

# **DISEÑO DE ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS PARA EL PROBLEMA DE COLOCACIÓN DE TURBINAS EÓLICAS SOBRE EL TERRENO**

**ANTONIO JOSÉ ROMERO BARRERA**

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

**BOE-A-2009-2737**

**14/05/2023**

# ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN
2. ESTADO DEL ARTE
3. MARCO TEÓRICO
4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
6. CONCLUSIONES
7. IMPACTO DEL ESTUDIO
8. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN



# INTRODUCCIÓN

La Tierra alcanzó los 8.000 millones  
habitantes en 2022

Población en miles de millones



Fuente: División de Población de la ONU

BBC



Naciones  
Unidas



Unión Europea

enza

European Net Zero Alliance



# PROBLEMÁTICA

**Quiero mejorar el funcionamiento y eficiencia de un parque eólico...**

**¿Cómo obtengo mayores valores de energía generada?**

**¿Dónde posiciono cada uno de los aerogeneradores?**

**¿Cómo simulo el funcionamiento aerodinámico de las turbinas eólicas?**



# SELECCIÓN DE METODOLOGÍA

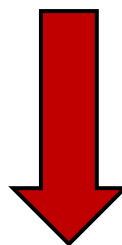
Número total de posibles combinaciones de turbinas (soluciones)

$$nCr = \frac{400!}{20!} (400 - 20)! \rightarrow \infty$$

Configuración de 20x20 con 20 turbinas

$$nCr = \frac{2500!}{50!} (2500 - 50)! \rightarrow \infty$$

Configuración de 50x50 con 50 turbinas



ESPACIO DE BÚSQUEDA INFINITO



- Fuerza bruta.
- Optimización lineal.
- Planificadores.

# SELECCIÓN DE METODOLOGÍA

## Algoritmos metaheurísticos

Algoritmos metaheurísticos basados en trayectorias	Algoritmos metaheurísticos basados en población
Búsqueda Tabú	Algoritmos genéticos
Recocido simulado	Enjambre de partículas
Búsqueda local	Algoritmos meméticos
Búsqueda de descenso por gradiente	Algoritmos de organización colonial
Búsqueda de vecindario variable	Evolución diferencial
⋮	⋮

## Características y propiedades:

- Uso recomendado en problemas de optimización complejos que requieren gran magnitud de datos y operaciones.
- Basadas en los sucesos observados en los procesos de la naturaleza.
- No encuentran la mejor solución, pero sí una solución muy próxima a ella en tiempos asumibles.

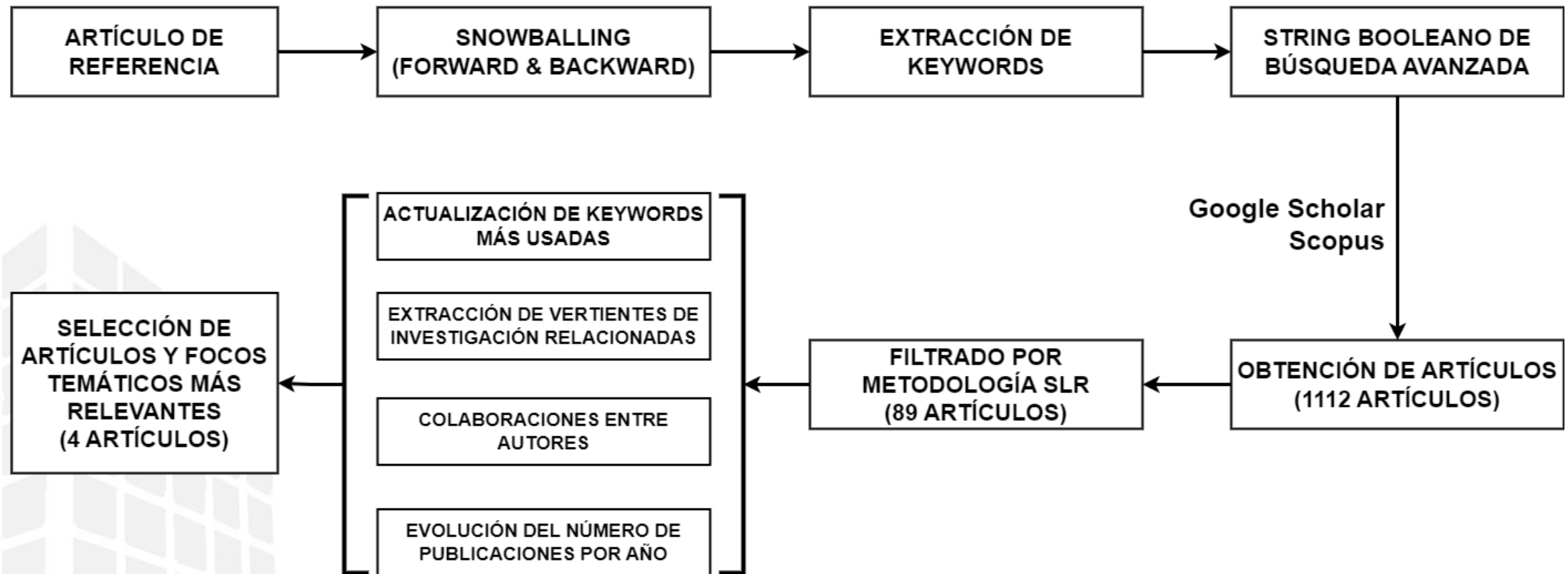
## Tabla de ponderación

Parámetros	CFD	Modelos de estela
Precisión	Alta	Media
Tiempo de ejecución	Muy elevado	Bajo (<1 seg.)
Capacidad de automatización	Baja	Alta
Necesidad de preprocesamiento de datos	Diseño CAD, mallado, cálculos de y+...	Coordenadas de turbinas sobre un plano.
Equipamiento informático	Componentes de alta calidad	Estándar
Simplicidad jerárquica de programas	Necesidad de sincronizar varias herramientas	Se puede implementar en una única herramienta





## ESTADO DEL ARTE



# VERTIENTES DE INVESTIGACIÓN

OPTIMIZACIÓN  
DE  
DISTRIBUCIÓN  
DE TURBINAS  
EÓLICAS SOBRE  
EL TERRENO

SELECCIÓN DE  
LOCALIZACIÓN  
PARA LA  
INSTALACIÓN  
DE PARQUES  
EÓLICOS

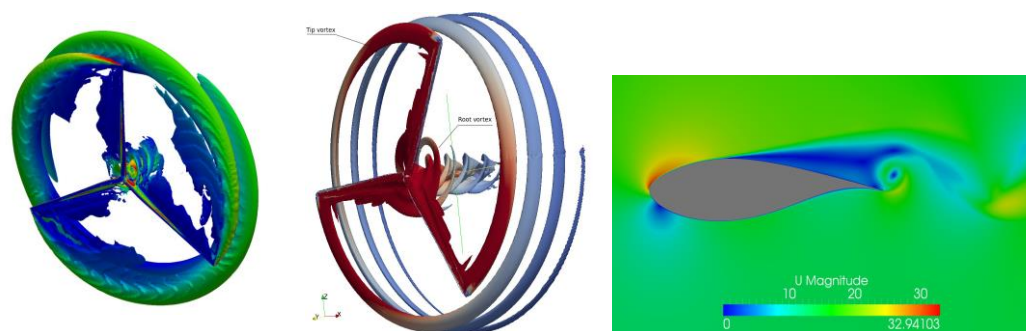
OPTIMIZACIÓN  
GEOMÉTRICA  
DE TURBINAS  
INDIVIDUALES

# VERTIENTES DE INVESTIGACIÓN

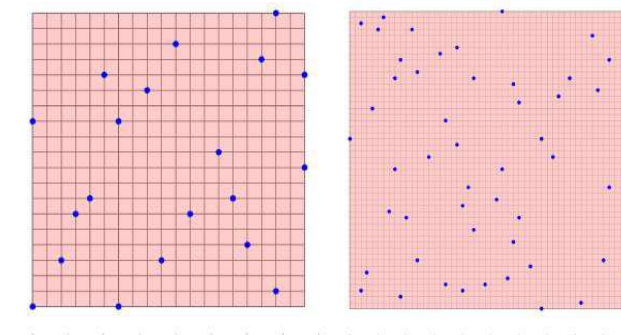
SELECCIÓN DE  
LOCALIZACIÓN  
PARA LA  
INSTALACIÓN DE  
PARQUES  
EÓLICOS

OPTIMIZACIÓN  
GEOMÉTRICA  
DE TURBINAS  
INDIVIDUALES

OPTIMIZACIÓN DE  
DISTRIBUCIÓN DE  
TURBINAS  
EÓLICAS SOBRE EL  
TERRENO

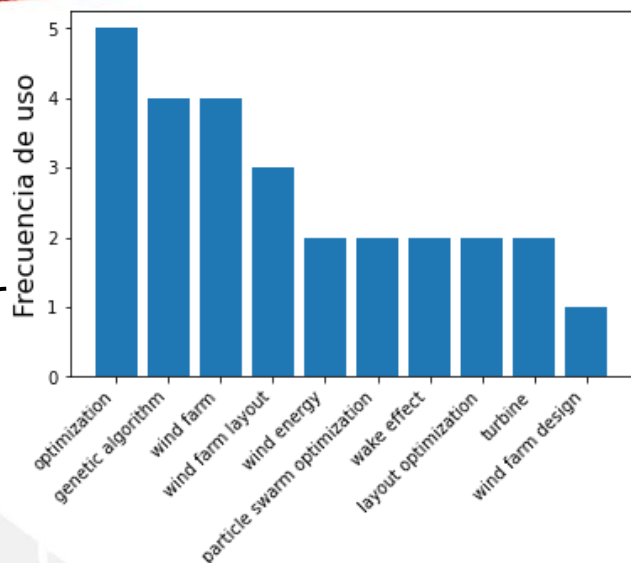


Rahimi, Hamid & Stoevesandt, Bernhard & Peinke, Joachim. (2014).  
Computational Modeling of Wind Turbines in OpenFOAM.

