerogeneradores en el posible parque eólico.

Una posible solución a lo anterior mencionado es la utilización de matrices binarias donde cada gen es definido con un valor booleano: 1 significa que existe una turbina eólica en esa posición de la matriz y 0 indique la ausencia del mismo. En nuestro estudio, se decidió codificar una clase aparte que represente al gen llamada "Casillero", la cual nos permitió guardar información adicional del gen dependiendo del lugar que ocupe en la matriz, facilitando de esta manera los cálculos necesarios.

Por lo tanto, nuestro cromosoma será una matriz de  $10 \times 10$  genes, donde cada gen es una instancia de la siguiente clase:

##### Casillero:

- fila: Indica la fila a la que corresponde ese gen.
- columna: Indica la columna a la que corresponde ese gen.
- hayGenerador: Valor booleano que indica si hay generador en ese casillero.
- viento: Numero que indica el viento que pasa por ese casillero.
- generador: Se guarda el modelo de aerogenerador a utilizar
- potenciaGenerada: Numero que indica la potencia generada. Se calcula según el viento y el modelo de generador.

##### 3.2.2. Población Inicial

La ejecución de un algoritmo genético comienza con la generación de una población inicial que contenga una cantidad determinada de cromosomas (definida con anterioridad) generadas al azar.

En este trabajo, la población inicial estará formada por un conjunto de 50 cromosomas, donde los molinos de cada uno de ellos se distribuirán aleatoriamente. Para realizar esto, se elijen dos números enteros al azar,  $f$  y  $c$ , ubicados en el rango  $[1, 10]$ , donde  $f$  indica la fila de la matriz del cromosoma y  $c$  la columna de la misma, definiendo así la ubicación donde se colocará el aerogenerador inicialmente. En el caso de que se elijan dos pares iguales de  $f$  y  $c$ , se volverá a realizar otra selección de números. Estos pasos se repiten hasta distribuir en total 25 generadores en la matriz.

##### 3.2.3. Selección

Una vez formada la población inicial, pasamos al método de selección, donde se van a elegir a los mejores cromosomas de la población para luego reproducir dos hijos, que puede ser resultado del cruce de los cromosomas seleccionados y que van a ser parte de la próxima generación. Para lograr esto, primero debemos asignar a cada cromosoma una puntuación llamada

”Fitness” que representa cuán cerca está una solución de ser la mejor de la población en comparación de los demás cromosomas de la generación a la que pertenece. A partir de este fitness, se determinarán los cromosomas que se van a reproducir y aquellos que se van a eliminar.

Para nuestro problema, la funcion Fitness para un cromosoma en particular está definido de la siguiente manera:

$$Fitness = \frac{f_{obj}(x)}{\sum_{i=1}^n f_{obj}(i)}$$

$$f_{obj} = \sum_{f=1}^{10} \sum_{c=1}^{10} Pot_{f,c}$$

Donde  $n$  es el tamaño de la población,  $f_{obj}(x)$  es la función objetivo del cromosoma  $x$  y  $Pot_{f,c}$  es la potencia generada por el aerogenerador (si es que existe un generador) en el casillero fila  $f$ , columna  $c$  del cromosoma.

Cuando terminamos de evaluar el fitness de cada cromosoma, se tiene que crear la nueva población tratando de que los buenos rasgos de los mejores cromosomas se transmitan a ella. Para esto, como método de selección de los mejores padres, hemos aplicado el método de la rueda de ruleta.

La rueda de ruleta consiste en crear un pool genético formado por cromosomas de la generación actual, en donde cada cromosoma ocupa de ese pool una cantidad proporcional a su fitness. Por lo tanto, dentro de este pool se escogerán parejas de cromosomas de manera aleatoria para que se puedan emparejar, logrando que los mejores cromosomas sean los más probables en ser elegidos y los peores sean los menos probables y, por ende, son eliminados de la generación siguiente. De esta forma, logra la selección de la mejor pareja de una generación, sin importar incluso que ambos cromosomas seleccionados sean iguales.

