



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de un parque eólico de 50 MW en
Catí, Alto Maestrazgo, Castellón.
Anejo I: Análisis productivo

Presentado por

Salazar Chueca, María

Para la obtención del

Grado en Ingeniería Civil

Curso: 2019/2020

Fecha: 9 de julio del 2020

Tutor: Pérez Martín, Miguel Ángel

ÍNDICE ANEJO I

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANÁLISIS DEL VIENTO.....	1
2.1. DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DE VIENTOS.....	1
2.2. DENSIDAD	4
3. PRODUCCIÓN DE CADA AEROGENERADOR	5
3.1. CURVAS DE POTENCIA CORREGIDAS	5
3.2. PRODUCCIÓN DE CADA MODELO DE AEROGENERADOR	13
3.3. FACTOR DE USO Y NÚMERO DE HORAS DE FUNCIONAMIENTO EQUIVALENTE.....	15
4. DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA.....	15

ÍNDICE DE TABLAS ANEJO I

Tabla 1 Obtención de parámetros Weibull	2
Tabla 2- Datos de partida	3
Tabla 3- Valores distribución de Weibull	3
Tabla 4- Densidad en %	5
Tabla 5-Curva corregida Enercon E-115.....	7
Tabla 6- Curva corregida Enercon E-138 EP3	8
Tabla 7- Curva corregida Enercon E-126EP3.....	9
Tabla 8- Curva corregida S.G. 5.0-132	10
Tabla 9- Potencia del viento y límite de Betz (KW)	12
Tabla 10- Producción para cada modelo de aerogenerador	14
Tabla 11. Producción real y máxima (KW*h)	15
Tabla 12- Factor de uso y horas de funcionamiento equivalente.....	15
Tabla 13- Energía para cada modelo de aerogenerador	16
Tabla 14- Energía aprovechada por cada aerogenerador	17

ÍNDICE DE FIGURAS ANEJO I

Figura 1- Distribución estadística de vientos en función de la probabilidad para $h=135$ m	4
Figura 2- Distribución estadística de vientos en función de las horas para $h=135$ m	4
Figura 3- Curvas de potencia corregidas.....	13
Figura 4- Distribución de la energía para cada modelo de aerogenerador	17

ÍNDICE DE FÓMRULAS ANEJO I

Fórmula 1- Ley del perfil logarítmico del viento	2
Fórmula 2- Relación entre densidades	6
Fórmula 3- Potencia del viento.....	11

1.INTRODUCCIÓN

En el presente anejo se realiza un análisis de aquellos factores que determinan la productividad de cada modelo de aerogenerador que se ha tenido en cuenta a la hora de redactar el proyecto.

Los modelos de aerogeneradores son Enercon E-115 de 3 MW, Enercon 138 EP3 de 3,5 MW, Enercon E-126 EP3 de 4 MW y Siemens Gamesa S.G. 5.0-132.

2.ANÁLISIS DEL VIENTO

2.1. DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DE VIENTOS

En este apartado se procede a calcular la distribución estadística de vientos, la cual viene determinada por la distribución de Weibull. Para ello, en primer lugar, es necesario determinar los parámetros de escala (A) y de forma (C) que la definen.

De la página web Global Wind Atlas, se obtienen para el punto de estudio, definido por las coordenadas: 40, 462º; 0,03983º, los parámetros mencionadas para las alturas de 10, 50, 100, 150 y 200 m procedente de todas las direcciones y para las rugosidades de 0, 0.03, 0.1, 0.4 y 1.5 m.

De todos estos, se decide escoger los valores dados para una rugosidad de 0.10 la cual se corresponde con un terreno agrícola con algunas casas a distancia > 500 m y una altura de 100m. Como se muestra en la tabla 1, los valores finales son $A=9,2$ m/s y $C=1,98$.