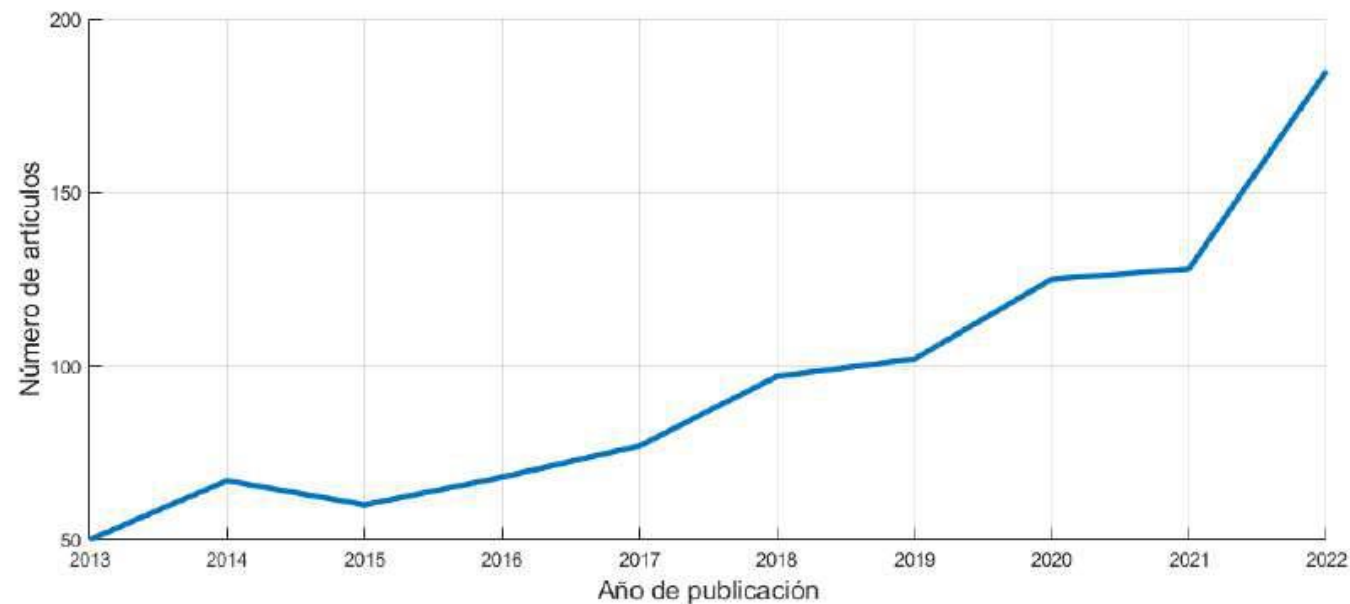
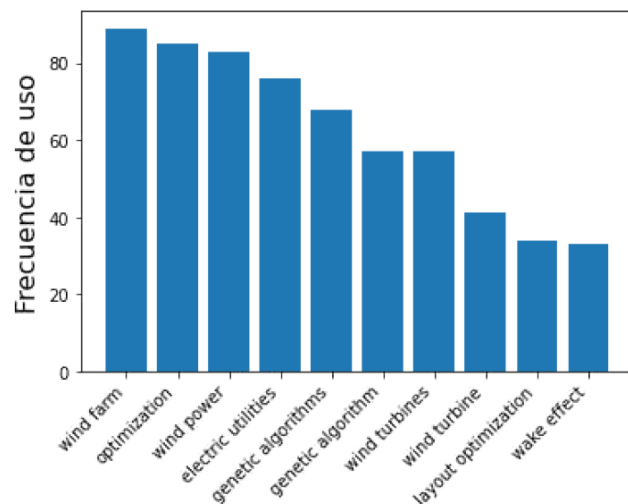


# EVOLUCIÓN DE PUBLICACIONES

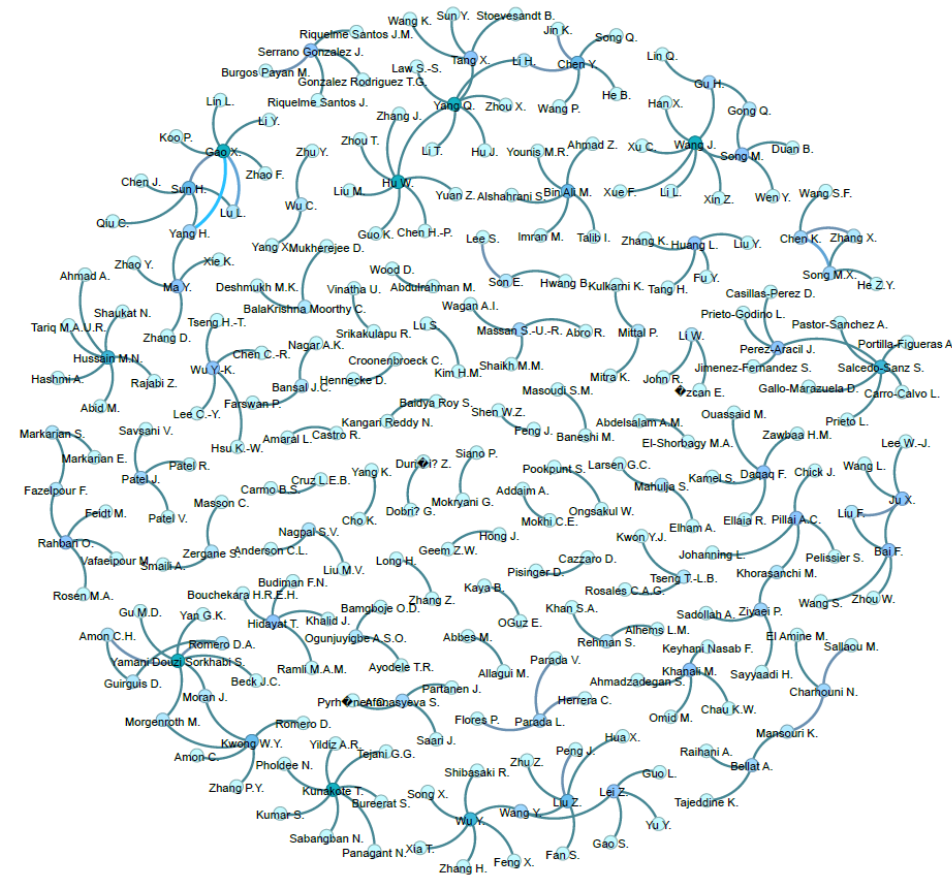
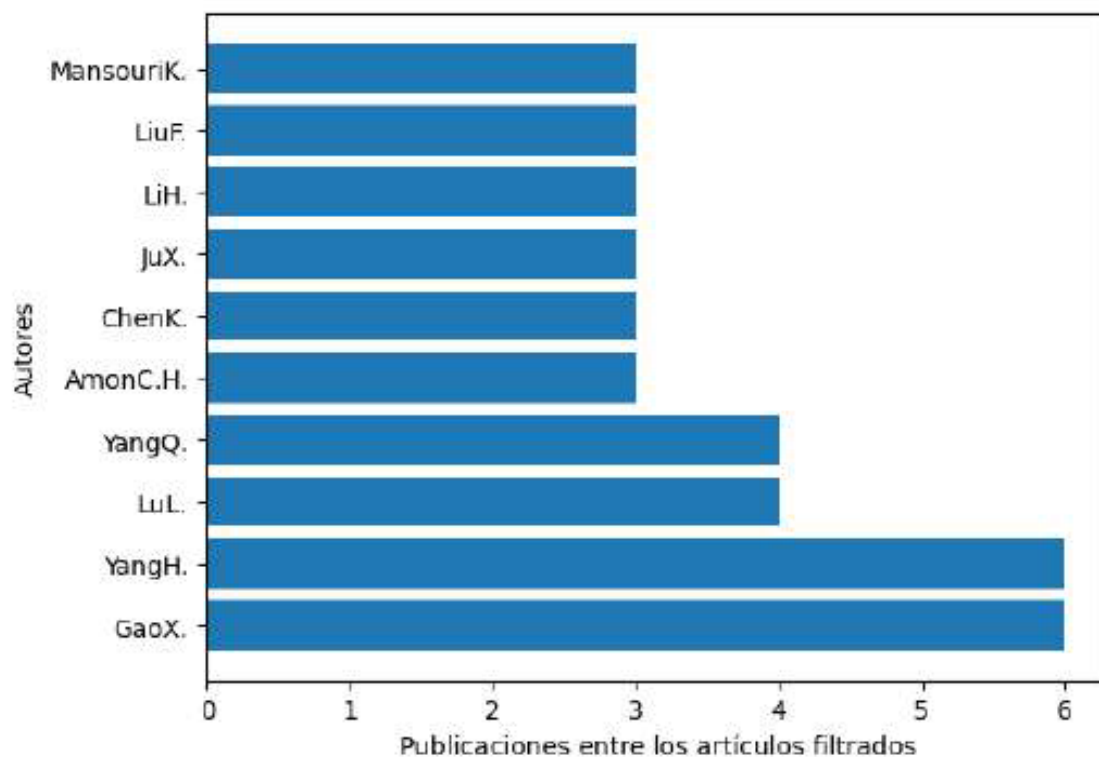
Keywords del  
snowballing



