

## **PROYECTO FIN DE CARRERA**



# **ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DE LA GENERACIÓN EÓLICA EN ESPAÑA**

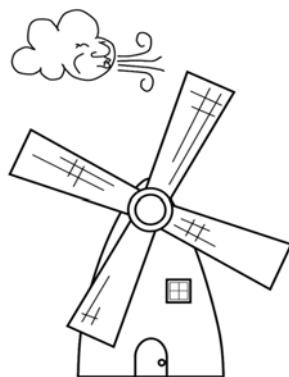
---

**Autor: Joaquín Capilla Mozas**

**Tutor: Joaquín Mur Amada**

**Ponente: Jesús Sallán Arasanz**

---



**Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica**

**Diciembre 2011**

Me gustaría agradecer muy sinceramente el apoyo y la paciencia de Joaquín Mur por su generosa labor como tutor de mi proyecto. Dedico este proyecto a mis padres que siempre creyeron en mí, esto es para vosotros.

## **INDICE**

<b>CAPÍTULO 1. OBJETIVOS Y ALCANCE.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 2. GENERALIDADES SOBRE LA VARIACIÓN DEL VIENTO .....</b>	<b>9</b>
2.1. RELACIÓN ENTRE LA VARIABILIDAD Y SU PREDICCIÓN .....	9
2.2. INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD DEL VIENTO EN LA RED .....	9
2.3. LA DIVERSIDAD GEOGRÁFICA DE LA ENERGÍA EÓLICA.....	10
2.4. CAPACIDAD DE INSTALACIONES DE ENERGÍA EÓLICA .....	11
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	12
3.2. HERRAMIENTAS.....	12
3.2.1. <i>Wolfram Mathematica</i> .....	12
3.2.2. <i>Windfreedom</i> .....	12
3.3. EMPLAZAMIENTOS.....	14
3.4. GENERACIÓN EÓLICA EN ESPAÑA EN LOS AÑOS 2007 Y 2008 .....	15
<b>CAPÍTULO 4. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL AEROPUERTO DE REUS .....</b>	<b>17</b>
4.1. INTRODUCCIÓN.....	17
4.2. HISTÓRICO DE VIENTO .....	17
4.3. HISTOGRAMA .....	19
4.4. ROSA DE LOS VIENTOS .....	21
4.5. MATRIZ DE TRANSICIÓN .....	22
4.6. ESPECTRO DE VIENTO .....	26
4.7. VARIACIONES DE VIENTO .....	27
4.8. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LAS VARIACIONES DE VIENTO .....	38
<b>CAPÍTULO 5. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL AEROPUERTO DE JEREZ.....</b>	<b>42</b>
5.1. INTRODUCCIÓN .....	42
5.2. HISTÓRICO DE VIENTO .....	42
5.3. HISTOGRAMA .....	43
5.4. ROSA DE LOS VIENTOS .....	44
5.5. MATRIZ DE TRANSICIÓN .....	45
5.6. ESPECTRO DE VIENTO .....	47
5.7. VARIACIONES DE VIENTO .....	49
5.8. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LAS VARIACIONES DE VIENTO .....	57

<b>CAPÍTULO 6. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL AEROPUERTO DE LOGROÑO .....</b>	<b>60</b>
6.1. INTRODUCCIÓN.....	60
6.2. HISTÓRICO DE VIENTO .....	60
6.3. HISTOGRAMA .....	61
6.4. ROSA DE LOS VIENTOS .....	62
6.5. MATRIZ DE TRANSICIÓN .....	63
6.6. ESPECTRO DE VIENTO .....	65
6.7. VARIACIONES DE VIENTO .....	66
6.8. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LAS VARIACIONES DE VIENTO .....	68
<b>CAPÍTULO 7. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL AEROPUERTO DE VALLADOLID.....</b>	<b>71</b>
7.1. INTRODUCCIÓN.....	71
7.2. HISTÓRICO DE VIENTO .....	71
7.3. HISTOGRAMA .....	72
7.4. ROSA DE LOS VIENTOS .....	73
7.5. MATRIZ DE TRANSICIÓN .....	74
7.6. ESPECTRO DE VIENTO .....	75
7.7. VARIACIONES DE VIENTO .....	76
7.8. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LAS VARIACIONES DE VIENTO .....	77
<b>CAPÍTULO 8. COMPARACIÓN ESPECTRAL DE DOS ESTACIONES.....</b>	<b>80</b>
8.1. INTRODUCCIÓN.....	80
8.2. ANÁLISIS ESPECTRAL .....	80
<b>CAPÍTULO 9. GENERACIÓN EÓLICA 2007-2008.....</b>	<b>85</b>
9.1. INTRODUCCIÓN.....	85
9.2. AÑO 2007 .....	85
9.2.1. <i>Histórico de producción</i> .....	85
9.2.2. <i>Histograma</i> .....	86
9.2.3. <i>Matriz de transición</i> .....	86
9.2.4. <i>Espectrograma</i> .....	88
9.2.5. <i>Variaciones de potencia</i> .....	89
9.3. AÑO 2008 .....	93
9.3.1. <i>Histórico de producción</i> .....	93
9.3.2. <i>Histograma</i> .....	94
9.3.3. <i>Matriz de transición</i> .....	95

9.3.4. <i>Espectrograma</i> .....	96
9.3.5. <i>Variaciones de potencia</i> .....	97
<b>CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES .....</b>	<b>101</b>
10.1. AEROPUERTOS DE REUS Y JEREZ .....	101
10.2. AEROPUERTOS DE LOGROÑO Y VALLADOLID .....	101
10.3. GENERACIÓN EÓLICA EN ESPAÑA AÑOS 2007-2008 .....	102
<b>CAPÍTULO 11. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO I. MANUAL DE USUARIO DE WINDFREEDOM .....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1: Energía eólica instalada en 2010.....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 2: Mapa con los aeropuertos de estudio .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 3: Aeropuerto de Reus .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 4: Histórico de viento (km/h) en Reus .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 5: Histórico de viento (km/h) en Reus (zoom).....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 6: Cuantiles 5%,25%,50%,75% y 95% .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 7: Histograma del viento (km/h) en Reus.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 8: Rosa de los vientos en Reus.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 9: Matriz de transición (km/h) en Reus para ½ hora.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 10: Probabilidad del viento en Reus para ½ hora, .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 11: Matrices de transición (km/h).....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 12: Probabilidad del viento en Reus para 0.5, 2.5, 5 y 7.5 horas,.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 13: Espectrograma y periodograma en Reus.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 14: Variaciones de viento (km/h) en Reus .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 15: Variaciones de viento entre 21/03/10 y 21/04/10.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 16: Variaciones de viento entre 21/04/10 y 21/05/10.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 17: Variaciones de viento entre 21/05/10 y 21/06/10.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 18: Variaciones de viento entre 21/06/10 y 21/07/10.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 19: Variaciones de viento entre 21/07/10 y 21/08/10.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 20: Variaciones de viento entre 21/08/10 y 21/09/10.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 21: Variaciones de viento entre 21/09/10 y 21/10/10.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 22: Variaciones de viento entre 21/10/10 y 21/11/10.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 23: Variaciones de viento entre 21/11/10 y 21/12/11.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 24: Variaciones de viento entre 21/12/10 y 21/01/11.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 25: Variaciones de viento entre 21/01/11 y 21/02/11.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 26: Variaciones de viento entre 21/02/11 y 21/03/11.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 27: Rangos cuantiles de las variaciones de viento .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 28: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos de gris.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 29: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos en 3D .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 30: Aeropuerto de Jerez .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 31: Histórico del viento (km/h) en Jerez.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 32: Cuantiles 5%,25%,50%,75% y 95% .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 33: Histograma del viento (km/h) en Jerez .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 34: Rosa de los vientos en Jerez .....</b>	<b>45</b>

<b>Figura 35: Matriz de transición (km/h) en Jerez para ½ hora .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 36: Matrices de transición (km/h).....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 37: Espectrograma y periodograma en Jerez .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 38: Variaciones de viento (km/h) en Jerez .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 39: Variaciones de viento entre 21/03/10 y 21/04/10.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 40: Variaciones de viento entre 21/04/10 y 21/05/10.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 41: Variaciones de viento entre 21/05/10 y 21/06/10.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 42: Variaciones de viento entre 21/06/10 y 21/07/10.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 43: Variaciones de viento entre 21/07/10 y 21/08/10.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 44: Variaciones de viento entre 21/08/10 y 21/09/10.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 45: Variaciones de viento entre 21/09/10 y 21/10/10.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 46: Variaciones de viento entre 21/10/10 y 21/11/10.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 47: Variaciones de viento entre 21/11/10 y 21/12/10.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 48: Variaciones de viento entre 21/12/10 y 21/01/11.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 49: Variaciones de viento entre 21/01/11 y 21/02/11.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 50: Variaciones de viento entre 21/02/11 y 21/03/11.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 51: Rangos cuantiles de las variaciones del viento .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 52: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos de gris.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 53: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos en 3D .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 54: Aeropuerto de Logroño.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 55: Histórico de viento (km/h) en Logroño .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 56: Cuantiles 5%,25%,50%,75% y 95% .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 57: Histograma del viento (km/h) en Logroño.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 58: Rosa de los vientos en Logroño.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 59: Matriz de transición (km/h) en Logroño para ½ hora.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 60: Matrices de transición (km/h).....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 61: Espectrograma y periodograma de Logroño.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 62: Variaciones de viento (km/h) en Logroño.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 63: Variaciones de viento entre 21/06/10 y 21/07/10.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 64: Variaciones de viento entre 21/01/11 y 21/02/11.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 65: Rangos cuantiles de las variaciones del viento .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 66: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos de gris.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 67: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos en 3D .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 68: Aeropuerto de Valladolid.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 69: Histórico de viento (km/h) en Valladolid .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 70: Cuantiles 5%,25%,50%,75% y 95% .....</b>	<b>72</b>

<b>Figura 71: Histograma del viento (km/h) en Valladolid .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 72: Rosa de los vientos en Valladolid.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 73: Matriz de transición (km/h) en Valladolid para ½ hora.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 74: Espectrograma y periodograma de Valladolid .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 75: Variaciones de viento (km/h) en Valladolid.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 76: Variaciones de viento entre 21/06/10 y 21/07/10.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 77: Variaciones de viento entre 21/01/11 y 21/02/11.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 78: Rangos cuantiles de las variaciones del viento .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 79: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos de gris.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 80: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos en 3D .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 81: Módulo de coherencia entre Logroño y Valladolid.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 82: Tiempo de retraso entre Logroño y Valladolid .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 83: Cuantiles 5%, 25%, 50%, 75% y 95% .....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 84: Comparación de modelos de coherencia .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 85: Histórico de generación eólica española 2007 (kW).....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 86: Cuantiles 5%,25%,50%,75% y 95% .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 87: Histograma de la generación eólica española del año 2007 .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 88: Matriz de transición año 2007 para 1 hora .....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 89: Matrices de transición año 2007 .....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 90: Espectrograma de la generación eólica española del año 2007 .....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 91: Variaciones de la generación eólica del año 2007 (kW).....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 92: Variaciones de la generación entre 01/01/07 y 05/04/07 (kW).....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 93: Variaciones de la generación entre 05/04/07 y 04/07/07 (kW).....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 94: Variaciones de la generación entre 04/07/07 y 02/11/07 (kW).....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 95: Variaciones de la generación entre 02/11/07 y 01/01/08 (kW).....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 96: Histórico de generación eólica española 2008 (kW).....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 97: Cuantiles 5%,25%,50%,75% y 95% .....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 98: Histograma de la generación eólica española del año 2008.....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 99: Matriz de transición año 2008 para 1 hora .....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 100: Matrices de transición año 2008 .....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 101: Espectrograma de la generación eólica española del año 2008 .....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 102: Variaciones de la generación eólica del año 2008 (kW).....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 103: Variaciones de la generación entre 01/01/08 y 05/04/08 (kW).....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 104: Variaciones de la generación entre 05/04/08 y 04/07/08 (kW).....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 105: Variaciones de la generación entre 04/07/08 y 02/11/08 (kW).....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 106: Variaciones de la generación entre 02/11/08 y 01/01/09 (kW).....</b>	<b>100</b>

<b>Figura 107: Station map .....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 108: Disponibilidad de las estaciones meteorológicas .....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 109: Selección de la estación nº 1 y de la variable a estudiar .....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 110: Selección de la gráfica histórica de la serie de datos.....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 111: Histograma de la serie de datos .....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 112: Station 1-Wind rose .....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 113: Station 1-Transition matrix .....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 114: Station 1-Gust detector.....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 115: Station 1-Spectrogram.....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 116: Station 2.....</b>	<b>112</b>

## Capítulo 1. Objetivos y alcance

El propósito de mi trabajo es realizar un estudio sobre la variabilidad de la generación eólica. Los datos de partida son datos meteorológicos facilitados por organizaciones medioambientales de aeropuertos y datos publicados en la web de Red Eléctrica Española (REE). El estudio lo realizo con el programa Windfreedom, este programa permite analizar variables meteorológicas de forma estadística en el dominio del tiempo y en de la frecuencia. Una vez seleccionado los emplazamientos, estudiare los datos meteorológicos que presentan a lo largo de un periodo de estudio de un año. Asimismo realizaré un análisis de coherencia entre dos estaciones para estimar las diferencias en amplitud y tiempo de las oscilaciones.

También analizare la generación eólica española (años 2007 y 2008) con los métodos analíticos de Windfreedom e intentaré ver qué factores influyen en dicha generación. Adicionalmente, he realizado un resumen del manual de usuario de Windfreedom que permite al lector poder hacer sus propios estudios o consultas. Esta guía rápida complementa los casos planteados en el estudio y muestra las posibilidades prácticas del programa.

Los análisis realizados con las series de datos de viento y de generación eólica son los siguientes:

- El estudio en el dominio de la frecuencia utilizando la transformada de Fourier de una serie de datos (espectro del viento).
- El estudio en el dominio del tiempo con cadenas de Markov y la matriz de transición obtenida experimentalmente de los datos.
- El estudio en el dominio del tiempo a distintas escalas temporales utilizando la transformada wavelet continua de tipo Morlet.
- El estudio en el dominio conjunto tiempo-frecuencia utilizando espectrogramas.
- La comparación de dos estaciones en el dominio conjunto tiempo-frecuencia utilizando la coherencia temporal y el intervalo de tiempo entre la observación de una variación en dos estaciones.

## Capítulo 2. Generalidades sobre la variación del viento

### 2.1. Relación entre la variabilidad y su predicción

El viento varía en el espacio y en el tiempo. Las previsiones intentan predecir esta variación de la dinámica del clima y de las condiciones meteorológicas. La disponibilidad de los datos meteorológicos aumenta la precisión del pronóstico de la generación de viento de días futuros. Si la incertidumbre en la generación de la energía eólica se disminuye, también se mejora la previsión del recurso eólico. Además, los avances en la predicción de viento y los controles de la turbina sugieren que la energía eólica puede usarse en los mercados de servicios auxiliares.

La forma más simple de previsión de un proceso estocástico es el principio de persistencia: el valor esperado en el siguiente período  $[t, t + \Delta t]$  es el valor medio del período anterior  $[t - \Delta t, t]$ . El error cuadrático esperable de la predicción de la persistencia es la varianza del proceso durante el intervalo  $[t - \Delta t, t]$ , siempre que no haya cambios importantes en las condiciones meteorológicas en el intervalo  $[t - \Delta t, t + \Delta t]$  (esto equivale matemáticamente a que el viento sea un proceso ergódico). Para mejorar estos niveles de incertidumbre y determinar mejor los parámetros de riesgo a la variabilidad se siguen desarrollando continuamente modelos complejos de predicción.

Por lo general, la predicción numérica del tiempo supera significativamente a la persistencia en horizontes de más de 6 horas.

### 2.2. Influencia de la variabilidad del viento en la red

La energía eólica es la energía renovable más viable económicamente, aparte de la energía hidroeléctrica. Con el fin de tener un crecimiento a largo plazo de la generación eólica, la variabilidad y la intermitencia de la energía eólica deben ser gestionadas. En Dinamarca, en el norte de Alemania, y en partes de España, el viento suministra del 20% al 40% del consumo eléctrico sin perder fiabilidad.

Si comparamos parques eólicos suficientemente distantes, el viento en esas zonas no variará de la misma forma, puede que cuando el viento se reduzca en una zona, en la otra no lo haga, o incluso aumente. Conforme más parques eólicos tenga el sistema, sobre todo si son distantes y en zonas con vientos “desacoplados” entre ellos, se irá reduciendo la variabilidad relativa de la energía vertida a la red, pues las variaciones en unas instalaciones compensarán parcialmente los cambios que se produzcan en otras.

En general, la previsión de la energía eólica está dirigida a optimizar el suministro de energía horaria. Sin embargo, el sistema eléctrico tiene que hacer frente a

la variación instantánea de la carga y a la generación. Estas variaciones suelen ser impredecibles, y suelen considerarse desviaciones de la tendencia esperada de la energía. La variabilidad de la energía eólica tiene varios efectos negativos sobre el funcionamiento del sistema y la fiabilidad de la red eléctrica, así como en la economía de los proyectos eólicos. En algunas aplicaciones, la estimación de la variabilidad de la energía eólica puede ser tan importante como su predicción.

La mayoría de los modelos de predicción solamente predicen el viento promedio por hora o la energía eólica horaria y están destinados a las exigencias de los mercados de electricidad. Sólo unos pocos modelos caracterizan la incertidumbre de las previsiones y cuantifican las fluctuaciones instantáneas dentro del período de estudio. Las principales aplicaciones que se benefician de la evaluación de la variabilidad son las siguientes:

- El control de aerogeneradores y parques eólicos.
- El control de la generación automática y el control automático de tensión.
- La mejora de la calidad de la energía, más relacionado con las variaciones de tensión y por lo tanto, con las variaciones de potencia instantánea.
- El dimensionado óptimo de los dispositivos de almacenamiento o de funcionamiento de las reservas en sistemas aislados o débiles, donde la electricidad debe ser suministrada, incluso en el peor de los casos.
- En la evaluación del riesgo y en la operación segura de la red. El sistema debe hacer frente a los resultados inesperados cuando la predicción tenga gran incertidumbre.

### *2.3. La diversidad geográfica de la energía eólica*

Tanto la energía generada como el error de predicción disminuye a medida que aumentan los productores de energía eólica. Debido a la dispersión geográfica de los generadores de viento, algunas variaciones de potencia y errores de predicción pueden ser parcialmente anulados por otros errores en otros emplazamientos. Por esto, los errores de predicción pueden ser muy bajos cuando se consideran amplias áreas geográficas. Muchos parámetros de calidad de la red se deben cumplir a nivel local y el fortalecimiento de la red de electricidad es costosa y, a veces, no es factible.

La velocidad del viento está siempre fluctuando, por lo que el contenido energético del viento varía continuamente. De qué magnitud sea exactamente esa fluctuación depende tanto de las condiciones climáticas como de la orografía. La producción de energía de una turbina eólica variará conforme varíe el viento.

Conociendo el rotor de la turbina eólica, la rosa de los vientos, la distribución de velocidades y la rugosidad en las diferentes direcciones; los fabricantes pueden calcular la pérdida de energía debida al apantallamiento entre aerogeneradores. La pérdida de energía típica es de alrededor del 5 a 10%.

Las fluctuaciones locales son más difíciles de predecir en el tiempo y en el lugar. En las islas, el balance de potencias no puede basarse en la diversidad geográfica y otras medidas son necesarias para contrarrestar la variabilidad de la energía eólica. De hecho, un buen parámetro de la exactitud de la predicción es el error relativo de la varianza de la variable aleatoria que se predijo. Sin embargo la exactitud de las predicciones de energía eólica está normalmente referida al total de la potencia eólica instalada. Estas cifras deben considerarse con precaución:

- Un error de predicción del 15% de la potencia horaria del día siguiente, se considera un pronóstico preciso.
- Un error de predicción del 15% de la potencia horaria del día siguiente en un gran sistema, es un mal pronóstico.

La variación de la potencia del viento disminuye cuando aumentamos el período de estudio de la medida o con la diversidad espacial de los generadores eólicos. Por lo tanto, aumentando el tiempo u horizonte espacial de las predicciones, disminuye el error de predicción absoluta. La densidad espectral de potencia identifica que frecuencias de variación contribuyen a la varianza. La coherencia indica el grado de cancelación parcial de la oscilación entre las turbinas a diferentes frecuencias.

## 2.4. Capacidad de instalaciones de energía eólica

Durante el año 2010, 9.918 MW de energía eólica se instalaron en Europa, en los países de la Unión Europea fueron 9.295 MW del total. Esto representa una desaceleración anual de la UE en instalaciones de energía eólica del 10% respecto a 2009. De los 9.295 MW instalados en la UE, 8.412 MW fueron instalados en tierra firme y 883 MW en el mar (datos publicados por la EWEA). En términos de instalaciones anuales, España tuvo el mayor mercado en 2010, se instalaron 1.516 MW, frente a los 1.493 MW de Alemania.

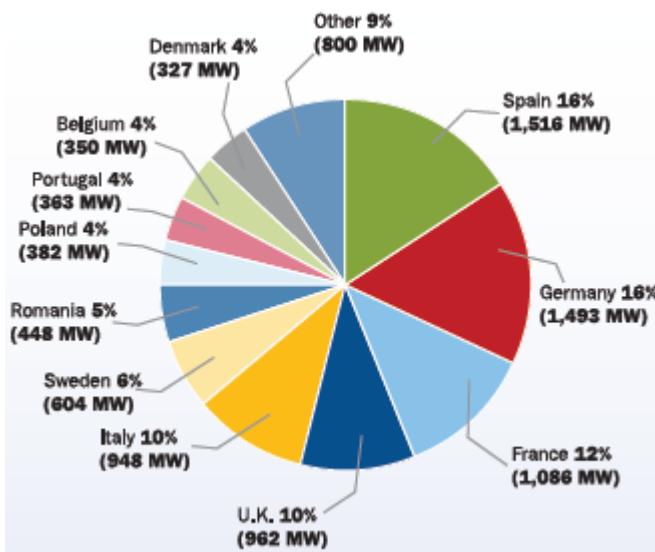


Figura 1: Energía eólica instalada en 2010

## Capítulo 3. Metodología

### 3.1. Introducción

El estudio de la variabilidad eólica se basa en el análisis de la información meteorológica mediante una serie de herramientas, que descargan datos y generan gráficas que nos facilitan la comprensión de dicha información.

Como fuente principal uso el programa Windfreedom, que se puede obtener de forma gratuita de la página [www.windygrid.org/software](http://www.windygrid.org/software). Dicho programa ha sido realizado por Joaquín Mur para la elaboración de su tesis y va a ser la herramienta fundamental para la confección de este proyecto. Con él seleccionaré mis estaciones de estudio y elaboraré mis conclusiones. Se ha incluido en el anexo I una guía rápida de uso del programa, que ilustra la realización de la comparación entre Valladolid y Logroño.

El alcance de este documento, es el análisis y modelado de la variabilidad del viento en distintas estaciones meteorológicas en el dominio temporal y frecuencial. También se analizarán los datos de generación eólica publicados por REE en su página web, para hacernos una idea de la producción de energía anual y así poder predecir la generación con vistas a años futuros.

### 3.2. Herramientas

#### 3.2.1. Wolfram Mathematica

Mathematica, dispone de herramientas matriciales, estadísticas, analíticas y de visualización de datos en 2D y 3D, etc. Estas utilidades se emplean en el interior de los paquetes “ColorHueGray3.m” y “WaveletDetector.m”. Las funciones de los paquetes se utilizan desde el programa (“notebook” en terminología Mathematica) Windfreedom. Se han realizado pequeñas modificaciones del programa Windfreedom para poder cargar datos de ficheros de texto, realizar estadísticas de los picos y rampas (variaciones) de la velocidad del viento, etc.

#### 3.2.2. Windfreedom

Como he indicado en la introducción, este programa va a ser la herramienta sobre la cual se va a desarrollar el estudio de la evolución del viento en emplazamientos. Los datos de velocidad de viento de mayor calidad suelen corresponder a aeropuertos. En estos emplazamientos los sistemas de medida están bien mantenidos y su ubicación suele estar razonablemente despejada de obstáculos que falseen la velocidad en algunas direcciones de viento. Para el mantenimiento de estos sistemas hay empresas que se dedican a su control, como referencia en este sector encontramos a STE Global, empresa especializada en la medición del viento. El programa descarga ficheros de

viento medidos en estaciones meteorológicas, que colaboran con el programa ciudadano de observación del tiempo (Citizen Weather Observer Program), la red oceánica y atmosférica norteamericana (National Oceanic and Atmospheric Administration) y el centro de datos climáticos norteamericano (USA Nacional Climatic Data Center). Es necesario disponer de conexión a Internet y se recomienda que esta conexión sea rápida para acelerar el proceso. Estos datos son tratados dentro de las bibliotecas (“paquetes” en la terminología de Mathematica) y los resultados se almacenan en variables que el usuario puede visualizar en gráficas. Los datos no siempre son fiables pues las estaciones meteorológicas pueden presentar fallos técnicos, y estar afectadas por obstáculos cercanos, altura del anemómetro diferente al estándar de 10 m, desfase entre veletas, errores de conexión entre el “data logger” y fuente de alimentación, fallo de la red gsm, imprecisiones en el montaje, etc.

Windfreedom nos permite hacer un análisis detallado de emplazamientos en todo el mundo. En mi caso me limito a España porque es el país donde vivo y porque España es una referencia mundial en energía eólica (figura 1). Las variables que están disponibles en la gran parte de las estaciones meteorológicas son:

- *WindSpeed (Velocidad del viento; km/h).*
- *WindDirection (Dirección del viento; grados sexagesimales).*
- *WindGusts (Variación del viento; km/h).*
- *Temperature (Temperatura; grados Celsius).*
- *Pressure (Presión milibárica; corregida a la altura del mar).*
- *StationPressure (Presión milibárica; sin corregir a la altura del mar).*
- *Humidity (Humedad relativa; de 0 a 1).*
- *PrecipitationRate (Tasa de precipitación; cm/h).*
- *DewPoint (Temperatura de rocío; grados Celsius).*
- *CloudCoverFraction (Fracción de cielo cubierto por nubes; de 0 a 1).*
- *CloudHeight (Altura de las nubes).*
- *Visibility (Visibilidad; km).*
- *WindChill (Sensación térmica).*

Cuando hemos seleccionado una variable, el programa nos permite elegir el análisis a efectuar, entre los que se encuentran:

- *Time series plot (Evolución de la variable en el tiempo).*
- *Histogram (Histograma; representado por la distribución normal y Weibull).*
- *Wind rose (Rosa de los vientos).*
- *Transition Matrix (Matriz de transición; probabilidad de obtener una velocidad de viento en función de un viento medido previamente).*

- *Spectrogram (Espectrograma; análisis frecuencial de la variable).*
- *Gust detector (Detector de variaciones de viento).*

Los estudios anteriores analizan los datos de una sola estación, sin compararlos con datos de estaciones cercanas. No obstante, Windfreedom permite hacer un análisis de coherencia entre dos estaciones, mediante el estudio del:

- Módulo de la coherencia.
- Intervalo de tiempo entre la observación de las fluctuaciones en dos estaciones.
- Análisis estadístico de los intervalos de tiempo entre las fluctuaciones en las dos estaciones mediante cuantiles.
- Comparación de modelos de coherencia.

### *3.2.3. Estudio estadístico de las variaciones de viento*

Con el programa Windfreedom tenemos la opción de ver las variaciones de viento, pero si usamos una escala temporal elevada no se distingue con claridad dichas variaciones. Para poder tener una mejor perspectiva se ha añadido un pequeño programa que nos permite analizar estadísticamente las variaciones de subida y bajada mediante 3 gráficas:

- Rangos cuantiles de las variaciones del viento.
- Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos de gris.
- Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos en 3D.

## **3.3. Emplazamientos**

A la hora de seleccionar un emplazamiento debemos calcular la posible producción prevista a largo plazo, incluyendo: medidas, tratamiento de datos, simulación, análisis, optimización, análisis de incertidumbres y evaluación de clase para aprovechar al máximo el potencial eólico de una zona.

El programa Windfreedom nos permite seleccionar estaciones meteorológicas ubicadas en cualquier continente. Los datos se descargan del servidor meteorológico de Wolfram, que se nutre del programa ciudadano de observación del tiempo (Citizen Weather Observer Program), la red oceánica y atmosférica norteamericana (National Oceanic and Atmospheric Administration) y el centro de datos climáticos norteamericano (USA National Climatic Data Center).

Sin embargo, aunque para las previsiones meteorológicas no es tan importante realizar medidas precisas de la velocidad del viento y, por tanto, de la energía del viento, sí que lo es para la elaboración de planes eólicos.

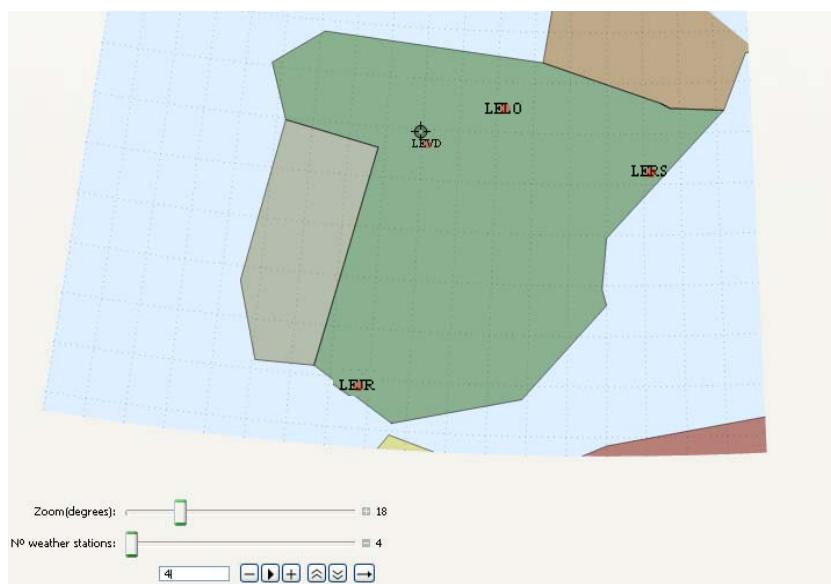
Las velocidades del viento están fuertemente influenciadas por la rugosidad de la superficie del área circundante, por los obstáculos cercanos (como árboles, casas u otras construcciones) y por los alrededores del terreno local.

A menos de que se hagan cálculos que compensen las condiciones locales en las que las medidas fueron hechas, es difícil estimar las condiciones eólicas de un emplazamiento cercano.

En mi proyecto he optado por elegir instalaciones de nuestro país, ya que somos una referencia mundial en energía eólica. Dado que en España se dispone de numerosas estaciones, he escogido cuatro de ellas que están situadas en las inmediaciones de aeropuertos y que tienen a su vez una base de datos actualizada cada media hora. La elaboración del estudio se ha llevado a cabo mediante mediciones sobre una serie de aeropuertos en el periodo de un año (21/3/2010-21/3/2011). He seleccionado cuatro aeropuertos de los cuales dos están ubicados en zonas costeras y los otros dos están en zonas del interior de la península. Así pues, en los siguientes capítulos estudiaré los aeropuertos de Reus, Jerez, Logroño y Valladolid.

### *3.4. Generación eólica en España en los años 2007 y 2008*

En esta parte trataré los datos de la generación eólica de España durante los años 2007 y 2008. Se analizará la información de igual modo que en los casos de estudio de aeropuertos, realizando análisis estadísticos y representándolos de forma gráfica. El propósito de este anexo es dar a conocer al lector la potencia generada respecto al tiempo, viendo sus variaciones a lo largo del mismo.



**Figura 2: Mapa con los aeropuertos de estudio**

De forma escueta resumiré los pasos que he seguido para realizar el estudio de un emplazamiento:

- Primero selecciono la estación cuyos datos se van a analizar.
- Despues seleccionamos la velocidad del viento como variable a estudiar, puesto que es la más relevante de las 13 disponibles para la producción de energía eólica.
- Por ultimo, generaremos las gráficas necesarias para analizar los datos, de entre las indicadas en el punto 3.2.2 y en el anexo I.

A la hora de analizar la coherencia entre estaciones, seleccionaré dos de ellas (Logroño y Valladolid) y seguiré los pasos indicados en el capítulo ocho. No realizo un análisis de coherencia entre Reus y Jerez ya que no se ha considerado necesario un estudio entre emplazamientos tan lejanos.

## Capítulo 4. Estación meteorológica del aeropuerto de Reus

### 4.1. Introducción

Los datos se han medido en la estación meteorológica del aeropuerto de Reus (LERS), que está situada aproximadamente a 3 km del núcleo de la ciudad. Su coordenada de latitud es  $41.15^{\circ}$ , su longitud es  $1.16^{\circ}$  y su altura sobre el nivel del mar es 76 m.

En Reus diferenciamos varias direcciones: un viento habitualmente fuerte en dirección Noroeste debido al valle del Ebro (Cierzo). Otro viento frío en dirección Norte debido a los Pirineos (Tramontana) y el último un viento del Este provocado por la brisa marina (Garbí) al que se le puede añadir un viento cálido del Sureste (Bochorno). La figura 3 ha sido tomada mediante un servidor de aplicaciones de mapas (google map), para tener una vista aérea de las condiciones de medida del emplazamiento.



**Figura 3: Aeropuerto de Reus**

### 4.2. Histórico de viento

En la figura 4 podemos ver la evolución del viento en el periodo comprendido entre Marzo de 2010 y Marzo de 2011. La velocidad no suele superar los 36 km/h, siendo su media 9.5 km/h. Los datos de las velocidades y direcciones del viento obtenidos por el anemómetro son recogidos en un chip electrónico en una pequeña computadora, el registrador de datos (“data logger”), que puede funcionar con batería durante un largo período de tiempo.

La figura 4 permite ver que la velocidad del viento varía considerablemente en un año entre 0 y 35 km/h. Como el periodo dibujado es muy grande, no se pueden observar bien eventos singulares, como el que se produce entre el 24 y 27 de diciembre de 2010. Este detalle se estudiará en la figura 5.

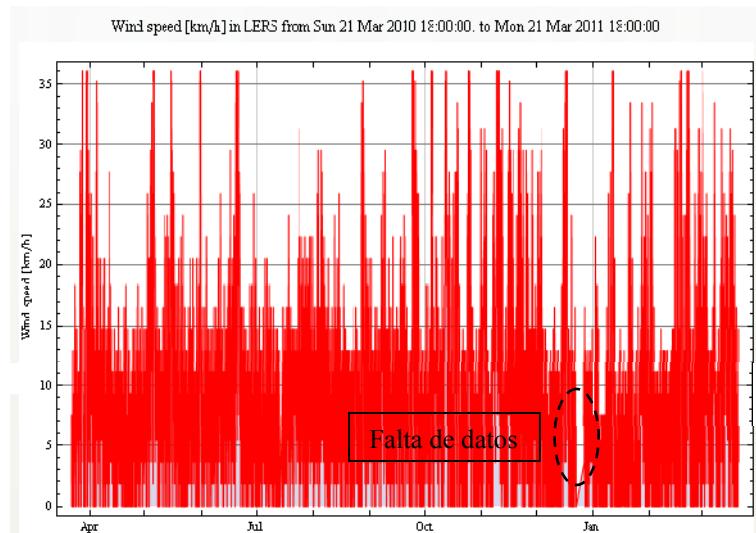


Figura 4: Histórico de viento (km/h) en Reus

En la figura 5 puede intuirse que el valor de la señal está cuantizado a unos valores determinados, pues la altura de la gráfica parece saltar entre unos niveles determinados (esto se puede comprobar dibujando un histórico más corto o realizando un histograma de la serie de datos).

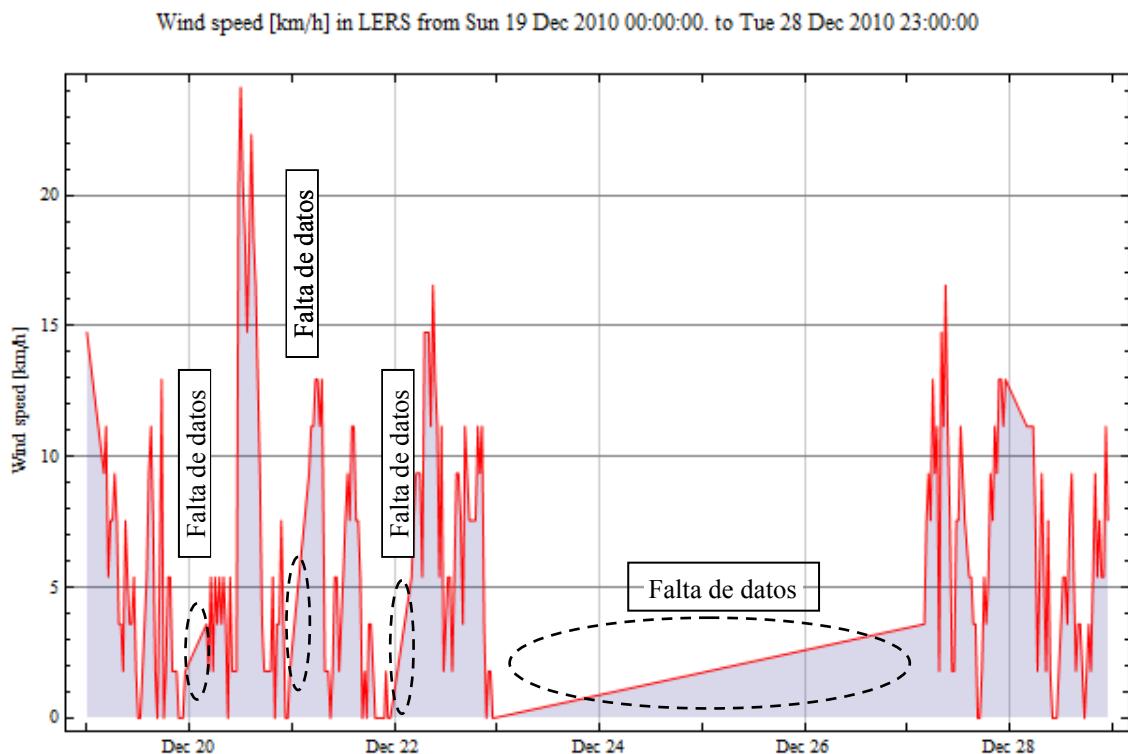
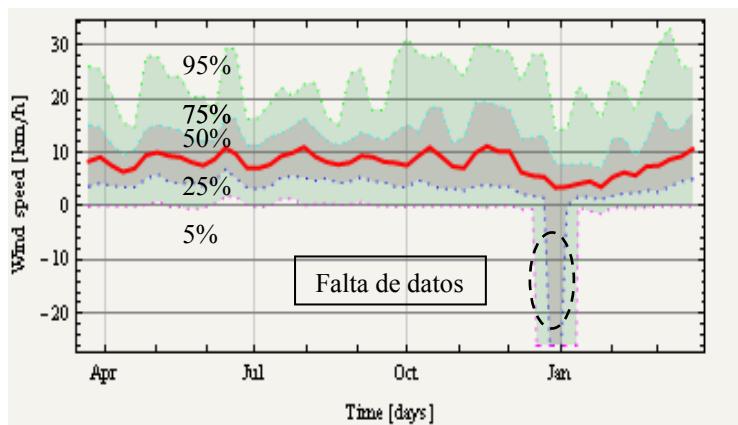


Figura 5: Histórico de viento (km/h) en Reus (zoom)

También se puede observar que faltan datos en el periodo entre el 24 y 27 de diciembre de 2010 (cuando faltan datos, el programa interpola los valores faltantes y estos valores interpolados no están cuantizados). También se observa que hay periodos más cortos en los cuales falta algún dato: la velocidad promedio de cada media hora debería estar registrada en la serie de datos, pero hay datos perdidos a primera hora de los días 20, 21 y 22, posiblemente por el mal funcionamiento del sistema con las bajas temperaturas de la noche.

La imagen de la figura 6 nos detalla la velocidad del viento durante el periodo de estudio. Podemos diferenciar los cambios de velocidad así, como el fallo en la representación debido a la falta de datos (cuando faltan datos, el programa interpola los valores faltantes).