0.10	100 m					
DIRECCIÓN	SECT	FREQ	A	A*f	c	c*f
N	0	3.99	2.81	0.11	1.12	0.04
NNE	30	2.70	3.85	0.10	1.29	0.03
ENE	60	3.17	4.52	0.14	1.37	0.04
E	90	3.34	3.73	0.12	1.44	0.05
ESE	120	4.87	3.26	0.16	2.16	0.11
SSE	150	10.59	3.90	0.41	2.61	0.28
S	180	8.24	4.21	0.35	2.17	0.18
SSSW	210	10.64	5.71	0.61	1.83	0.19
WSW	240	4.29	5.25	0.23	1.42	0.06
W	270	2.71	4.66	0.13	1.05	0.03
WNW	300	22.73	15.87	3.61	2.39	0.54
NNW	330	22.73	14.06	3.20	1.87	0.43
	TOTAL	100		9.2		1.98

Tabla 1 Obtención de parámetros Weibull

Una vez calculados los parámetros para la altura de 100 m se procede a convertirlos a la altura de 135 m ya que es la altura de buje de los aerogeneradores. La fórmula que relaciona ambas es la ley del perfil logarítmico del viento, expresada de la siguiente forma:

$$\frac{v}{v_{ref}} = \frac{\ln(z/z_o)}{\ln(z_{ref}/z_o)}$$

Fórmula 1- Ley del perfil logarítmico del viento

Donde z y zref representan la cota de la nueva y actual altura respectivamente y z0 la rugosidad. Por su parte, vref es la velocidad de la altura actual y v la que se desea conseguir para obtener la relación.

De esta relación se obtiene A=9,6 m/s mientras que el parámetro C permanece constante.

Por tanto, los datos considerados para la distribución de Weibull son:

A(m/s)	9,6
C	1,98
Rugosidad (m)	0,1

Tabla 2- Datos de partida

A continuación, se han obtenido los valores de la distribución de vientos para cada velocidad en un intervalo de 1 m/s de una velocidad nula a una de 26 m/s tanto en términos de probabilidad como el equivalente en horas de un año.

vel calc (m/s)	Weibull	horas años
0	0	0
1	0.022233163	98.71662351
2	0.042531867	285.3821324
3	0.059973223	451.4132475
4	0.073690381	588.4091001
5	0.083152621	690.1841623
6	0.088211081	753.7547313
7	0.089081371	779.4441831
8	0.08628151	770.5238667
9	0.080541062	732.5311397
10	0.072698363	672.4089231
11	0.063601738	597.6122524
12	0.054027273	515.3078958
13	0.044620877	431.7566806
14	0.035867226	351.9236242
15	0.028083631	279.3178475
16	0.021433693	216.0300735
17	0.015953994	162.9144825
18	0.011586992	119.8544439
19	0.00821428	86.05596854
20	0.005686031	60.32475556
21	0.003844262	41.2981532
22	0.002539146	27.61853656
23	0.001638801	18.04700598
24	0.001033737	11.52474215
25	0.0006374	7.193753498
26	0.000384234	4.38981444

Tabla 3- Valores distribución de Weibull I

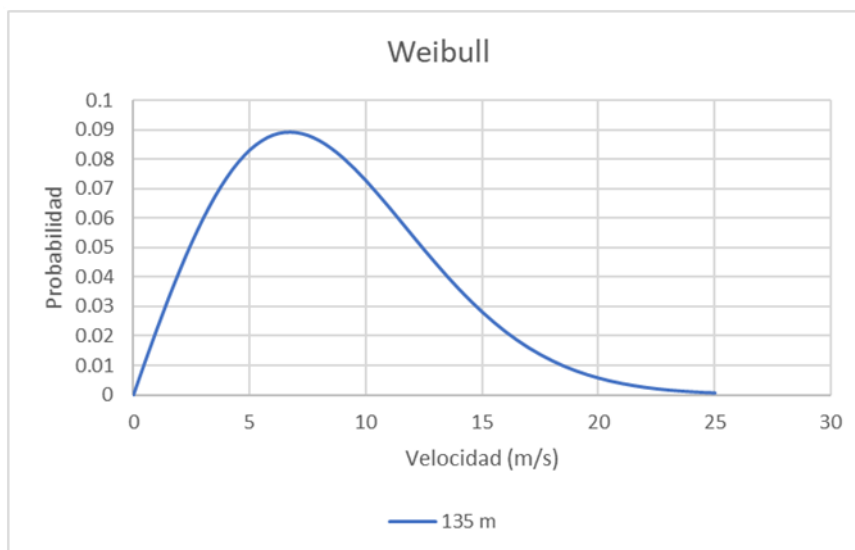


Figura 1- Distribución estadística de vientos en función de la probabilidad para $h=135$ m (Fuente: elaboración propia)