Keywords  
tras el SLR



# RELACIÓN ENTRE AUTORES





## ALGORITMOS SELECCIONADOS

**ALGORITMO GENÉTICO BÁSICO**  
(*BASIC GENETIC ALGORITHM, BGA*)

**OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS**  
(*PARTICLE SWARM OPTIMIZATION, PSO*)

**LOS 2 ALGORITMOS MÁS  
UTILIZADOS ENTRE LOS  
ARTÍCULOS ANALIZADOS**

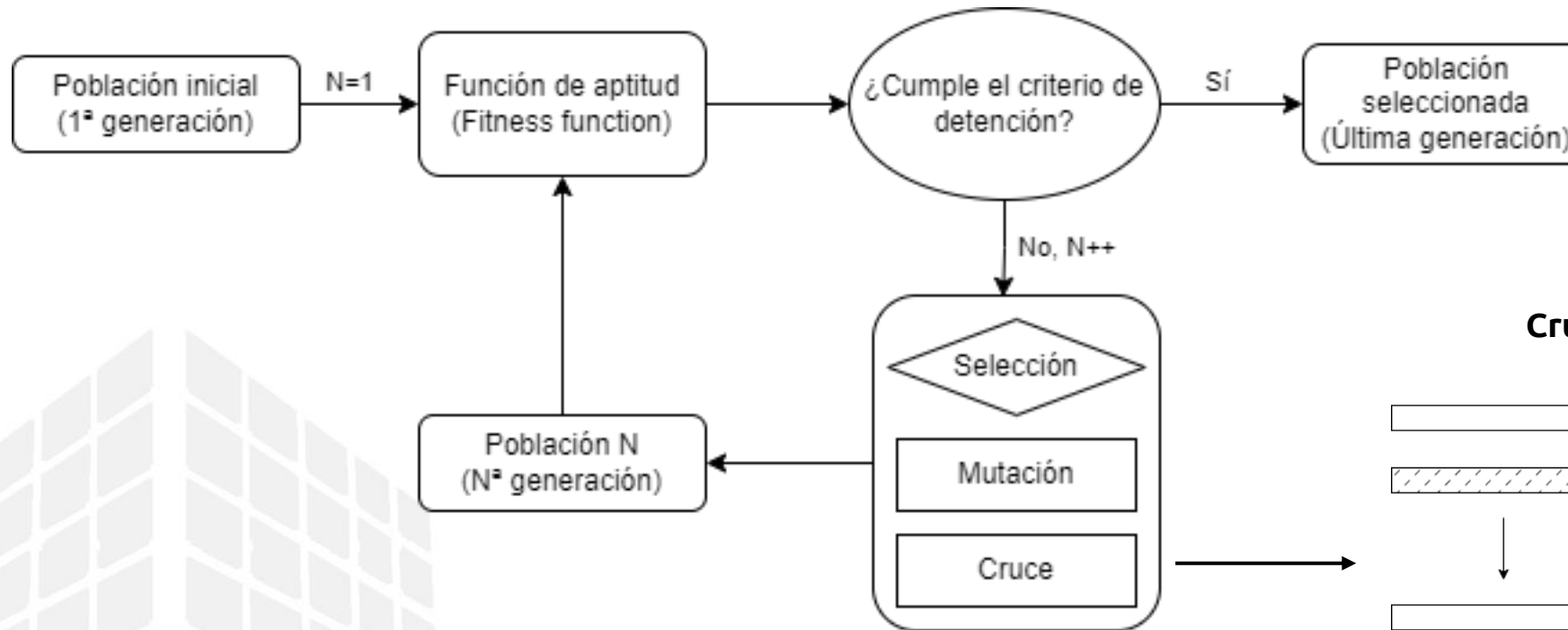
**OPTIMIZACIÓN DE ARRECIFES DE CORAL CON CAPAS DE  
SUSTRATOS**  
(*CORAL REEF OPTIMIZATION WITH SUBSTRATES LAYER, CRO-SL*)

**ALGORITMO UTILIZADO  
EN EL ARTÍCULO DE  
REFERENCIA**

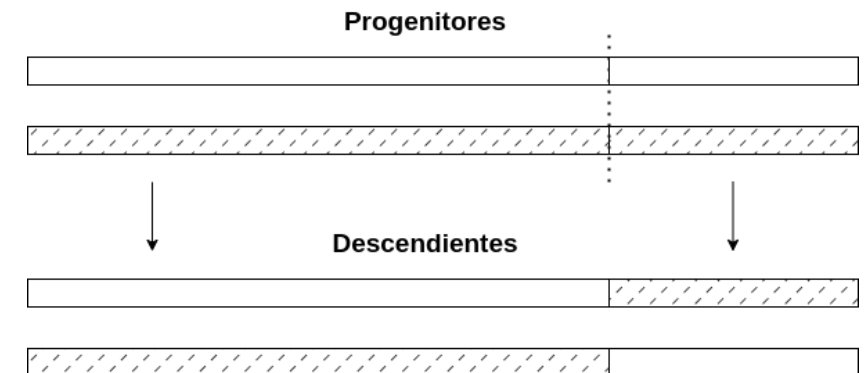


# ALGORITMO GENÉTICO BÁSICO (BGA)

Diagrama de funcionamiento BGA



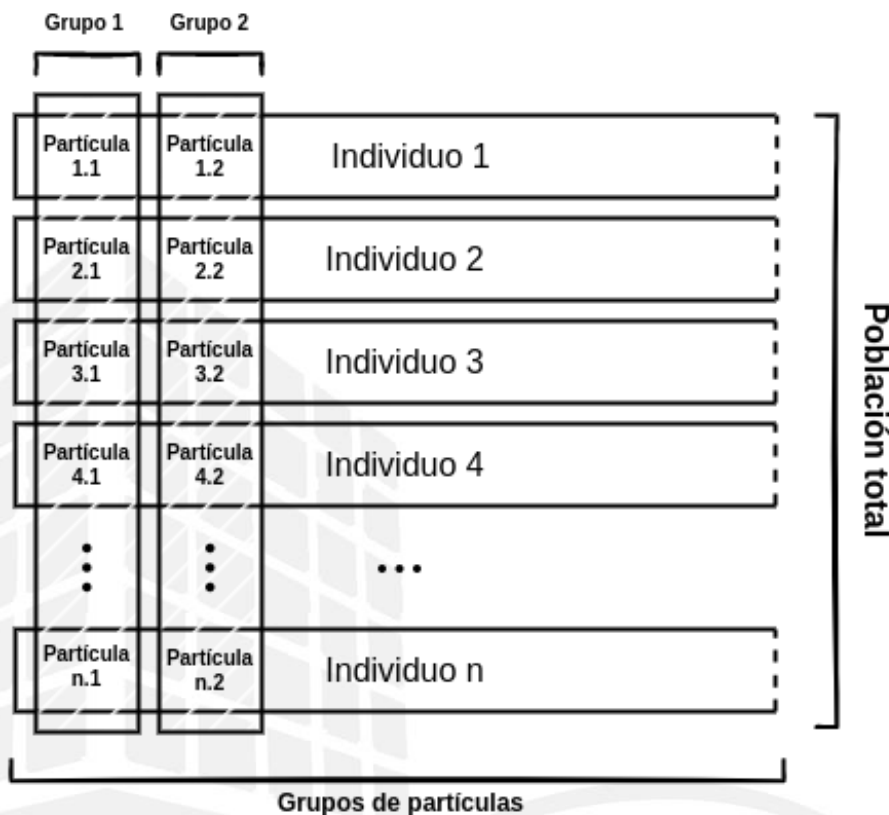
## Cruce 1Px (Crossover 1Px)





## PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

División en grupos de partículas  
que conforman cada individuo



$$v_{i+1} = w \cdot v_i + c_1 \cdot r_1 \cdot (x_p^{Best} - x_i) + c_2 \cdot r_2 \cdot (x_g^{Best} - x_i)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1}$$

2 puntos de referencia que motivan el movimiento de las partículas:

- Mejor posición histórica personal ( $x_p^{Best}$ ).
- Mejor posición histórica de toda la población ( $x_g^{Best}$ ).