### 3.2.4. Crossover

Una vez seleccionada la pareja, el operador de Crossover (cruza o reproducción) consiste en el intercambio de material genético entre estos dos cromosomas. Es decir, distingue los genes que proporcionan al cromosoma una característica que lo distingue como un buen cromosoma.

En este caso, el método elegido consiste en elegir de cada padre las mejores filas y columnas, para luego formar dos hijos: el primer hijo será formado por las mejores filas de sus padres, y el segundo, por las mejores columnas.

Luego, una vez obtenido ambos hijos, se verifica si se cumple la restricción de que cada cromosoma posea a lo sumo 25 generadores, es decir, que no se haya producido un cromosoma que tenga 26 genes o más que simbolizen la presencia de un generador. Si lo anterior no se produce, no se realiza ninguna acción; en cambio, si se detecta un cromosoma inválido de este tipo, entonces se prosigue con la selección del generador que menos potencia genera para su posterior eliminación del cromosoma. Esto se repite hasta tener como máximo 25 generadores por cromosoma.

Este operador posee una probabilidad de ocurrencia que define si se debe realizar o no con el par de cromosomas que se hayan seleccionado. La probabilidad de ocurrencia se define con

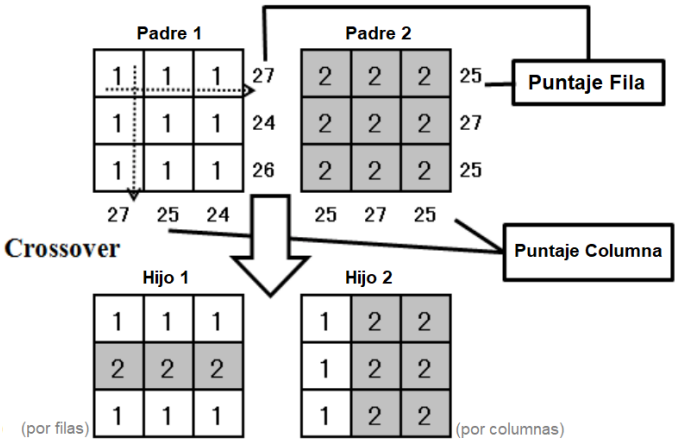


Figura 1: Ejemplo del Crossover utilizado en matrices 3x3.

un numero perteneciente al intervalo  $[0,1]$  y, al ejecutarse el operador, se compara con un número generado al azar perteneciente al mismo intervalo. Si este valor generado es menor que el valor de probabilidad definido previamente, la acción es ejecutada; caso contrario, los padres pasan a ser directamente los hijos sin realizar el cruce entre ellos.

### 3.2.5. Mutación

En la evolución biológica, una mutación es un suceso bastante poco común (sucede aproximadamente una de cada mil replicaciones) y en la mayoría de los casos suele ser letal. Pero en el largo plazo, contribuyen a la diversidad genética de la especie. En un algoritmo genético tendrán el mismo papel: ocurrir con baja frecuencia para contribuir a la diversidad genética de la población.

Para nuestro trabajo, hemos utilizado el método de *mutación invertida* que consiste en elegir 2 coordenadas al azar de una tira de genes pertenecientes a una fila de un cromosoma para luego invertir el orden de estos entre esos 2 puntos elegidos.

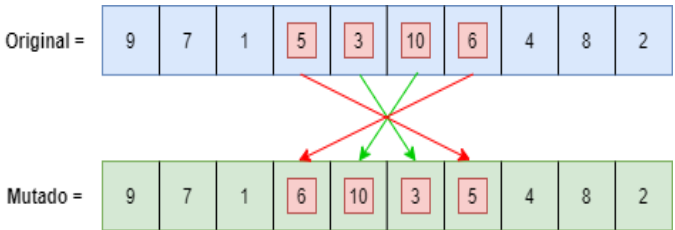


Figura 2: Ejemplo mutación invertida sobre un cromosoma

Como en el caso del crossover, el operador mutación también tiene una probabilidad de ocurrencia que, por definición teórica debe ser un valor bajo pero sin llegar a ser cercano a cero. Esta probabilidad también se encuentra en el intervalo  $[0,1]$  y la comparación de este valor con el número generado aleatoriamente al inicio del método es exactamente igual al descrito en el apartado anterior.

