

# Capítulo 5.

## Curva Multi-turbina

## Tabla de contenido

Capítulo 5. Simulación de la curva Multi-turbina.....	111
1 Introducción .....	111
2 Método de Hannele Holttinen para curva Multi-turbina.....	111
2.1 Introducción .....	111
2.2 Potencia Eólica Agregada .....	113
2.3 Metodología .....	113
2.4 Método paso a paso.....	116
2.5 Conclusiones de Holttinen .....	116
3 Aplicación Método de Hannele Holttinen para curva Multi-turbina .....	117
3.1 Aplicación práctica a la base de datos disponible.....	117
3.2 Conclusiones.....	122
4 Método Alternativo para Curva Multi-turbina.....	123
4.1 Descripción del método propuesto.....	123
4.2 Aplicación práctica a la base de datos disponible.....	124
4.3 Conclusiones.....	127
5 Comparativo de ambos métodos propuestos para la obtención de Curva Multi-turbina	128
5.1 Caso práctico simulación de la curva multi-turbina en una localización concreta. ..	128
5.1.1 Método de Hannele Holttinen .....	128
5.1.2 Método Alternativo .....	131
5.1.3 Simulación Aerogenerador G80 .....	133
5.1.4 Resultados .....	135
5.2 Caso práctico simulación de la curva multi-turbina en una región.....	137
5.3 Conclusiones.....	138

## Capítulo 5. Simulación de la curva Multi-turbina

### 1 Introducción

Una vez disponemos de un software para estudiar el comportamiento de un aerogenerador para una determinada zona o perfil de viento y podemos pues prever cómo será su producción eléctrica, sería interesante poder generalizar los resultados obtenidos en una determinada localización, para una región determinada sin necesidad de disponer de datos por toda la región.

Para ellos se ha analizado el artículo “*A Multi-Turbine Power Curve Approach*” de Hannele Holttinen, el cual vamos a desarrollar y posteriormente debatir.

### 2 Método de Hannele Holttinen para curva Multi-turbina

Para el desarrollo del método propuesto nos basamos en el artículo “*A Multi-Turbine Power Curve Approach*” de Per Norgaard, (RISC) National Laboratory, Denmark y Hannele Holttinen, VTT, Finland. En el mencionado artículo, los autores indican cómo se puede aproximar, mediante un método simple, el comportamiento de todos los aerogeneradores instalados en una determinada zona, mediante una única curva característica Potencia/Velocidad.

#### 2.1 Introducción

Sabemos que el viento varía tanto con el tiempo como con la distancia, y que la diferencia de velocidad de viento en dos puntos distantes en un determinado instante, disminuirá con el incremento del tiempo transcurrido hasta la medida del siguiente punto o la distancia desde el punto de referencia se realice la medida.

La potencia eólica se puede expresar como el cubo de la velocidad del viento:

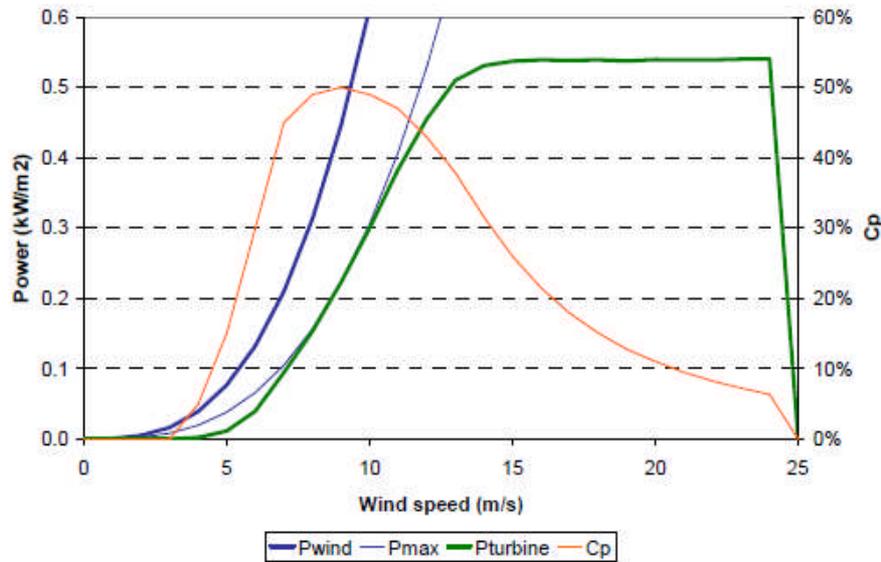
$$P_w(u) = \frac{1}{2} \rho A u^3$$

Donde  $u$  es la velocidad del viento,  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es la superficie que atraviesa el tubo de viento.

La potencia eléctrica obtenida de un aerogenerador puede expresarse como:

$$P_e = C_p \times P_w \quad C_p(u) = \frac{P_e}{P_w}$$

Donde  $C_p$  es un coeficiente de eficiencia de los aerogeneradores. El cual incrementa su valor con la velocidad del viento desde cero hasta su máximo, el cual suele ser 0,5 entorno  $6 \div 10$  m/s, para después disminuir con altas velocidades de viento, limitando la potencia generada por el aerogenerador.



*Ilustración 1. Potencia Generada desde una turbina simple respecto a la velocidad del viento. Coeficiente  $C_p$ .*

Por tanto un aerogenerador es más sensible a cambios de potencia generadas a bajas velocidades 4÷8 m/s, que no ha altas velocidades. Para un único aerogenerador estas fluctuaciones de potencias son amortiguadas debido a la altura a la que se encuentra el rotor y al control de potencia de los aerogeneradores. Para un conjunto de aerogeneradores, estos pequeños cambios se ven amortiguados, al existir un gran número de aerogeneradores y situados a largas distancias.

El objetivo del artículo surge por la necesidad de simular el comportamiento de los aerogeneradores localizados en una extensión de terreno considerable, cuando no se disponen de un número importante de series temporales de velocidad de viento o de generación de energía durante toda la extensión de terreno, y solo se disponen de varias medidas en puntos deslocalizados pero representativos del total de la extensión. Por lo tanto, hay que ser capaz de simular una serie temporal de generación de energía agregada de un grupo de aerogeneradores en base a la serie temporal de la velocidad del viento en un solo punto, o, alternativamente, sobre la base de una serie temporal de generación de energía a partir de una sola unidad o un grupo más pequeño de aerogeneradores.

Sin embargo, una muestra cualificada de una serie temporal de potencia agregada (o representativa) para múltiples aerogeneradores puede ser obtenida basándose en series temporales de velocidad y una curva de potencia estándar de un solo aerogenerador representativo de todas las unidades, teniendo en cuenta los efectos de suavizado en tiempo y espacio.

La metodología es obtener una curva de potencia multi-turbina con la cual simular los efectos de suavizado de la potencia agregada de una serie de aerogeneradores de una determinada extensión.

## 2.2 Potencia Eólica Agregada

Sabemos que la potencia instantánea de una determinada área no es más que la suma de la potencia de todas las turbinas instaladas en tal área.

$$P_{\Sigma} = \sum_i P_i$$

Debido a la distribución espacial de cada una de las turbinas (distancia entre ellas) sabemos que la potencia instantánea de cada turbina no tiene por qué ser necesariamente la misma. La potencia instantánea de las turbinas estarán distribuidas alrededor de un valor medio, la desviación de esta distribución dependerá de la extensión del área a estudiar y de la turbulencia del viento.

## 2.3 Metodología

El método propuesto en el artículo es simple, práctico y aproximado, pero puede ser una buena y aceptable estimación. El método es aplicado para áreas entre 5 y 3 turbinas, de iguales características e igualmente distribuidas por todo el área.

### Moving block-averaged wind speed time series

Como una primera aproximación, un cambio en la velocidad del viento se propagará en el espacio en la dirección de la dirección de la velocidad media con una velocidad similar a la velocidad media. Ejemplo, con una velocidad media de 8m/s un cambio en la velocidad del viento se propagará aproximadamente 5 km en 10 minutos, 30 km en una hora o 100 km en 3 horas.

Una medida de velocidad a la entrada del área de estudio, para la dirección del viento, será representativa del área en un periodo de tiempo correspondiente al tiempo de viaje al cruzar toda el área.

Para representar el efecto memoria espacial de las fluctuaciones del viento en el área cubierta, la serie de datos de velocidad en cada periodo de tiempo es promediada por bloques moviéndose un periodo de tiempo (timeslot) correspondiente a la velocidad media representativa ( $W_m$ ) y a la dimensión especial del área  $D$ .

$$W_j = \frac{1}{N+1} \sum_{i=j-\frac{N}{2}}^{j+\frac{N}{2}} W_i$$

El número de puntos a incluir en cada iteración es

$$N = T/\Delta t$$

Donde  $T$  es el tiempo de propagación y  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo de cada medida o paso. Siendo  $N$  un número par. En la siguiente figura adjunta se muestra el tiempo de propagación en función de la velocidad de viento promedio y la dimensión del área.

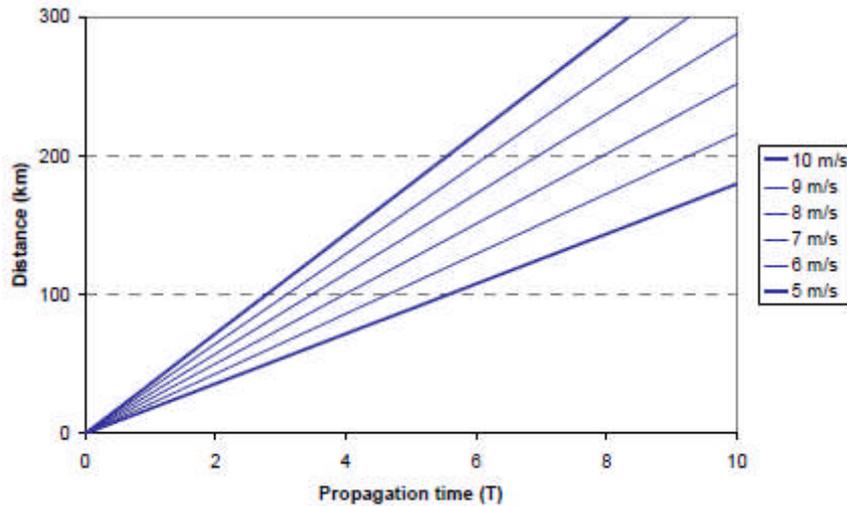


Ilustración 2. Relación entre D, T y Ws

Ejemplo. Para un área de 200 km y una velocidad media de 8m/s, la propagación de tiempo (T) sería  $200\text{km}/8\text{m/s}=7\text{horas}$ , si periodo de tiempo ( $\Delta t$ ) son de 10 minutos, el número de puntos N a incluir para generar la nueva serie de velocidades sería de 42.

Spatial wind speed distribution

Las velocidades de viento en una turbina, a cualquier periodo de tiempo, estarán distribuidas alrededor de la velocidad promedio. Como primera aproximación, la distribución de velocidades de viento de turbinas de viento simultáneas, a cualquier tiempo dado, sería una distribución normal alrededor de la velocidad promedio de la serie de velocidades promedio por bloques para un correspondiente timeslot.