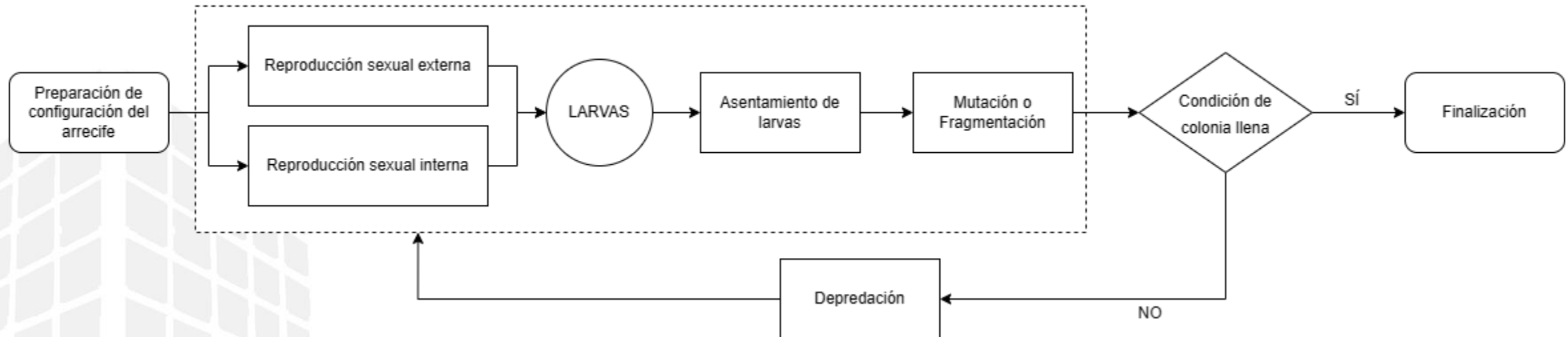
Modificaciones importantes:

- Añadido proceso mutativo entre los grupos de partículas.
- Mejor posición histórica de toda la población ( $x_g^{Best}$ ).