### 3.2.6. Elitismo

El elitismo es un método consistente en la preservación de un grupo de individuos definidos como elite. "Coloquialmente, por elite se entiende un grupo pequeño que por algún motivo, característica, facultad o privilegio es superior o mejor en comparación al grueso de una población determinada; con cualidades o prerrogativas de las que la gran mayoría no disfrutan." (Díaz, 2013).

En el algoritmo genético, esto refiere a la preservación de uno o más cromosomas que son definidos como los mejores en comparación por el valor de su Fitness. Para preservarlos, simplemente se los añade a la población de la generación siguiente sin ninguna modificación, o sea, sin pasar por los operadores crossover o mutación. El resto de los individuos serán operados con normalidad como lo descrito en las secciones anteriores.

Este mecanismo se aplica en todas las generaciones producidas, por lo que se presencia su principal característica: mantener siempre el mejor cromosoma y lograr que la calidad de la población no disminuya.

## 4. Resultados

Al realizar diferentes ejecuciones del programa realizado pudimos obtener distintos resultados que decidimos dividir en tres casos.

Las salidas completas del programa pueden encontrarse en el siguiente link: <https://cutt.ly/AG-TPI-ejecuciones>

### 4.1. Caso 1

- Modelo de aerogenerador: Gamesa G47.
- Viento norte constante de 20 m/s.
- Longitud de estela de 5 casilleros.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

Figura 3: Resultado del programa con aerogenerador Gamesa G47 y viento de 20 m/s.

### 4.2. Caso 2

- Modelo de aerogenerador: Gamesa G128.
- Viento norte constante de 20 m/s.
- Longitud de estela de 5 casilleros.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| x |   |   |   | x |   |   |   | x | x |
|   |   |   | x |   | x | x |   |   | x |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| x |   | x | x |   | x |   | x | x |   |
|   | x |   |   | x |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| x |   |   |   |   |   |   | x |   | x |
| x |   |   |   | x | x |   | x |   |   |

Figura 4: Caso 2: Resultado del programa con aerogenerador Gamesa G128 y viento de 20 m/s.

### 4.3. Caso 3

- Modelo de aerogenerador: Areva M5000-116.
- Viento norte constante de 13 m/s.
- Longitud de estela infinita.

5.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| x | x | x | x |   |   |   | x | x | x | x |
|   |   |   |   |   | x | x |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| x |   |   | x | x |   |   |   |   | x | x |
|   |   |   |   |   | x | x |   | x |   |   |
|   |   | x |   |   |   |   | x |   |   | x |
|   |   |   | x | x |   | x |   |   | x |   |

Figura 5: Caso 3: Resultado con el aerogenerador Areva M5000-116, estela infinita y viento de 13 m/s.

## 5. Discusión

En la salida del programa para el Caso 1, se puede observar que el algoritmo fue capaz de identificar que las ubicaciones más favorables eran en los casilleros de la primera fila, dado que ellos no se ven interferidos por la estela de ningún aerogenerador y dejan más espacio para colocar aerogeneradores en filas inferiores. Esto parecería intuitivo y a priori parecería una regla general, pero no es así y se verá con detalle para el caso 2.

A su vez, se podría decir que la distribución de los aerogeneradores es "casi óptima", dado que la mayoría se encuentra generando cerca de su límite máximo para el modelo de generador seleccionado (700 kW).

Este resultado se podría optimizar manualmente haciendo que todos las columnas tengan un formato parecido a la de las columnas 6, 7, 8 y 9 empezando de izquierda a derecha. Dado que es una de las mejores combinaciones de las posibles en una columna con 3 aerogeneradores bajo estas condiciones.