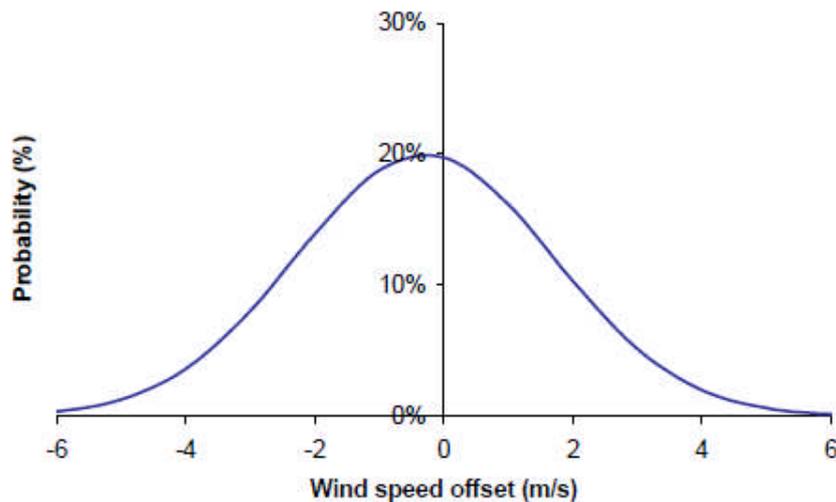


Ilustración 3. Ejemplo de distribución normal de las velocidades de viento para turbinas en un área determinada (la velocidad de viento indicada es relativa respecto a la velocidad promedio por bloque par el timeslot).

La desviación estándar normalizada (relativa a la velocidad media) de la distribución depende de la dimensión D del área y de la intensidad de turbulencia del viento I.

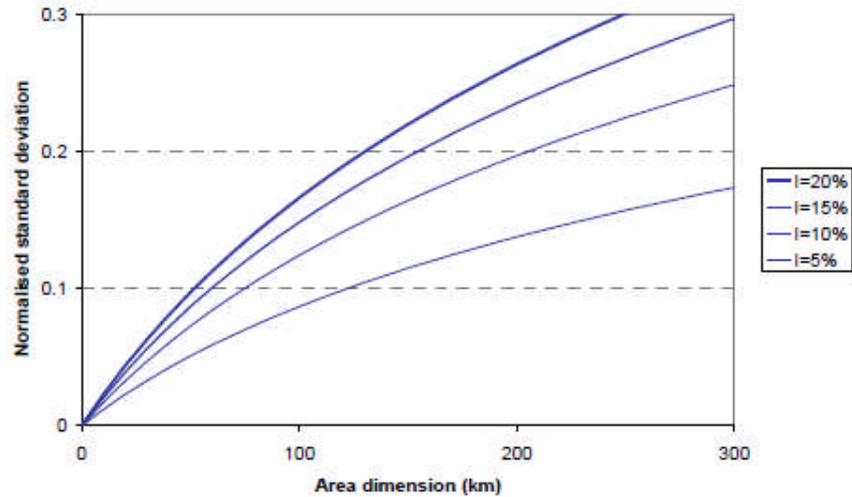


Ilustración 4. Desviación Estándar Normalizada de la distribución de velocidades de viento para una turbina en cualquier momento de tiempo.

The multi-turbine power curve

Si la distribución normal de velocidades de viento anterior alrededor de los valores promedio por bloques es aplicada a la curva de potencia representativa del aerogenerador, obtendremos la curva de potencia multi-turbina suavizada, que podrá ser representativa para la curva de potencia del área.

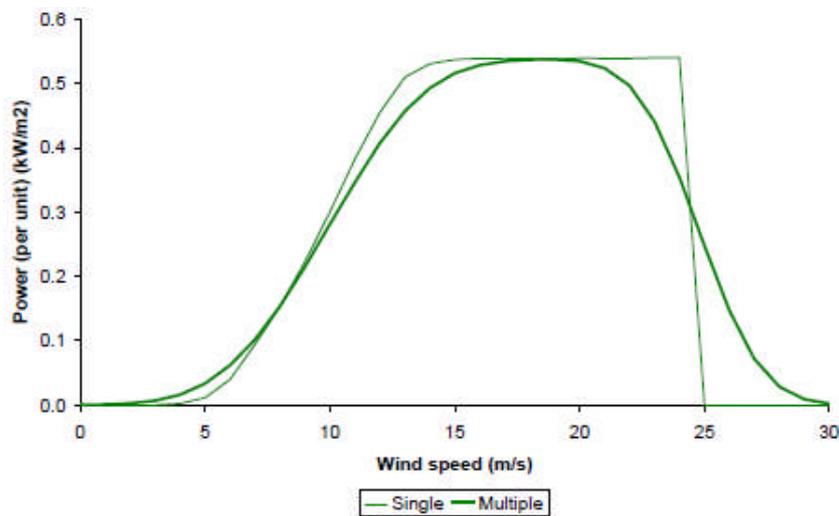


Ilustración 5. Curva multi-turbina

Cada término de la curva multi-turbina  $Pm_j$  podrá calcularse como:

$$Pm_j = \sum_i P_{s_{j+1}} \times ps_i$$

Donde  $P_{s_j}$  es el elemento  $j^{th}$  de la curva de potencia de la turbina simple y  $ps_i$  es la probabilidad de la distribución espacial de la figura 2. En la práctica la suma parcial será como mínimo de un rango de +- 5 m/s alrededor del  $j^{th}$  elemento de la curva de potencia.

## 2.4 Método paso a paso

1. Especificar las dimensiones del área D
2. Especificar la distribución de viento representativa para el área (ejemplo parámetros de distribución de Weibull, factor de escala A y factor de forma k), velocidad de viento media ( $W_m$ ) e intensidad de turbulencia de viento I.
3. Generar una nueva de series de velocidad de viento desde la serie original, aplicando el promedio por bloques en los elementos de la serie original, con el timeslot correspondiente al área D y a la velocidad media  $W_m$ .
4. identificar la desviación estándar normalizada  $\sigma_n$  de la distribución espacial de la velocidad del viento. Encontrar la actual desviación estándar (en m/s) para ser usada,  $\sigma_w$ , multiplicando por la velocidad media  $W_m$ .
5. Generar la distribución normal con el valor de desviación estándar  $\sigma_w$ .
6. Identificar la curva de potencia representativa para todas las turbinas de la zona.
7. Generar la curva multi-turbina de potencia aplicando la distribución normal sobre la curva simple de potencia.
8. Aplicar la distribución de viento en tiempo para las dos curvas de potencia (simple y multi-turbina), calcular la energía anual generada.

## 2.5 Conclusiones de Holttinen

Como indica la doctora Hannele Holttinen en su propio artículo; *“La metodología es muy simplificado y no es capaz de simular todas las cualidades de la serie temporal de la energía eólica agregada, pero es mejor que no hacer nada, y podría ser la mejor opción”*.

### 3 Aplicación Método de Hannele Holttinen para curva Multi-turbina

#### 3.1 Aplicación práctica a la base de datos disponible.

Una vez descrito el método de Hannele Holttinen vamos a intentar aplicarlo a los datos de los que disponemos. Para ellos seguimos los siguientes pasos:

1. Para disminuir el volumen de datos de trabajo, disminuimos el número de localizaciones de trabajo a 34 localizaciones en vez de las 68 con las que hemos estado trabajando anteriormente.
2. Definimos un aerogenerador típico para todas las localizaciones, que en este caso seguimos con el modelo G80 de Gamesa.
3. Para las localizaciones anteriores calculamos los parámetros de la distribución de Weibull ( $k$ ,  $\lambda$ ). Para ellos programamos en Matlab un algoritmo el cual, basándonos en la función "wblfit", al definir el aerogenerador tipo, obtenemos los parámetros ( $k$ ,  $\lambda$ ) para todas las localizaciones existentes en la base de datos, mostrando los resultados en un fichero.

El algoritmo empleado se muestra en el Anexo. Cálculo Parámetros de Weibull adjunto.

Tabla 1. Parámetros de Weibull

	fc	Vm (m/s)	Pm (kW)	k	Lambda		fc	Vm (m/s)	Pm (kW)	k	Lambda
Sitio 1	0,53	9,88	1069,83	11,18	2,13	Sitio 18	0,20	5,07	404,30	5,13	1,02
Sitio 2	0,54	10,01	1073,18	11,30	2,06	Sitio 19	0,20	4,97	393,88	5,07	1,05
Sitio 3	0,60	10,83	1204,03	12,24	2,29	Sitio 20	0,28	6,52	562,97	7,22	1,73
Sitio 4	0,29	6,78	583,10	7,65	1,92	Sitio 21	0,06	2,72	110,81	2,40	0,76
Sitio 5	0,63	11,09	1267,12	12,49	2,36	Sitio 22	0,06	2,33	110,81	1,75	0,63
Sitio 6	0,54	10,01	1088,64	11,30	2,16	Sitio 23	0,04	1,89	87,78	1,27	0,59
Sitio 7	0,48	9,40	953,21	10,54	1,79	Sitio 24	0,23	5,35	452,90	5,40	1,02
Sitio 8	0,22	5,68	441,48	5,94	1,14	Sitio 25	0,19	5,40	377,28	5,97	1,61
Sitio 9	0,18	4,91	367,31	4,95	1,01	Sitio 26	0,15	4,51	290,02	4,68	1,13
Sitio 10	0,23	5,07	459,57	4,76	0,84	Sitio 27	0,23	5,82	455,18	6,38	1,48
Sitio 11	0,05	1,88	90,11	1,18	0,56	Sitio 28	0,11	4,17	212,04	4,52	1,38
Sitio 12	0,14	4,54	275,31	4,87	1,28	Sitio 29	0,22	5,19	438,34	5,13	0,96
Sitio 13	0,05	1,88	90,11	1,18	0,56	Sitio 30	0,17	4,76	335,92	4,89	1,09
Sitio 14	0,14	4,33	279,70	4,39	1,03	Sitio 31	0,17	4,93	334,08	5,32	1,36
Sitio 15	0,14	4,21	281,35	4,12	0,94	Sitio 32	0,32	7,00	635,61	7,85	1,90
Sitio 16	0,13	4,33	263,47	4,50	1,12	Sitio 33	0,42	8,22	831,61	9,20	1,84
Sitio 17	0,24	6,08	488,20	6,66	1,47	Sitio 34	0,47	8,86	938,75	9,97	2,16

4. Definimos el área de estudio para la cual queremos obtener la curva multi-turbina, que en este caso será de 300 km x 300 km, para un total de 2.000 aerogeneradores.

5. Como para cada localización tenemos registro de velocidad de viento para todo el año en periodos horarios, rectificando a la altura del rotor del aerogenerador podemos conocer la velocidad promedio  $W_m$  en m/s.

6. Una vez identificados todos los datos anteriores se puede realizar el algoritmo anteriormente descrito para obtener la curva multi-turbina. En nuestro caso vamos a obtener una curva característica multi-turbina según empleemos cada una de las localizaciones de las que disponemos información, con lo que podemos ver cómo sería la curva en función del registro de velocidades de viento del que dispongamos.

Tabla 2. Curva Multi-turbina para Serie de datos i (kW/m2).