# CORAL REEF OPTIMIZATION (CRO)

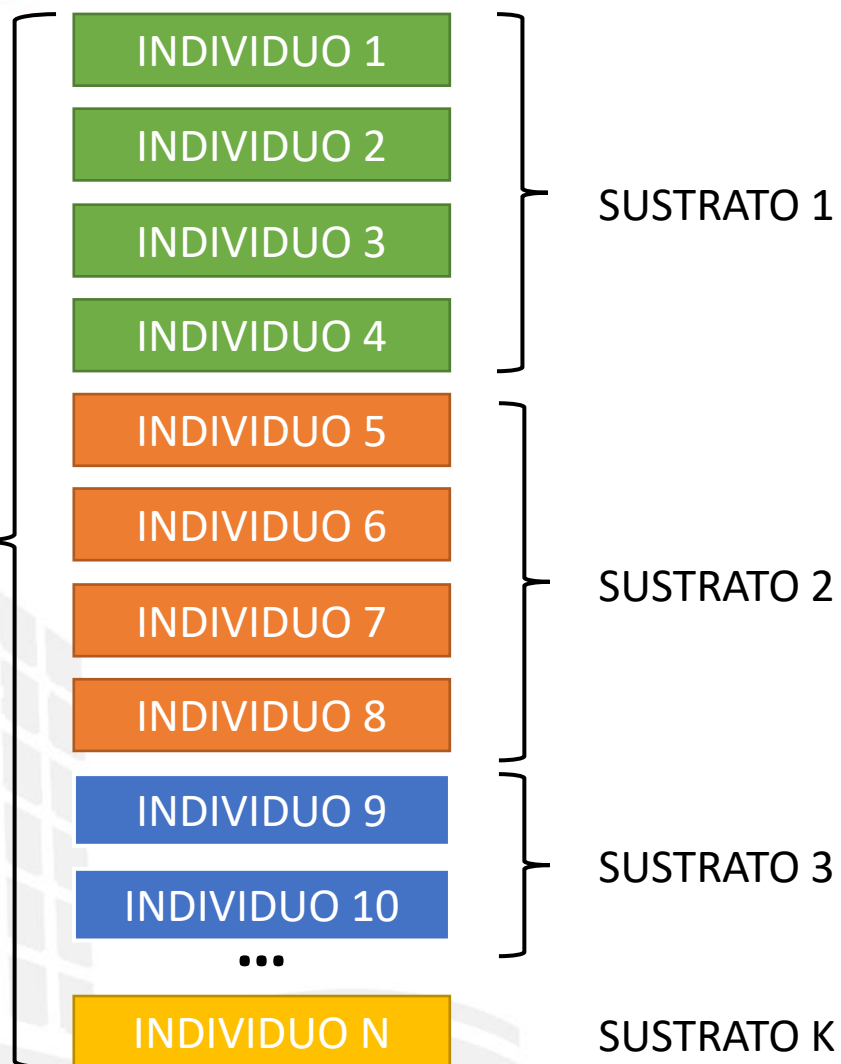
Diagrama de funcionamiento CRO

Procesos reproductivos



## CORAL REEF OPTIMIZATION SL (CRO-SL)

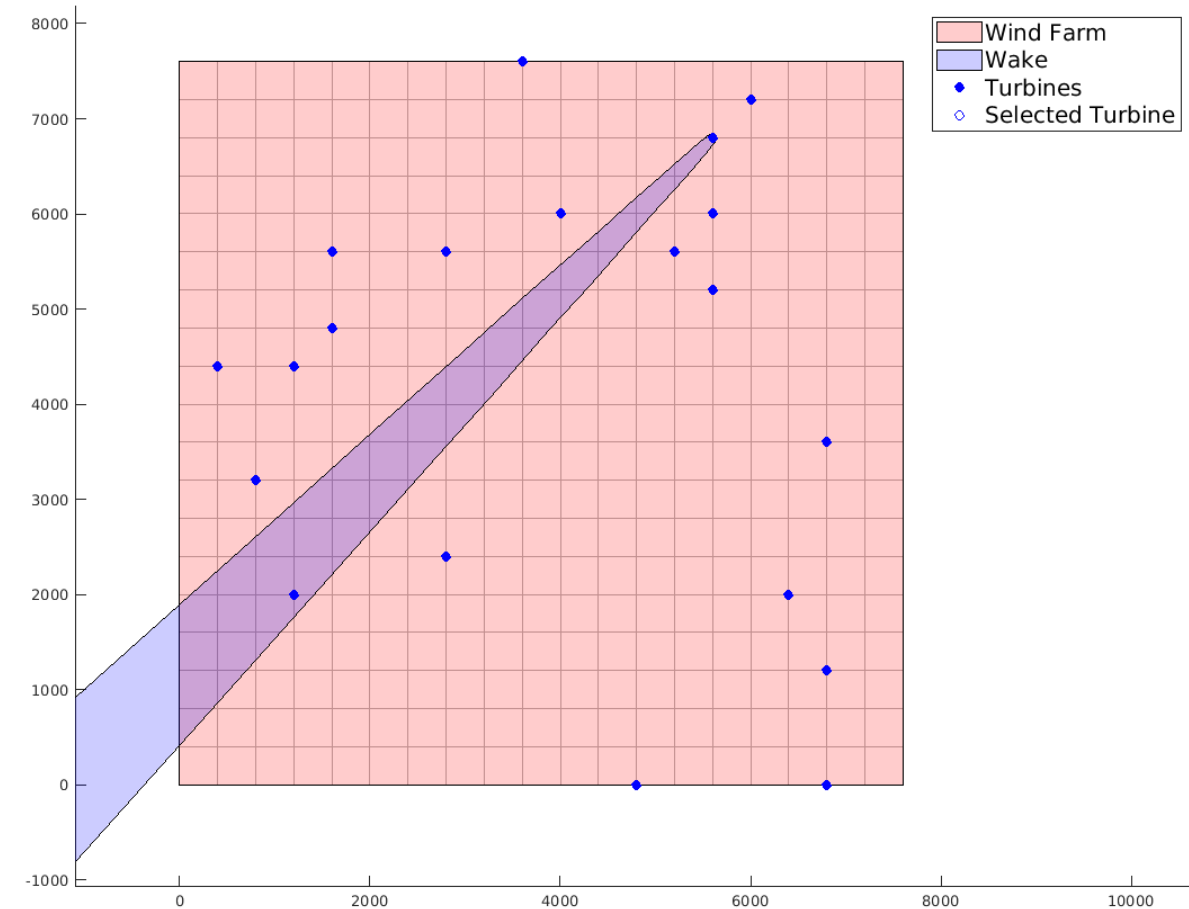
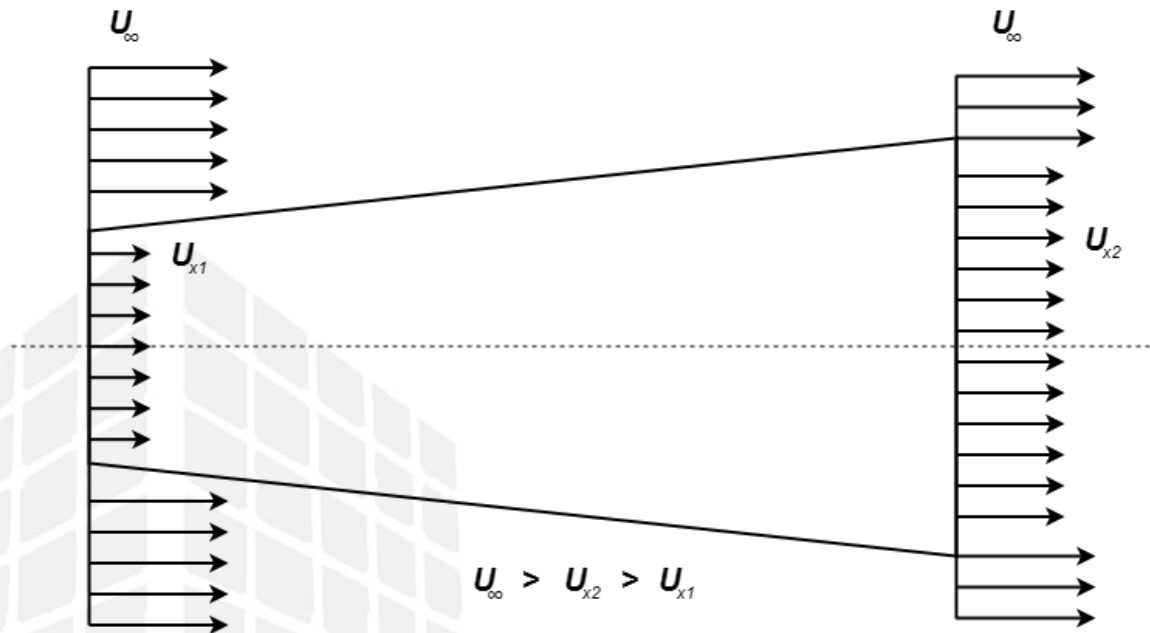
POBLACIÓN TOTAL  
DEL ARRECIFE



### SUSTRATOS UTILIZADOS:

1. HS: *Harmonic Search*.
2. DE: *Differential Evolution*.
3. MPx: *Multipoint Crossover*.
4. 2Px: *Two Point Crossover*.
5. GM: *Gaussian Mutation*.

# MODELOS DE ESTELA



## MODELOS DE ESTELA

### MODELO DE JENSEN

$$U_x = U_\infty \cdot \left( 1 - \frac{1 - \sqrt{1 - c_T}}{\sqrt{\sum (1 + \frac{2 \cdot k \cdot x}{D_r})^4}} \right)$$

### MODELO DE PARK2

$$U_x = U_\infty - \sum_i^N \Delta U_x \frac{A_{x,i}^{overlap}}{A_{rotor}}$$

### MODELO DE BASTANKHAH

$$U_x = U_\infty \cdot (1 - C(x) \cdot f(r/\delta(x)))$$

### MODELO DE FRANDSEN

$$U_x = U_\infty \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{1 - 2c_T \frac{A_r}{A_w}} \right)$$

### MODELO DE LARSEN

$$U_x = U_\infty - \frac{U_\infty}{9} (c_T \cdot A_r \cdot x^{-2})^{1/3} \left( r^{3/2} (3c_1^2 \cdot c_T \cdot A_r \cdot x)^{-1/2} - \left( \frac{35}{2\pi} \right)^{3/10} (3c_1^2)^{-1/5} \right)^2$$

### MODELO DE ISHIHARA

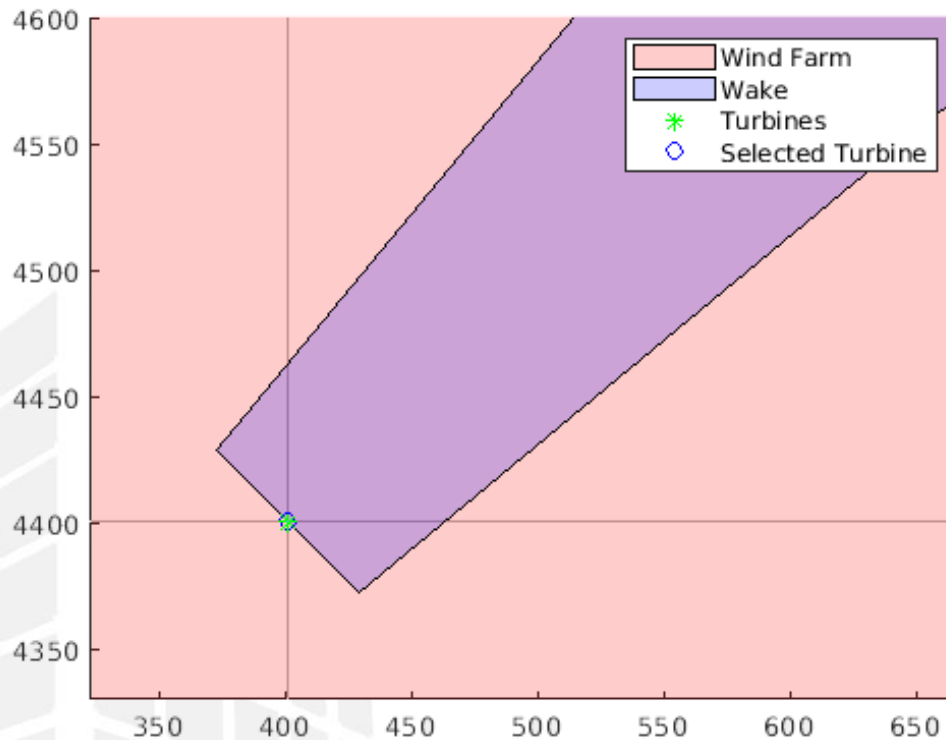
$$U_x = U_\infty \cdot \left( 1 - \frac{c_T}{\left[ a + b + \frac{c}{(1+x/D_r)^2} \right]^2} \exp \left( \frac{r^2}{2\sigma^2} \right) \right)$$

### MODELO DE ZHANG

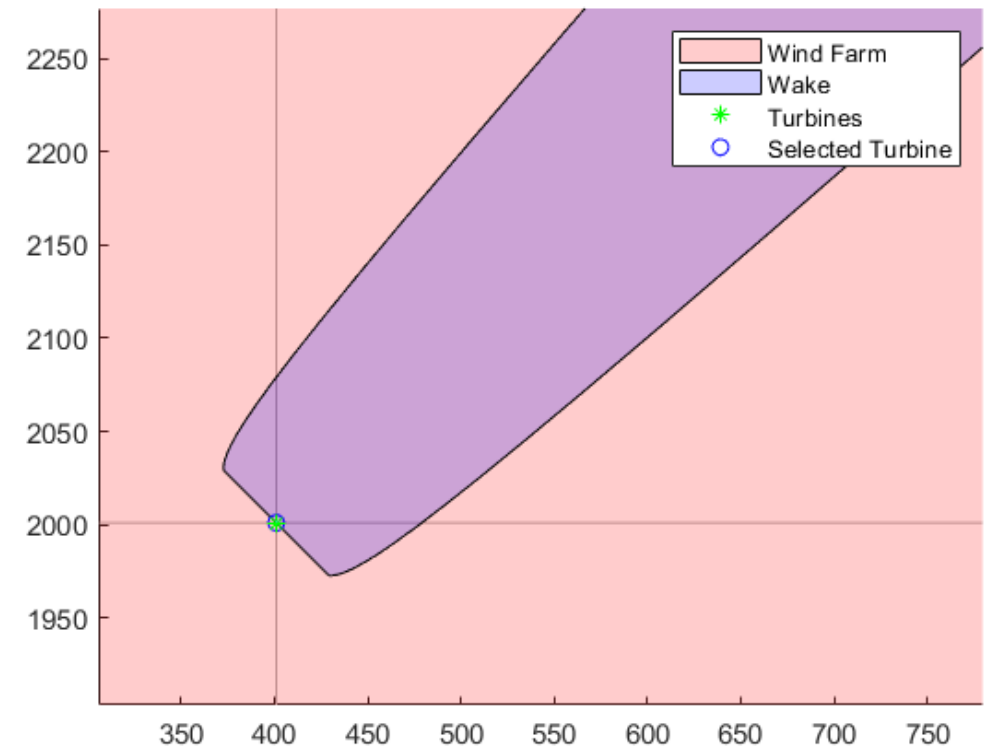
$$U_x = U_\infty \left[ 1 - \left( \frac{\pi^2 - 4}{3\pi^2 - 16} - \sqrt{\left( \frac{\pi^2 - 4}{3\pi^2 - 16} \right)^2 - \frac{\pi^2 \cdot c_T}{3\pi^2 - 16} \left( \frac{D_r/2}{R_w} \right)^2} \right) \cdot \left( \cos \left( \frac{r}{R_w} \pi \right) + 1 \right) \right]$$