**Figura 6: Cuantiles 5%,25%,50%,75% y 95% históricos del viento**

Los picos de velocidad máximos están muy repartidos pero se ve una cierta frecuencia de repetición en los meses de Octubre y Noviembre. Respecto al cuantil de orden 0.95 su velocidad es 24.12 km/h. Su mediana es de 7.56 km/h. Los datos corresponden a los valores medios de cada  $\frac{1}{2}$  hora (48 muestras/día). No obstante la frecuencia de muestreo promedio son 39 datos/día (valores medios cada 37 minutos) si no se tiene en cuenta que a veces faltan registros en la serie de datos. Los datos que faltan del servidor se interpolan a partir de los adyacentes.

### 4.3. Histograma

En la figura 7 vemos la representación gráfica de la velocidad del viento con la distribución Weibull (trazo continuo) y la distribución normal (trazo discontinuo).

Representado el histograma con formas rectangulares incorporamos la distribución normal y Weibull, como casi siempre en estos análisis se ve que es la distribución Weibull la que más se asemeja al caso de estudio. La distribución normal, también llamada distribución de Gauss o distribución gaussiana, es la distribución de

probabilidad que con más frecuencia aparece en estadística y en teoría de probabilidades. La velocidad del viento media es el promedio de las observaciones de la velocidad del viento que tendremos en ese emplazamiento.

Su función de densidad es simétrica y con forma de campana, lo que favorece su aplicación como modelo a gran número de variables estadísticas. Es, además, límite de otras distribuciones y aparece relacionada con multitud de resultados ligados a la teoría de las probabilidades gracias a sus propiedades matemáticas.

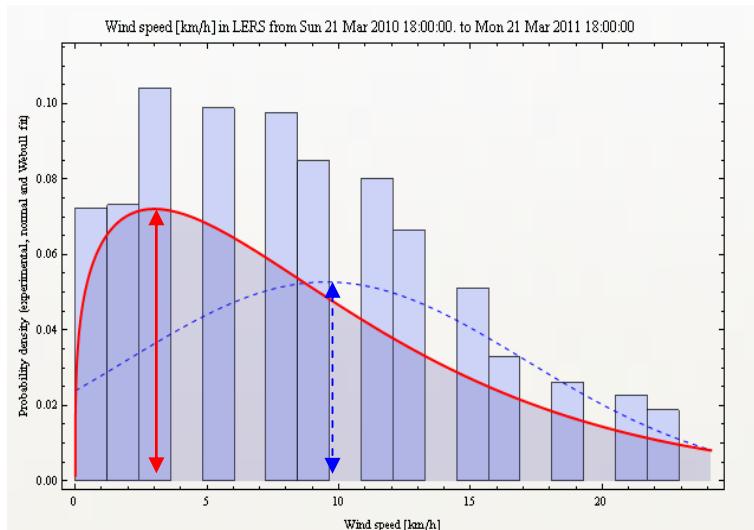


Figura 7: Histograma del viento (km/h) en Reus

El área bajo la curva siempre vale exactamente 1, ya que la probabilidad de que el viento sople a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100 por cien.

El pico de la distribución normal corresponde con la media del viento medido. En la figura 6 observamos que el pico de la distribución normal (curva azul de rayas) y, por tanto, la media del viento se encuentra en unos 10 km/h. Por otro lado, las velocidades del viento de 3 km/h son las más comunes. Los 3 kilómetros por segundo es el llamado valor modal de la distribución. Si multiplicamos cada intervalo de la velocidad del viento por la probabilidad de tener esa velocidad particular, y los sumamos todos, obtenemos la velocidad del viento media.

Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele empezar entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad de arranque llamada “cut-in speed”. Para que el aerogenerador no se desconecte por excesivo viento, la velocidad del viento no debe superar los 25 m/s (90 km/h), velocidad de desconexión llamada “cut-out speed”.

El emplazamiento del anemómetro posiblemente esté a 10 m sobre el suelo (altura estándar de las torres para la predicción meteorológica, aunque en un aeropuerto

es posible que se encuentre a mayor altura) y puede estar obstaculizado en algunas direcciones del viento. Si se construyera un parque eólico en los alrededores, se buscaría un emplazamiento más expuesto, posiblemente en un alto y con turbinas con bujes a una altura muy superior a 10 m. Por ello, la velocidad que se obtendría a la altura del buje de unas turbinas situadas en algún alto cercano sería muy superior a la registrada en el anemómetro del aeropuerto.

En teoría, el histograma debe parecerse a la distribución de probabilidad de Weibull, pero vemos que hay puntos que doblan la altura que deberían tener: esto es debido a un error provocado por el redondeo o discretización de los datos al formar los intervalos, “bines” en terminología estadística (vea la figura 5). La representación más adecuada es la distribución Weibull, porque refleja mejor la acumulación de observaciones de bajo viento ( $v < 10$  km/h) y porque la distribución normal tiene una probabilidad considerable para velocidades de viento negativas.

#### 4.4. Rosa de los vientos

Representamos la rosa de los vientos para estudiar la relación entre la dirección y la velocidad del viento durante un año. La utilidad de la rosa de los vientos radica en la identificación de las direcciones en las cuales sopla el viento con mayor duración e intensidad. Esta información es muy útil para la distribución de turbinas eólicas, ya que se suelen localizar en alineaciones perpendiculares al viento para evitar las pérdidas de viento en las estelas de aerogeneradores aguas arriba.

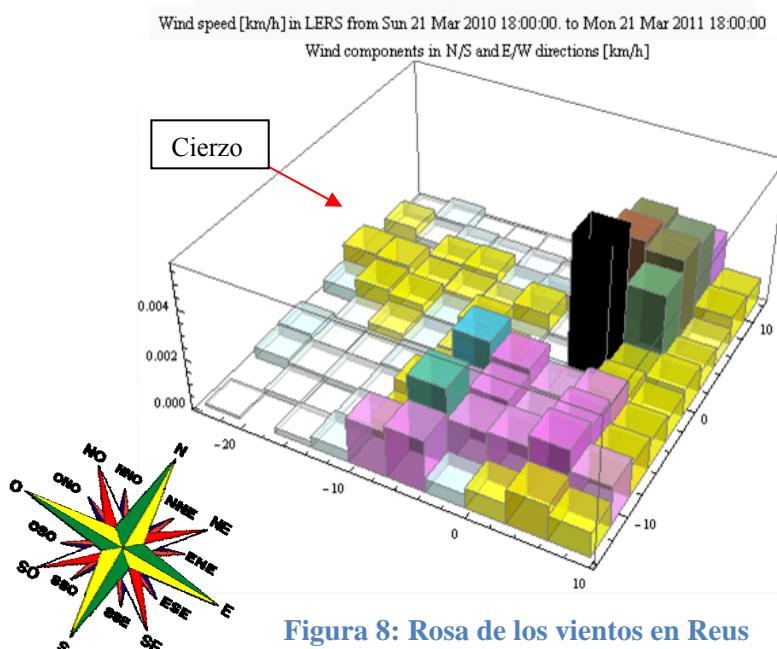


Figura 8: Rosa de los vientos en Reus

Las rosas de los vientos de las áreas vecinas son a menudo similares, por lo que en la práctica la interpolación (hallando una media) de las rosas de los vientos de las

áreas circundantes puede dar resultados seguros. Pero si el terreno es complejo, por ejemplo en montañas y valles que recorren diferentes direcciones, o litorales orientados en direcciones diferentes, no es seguro en general adoptar este tipo de suposiciones.

Haciendo hincapié una vez más, la rosa de los vientos sólo indica la distribución relativa de las direcciones del viento, y no el nivel real de la velocidad media del viento.

En Reus diferenciamos varias direcciones: un viento habitualmente fuerte en dirección Noroeste debido al valle del Ebro (Cierzo). Otro viento frío en dirección Norte debido a los Pirineos (Tramontana) y el último un viento del Este provocado por la brisa marina (Garbí) al que se le puede añadir un viento cálido del Sureste (Bochorno).

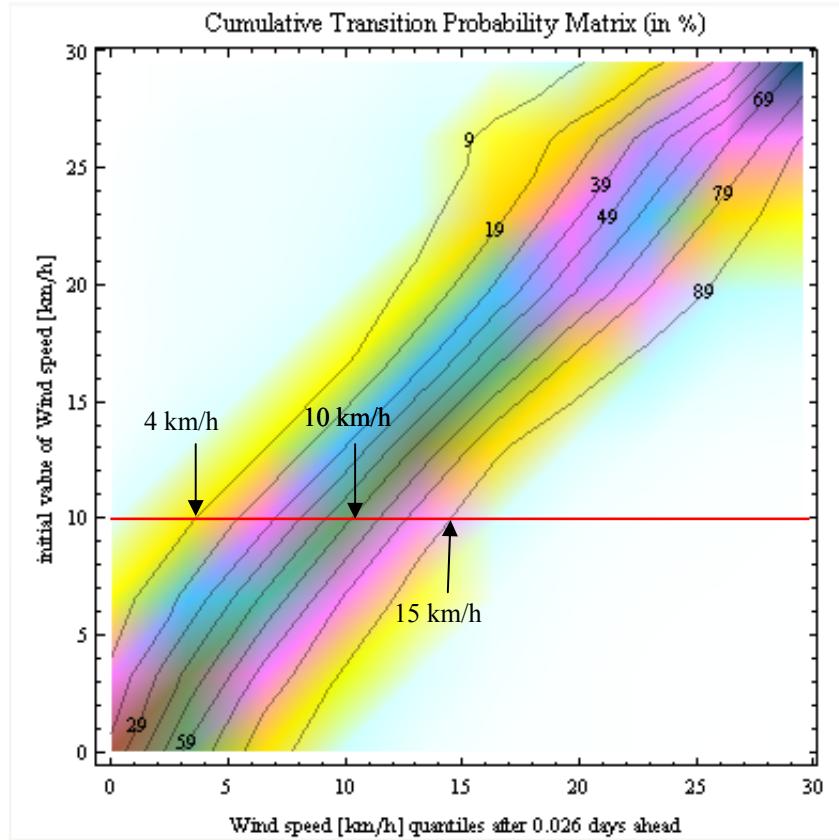
## 4.5. Matriz de transición

La ley de probabilidad condicional de una cadena de Markov se expresa mediante la matriz de probabilidades de transición  $P$ , o más sencillamente, matriz de la cadena.

Dicha matriz es cuadrada y tiene tantas filas y columnas como estados tiene el sistema. El programa Windfreedom discretiza la velocidad del viento en 10 valores entre los cuantiles 2% (usualmente 0 km/h) y 98% (correspondiente a velocidades de viento elevadas, que no sobrepasa el 2% del tiempo). Para evitar los efectos de discretización de la velocidad se utiliza el algoritmo [Mur Amada, Joaquín, 2009: 7.4] que estima el valor de la matriz  $P$  a partir de una serie de datos. Los elementos de la matriz  $P$  representan la probabilidad de que el estado próximo sea el correspondiente a la columna  $j$  si el estado actual o inicial es el correspondiente a la fila  $i$ . Es decir, si el sistema está inicialmente en el estado  $i$ , la probabilidad de que pase al estado  $j$  es  $P_{i,j}$  (elemento de la fila  $i$  y columna  $j$  de la matriz  $P$ ). En el caso que nos ocupa representa la probabilidad de tener un viento después de un intervalo de tiempo, considerando únicamente la información del viento medido.

En la gráfica representamos el último valor de la velocidad del viento medida en el eje vertical y en el eje horizontal la posible velocidad después de un tiempo definido. La matriz de la figura 9 se ha desarrollado con un periodo equivalente a 0.026 días, es decir,  $\frac{1}{2}$  hora. Las diferentes tonalidades nos indican la probabilidad del evento: el color más oscuro es el cambio que se ha producido más veces.

Durante periodos cortos, el viento no suele variar notablemente y la zona más oscura (es decir, las transiciones más probables) corresponde a la diagonal: la transición más probable es que el estado final sea igual al inicial ( $j = i$ ). En otras palabras, si la zona más oscura de la matriz está en la diagonal ( $j = i$ ), el evento más probable es que el viento no varíe en el lapso y el modelo de predicción de la persistencia es adecuado para ese intervalo.



**Figura 9: Matriz de transición (km/h) en Reus para ½ hora**

La matriz de transición acumulada se superpone en la figura 9 mediante las líneas cuantiles de probabilidad 9%, 19%, 29%, ..., 89%. Entre las líneas 9% y 89% tenemos el 80% de las transiciones de viento observadas y al intervalo entre las líneas 10% y 90% se le denomina intervalo interdecil.

Entre dos líneas deciles se producen el 10% de las transiciones. A mayor distancia entre líneas deciles de los cuantiles alrededor del punto  $(i, j)$ , más claro es ese punto y menor es la densidad de transiciones observadas del viento inicial  $i$  (representado en la escala vertical) hasta el viento final  $j$  (representado en la escala horizontal). Si las líneas cuantiles están muy juntas alrededor del punto  $(i, j)$ , ese punto será más oscuro y habrá más densidad de transiciones desde el estado inicial  $i$  hasta el estado final  $j$ .

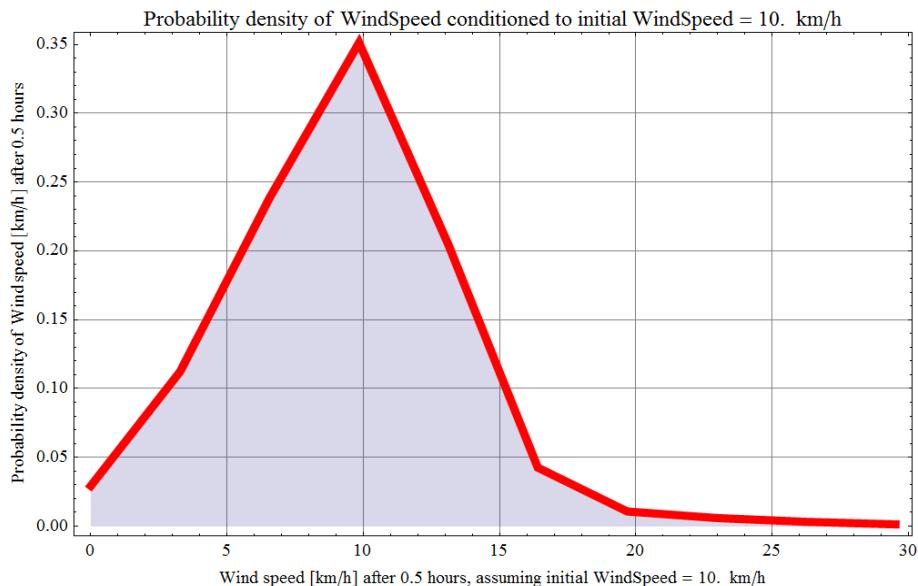
Las líneas deciles están más próximas cerca de la mediana (línea del cuantil 50%) y más alejadas en los deciles de los extremos (líneas de los cuantiles 9% y 89%). La densidad de líneas cuantiles es, precisamente, la densidad de probabilidad de esa transición y está representada por la oscuridad de ese punto en el gráfico.

A continuación mostramos un ejemplo ilustrativo, en donde supondremos que medimos una velocidad inicial  $i = 10 \text{ km/h}$ . La línea del cuantil 9% pasa por las coordenadas 10 km/h en el eje vertical y 4 km/h en el eje horizontal, punto  $(10, 4)$ . Esto indica que si se mide ahora 10 km/h, la siguiente medida bajará de 4 km/h con una probabilidad del 9%. También se observa una pendiente casi constante en las líneas

cuantiles y muy cercanas a la diagonal: el viento medido ahora es muy parecido al viento que habrá 30 minutos después (modelo de predicción de la persistencia).

En el presente medimos una velocidad de 10 km/h, la probabilidad de la velocidad dentro de 30 minutos es el corte horizontal de la imagen 8 a lo largo de la línea horizontal de 10 km/h. Dado que la línea horizontal a la altura de 10 km/h corta la línea del cuantil 9% en la coordenada horizontal de 4 km/h, esto implica que después el periodo elegido en el programa (30 minutos = 0.026 días) la velocidad estará por debajo de 4 km/h con una probabilidad del 9%.

El corte de la línea horizontal de 10 km/h con el cuantil 89% es 15 km/h, punto (15,10) de la gráfica 9. Esto indica que en un instante sopla 10 km/h de promedio en Reus, la velocidad media de la siguiente  $\frac{1}{2}$  hora no sobrepasará los 15 km/h con una probabilidad del 89%.



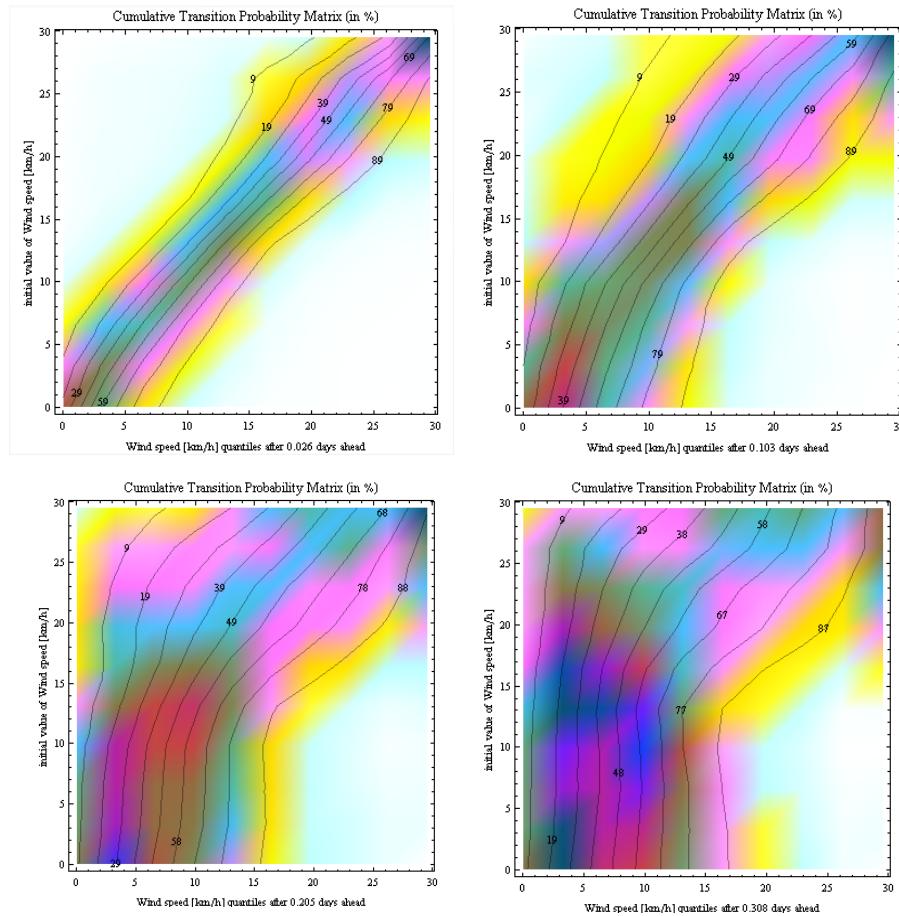
**Figura 10: Probabilidad del viento en Reus para  $\frac{1}{2}$  hora, dado un viento inicial de 10 km/h**

Para observar mejor la probabilidad del viento en un periodo futuro, se ha realizado un corte por la línea horizontal de 10 km/h en la gráfica 9 y la oscuridad de la gráfica (esto es, la densidad de probabilidad de la transición) se ha representado en la gráfica 10, obteniendo la densidad de probabilidad de la velocidad del viento en el siguiente periodo, condicionada a que la velocidad inicial de 10 km/h.

El viento más probable en el siguiente periodo es aproximadamente 10 km/h, porque es donde más juntas están las líneas cuartiles y más oscura es la gráfica 9. En la figura 10 queda claro que ese punto es la moda de la distribución condicionada. Además, este punto coincide aproximadamente con la línea mediana del 50%.

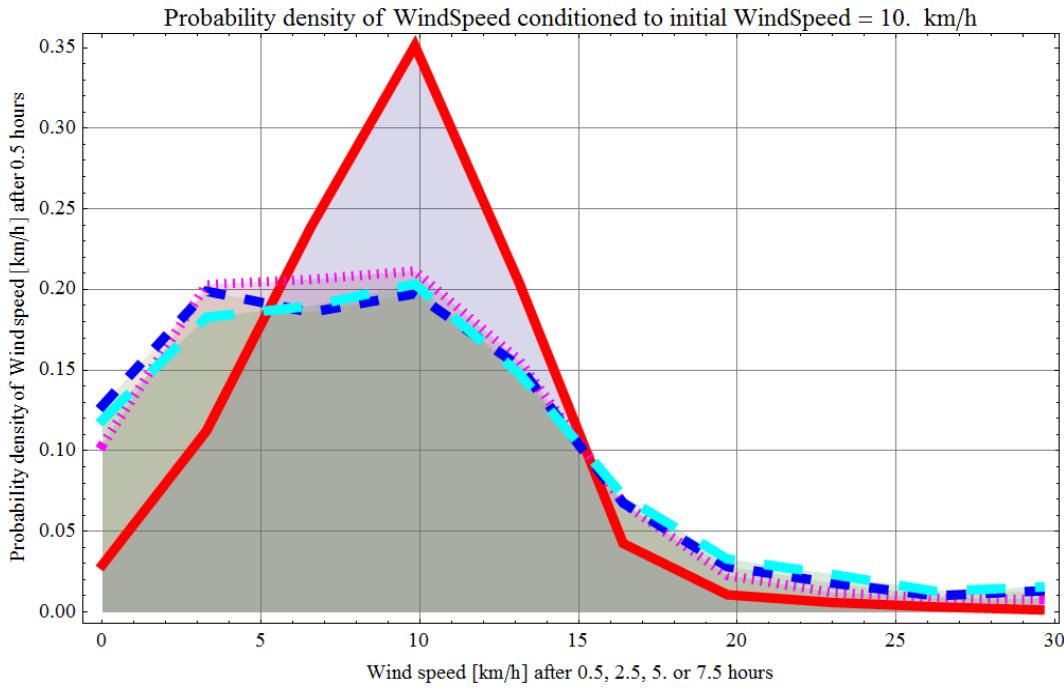
En la figura 11 se observa que al aumentar el periodo entre las medidas de viento consideradas (aumentamos el intervalo entre la medida inicial y el instante predicho), la

pendiente de cada línea cuantil se incrementa, llegando a ser casi verticales. Para vientos bajos y moderados en un periodo de 7 horas, las líneas de los cuantiles están más separadas y los colores oscuros están más repartidos a lo largo del gráfico. Esto indica que, dada una velocidad de viento inicial, la velocidad al final del intervalo tendrá una mayor incertidumbre y dependerá menos del viento medido inicialmente conforme mayor sea el horizonte de predicción.



**Figura 11: Matrices de transición (km/h)**  
**Periodo 30 minutos, 2.5horas, 5 horas, 7 horas**

Si el viento inicial es 10 km/h y observamos la distribución del viento media, 2.5, 5 y 7.5 horas después, veremos como tiende a la distribución del viento mostrada en la gráfica 7. Es decir, conforme avanzamos en el horizonte considerado, menos relevante es la velocidad del periodo inicial. Si cortamos las gráficas de la figura 11 y dibujamos la probabilidad condicionada a 10 km/h en el periodo inicial, obtenemos la gráfica 12.



**Figura 12: Probabilidad del viento en Reus para 0.5, 2.5, 5 y 7.5 horas, dado un viento inicial de 10 km/h**

#### 4.6. Espectro de viento

El espectrograma es una representación visual de la periodicidad de la señal a lo largo del tiempo. Para obtener el espectrograma se aplica la transformada de Fourier a porciones de la señal. El color del espectrograma representa la cantidad de oscilaciones de una determinada frecuencia en un intervalo de tiempo (densidad de oscilaciones de una frecuencia en un intervalo). Para que la oscuridad del espectrograma represente el valor cuadrado medio de las oscilaciones cuando el eje de frecuencias es logarítmico, el color de cada punto corresponde al cuadrado de la transformada de Fourier, multiplicado por la frecuencia [Mur Amada, Joaquín, 2009: 2.3].

Analizando el periodograma (figura 13), observamos dos picos estrechos, el primero a una frecuencia de 1 ciclo/día debido a la brisa marina, sobretodo en verano. El segundo pico de frecuencia 2 ciclos/día es debido a la combinación de la brisa marina y la brisa terrestre. Los tramos en donde aparecen manchas verticales muy oscuras indican un periodo con variaciones muy fuertes de la señal en un rango de frecuencias que pocas veces corresponden con cambios reales del viento, y que pueden indicar fallos en el sistema de medida.

El pico ancho en 1/6 ciclos/día corresponde a la dinámica borrasca/anticiclón, que suele tener un periodo de unos 6 días. El pico es ancho porque la frecuencia de alternancia de borrascas y anticiclones es variable: el ciclo puede durar entre 5 días ( $f = 0.2$  ciclos/día) y 12 días ( $f = 0.083$  ciclos/día).

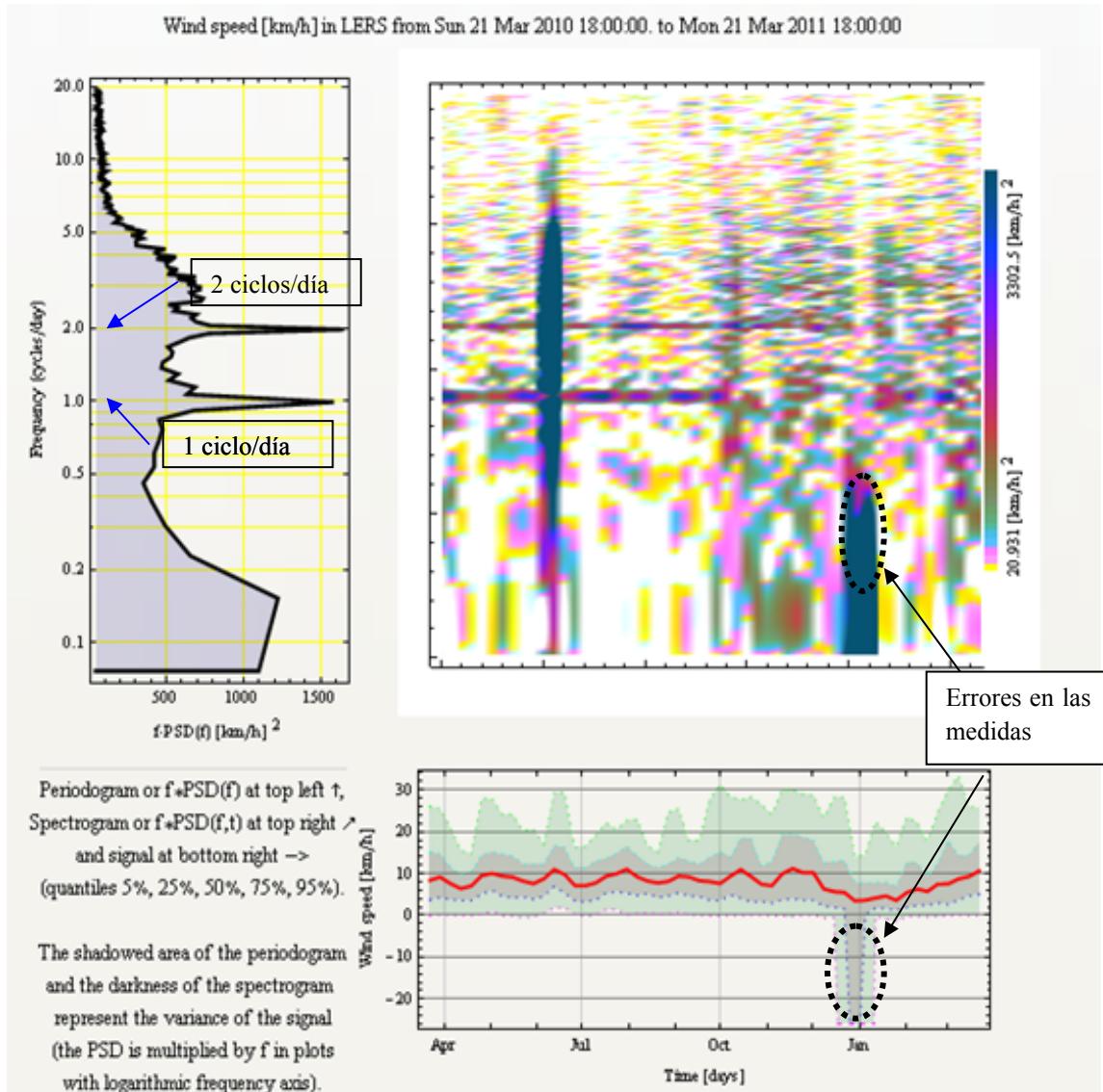


Figura 13: Espectrograma y periodograma en Reus

El resto de picos son poco significativos e indican que, fuera de estos patrones, el viento tiene un comportamiento aleatorio. También se observa que las oscilaciones de duración entre 1 h (24 ciclos/día) y 6 h (4 ciclos/día) tienen baja amplitud. Se han observado en Enero velocidades negativas (datos aberrantes) y oscilaciones excesivas en finales de mayo debido a fallos en el sistema de medida.

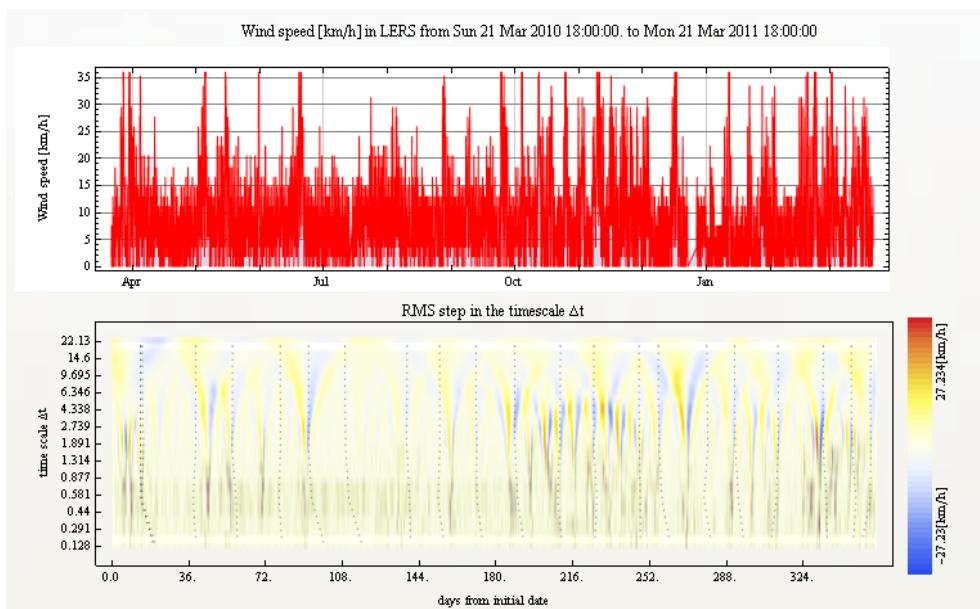
#### 4.7. Variaciones de viento

Las ráfagas de viento son vientos no constantes y racheados, de fuerza y dirección cambiantes. Su origen es diverso: diferencias de presión y de temperatura, turbulencias, orografía, etc.

La distinta capacidad térmica que tiene el mar y la tierra es la causa de su distinta velocidad de enfriamiento y calentamiento, produciéndose diferencias de

temperaturas al amanecer y anochecer y, por tanto, las brisas de mar y de tierra. Estos movimientos circulatorios del aire son más acusados cuanto más fuerte sea la radiación solar. Es decir, son más acusados en las estaciones de calor y en días despejados sin nubes.

La siguiente gráfica representa las variaciones de viento en el aeropuerto de Reus en el periodo de un año, comprendido entre el 21 de Marzo de 2010 hasta el 21 de Marzo de 2011 (un año tomado al inicio de la primavera de 2010). Están clasificadas en su duración (eje vertical en el escalograma de la figura 14) y en su amplitud (color de cada punto del escalograma) a lo largo del tiempo (eje horizontal).



**Figura 14: Variaciones de viento (km/h) en Reus entre 21/03/10 y 21/03/11**

A la derecha de los escalogramas se ha incluido la escala de colores que indica el valor eficaz o RMS de la variación del viento. Las variaciones de viento se muestran en color rojo cuando corresponden a incrementos de viento y en color azul los decrementos. Cuanto más oscuro sea el color, mayor será su valor absoluto (ver la graduación de colores a la izquierda de la figura 14).

El punto donde más intenso es el color indica la duración de la variación en el eje vertical (escala temporal en días de la variación) y el centro temporal de la variación en el eje horizontal (días desde el inicio de la gráfica). La determinación exacta de la duración de la rampa es compleja ya que la señal del viento tiene un comportamiento caótico debido a la turbulencia y a la dinámica. Esto se refleja en las gráficas, donde las manchas de color son alargadas en el sentido vertical, indicando la relativa incertidumbre de la duración, que suele ser del  $\pm 20\%$ .

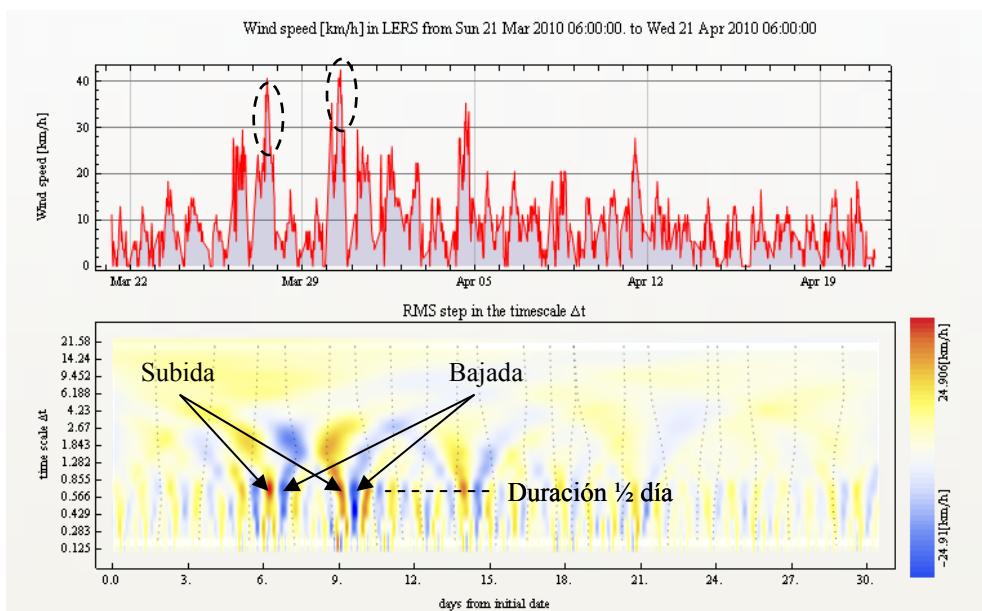
No podemos ver de forma detallada dichos cambios en la imagen 14 porque un año es un periodo excesivo para este tipo de gráficas. Se puede observar que los

cambios son mayores en la época de verano ya que el día tiene más hora y ello provoca un mayor calentamiento del mar, favoreciendo la generación de brisas tierra-mar y mar-tierra y el estado inestable de la atmósfera. Durante el invierno la atmósfera suele ser más estable.

Para poder percibir estas variaciones voy a analizar los escalogramas de cada mes. En vez de dividir el estudio en meses completos, se ha preferido abarcar el periodo entre el 21 de un mes hasta el día 21 del mes siguiente para ajustarse mejor a los cambios de estaciones.

#### *Marzo 2010-Abril 2010:*

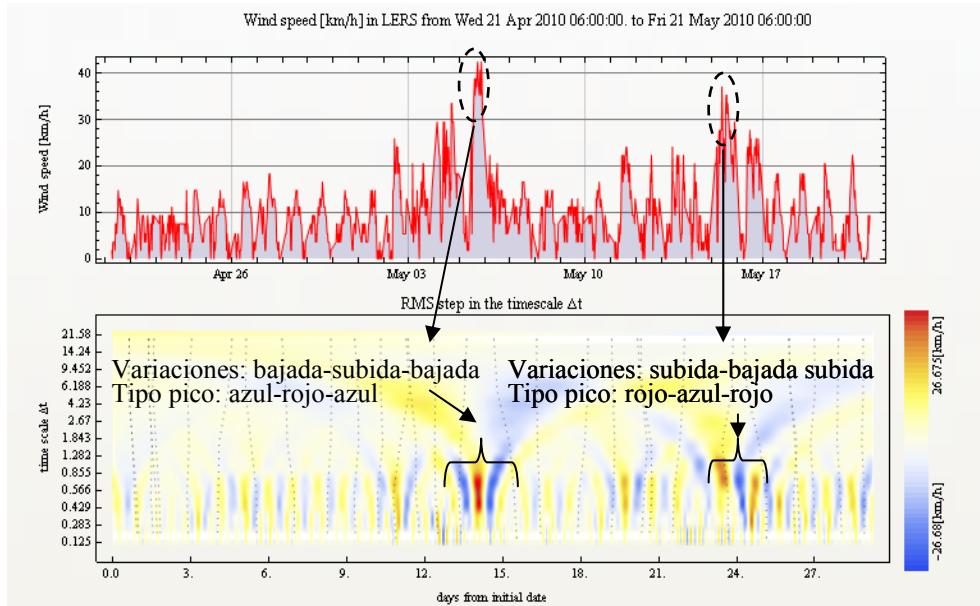
Lo primero que salta a la vista en la siguiente gráfica son dos picos de muy alta amplitud sucedidos entre el 28 y 31 de Marzo. Tenemos dos frentes con velocidades máximas entorno a los 40 km/h, también se observan oscilaciones periódicas con una amplitud de  $\pm 10$  km/h y duraciones por debajo de medio día.



**Figura 15: Variaciones de viento entre 21/03/10 y 21/04/10**

#### *Abril 2010-Mayo 2010:*

El análisis de esta toma es idéntico al del caso anterior: tenemos claramente dos frentes aislados con unas velocidades máximas que rondan los 40 km/h, y con una duración muy reducida.



**Figura 16: Variaciones de viento entre 21/04/10 y 21/05/10**

En principio, un pico simple consiste en una subida del viento (color rojo) seguido de una bajada (color azul) y un valle simplemente lo contrario. No obstante, este tipo de comportamiento no se suele observar. Es más común observar un comportamiento más oscilatorio: antes y después de una subida fuerte (pico) se observan bajadas. Lo mismo se puede decir de las bajadas (valles): antes y después de la bajada, se suele observar incrementos de velocidad.

Este comportamiento oscilatorio es debido a la dinámica atmosférica. Cuando hay un aumento prolongado de la velocidad del viento, se produce una aceleración de una gran masa de aire. Pero dicha aceleración suele estar precedida y proseguida por la desaceleración de esa masa de aire porque la transferencia energética entre la atmósfera y el entorno está limitada. En una disminución prolongada de la velocidad del viento también se produce el proceso análogo.

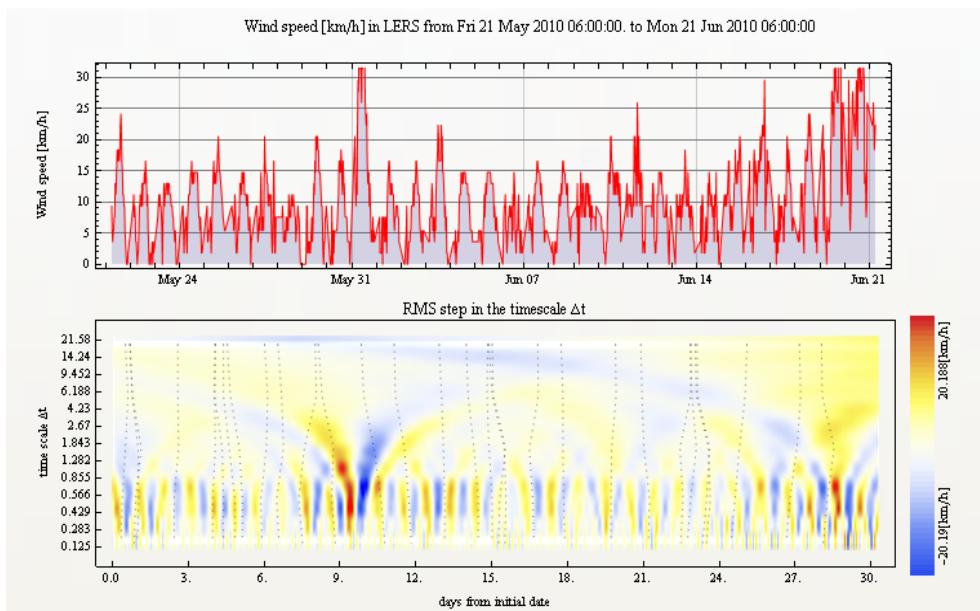
#### Mayo 2010-Junio 2010:

Aunque los vientos globales son importantes en la determinación de los vientos dominantes de un área, las condiciones climáticas y orográficas locales pueden influir en las direcciones de viento más comunes. Los vientos locales siempre se superponen en los sistemas eólicos a gran escala, esto es, la dirección del viento es influenciada por la suma de los efectos global y local.