V (m/s)	Localizaciones (i)																																				
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5	Sitio 6	Sitio 7	Sitio 8	Sitio 9	Sitio 10	Sitio 11	Sitio 12	Sitio 13	Sitio 14	Sitio 15	Sitio 16	Sitio 17	Sitio 18	Sitio 19	Sitio 20	Sitio 21	Sitio 22	Sitio 23	Sitio 24	Sitio 25	Sitio 26	Sitio 27	Sitio 28	Sitio 29	Sitio 30	Sitio 31	Sitio 32	Sitio 33	Sitio 34			
0	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01		
1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01		
2	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02		
3	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04		
4	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06		
5	0,09	0,09	0,08	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09		
6	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12
7	0,16	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	
8	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	
9	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	
10	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,24	0,24	0,24		
11	0,26	0,26	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	
12	0,27	0,27	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,25	0,26	0,25	0,26	0,25	0,26	0,26	0,25	0,26	0,27	0,27	
13	0,28	0,28	0,28	0,27	0,28	0,28	0,28	0,27	0,26	0,27	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	
14	0,28	0,28	0,29	0,27	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,27	0,25	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,27	0,25	0,26	0,25	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28
15	0,28	0,29	0,29	0,27	0,29	0,29	0,28	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28
16	0,29	0,29	0,29	0,27	0,29	0,29	0,28	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28
17	0,29	0,29	0,29	0,27	0,29	0,29	0,28	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28
18	0,29	0,29	0,29	0,27	0,29	0,29	0,28	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28
19	0,29	0,29	0,29	0,27	0,29	0,29	0,28	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28
20	0,29	0,29	0,29	0,27	0,29	0,29	0,28	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,25	0,27	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28
21	0,26	0,26	0,27	0,24	0,27	0,26	0,26	0,24	0,23	0,24	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,24	0,22	0,22	0,22	0,24	0,23	0,23	0,23	0,22	0,24	0,23	0,23	0,24	0,23	0,24	0,25	0,25	
22	0,23	0,23	0,24	0,20	0,24	0,23	0,23	0,20	0,20	0,20	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,18	0,18	0,18	0,20	0,19	0,19	0,20	0,18	0,20	0,19	0,19	0,20	0,19	0,20	0,22	0,22	
23	0,19	0,19	0,20	0,16	0,20	0,19	0,19	0,16	0,15	0,16	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,16	0,16	0,15	0,16	0,14	0,14	0,13	0,16	0,15	0,14	0,15	0,13	0,16	0,15	0,14	0,16	0,18	0,18	0,18		
24	0,15	0,15	0,16	0,12	0,16	0,15	0,14	0,12	0,11	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,11	0,10	0,10	0,11	0,09	0,11	0,11	0,10	0,12	0,13	0,14	0,14		
25	0,10	0,11	0,11	0,08	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07	0,08	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,08	0,06	0,06	0,06	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,09	0,10
26	0,07	0,07	0,08	0,05	0,08	0,07	0,07	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06		
27	0,04	0,04	0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	
28	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	
29	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Tabla 3. Curva Multi-turbina para Serie de datos i (kW).

Para obtener el valor de Potencia para cada velocidad multiplico los MW x Área Barrida por las pala, que para el modelo G80 es 5027 m<sup>2</sup>.

V (m/s)	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5	Sitio 6	Sitio 7	Sitio 8	Sitio 9	Sitio 10	Sitio 11	Sitio 12	Sitio 13	Sitio 14	Sitio 15	Sitio 16	Sitio 17
0	26,23	25,67	24,54	30,91	23,97	25,67	26,78	30,91	31,83	30,91	33,85	33,48	33,85	32,69	32,69	33,09	31,38
1	52,46	51,34	49,08	61,82	47,94	51,34	53,56	61,82	63,66	61,82	67,71	66,97	67,71	65,38	65,38	66,19	62,75
2	103,54	101,57	97,57	119,63	95,54	101,57	105,48	119,63	122,68	119,63	129,22	128,05	129,22	125,49	125,49	126,81	121,18
3	182,08	179,03	172,78	206,37	169,59	179,03	185,07	206,37	210,80	206,37	219,97	218,37	219,97	214,81	214,81	216,65	208,63
4	293,04	288,77	279,94	326,10	275,39	288,77	297,21	326,10	331,86	326,10	343,22	341,32	343,22	336,94	336,94	339,22	329,06
5	436,45	431,03	419,71	476,91	413,84	431,03	441,72	476,91	483,52	476,91	495,66	493,76	495,66	489,15	489,15	491,58	480,34
6	605,61	599,42	586,36	649,37	579,51	599,42	611,56	649,37	655,81	649,37	666,07	664,70	666,07	660,94	660,94	662,99	652,75
7	781,61	775,56	762,52	820,44	755,56	775,56	787,34	820,44	824,89	820,44	828,88	828,91	828,88	827,73	827,73	828,53	822,87
8	949,01	944,10	933,12	974,37	927,07	944,10	953,52	974,37	975,15	974,37	969,03	971,18	969,03	974,09	974,09	972,86	974,99
9	1096,26	1093,30	1086,04	1102,21	1081,76	1093,30	1098,78	1102,21	1098,31	1102,21	1080,20	1084,77	1080,20	1092,49	1092,49	1088,87	1100,50
10	1215,63	1215,02	1212,43	1199,84	1210,44	1215,02	1215,77	1199,84	1191,11	1199,84	1161,14	1168,05	1161,14	1180,51	1180,51	1174,51	1195,71
11	1304,44	1306,21	1308,37	1268,16	1308,77	1306,21	1302,23	1268,16	1255,16	1268,16	1215,08	1223,94	1215,08	1240,40	1240,40	1232,38	1261,88
12	1364,71	1368,49	1374,80	1311,72	1377,32	1368,49	1360,50	1311,72	1295,42	1311,72	1247,80	1258,09	1247,80	1277,53	1277,53	1268,00	1303,77
13	1401,72	1407,02	1416,44	1336,86	1420,57	1407,02	1396,04	1336,86	1318,33	1336,86	1265,77	1276,98	1265,77	1298,36	1298,36	1287,84	1327,78
14	1421,97	1428,22	1439,66	1349,81	1444,85	1428,22	1415,35	1349,81	1329,97	1349,81	1274,59	1286,31	1274,59	1308,79	1308,79	1297,71	1340,05
15	1431,40	1438,16	1450,69	1355,51	1456,44	1438,16	1424,30	1355,51	1335,03	1355,51	1278,30	1290,26	1278,30	1313,27	1313,27	1301,92	1345,43
16	1434,76	1441,72	1454,67	1357,45	1460,66	1441,72	1427,47	1357,45	1336,73	1357,45	1279,51	1291,56	1279,51	1314,76	1314,76	1303,31	1347,25
17	1435,30	1442,30	1455,32	1357,75	1461,35	1442,30	1427,98	1357,75	1336,99	1357,75	1279,70	1291,76	1279,70	1314,99	1314,99	1303,53	1347,53
18	1435,30	1442,30	1455,32	1357,75	1461,35	1442,30	1427,98	1357,75	1336,99	1357,75	1279,70	1291,76	1279,70	1314,99	1314,99	1303,53	1347,53
19	1435,30	1442,30	1455,32	1357,75	1461,35	1442,30	1427,98	1357,75	1336,99	1357,75	1279,70	1291,76	1279,70	1314,99	1314,99	1303,53	1347,53
20	1435,30	1442,30	1455,32	1357,75	1461,35	1442,30	1427,98	1357,75	1336,99	1357,75	1279,70	1291,76	1279,70	1314,99	1314,99	1303,53	1347,53
21	1313,47	1323,95	1343,90	1204,52	1353,35	1323,95	1302,64	1204,52	1177,02	1204,52	1103,77	1118,90	1103,77	1148,46	1148,46	1133,80	1190,91
22	1148,56	1162,32	1188,97	1013,20	1201,83	1162,32	1134,50	1013,20	980,84	1013,20	897,48	914,38	897,48	947,86	947,86	931,18	997,10
23	949,02	964,99	996,39	799,66	1011,79	964,99	932,88	799,66	765,76	799,66	681,24	698,06	681,24	731,85	731,85	714,94	782,72
24	733,18	749,62	782,41	586,60	798,73	749,62	716,73	586,60	554,98	586,60	478,61	493,54	478,61	523,93	523,93	508,64	570,72
25	524,49	539,50	569,86	396,56	585,19	539,50	509,61	396,56	370,32	396,56	308,89	320,67	308,89	345,01	345,01	332,72	383,33
26	344,10	356,24	381,13	245,04	393,87	356,24	332,17	245,04	225,70	245,04	181,79	190,07	181,79	207,38	207,38	198,60	235,24
27	204,72	213,37	231,33	137,04	240,64	213,37	196,30	137,04	124,46	137,04	96,72	101,86	96,72	112,74	112,74	107,19	130,64
28	108,45	113,79	125,03	68,23	130,93	113,79	103,28	68,23	61,10	68,23	45,82	48,60	45,82	54,56	54,56	51,51	64,59
29	49,00	51,75	57,61	29,04	60,72	51,75	46,36	29,04	25,65	29,04	18,59	19,85	18,59	22,60	22,60	21,19	27,30
30	16,19	17,20	19,38	9,08	20,55	17,20	15,23	9,08	7,93	9,08	5,57	5,98	5,57	6,90	6,90	6,42	8,49