## MODELOS DE ESTELA

**Estela trapezoidal:** Jensen, Park2, Bastankhah e Ishihara



**Estela suavizada:** Frandsen, Larsen y Zhang



## COMPARATIVA DE MODELOS DE ESTELA

MODELO	JENSEN	PARK2	BASTANKHAH	FRANDSEN	LARSEN	ISHIHARA	ZHANG
PARÁMETROS COMUNES	$c_T, U_\infty, D_r, k^{(*)}, x, z$						
PARÁMETROS ESPECÍFICOS	$z_0$	$A_{overlap}$	$\sigma, y, \delta$	$A_w$	$c_1$	$\sigma, a, b, c, y$	$\sigma, y, R_w$

NOTA:  $r = \sqrt{y^2 + z^2}$

Coordenadas locales del cono de la estela.





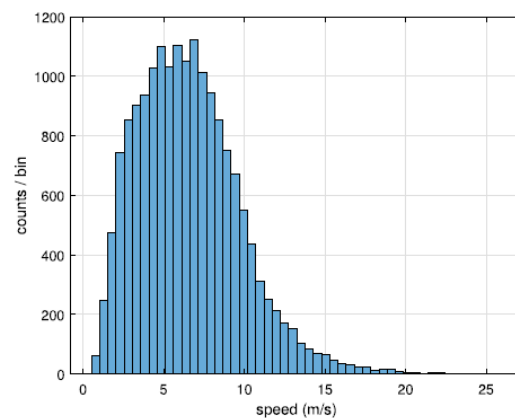
## HIPÓTESIS TOMADAS

- Ángulo de resbalamiento del ala nulo,  $\beta = 0$ .
- **Turbinas** eólicas con las **mismas características** geométricas.
- Se considera una **tipología de terreno despejada sin desniveles ni obstáculos** externos que interfieran en las estelas.
- Atmósfera en calma y **sin cambios** apreciables en la **densidad del aire** que afecten significativamente a la curva del coeficiente de tracción de las palas del rotor.
- **Flujo incompresible y estacionario.**

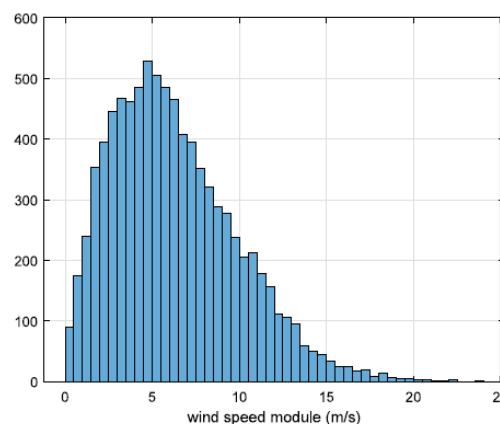
# EXPERIMENTOS, DATOS Y VALORES

## Distribución velocidades:

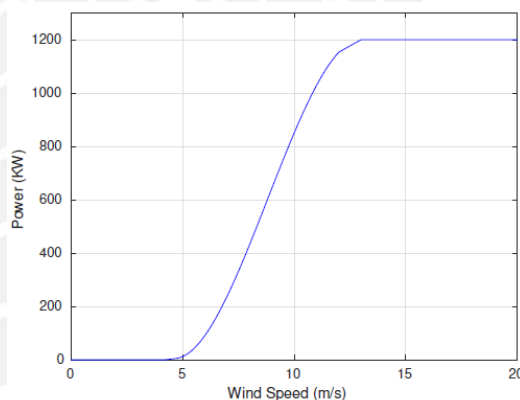
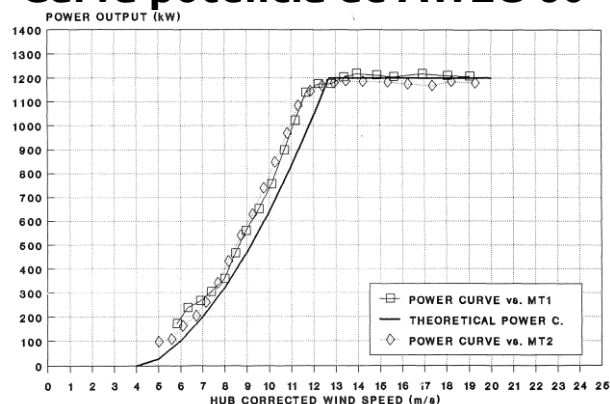
### Reales



### Sintéticas



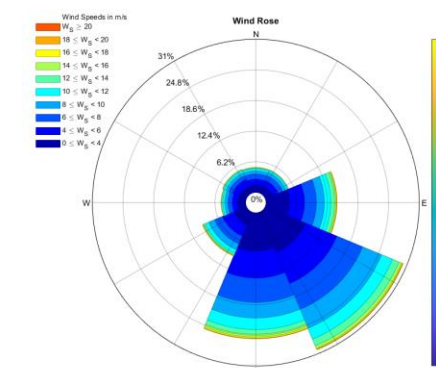
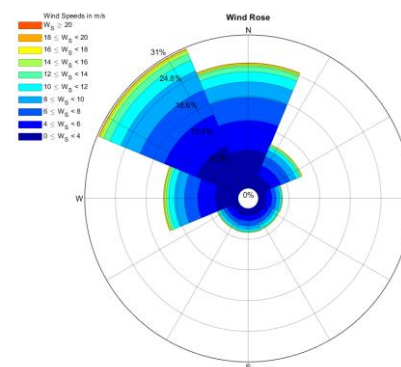
## Curva potencia de AWEC-60



Forma	Escala	Rosa de vientos (E,NE,N,NW,W,SW,S,SE)	Número de Muestras
1.8	7	(0.15, 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.1, 0.25, 0.3)	8760

Z (m)	$D_{rotor}$ (m)	$c_T$	$A_r$ (m <sup>2</sup> )	Distancia seguridad (m)	$z_0$ (m)	$I_0$
60	80	0.88	$5.0265 \cdot 10^3$	400	0.3	0.035



## EXPERIMENTOS, DATOS Y VALORES

Tras la programación de los distintos scripts, se dispone de:

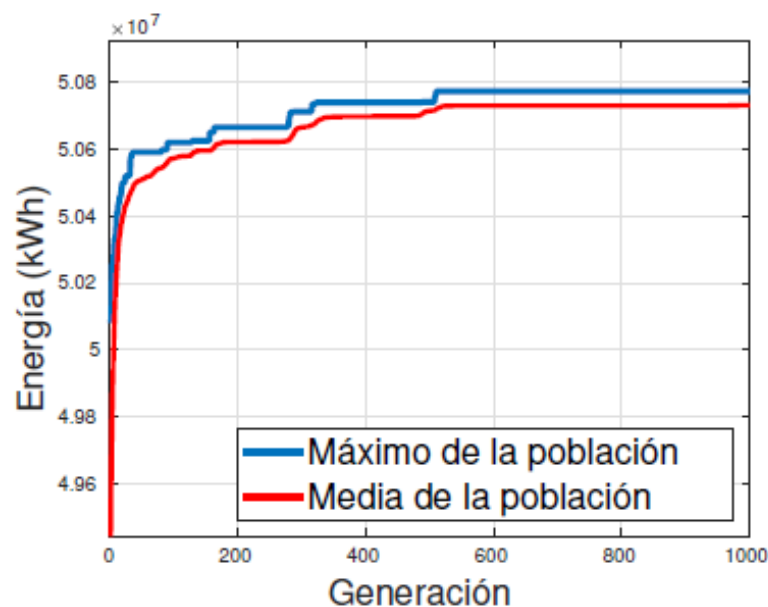
- 3 algoritmos (BGA, PSO y CRO-SL).
- 7 modelos de estela (Jensen, Park2, Bastankhah, Frandsen, Larsen, Ishihara y Zhang).
- 2 tipos de vector vientos (sintéticos y reales).
- 2 proporciones de terreno (20x20 y 50x50).