Cuando los vientos a gran escala son suaves, los vientos locales pueden dominar los regímenes de viento.

En este periodo nos encontramos en la transición de la primavera-verano, podemos localizar un frente el día 31 de Mayo y una secuencia de oscilaciones con velocidades medias algo menores a 10 km/h. Asimismo localizamos entorno al día 18

de Junio el inicio de cambios en nuestro viento referidos al inicio del verano, haciéndose notar la acción de las brisas marinas.



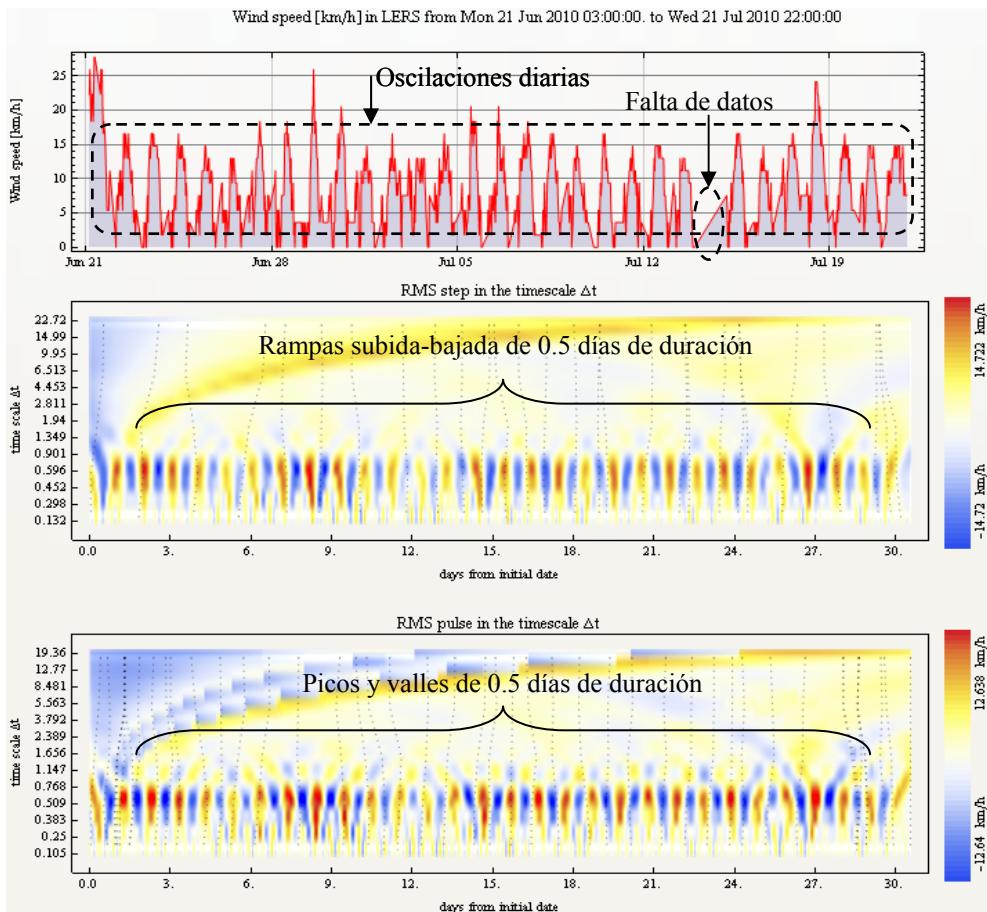
**Figura 17: Variaciones de viento entre 21/05/10 y 21/06/10**

#### Junio 2010-Julio 2010:

En esta gráfica se pueden ver claramente los vientos locales que ocurren por las variaciones diarias de temperatura entre la tierra y el agua, las que se dan principalmente en verano. La Tierra, debido a la acción del Sol, se calienta más rápidamente que el mar durante el día. El aire caliente que viene de la Tierra asciende, dirigiéndose hacia el mar, y es reemplazado a nivel del suelo aire frío del mar: es la brisa marina.

En la noche se produce lo contrario. La Tierra está más fría que el mar, por lo que el aire frío desciende sobre la Tierra y se desplaza hacia el mar. El aire marino que está más caliente, se eleva y es reemplazado por el aire frío de la Tierra: es la brisa terrestre. Estas brisas son de menor velocidad que las brisas marinas porque por la noche la tierra y el mar se encuentran a temperaturas próximas.

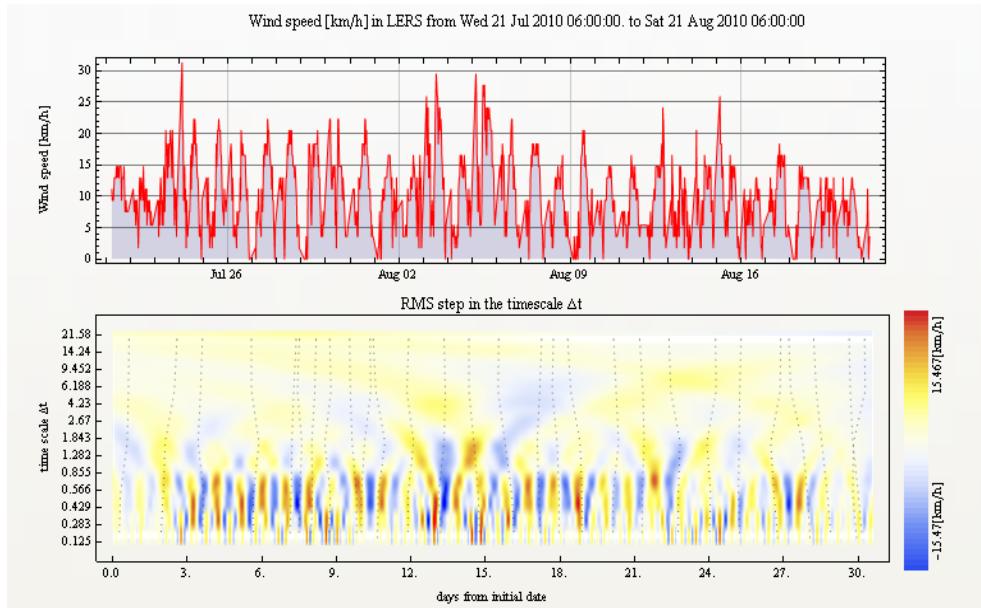
En nuestro caso observamos claramente las brisas marinas y las terrestres, de duración semidiaria y todas ellas con una velocidad media entorno a 12 km/h. Para tener mayor constancia de ello hacemos uso de una segunda gráfica que nos ayude a analizarlo. En la gráfica siguiente se muestra la segunda derivada del viento en función de la escala temporal para detectar los picos y valles de viento. Para que la figura 18 represente el valor eficaz o RMS del pico o del valle, la segunda derivada del viento se ha multiplicado por el cuadrado de la escala temporal. En otras palabras, la gráfica inferior es el resultado de aplicar un detector de picos y valles a la señal de viento.



**Figura 18: Variaciones de viento entre 21/06/10 y 21/07/10**

*Julio 2010-Agosto 2010:*

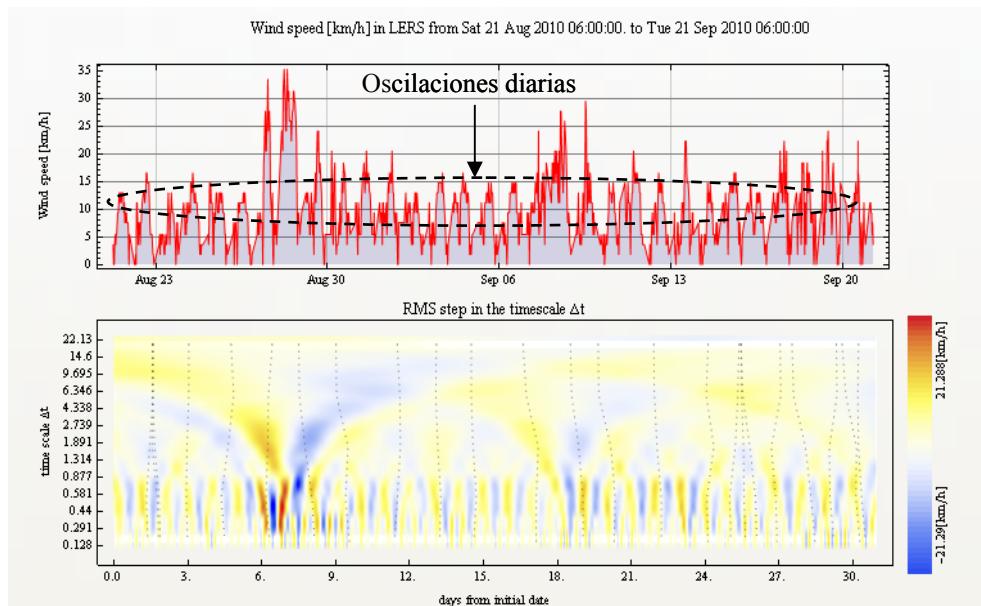
En la siguiente imagen se puede observar que la modulación diaria del viento es mayor cuanto mayor es el calentamiento o enfriamiento del mar, porque mayor es la diferencia de temperatura entre el mar y la tierra, produciéndose la brisa del mar o de tierra. En períodos de verano, el día tiene una duración mayor que la noche, el Sol irradian mayor energía y hay mayores diferencias de temperaturas entre el mar y la Tierra debida a las distintas velocidades de calentamiento y enfriamiento.



**Figura 19: Variaciones de viento entre 21/07/10 y 21/08/10**

*Agosto 2010-Septiembre 2010:*

Analizando la siguiente imagen podemos apreciar claramente una periodicidad de rampas de subida y bajada, con un patrón diario. En esta época del año el día y la noche son más cálidos, lo que favorecen el ascenso de masas de aire por convección. Tenemos una velocidad de 9 km/h en promedio diario, prácticamente constante a excepción de un frente el día 28 de Agosto.

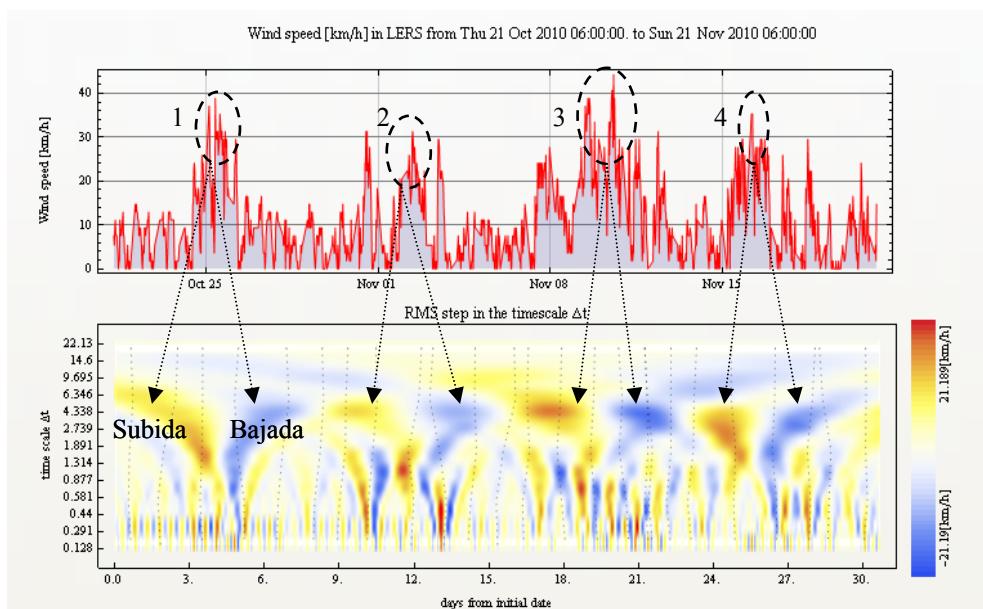


**Figura 20: Variaciones de viento entre 21/08/10 y 21/09/10**

### Septiembre 2010-Octubre 2010:

En esta gráfica podemos ver cuatro períodos con elevada velocidad de viento, en los días: 25-26 de Octubre, 30 de Noviembre, 10-11 de Noviembre y 16-17 de Noviembre. Son debidos a frentes aislados que no cumplen ninguna periodicidad, con unas velocidades máximas de 35 km/h. Podemos ver sus pendientes de subida y bajada relacionadas con los colores rojo y azul respectivamente de la gráfica inferior, en la figura 21.

Como análisis de un tramo, tomaré el comprendido entre el 10 y 11 de Noviembre (frente número 3). Vemos que tiene un pico de velocidad máxima de 45 km/h y una duración aproximada de 5 días, hasta que baja la velocidad apreciablemente con una velocidad media de 12 km/h. Como conclusión, en este intervalo los cambios debido a frentes han prevalecido sobre otros patrones diarios/semidiarios.



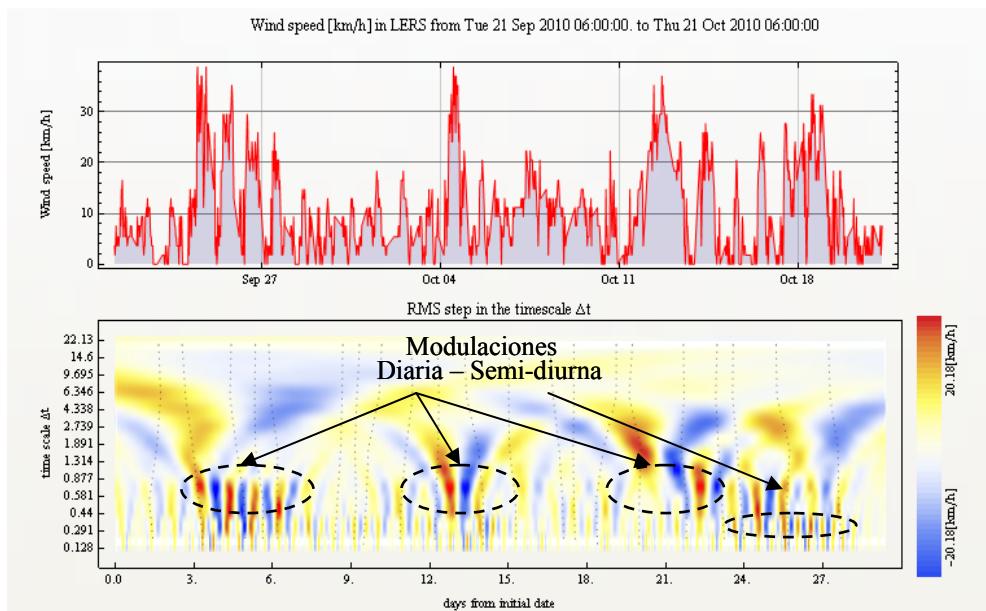
**Figura 21: Variaciones de viento entre 21/09/10 y 21/10/10**

### Octubre 2010-Noviembre 2010:

Seguimos viendo en esta representación una similitud en cuanto a los cambios de pendiente representados en el periodo anterior, todos ellos de modulación diaria a excepción del último tramo que tenemos modulación semi-diurna. Nos encontramos en la estación de otoño con un clima muy variable. En nuestras mediciones observamos muchos cambios debidos, en gran medida, a cambios atmosféricos causados por frentes, borrascas y anticiclones.

Al chocarse dos masas de aire con diferentes temperaturas se produce un cambio brusco de la temperatura a ello se le llama frente. Al juntarse dos masas de aire, uno frío y otro menos frío, la zona que se altera es la borrasca. La zona donde la presión

atmosférica es más estable es el anticiclón. Las bajas se caracterizan por tener presiones atmosféricas menores que las zonas anticiclónicas.



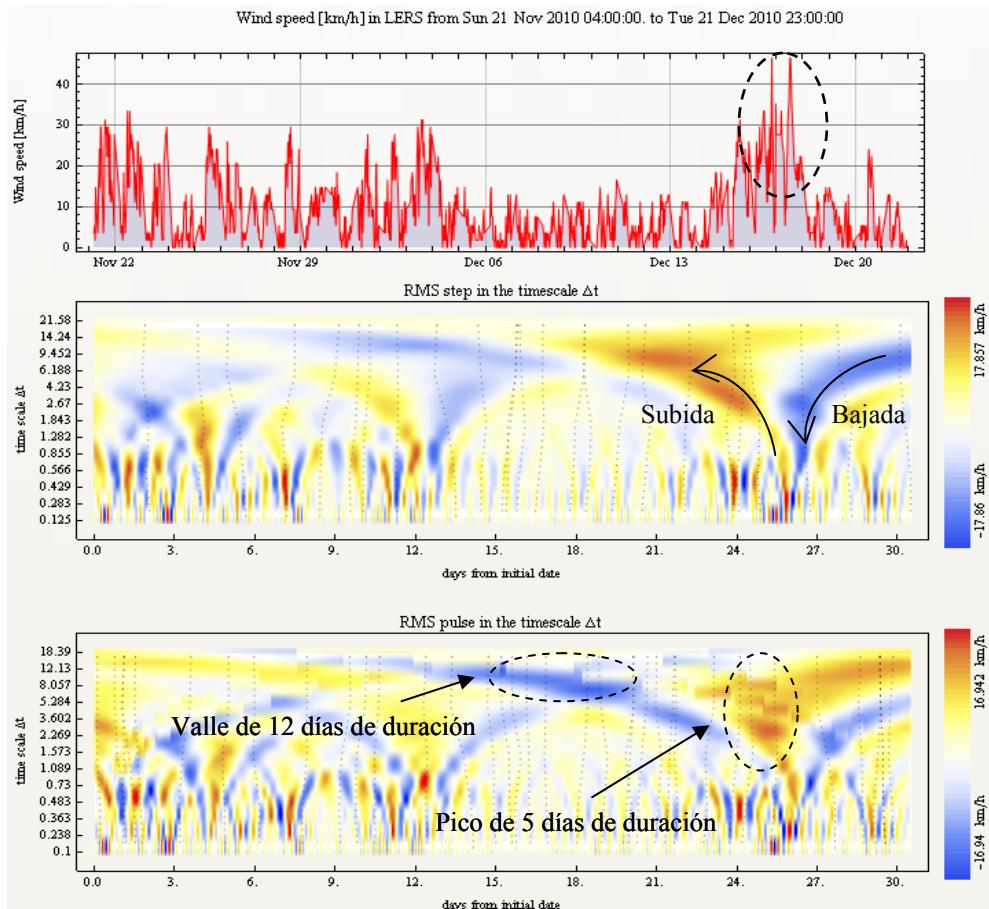
**Figura 22: Variaciones de viento entre 21/10/10 y 21/11/10**

#### *Noviembre 2010-Diciembre 2010:*

Para el estudio de este intervalo vamos a hacer uso los detectores de rampas y picos/valle ya que apreciamos una mayor serie de cambios en nuestro viento. En el histórico (figura 23, parte superior) se pueden observar un gran número de picos máximos entorno a 30 km/h y dos de ellos llegan a la cota máxima de 50 km/h. Ello queda representado por una gran tonalidad de colores predominando los oscuros que denotan el cambio ya sea de subida o de bajada.

Un tramo que es notorio es el comprendido entre el 15 y 18 de Diciembre, en él se producen una serie de cambios climáticos que afectan notablemente a la velocidad del viento, provocándole cambios bruscos en su pendiente. A grandes rasgos podemos asimilar todo este periodo a una rampa con una subida en el día 15 y bajada el día 18.

La rampa ascendente del día 15 de Diciembre se representa en la gráfica “RMS step in the timescale” con tonos rojos vivos con una duración (eje vertical) de  $\Delta t=2.67$  días aproximadamente y tornándose azul hacia el 18 de Diciembre. El detector de picos/valle en las figuras (gráfica inferior de la figura 23) muestra manchas de colores rojos cuando se detecta un pico (una rampa de subida seguida de una de bajada de duración similar). Si se produce una bajada seguida de una subida de duración similar, entonces se considera un valle y la gráfica muestra manchas de colores azules. Las manchas se sitúan en el eje de tiempos (eje horizontal) y de duración (eje vertical) que les corresponda.



**Figura 23: Variaciones de viento entre 21/11/10 y 21/12/11**

A la derecha de las gráficas se ha incluido la escala de colores que indica el valor eficaz o RMS de las rampas o de los picos/valles. En general las gráficas del detector de rampas son más intuitivas que las de picos/valles porque el viento no suele mostrar la misma duración y amplitud de subida y bajada.

#### Diciembre 2010-Enero 2011:

Entramos en la estación de invierno, cuando las noches son más largas que los días debido a la inclinación del eje terrestre. La temperatura depende de diversos factores, uno de ellos es la mayor o menor distancia con el sol y otro es la inclinación de su eje de rotación, que afecta a la inclinación de los rayos solares que llegan a la Tierra. Además, la temperatura también depende del tipo de sustratos al que llegan los rayos del sol (la roca absorbe energía, el hielo la refleja), de la dirección y fuerza del viento, de la latitud, de la altura sobre el nivel del mar, de la proximidad de masas de agua, etc. La suma y resta de estos factores da como resultado que el invierno sea menos caluroso que el verano.

Este periodo es muy similar al anterior y se distinguen claramente secuencias de picos de diferente amplitud y duración. Entre los días 22 y 27 de Diciembre de 2010 no

se disponen de datos. Esta falta de datos hace que aparezca una línea recta entre los datos faltantes en la gráfica histórica.

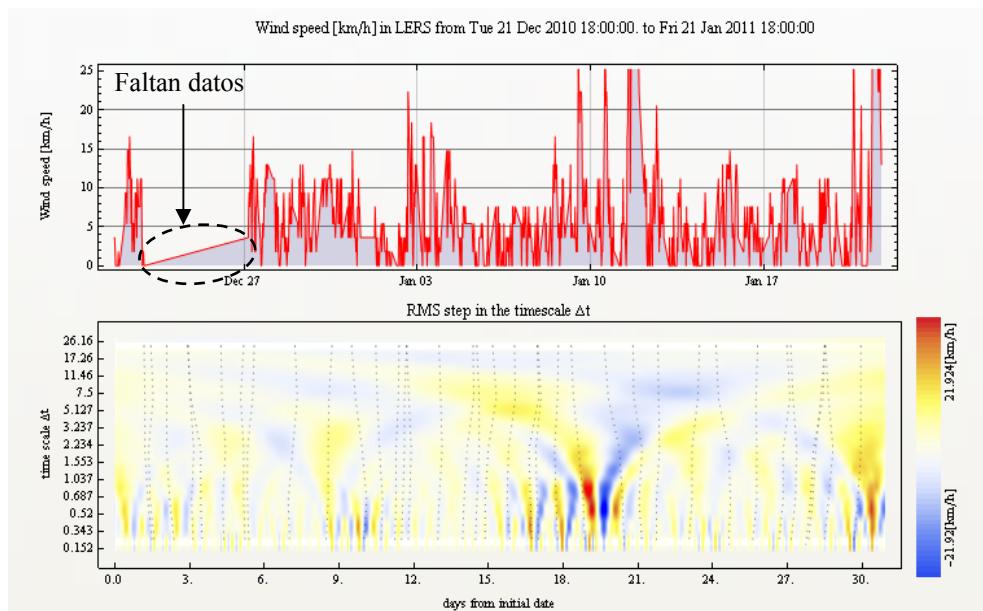


Figura 24: Variaciones de viento entre 21/12/10 y 21/01/11

#### Enero 2011-Febrero 2011:

Estas variaciones se deben sobretodo, a que las diferencias de temperatura entre la superficie del mar y la superficie terrestre, son mayores durante el día que durante la noche. El viento presenta también más turbulencias y tiende a cambiar de dirección más rápidamente durante el día que durante la noche.

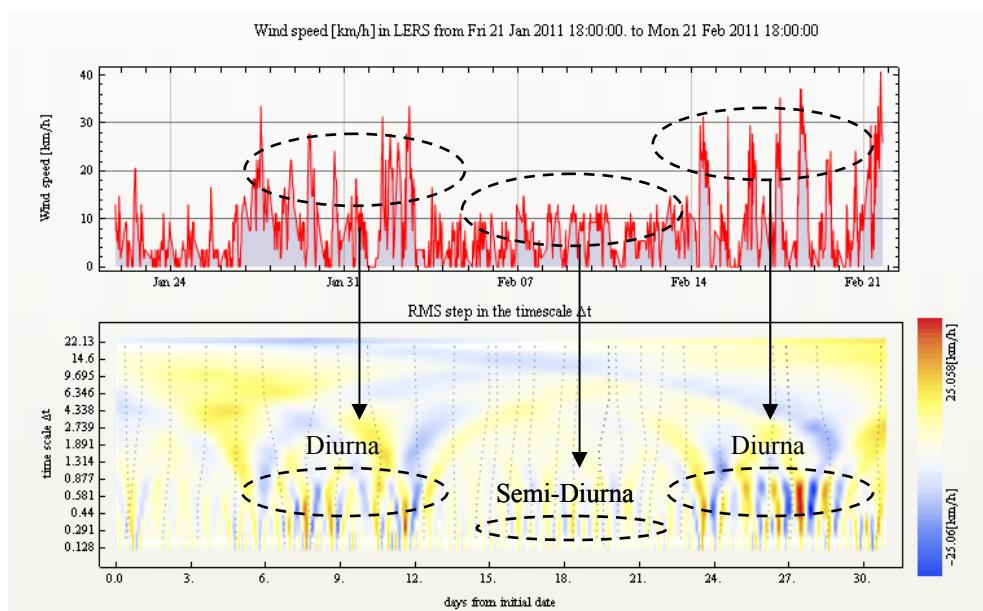
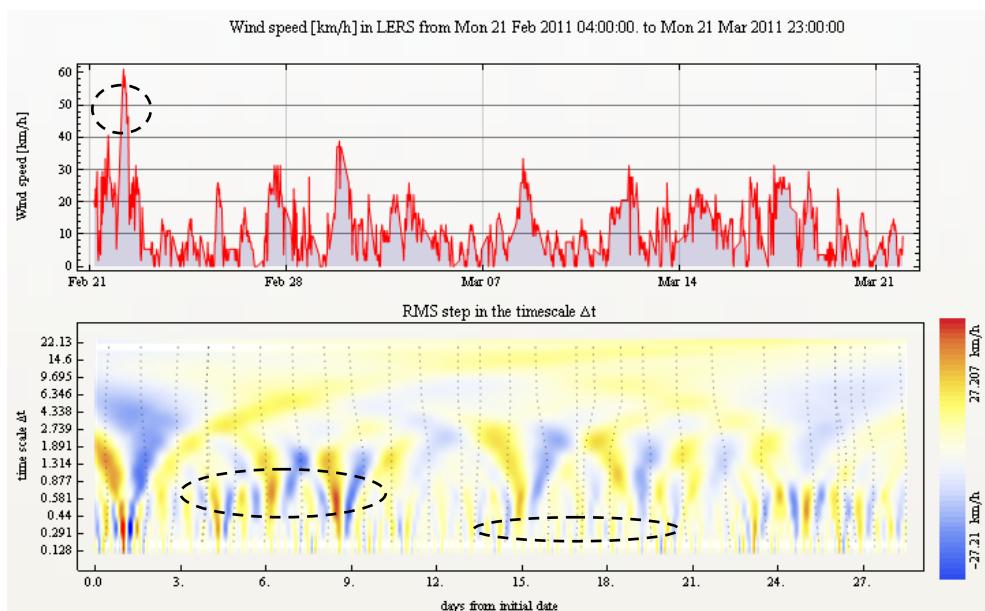


Figura 25: Variaciones de viento entre 21/01/11 y 21/02/11

Para analizar este periodo actuamos de forma consecuente al periodo anterior, distinguimos dos series de oscilaciones de amplitud idéntica. La primera con una modulación semidiaria y una variación media de velocidad entorno a 5 km/h. La segunda de carácter más relevante, con una modulación diaria y una variación media de velocidad alrededor de 10 km/h. En la imagen se observa que estas secuencias se alternan en un periodo semanal.

#### *Febrero 2011-Marzo 2011:*

En este periodo lo primero que salta a la vista es un pico de muy alta amplitud en los días 20-21 de Febrero, entorno a 60 km/h y una duración de algo más de un día, siendo éste un fenómeno aislado y no repetitivo debido a condiciones infrecuentes en la atmósfera. También podemos ver una secuencia de picos repetitivos de duración semidiaria con una velocidad media de 10 km/h, representados en la gráfica por colores bastante vivos. Estas rampas de subida y bajada presentan irregularidades debido a la naturaleza estocástica del viento.



**Figura 26: Variaciones de viento entre 21/02/11 y 21/03/11**

#### *4.8. Estudio estadístico de las variaciones de viento*

Para poder tener una mayor información sobre los cambios que se producen a lo largo de nuestro periodo de estudio, voy a realizar un análisis estadístico de las rampas anteriormente descritas. Para ello ha sido necesario desarrollar un pequeño programa que calcula los percentiles y las probabilidades observadas en los detectores de rampas.

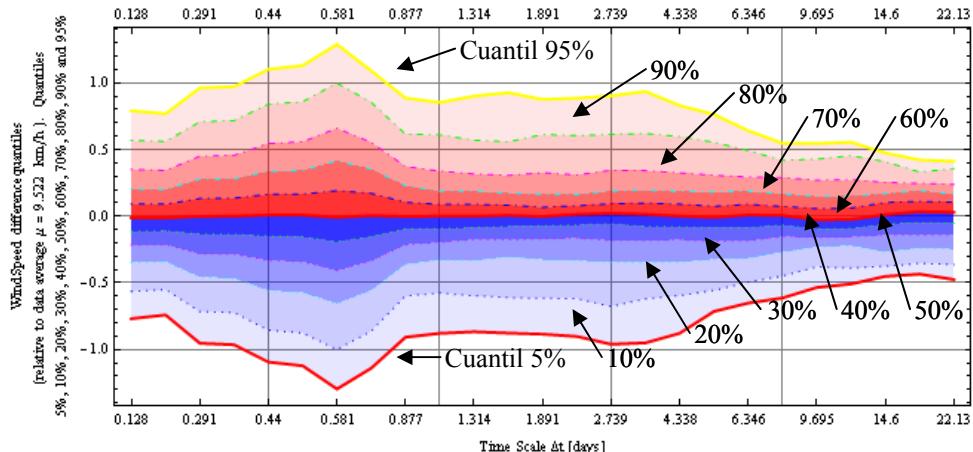


Figura 27: Rangos cuantiles de las variaciones de viento

En la figura anterior la ocurrencia durante un año de las variaciones de viento se representa en función del intervalo de tiempo  $\Delta t$  considerado. En las tres gráficas se mostrará la distribución observada de las variaciones de viento (la duración y magnitud de las variaciones de viento observadas) utilizando tres tipos de representación estadística.

En la figura 27 se muestran los cuantiles en orden ascendente, desde el cuantil del 5% (dibujado en color rojo) hasta el del 95% (en color amarillo). El eje de ordenadas o vertical se muestra la variación del viento relativa (variación observada en un intervalo o escala temporal  $\Delta t$  dividida por la velocidad media anual, 9.5 km/h en este caso). En el eje de abscisas u horizontal represento el intervalo de tiempo  $\Delta t$  en días en donde se mide la variación de viento y el periodo de estudio correspondiente al año mostrado en la figura 27 (del 21/03/2010 al 21/03/2011). El horizonte temporal  $\Delta t$  está representado logarítmicamente desde 0.128 días (correspondiente a 3 horas) hasta 22.13 días. El factor entre las escalas temporales contiguas es 1.5 aproximadamente (la escala superior es un 50% superior y la inferior es 33% inferior).

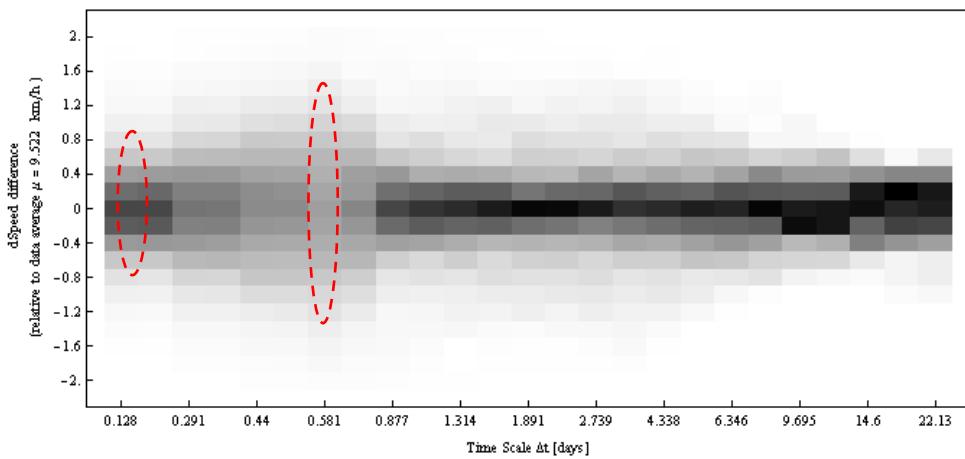
Concretando en nuestro caso, vemos la distribución estadística de rampas de subida y de bajada. El cuantil del 95% (representado en la gráfica con una línea amarilla), indica la mayor variación que se observa el 95% del tiempo. Podemos decir que después de 0.291 días (7 horas), el viento va a experimentar una subida menor del 100% respecto su valor medio, con una probabilidad del 90%. En 7 horas podemos llegar a tener aumentos de viento del orden de la velocidad media y resulta muy difícil hacer una predicción de estas variaciones si no se dispone de modelos numéricos de predicción meteorológica.

Las máximas variaciones de viento se observan en la escala temporal de 0,5 a 0,6 días, donde se observan variaciones por encima del 130 % de la velocidad media durante el 10% del tiempo (aproximadamente el 5% del tiempo se producen incrementos y el 5% decrementos). Esto significa que las rampas de subida o bajada que producen las mayores variaciones de viento tienen una duración entre 12 y 14 horas. En escalas mayores de tiempo, se produce un cierto efecto de suavizado: si se media el

viento en intervalos de más de 14 horas, las oscilaciones de menor duración se ven atenuadas de forma similar a un filtro paso bajo de segundo orden con la correspondiente frecuencia de corte  $f = 0.443/\Delta t$  [Mur Amada, Joaquín, 2009: 7.2.3].

A medida que vamos desplazándonos por el eje de tiempos (entre 1 y 3 días), vemos que la dispersión de los cuantiles se estabilizan, teniendo bastante homogeneidad entre todos los cuantiles, acercándose a sus valores iniciales (0.128 días). La frecuencia de ocurrencia también se ha representado mediante tonos de gris y en 3 dimensiones para apreciar más claramente la duración y magnitud de las variaciones de viento observadas.

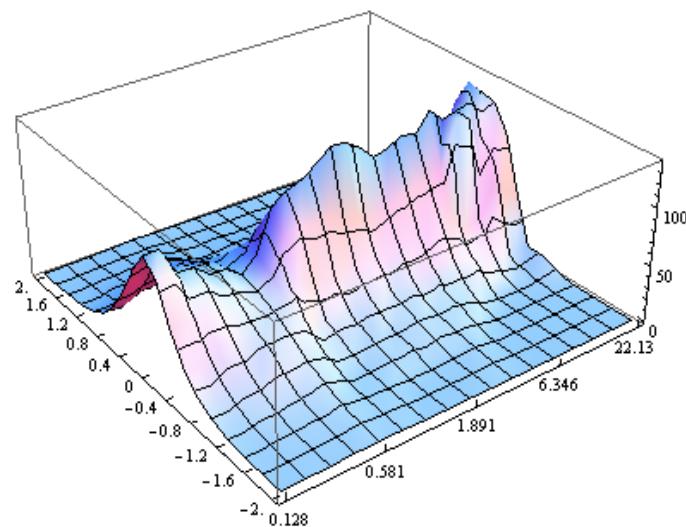
En períodos de más de 6 días, las oscilaciones de bajas presiones y anticiclones se promedian. Por tanto, las variaciones semanales o más lentas suelen ser más pequeñas que las que se observan en intervalos de 8 h (0.128 días).



**Figura 28: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos de gris**

En la figura 28 se representa el histograma de la magnitud y duración de las variaciones de viento dividido en intervalos rectangulares respecto a la escala temporal ( $\Delta t$ ). La altura de cada rectángulo es de 0.2 (20% de variación relativa a la media). Por ejemplo, en 0.128 días distinguimos un rectángulo gris oscuro, dos grises medios y el resto claroscuros. En contraposición en un periodo de 0.581 días tenemos mayor dispersión de grises (dibujados en tonalidades claras bastante difuminadas). La figura anterior se complementa con la siguiente.

En la gráfica de la página siguiente se representa en 3 dimensiones el histograma (distribución de las frecuencias de ocurrencia de las variaciones en función de su duración). Las tres gráficas de este apartado son herramientas adecuadas para caracterizar la distribución de las variaciones en función de la escala temporal. Se observa que la duración de las variaciones suele estar entre 0.3 y 0.6 días y sobrepasan la media del emplazamiento (amplitud 1 por unidad) el 10% del tiempo (aproximadamente el 5% del tiempo corresponde a incrementos y otro tanto a decrementos).



**Figura 29: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos en 3D**

## Capítulo 5. Estación meteorológica del aeropuerto de Jerez

### 5.1. Introducción

Los datos se han medido en la estación meteorológica del aeropuerto de Jerez (LEJR), que está situado en el noreste de Jerez de la Frontera, a 8 kilómetros del centro de la ciudad. Su coordenada de latitud es  $36.75^{\circ}$ , su longitud es  $-6.06^{\circ}$  y su altitud respecto del mar es 28 m.

En Jerez se distinguen varios vientos: uno en dirección Oeste proveniente del atlántico, que es el llamado viento de Poniente, y otro dirección Suroeste por el golfo de Cádiz, llamado viento de Vendaval, siendo racheado y algo húmedo. Como mención podemos percibir en poca medida el viento de Levante, proveniente del Este y cuya acción se nota más en verano. Como se vio en la figura 3, he capturado la imagen del aeropuerto de Jerez para ver que la medición del viento se realiza en un terreno neutro.

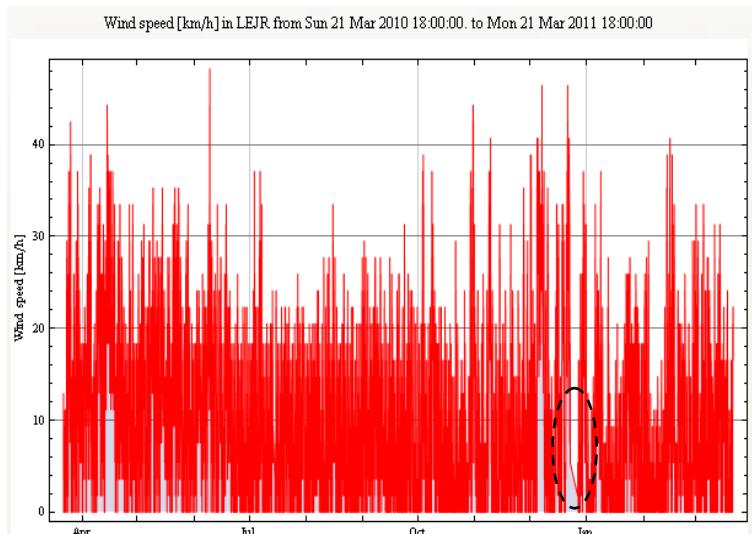


**Figura 30: Aeropuerto de Jerez**

### 5.2. Histórico de viento

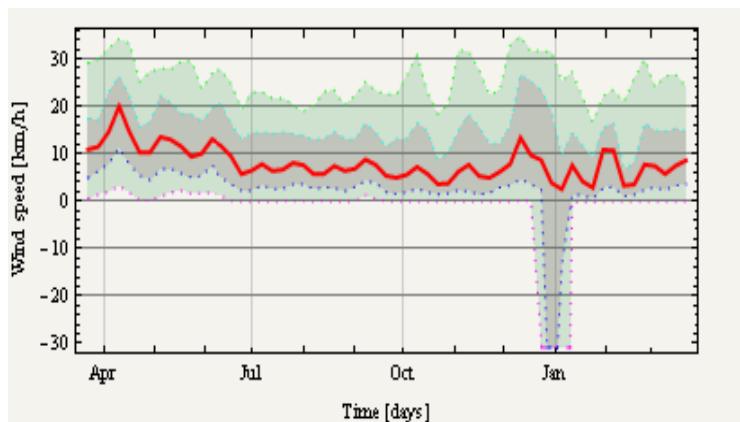
En la siguiente gráfica podemos observar que son en los meses finales del año cuando obtenemos una mayor velocidad promedio del viento. A lo largo del periodo anual tenemos una velocidad comprendida entre 0 y 48 km/h, siendo su media de 10.5 km/h. Tenemos una frecuencia de muestreo de 43 tomas/día. Respecto al cuantil de orden 95% su velocidad es 27.72 km/h y su mediana es 9.36 km/h. La frecuencia de muestreo promedio son 48 tomas/día, aunque el programa indique 43 tomas/día por la

falta de medidas. Al principio de Enero hay un fallo de datos que modifica nuestra frecuencia.