En el Caso 2, se ejecutó el programa con las mismas condiciones iniciales que en el Caso 1, con la excepción de que se cambió el modelo de aerogenerador por el Gamesa G128. Esta turbina eólica tiene la particularidad de que llega a su punto máximo de potencia con una velocidad de viento de 13 m/s y lo mantiene hasta los 17.5 m/s para luego disminuir su potencia drásticamente hasta los 25 m/s donde ocurre su interrupción total. En este caso, el algoritmo fue capaz de identificar esta

situación, colocando aerogeneradores inmediatamente atrás de otros para que estos se vean afectados por la estela de los primeros y puedan aumentar su potencia generada.

La salida del programa con estas condiciones iniciales puede verse en la figura 4. En donde se pueden observar que todos los casilleros marcados en celeste aumentaron su potencia generada al estar afectados por la estela de las turbinas que se encuentran delante. Cabe mencionar que esto solo ocurre en modelos de aerogeneradores que disminuyan su potencia generada con vientos altos. En los casos donde las curvas de potencia son siempre crecientes se obtiene un resultado similar al del caso 1.

Pudimos verificar mediante reiteradas ejecuciones que cuando la longitud de la estela es corta (menor a 4), el algoritmo encuentra en la mayoría de casos una distribución que genere en todos sus aerogeneradores la máxima potencia posible. El problema surge en casos más cercanos a la realidad, donde la estela puede ser extremadamente larga.

La velocidad del viento perturbado tiene una estrecha relación con el modelo de aerogenerador. En resumen, mientras más grande sea el modelo de aerogenerador (en dimensiones físicas) más perturbado saldrá el viento a causa del efecto estela.

Por este motivo, en el Caso 3, se eligió poner a prueba al algoritmo dándole una longitud de estela infinita, con un viento incidente de solo 13 m/s y uno de los aerogeneradores más grandes en tamaño de nuestra base de datos; el Areva M5000-116. El resultado se puede observar en la figura 5.

Bajo estas condiciones iniciales, se observa un comportamiento similar al del caso 1, con la excepción de que los aerogeneradores de las primeras filas se encuentran más separados del resto. Esto se debe a que el efecto estela perturba demasiado el viento de sólo 13 m/s lo que causa que en los próximos casilleros se genere poca (o nada) de potencia. En este modelo de aerogenerador, la diferencia de potencia generada entre los 11 m/s, presente en los vientos a 6 casilleros atrás de un aerogenerador, con respecto a los de 10.5 m/s existente en los casilleros ubicados a 5 posiciones atrás de un generador es muy grande. Por eso no se observan aerogeneradores a distancias menores de 6 casilleros entre sí (en la misma dirección que la del viento). Además, a 7 casilleros de separación, llega un viento de sólo 0.4 m/s más que en los que se encuentran a 6 casilleros, generando la misma potencia. Lo último parece concluir que esta diferencia de ubicar los generadores en 6 o 7 casilleros más atrás de otros parece resultar relativamente indiferente con respecto al objetivo perseguido, pero, al encontrarnos en un espacio reducido y limitado para el parque eólico, esto afecta a los generadores restantes de las ultimas filas, ya que producirán menos potencia eléctrica por encontrarse muy cerca de aquellos de la fila 7 y 8.

Cabe destacar que los generadores de las ultimas filas, fueron colocados por el algoritmo en esa posición debido a que se está buscando generar la máxima potencia posible sin importar el costo. En este caso, sería necesaria la intervención humana para decidir si es viable colocar un aerogenerador en las ultimas filas, dado que en este caso sólo son capaces de generar 1259 kW de los 5000 kW máximos posibles (es decir, un 25 % de su capacidad).

## 6. Posibles mejoras a implementar

Para el desarrollo del algoritmo genético se han omitido varias condiciones presentes en el contexto real de aplicación con el fin de simplificar la producción de dicho programa. Es por eso que en esta sección describimos en detalle aquellos puntos que no se han tenido en cuenta para la resolución del problema pero que se pueden implementar en el mismo para así obtener la solución más eficiente y eficaz de la aplicación del parque eólico.