$$\text{Número experimentos} = 3 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 2 = 84 \text{ experimentos}$$



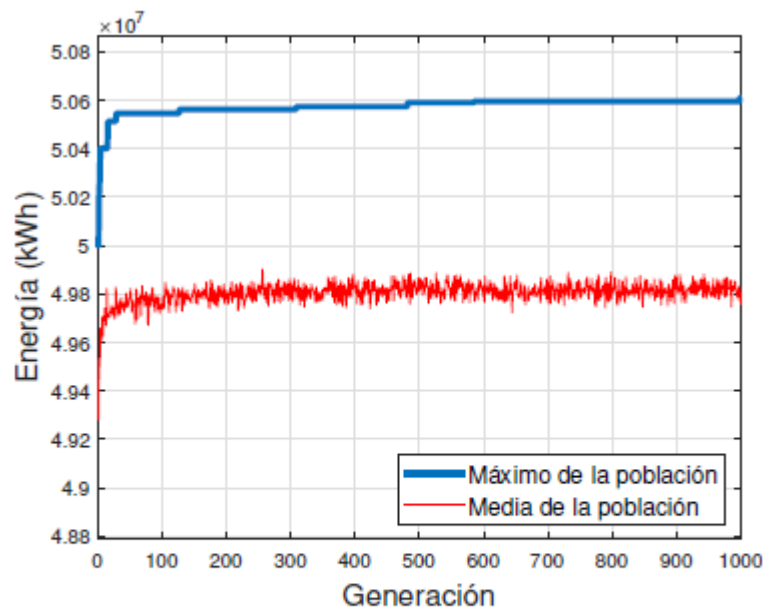
## TENDENCIA EVOLUTIVA DE LA FUNCIÓN DE FITNESS

**BGA**



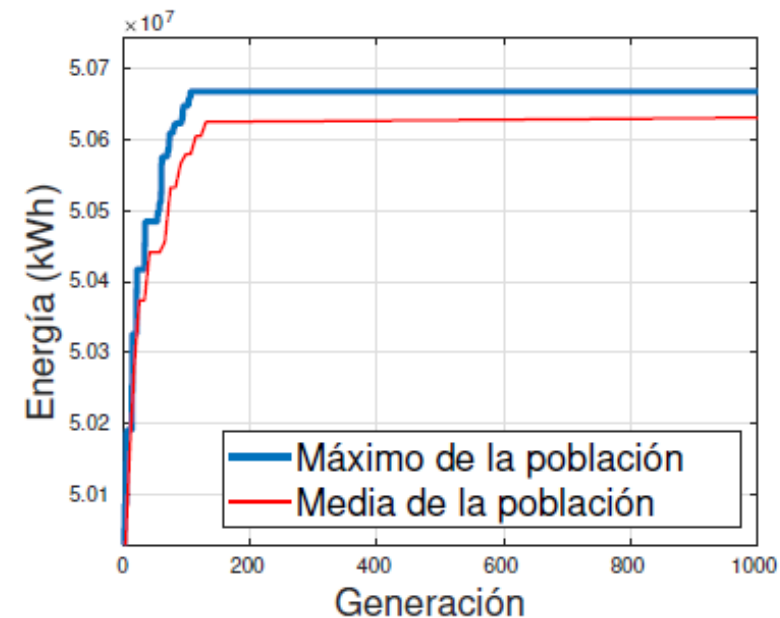
(g) Zhang

**PSO**



(g) Zhang

**CRO-SL**



(g) Zhang

## VALORES FUNCIÓN DE FITNESS

Tabla 6.2: Resultados BGA con distribución de vientos real.

Modelo	20×20 con 20 turbinas		50×50 con 50 turbinas	
	Energía (kWh)	Rendimiento (%)	Energía (kWh)	Rendimiento (%)
Jensen	$5.1895 \cdot 10^7$	99.40	$1.2964 \cdot 10^8$	99.24
Park2	$5.1940 \cdot 10^7$	99.73	$1.2964 \cdot 10^8$	99.51
Bastankhah	$5.1572 \cdot 10^7$	99.17	$1.2846 \cdot 10^8$	98.93
Frandsen	$5.1892 \cdot 10^7$	99.67	$1.2954 \cdot 10^8$	99.48
Larsen	$4.7814 \cdot 10^7$	92.02	$1.2469 \cdot 10^8$	93.19
Ishiahara	$5.1890 \cdot 10^7$	99.69	$1.2962 \cdot 10^8$	99.58
Zhang	$5.0774 \cdot 10^7$	96.43	$1.2759 \cdot 10^8$	97.27

Tabla 6.6: Resultados CRO-SL con distribución de vientos real.

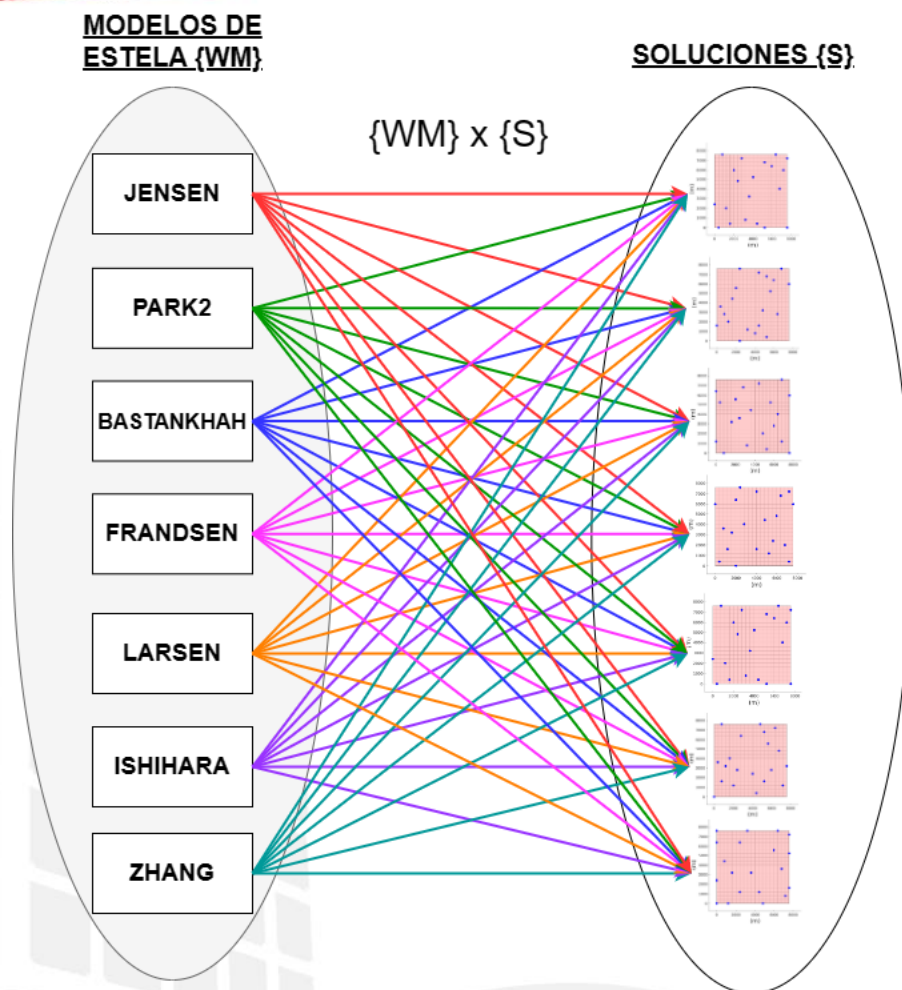
Modelo	20×20 con 20 turbinas		50×50 con 50 turbinas	
	Energía (kWh)	Rendimiento (%)	Energía (kWh)	Rendimiento (%)
Jensen	$5.1846 \cdot 10^7$	99.19	$1.2967 \cdot 10^8$	99.31
Park2	$5.1904 \cdot 10^7$	99.63	$1.2966 \cdot 10^8$	99.58
Bastankhah	$5.1603 \cdot 10^7$	98.99	$1.2889 \cdot 10^8$	98.91
Frandsen	$5.1831 \cdot 10^7$	99.53	$1.2955 \cdot 10^8$	99.54
Larsen	$5.0278 \cdot 10^7$	95.85	$1.2225 \cdot 10^8$	93.48
Ishiahara	$5.1806 \cdot 10^7$	99.51	$1.2954 \cdot 10^8$	99.55
Zhang	$5.0668 \cdot 10^7$	96.13	$1.2759 \cdot 10^8$	97.54

Tabla 6.4: Resultados PSO con distribución de vientos real.