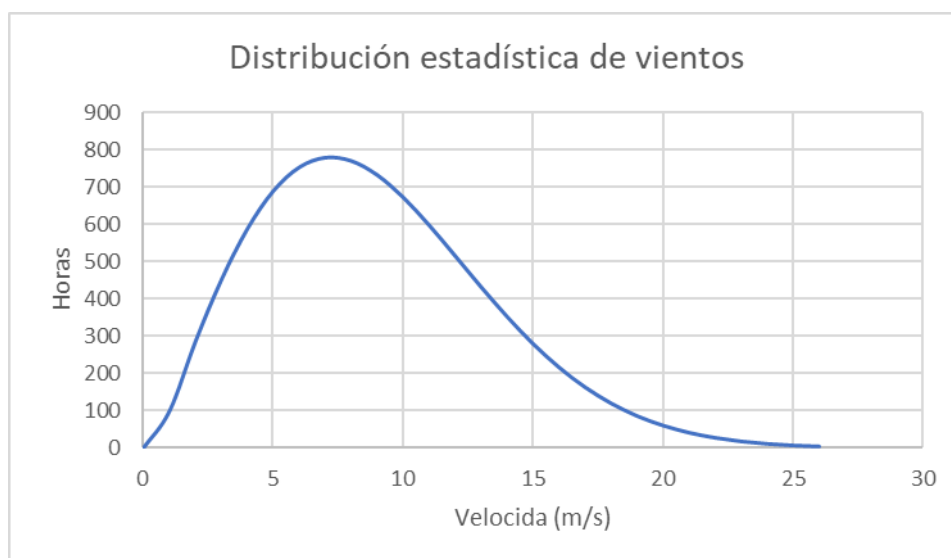


Figura 2- Distribución estadística de vientos en función de las horas para $h=135$ m (Fuente: elaboración propia)

2.2. DENSIDAD

En este apartado se procede al cálculo de la densidad, obtenida a partir de la diferencia entre probabilidades acumuladas consecutivas en la distribución de Weibull .

vel calc (m/s)	Weibull Acumulada	Densidad (%)
0	0	0
1	0.011269021	0.011269021
2	0.04384689	0.032577869
3	0.095378083	0.051531193
4	0.162548071	0.067169989
5	0.241336218	0.078788146
6	0.327381278	0.086045061
7	0.416358925	0.088977646
8	0.50431827	0.087959346
9	0.587940546	0.083622276
10	0.664699556	0.076759009
11	0.732920133	0.068220577
12	0.791745235	0.058825102
13	0.841032527	0.049287292
14	0.881206457	0.04017393
15	0.913092056	0.031885599
16	0.937753023	0.024660967
17	0.956350567	0.018597544
18	0.970032581	0.013682014
19	0.979856322	0.009823741
20	0.986742709	0.006886388
21	0.99145711	0.004714401
22	0.994609911	0.003152801
23	0.996670072	0.002060161
24	0.997985682	0.00131561
25	0.998806886	0.000821205
26	0.999308007	0.00050112

Tabla 4- Densidad en % (Fuente: elaboración propia)

3. PRODUCCIÓN DE CADA AEROGENERADOR

En este apartado se exponen los pasos seguidos para la obtención de la producción energética de cada modelo de aerogenerador, así como su factor de uso.

3.1. CURVAS DE POTENCIA CORREGIDAS

En primer lugar, para la obtención de la producción real de cada aerogenerador es necesario hacer una corrección de las curvas de potencia otorgadas por los fabricantes en función de la densidad del

viento. La densidad de referencia respecto a la que se calcula es de 1,225 kg/m³. La relación viene definida por la siguiente fórmula:

$$\rho = \rho_0 * e^{-(z/8435)-(t-15/288)}$$

Fórmula 2- Relación entre densidades

Donde z es la altura, que estará condicionada por la altura de buje de cada aerogenerador, y t es la temperatura.