V (m/s)	Sitio 18	Sitio 19	Sitio 20	Sitio 21	Sitio 22	Sitio 23	Sitio 24	Sitio 25	Sitio 26	Sitio 27	Sitio 28	Sitio 29	Sitio 30	Sitio 31	Sitio 32	Sitio 33	Sitio 34
0	31,38	31,83	31,38	33,85	33,48	34,21	31,38	32,69	33,09	31,83	34,21	31,38	32,27	33,09	30,91	28,40	27,87
1	62,75	63,66	62,75	67,71	66,97	68,42	62,75	65,38	66,19	63,66	68,42	62,75	64,53	66,19	61,82	56,80	55,73
2	121,18	122,68	121,18	129,22	128,05	130,33	121,18	125,49	126,81	122,68	130,33	121,18	124,12	126,81	119,63	111,09	109,26
3	208,63	210,80	208,63	219,97	218,37	221,44	208,63	214,81	216,65	210,80	221,44	208,63	212,86	216,65	206,37	193,65	190,86
4	329,06	331,86	329,06	343,22	341,32	344,94	329,06	336,94	339,22	331,86	344,94	329,06	334,49	339,22	326,10	309,04	305,22
5	480,34	483,52	480,34	495,66	493,76	497,30	480,34	489,15	491,58	483,52	497,30	480,34	486,46	491,58	476,91	456,43	451,71
6	652,75	655,81	652,75	666,07	664,70	667,08	652,75	660,94	662,99	655,81	667,08	652,75	658,54	662,99	649,37	627,86	622,69
7	822,87	824,89	822,87	828,88	828,91	828,42	822,87	827,73	828,53	824,89	828,42	822,87	826,52	828,53	820,44	802,49	797,79
8	974,99	975,15	974,99	969,03	971,18	966,43	974,99	974,09	972,86	975,15	966,43	974,99	974,85	972,86	974,37	964,58	961,31
9	1100,50	1098,31	1100,50	1080,20	1084,77	1075,15	1100,50	1092,49	1088,87	1098,31	1075,15	1100,50	1095,64	1088,87	1102,21	1103,59	1102,45
10	1195,71	1191,11	1195,71	1161,14	1168,05	1153,79	1195,71	1180,51	1174,51	1191,11	1153,79	1195,71	1186,04	1174,51	1199,84	1213,36	1214,63
11	1261,88	1255,16	1261,88	1215,08	1223,94	1205,81	1261,88	1240,40	1232,38	1255,16	1205,81	1261,88	1248,00	1232,38	1268,16	1292,85	1296,43
12	1303,77	1295,42	1303,77	1247,80	1258,09	1237,15	1303,77	1277,53	1268,00	1295,42	1237,15	1303,77	1286,67	1268,00	1311,72	1345,33	1350,81
13	1327,78	1318,33	1327,78	1265,77	1276,98	1254,23	1327,78	1298,36	1287,84	1318,33	1254,23	1327,78	1308,53	1287,84	1336,86	1376,70	1383,53
14	1340,05	1329,97	1340,05	1274,59	1286,31	1262,55	1340,05	1308,79	1297,71	1329,97	1262,55	1340,05	1319,54	1297,71	1349,81	1393,40	1401,07
15	1345,43	1335,03	1345,43	1278,30	1290,26	1266,04	1345,43	1313,27	1301,92	1335,03	1266,04	1345,43	1324,31	1301,92	1355,51	1400,99	1409,10
16	1347,25	1336,73	1347,25	1279,51	1291,56	1267,17	1347,25	1314,76	1303,31	1336,73	1267,17	1347,25	1325,90	1303,31	1357,45	1403,64	1411,91
17	1347,53	1336,99	1347,53	1279,70	1291,76	1267,34	1347,53	1314,99	1303,53	1336,99	1267,34	1347,53	1326,15	1303,53	1357,75	1404,06	1412,36
18	1347,53	1336,99	1347,53	1279,70	1291,76	1267,34	1347,53	1314,99	1303,53	1336,99	1267,34	1347,53	1326,15	1303,53	1357,75	1404,06	1412,36
19	1347,53	1336,99	1347,53	1279,70	1291,76	1267,34	1347,53	1314,99	1303,53	1336,99	1267,34	1347,53	1326,15	1303,53	1357,75	1404,06	1412,36
20	1347,53	1336,99	1347,53	1279,70	1291,76	1267,34	1347,53	1314,99	1303,53	1336,99	1267,34	1347,53	1326,15	1303,53	1357,75	1404,06	1412,36
21	1190,91	1177,02	1190,91	1103,77	1118,90	1088,42	1190,91	1148,46	1133,80	1177,02	1088,42	1190,91	1162,87	1133,80	1204,52	1268,19	1280,00
22	997,10	980,84	997,10	897,48	914,38	880,49	997,10	947,86	931,18	980,84	880,49	997,10	964,42	931,18	1013,20	1090,75	1105,59
23	782,72	765,76	782,72	681,24	698,06	664,49	782,72	731,85	714,94	765,76	664,49	782,72	748,80	714,94	799,66	883,63	900,17
24	570,72	554,98	570,72	478,61	493,54	463,89	570,72	523,93	508,64	554,98	463,89	570,72	539,38	508,64	586,60	667,49	683,87
25	383,33	370,32	383,33	308,89	320,67	297,36	383,33	345,01	332,72	370,32	297,36	383,33	357,54	332,72	396,56	465,86	480,28
26	235,24	225,70	235,24	181,79	190,07	173,77	235,24	207,38	198,60	225,70	173,77	235,24	216,41	198,60	245,04	297,72	308,98
27	130,64	124,46	130,64	96,72	101,86	91,79	130,64	112,74	107,19	124,46	91,79	130,64	118,49	107,19	137,04	172,38	180,13
28	64,59	61,10	64,59	45,82	48,60	43,16	64,59	54,56	51,51	61,10	43,16	64,59	57,76	51,51	68,23	88,86	93,49
29	27,30	25,65	27,30	18,59	19,85	17,39	27,30	22,60	21,19	25,65	17,39	27,30	24,08	21,19	29,04	39,11	41,42
30	8,49	7,93	8,49	5,57	5,98	5,17	8,49	6,90	6,42	7,93	5,17	8,49	7,39	6,42	9,08	12,61	13,44

Si queremos tener el valor de potencia para el área de 300 km x 300 km tendríamos que multiplicar por el nº Total de aerogeneradores, que en nuestro caso estamos suponiendo 2.000 unidades.

Cabe recordar que el método de Hannele Holttinen, caracteriza el comportamiento de un número de aerogeneradores localizados en una determinada extensión D, conociendo los datos de viento de una sola ubicación de la extensión de estudio, a través de una curva multi-turbina aproximada. De esta forma, en las tablas anteriores, disponemos de la curva multi-turbina de la zona de estudio según la información de viento de la que partamos, mostrada esa información con las diferentes curvas multi-turbinas sobre la curva de comportamiento del aerogenerador.

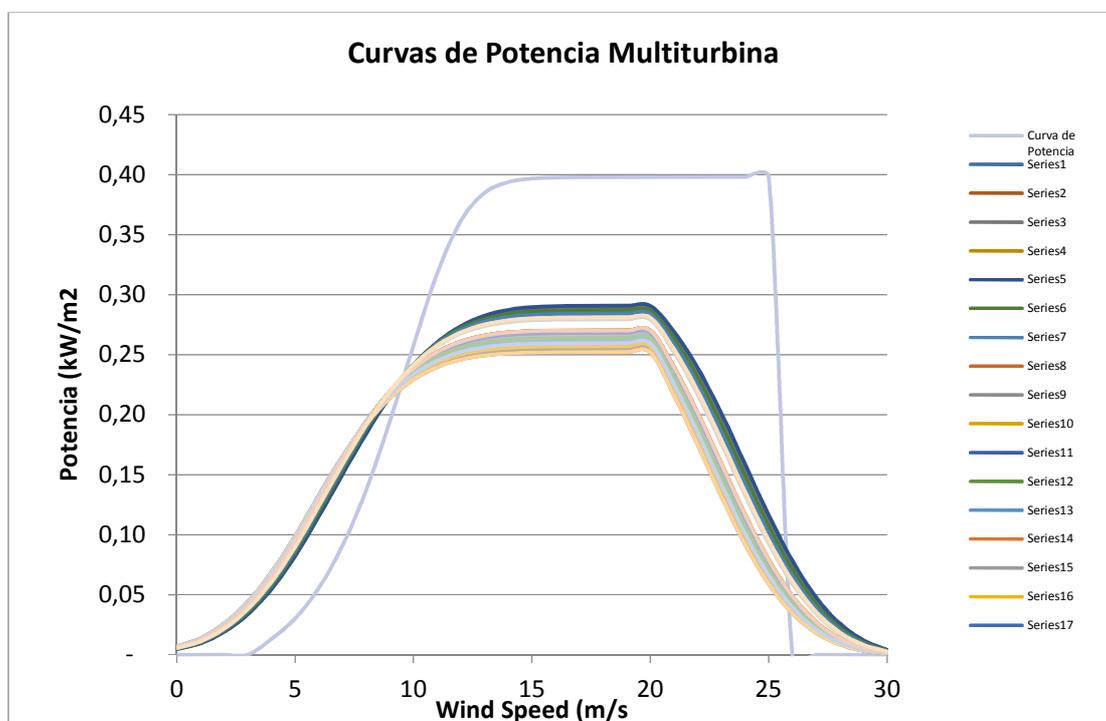


Ilustración 6. Curvas de Potencia Multi-turbina. Método de Hannele Holttinen

### 3.2 Conclusiones

Una vez llevada a la práctica el método de HH para una hipotética región de 300 x 300 kilómetros y 2.000 aerogeneradores de 2.000 kW potencia nominal, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Según los datos de partida la potencia máxima generada por la curva multi-turbina puede variar hasta en 200 kW. En nuestro caso particular puede ser achacable a muy distinto comportamiento del viento de todas las localizaciones disponibles en la base de datos.
- En la zona de arranque de los aerogeneradores la curva multi-turbina si cumple con su objetivo de suavizado (como se puede ver en la ilustración anterior), pero no así en la zona de generación constante, donde la potencia de la curva multi-turbina es considerablemente superior a la curva simple. La potencia máxima es aproximadamente un 30% inferior.

Para poder llegar a valorar la utilidad del método propuesto por HH, tendríamos que comparar la energía generada en un caso real con la energía simulada con la curva multi-turbina, tal como hizo HH en su artículo para 3 aerogeneradores diferentes, obteniendo como conclusión, que a pesar de no ser un fiel reflejo de la realidad podría ser un punto de partida para estudiar la localización correcta de los aerogeneradores.

## 4 Método Alternativo para Curva Multi-turbina

Una vez estudiado el método propuesto por Hannele Holttinen, y teniendo en consideración las diferentes hipótesis de partidas planteadas. Se nos plantea la posibilidad de plantear un método alternativo, para obtener la curva de potencia multi-turbina que defina el comportamiento de un modelo determinado aerogenerador instalado por toda una extensión determinada conocidos los parámetros de viento de una única ubicación.

### 4.1 Descripción del método propuesto.

- Especificamos las dimensiones del área D de estudio.
- Especificamos un aerogenerador de referencia a instalar por el área D.
- Cálculo de la velocidad media  $w_m$  (m/s) del viento a la altura del rotor.
- Cálculo de la propagación de tiempo T, siendo

$$T = D/w_m$$

- Realizamos la siguiente hipótesis: "Conocida la medida velocidad de viento en cada una de las horas durante todo un año, asumimos la distribución temporal del viento como si fuera una distribución espacial dentro de un recinto en estudio A".
- Para determinar el recinto de estudio donde aplicar la hipótesis anterior, empleamos la propagación del tiempo T y el hecho de tomar medidas de viento en periodo de tiempo horarios. Así el número de puntos N que vamos a emplear para determinar el recinto A es

$$N = T/\Delta t$$

Donde T es el tiempo de propagación y  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo de cada medida o paso. Siendo N un número par (mismo procedimiento que utilizado por Hannele Holttinen para crear las series de velocidades promediada por bloques).

- Para cada  $w_j$  de la serie de velocidades de viento, calculamos la Potencia promedio en el intervalo N+1 centrado en j

$$\bar{P}_j = \frac{1}{N+1} \sum_{i=j-\frac{N}{2}}^{j+\frac{N}{2}} P_i$$

La potencia  $P_i$  es calculada al pasar la velocidad  $w_i$  por la curva de potencia del aerogenerador.

Una vez calculado todos los  $\bar{P}_j$  obtengo el vector de potencias promedio  $\bar{P}$  para toda la serie de datos de viento.