**Figura 31: Histórico del viento (km/h) en Jerez**

La imagen de la figura 32 nos detalla la velocidad del viento durante el periodo de estudio, podemos diferenciar los cambios de velocidad así, como el fallo en la representación debido a la falta de datos.



**Figura 32: Cuantiles 5%, 25%, 50%, 75% y 95% históricos del viento**

### 5.3. Histograma

Es una representación gráfica de valores en forma de barras donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. El histograma permite reconocer y analizar patrones de comportamiento en la información que no son aparentes a primera vista al calcular un cuantil o una media.

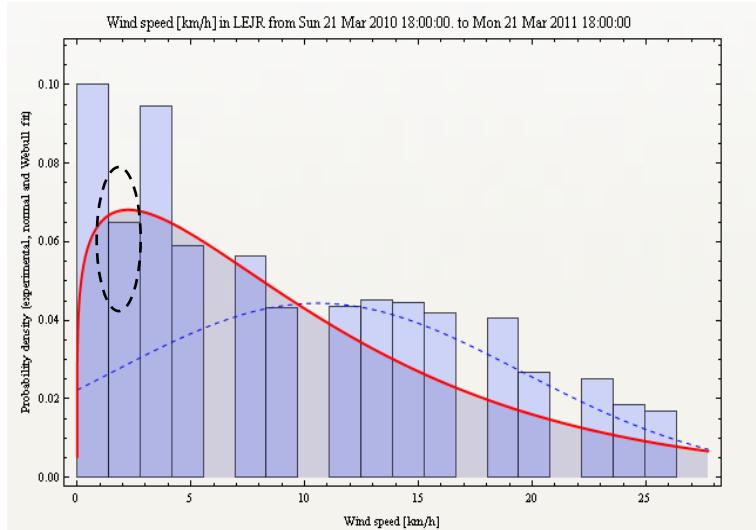


Figura 33: Histograma del viento (km/h) en Jerez

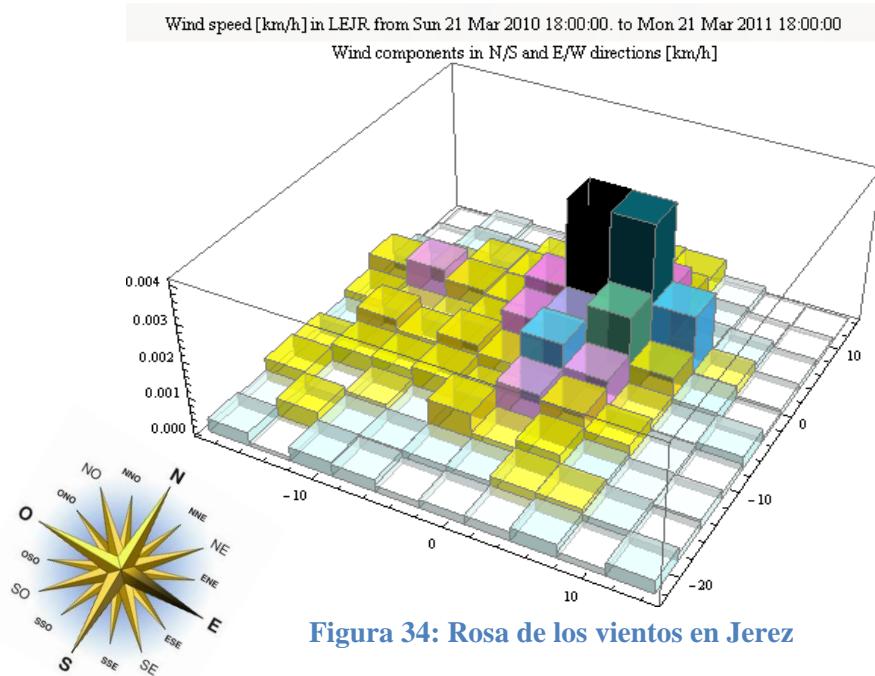
En nuestro histograma podemos ver ambas distribuciones comentadas con anterioridad, distribución Weibull y normal. Por otro lado, las velocidades del viento de 2 km/h son las más comunes La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. Por lo tanto, la distribución de Weibull puede variar tanto en la forma como en el valor medio. Podemos observar que la distribución Weibull se ajusta mejor a los datos experimentales, con una velocidad media de 10 km/h.

## 5.4. Rosa de los vientos

Los vientos se diferencian según la dirección de donde proceden y normalmente llevan el nombre de la dirección desde la que soplan, pero también tienen un nombre propio.

La dirección del viento depende de los centros isobáricos y se desplaza de la alta a la baja presión de forma bastante paralela a las líneas isobaras, siendo su velocidad tanto mayor cuanto mayor sea el diferencial de presión entre ambas. El efecto Coriolis hace que ese movimiento sea según las agujas del reloj en el centro del anticiclón y en sentido contrario en el centro de la borrasca, lo cual podemos ver en los mapas isobáricos.

Sin embargo los modelos eólicos pueden variar de un año a otro, así como el contenido energético (normalmente alrededor de un 10 por ciento). Por lo tanto, lo más conveniente es tener observaciones de varios años para poder obtener una media fidedigna. Los proyectistas de grandes parques eólicos cuentan normalmente con un año de medidas locales y utilizan observaciones meteorológicas a largo plazo de las estaciones climáticas cercanas para ajustar sus medidas y obtener así una media a largo plazo fiable.



**Figura 34: Rosa de los vientos en Jerez**

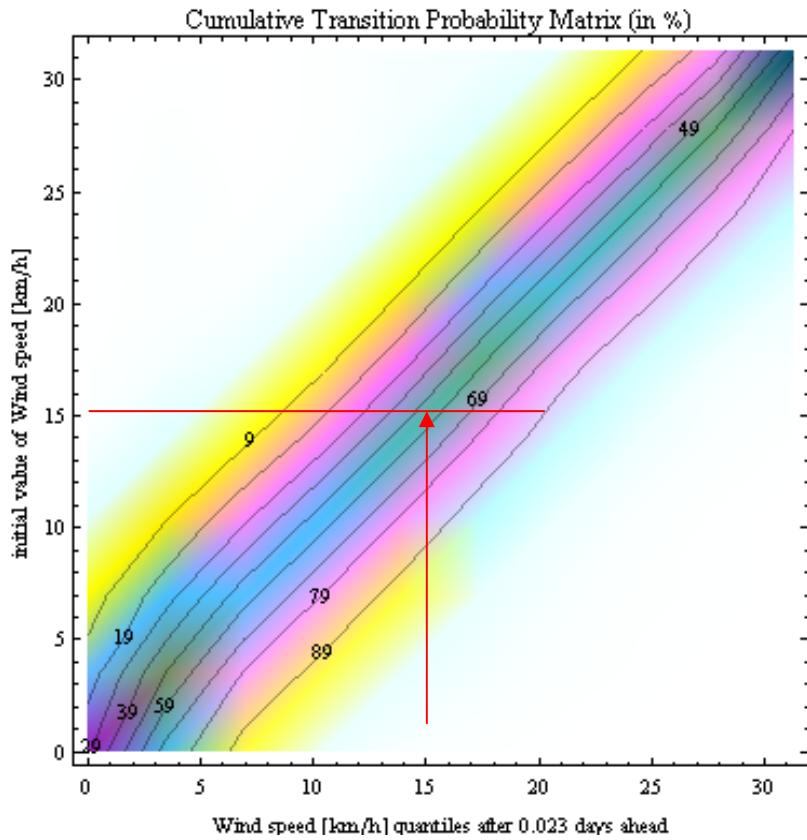
La rosa de los vientos nos diferencia dos vientos, una dirección Oeste proveniente del atlántico que es el llamado viento de Poniente y otra dirección Suroeste por el golfo de Cádiz, llamado viento de Vendaval, siendo racheado y algo húmedo. Como mención podemos percibir en poca medida el viento de Levante, proveniente del Este y cuya acción se nota más en verano.

## 5.5. Matriz de transición

Para formular un modelo climatológico futuro a través de los datos medidos anteriormente se utilizan las cadenas de Markov, entre otros métodos. En la teoría de probabilidad se conoce a ello como un proceso matemático en el que la probabilidad que ocurra un dato depende del dato anterior.

Gracias al programa ya comentado podemos estimar dicha matriz y predecir sus posibles valores futuros en función del valor actual.

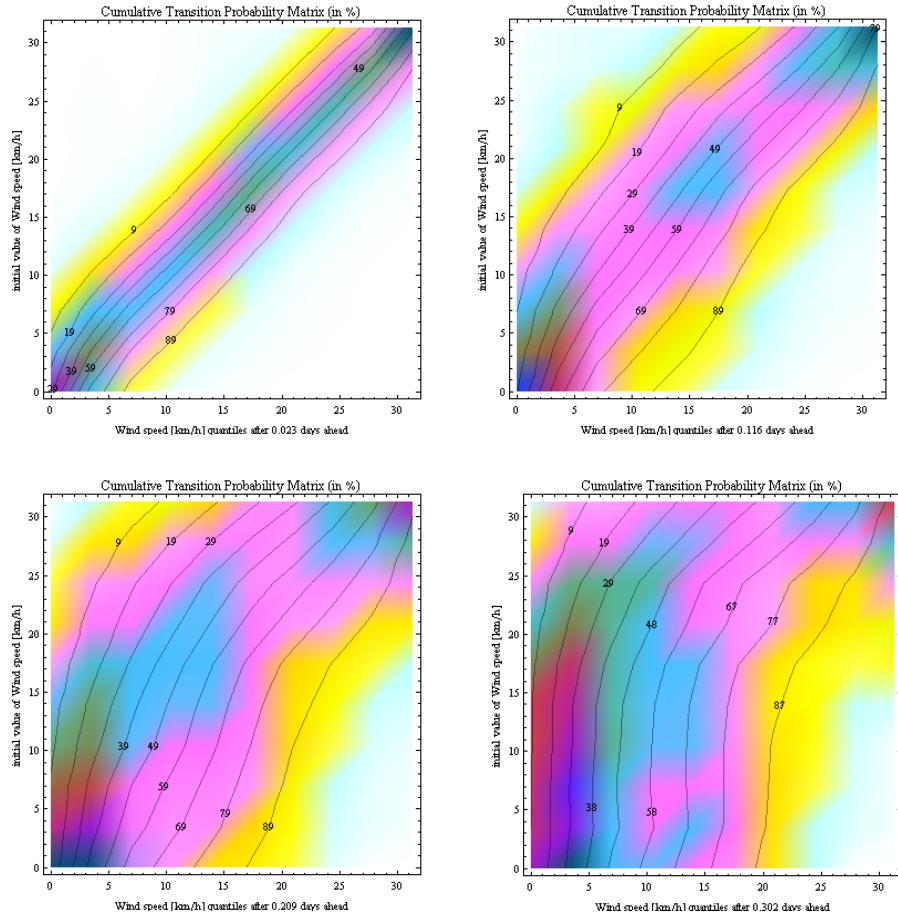
Representada la matriz de probabilidad vemos que la pendiente de las líneas de todos los cuantiles son prácticamente rectas para un periodo de 0.023 días ( $\frac{1}{2}$  hora). Cada línea de los cuantiles incrementa el 10% de dichas transiciones, a mayor distancia entre líneas de los cuantiles, menor es el número de transiciones observadas del viento inicial (representado en la escala vertical) hasta el viento final (representado en la escala horizontal) en un rango de viento menor, bajando la probabilidad cosa que ocurre en los cuantiles 9 y 89, teniendo un color más claro. Dada la opción siempre que podamos optaremos por movernos entorno a las líneas de los cuantiles del 49% y 59% (tonalidades oscuras), ya que nos aportan una predicción más fiable.



**Figura 35: Matriz de transición (km/h) en Jerez para ½ hora**

Para poder ver que ocurriría con predicciones a tiempo más lejano he calculado la matriz de transición para intervalos mayores.

La evolución de la matriz de transición queda de manifiesto a mayor periodo, nuestra capacidad de predicción está limitada, porque las líneas de los cuantiles se separan y tienden a la verticalidad para grandes intervalos. La anchura de los cuantiles también se incrementa aumentando mucho el rango de incertidumbre para horizontes de predicción de varias horas.



**Figura 36: Matrices de transición (km/h).**  
Periodo 30 minutos, 2.5horas, 5 horas, 7 horas

Dado un viento medido, el rango de posibles velocidades pasado un intervalo aumenta con el intervalo, hasta el punto de no ser operativo este método estadístico para la predicción para horizontes mayores de 6 h.

Como conclusión se puede decir que, si aumentamos el periodo de predicción meteorológica nuestras probabilidades de acierto disminuyen considerablemente si sólo tenemos en cuenta la información estadística.

## 5.6. Espectro de viento

El programa Windfreedom nos da la posibilidad de analizar la evolución del espectro del viento con un spectrograma y su correspondiente periodograma, con estas gráficas podemos estudiar la evolución de las oscilaciones de nuestro viento a lo largo del tiempo.

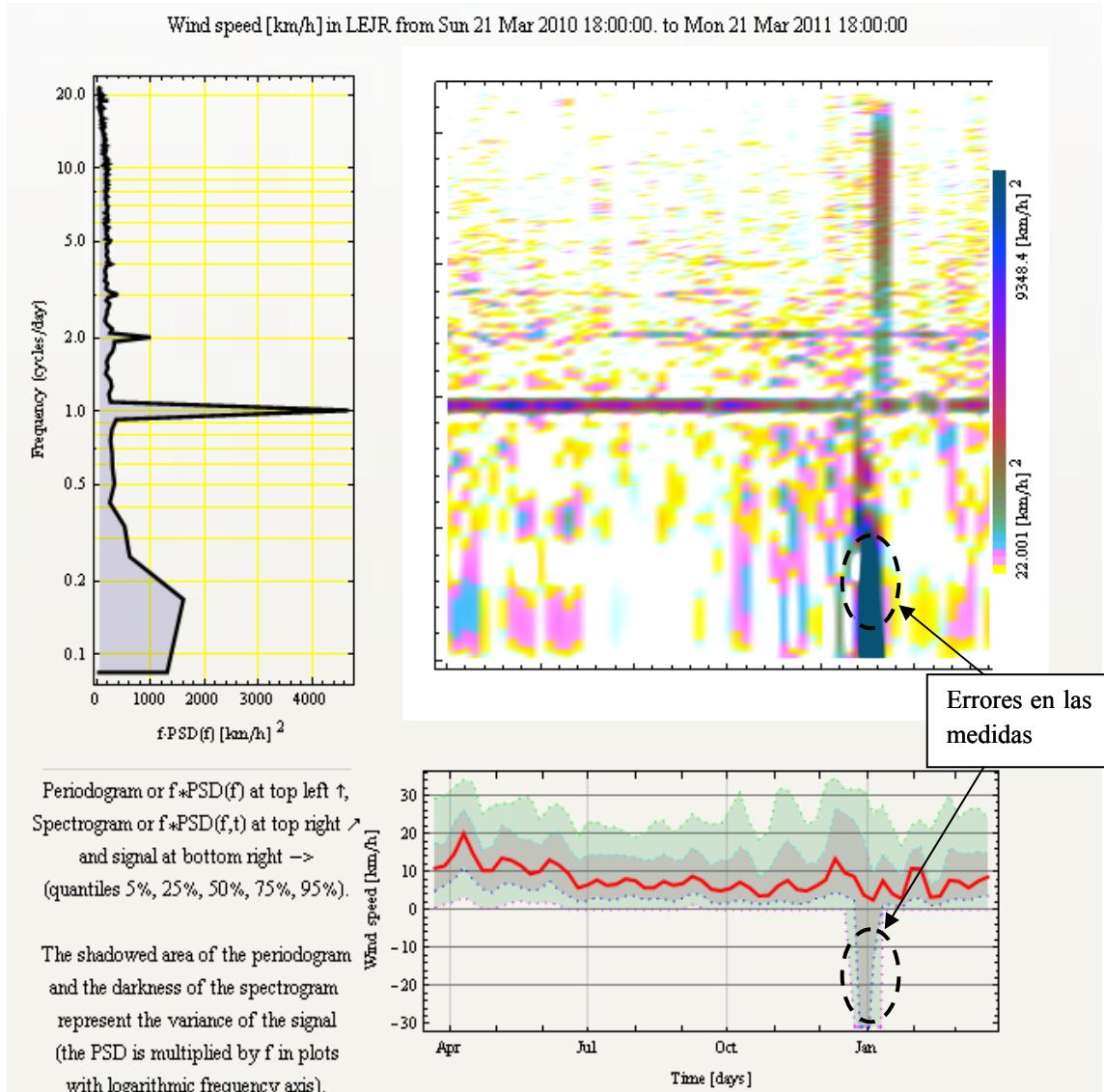


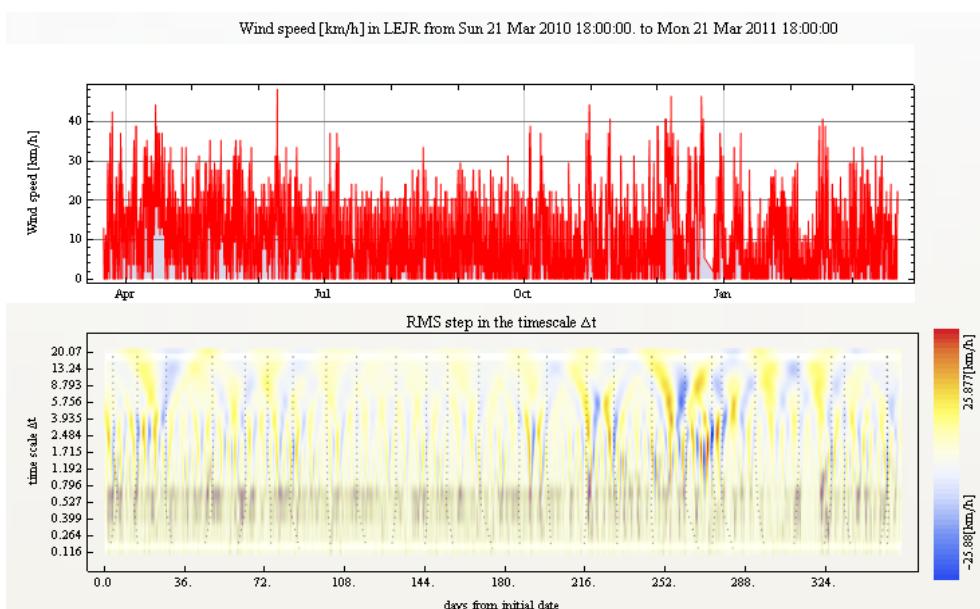
Figura 37: Espectrograma y periodograma en Jerez

Dado que nuestras mediciones se realizan cercanas al mar, tendremos que considerar principalmente las oscilaciones debido a 1 ciclo/día y 2 ciclos/día debidas a la brisa marina, característica del verano y a la combinación de brisa marina y terrestre, respectivamente. Las demás oscilaciones no tienen un patrón definido, ya que aparecen y desaparecen debido al comportamiento caótico de la turbulencia, a pequeña escala y al de los anticiclones y borrascas a grandes escalas. Los cambios debidos a anticiclones/borrascas suelen tener una duración de 6 días, al igual que en Reus. La modulación diaria del viento es bastante mayor en Jerez que en Reus ( $5000 [\text{km}/\text{h}]^2$  respecto  $1500 [\text{km}/\text{h}]^2$ ).

## 5.7. Variaciones de viento

Con el programa Windfreedom, podemos hacer uso de una aplicación para ver la evolución temporal del viento, representado en el eje de abscisas la duración y por el de ordenadas la amplitud del cambio. En el aeropuerto de Jerez existen bastantes similitudes con el de Reus ya que ambos son afectados por las brisas marinas y terrestres, con mayor incidencia en Jerez ya que también se ve afectado por la acción del mar Atlántico.

Vamos a observar una gráfica para medir la evolución del viento durante un año. Como no podemos distinguir ni los frentes más importantes ni las brisas lo analizaré mes a mes como en el caso de Reus aunque de forma más global ya que el proceso es el mismo.



**Figura 38: Variaciones de viento (km/h) en Jerez entre 21/03/10 y 21/03/11**

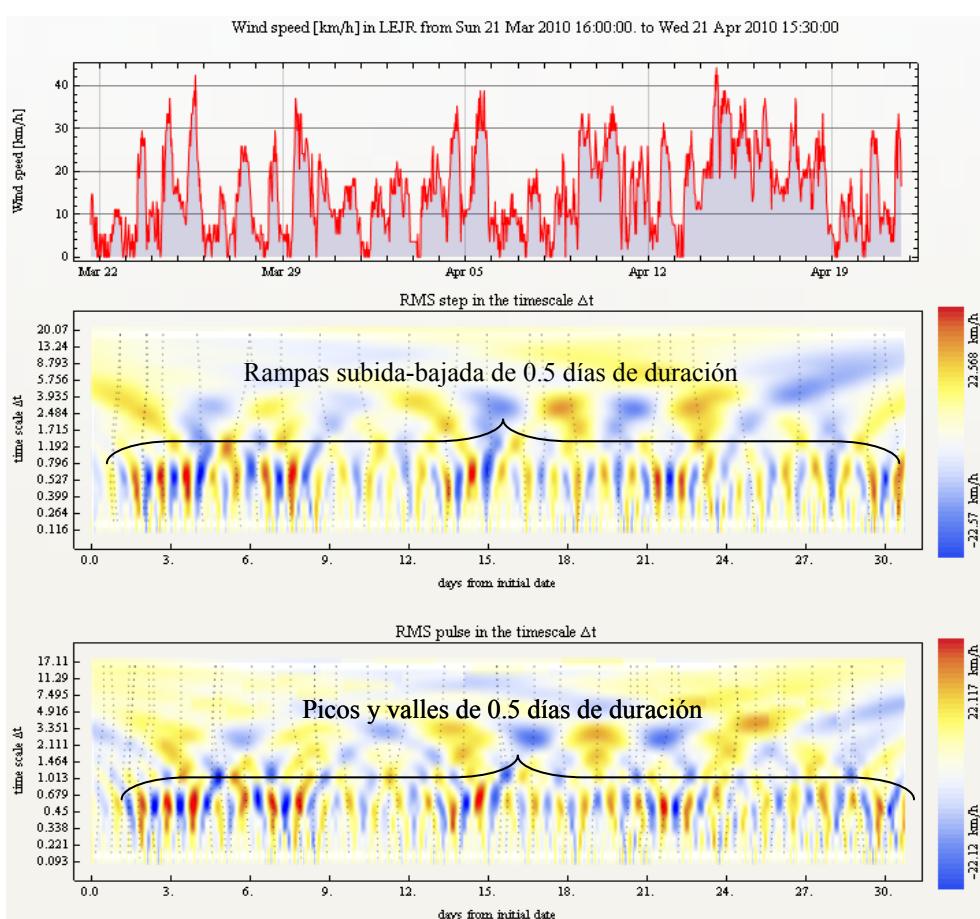
A primera vista, observamos un mayor número de tonalidades entre Junio y Agosto y algún cambio brusco en Abril, Noviembre y Diciembre debidos a variaciones en la atmósfera, descritos por frentes, borrascas o anticiclones.

*Marzo 2010-Abril 2010:*

El primer mes de la primavera muestra una intensa modulación diaria. En esta gráfica se puede ver claramente los vientos locales que ocurren por las variaciones diarias de temperatura entre la tierra y el agua, las que se dan principalmente en verano. La Tierra, debido a la acción del Sol, se calienta más rápidamente que el mar durante el día. El aire caliente que viene de la Tierra asciende, dirigiéndose hacia el mar, y es reemplazado a nivel del suelo aire frío del mar, es la brisa marina.

En la noche se produce lo contrario. La Tierra está más fría que el mar, por lo que el aire frío desciende sobre la Tierra y se desplaza hacia el mar. El aire marino que está más caliente, se eleva y es reemplazado por el aire frío de la Tierra, es la brisa terrestre. Estas brisas son de menor velocidad que las brisas marinas porque por la noche la tierra y el mar se encuentran a temperaturas próximas.

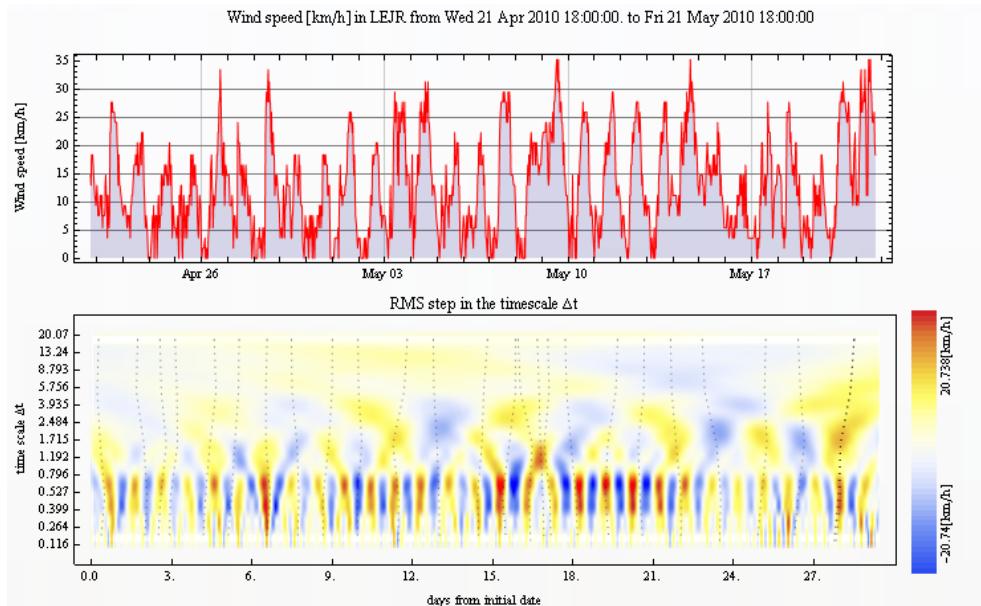
Si comprobásemos este periodo con el comentado anteriormente en Reus, nos damos cuenta de cómo afectan las corrientes atlánticas en nuestro emplazamiento, vemos la acción de la brisa marina racheada y húmeda. Ya que en épocas veraniegas viene desde Sur y ahora desde el Oeste. Estas variaciones son quasi constantes en amplitud y tiempo, se distinguen pequeñas variaciones debidas a fenómenos meteorológicos.



**Figura 39: Variaciones de viento entre 21/03/10 y 21/04/10**

*Abril 2010-Mayo 2010:*

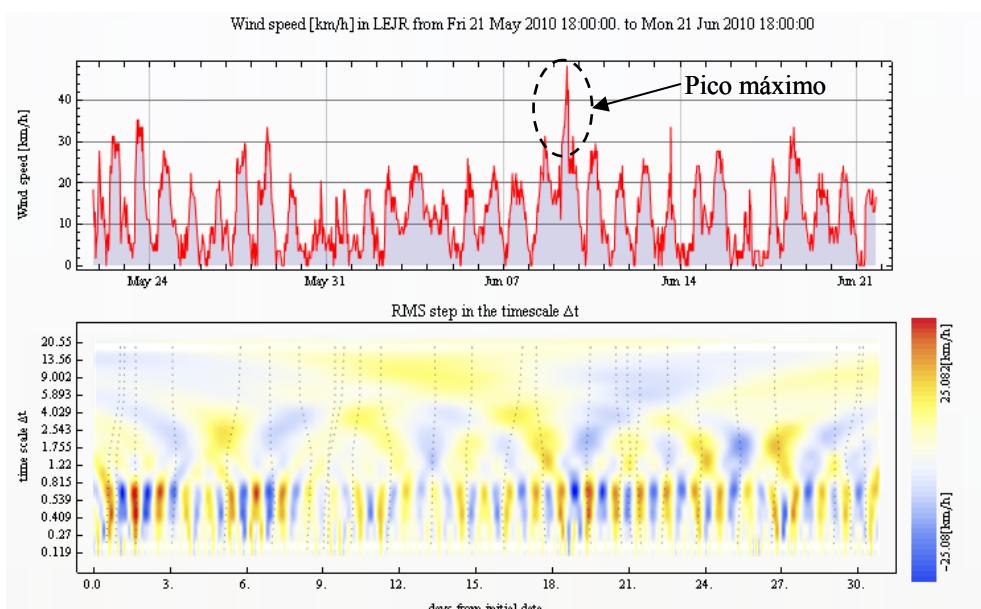
La modulación diaria es incluso más regular en el segundo mes, que en el primero de la primavera del año 2010. A modo comparativo con el estudio de Reus vemos que tenemos unas velocidades de viento superiores tanto en velocidad máxima como en duración de las mismas.



**Figura 40: Variaciones de viento entre 21/04/10 y 21/05/10**

*Mayo 2010-Junio 2010:*

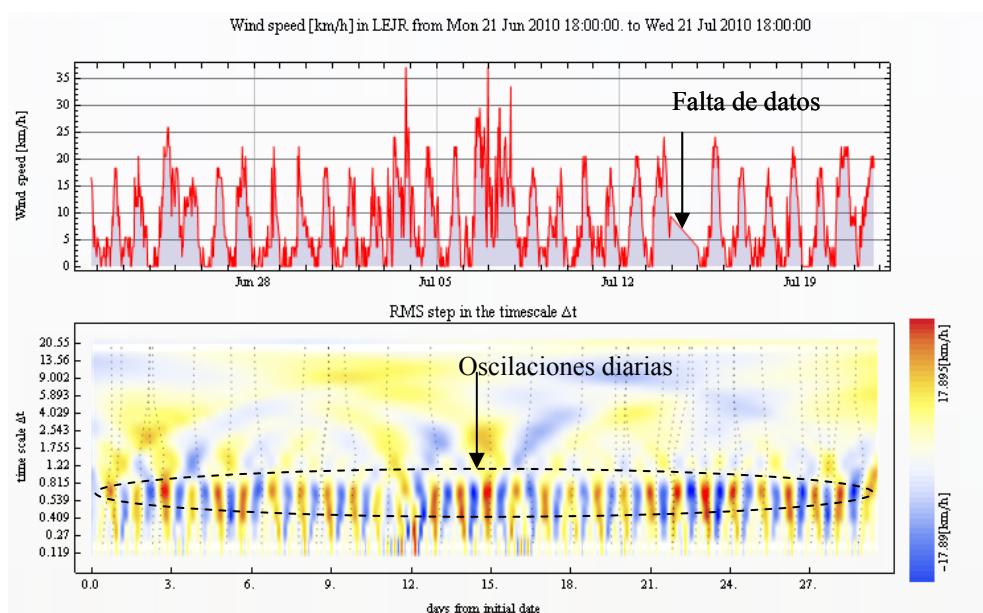
Se observa un pico máximo localizado el 9 de Junio que roza los 50 km/h, y una duración de algo más de 1 día, siendo éste un fenómeno aislado y no repetitivo debido a condiciones infrecuentes en la atmósfera. Sí que vemos una secuencia de picos repetitivos de duración semidiaria con una velocidad media de 10 km/h, representados en la gráfica por colores tirantes a oscuros. Estas rampas de subida y bajada no son ideales sino que presentan irregularidades debido a la naturaleza estocástica del viento.



**Figura 41: Variaciones de viento entre 21/05/10 y 21/06/10**

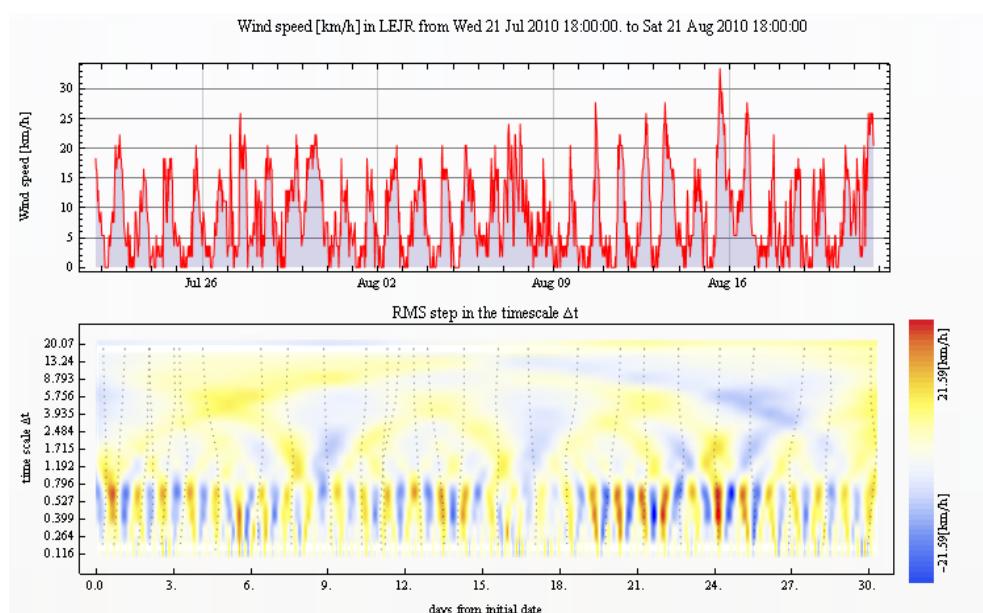
### Junio 2010-Julio 2010:

Durante el verano, seguimos viendo las mismas oscilaciones que en el periodo anterior, claramente distinguimos las variaciones debidas a la acción de los vientos locales. También tenemos el mismo problema que en el emplazamiento de Reus, que es la falta de datos. Este será un problema que acarrearemos durante todo el ejercicio. A modo comparativo con Reus nuestra velocidad media decrece considerablemente (5 km/h).



**Figura 42: Variaciones de viento entre 21/06/10 y 21/07/10**

### Julio 2010-Agosto 2010:

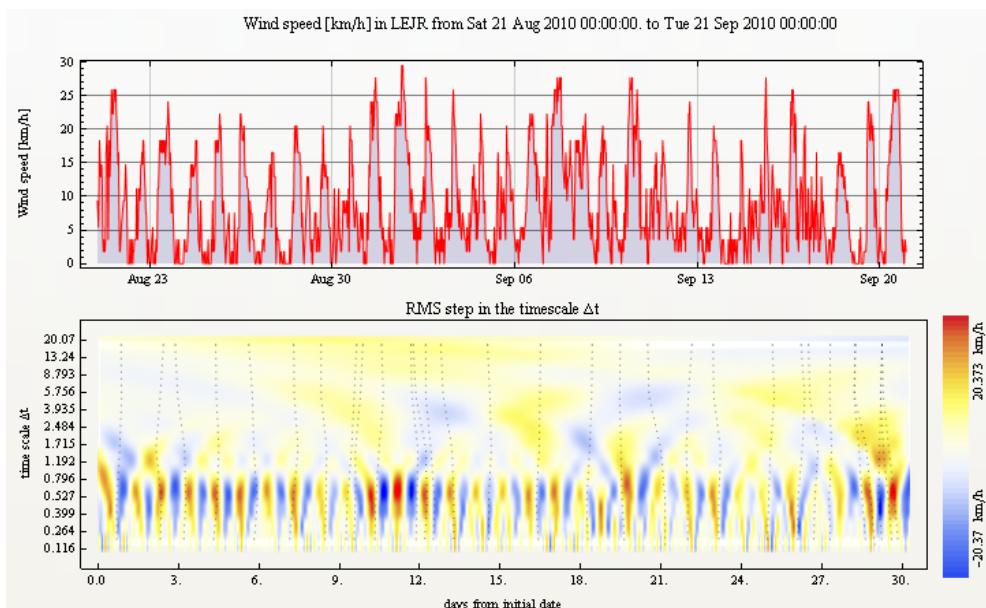


**Figura 43: Variaciones de viento entre 21/07/10 y 21/08/10**

Este segundo mes de verano, la imagen 43 refleja una periodicidad en las oscilaciones de 1 ciclo/día, así como una velocidad media de 10 km/h.

*Agosto 2010-Septiembre 2010:*

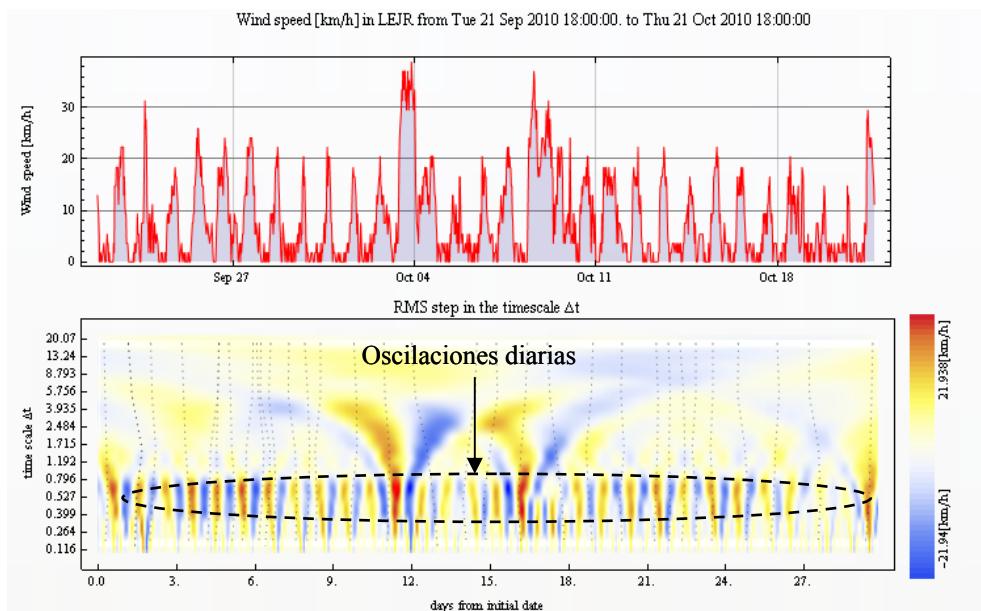
Como explicación a estos cambios de subida y bajada en las variaciones de viento, hacemos referencia a lo acontecido en el aeropuerto de Reus en esta misma estación del verano. Dado que en estos periodos cálidos la brisa alcanza mayor importancia en cuanto a intensidad de soplo y grado de penetración tierra adentro. Lo vemos reflejado con los cambios de subida y bajada en nuestras gráficas.