La altura de buje de los modelos Enercon es de 135m que junto con una temperatura de 15º da una densidad final de 1,092 kg/m³. Mientras que en el caso de Siemens Gamesa, la altura de buje es de 140 m, dando una densidad final de 1,091 kg/m³ para la misma temperatura.

Con esto se calcula la curva de potencia corregida para cada modelo de aerogenerador a partir del producto de la curva de potencia dada y la relación entre la densidad de referencia y la final.

- **ENERCON E-115 (3 MW):**

vel calc (m/s)	Curva de potencia (KW)	Curva corregida (KW)
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	69	61.4971551
4	228	203.207991
5	460	793.224174
6	890	1262.91984
7	1417	1832.43697
8	2056	2311.93653
9	2594	2772.71956
10	3111	3001.77418
11	3368	3077.53154
12	3453	3119.42091
13	3500	3119.42091
14	3500	3119.42091
15	3500	3119.42091
16	3500	3119.42091
17	3500	3119.42091
18	3500	3119.42091
19	3500	3119.42091
20	3500	3088.2267
21	3465	3053.46744
22	3426	2997.31786
23	3363	2878.77987
24	3230	0
25	0	0
26	0	0

Tabla 5-Curva corregida Enercon E-115

- **ENERCON E-138 EP3 (3,5 MW):**

vel calc (m/s)	Curva de potencia (KW)	Curva corregida (KW)
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	47	41.8893665
4	150	133.6894676
5	441	393.0470346
6	732	652.4046017
7	1165	1038.321531
8	1700	1515.147299
9	2323	2070.404221
10	3023	2694.288403
11	3504	3122.985962
12	3880	3458.100894
13	3945	3516.032997
14	3969	3537.423311
15	4000	3565.052468
16	4000	3565.052468
17	4000	3565.052468
18	4000	3565.052468
19	4000	3565.052468
20	4000	3565.052468
21	4000	3565.052468
22	4000	3565.052468
23	3960	3529.401943
24	3952	3522.271838
25	3898	3474.14363
26	0	0

Tabla 6- Curva corregida Enercon E-138 EP3

- **ENERCON E-126 EP3 (4 MW):**

vel calc (m/s)	Curva de potencia (KW)	Curva corregida (KW)
	0	0
1	0	0
2	0	0
3	49	43.67189273
4	155	138.1457831
5	339	302.1381967
6	628	559.7132375
7	1035	922.4573261
8	1549	1380.566568
9	2090	1862.739915
10	2580	2299.458842
11	2900	2584.663039
12	3000	2673.789351
13	3000	2673.789351
14	3000	2673.789351
15	3000	2673.789351
16	3000	2673.789351
17	3000	2673.789351
18	3000	2673.789351
19	3000	2673.789351
20	3000	2673.789351
21	3000	2673.789351
22	3000	2673.789351
23	3000	2673.789351
24	3000	2673.789351
25	3000	2673.789351
26	0	0

Tabla 7- Curva corregida Enercon E-126EP3

- **SIEMENS GAMESA S.G. 5.0-132 (5 MW):**

vel calc (m/s)	Curva de potencia (KW)	Curva corregida (KW)
	0	0
2	0	0
3	61	54.36705014
4	188	167.557466
5	434	386.8081928
6	823	733.5095453
7	1355	1207.661524
8	2037	1815.502969
9	2843	2533.861042
10	3667	3268.26185
11	4337	3865.408139
12	4742	4226.369701
13	4921	4385.905799
14	4980	4438.490323
15	4996	4452.750533
16	4999	4455.424322
17	4996	4452.750533
18	4979	4437.59906
19	4931	4394.81843
20	4833	4307.474645
21	4678	4169.328861
22	4477	3990.184975
23	4247	3785.194458
24	4006	3570.400047
25	3763	3353.823109
26	0	0

Tabla 8- Curva corregida S.G. 5.0-132

Una vez obtenidas las curvas de potencia corregidas se procede a obtener la potencia del viento y el límite de Betz. Este último representa el 59 % del valor real del viento.

La fórmula de la potencia del viento es la siguiente:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * \pi * r^2$$

Fórmula 3- Potencia del viento

Donde:

P = potencia del viento medida en W.