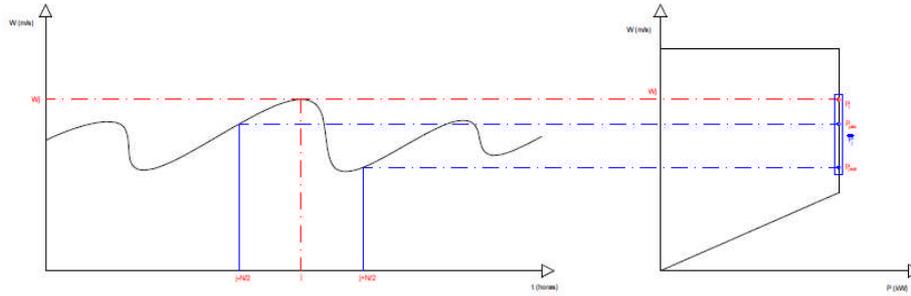


Ilustración 7. Método Propuesto (1)

- Con los datos del vector de potencias promedio  $\bar{P}$  calculo la curva multi-turbina asociada a la serie de vientos en esa determinada zona de la siguiente manera:

$$P_j^m = \frac{1}{N} \sum \bar{P}_i$$

Para cada una de los valores de la serie de viento discretizados en tramos de 0.1 m/s, busco en el vector  $\bar{P}$  su potencia promedio asociada, y en caso de que cada velocidad tenga más de una velocidad promedio  $\bar{P}_i$  asociada, la potencia  $P_j^m$  para esa velocidad será la potencia promedio de los N términos.

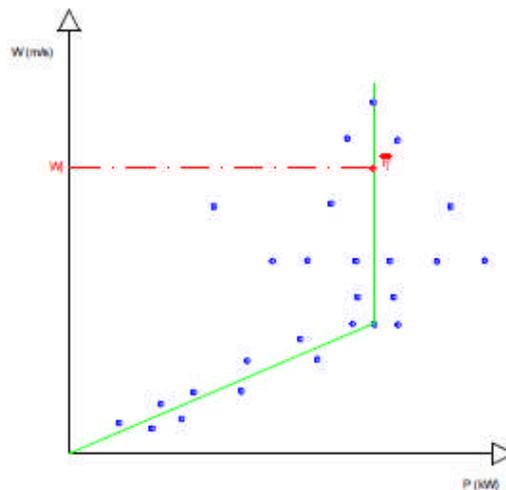


Ilustración 8. Método Propuesto (1)

#### 4.2 Aplicación práctica a la base de datos disponible.

Una vez descrito el método alternativo propuesto por nosotros, vamos a llevarlo a la práctica aplicándolo a una de las series existente en la base de datos.

Aplicamos a la serie de datos denominada serie 1. La cual viene caracterizada por una velocidad media de 9,88 m/s y velocidad mediana de 6,95 m/s.

- Definimos un área de estudio para la cual queremos obtener la curva multi-turbina, que en este caso será de 300 km x 300 km, para un total de 2.000 aerogeneradores.
- Definimos un aerogenerador típico, en este caso seguimos con el modelo G80 de Gamesa.
- Cálculo de la velocidad media  $W_m$  (m/s) del viento a la altura del rotor 9,88 m/s.
- Cálculo de la propagación de tiempo T y N.

$$T = \frac{300 \text{ kn}}{9.88 \text{ m/s} \cdot 1 \text{ km}/1000 \text{ m}} = 30612 \text{ segundos} = 8.5 \text{ horas}$$

$$N = T/\Delta t = \frac{8.5}{1} \sim 8$$

- Realizamos la hipótesis de “conocida la medida velocidad de viento durante un periodo de 8 horas, asumimos la distribución temporal del viento como si fuera una distribución espacial dentro de un recinto en estudio A caracterizado por 8 posiciones”.

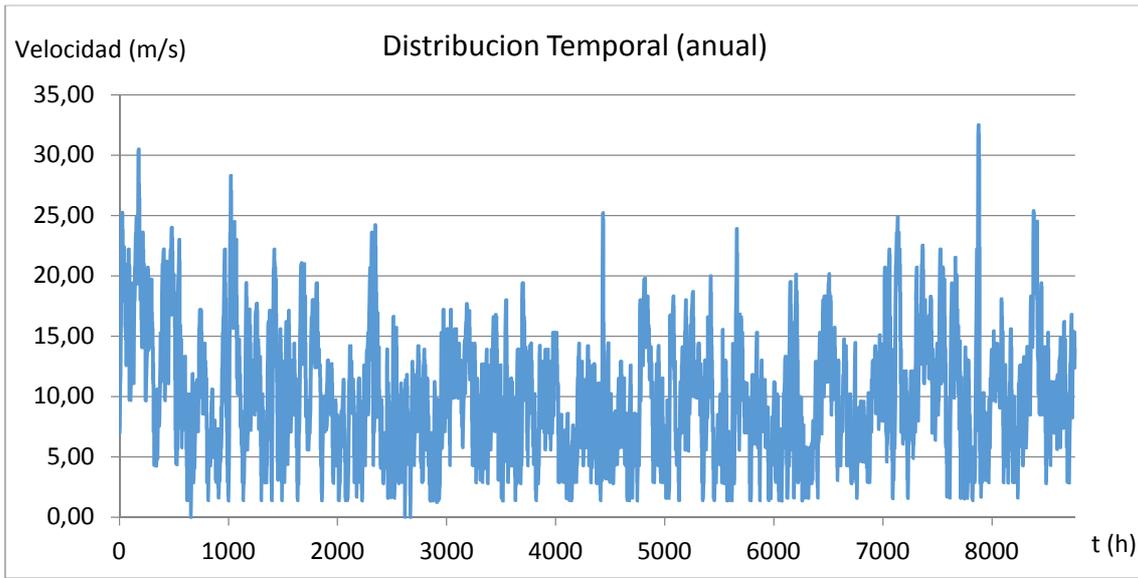


Ilustración 9. Distribución Temporal Anual

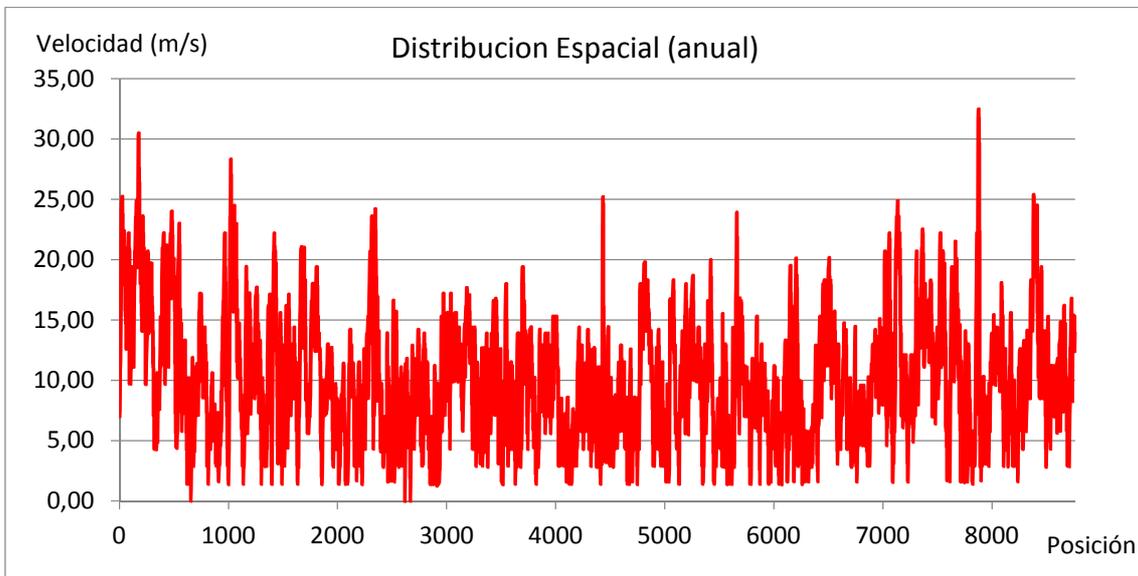


Ilustración 10. Distribución Espacial Anual

Así en la siguiente grafica podemos ver en rojo cómo sería la “distribución espacial” del viento en el primer punto de estudio, situado en la posición media número 5.

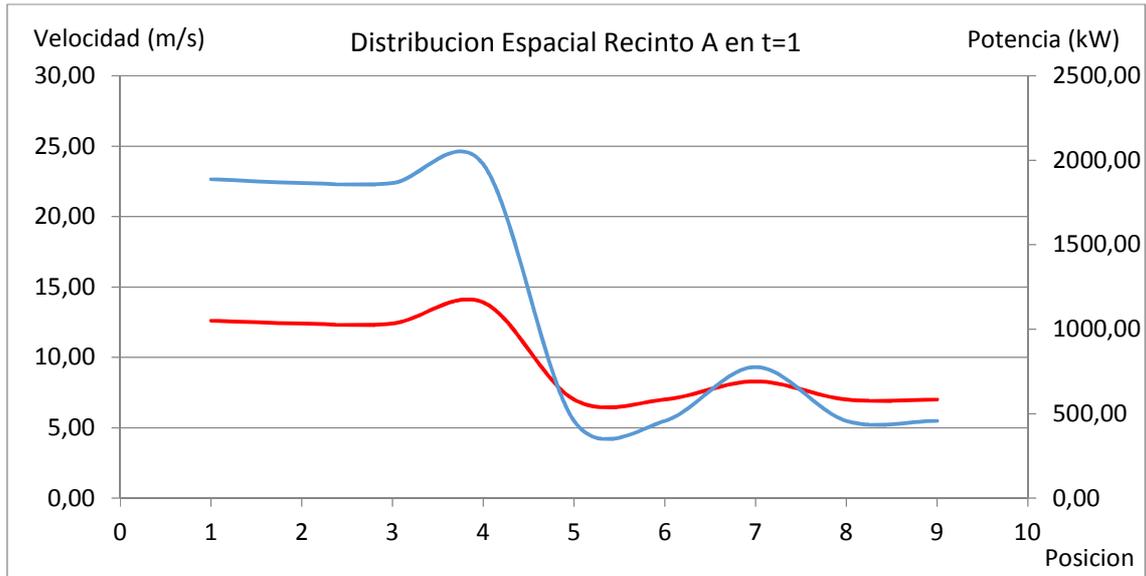


Ilustración 11. Distribución Espacial Recinto A en t=1

- Para cada  $w_j$  de la serie de velocidades de viento, calculamos la Potencia promedio en el intervalo N+1 centrado en j.

En la gráfica superior se encuentra representada gráficamente la primera fila correspondiente a t=1h.

Tabla 4. Calculo Potencia promedio para 10 primeros datos de la serie

$w_j$ (m/s)	t (h)	Intervalo N+1									$\bar{P}_j$ (kW)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
7,00	1	1888,20	1864,80	1864,80	1975,50	457,00	457,00	776,40	457,00	457,00	1133,08
7,00	2	1864,80	1864,80	1975,50	457,00	457,00	776,40	457,00	457,00	776,40	1009,54
8,30	3	1864,80	1975,50	457,00	457,00	776,40	457,00	457,00	776,40	1620,00	982,34
7,00	4	1975,50	457,00	457,00	776,40	457,00	457,00	776,40	1620,00	1620,00	955,14
7,00	5	457,00	457,00	776,40	457,00	457,00	776,40	1620,00	1620,00	1864,80	942,84
8,30	6	457,00	776,40	457,00	457,00	776,40	1620,00	1620,00	1864,80	1620,00	1072,07
11,10	7	776,40	457,00	457,00	776,40	1620,00	1620,00	1864,80	1620,00	1620,00	1201,29
11,10	8	457,00	457,00	776,40	1620,00	1620,00	1864,80	1620,00	1620,00	1899,90	1326,12
12,40	9	457,00	776,40	1620,00	1620,00	1864,80	1620,00	1620,00	1899,90	1864,80	1482,54
11,10	10	776,40	1620,00	1620,00	1864,80	1620,00	1620,00	1899,90	1864,80	1981,50	1651,93

Repetimos este proceso para los 8.760 datos de la serie.