### 6.1. Variabilidad de la velocidad del vientos

El algoritmo realizado tiene como parámetro de entrada la velocidad del viento y da como resultado aquella distribución de generadores eólicos que permite obtener la mayor cantidad de potencia generada a partir de dicha velocidad previamente especificada. Pero esto presenta dos cuestiones importantes que aclarar: en primer lugar, y como obviedad, los vientos no son constantes ya que varían continuamente; y en segundo lugar, existen generadores cuyas curvas de potencia no son directamente proporcionales al viento incidente.

Por lo tanto, el algoritmo se podría mejorar evaluando las distintas soluciones (distribuciones de los generadores en el parque eólico) teniendo en cuenta las distintas velocidades del viento que pueden presentarse en cada una de ellas. Una posible aplicación de esta mejora es calcular la función objetivo de cada cromosoma como la media aritmética de la sumatoria de las distintas potencias generadas a partir de la variación (discreto o, en lo posible, continua) del valor de la velocidad del viento. En matemática, específicamente en la rama del cálculo, la sumatoria de una función con variación continua de su variable independiente se representa como la integral de la función de potencia con respecto a la velocidad del viento.

A esto, se debería añadir una ponderación de dichos valores en función de la probabilidad de frecuencia. Con esta idea, se le asignarían más peso a aquellas potencias generadas a partir de vientos con velocidades iguales, o cercanas, al promedio del lugar de implementación y, a su vez, menos valor a aquellas que se obtienen con vientos pocos frecuentes en la zona. De esta forma, una solución aportaría como potencia generada un valor que se asemejaría más a la realidad.

Por ende, ante la variación discreta del viento, la función es la siguiente:

$$f_{obj} = \sum_{x \in vel} PotTotal(x) \cdot F_r(x)$$

$$PotTotal(x) = \sum_{f=1}^{10} \sum_{c=1}^{10} Pot_{f,c}(x)$$

Donde  $f_{obj}$  es la función objetivo del cromosoma,  $vel$  es el conjunto de las velocidades del viento a calcular,  $F_r$  es la distribución de frecuencia relativa de ocurrencia de velocidad del viento,  $F_r(x)$  es la frecuencia relativa de ocurrencia de un viento con velocidad  $x$ ,  $PotTotal(x)$  es la potencia generada por el parque eólico con una velocidad de viento ( $x$ ) y  $Pot_{f,c}(x)$  es la potencia generada por el aerogenerador ubicado en la celda

$(f, c)$  con un viento incidente de  $x$  velocidad (esta velocidad puede ser modificada dentro de la función por la ubicación del aerogenerador dependiendo de la rugosidad del terreno o del efecto estela simple).

Para la variación continua del viento, la función objetivo se definiría de la siguiente forma:

$$f_{obj} = \int_0^{25} PotTotal(x) \cdot F_r(x) dx$$

Donde las funciones expresadas dentro de la integral se definen de la misma manera que en el caso anterior. Aquí, se evalúan las distintas potencias generadas a partir de la variación continua del viento partiendo de  $0m/s$  y finalizando en  $25m/s$ .

Cabe la aclaración de que no expresamos estas funciones como las óptimas para la evaluación de la función objetivo, solamente señalamos un punto de vista diferente al desarrollado (y que a la vez puede ser mejorado) con la que se podría mejorar el cálculo de la función objetivo y la obtención de mejores resultados.

## 6.2. Variabilidad de la direcciones del viento

Para nuestra implementación, se ha estudiado que el lugar geográfico objetivo de nuestro trabajo los vientos son predominantemente provenientes del norte. Pero se sabe que los vientos provienen de todas las direcciones, e incluso las más frecuentes pueden tener sentidos opuestos sobre una misma dirección. Es por esto que se plantea como posible perfeccionamiento la modificación del código para que logre una solución dando importancia a la posibilidad de los cambios de dirección del viento.