**Figura 44: Variaciones de viento entre 21/08/10 y 21/09/10**

*Septiembre 2010-Octubre 2010:*

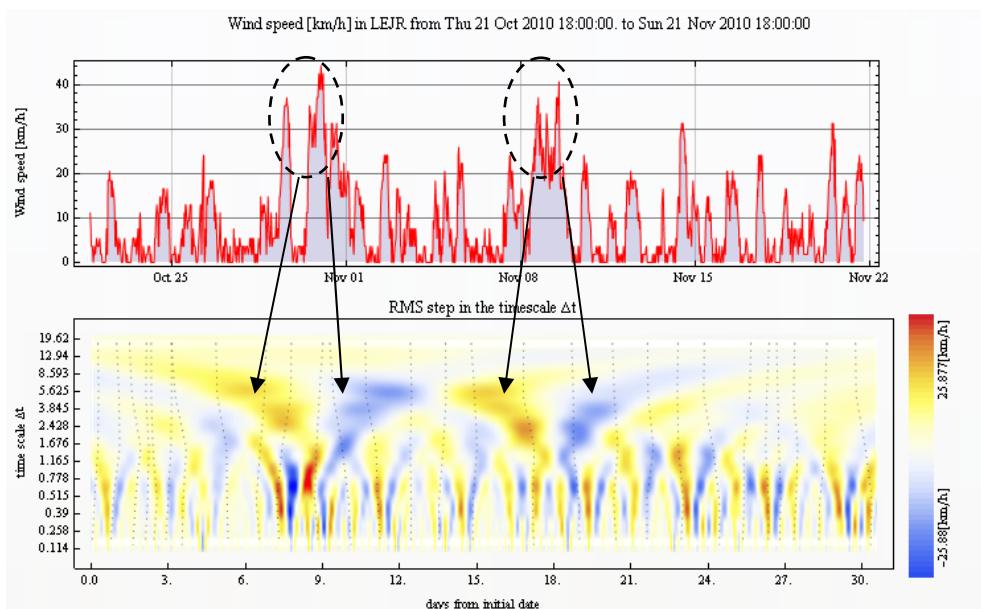
En ambas gráficas vemos una secuencia repetitiva de oscilaciones de modulación diaria y velocidades medidas entorno a 10 km/h. En este periodo, el mar está significativamente más caliente que en pleno invierno.



**Figura 45:** Variaciones de viento entre 21/09/10 y 21/10/10

*Octubre 2010-Noviembre 2010:*

A partir de finales de Octubre las brisas marinas son más débiles debido al enfriamiento del mar. En esta gráfica se observa dos frentes de alta amplitud localizados entre el 30 de Octubre y 1 de Noviembre y entre el 8 y 10 de éste mismo mes. Ambos tienen un pico máximo de 40 km/h, representados con unas importantes rampas de subida y bajada respectivamente, tal como se indica en la figura 46. Estos fenómenos son aislados y de carácter notorio, tal como se ha observado en otras fechas.

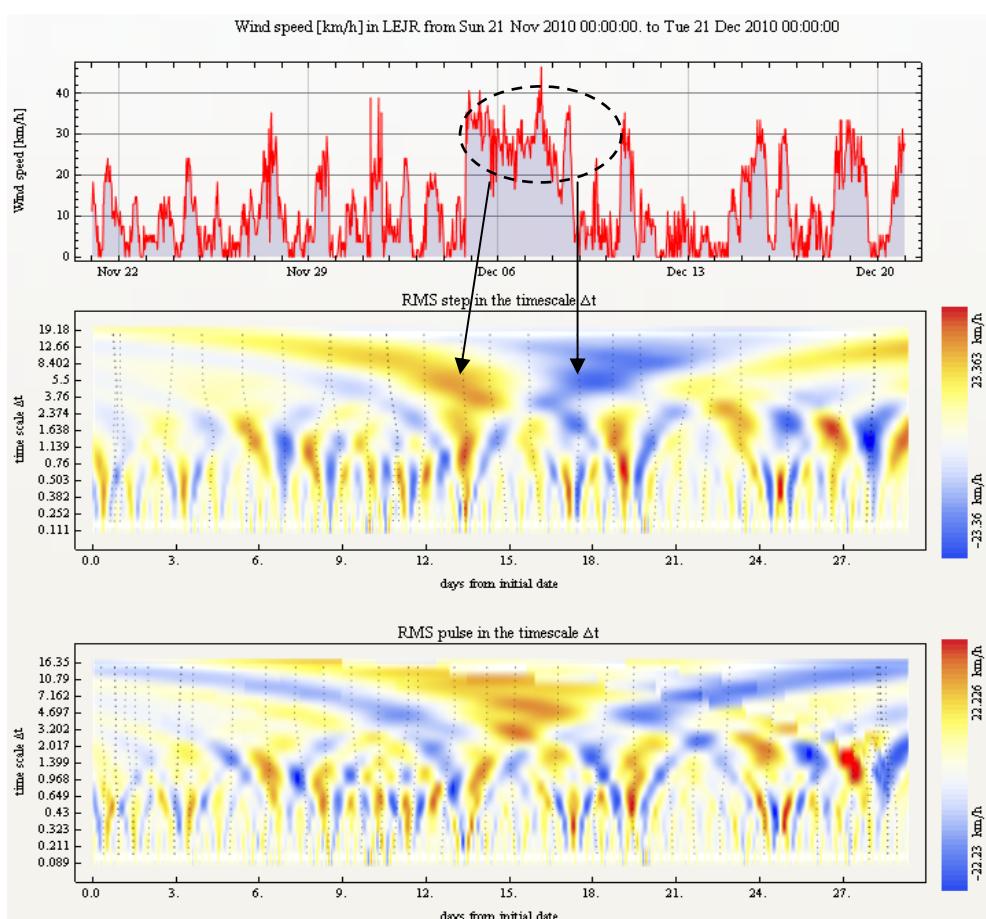


**Figura 46:** Variaciones de viento entre 21/10/10 y 21/11/10

#### *Noviembre 2010-Diciembre 2010:*

En este periodo es conveniente visualizar la gráfica del detector de picos y valles para ver con más detalle el cambio producido en la disposición del viento entre el 5 y 9 de Diciembre. Dicho cambio se produce de forma brusca con una pendiente de subida aproximada a un escalón ideal con una tonalidad rojo oscuro que nos dice que ha subido a 22 km/h, manteniéndose durante un periodo de 5 días para después caer con una misma pendiente, representada con color azul oscuro.

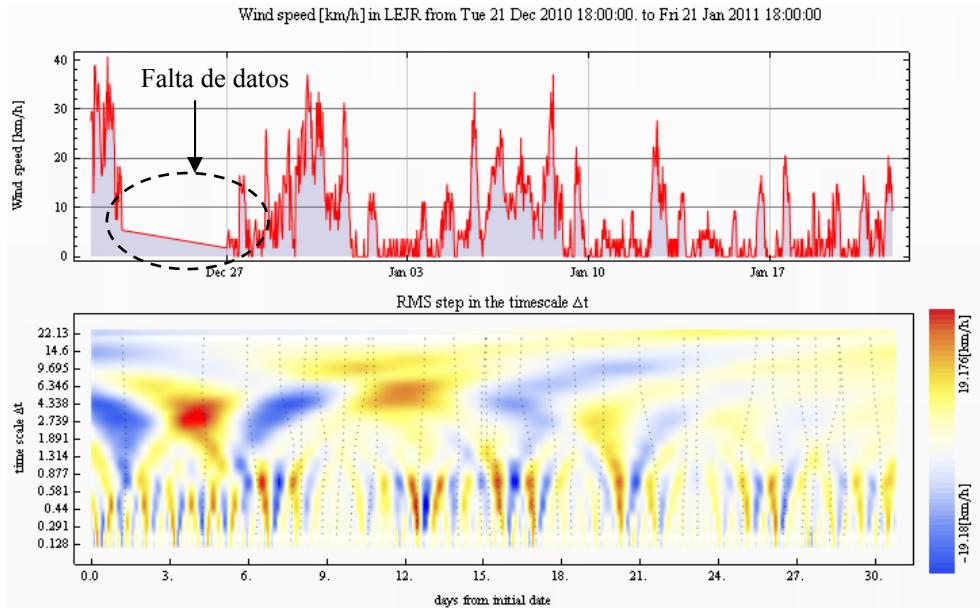
Durante el resto de días observamos las frecuencias de modulación diaria y semidiaria debidas a las brisas locales, aunque con menor fuerza que en verano.



**Figura 47: Variaciones de viento entre 21/11/10 y 21/12/10**

#### *Diciembre 2010-Enero 2011:*

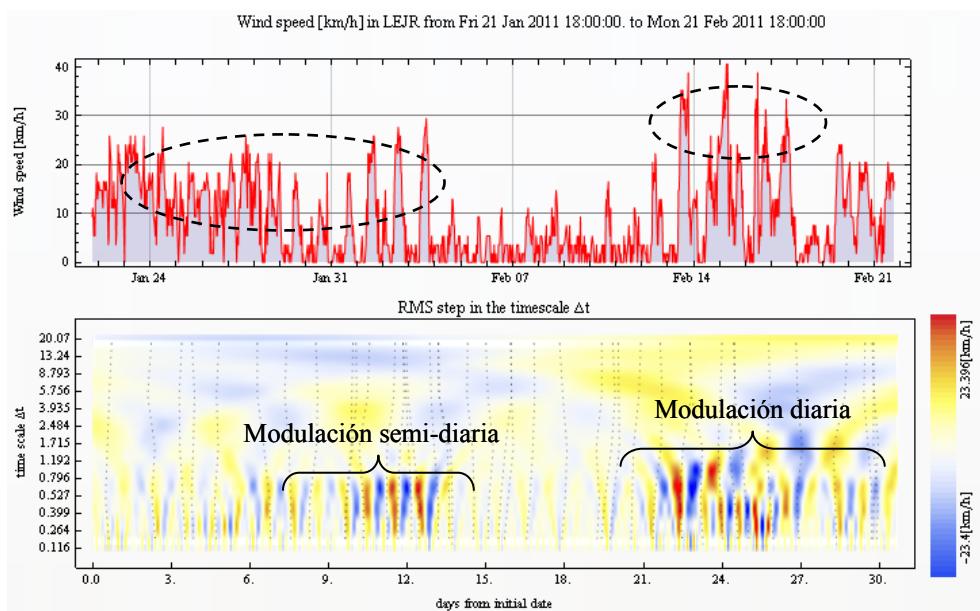
En lo acontecido al periodo de Diciembre-Enero, vemos datos aberrantes provocados por la falta de datos meteorológicos en el servidor, entre el 22 y 27 de Diciembre. No debemos hacer caso de los datos interpolados entre el 22 y 27 de Diciembre. Como observación vemos dos grandes frentes típicos de la estación del invierno, acompañados por unas oscilaciones de frecuencia pequeña y variable con velocidades y duraciones menores entre ellas.



**Figura 48:** Variaciones de viento entre 21/12/10 y 21/01/11

#### Enero 2011-Febrero 2011:

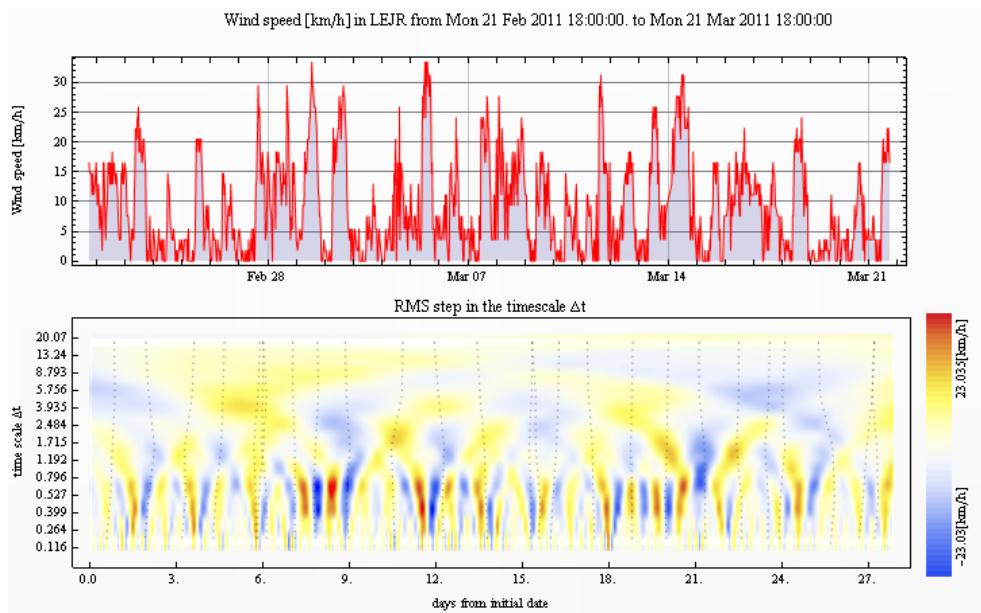
En estas últimas gráficas vemos una similitud, se distinguen dos oscilaciones unas a 30 km/h y otras a 10 km/h, predominando estas últimas con una duración semidiaria. Entre el 4 y el 13 de Febrero hay un periodo de 9 días con calmas.



**Figura 49:** Variaciones de viento entre 21/01/11 y 21/02/11

*Febrero 2011-Marzo 2011:*

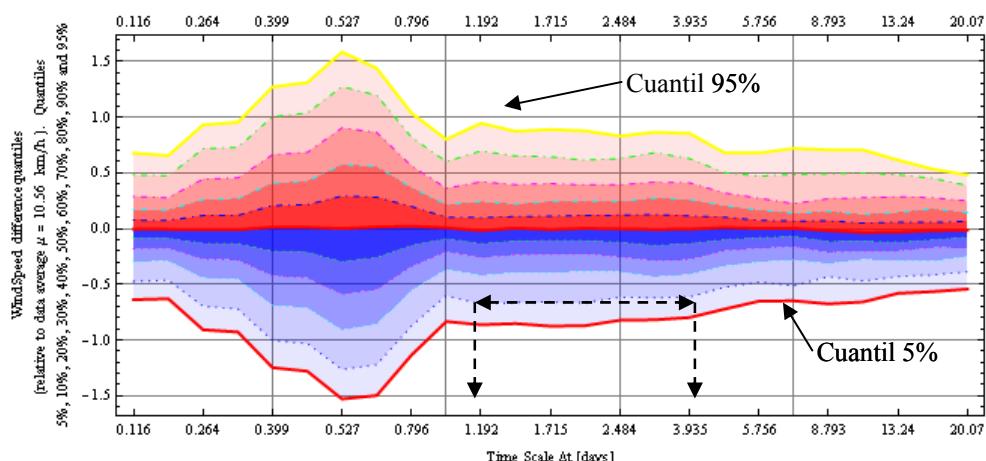
En este último periodo no observamos frentes importantes, tenemos una modulación diaria y repetitiva. Tenemos intervalos con velocidades máximas de 30 km/h y otros intervalos con velocidades de 15 km/h y 5 km/h.



**Figura 50: Variaciones de viento entre 21/02/11 y 21/03/11**

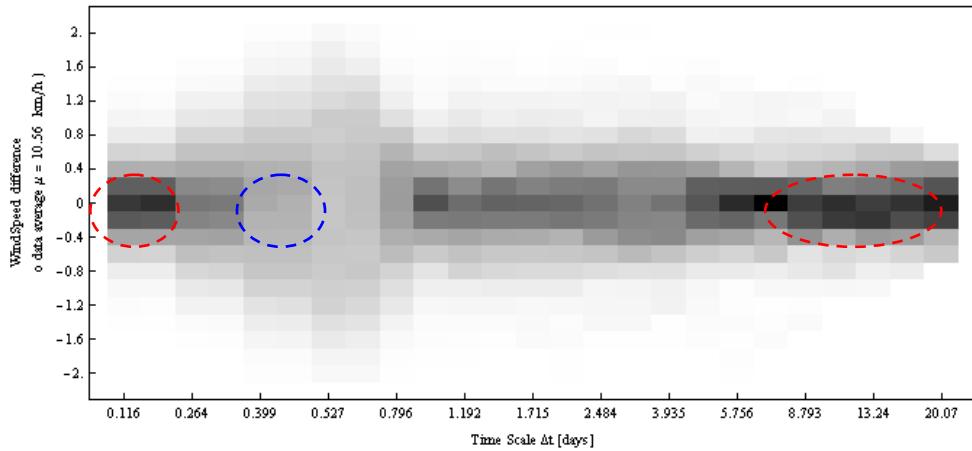
## 5.8. Estudio estadístico de las variaciones de viento

Como complemento a la información de las variaciones de viento, voy a analizar dichos datos de forma representativa mediante 3 gráficas de igual contenido pero en distintos formatos, para el estudio cuantitativo del viento. Dando la suma de ellas una visión más completa y descriptiva de nuestro caso de estudio



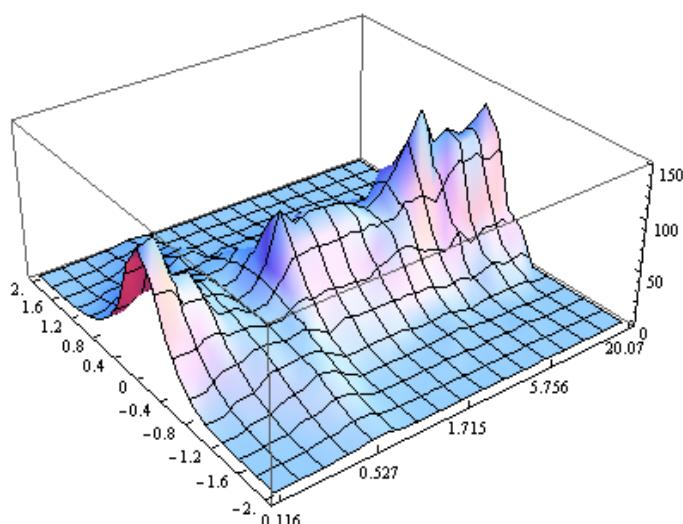
**Figura 51: Rangos cuantiles de las variaciones del viento**

Analizando este caso vemos una gran similitud al expuesto anteriormente del aeropuerto de Reus, con una varianza inicial del 50%. Si nos fijamos en el cuantil de orden 5% (color rojo oscuro), vemos como su predicción inicial es difícil de calcular ya que tiene una variación alta en poco periodo de estudio. En cambio, sí que es factible con un periodo de un día ya que se mantiene prácticamente constante hasta 3 días (periodo encerrado mediante flechas discontinuas). Cuanto más nos desplazemos por el eje temporal vemos que poco a poco nuestros cuantiles van decrementándose, tendentes hacia la homogeneidad.



**Figura 52: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos de gris**

Con vistas a la representación mediante la gama de colores entre negro y blanco, observamos diferentes tonalidades, a una mayor oscuridad se representan aquellos datos que son muy parecidos entre sí (círculo rojos), los cuales podemos asimilarlos con la igualdad entre cuantiles, contrariamente a los colores claros (círculo azul) que representan que nuestro viento es muy variable y nuestra predicción tendrá más incertidumbre. Como ocurre entre el punto de 0.399 días y 0.527 días respectivamente.



**Figura 53: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos en 3D**

En la figura 53 represento la distribución de las frecuencias de ocurrencia de las variaciones en función de su duración. Observamos las variaciones entre 0.2 y 0.6 días, como entre 1.7 y 5 días, siendo estas últimas debidas a frentes o anticiclones. Al tener una perspectiva tridimensional perdemos la información de los cuantiles pero ganamos una visión más clara de las variaciones del viento (rampas de subida y bajada).

## Capítulo 6. Estación meteorológica del aeropuerto de Logroño

### 6.1. Introducción

Los datos se han medido en la estación meteorológica del aeropuerto de Logroño (LELO), que está situado al este de Logroño (La Rioja), en el término municipal de Agoncillo. Su coordenada de latitud es 42.45°, su longitud es -2.33 ° y su altitud sobre el nivel del mar es 353 m.

Los vientos que afectan a la ciudad son los siguientes: desde el norte sopla el Cierzo; del sur, el Abrego, del este, Solano; y del oeste, el Castellano. Los vientos intermedios son, del noreste, el Navarrico; del Noroeste, Regañón; del suroeste, el Burgalés; y del sureste, el Soriano.



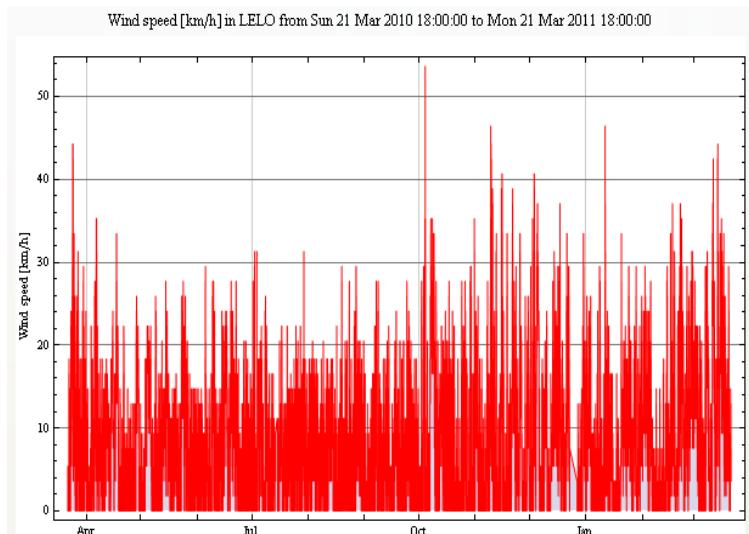
Figura 54: Aeropuerto de Logroño

### 6.2. Histórico de viento

Como datos principales se puede decir de nuestra gráfica que tiene una velocidad media de 8.6 km/h siendo su mediana de 7.5 km/h. La frecuencia de muestreo promedio son 38 datos/día (valores medios cada 37 minutos) porque a finales de Diciembre hay un fallo de datos. Este error se repite a lo largo de nuestros casos de estudio, la explicación la encontramos en la página 18.

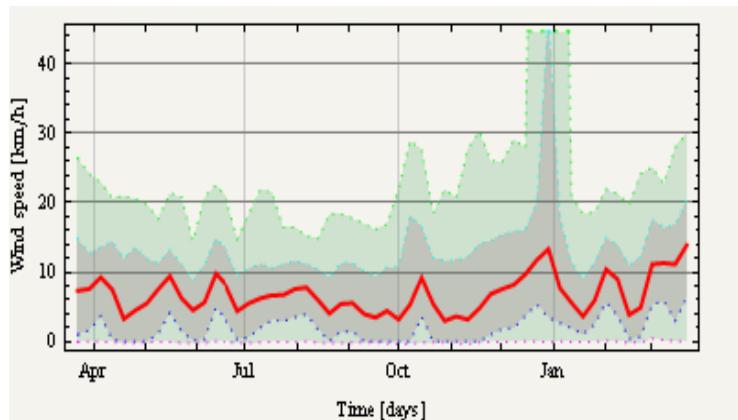
Podemos apreciar que los períodos de tiempo con mayor velocidad media vienen dados por las estaciones de otoño e invierno. Dado que nuestro emplazamiento se

encuentra en el interior de la península los efectos de las brisas marinas tendrán efecto parecido a los producidos por la orografía del terreno.



**Figura 55: Histórico de viento (km/h) en Logroño**

En la siguiente figura represento la velocidad del viento mediante sus cuantiles, siendo su media la línea representada en color rojo. Podemos ver los cambios en la velocidad del viento en amplitud, para poder estudiar los días de esos incrementos.



**Figura 56: Cuantiles 5%, 25%, 50%, 75% y 95% históricos del viento**

### 6.3. Histograma

Represento el histograma para hacernos una idea de cual es la probabilidad de tener un viento con los datos medidos.

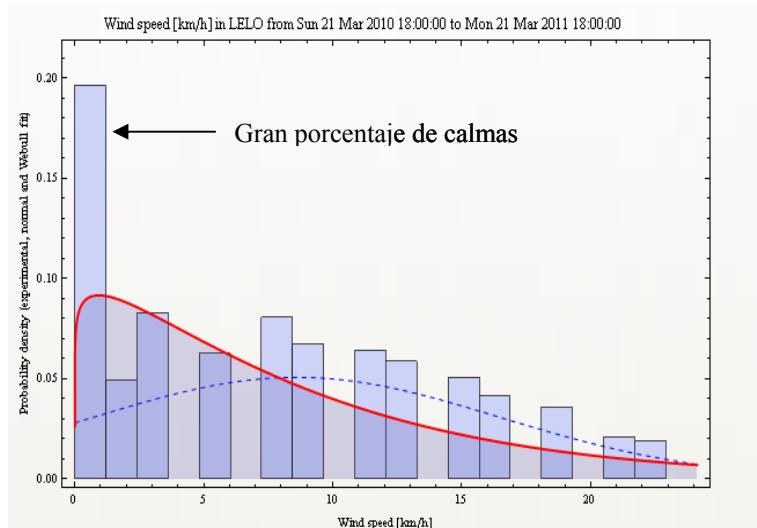


Figura 57: Histograma del viento (km/h) en Logroño

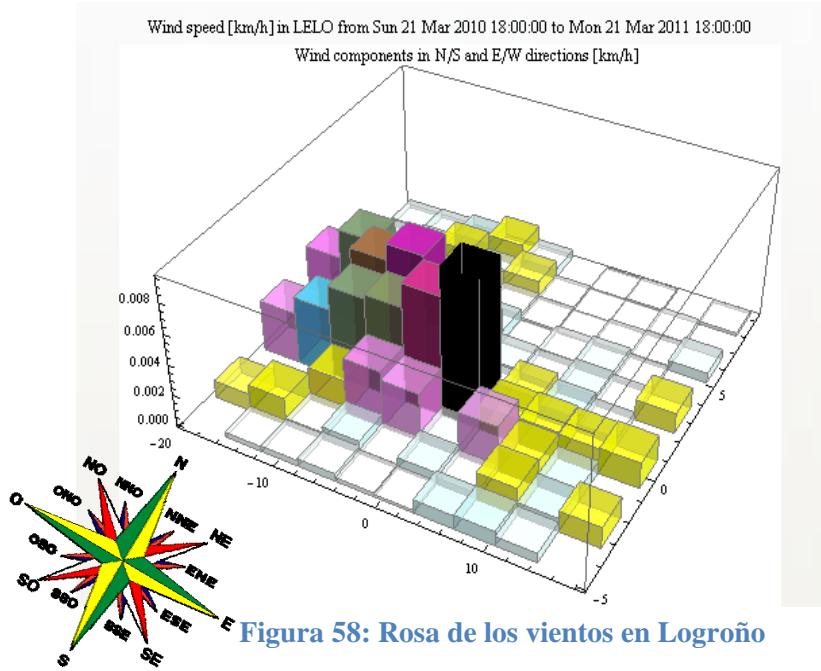
En este emplazamiento hay una gran ocurrencia de calmas, donde el anemómetro registra una velocidad de viento nula. Los anemómetros, junto con los “data loggers” tienen limitaciones para medir velocidades muy bajas de viento y además suelen redondear la velocidad media a 1 decimal o a números enteros. No podemos revisar las especificaciones técnicas y de calibración del sistema de medida del viento para cerciorarnos de que este alto porcentaje de calmas corresponda a situaciones reales.

Como consecuencia del alto número de calmas, la distribución del viento es bimodal y no se adaptan bien ni a la distribución Weibull ni a la distribución normal.

## 6.4. Rosa de los vientos

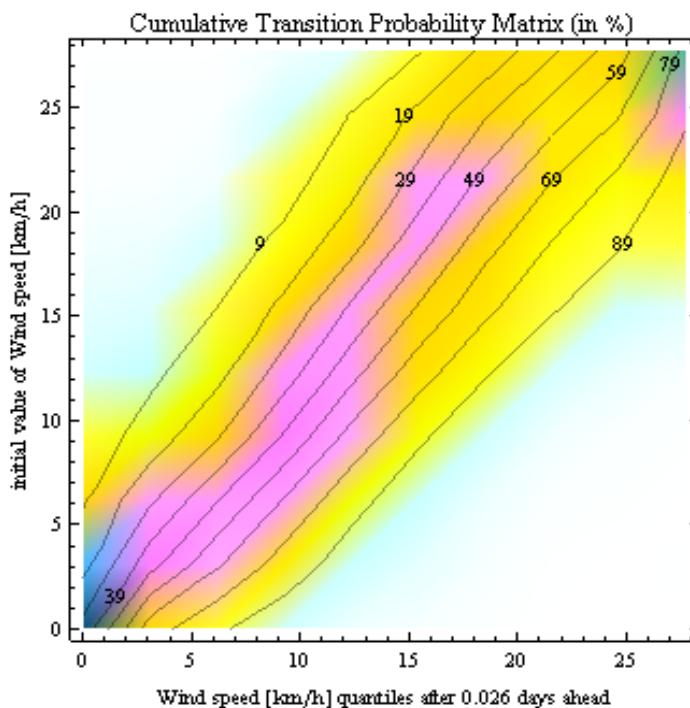
Para mostrar la información sobre las distribuciones de velocidades del viento y la frecuencia de variación de las direcciones del viento, utilice la rosa de los vientos que se basa en observaciones meteorológicas de las velocidades y direcciones del viento.

Al representar la rosa de los vientos, vemos claramente la acción del Cierzo un viento proveniente del Noroeste, cuya zona de influencia es el valle del Ebro y cuyas características son el ser un viento frío y seco. Podemos distinguir en muy poca medida el viento de Bochorno que viene del Sureste y es un viento cálido, aunque su frecuencia de ocurrencia es pequeña.



## 6.5. Matriz de transición

La matriz de transición es cuadrada con tantas filas y columnas como estados tiene el sistema. Los elementos de la matriz representan la probabilidad de que el estado próximo sea el correspondiente a la columna si el estado actual es el correspondiente a la fila. En el caso que nos ocupa representa la probabilidad de tener un viento después de un intervalo de tiempo, considerando únicamente la información del viento medido.



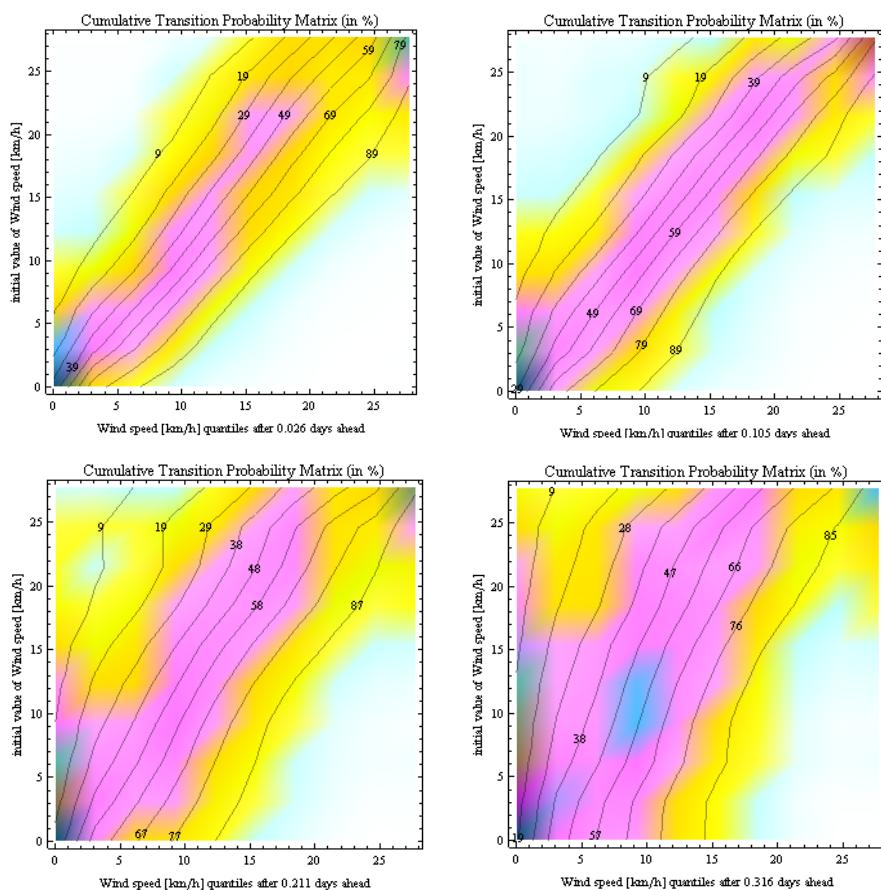
**Figura 59: Matriz de transición (km/h) en Logroño para 1/2 hora**

Cada línea de los cuantiles incrementa el 10% de dichas transiciones, a mayor amplitud entre líneas de los cuantiles menor es el número de transiciones observadas en un rango de viento menor, bajando la probabilidad cosa que ocurre en los cuantiles 9 y 89, teniendo un color más claro.

La matriz se ha desarrollado con un periodo de 0.026 días equivalente a  $\frac{1}{2}$  hora. Como es obvio para velocidades bajas la probabilidad de obtener velocidades bajas es alta indicado por el color oscuro. Las líneas cuantiles para  $\frac{1}{2}$  hora están mucho más separadas que en el resto de emplazamientos, lo que indica que el viento es más cambiante del plazo de  $\frac{1}{2}$  hora respecto a otros emplazamientos.

De modo general se puede afirmar, que la mayor probabilidad de ocurrencia observada en las transiciones, es de un estado a sí mismo.

Ahora vamos a ver que al aumentar el periodo de medición la pendiente de cada línea va en aumento, llegando hasta el punto de ser verticales. El color también se oscurece dando una gran variedad de velocidades probables para un horizonte de 5h o más. Esto indica que la velocidad del viento que habrá en 5h depende de muchos más factores que sólo de la velocidad de viento normal.



**Figura 60: Matrices de transición (km/h)**  
**Periodo 30 minutos, 2.5horas, 5 horas, 7 horas**

## 6.6. Espectro de viento

El espectrograma es una representación visual de las variaciones de la señal a lo largo del tiempo, para su obtención se aplica la transformada corta de Fourier al viento. El periodograma es el promedio de las oscilaciones de la señal.

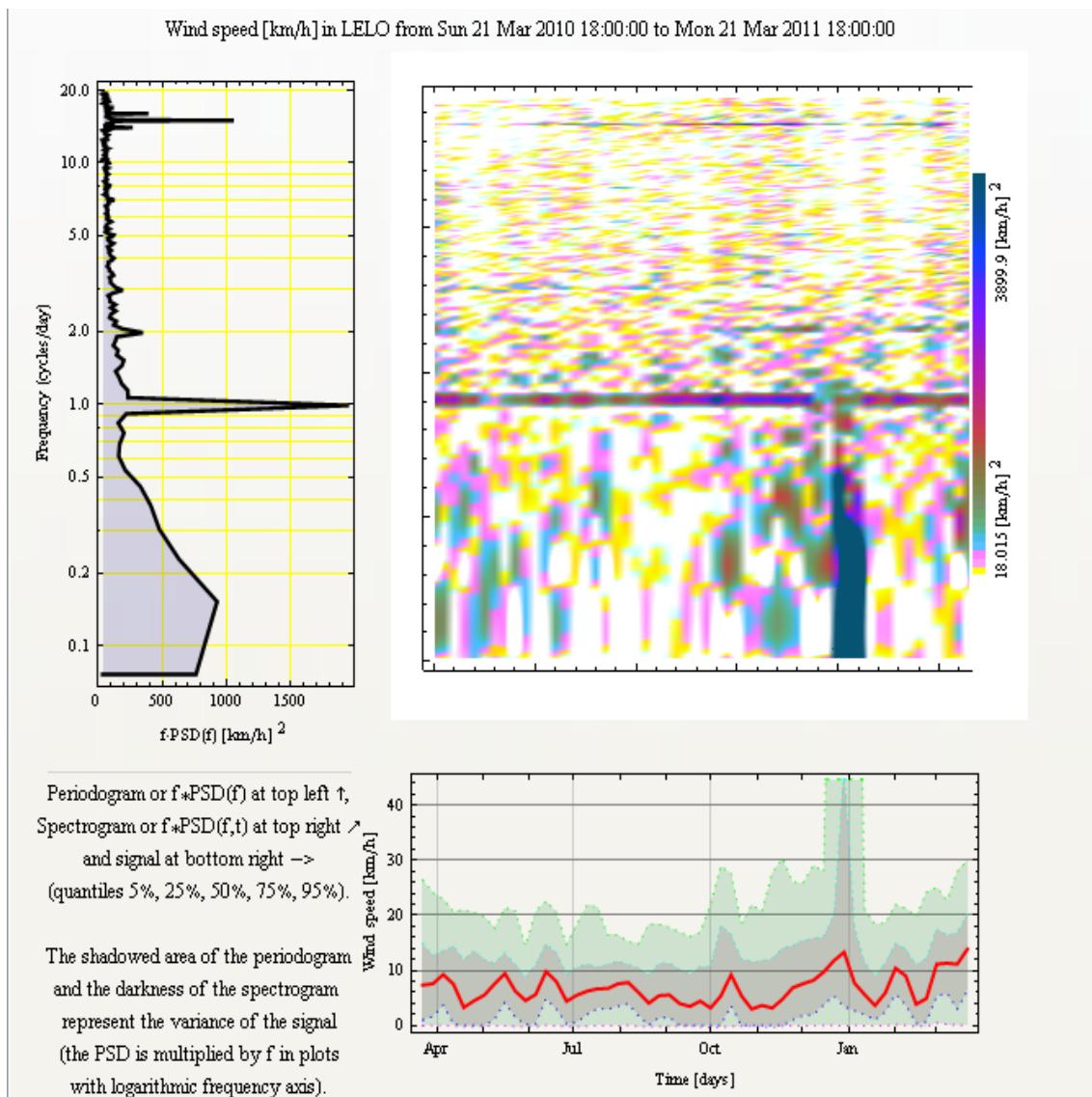


Figura 61: Espectrograma y periodograma de Logroño

Si tenemos en cuenta la escala del periodograma, nos damos cuenta de que el área sombreada (que es proporcional a la varianza espectral del viento) es mayor en términos absolutos. Es decir, es el emplazamiento con mayor variabilidad de los tres analizados. Con una frecuencia de 0.9 ciclos/día tenemos una varianza espectral de  $200 [\text{km/h}]^2$  mientras que Reus y Jerez son de  $500 [\text{km/h}]^2$ .

Observando el espectro de viento, vemos un pico principal a una frecuencia de 1 ciclo/día, derivado de las diferencias entre el día y la noche. Las oscilaciones de 2 ciclos/día y 3 ciclos/día usualmente asociadas a la brisa marina y la orografía del

terreno (brisas valle) son pequeñas. El grueso de las variaciones de viento corresponden a los frentes meteorológicos, que no tienen una frecuencia característica sino que suceden habitualmente cada 3 a 12 días (frecuencia entre 0.33 y 0.08 ciclos/día).

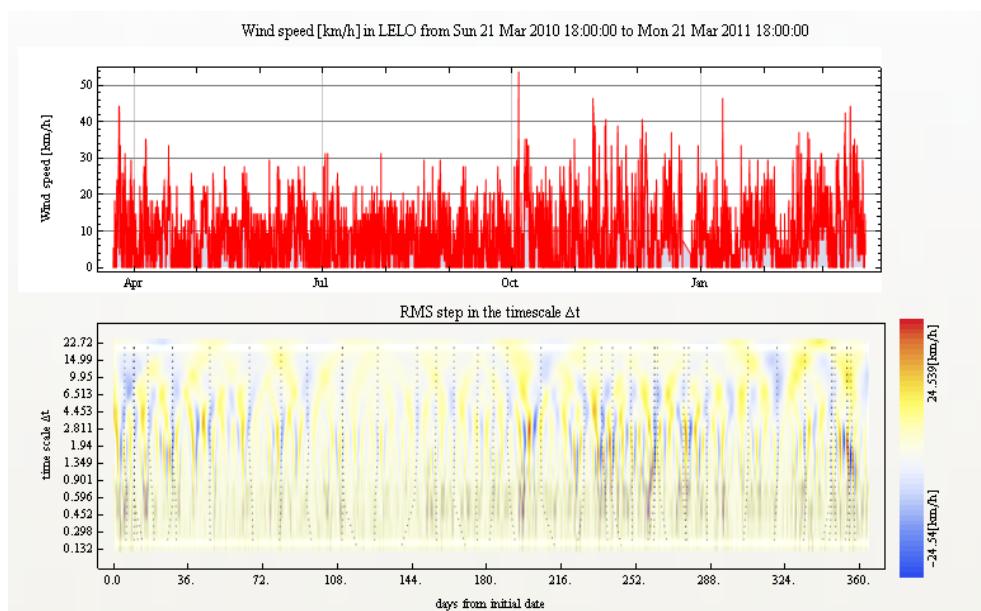
## 6.7. Variaciones de viento

En emplazamientos anteriores he detallado como se formaban las variaciones de viento debido a las variaciones diarias y a las brisas marinas pero ahora estamos analizando unos datos tomados en el Valle del Ebro, al sur de los montes Vascos. En este emplazamiento se ha de añadir el efecto provocado por las brisas valle-montaña.