- Con los datos del vector de potencias promedio  $\bar{P}$  calculo la curva multi-turbina asociada a la serie de vientos en esa determinada zona de la siguiente manera:

$$P_j^m = \frac{1}{N} \sum \bar{P}_i$$

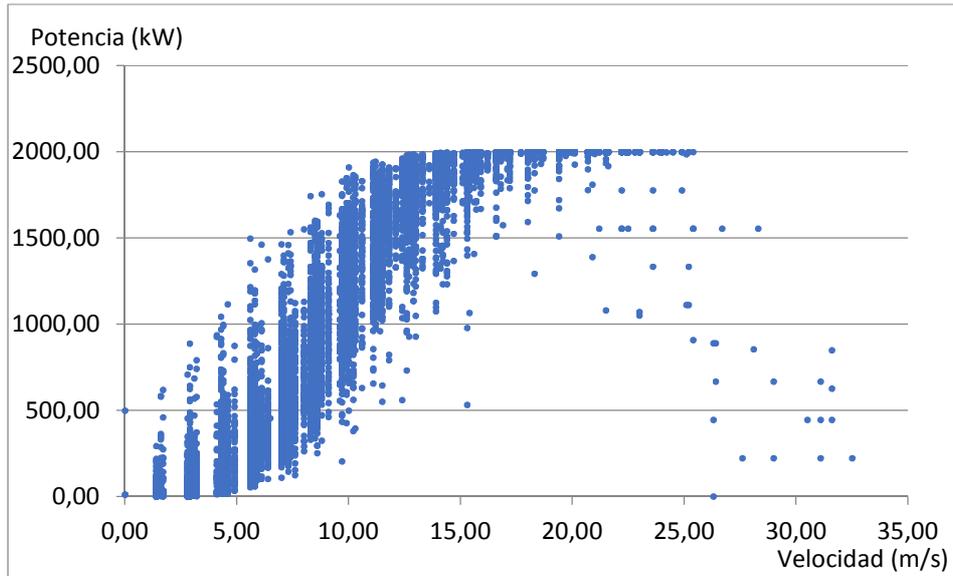


Ilustración 12. Potencias Promedios de la serie anual

- Comparamos la curva de la potencia multi-turbina para el recinto D con la curva del aerogenerador.



Ilustración 13. Curva Potencia Aerogenerador Vs Multi-turbina

Respecto a la ilustración anterior, cabe mencionar que la curva multi-turbina se ha graficado como de forma discretizada, de ahí los picos que se pueden observar en la curva.

### 4.3 Conclusiones

De la curva multi-turbina obtenida por el método alternativo podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Tanto en la zona de arranque, como en la zona de potencia constante de los aerogeneradores la curva multi-turbina cumple con su objetivo de suavizado (como se puede ver en la ilustración anterior).

Para poder llegar a valorar la utilidad del método alternativo a HH propuesto, tendríamos que comparar la energía generada en un caso real con la energía simulada con la curva multi-turbina, y sacar así las correspondientes conclusiones que nos indique la utilidad de la curva multi-turbina obtenida.

## 5 Comparativo de ambos métodos propuestos para la obtención de Curva Multi-turbina

### 5.1 Caso práctico simulación de la curva multi-turbina en una localización concreta.

El objetivo del siguiente caso práctico es comparar las curvas multi-turbina obtenidas por ambos métodos, y su semejanza con la curva de potencia del aerogenerador. Para ellos vamos a simular el comportamiento de cada una de las dos curvas multi-turbinas en una única localización.

Teniendo en cuenta que el objetivo de la curva multi-turbina es que conocida la curva y los datos de una única localización, extrapolar los resultados a toda una región N. Tendríamos que multiplicar la energía anual generada por un aerogenerador por los 68 aerogeneradores situados en la localización. Para elegir que localización simular, elegimos una cuyos valores de viento no sean extremos, es decir que su factor de capacidad se encuentre en los valores medios, entorno 0,3. Luego vamos a simular en la localización Canada\_B\_5 o sitio 17 según la tabla 3.

Para ello, se ha preparado un programa en Matlab, en el cual cargamos las curvas multi-turbina obtenidas por ambos métodos, para una determinada localización a elegir, y las simulamos para poder comparar ambos métodos. El aerogenerador para el que sea han calculado las curvas multi-turbina, como se ha seguido durante el desarrollo de tema, es el modelo G80 de Gamesa

#### 5.1.1 Método de Hannele Holttinen

En una carpeta denominada "Método HH" se han guardado las curvas multi-turbina obtenidas en el punto 3 de este mismo tema. Las curvas se han guardado en archivos ".txt".

Elegimos el sitio de la región donde queremos evaluar la curva multi-turbina y lo introducimos por pantalla. En este caso nos vamos a centrar en la denominada serie17, correspondiente a la localización Canada\_B\_5. Como se muestra en la captura, se carga la curva de potencia (curva multi-turbina), y se pasa por la serie de viento de la localización para calcular la potencia turbinada, previamente al cálculo de la potencia, se ha tenido que rectificar los datos de velocidad de viento a la altura del rotor.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Comparativa Multiturbina %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all
clc
format short %eng

a=pwd;
cd('Multiturbina')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Método de Hanel Holttinen %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

cd('Método HH')
nombre1=input('Introduzca Localización para obtener la curva Multiturbina de la región
WSPTable=importdata([nombre1,'.txt']); % Archivo.txt con Datos del aerogenerador
[mwSP,n]=size(WSPTable);
WS=WSPTable(2:mwSP,1); % Look-up Table viento (m/s)
Power=WSPTable(2:mwSP,2); % Look-up Table Potencia (kw)
HT=WSPTable(1,1); % Altura del Rotor
Prated=WSPTable(1,2); % Potencia Nominal Aerogenerador

```

Ilustración 14. Algoritmo Carga de Curva del aerogenerador. Método de Hanel Holttinen.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Lectura de los archivos .txt de velocidades para los n sitios %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

cd(a)
cd('Datos viento')
Mdatos=importdata([nombre1,'.txt']); % Archivo.txt con Datos de la localización
[mdatos,n]=size(Mdatos);
HW=Mdatos(1,1);
WSdatos=Mdatos(2:mdatos,1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Rectificación de la velocidad a la Altura del aerogenerador %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

alfa=0.2;
WSR=WSdatos.*(HT/HW)^alfa; % Fórmula de rectificación de Altura
% según UNE61400-1
WSR_promedio=mean(WSR); % Velocidad Promedio
WSR_mediana=median(WSR); % Velocidad Mediana
WSR_moda=mode(WSR); % Velocidad Moda

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Potencia Turbinada %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Pt=interp1(WS,Power,WSR,'linear');
nhev=0;
nhdv=0;
for i=1:length(WSdatos)
    if WSR(i)>max(WS)
        Pt(i)=0;
        nhev=nhev+1;
        % si la velocidad de viento > max. velocidad de viento permitida, el
        % Aerogenerador se pone en posición segura (No turbina).
    end
    if WSR(i)==0
        Pt(i)=0;
        nhdv=nhdv+1;
        % si la velocidad de viento = 0, el aerogenerador no turbina
    end
end
end

```

Ilustración 15. Algoritmo Cálculo de Potencia. Método de Hanel Holttinen

Una vez calcula la potencia, se procede a calcular varios parámetros que nos van ayudar a comparar los dos métodos propuestos:

- Factor de Capacidad
- Velocidad Media
- Velocidad Mediana
- Velocidad Moda
- Potencia Media
- Potencia Mediana
- Energía Anual
- Número de Horas paradas por exceso de viento
- Número de Horas paradas por déficit de viento
- Energía Máxima

Posteriormente se sacará por pantalla la curva multi-turbina de la localización, para el aerogenerador G80 por el método de Hannele Holttinen.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Resultados HH %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fc=zeros(2,1);
vm=zeros(2,1);
vmdm=zeros(2,1);
vmd=zeros(2,1);
Ptm=zeros(2,1);
Ptmdn=zeros(2,1);
Eanual=zeros(2,1);
nhev_V=zeros(2,1);
nhdv_V=zeros(2,1);
Emax=zeros(2,1);

fc(1)=sum(Pt)/(Prated*length(Pt)); % Factor de Capacidad
vm(1)=mean(WSR); % Velocidad Media
vmdn(1)=median(WSR); % Velocidad Mediana
vmd(1)=mode(WSR); % Velocidad Moda
Ptm(1)=mean(Pt); % Potencia Media
Ptmdn(1)=median(Pt); % Potencia Mediana
Eanual(1)=sum(Pt); % Energía Anual
nhev_V(1)=nhev; % Número de Horas paradas por exceso de viento
nhdv_V(1)=nhdv; % Número de Horas paradas por déficit de viento
Emax(1)=Prated*length(Pt); % Energía Máxima

figure(1) % Curva Característica Multiturbina [Método Hannele Holttinen]
plot(WS,Power)
title('Curva Multiturbina - Método Hannele Holttinen')
xlabel('Velocidad (m/s)')
ylabel('Potencia(kw)')

WS_HH=WS;
Power_HH=Power;
    
```

Ilustración 16. Algoritmo Presentación de Resultados. Método de Hannele Holttinen

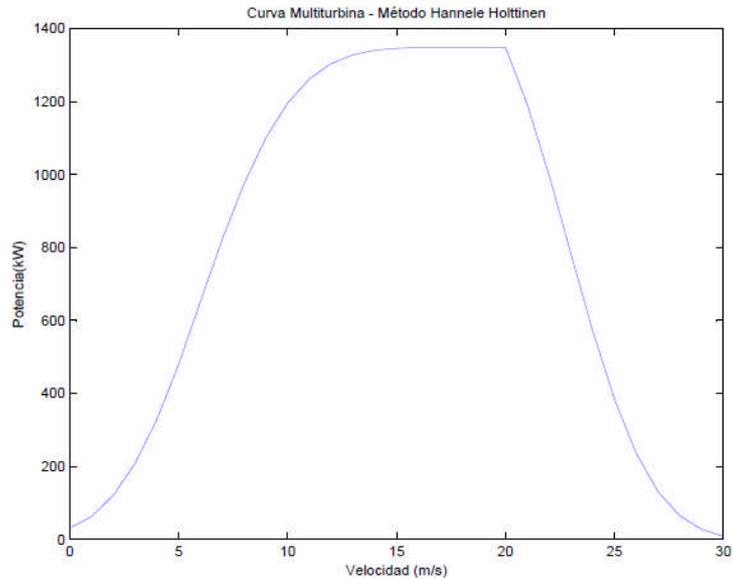


Ilustración 17. Curva de Potencia Multi-turbina. Método de Hannel Hoittinen (Canadá B 5 o Serie 17)

### 5.1.2 Método Alternativo

En una carpeta denominada “Método Alternativo” se han guardado las curvas multi-turbina obtenidas en el punto 4 de este mismo tema. Las curvas se han guardado en archivos “.txt”.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Método de Propio %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cd(a)
cd('Multiturbina')
cd('Método Alternativo')

WSPTable=importdata([nombre1,'.txt']); % Archivo.txt con Datos del aerogenerador
[mwSP,n]=size(WSPTable);
WS=WSPTable(2:mwSP,1); % Look-up Table viento (m/s)
Power=WSPTable(2:mwSP,2); % Look-up Table Potencia (kw)
HT=WSPTable(1,1); % Altura del Rotor
Prated=WSPTable(1,2); % Potencia Nominal Aerogenerador

%%%%%%%%%% Rectificación de la velocidad a la Altura del aerogenerador %%%%%%%%%%%

% Los datos ya están cargados en el vector wsdatos, y las velocidades
% de viento no hay que rectificarlas ya que la altura de las máquinas la misma
    
```