Esta propuesta se puede implementar modificando la función objetivo de las soluciones generadas tomando en consideración las potencias generadas de los generadores en función a la dirección del viento incidente. Cada potencia obtenida debe ser ponderada, como en el caso tratado anteriormente, con la probabilidad de frecuencia respecto a la dirección del viento para así poder obtener como solución una distribución de los generadores tal que puedan generar de forma eficaz energía eléctrica sea cualquiera la dirección del viento que se presente. El cálculo se podría plantear de la siguiente forma:

$$f_{obj} = \sum_{x \in dir} PotTotal(x) \cdot F_r(x)$$

$$PotTotal(x) = \sum_{f=1}^{10} \sum_{c=1}^{10} Pot_{f,c}(x)$$

Donde  $f_{obj}$  es la función objetivo del cromosoma,  $dir$  es el conjunto de las distintas direcciones del viento a calcular,  $F_r$  es la distribución de frecuencia relativa de ocurrencia de las direcciones del viento,  $F_r(x)$  es la frecuencia relativa de ocurrencia de un viento con dirección  $x$ ,  $PotTotal(x)$  es la potencia generada por el parque eólico con una dirección del viento igual a  $(x)$  y  $Pot_{f,c}(x)$  es la potencia generada por el aerogenerador ubicado en la celda  $(f, c)$  con un viento incidente proveniente de la dirección  $x$ .

## 6.3. Costo de implementación de cada molino

En este caso, se plantea la posibilidad de involucrar el costo de implementación de los molinos y, por ende, del parque eólico. Esto puede aplicarse simplemente afectando de manera negativa la función objetivo de cada cromosoma en proporción a la cantidad de molinos encontrados en dicha solución. Esto permite lograr que un mínimo incremento de la potencia generada por un aerogenerador tenga al final un valor neto negativo por ser su beneficio muy inferior al costo existente en la implementación y mantenimiento del mismo.

## 6.4. Especificación de características del terreno

En nuestra solución, se puede fácilmente adaptar el modelo a terrenos con diferentes longitud de rugosidades, dado que los coeficientes de rugosidad se encuentran codificadas dentro de la clase Casillero. En este caso, este parámetro se dejó fijo con un valor de 0.0024, correspondiente a un terreno llano (ver Tabla 1 en Anexo), pero este valor podría cambiarse por casillero si se intenta modelar un terreno diferente.

También se podría adaptar el programa para que detecte otros fenómenos que inciden en el comportamiento del viento a causas del terreno, como por ejemplo: Obstáculos que causan turbulencias, efecto túnel, efecto colina, etc.

## 7. Conclusión

Se concluye que, si bien el programa realizado con base sobre un algoritmo genético puede llegar a buenos resultados, es necesario una revisión humana para decidir algunas cuestiones sobre la distribución de los generadores en el parque. El algoritmo no tiene en cuenta el costo de colocar un aerogenerador, por lo tanto, se deberá verificar la viabilidad de turbinas que queden cerca de otras, especialmente en las ultimas filas, y que solo estén colocadas en ese lugar con el fin de maximizar la potencia generada, así sea unos pocos kW.

Tampoco se tiene en cuenta el mejor aprovechamiento posible del terreno, por lo que, para el algoritmo, un aerogenerador que es capaz de generar su máxima potencia a 9 casilleros con respecto al generador que perturba su viento incidente, es igual de bueno que uno que se encuentre más cerca.

Por estas razones, el algoritmo puede ser de gran ayuda para evaluar posibilidades y ver distintas combinaciones posibles, dado que cada modelo de aerogenerador tiene sus particularidades y las condiciones que se presentan (tanto viento, como terreno) pueden ser muy diferentes entre sí, pero muy fáciles de adaptar al programa. Esto permite un buen punto de partida a la hora de diseñar una distribución óptima de aerogeneradores en un parque eólico.

## 8. Agradecimientos

A Michaël Pierrot, de thewindpower.net, por brindarnos una muestra de su base de datos de curvas de potencia para diferentes modelos de turbinas eólicas.