A modo de explicación, la formación de dichas brisas se producen porque los rayos solares inciden desigualmente en las laderas de las montañas y en los valles; asimismo, varían su ángulo de incidencia a lo largo del día según la trayectoria del sol. Esto genera un flujo de aire condicionado por los centros de alta y baja presión producidos por las diferencias térmicas diarias que se desarrollan entre el valle y las montañas.

En este caso, las laderas de solana se calientan más rápidamente que los fondos de valles de un cordón montañoso. El flujo de aire durante el día va desde el valle hacia las partes más altas. Esto es en dos sentidos: a lo largo del valle hacia los sectores superiores y desde el fondo del valle hacia las laderas.

En la noche se produce el enfriamiento rápido de las laderas respecto del valle y los vientos cambian, el aire desciende por enfriamiento hasta el fondo del valle levantando el aire aun cálido que mantienen estos.

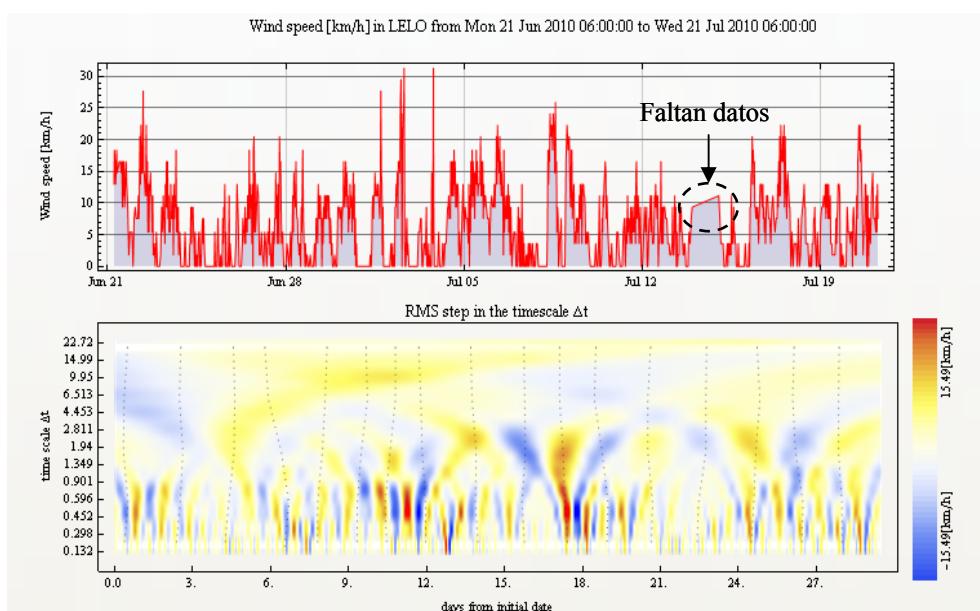


**Figura 62: Variaciones de viento (km/h) en Logroño entre 21/03/10 y 21/03/11**

Asimismo como en emplazamientos anteriores, muestro las variaciones a lo largo del periodo anual que he tomado desde el inicio.

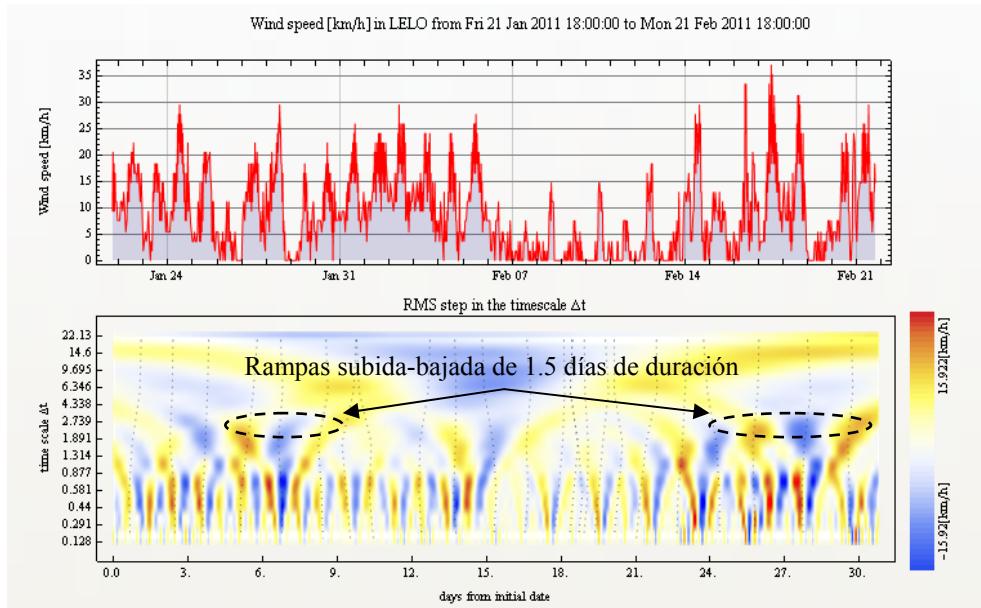
Como se hace prácticamente imposible distinguir las variaciones con un periodo tan extenso, voy a resaltar aquellos periodos que comprenda que son más relevantes para hacernos una idea del cambio de dichos fenómenos.

La siguiente gráfica refleja la estación del verano. Ya no apreciamos tan claramente esas rampas tan abruptas como las observadas en los aeropuertos de Reus y Jerez, si bien es cierto que es en verano cuando más variaciones tenemos debido a la mayor duración del día respecto a periodos de invierno. Vemos que al no ser un emplazamiento cercano al mar las brisas marinas apenas afectan respecto a los aeropuertos anteriormente citados.



**Figura 63: Variaciones de viento entre 21/06/10 y 21/07/10**

Quiero resaltar de la gráfica 64, las variaciones de viento que se producen a una frecuencia de 3 ciclos/día. Ellas son debidas a la orografía del terreno, su efecto son las brisas valle anteriormente explicadas. Podemos ver en todo el periodo rampas de subida y de bajada de 1.5 ciclos/día aproximadamente de manera constante. Con una velocidad media de 9 km/h. Se observan periodos en el que tenemos unas oscilaciones con gran variabilidad, entre los días 25 y 30 Enero y entre el 15 y 20 de Febrero.

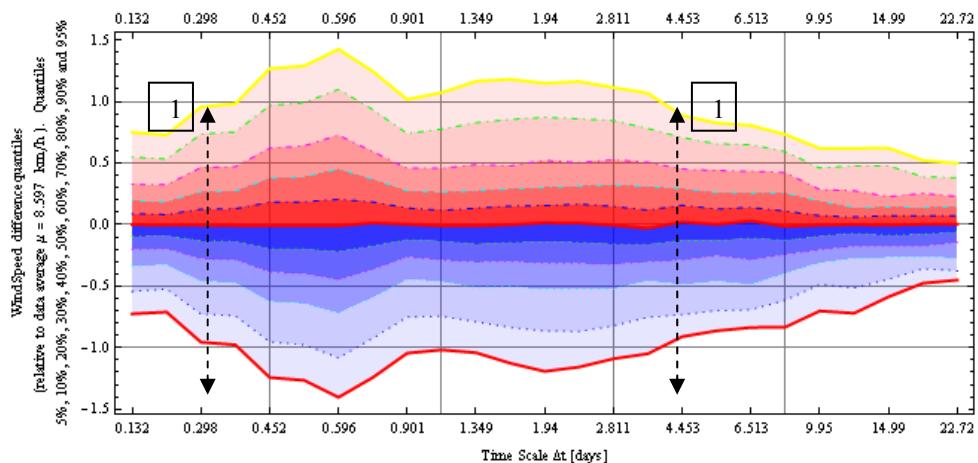


**Figura 64: Variaciones de viento entre 21/01/11 y 21/02/11**

Con estas dos gráficas mostradas queda de manifiesto el cambio producido al ubicar nuestra estación cercana al mar o alejada. No me parece de mayor interés el ampliar este apartado con más gráficas repetitivas siendo que ya se ha demostrado la forma de obtenerlas.

## 6.8. Estudio estadístico de las variaciones de viento

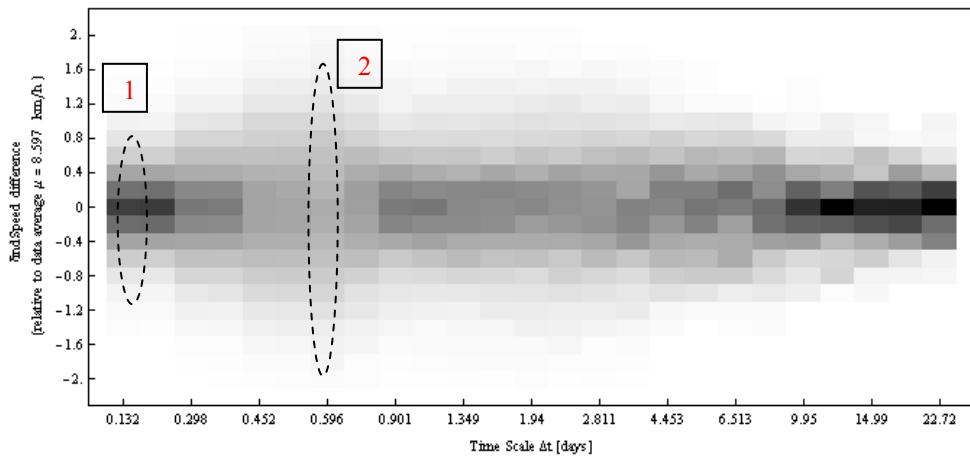
Para poder tener una mayor información sobre los cambios que se producen a lo largo de nuestro periodo de estudio, voy a realizar un análisis estadístico de las variaciones anteriormente descritas.



**Figura 65: Rangos cuantiles de las variaciones del viento**

En orden descriptivo, voy a representar dicha información mediante 3 gráficas. La primera de ellas es la mostrada en la figura 65. Estoy representando mediante 11 trazados los cuantiles comprendidos entre el 5% y 95% para caracterizar la distribución de las variaciones de viento, en la figura 27 se indica el orden de los cuantiles.

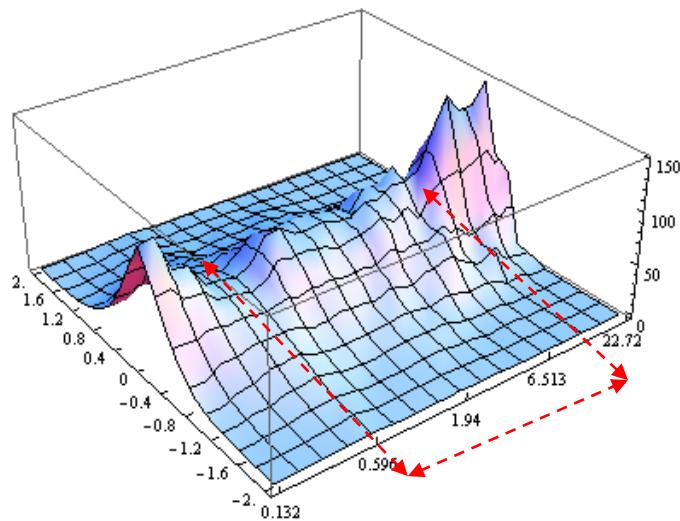
Concretando en nuestro caso, vemos una serie de variaciones tanto de subida como de bajada. Como ejemplo tomando el cuantil del 95%, con el cual tenemos casi la totalidad de los datos, podemos decir que desde el inicio hasta 0.298 días (7 horas) se ha experimentado una subida relativa del 90% (punto 1). Vemos que este incremento también es el mismo cuando tenemos un periodo de 4.453 días (punto 2).



**Figura 66: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos de gris**

Estoy representando por cada franja de divisiones rectangulares la misma cantidad de datos respecto en el eje temporal, así en 0.132 días (punto 1) distinguimos un rectángulo negro, dos grises y los demás claroscuros pero en un periodo de 0.596 días (punto 2) tenemos los mismos datos con mayor dispersión, pero dibujados en tonalidades claras. Si comparamos este análisis estadístico con los realizados en Reus y Jerez vemos que la dispersión de tonalidades claras es mayor, dado que tenemos un periodo caracterizado por calmas.

Al representar los datos tridimensionalmente (figura 67), lo primero que resalta a la vista es que durante 10 días no vemos variaciones importantes de viento (representado mediante flechas de color rojo). Este tipo de periodos de calmas son de valor importante para empresas dedicadas a la medición del viento, ya que si se mantiene una velocidad del viento entre 10 m/s y 20 m/s, sería considerable hacer estudio más exhaustivo para la posible instalación de un parque eólico.



**Figura 67: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos en 3D**

## Capítulo 7. Estación meteorológica del aeropuerto de Valladolid

### 7.1. Introducción

Los datos se han medido en la estación meteorológica del aeropuerto de Valladolid (LEVD), que está situado en el término municipal de Villanubla en la provincia de Valladolid, a 10 km de la capital provincial. Su coordenada de latitud es 41.71°, su coordenada de longitud es -4.85 y su altitud sobre el nivel del mar es 849 m.

El viento que más afecta es el que proviene del Noroeste, llamado viento Gallego, que es frío y húmedo. En este emplazamiento notamos la acción del Bochorno proveniente del Suroeste.



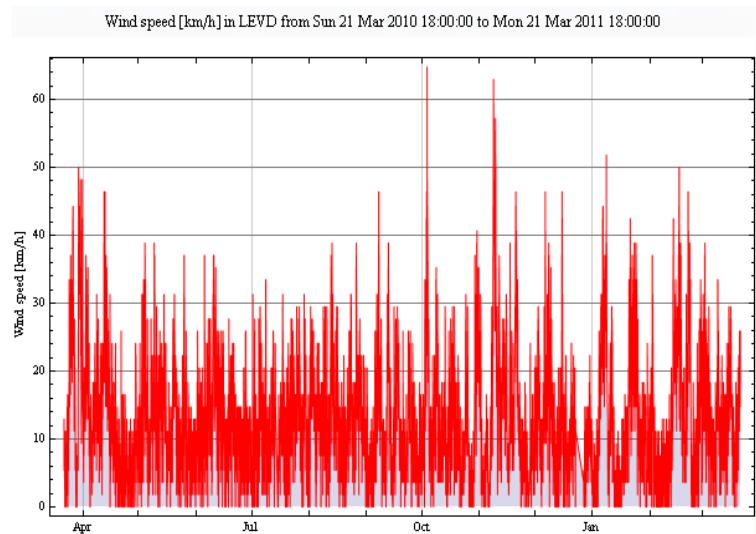
Figura 68: Aeropuerto de Valladolid

### 7.2. Histórico de viento

En la figura 66 vemos la evolución del viento en el periodo comprendido entre Marzo de 2010 y Marzo de 2011. Medimos una velocidad media de 13 km/h, la máxima en comparación a los otros casos analizados y la mediana es de 11 km/h.

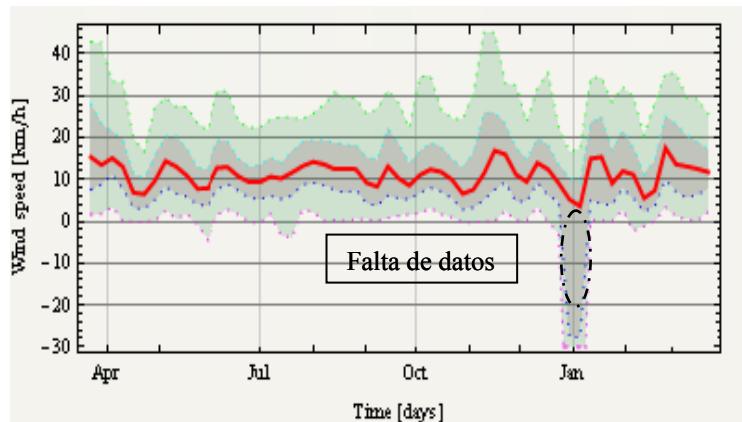
La mejor forma de medir la velocidad del viento en una futura localización de una turbina eólica, es situar un anemómetro en el extremo superior de un mástil que tenga la misma altura que la altura de buje esperada de la turbina que se va a utilizar. Esto evita la incertidumbre que conlleva el recalcular la velocidad del viento a una altura diferente.

Al tomar las muestras a una altitud cercana a 900 m sobre el nivel del mar, la orografía influye totalmente en las variaciones. Los datos corresponden a los valores medios de cada  $\frac{1}{2}$  hora (48 muestras/día).



**Figura 69: Histórico de viento (km/h) en Valladolid**

En la siguiente figura se observa la relación entre cuantiles (5%, 25%, 50%, 75% y 95%). Podemos ver que las oscilaciones son continuas a lo largo del año, exceptuando un periodo de calmas comprendido entre Junio y Septiembre.

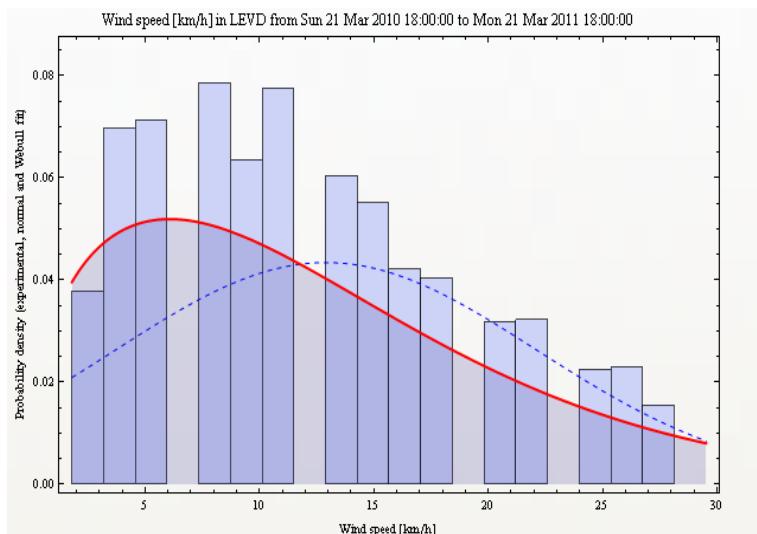


**Figura 70: Cuantiles 5%, 25%, 50%, 75% y 95% históricos del viento**

### 7.3. Histograma

El histograma es una representación gráfica de valores en forma de barras donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados.

El histograma es la frecuencia de ocurrencia de los datos y sirve para conocer la distribución estadística de los datos.



**Figura 71: Histograma del viento (km/h) en Valladolid**

Al observar las representaciones Weibull y normal, vemos que la Weibull es la que más se asemeja a los nuestros datos ya que tiene una distribución uniforme a lo largo de toda ella.

## 7.4. Rosa de los vientos

Las rosas de los vientos varían de un lugar a otro. Son en realidad una especie de huella meteorológica. La información de cada rosa de viento muestra la frecuencia de ocurrencia de los vientos en 16 sectores de dirección (N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSO, SO, OSO, O, ONO, NO y NNO) y en clases de velocidad del viento para un emplazamiento y un periodo de tiempo dado. En las estaciones meteorológicas se utilizan generalmente la veleta y el anemómetro para conocer los valores correspondientes a la dirección y la velocidad del viento respectivamente.

Debido a las influencias locales de terreno, efectos de costa y variabilidad temporal del viento. La estadística de la rosa de vientos puede no ser siempre representativa de los vientos de un área.

La disposición de nuestra estación a nivel orográfico está localizada en la meseta septentrional. El viento que más afecta es el que proviene del Noroeste, llamado viento Gallego que es frío y húmedo, también notamos el Bochorno proveniente del Suroeste.

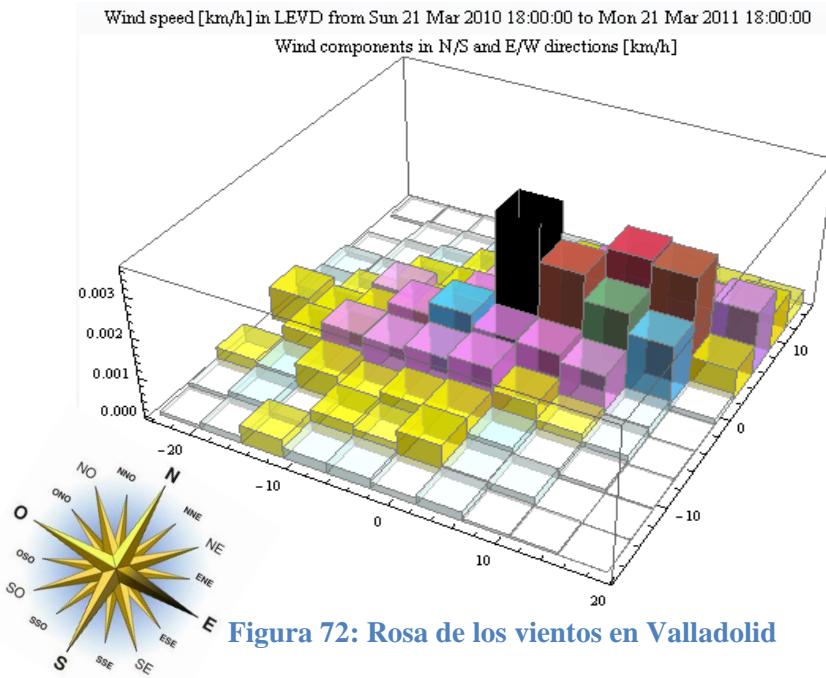


Figura 72: Rosa de los vientos en Valladolid

## 7.5. Matriz de transición

A la hora de analizar procesos estocásticos utilizamos las cadenas de Markov, para ajustar un modelo teórico que nos permita hacer predicciones sobre el comportamiento futuro de un proceso. Una matriz de transición de Markov es una matriz cuadrada que describe las probabilidades de pasar de un estado a otro en un sistema dinámico.

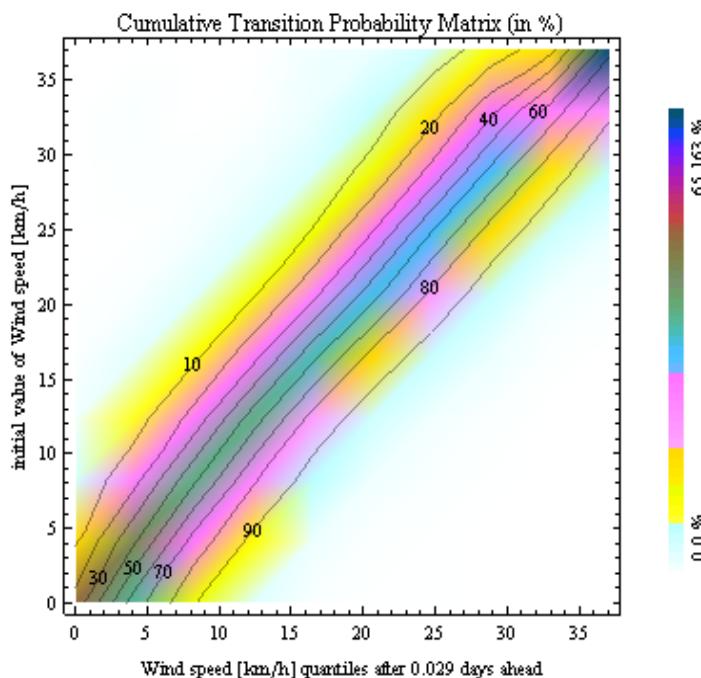


Figura 73: Matriz de transición (km/h) en Valladolid para ½ hora

## 7.6. Espectro de viento

A la hora de representar el espectro, el programa Windfreedom nos da la posibilidad de analizarlo con un spectrograma y periodograma, para poder ver las oscilaciones de nuestro viento a lo largo del tiempo.

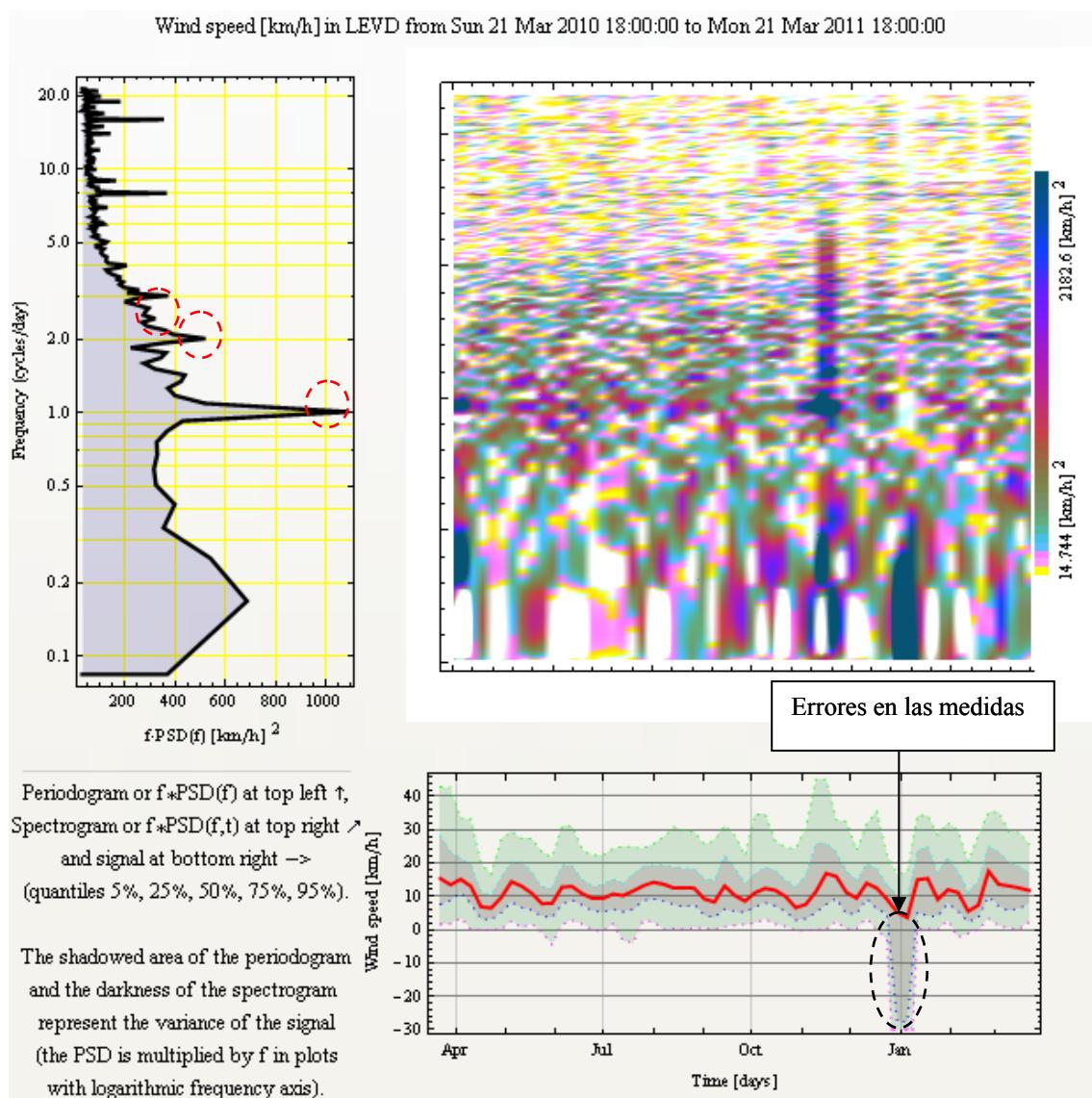


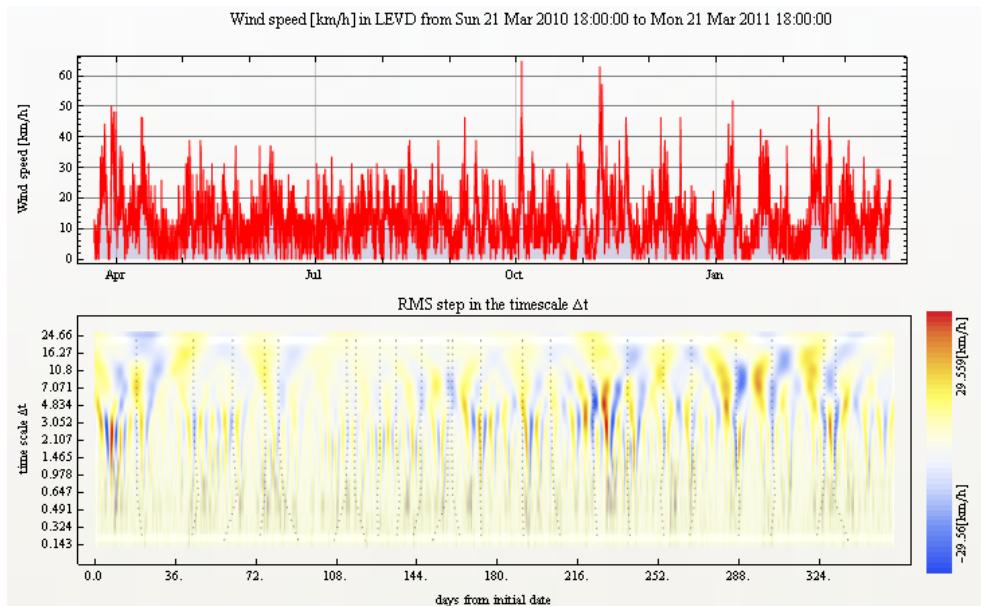
Figura 74: Espectrograma y periodograma de Valladolid

Podemos apreciar grandes variaciones de viento (círculos de color rojo), al tener nuestra estación una altitud elevada las oscilaciones del viento son continuas provocadas en gran medida por sus vientos locales (brisas de montaña).

Vemos un fallo en la toma de datos (Enero) y su posterior tratado porque nunca podremos tener velocidades negativas, como aparece en Enero, como información fiable nos quedamos con las oscilaciones de entre 1,2 y 3 ciclos/día.

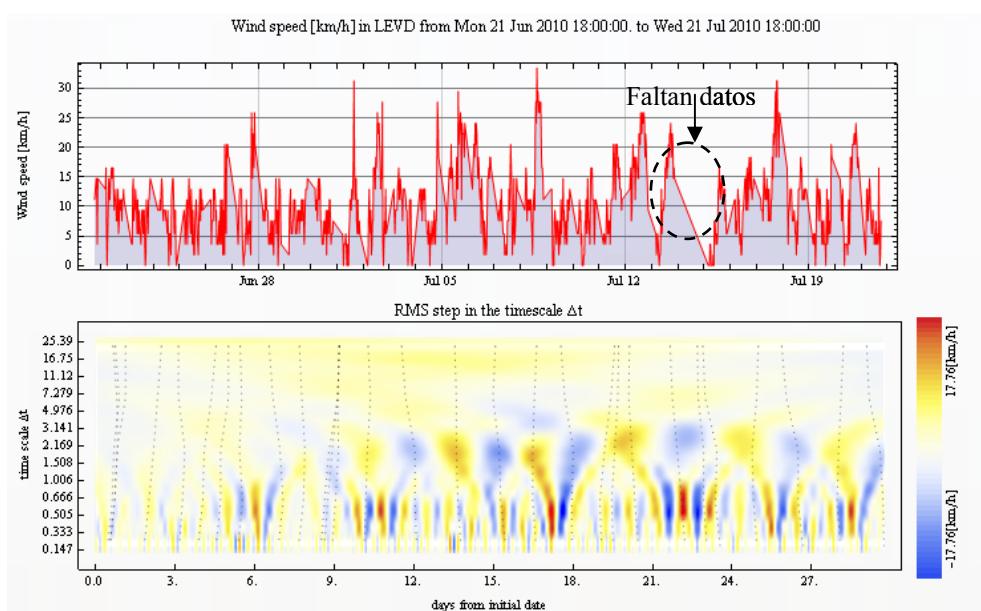
## 7.7. Variaciones de viento

Con el programa Windfreedom, podemos hacer uso de una aplicación para ver la evolución temporal del viento, representado por el eje de abscisas la duración y por el de ordenadas la amplitud del cambio. Respecto al aeropuerto de Valladolid vamos a tener muchas similitudes comparadas con el de Logroño ya que ambos son afectados por las brisas valle (3 ciclos/día), con mayor incidencia en Valladolid dado que su altitud y la medida de la velocidad del viento es mayor.



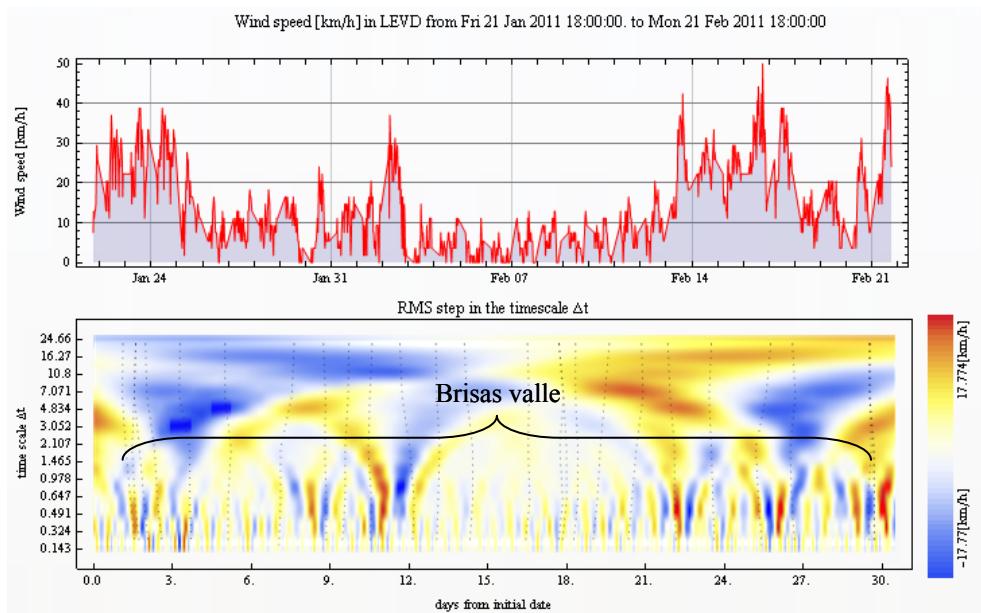
**Figura 75: Variaciones de viento (km/h) en Valladolid entre 21/03/10 y 21/03/11**

Si tomamos el mismo periodo que el analizado en el capítulo anterior, observamos las mismas tendencias, con variaciones debidas a las brisas valle y a las oscilaciones diarias.



**Figura 76: Variaciones de viento entre 21/06/10 y 21/07/10**

Un ejemplo de viento es el que se origina en las laderas que dan al sur (ó en las que dan al norte en el hemisferio sur). Cuando las laderas y el aire próximo a ellas están calientes la densidad del aire disminuye, y el aire asciende hasta la cima siguiendo la superficie de la ladera. Durante la noche la dirección del viento se invierte, convirtiéndose en un viento que fluye ladera abajo. Si el fondo del valle está inclinado, el aire puede ascender y descender por el valle; este efecto es conocido como brisas de montaña. Este efecto se aprecia claramente en el periodograma de la figura 74.



**Figura 77: Variaciones de viento entre 21/01/11 y 21/02/11**

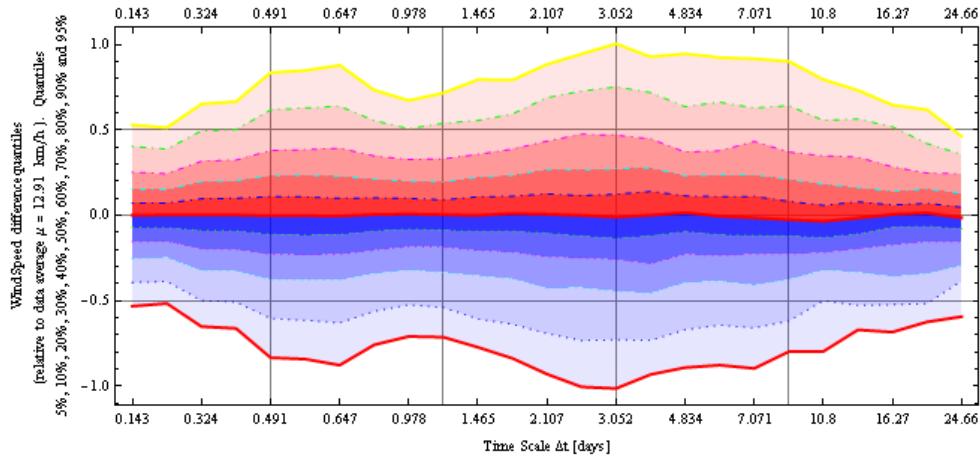
## 7.8. Estudio estadístico de las variaciones de viento

Los cuantiles son aquellos valores de la variable, que ordenados de menor a mayor, dividen a la distribución en partes, de tal manera que cada una de ellas contiene el mismo número de frecuencias. Cuando la distribución contiene un número alto de intervalos y se requiere obtener un promedio de una parte de ella, se puede dividir la distribución en cuatro, en diez o en cien partes. Los más usados son los cuartiles, cuando dividen la distribución en cuatro partes; los deciles, cuando dividen la distribución en diez partes y los centiles o percentiles, cuando dividen la distribución en cien partes.

Como explicación estadística diré que los cuartiles son los tres valores que dividen al conjunto de datos ordenados en cuatro partes porcentualmente iguales.

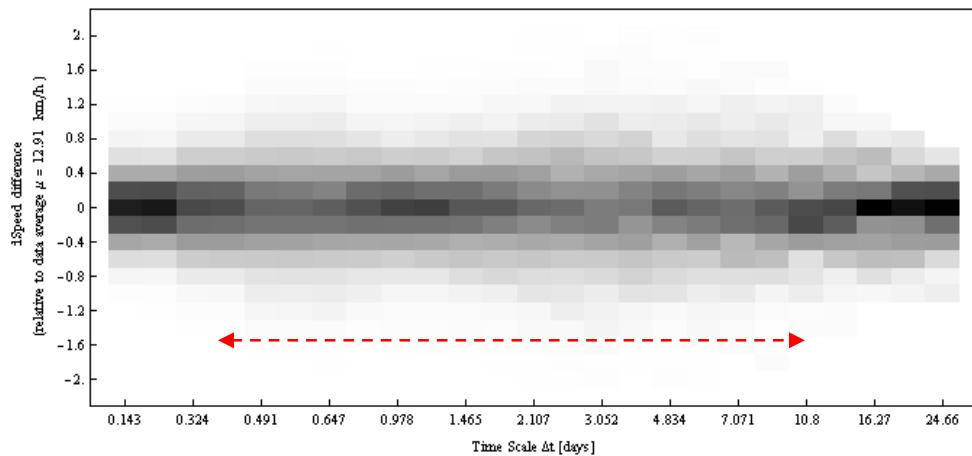
Hay tres cuartiles denotados usualmente Q1, Q2, Q3. El segundo cuartil es precisamente la mediana. El primer cuartil, es el valor en el cual o por debajo del cual queda un cuarto (cuantil de orden 25%) de todos los valores de la sucesión (ordenada); el tercer cuartil, es el valor en el cual o por debajo del cual quedan las tres cuartas partes (cuantil de orden 75%) de los datos.

En la figura 78 se muestran los cuantiles en orden ascendente, desde el cuantil del 5% (dibujado en color rojo) hasta el del 95% (en color amarillo). La forma de analizar los datos se vio en el capítulo 4.8.



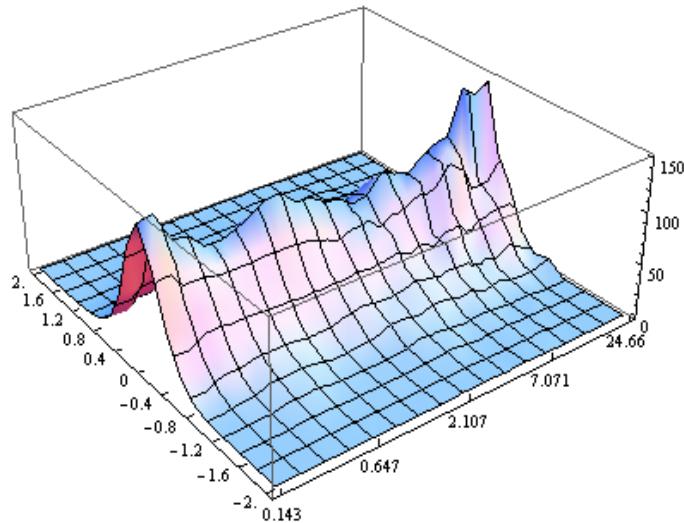
**Figura 78: Rangos cuantiles de las variaciones del viento**

La imagen 79 nos refleja lo visto anteriormente, tenemos una gran dispersión de los datos a lo largo de todo el periodo, no podemos realizar una predicción fiable debido a los cambios del viento. Las cotas van desde 0.4 días hasta 10 días con una gran amplitud de señal.