Ilustración 18. Algoritmo Carga de Curva del aerogenerador. Método Alternativo

Para el sitio de la región donde a evaluar, se carga la curva de potencia (curva multi-turbina), y se pasa por la serie de viento de la localización, cargada previamente, para calcular la potencia turbinada.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Potencia Turbinada %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Pt=interp1(WS,Power,WSR,'linear');
nhev=0;
nhdv=0;
for i=1:length(wsdatos)
    if WSR(i)> max(ws)
        Pt(i)=0;
        nhev=nhev+1;
        % Si la velocidad de viento > max. velocidad de viento permitida, el
        % Aerogenerador se pone en posición segura (No turbina).
    end
    if WSR(i)==0
        Pt(i)=0;
        nhdv=nhdv+1;
        % Si la velocidad de viento = 0, el aerogenerador no turbina
    end
end
end
    
```

Ilustración 19. Algoritmo Cálculo de Potencia. Método Alternativo

Una vez calcula la potencia, se procede a calcular los parámetros que nos van ayudar para comparar los métodos propuestos, para sacar por pantalla la curva multi-turbina de la localización, para el aerogenerador G80 por el método de alternativo.

- Factor de Capacidad
- Velocidad Media
- Velocidad Mediana
- Velocidad Moda
- Potencia Media
- Potencia Mediana
- Energía Anual
- Número de Horas paradas por exceso de viento
- Número de Horas paradas por déficit de viento
- Energía Máxima

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Resultados MP %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fc(2)=sum(Pt)/(Prated*length(Pt)); % Factor de Capacidad
vm(2)=mean(WSR); % Velocidad Media
vmdn(2)=median(WSR); % Velocidad Mediana
vmd(2)=mode(WSR); % Velocidad Moda
Ptm(2)=mean(Pt); % Potencia Media
Ptmdn(2)=median(Pt); % Potencia Mediana
Eannual(2)=sum(Pt); % Energía Anual
nhev_v(2)=nhev; % Número de Horas paradas por exceso de viento
nhdv_v(2)=nhdv; % Número de Horas paradas por déficit de viento
Emax(2)=Prated*length(Pt); % Energía Máxima

figure(2) % Curva Característica Multiturbina [Método Propio]
plot(WS,Power)
title('Curva Multiturbina - Método Propio')
xlabel('velocidad (m/s)')
ylabel('Potencia(kw)')
WS_MP=WS;
Power_MP=Power;
    
```

Ilustración 20. Algoritmo Presentación de Resultados. Método Alternativo

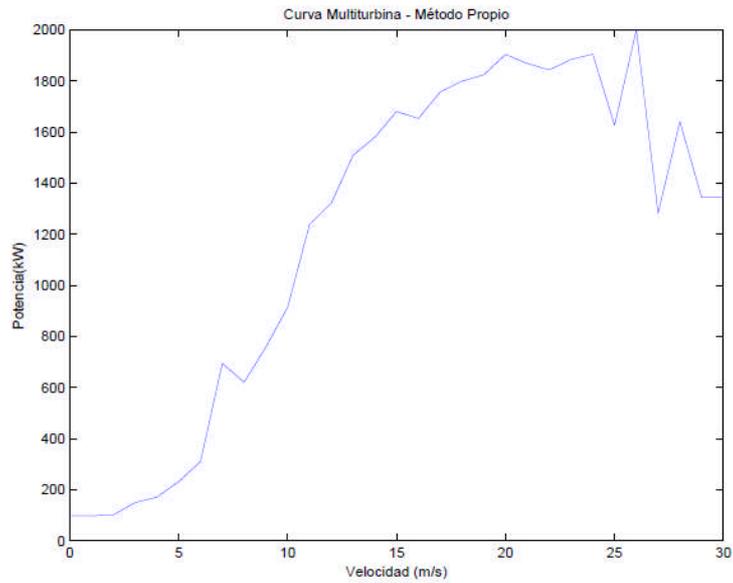


Ilustración 21. Curva de Potencia Multi-turbina. Método Alternativo (Canadá B 5 o Serie 17)

### 5.1.3 Simulación Aerogenerador G80

Cargada la curva de potencia del aerogenerador G80 se calcula la potencia de la localización en estudio, y se calculan los mismos parámetros anteriores que nos ayudarán a la hora de la comparación.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Aerogenerador de referencia (G80) %%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cd(a)
cd('Datos Aerogeneradores')
nombre2=input('Introduzca Modelo Aerogenerador (G80):','s');

WSPTable=importdata([nombre2,'.txt']); % Archivo.txt con Datos del aerogenerador
[mwSP,n]=size(WSPTable);
WS=WSPTable(2:mwSP,1); % Look-up Table viento (m/s)
Power=WSPTable(2:mwSP,2); % Look-up Table Potencia (kw)
HT=WSPTable(1,1); % Altura del Rotor
Prated=WSPTable(1,2); % Potencia Nominal Aerogenerador
    
```

Ilustración 22. Algoritmo Carga de Curva del aerogenerador G80

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Rectificación de la velocidad a la Altura del aerogenerador %%%%%%%%%%
% Los datos ya están cargados en el vector wsdatos, y las velocidades
% de viento no hay que rectificarlas ya que la altura de las máquinas la misma

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Potencia Turbinada %%%%%%%%%%

Pt=interp1(ws,Power,WSR,'linear');
nhev=0;
nhdv=0;
for i=1:length(wsdatos)
    if WSR(i)> max(ws)
        Pt(i)=0;
        nhev=nhev+1;
        % Si la velocidad de viento > max. velocidad de viento permitida, el
        % Aerogenerador se pone en posición segura (No turbina).
    end
    if WSR(i)==0
        Pt(i)=0;
        nhdv=nhdv+1;
        % Si la velocidad de viento = 0, el aerogenerador no turbina
    end
end
end
    
```

Ilustración 23. Algoritmo Cálculo de Potencia. Aerogenerador G80 (Canadá B 5 o Serie 17)

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Resultados Aerogenerador G80 %%%%%%%%%%

fc(3)=sum(Pt)/(Prated*length(Pt)); % Factor de Capacidad
vm(3)=mean(WSR); % Velocidad Media
vmdn(3)=median(WSR); % Velocidad Mediana
vmd(3)=mode(WSR); % Velocidad Moda
Ptm(3)=mean(Pt); % Potencia Media
Ptm(3)=median(Pt); % Potencia Mediana
Eannual(3)=sum(Pt); % Energía Anual
nhev_v(3)=nhev; % Número de Horas paradas por exceso de viento
nhdv_v(3)=nhdv; % Número de Horas paradas por déficit de viento
Emax(3)=Prated*length(Pt); % Energía Máxima

figure(3) % Curva Característica Aerogenerador
plot(ws,Power)
title('Curva Multiturbina - Método Propio')
xlabel('Velocidad (m/s)')
ylabel('Potencia(kw)')

WS_G80=ws;
Power_G80=Power;
    
```

Ilustración 24. Algoritmo Presentación de Resultados. Aerogenerador G80 (Canadá B 5 o Serie 17)

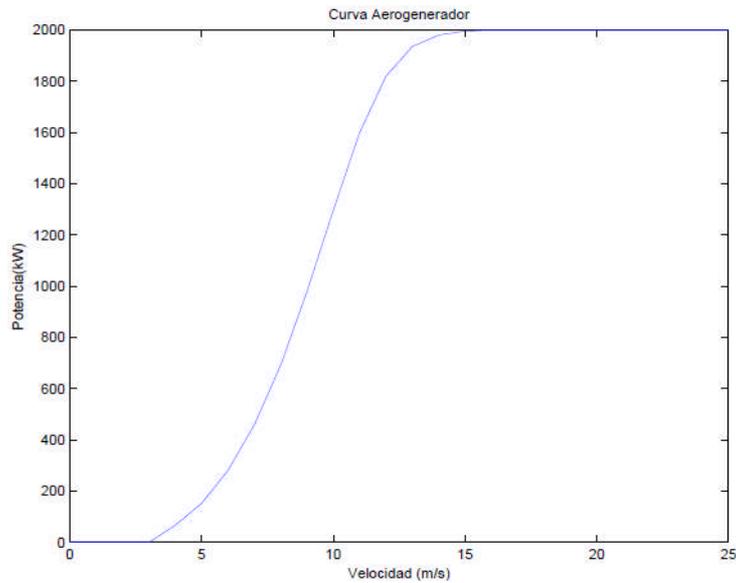


Ilustración 25. Curva de Potencia Aerogenerador G80

#### 5.1.4 Resultados

Una vez cargados las curvas multi-turbina de ambos métodos y realizados los cálculos correspondientes, se procede a graficar los diagramas que nos ayudaran a realizar la comparación de ambos métodos, así como la creación de un archivo “.txt” con los resultados de ambos métodos.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Comparativa de Métodos %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(3)                                % Diagrama Curva Factor de Capacidad
bar(fc)
title('Factor de Capacidad')
ylabel('Factor de Capacidad')

figure(4)
bar(Ptm)                                  % Diagrama Potencia Media
title('Potencia Media (kw)')
ylabel('Potencia Media (kw)')

figure(5)
bar(Eanual/10^6)                          % Diagrama Energía anual
title('Energía Anual')
ylabel('Energía anual(Gwh)')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(6)                                  % Curvas Multiturbina
plot(ws_HH,Power_HH,ws_MP,Power_MP,ws_G80,Power_G80)
title('Curvas Multiturbina')
xlabel('velocidad (m/s)')
ylabel('Potencia(kw)')
    
```

Ilustración 26. Algoritmo Cálculo de Gráficas Comparativas de métodos

Las gráficas que se muestran por pantalla son:

- Diagrama Factor de Capacidad de ambos métodos
- Diagrama Potencia Media de ambos Métodos

- Diagrama Energía anual de Ambos Métodos
- Diagrama donde muestra la curva de potencia multi-turbina de ambos métodos y la curva de potencia del aerogenerador original G80.