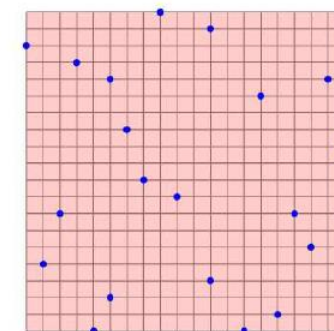
Modelo	20×20 con 20 turbinas		50×50 con 50 turbinas	
	Energía (kWh)	Rendimiento (%)	Energía (kWh)	Rendimiento (%)
Jensen	$5.0032 \cdot 10^7$	91.73	$1.2814 \cdot 10^8$	96.88
Park2	$5.0776 \cdot 10^7$	96.61	$1.2731 \cdot 10^8$	97.36
Bastankhah	$4.8991 \cdot 10^7$	92.98	$1.2333 \cdot 10^8$	93.99
Frandsen	$5.0714 \cdot 10^7$	97.05	$1.2716 \cdot 10^8$	97.60
Larsen	$4.7555 \cdot 10^7$	89.44	$1.1701 \cdot 10^8$	89.13
Ishiahara	$4.9015 \cdot 10^7$	93.78	$1.2653 \cdot 10^8$	97.17
Zhang	$4.9941 \cdot 10^7$	94.08	$1.2592 \cdot 10^8$	95.91



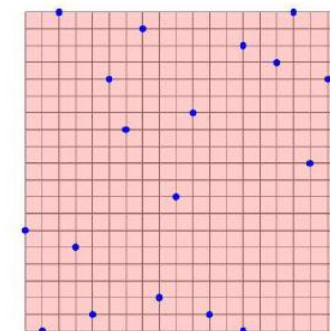
## SOLUCIONES CRUZADAS



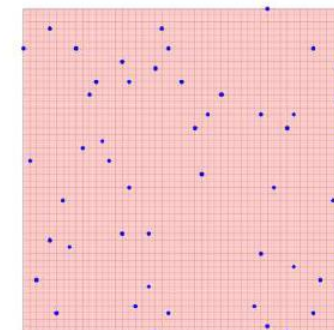
*Número experimentos =  $84 \cdot 7 = 588$  experimentos*



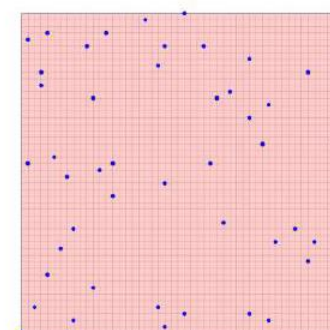
(a) BGA, Park2, 20×20, sintético.



(b) BGA, Jensen, 20×20, real.



(c) CRO-SL, Larsen, 50×50, sintético.



(d) CRO-SL, Larsen, 50×50, real.

## SOLUCIONES CRUZADAS

### Vientos sintéticos

	20×20 con 20 turbinas		50×50 con 50 turbinas	
Modelo	Algoritmo	Rendimiento (%)	Algoritmo	Rendimiento (%)
Jensen	BGA	98.92	CRO-SL	99.12
Park2	BGA	99.43	CRO-SL	99.49
Bastankhah	BGA	98.48	CRO-SL	98.90
Frandsen	BGA	99.43	CRO-SL	99.37
Larsen	BGA	92.40	CRO-SL	90.78
Ishihara	BGA	99.44	CRO-SL	99.55
Zhang	CRO-SL	95.04	CRO-SL	96.79

### Vientos reales

	20×20 con 20 turbinas		50×50 con 50 turbinas	
Modelo	Algoritmo	Rendimiento (%)	Algoritmo	Rendimiento (%)
Jensen	BGA	98.67	CRO-SL	99.05
Park2	CRO-SL	99.41	CRO-SL	99.46
Bastankhah	CRO-SL	98.45	CRO-SL	98.79
Frandsen	CRO-SL	99.30	CRO-SL	99.34
Larsen	CRO-SL	93.00	CRO-SL	90.72
Ishihara	CRO-SL	99.45	CRO-SL	99.50
Zhang	CRO-SL	99.18	BGA	96.75

Tabla 6.9: Soluciones cruzadas con mejores rendimientos medios.

Algoritmo	Modelo	Terreno	Turbinas	Viento	Rendimiento
<b>BGA</b>	<b>Park2</b>	<b>20×20</b>	<b>20</b>	<b>Sintético</b>	<b>97.94 %</b>
BGA	Zhang	50×50	50	Sintético	97.71 %
<b>BGA</b>	<b>Jensen</b>	<b>20×20</b>	<b>20</b>	<b>Real</b>	<b>97.97 %</b>
BGA	Ishihara	50×50	50	Real	97.70 %
PSO	Larsen	20×20	20	Sintético	95.31 %
PSO	Larsen	50×50	50	Sintético	96.47 %
PSO	Frandsen	20×20	20	Real	95.14 %
PSO	Larsen	50×50	50	Real	95.89 %
CRO-SL	Bastankhah	20×20	20	Sintético	97.62 %
<b>CRO-SL</b>	<b>Larsen</b>	<b>50×50</b>	<b>50</b>	<b>Sintético</b>	<b>97.93 %</b>
CRO-SL	Frandsen	20×20	20	Real	97.81 %
<b>CRO-SL</b>	<b>Larsen</b>	<b>50×50</b>	<b>50</b>	<b>Real</b>	<b>97.84 %</b>





## CONCLUSIONES MÁS RELEVANTES

- **CRO-SL** obtiene **mejores soluciones** para distribuciones de **50 turbinas** en terrenos de proporciones **50x50**.
- **BGA** obtiene mejores soluciones para distribuciones de **20 turbinas** en terrenos de proporciones **20x20**.
- **PSO** necesita un buen **proceso de estudio y selección de hiperparámetros** para obtener soluciones a la altura de los otros dos algoritmos utilizados.
- Tanto el **CRO-SL** como el **PSO** necesitan **tiempos de ejecución muy elevados** en comparación con el BGA.
- Los **valores de energía** generados **fluctúan** considerablemente **en función del modelo de estela** escogido, y éstos inciden mucho en la distribución generada por los distintos algoritmos.
- El modelo de estela de **Larsen** es aquel con el que los **algoritmos logran mejores soluciones**, seguido del modelo de Frandsen.



## IMPACTO SOCIAL, ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL

**Social:** disminuye el impacto visual de los parques eólicos y mayor nivel de aceptación.

**Económico:** hace falta un número menor de aerogeneradores para abastecer un determinado territorio, ahorro económico en la compra de aerogeneradores, más capital para la inversión en otros aspectos como i+D.

**Medioambiental:** disminución del impacto en la fauna y flora de un territorio, posibilidad de generar más energía limpia reduciendo la huella de carbono, disminución de la probabilidad de defunción de aves por el impacto con las palas de los rotores.

## OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Tabla 7.1: Metas específicas de los ODS que se adecuan a este estudio.

Objetivo	Meta específica	Descripción
ODS 7: Garantizar el acceso a una energía asequible segura, sostenible y moderna.	ODS 7.1	De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.
	ODS 7.2	De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.
	ODS 7.3	De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
	ODS 7.b	De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo.
ODS 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.	ODS 8.4	Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados.
ODS 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.	ODS 12.2	De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.

ODS 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna

ODS 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos

ODS 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles



## LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

- **Estudio y selección de hiperparámetros** óptimos para la utilización del algoritmo **PSO** en problemas de colocación de turbinas.
- Establecimiento de **criterios y restricciones** que permitan utilizar otras herramientas de optimización como **planificadores** (PDDL, STRIPS...), algoritmos metaheurísticos **basados en trayectorias** u **optimización lineal**.
- Incorporar posibilidad **de realizar optimización** de turbinas en parques eólicos situados en zonas con **distintas elevaciones**.
- Diseño o búsqueda de **nuevos modelos de estela** que **mejoren** los resultados de **optimización** de los algoritmos metaheurísticos utilizados (TFM).
- **Aumentar** el número de **sustratos** del algoritmo **CRO-SL** (TFM).

Autor: A.J. Romero Barrera  
Tutor: D. Casillas Pérez (URJC)  
Cotutora: L.M<sup>a</sup>. Bueno Cornejo (UAH)



**Despacho B103, Biblioteca  
Campus Fuenlabrada**

<https://orcid.org/0000-0001-5496-1331>

<https://gestion2.urjc.es/pdi/ver/antonio.romero>

**e-mail: antonio.romero@urjc.es**

Se pueden descargar las diapositivas (.pptx) en:  
<https://github.com/antoniojromero/docs/tfg/slides.pptx>