ρ = densidad del aire seco = 1.225 medida en kg/m³ (a la presión atmosférica promedio a nivel del mar y a 15° C).

v = velocidad del viento medida en m/s.

π = (pi) = 3.1415926535...

r = radio m .

Velocidad (m/s)	P(kW)	Betz (kW)
0	0	0
1	8.19468358	4.91681015
2	65.5574686	39.3344812
3	221.256457	132.753874
4	524.459749	314.675849
5	1024.33545	614.601269
6	1770.05165	1062.03099
7	2810.77647	1686.46588
8	4195.67799	2517.4068
9	5973.92433	3584.3546
10	8194.68358	4916.81015
11	10907.1238	6544.27431
12	14160.4132	8496.24794
13	18003.7198	10802.2319
14	22486.2117	13491.727
15	27657.0571	16594.2343
16	33565.4239	20139.2544
17	40260.4804	24156.2883
18	47791.3946	28674.8368
19	56207.3347	33724.4008
20	65557.4686	39334.4812
21	75890.9646	45534.5788
22	87256.9908	52354.1945
23	99704.7151	59822.8291
24	113283.306	67969.9835
25	128041.931	76825.1586
26	144029.759	86417.8552

Tabla 9- Potencia del viento y límite de Betz (KW)

A continuación, se muestran la representación gráfica de las curvas de potencia corregidas para cada modelo , la potencia del viento y el límite de Betz.

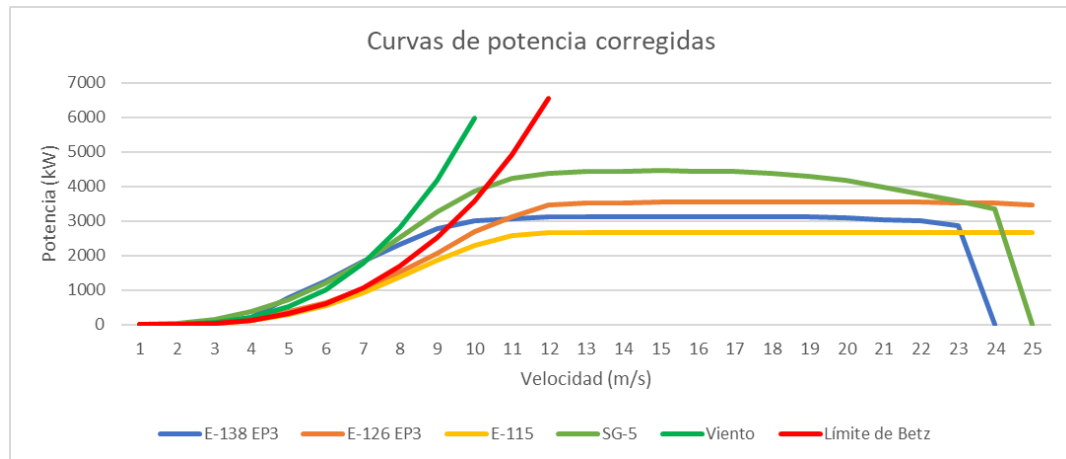


Figura 3- Curvas de potencia corregidas

3.2. PRODUCCIÓN DE CADA MODELO DE AEROGENERADOR

La producción se calcula multiplicando el número de horas anuales por la curva de potencia corregida. Dando así los siguientes valores para cada velocidad:

	Producción KW*h	Producción KW*h	Producción KW*h	Producción KW*h
vel calc (m/s)	E-138 EP3	E-126 EP3	E-115	SG 5.0-132
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	0	0	0	24542.00666
3	27760.63048	11954.47674	12463.17788	98592.33778
4	119569.4309	60349.1967	62360.83659	266968.8885
5	547470.7622	231272.4519	177780.8644	552886.2902
6	951931.8022	450279.3235	386305.2119	941304.7496
7	1428282.336	782639.7668	695306.574	1398888.368
8	1781402.271	1180972.749	1076074.581	1856132.117
9	2031103.417	1595295.866	1435285.562	2197608.431
10	2018419.743	1973650.154	1684425.206	2310015.264
11	1839170.557	2099923.628	1737950.491	2177881.678
12	1607462.225	2066603.464	1597889.277	1893644.129
13	1346830.817	1811839.565	1377824.764	1562009.6
14	1097797.912	1527306.147	1154426.415	1243732.694
15	871309.9339	1254626.185	940969.6387	962505.6437
16	673888.7283	995782.7816	746837.0862	725417.5487
17	508198.8432	770158.5466	577618.91	531865.9674
18	373876.4583	580798.6779	435599.0084	378200.3565
19	268444.7876	427287.3809	320465.5357	259847.355
20	186296.5208	306794.043	230095.5323	172185.582
21	126102.5661	215060.9187	161295.689	110203.0696
22	82781.53297	147230.083	110422.5622	68311.42702
23	51953.35749	97476.91661	73846.14895	41147.93992
24	0	63566.46093	48253.89241	24126.57672
25	0	40038.60954	30814.73284	0
26	0	0	0	0