**Figura 79: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos de gris**

A la hora de implementar los datos en 3 dimensiones, vemos claramente como en la zona media del eje temporal los datos son prácticamente constantes, existe una gran dispersión. Sin embargo en tanto en las horas iniciales como en los días finales del año se nota una mayor concentración de información.



**Figura 80: Probabilidad de las variaciones, representadas en tonos en 3D**

## Capítulo 8. Comparación espectral de dos estaciones

### 8.1. Introducción

El análisis de la correlación entre variables espaciales se realiza por medio de la coherencia espectral, que se calcula a través de la función de densidad espectral cruzada para pares de procesos [Mur Amada, Joaquín, 2009: 4.18-4.19].

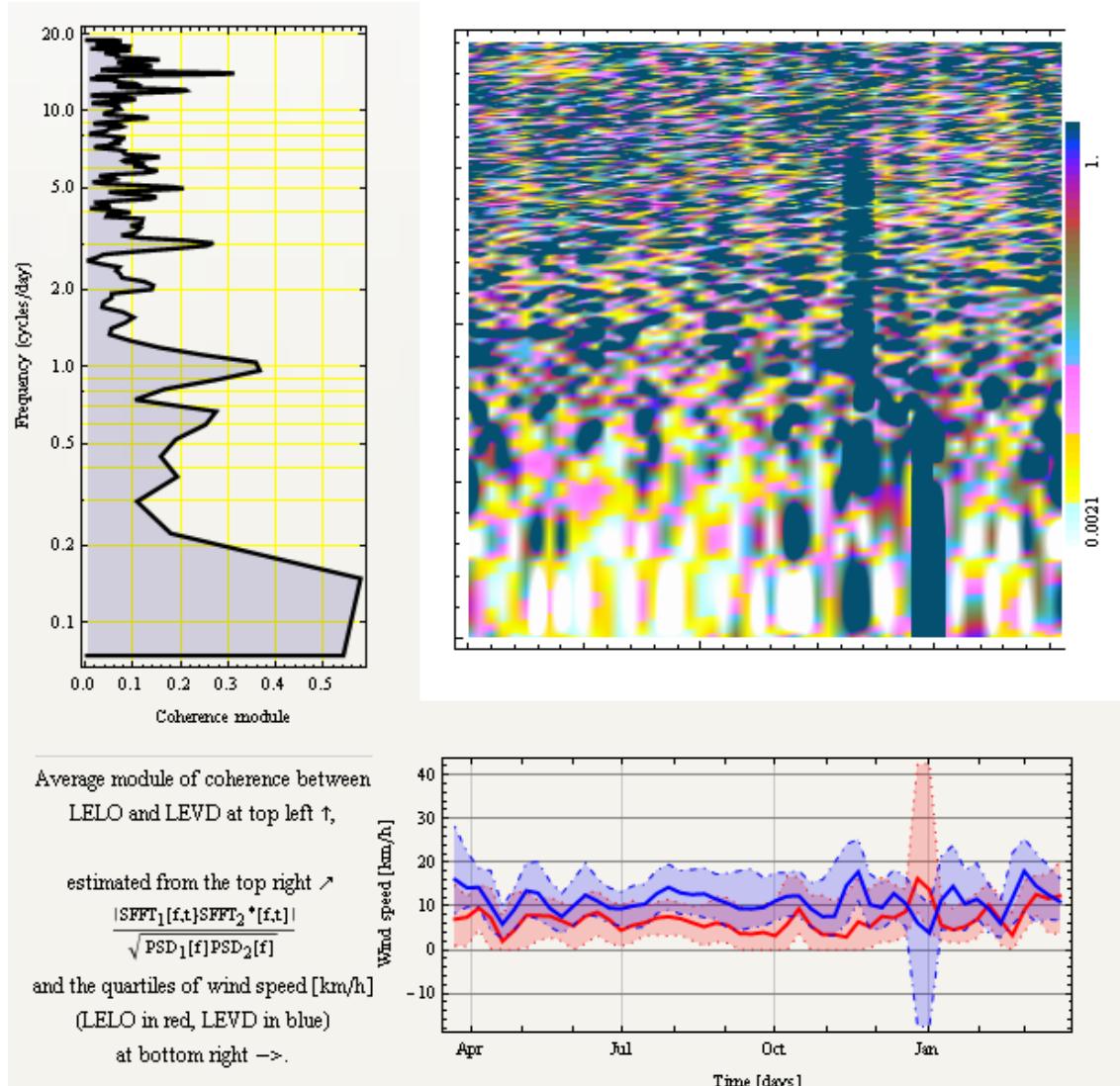
Dicho análisis de coherencia se ha establecido desde el 21 de Marzo de 2010 hasta el 21 de Marzo de 2011, como se viene haciendo desde el inicio del documento. Las estaciones a comparar son las de Logroño y Valladolid. El programa de ordenador Windfreedom obtiene los datos de la red de estaciones meteorológicas y es capaz de estimar la coherencia de oscilaciones lentas de viento. Las graficas obtenidas en este análisis de coherencia van desde la figura 81 hasta la 84.

### 8.2. Análisis espectral

Las variaciones en cada estación muestran diferentes valores con el tiempo. Algunas variaciones están repetidas en la otra estación pero con diferente retraso y magnitud. Estos valores son la razón de la escasa coherencia entre estaciones. En la práctica las oscilaciones observadas en una estación, suelen ser en cierta medida las mismas que en otra estación con algo de retraso o avance.

La coherencia es una magnitud compleja. El módulo representa el grado de correlación de las oscilaciones (0=ninguna correlación lineal, 1=correlación lineal perfecta). La fase representa el retraso (ángulos positivos) o el avance (ángulos negativos) de las oscilaciones en la segunda estación respecto a la primera (considerada la referencia). El argumento de la coherencia es la diferencia del avance de la fase de las fluctuaciones.

La dirección del viento no es considerada en esta estimación, pero tiene gran importancia en la estimación de la coherencia. El retraso del viento entre oscilaciones depende en gran medida de la dirección del viento.

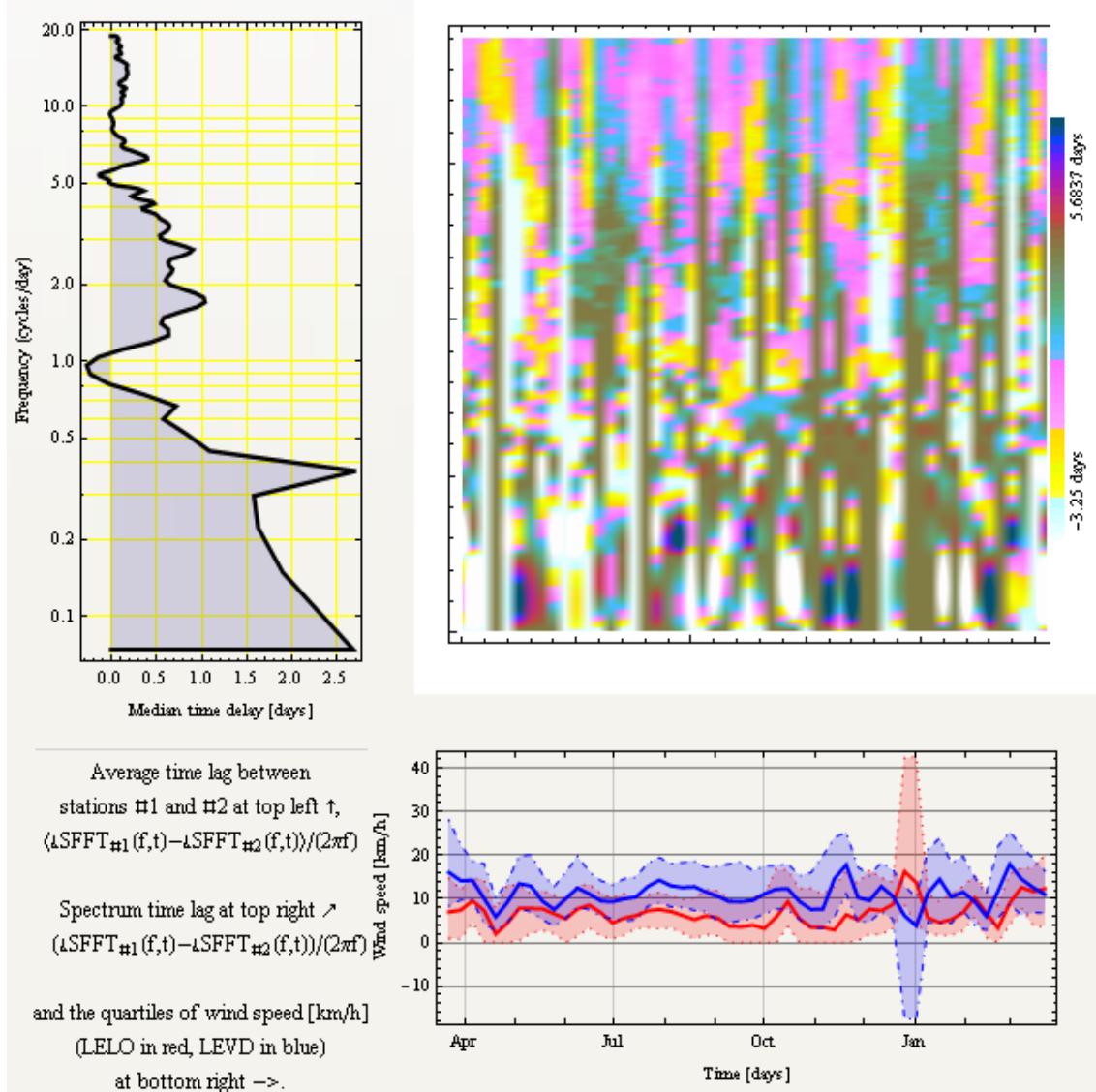


**Figura 81: Módulo de coherencia entre Logroño y Valladolid**

En la imagen anterior se puede ver zonas oscuras, que indican que se ha observado en ambas estaciones fluctuaciones correlacionadas en el instante y frecuencia correspondiente. Las zonas blancas indican que no se han observado fluctuaciones correlacionadas de las características correspondientes en, al menos, uno de dos campos.

La gráfica muestra que las fluctuaciones lentas muestran una fuerte correlación (coherencia cerca de la unidad). A partir de 1 ciclo/día, la coherencia disminuye y nunca alcanza valores superiores a 0.5. Hay que decir que para frecuencias de 2 ciclos/día la coherencia es cercana a cero.

Las fluctuaciones diarias tienen una gran coherencia debido a que la dinámica atmosférica y el calentamiento debido a la radiación solar tiende a sincronizar las oscilaciones diarias.



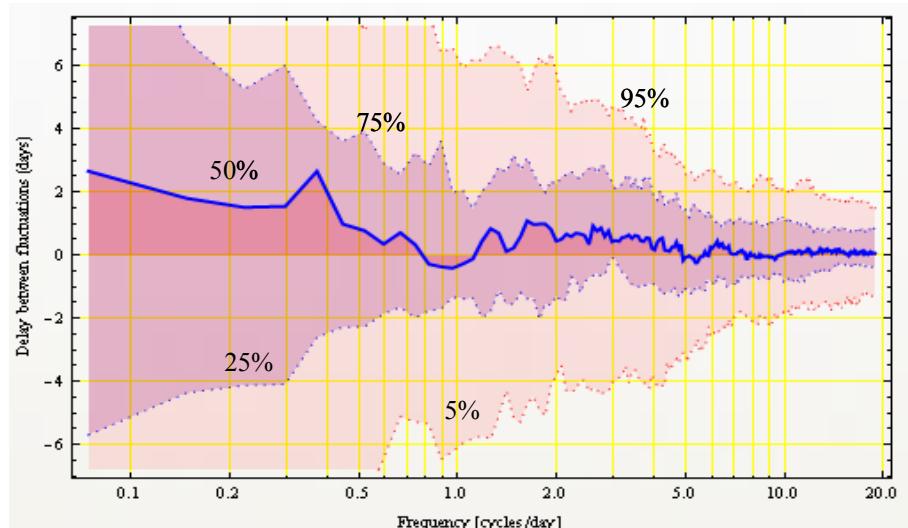
**Figura 82: Tiempo de retraso entre Logroño y Valladolid**

Definimos el tiempo de retraso como la distancia dividida por el desplazamiento de la velocidad de la perturbación. Para estaciones lejanas, esta velocidad puede variar notablemente de la velocidad y dirección del viento debido a las diferencias entre la capa límite y la atmósfera libre. Si el retraso del viento presenta valores característicos, puede ser debido a las diferentes direcciones del viento en los niveles superiores de la atmósfera. Ya que nuestras estaciones están alejadas observamos, bastante retraso en las oscilaciones en la gráfica siguiente.

Estas oscilaciones según la figura 82, podemos ver que tienen un retraso cercano a 0 días para frecuencias muy altas, negativo para las fluctuaciones diarias y positivo para las bajas. Los valores negativos implican que la fluctuación se ha observado primero en Valladolid y luego ha sucedido en Logroño y viceversa cuando el retraso es positivo. Así podemos decir que prácticamente todas las oscilaciones o fluctuaciones se han observado primero en Logroño y luego en Valladolid. A partir de los 5 ciclos/día se observa alternancia entre las estaciones. La coherencia de las fluctuaciones es baja a

altas frecuencias, porque lo que es difícil de determinar en donde se produce antes la fluctuación ya que estas fluctuaciones están poco relacionadas entre las dos estaciones.

En la figura 83 el adelanto de la mediana está sobre 0.8 días pero la variabilidad es muy grande. Las oscilaciones que duran 5 días suceden de media 2.5 días antes en Logroño que en Valladolid. La gran variabilidad del tiempo de retraso indica que el comportamiento de las oscilaciones del tiempo no es sistemático, esta alta variabilidad disminuye el modulo de coherencia.



**Figura 83: Cuantiles 5%, 25%, 50%, 75% y 95% del tiempo de retraso entre Logroño y Valladolid**

El rango intercuantil se muestra en la anterior gráfica. Las variaciones diurnas y semi-diurnas ( $f=1$  y  $2$  ciclos/día, respectivamente) presentan una dispersión mucho menor, con un rango intercuantil de 2 días. Las oscilaciones diurnas y semi-diurnas se relacionan principalmente con la dinámica de viento debido al calentamiento del sol.

Otra forma de ver el tiempo de retraso es con los modelos fraccionarios, la ley de potencia y el modelo exponencial. El mejor modelo es, la de ley de potencia que es el que más se ajusta. El modelo fraccional se incluye debido a que es similar a muchos modelos de viento de espectros que se encuentran en documentos.

	<b>Module of coherence[f]</b>	<b>Appearance</b>
<b>Measured coherence</b>	$\frac{ SFFT_1[f,t]SFFT_2^*[f,t] }{\sqrt{ESD_1[f]ESD_2[f]}}$	thin, grey solid line
<b>Fractional model</b>	$\frac{0.4609}{0.4609 + 2.16967 f^{0.615719}}$	thick, dotted red line
<b>Power law model</b>	$\frac{0.155618}{f^{0.465521}}$	dot-dashed blue line
<b>Exponential model</b>	$0.115063 + 2.00266 e^{-10.2859 f}$	thin, dashed green line

Comparision of the models in semi-logarithmic plot:

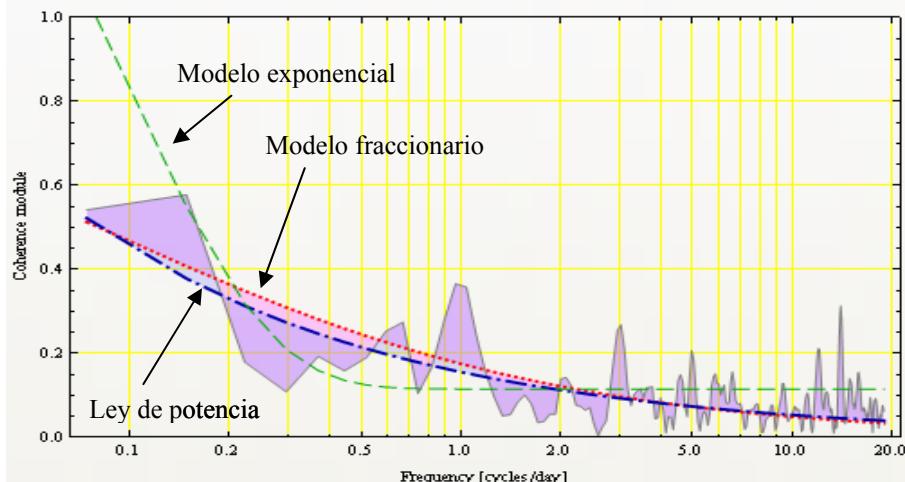


Figura 84: Comparación de modelos de coherencia

## Capítulo 9. Generación eólica 2007-2008

### 9.1. Introducción

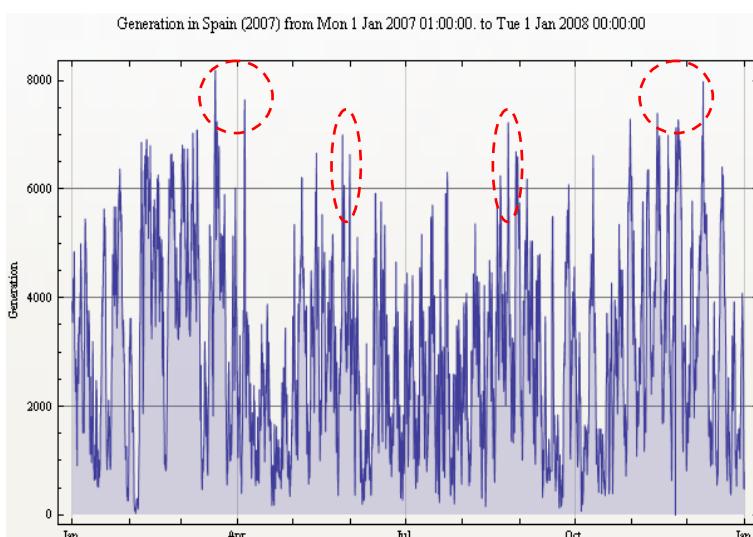
El consumo de los usuarios es ciertamente impredecible individualmente, pero no el de colectivos. El operador del sistema eléctrico español no puede saber cuándo un individuo va a encender la luz del cuarto, pero saben que en el descanso de un partido de fútbol retransmitido por la televisión, va a haber un pico de consumo de luz. Los hábitos de consumo de las masas están sobradamente estudiados por Red Eléctrica Española (REE). Teniendo en cuenta la fecha, día de la semana y temperatura prevista. El operador del sistema sabe cuánta energía se necesita generar cada hora. Esa cifra es la que se pone a disposición del mercado de generación. Por ello es importante conocer con precisión la generación cuya fuente de energía primaria no es controlable, como la generación eólica, solar y centrales hidroeléctricas sin embalse de regulación.

En este capítulo se estudian los datos de la generación eólica de España durante los años 2007 y 2008. El propósito de este capítulo es analizar la potencia generada respecto al tiempo viendo sus variaciones a lo largo del mismo. El procedimiento seguido en el estudio es análogo al utilizado en los capítulos anteriores, con la salvedad de que los datos de generación eólica en España se cargan desde dos ficheros, en vez de descargarse de una base de datos meteorológicos.

### 9.2. Año 2007

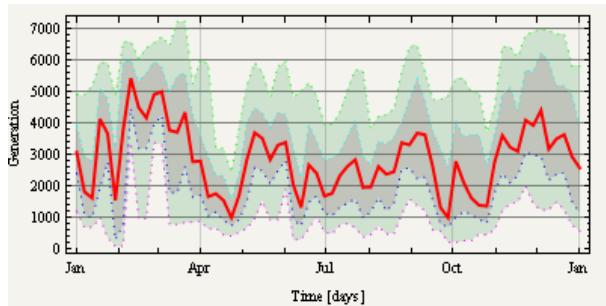
#### 9.2.1. Histórico de producción

En este análisis representamos la generación de la potencia media generada cada hora, (en kilowatios hora) respecto al tiempo (1 de Enero de 2007 al 1 de Enero de 2008).



**Figura 85: Histórico de generación eólica española 2007 (kW)**

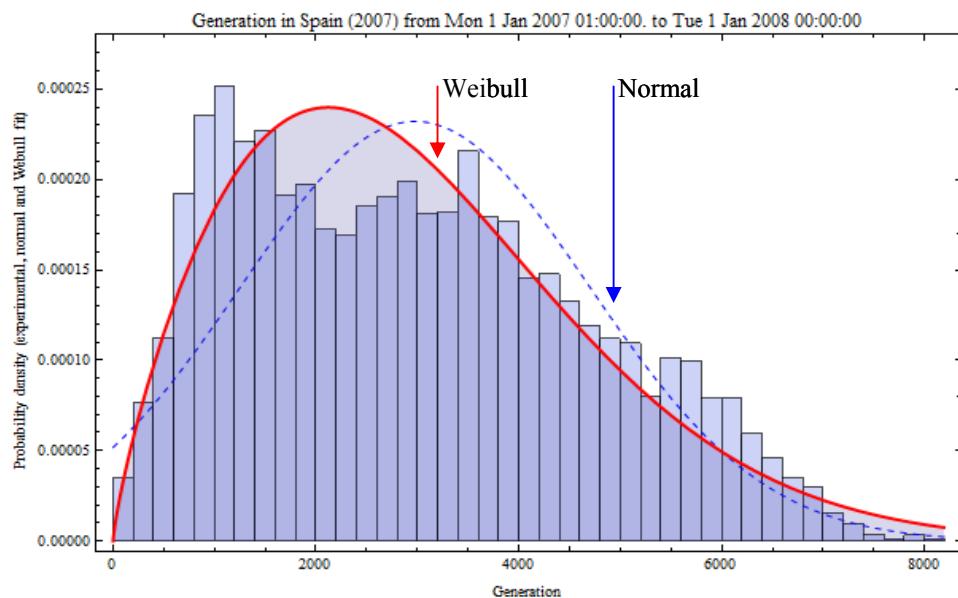
Podemos distinguir 4 períodos donde la generación es máxima (ver figura 85), dos de ellos rozan los 8000 kW y los otros dos en 7000 kW, indicados por círculos y óvalos respectivamente. La potencia instalada al final del año es 15154 MW, tenemos una frecuencia de muestreo de 24 tomas/día, siendo la media de 2977 kW. El cuantil de orden 5% indica que se generan menos de 625 kW el 5% del tiempo de la generación.



**Figura 86: Cuantiles 5%,25%,50%,75% y 95% históricos de generación del viento**

### 9.2.2. Histograma

El histograma de frecuencias se observa en la siguiente gráfica. La distribución no se ajusta bien ni a la distribución normal ni a la gaussiana.

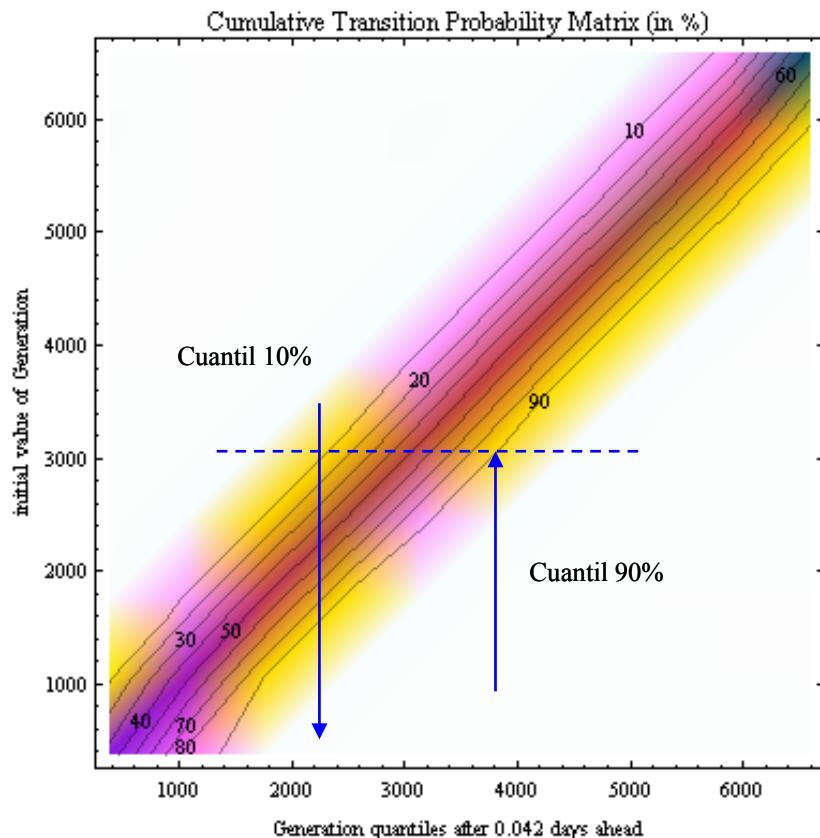


**Figura 87: Histograma de la generación eólica española del año 2007**

### 9.2.3. Matriz de transición

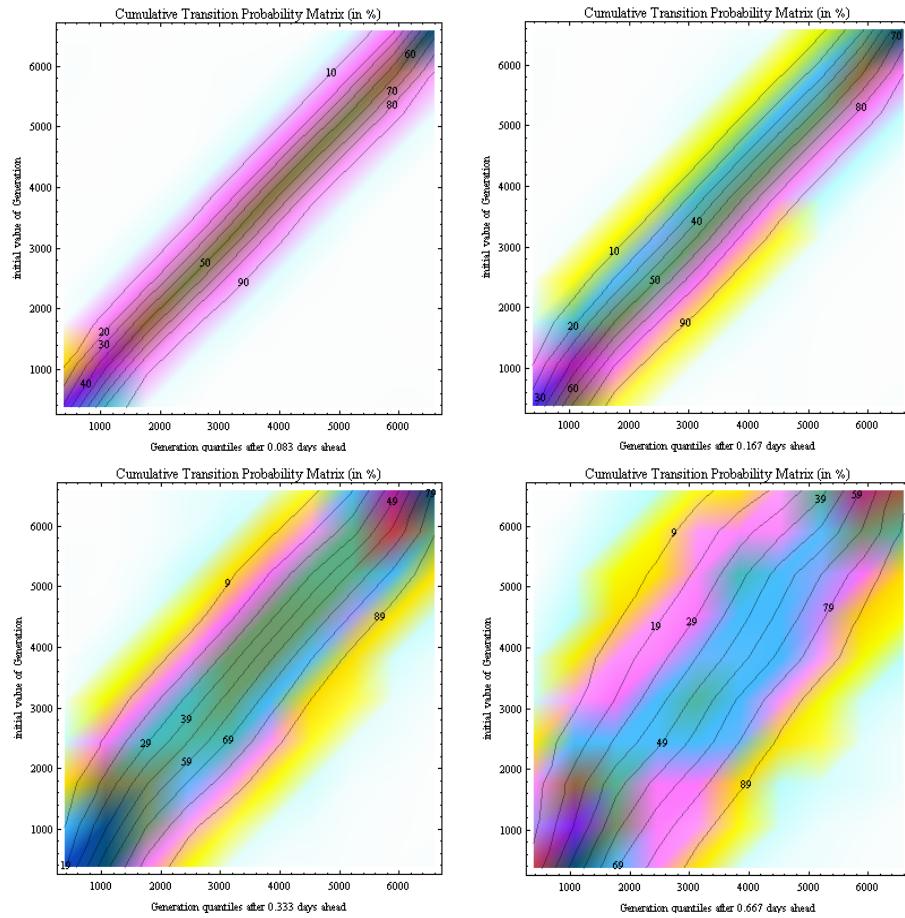
La ley de probabilidad condicional de una cadena de Markov se expresa con la matriz de probabilidades de transición P o más sencillamente con la matriz de cadena.

En la figura 88. Se ve que la línea horizontal a la altura de 3000 kW corta la línea del cuantil 10% en coordenada horizontal de 2200 kW, esto implica que la potencia media de la siguiente hora (0.042 días = 1 hora) estará por debajo de 2200 kW (con una probabilidad del 10%). Cuando actualmente se están produciendo 3000 kW. El corte de la línea horizontal de 3000 kW con el cuantil del 90% son 3800 kW. Esto indica que si en una hora se han producido 3000 kW de promedio, durante la siguiente hora la energía no sobrepasará los 3800 kW (con una probabilidad del 90%).



**Figura 88: Matriz de transición año 2007 para 1 hora**

En la figura 89 se observa que al aumentar el periodo entre las medidas de potencia la pendiente de cada línea va en aumento, llegando ser casi verticales. Conforme aumentamos el intervalo entre las medidas, las líneas de los cuantiles están más separadas y los colores oscuros están más repartidos a lo largo del gráfico. Dada una potencia inicial, la potencia media horaria al final del periodo tendrá una mayor incertidumbre.



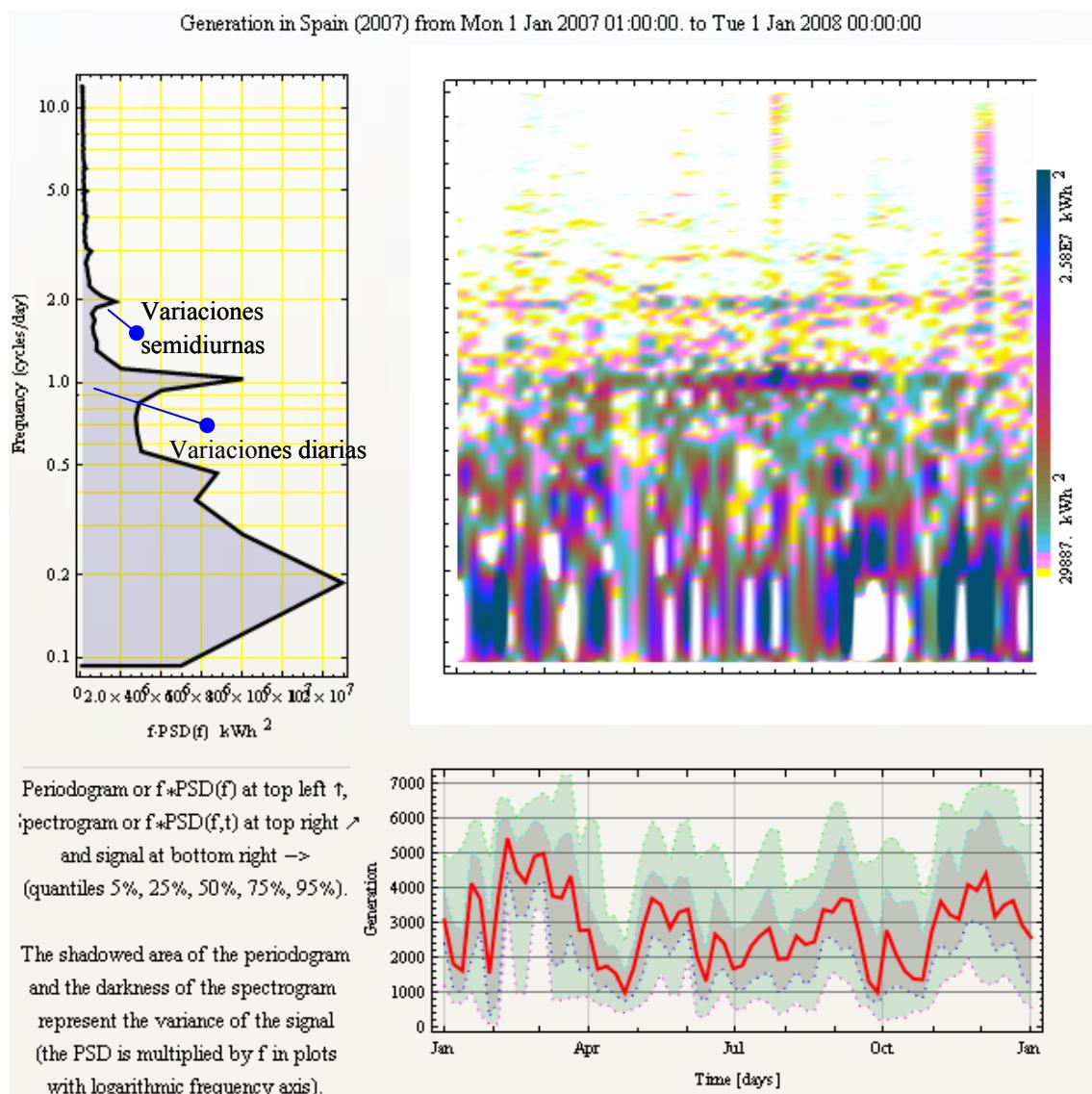
**Figura 89: Matrices de transición año 2007  
Período 2 horas, 4 horas, 8 horas, 16 horas**

#### 9.2.4. Espectrograma

El espectrograma es una representación visual de las variaciones de la frecuencia en el eje vertical. La intensidad de una fluctuación de una determinada frecuencia en un instante está codificada por el color del punto cuyas coordenadas horizontales y verticales corresponden al tiempo y a la frecuencia respectivamente. Para la obtención del espectrograma se aplica una transformada de Fourier a porciones de la señal. Dependiendo del tamaño de la ventana que utilizamos para el análisis de Fourier tendremos diferentes niveles de resolución del espectrograma. Si se aplica una ventana muy grande obtendremos un espectrograma muy detallado en la frecuencia y con poca resolución espacial. Para el caso de una ventana demasiado pequeña el efecto es el inverso y no seremos capaces de distinguir los diferentes armónicos si están muy juntos en el espectrograma.

En el espectrograma siguiente se puede observar que las mayores fluctuaciones duran varios días y corresponden a los frentes (periodos de 2 a 10 días), pues los colores más oscuros del espectrograma los encontramos en frecuencias entre 1/2 y 1/10 ciclos/día.

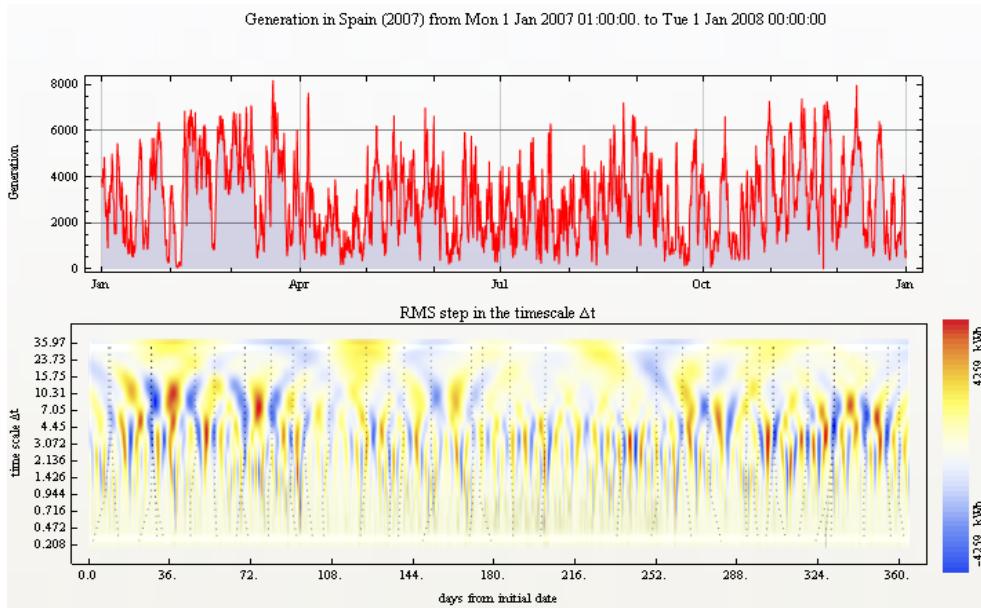
Las fluctuaciones diarias son más intensas en los meses de verano.



**Figura 90: Espectrograma de la generación eólica española del año 2007**

### 9.2.5. Variaciones de potencia

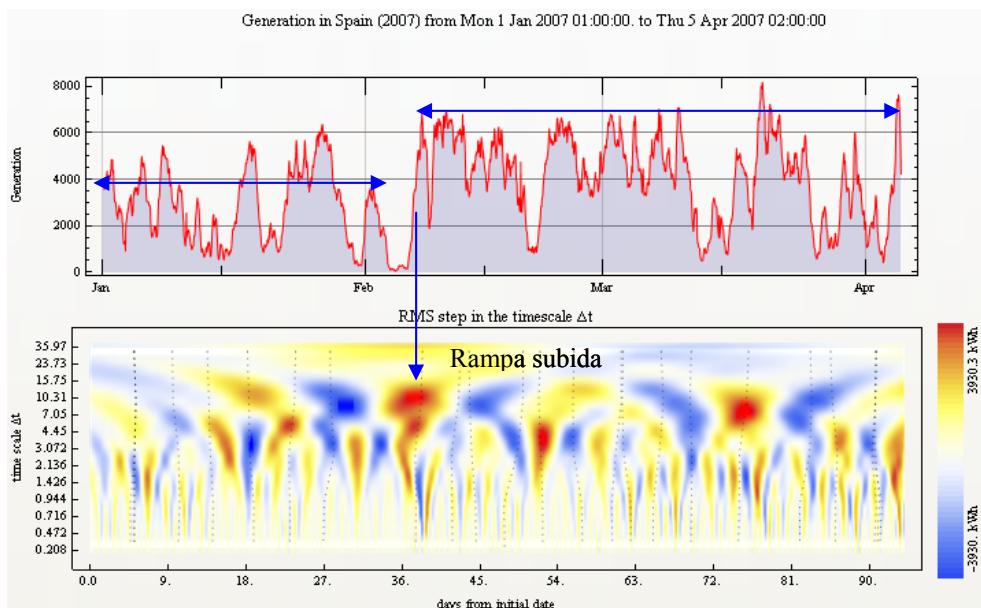
Para tener una mayor claridad a la hora de ver en qué meses o días nuestra generación ha sido máxima, vamos a ver las variaciones de la señal. En la figura 91, vemos que la señal no es constante sino que tiene altibajos a lo largo del intervalo. Para estudiar en detalle la señal, divido los datos en períodos de 3 meses, así tendremos la variable en 4 gráficas que nos aportarán una visión más definida.



**Figura 91: Variaciones de la generación eólica del año 2007 (kW)**

*Enero 2007-Abril 2007:*

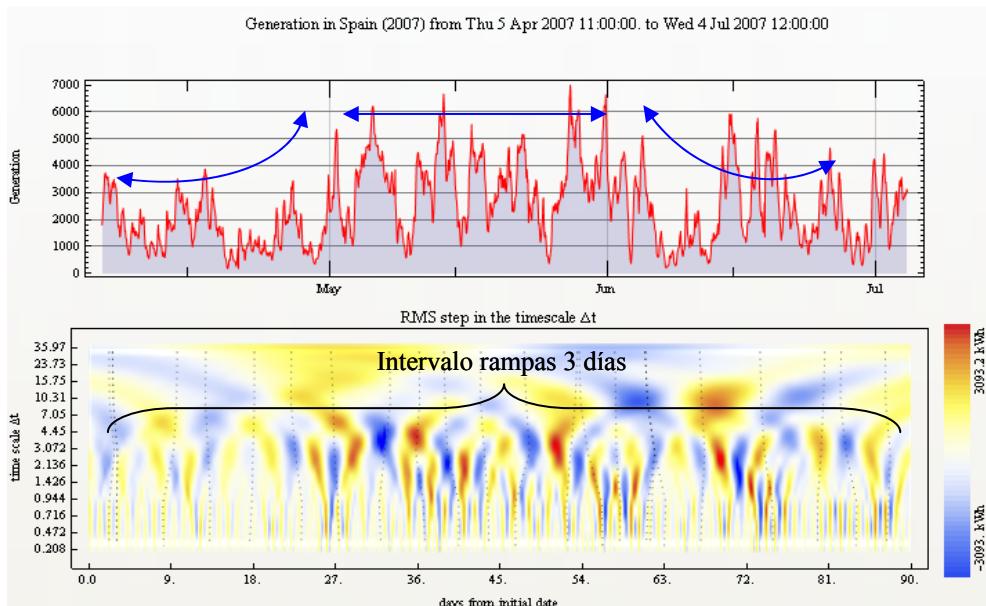
En este primer trimestre del mes vemos claramente una subida en la generación a partir del mes de Febrero, pasamos de tener una media de 4000 kW a subir hasta los 6000 kW durante los siguientes dos meses. Este cambio se produce de forma rápida en forma de rampa con una subida muy pronunciada el día 6 de Febrero de 2007.