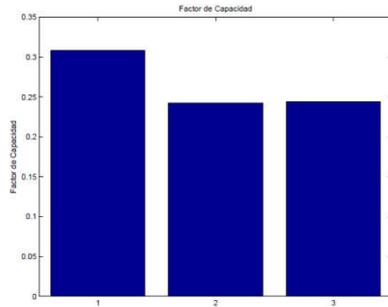


Ilustración 27. Comparativa Factor de Capacidad (Canadá B 5 o Serie 17)

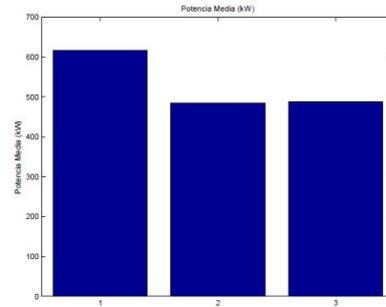


Ilustración 28. Comparativa Potencia Media (Canadá B 5 o Serie 17)

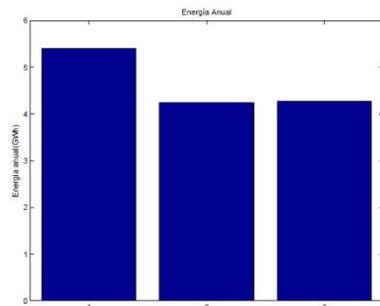


Ilustración 29. Comparativa Energía Anual (Canadá B 5 o Serie 17)

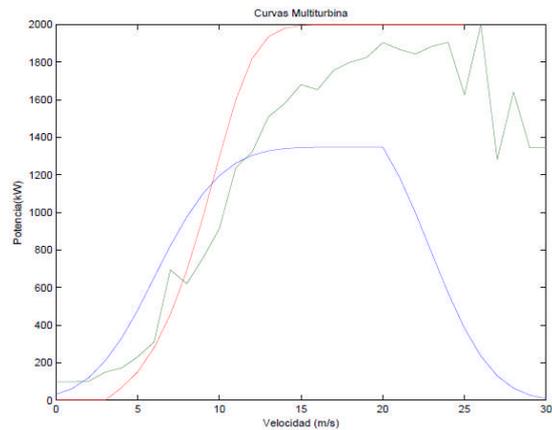


Ilustración 30. Comparativa Curva Multi-turbina HH, Método Alternativo y curva aerogenerador G80

El archivo a crear muestra 10 columnas con el factor de capacidad, velocidad media, velocidad mediana, velocidad moda, potencia media, potencia mediana, energía anual, número de horas en parada por exceso de viento, número de horas en parada por déficit de viento y energía máxima.

```
% Creación de archivo.txt con:
% - Columna 1. Factor de Capacidad
% - Columna 2. Velocidad media del viento
% - Columna 3. Velocidad mediana del viento
% - Columna 4. Velocidad moda
% - Columna 5. Potencia media
% - Columna 6. Potencia mediana
% - Columna 7. Energía Anual
% - Columna 8. Número de Horas paradas por exceso de viento
% - Columna 9. Número de Horas paradas por déficit de viento
% - Columna 10. Energía Máxima

Result=[fc,vm,vmdn',vmd,Ptm,Ptmdn,Eanua],nhev_v,nhdv_v,Emax];

cd(a)
mkdir('Resultados')
cd('Resultados')

%Archivo con resultados
dlmwrite(['Resultados - Multiturbina ',nombre1, '.txt'],Result,'delimiter','\t','precision', '%.2f');
```

Ilustración 31. Algoritmo Creación de archivo “.txt.” de resultados

Tabla 5. Resumen Resultados Comparación Método de HH, Método Alternativo y Aerogenerador.

Método	Fc	Vm (m/s)	Vmd (m/s)	Vd (m/s)	Pm (kW)	Pmd (kW)	Ea (MW)	He (horas)	Hd (horas)	Emax (MW)
Hannele Holttinen	0,31	6,08	5,43	4,67	617,07	554,31	5.405	-	480,00	17.520
Alternativo	0,24	6,08	5,43	4,67	484,67	265,41	4.245	-	480,00	17.520
Curva Potencia	0,24	6,08	5,43	4,67	488,20	206,91	4.276	6,00	480,00	17.520

### 5.2 Caso práctico simulación de la curva multi-turbina en una región.

Extrapolamos resultados para una región de 68 aerogeneradores en ambos métodos multi-turbina (multiplicar los resultados anteriores por las 68 localizaciones) y comparamos con los resultados de la simulación del aerogenerador G80 en toda la región N (tal como se vio en el capítulo 4).

Método	Energía anual (MW)
Hannele Holttinen	367.575
Alternativo	288.705
Aerogenerador G80	294.026

Importante destacar no se trata de simular la curva multi-turbina por cada una de las localizaciones, ya que de esta forma, se pierde el sentido de obtener una curva multi-turbina de la zona. Recordamos que el objetivo de la curva multi-turbina es predecir el comportamiento de toda una región conociendo únicamente los datos de viento en una única localización de toda la región.

Respecto a la potencia total generada vemos como el método de Alternativo tiene una desviación del 20% (Inferior) respecto a la simulación con el aerogenerador G80. Mientras que el método de Hannele Holttinen 25% (Superior) respecto a la simulación con el aerogenerador G80.

El que la potencia generada por el método de HH sea mayor que la potencia generada por el método alternativo y por la generalización de la curva del generador, es contrario a la idea por la cual decíamos que la curva multi-turbina por el método de HH no llegaba a generar la potencia nominal del generador y por lo tanto preveíamos que la potencia total generada sería menor.

En este caso práctico, los vientos predominantes durante la secuencia temporal se sitúan en la zona de arranque de del aerogenerador, por lo que el mayor suavizado de la curva multi-turbina del método de HH ha compensado la menor potencia máxima de la curva multi-turbina del método de HH.

### **5.3 Conclusiones**

Analizando la curva multi-turbina obtenida por cada uno de los dos métodos propuestos podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Ambos métodos está basados en buscar una relación entre la distribución temporal conocida y la distribución espacial desconocida. En el método de Hannele Holttinen se realiza una relación entre las desviaciones estándar espacial y temporal, mientras que en el método propuesto directamente asumimos distribución espacial igual a distribución espacial en un determinado recinto.
- De los resultados obtenidos concluimos que ambas curvas multi-turbina suavizan la curva de potencia del aerogenerador en la zona de arranque. En el método de HH es más radical, mientras que en el método alternativo el suavizado es menor, pareciéndose más a la curva de potencia del aerogenerador.
- La curva con el método de HH no llega nunca a generar la potencia nominal del aerogenerador, mientras que en el método propuesto si se alcanza. Este hecho nos lleva a anticipar que la energía total obtenida por el método alternativo será mayor que la obtenida por el método de HH, lo cual no es cierto, como se ha podido comprobar en el caso práctico.
- Respecto a la potencia total generada vemos como el método de Alternativo no tiene por qué generar más potencia que el método de HH, ya que esto dependerá de los vientos de la región. El mayor suavizado del método de HH, puede compensar la menor potencia máxima de la curva multi-turbina del método de HH, como sucedió en el caso práctico.
- Concluimos por tanto que, ninguno de los métodos refleja fielmente la realidad, y que son solo una herramienta para ayudar a estudiar posibles ubicaciones de aerogeneradores y del comportamiento de estos frente a la red eléctrica de la zona.

## Tabla de Ilustraciones

### Capítulo 5. Simulación de la Curva Multi-turbina

<i>Ilustración 1. Potencia Generada desde una turbina simple respecto a la velocidad del viento. Coeficiente <math>C_p</math></i> .....	112
<i>Ilustración 2. Relación entre <math>D</math>, <math>T</math> y <math>W_s</math></i> .....	114
<i>Ilustración 3. Ejemplo de distribución normal de las velocidades de viento para turbinas en un área determinada (la velocidad de viento indicada es relativa respecto a la velocidad promedio por bloque por el timeslot).</i> .....	114
<i>Ilustración 4. Desviación Estándar Normalizada de la distribución de velocidades de viento para una turbina en cualquier momento de tiempo.</i> .....	115
<i>Ilustración 5. Curva multi-turbina</i> .....	115
<i>Ilustración 6. Curvas de Potencia Multi-turbina. Método de Hannele Holttinen</i> .....	122
<i>Ilustración 7. Método Propuesto (1)</i> .....	124
<i>Ilustración 8. Método Propuesto (1)</i> .....	124
<i>Ilustración 9. Distribución Temporal Anual</i> .....	125
<i>Ilustración 10. Distribución Espacial Anual</i> .....	125
<i>Ilustración 11. Distribución Espacial Recinto A en <math>t=1</math></i> .....	126
<i>Ilustración 12. Potencias Promedios de la serie anual</i> .....	127
<i>Ilustración 13. Curva Potencia Aerogenerador Vs Multi-turbina</i> .....	127
<i>Ilustración 14. Algoritmo Carga de Curva del aerogenerador. Método de Hannel Holttinen</i> .....	129
<i>Ilustración 15. Algoritmo Cálculo de Potencia. Método de Hannel Holttinen</i> .....	129
<i>Ilustración 16. Algoritmo Presentación de Resultados. Método de Hannel Holttinen</i> .....	130
<i>Ilustración 17. Curva de Potencia Multi-turbina. Método de Hannel Holttinen (Canadá B 5 o Serie 17)</i> .....	131
<i>Ilustración 18. Algoritmo Carga de Curva del aerogenerador. Método Alternativo</i> .....	131
<i>Ilustración 19. Algoritmo Cálculo de Potencia. Método Alternativo</i> .....	132
<i>Ilustración 20. Algoritmo Presentación de Resultados. Método Alternativo</i> .....	132
<i>Ilustración 21. Curva de Potencia Multi-turbina. Método Alternativo (Canadá B 5 o Serie 17)</i> .	133

<i>Ilustración 22. Algoritmo Carga de Curva del aerogenerador G80</i> .....	133
<i>Ilustración 23. Algoritmo Cálculo de Potencia. Aerogenerador G80 (Canadá B 5 o Serie 17)</i> ....	134
<i>Ilustración 24. Algoritmo Presentación de Resultados. Aerogenerador G80 (Canadá B 5 o Serie 17)</i> .....	134
<i>Ilustración 25. Curva de Potencia Aerogenerador G80</i> .....	135
<i>Ilustración 26. Algoritmo Cálculo de Gráficas Comparativas de métodos</i> .....	135
<i>Ilustración 27. Comparativa Factor de Capacidad (Canadá B 5 o Serie 17)</i> .....	136
<i>Ilustración 28. Comparativa Potencia Media (Canadá B 5 o Serie 17)</i> .....	136
<i>Ilustración 29. Comparativa Energía Anual (Canadá B 5 o Serie 17)</i> .....	136
<i>Ilustración 30. Comparativa Curva Multi-turbina HH, Método Alternativo y curva aerogenerador G80</i> .....	136
<i>Ilustración 31. Algoritmo Creación de archivo “.txt.” de resultados</i> .....	137

## **Tabla de Tablas**

### Capítulo 5. Simulación de la Curva Multi-turbina

<i>Tabla 1. Parámetros de Weibull</i> .....	117
<i>Tabla 2. Curva Multi-turbina para Serie de datos <math>i</math> (kW/m<sup>2</sup>).</i> .....	119
<i>Tabla 3. Curva Multi-turbina para Serie de datos <math>i</math> (kW).</i> .....	120
<i>Tabla 4. Calculo Potencia promedio para 10 primeros datos de la serie</i> .....	126
<i>Tabla 5. Resumen Resultados Comparación Método de HH, Método Alternativo y Aerogenerador</i> .....	137