Tabla 10- Producción para cada modelo de aerogenerador

3.3. FACTOR DE USO Y NÚMERO DE HORAS DE FUNCIONAMIENTO EQUIVALENTE

El factor de uso representa la relación entre la producción máxima y la real para la curva de potencia corregida. Se puede observar, como a mayor producción, menor es el factor de uso.

Por su parte, las horas de funcionamiento equivalentes representan el número de horas en el año en las que el aerogenerador produce a plena potencia.

	Potencia máxima KW	Producción anual (KW*h)	Producción máxima corregida (KW*h)
Enercon E-138 EP3	3,500	17,940,054.63	27,326,127.17
Enercon E-126 EP3	4,000	18,690,907.39	31,229,859.62
Enercon E-115	3,000	15,074,311.70	23,422,394.72
SG 5.0-132	5,000	19,798,018.02	39,037,324.53

Tabla 11. Producción real y máxima (KW*h)

	Factor de uso	Horas de funcionamiento equivalente
Enercon E-138 EP3	66%	5,125.73
Enercon E-126 EP3	60%	4,672.73
Enercon E-115	64%	5,024.77
SG 5.0-132	51%	3,959.60

Tabla 12- Facto de uso y horas de funcionamiento equivalente

4. DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

En este último apartado se lleva a cabo el cálculo de la energía para cada modelo a partir del cociente entre la producción de cada aerogenerador y el área que depende en cada caso del diámetro rotor de este.

vel calci (m/s)	P(kW*h/m2)	Betz (kW*h/m2))	E-138 EP3 (kW*h/m2)	E-126 EP3 (kW*h/m2)	E-115 (kW*h/m2)	S.G. 5.0-132 (kW*h/m2)
1	0.062632899	0.037579739	0	0	0	0
2	1.448534981	0.869120989	0	0	0	0
3	7.733040525	4.639824315	1.849307641	0.943698464	1.185419847	1.793380015
4	23.89304916	14.33582949	7.965260816	4.764026519	5.931374333	7.204526129
5	54.7377856	32.84267136	36.47042037	18.25688086	16.90940843	19.5084565
6	103.2989779	61.97938672	63.41407686	35.54550442	36.74294548	40.40155466
7	169.6255865	101.7753519	95.14673806	61.78237339	66.13323027	68.78480434
8	250.3042814	150.1825689	118.6702454	93.22718115	102.3495113	102.2222216
9	338.8175061	203.2905036	135.3043862	125.9342663	136.5154223	135.6348032
10	426.6243995	255.9746397	134.459448	155.8019359	160.2120334	160.5878075
11	504.672651	302.8035906	122.5185489	165.7700914	165.3030251	168.8018126
12	564.9665783	338.979947	107.0830209	163.139764	151.9812748	159.1462968
13	601.8404104	361.1042463	89.72074761	143.0284446	131.0501092	138.3759521
14	612.6955843	367.6173506	73.13112242	120.5670893	109.8018497	114.1421254
15	598.1149883	358.868993	58.04335457	99.04145778	89.49917076	90.88439218
16	561.4180653	336.8508392	44.89190456	78.60809818	71.03449161	70.33403624
17	507.8303813	304.6982288	33.85427446	60.79709327	54.93951274	53.00908571
18	443.4900477	266.0940286	24.90622796	45.84883404	41.43146435	38.8655178
19	374.5018967	224.701138	17.88277097	33.73049726	30.48068558	27.6365731
20	306.194778	183.7168668	12.41036581	24.21863151	21.88525377	18.98805831
21	242.6614214	145.5968528	8.400473436	16.97712606	15.34144123	12.58227113
22	186.5868045	111.9520827	5.514590943	11.6224914	10.5027063	8.052967527
23	139.3159665	83.5895799	3.460935119	7.694926216	7.023785702	4.991782039
24	101.082777	60.6496662	0	5.018000606	4.589609674	3.006840237
25	71.31613527	42.78968116	0	3.160688262	2.930905444	1.763022932
26	48.95290042	29.37174025	0	0	0	0
26	32.70899177	19.62539506	0	0	0	0
27	21.28377115	12.77026269	0	0	0	0
28	13.49264454	8.095586722	0	0	0	0
29	8.33622761	5.001736566	0	0	0	0
30	5.021202838	3.012721703	0	0	0	0
31	2.949444031	1.769666418	0	0	0	0
32	1.689987897	1.013992738	0	0	0	0
33	0.944810431	0.566886259	0	0	0	0
34	0.515490856	0.309294514	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0