## 9. Referencias

- [1] Bassi, D., Bella, S., Garelo, I., Vacchino, L. N., Zilli, J. M. (2020), Proyecto de investigación - Documento guía para la investigación.
- [2] Educ.ar (2020), La energía eólica, extraído de: <http://energiasdemipais.educ.ar/la-energia-eolica-2/>
- [3] Secretaría de Energía (2020), Potencia de vientos y distribución de proyectos eólicos RenovAr, extraído de: <http://datos.minem.gob.ar/dataset/potencia-de-vientos>
- [4] Díaz, D. (2013), Introducción a los algoritmos genéticos.

## 10. Anexo

### 10.1. Código fuente

Todo el código del proyecto se encuentra subido a GitHub y puede ser accedido a través del siguiente link: <https://cutt.ly/github-algoritmosGeneticos-TPI>

Para ejecutar el programa solo será necesario ejecutar el script *main.py* en la raíz del proyecto. Es necesario tener Python 3.7.2 o superior instalado junto con todas las librerías mencionadas en la sección 2.

### 10.2. Tabla de rugosidades típicas

Tabla 1: Valores aproximados de longitud de rugosidad  $Z_0$  para diferentes tipos de terreno.

| $Z_0$ (m) | Tipo de Terreno                                     |
|-----------|---|
| 0.0002    | Superficie de agua. Terreno abiertos y llanos.      |
| 0.0024    | Pistas de hormigón, campos abiertos con césped.     |
| 0.03      | Colinas suavemente redondeadas.                     |
| 0.055     | Campos con casas y cultivos bajos.                  |
| 0.1       | Campos con casas y arbolados hasta 8 metros.        |
| 0.2       | Campos con cultivos altos y arboles medianos.       |
| 0.4       | Pueblos, bosques, terreno accidentado y desigual.   |
| 0.8       | Ciudades con edificios altos.                       |
| 1.6       | Grandes ciudades con edificios altos y rascacielos. |

### 10.3. Curvas de potencias para distintos modelos de turbinas eólicas

Puede obtenerse en máxima resolución en el siguiente link: [https://cutt.ly/power\\_curves\\_img](https://cutt.ly/power_curves_img)

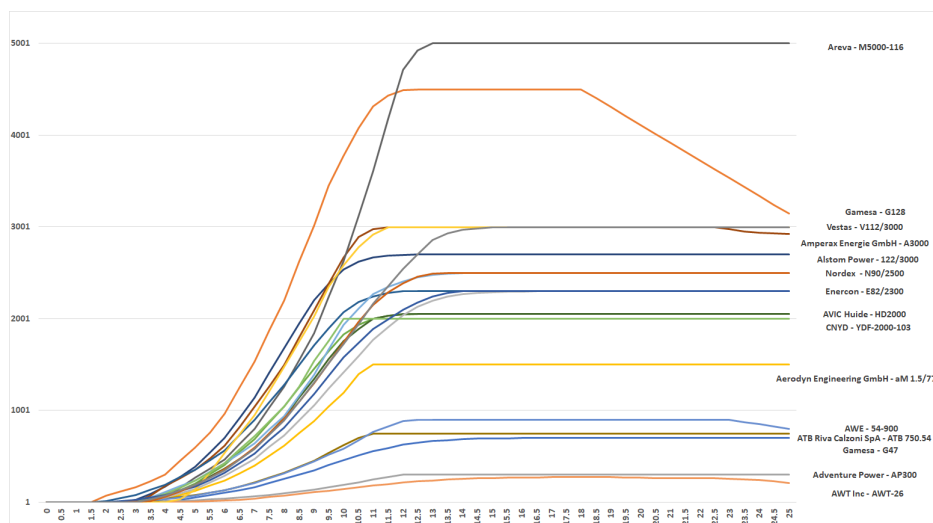


Figura 6: Curvas de potencias para distintos modelos de turbinas eólicas.