Tabla 13- Energía para cada modelo de aerogenerador

Gráficamente, la distribución de la energía es la siguiente:

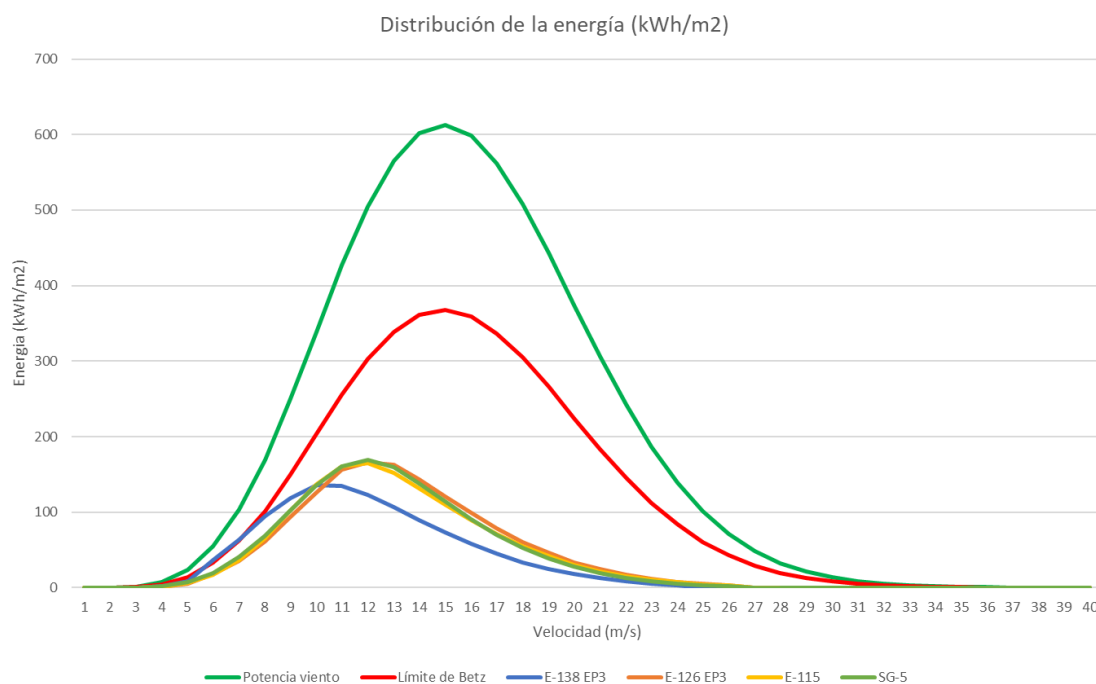


Figura 4- Distribución de la energía para cada modelo de aerogenerador

Donde la energía aprovechada se obtiene de la relación entre la energía producida por cada modelo de aerogenerador y la total del viento.

	Energía aprovechada
E-115 (3MW)	19%
E-138 EP3 (3,5 MW)	16%
E-126 EP3 (4 MW)	20%
SG 5.0-132 (5 MW)	19%

Tabla 14- Energía aprovechada por cada aerogenerador