**Figura 92: Variaciones de la generación entre 01/01/07 y 05/04/07 (kW)**

#### Abril 2007-Julio 2007:

El siguiente intervalo tenemos una serie de rampas ascendentes y descendentes cada 3 días, apreciamos también unas cotas máximas en el mes de Mayo y mínimas en Abril y Julio



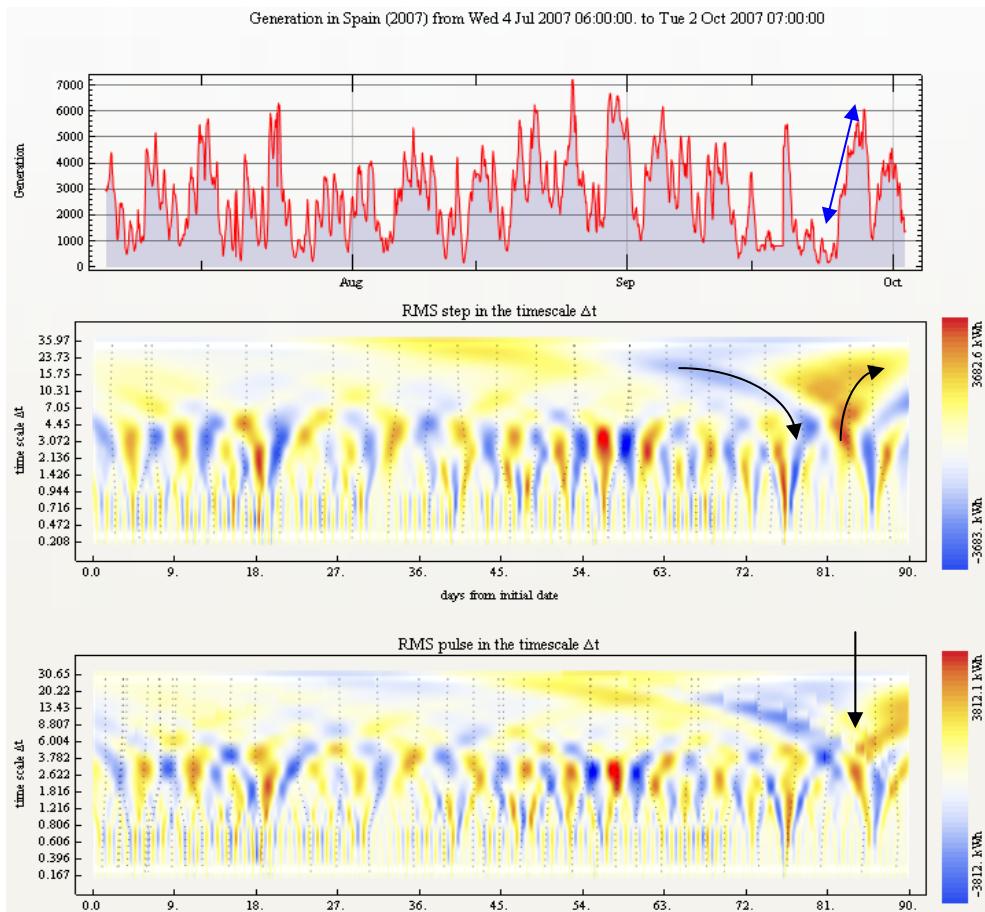
**Figura 93: Variaciones de la generación entre 05/04/07 y 04/07/07 (kW)**

#### Julio 2007-Octubre 2007:

En la siguiente imagen vemos como hay una serie de rampas de subida de duración 4 días aproximadamente, pero hacia el 26 de Septiembre tenemos un cambio brusco en la generación pasando de 1000 kW a 6000 kW, por ello he preferido tratar la señal con el detector de picos para distinguir mejor este cambio.

El detector de picos/valle en las figuras (gráfica inferior de la figura 94) muestra manchas de colores rojos cuando se detecta un pico (una rampa de subida seguida de una de bajada de duración similar). Si se produce una bajada seguida de una subida de duración similar, entonces se considera un valle y la gráfica muestra manchas de colores azules. Las manchas se sitúan en el eje de tiempos (eje horizontal) y de duración (eje vertical) que les corresponda.

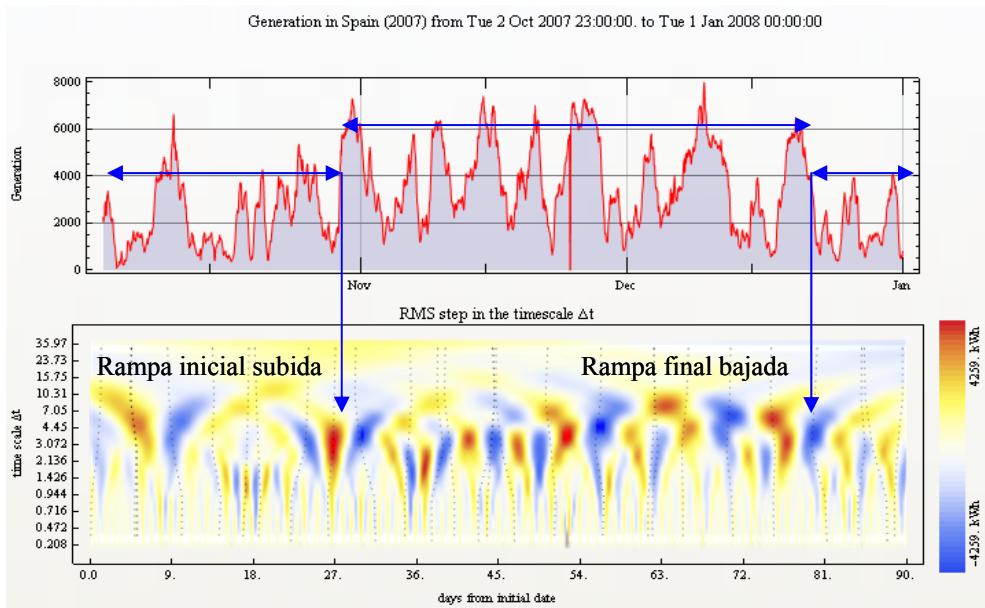
A la derecha de las gráficas se ha incluido la escala de colores que indica el valor eficaz o RMS de las rampas o de los picos/valles. En general las gráficas del detector de rampas son más intuitivas que las de picos/valles porque el viento no suele mostrar la misma duración y amplitud de subida y bajada.



**Figura 94: Variaciones de la generación entre 04/07/07 y 02/11/07 (kW)**

*Octubre 2007-Enero 2008:*

En este periodo podemos ver una gran similitud al estudiado en Enero-Abril, tenemos un reparto de la potencia en tres tramos, un primer y último tramo donde la generación ronda los 4000 kW y un tramo medio donde se incrementa hasta los 6000 kW, viendo que estos cambios de amplitud se reflejan con unas rampas de subida y bajada respectivamente.

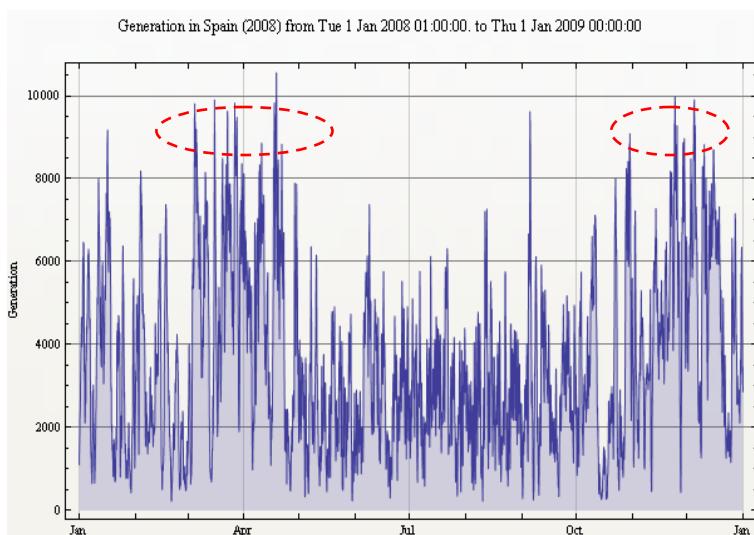


**Figura 95: Variaciones de la generación entre 02/11/07 y 01/01/08 (kW)**

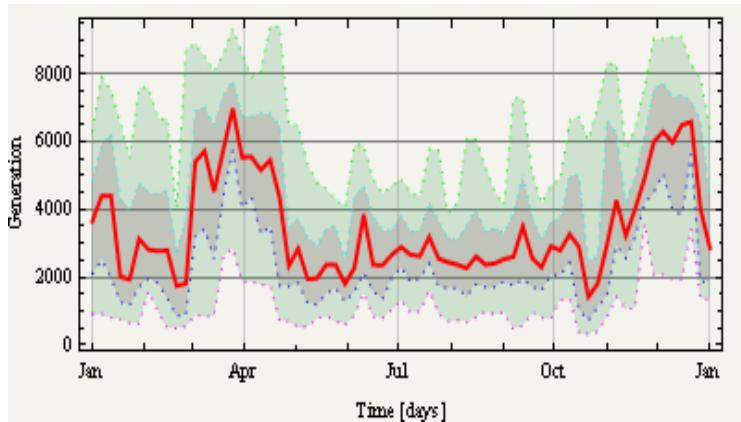
## 9.3. Año 2008

### 9.3.1. Histórico de producción

En la figura siguiente represento la potencia eólica horaria durante el año 2008. Como podemos observar, vemos dos claros tramos donde ella es máxima, comprendidos entre Marzo y Mayo y el otro entre Noviembre y Diciembre respectivamente, con unos picos máximos que rozan los 10 MW, indicados en la imagen mediante círculos. Si comparamos estos datos con lo acontecido en 2007, vemos que la generación de potencia es mayor durante este periodo, ello es debido que cada año se incrementa notablemente la construcción de parques eólicos.



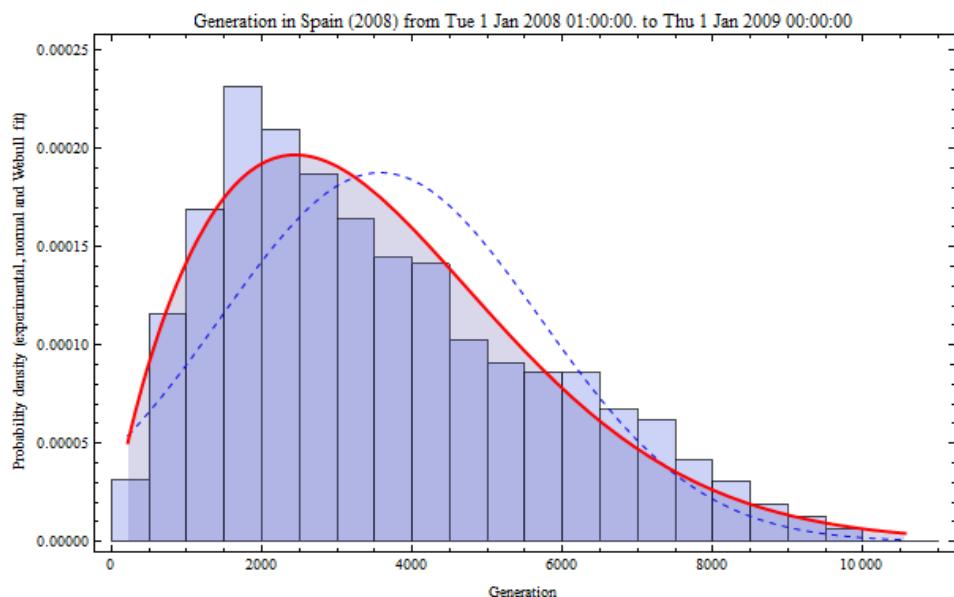
**Figura 96: Histórico de generación eólica española 2008 (kW)**



**Figura 97: Cuantiles 5%, 25%, 50%, 75% y 95% históricos de generación del viento**

### 9.3.2. Histograma

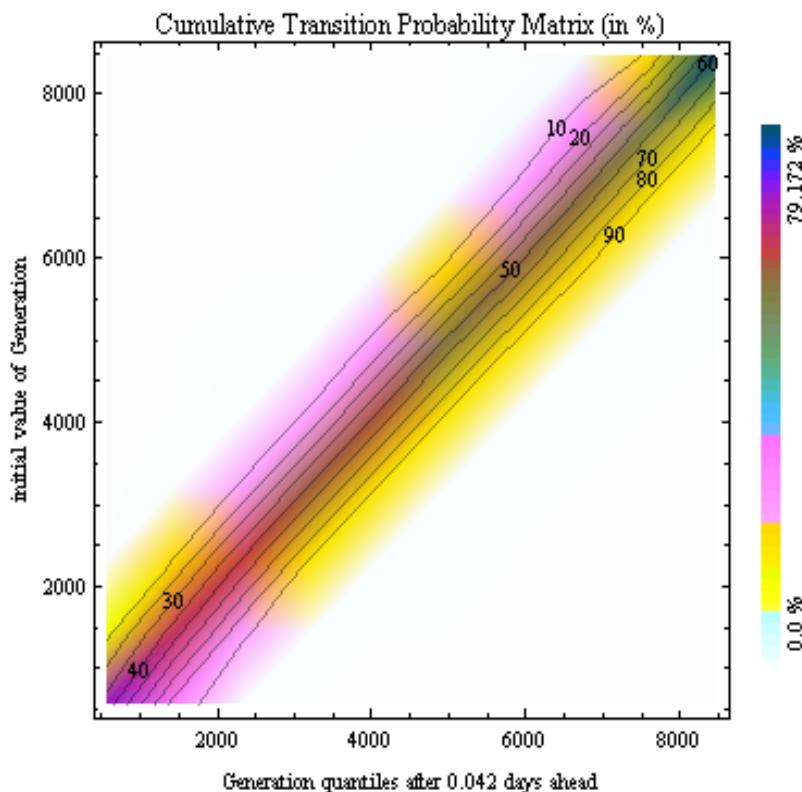
El histograma es la representación gráfica de una distribución de frecuencias por medio de rectángulos, cuyas anchuras representan intervalos de la clasificación y cuyas alturas representan las correspondientes frecuencias. En el eje vertical se representan las frecuencias, y en el eje horizontal los valores de las variables, normalmente señalando las marcas de clase, es decir, la mitad del intervalo en el que están agrupados los datos.



**Figura 98: Histograma de la generación eólica española del año 2008**

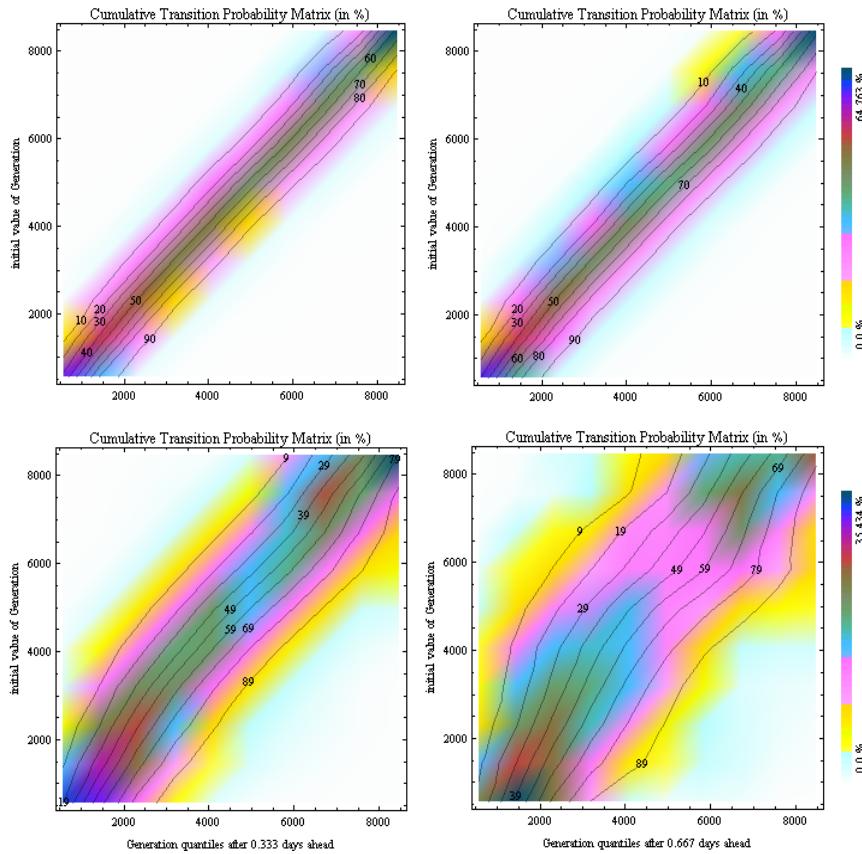
### 9.3.3. Matriz de transición

La matriz de transición permite encontrar la probabilidad de que un sistema se encuentre en un estado en particular en un momento dado. Algo más importante aún, es que permite encontrar el promedio a la larga o las probabilidades de estado estable para cada estado. Con esta información se puede predecir el comportamiento del sistema a través del tiempo. En el apartado 5 del capítulo 4 se han resumido las propiedades de esta herramienta estadística.



**Figura 99: Matriz de transición año 2008 para 1 hora**

Al aumentar el periodo entre las medidas de potencia la pendiente de cada línea va en aumento, llegando ser casi verticales porque la distribución de la generación en un horizonte lejano depende poco de lo que pasó en un tiempo remoto. Conforme aumentamos el intervalo de estudio, las líneas de los cuantiles están más separadas y los colores oscuros están más repartidos a lo largo del gráfico.



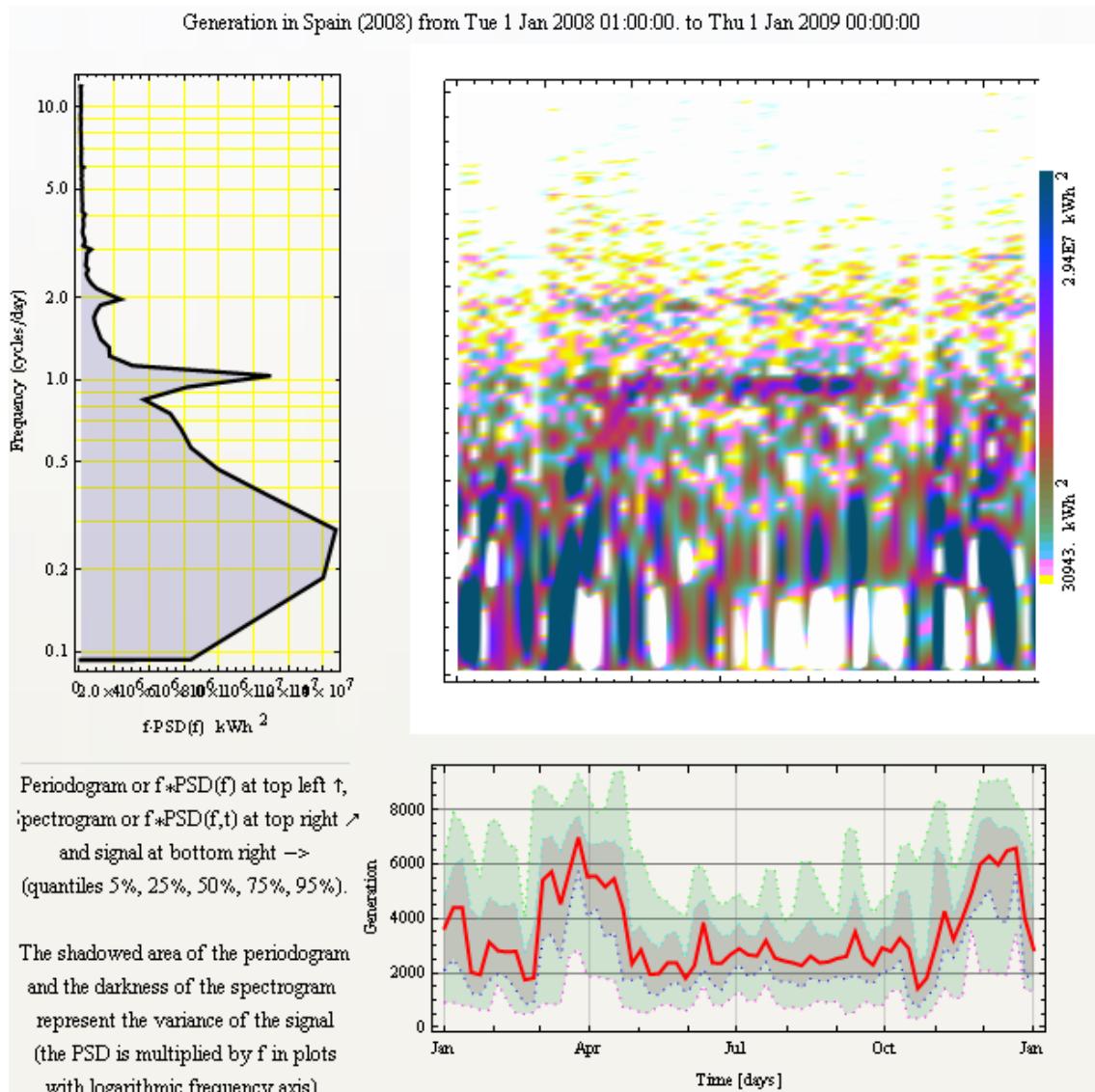
**Figura 100: Matrices de transición año 2008  
Periodo 2 horas, 4 horas, 8 horas, 16 horas**

### 9.3.4. Espectrograma

El espectrograma es una representación visual de la periodicidad de la señal a lo largo del tiempo. Para obtener el espectrograma se aplica la transformada de Fourier a porciones de la señal. El color del espectrograma representa la cantidad de oscilaciones de una determinada frecuencia en un intervalo de tiempo (densidad de oscilaciones de una frecuencia en un intervalo). El periodograma es el promedio de las oscilaciones de la señal (para más detalles, vea el apartado 6 del capítulo 4).

Durante el año 2008 se observa con claridad que las oscilaciones diarias son más intensas durante los meses de abril, julio, agosto y septiembre.

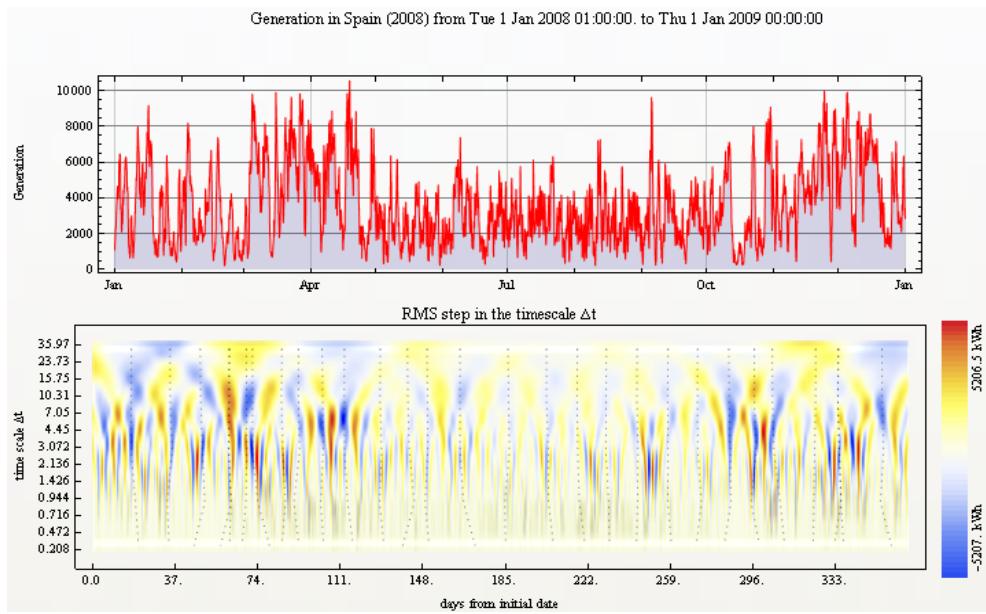
Las variaciones más fuertes corresponden a los colores más oscuros y se producen a bajas frecuencias (cambios lentos, con períodos de varios días).



**Figura 101: Espectrograma de la generación eólica española del año 2008**

### 9.3.5. Variaciones de potencia

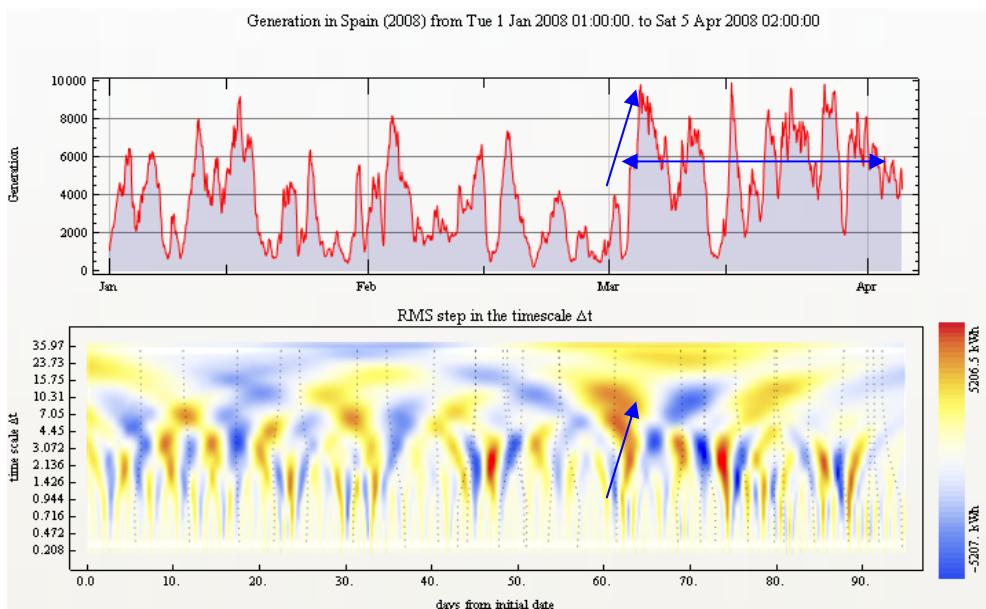
En este apartado voy a repetir el análisis de variaciones que hemos llevado realizando a lo largo del documento. Si utilizamos un año como periodo de estudio (gráfica siguiente), no distinguimos bien los cambios de subida y bajada de la generación. Para estudiar en detalle la señal, divido la señal en períodos de 3 meses, así tendremos la variable en 4 gráficas que nos aportarán una visión más definida.



**Figura 102: Variaciones de la generación eólica del año 2008 (kW)**

*Enero 2008-Abril 2008:*

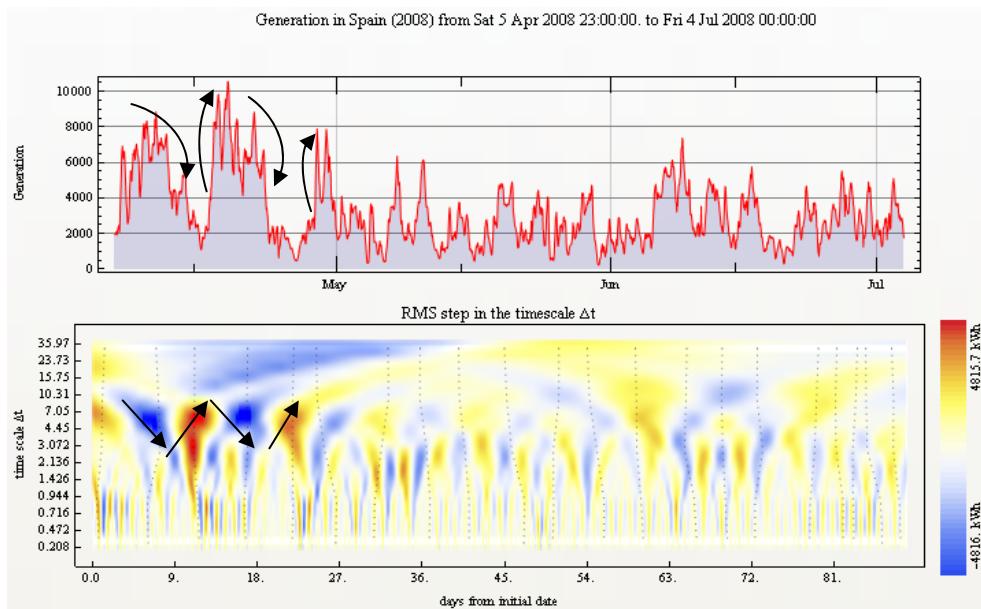
En el primer periodo vemos que las oscilaciones de subida y bajada son constantes hasta que llegamos a Marzo, donde observamos una gran pendiente de subida. Entre Marzo y Abril la generación de potencia se ha incrementado notablemente con una media de unos 6 MW.



**Figura 103: Variaciones de la generación entre 01/01/08 y 05/04/08 (kW)**

*Abril 2008-Julio 2008:*

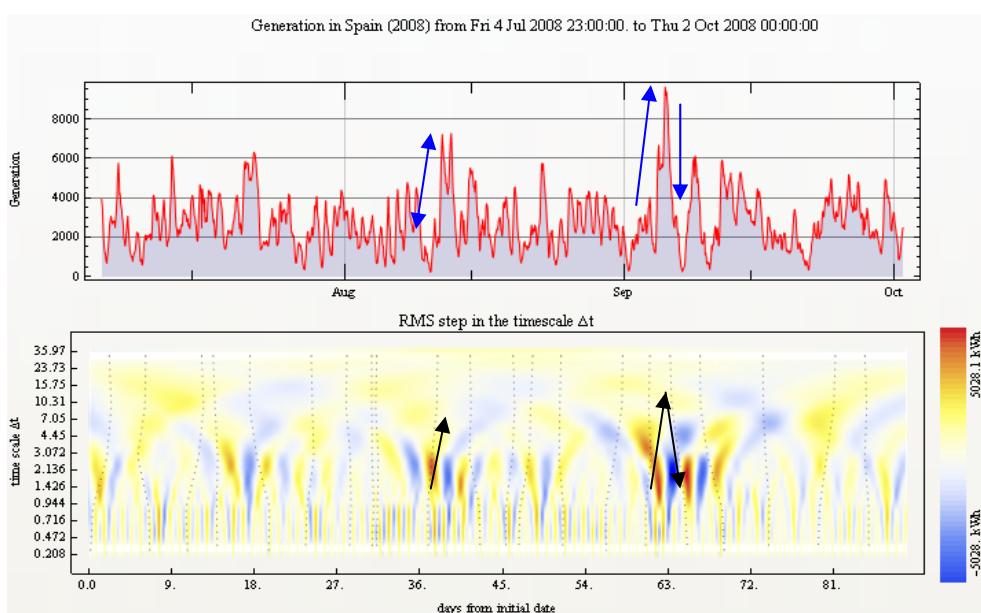
El siguiente periodo tiene una relevancia menor que el anterior en cuanto a generación, observamos que ha disminuido hasta 4 MW entre Mayo y Junio.



**Figura 104: Variaciones de la generación entre 05/04/08 y 04/07/08 (kW)**

*Julio 2008-Octubre 2008:*

Durante estos meses la generación se mantiene constante, con algún pico máximo esporádico comprendido entre 6 MW y 8 MW. Al comparar esta gráfica con la obtenida en el año 2007 vemos que hay semejanza, tenemos una potencia media entorno a los 3 MW.



**Figura 105: Variaciones de la generación entre 04/07/08 y 02/11/08 (kW)**

*Octubre 2008-Enero 2009:*

En la siguiente imagen, vemos como hay una serie de rampas de subida de duración 4 días aproximadamente, por ello he preferido tratar la señal con el detector de picos para distinguir mejor este cambio.

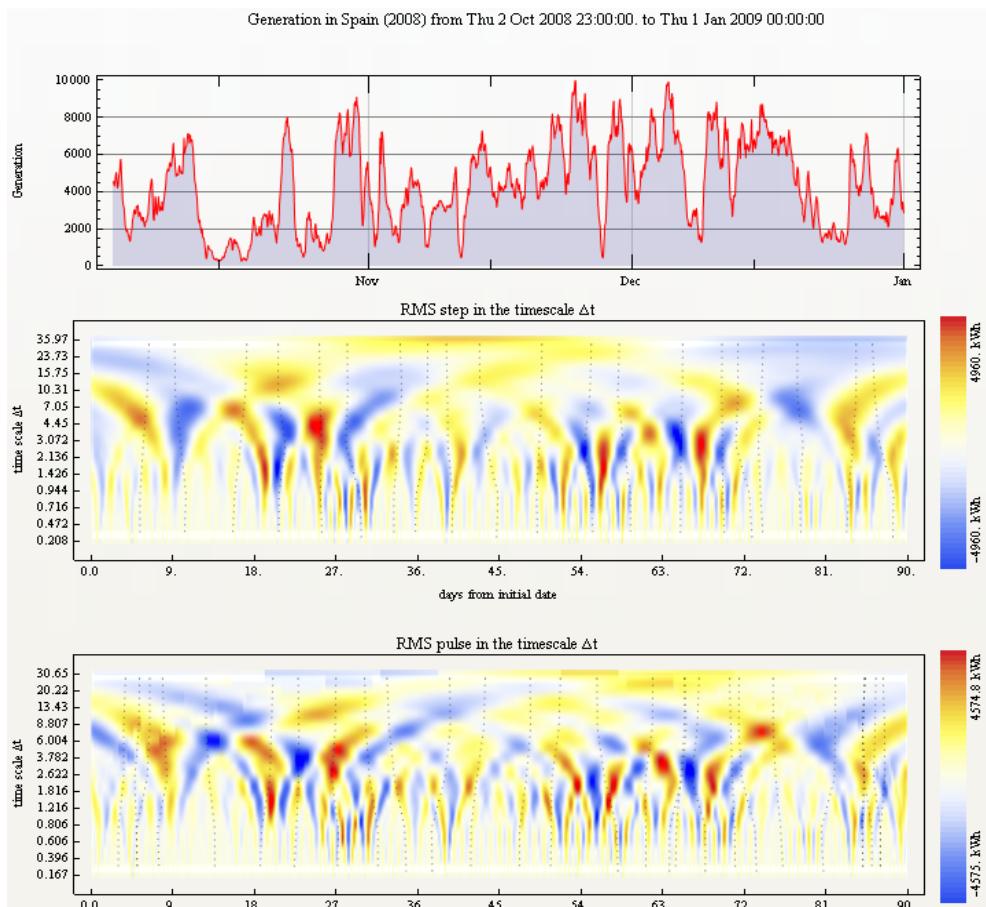


Figura 106: Variaciones de la generación entre 02/11/08 y 01/01/09 (kW)

## Capítulo 10. Conclusiones

La presente memoria detalla el procedimiento seguido para caracterizar la variabilidad de la velocidad del viento en cuatro estaciones meteorológicas y de la generación eólica española en los años 2008 y 2009. El procedimiento elegido utiliza herramientas matemáticas avanzadas y un paquete informático experimental.

Las conclusiones las dividiré en emplazamientos costeros y de interior, para así comprender las diferencias existentes entre ellos. Por último, compararé la generación eólica española, resultante de agregar parques eólicos en emplazamientos costeros y de interior.

### 10.1. Aeropuertos de Reus y Jerez

Ambos emplazamientos están situados en zonas costeras, aunque están distantes entre sí, siendo sus condiciones climáticas distintas. La altura sobre el nivel del mar de ambos no llega a los 100 metros, por lo que van a estar fuertemente limitados por las brisas marinas. Las brisas marinas tienen una mayor relevancia en Jerez dado que se ve afectado tanto por el mar Mediterráneo como por el océano Atlántico.

Comparando los histogramas de Reus y Jerez figura 7 y figura 33, vemos que tienen unas velocidades medias muy parejas, dando una distribución Weibull semejante. El viento que sopla lo podemos diferenciar en dos tipos: uno cálido proveniente del mar y el otro más fresco del interior de la península, aunque en ambos aeropuertos con direcciones diferentes como se pueden ver en la imagen de la rosa de los vientos.

Viendo la matriz de transición de ambos, figura 9 y figura 35, claramente vemos que los cuantiles son más próximos entre sí en Reus respecto Jerez. Esto nos indica que la velocidad del viento es más estable en Reus durante periodos cortos de estudio.

Los espectrogramas de ambos emplazamientos son similares en forma porque se distingue claramente las dos frecuencias dominantes 1 ciclo/día y 2 ciclos/día y las variaciones debidas a la alternancia de anticiclones y borrascas. No obstante, los picos de los espectrogramas presentan distintos valores en los dos emplazamientos. Se ha visto que la mayor variabilidad del viento se produce a lo largo del periodo veraniego dado el mayor tiempo de insolación. Por todo ello podemos decir que ambos emplazamientos están más influenciados por la acción del mar que por la orografía y que el viento tiene una variabilidad similar en ambos aeropuertos.

### 10.2. Aeropuertos de Logroño y Valladolid

La localización de los emplazamientos de este caso los tomé del interior de la península para poder ver otro tipo de factores que afectan a la disposición del viento. Sus altitudes son 353m y 849m respectivamente, y sus características orográficas son completamente distintas a los casos de estudio de emplazamientos costeros.

Al hacer el análisis de las series temporales lo que más me llama la atención fue la gran velocidad media tomada en Valladolid (13 km/h), siendo atípica respecto a la tónica general en otras estaciones meteorológicas que ronda los 10 km/h. Si bien es cierto que este aeropuerto está situado en la Meseta Central con cota elevada, está muy influenciado por variaciones medioambientales. Esto se podría deber también a una posición más expuesta al viento del anemómetro respecto otras estaciones meteorológicas. A la hora de ver sus espectros de frecuencia, figura 61 y figura 74, apreciamos que el factor determinante son las oscilaciones de 1 ciclo/día, dejando en un segundo lugar a las de 3 ciclos/día que son debidas a las ya citadas brisas valle/montaña, como es obvio dadas ambas localizaciones geográficas.

En Valladolid se ha observado una mayor variabilidad del viento respecto Logroño.

El comportamiento dinámico del viento es complejo y está influenciado por muchas variables meteorológicas. En este proyecto se ha estudiado el comportamiento del viento en un emplazamiento o, a lo sumo, en dos emplazamientos simultáneamente. Con este enfoque se puede estimar la evolución del viento sólo durante las primeras seis horas.

El análisis mediante espectrogramas y escalogramas permite un estudio sistemático de las variaciones presentes en el viento y en la producción eólica española. Estas herramientas permiten un análisis gráfico del comportamiento del viento y de la generación eólica en España.

El análisis mediante la coherencia da una información ambigua. La correlación espectral entre Logroño y Valladolid disminuye con una potencia al aumentar la frecuencia considerada. Para frecuencias de 0.08 ciclos/día, la coherencia es del 50%, pero baja hasta el 5% para las oscilaciones diarias. Las oscilaciones diarias tienen una correlación del 35%, mayor de lo que les corresponde por la tendencia general porque el ciclo día/sol tiende a sincronizar las oscilaciones diurnas/nocturnas. Las oscilaciones de frecuencia 3 ciclos/día, y que suelen estar debidas a la dinámica valle/montaña se ven también relativamente sincronizadas, con coherencias del 27%.

### **10.3. Generación eólica en España años 2007-2008**

En el capítulo 9 analicé la generación eólica de dos ficheros mediante los mismos procedimientos para los casos de estudio de los aeropuertos. La potencia instalada, en 2007 fue de 15154 MW mientras que en 2008 fue de 16740 MW. Este aumento de 1600 MW es debido a que cada vez en nuestro país se instalan más generadores eólicos tal como esta explicado en el capítulo 2.4. Los diferentes análisis realizados (histograma, matriz de transición y espectrograma) dan prácticamente el mismo resultado en ambos años. Solamente si nos fijamos en las variaciones de potencia mes a mes vemos las diferencias en sus pendientes.

La distribución de la generación eólica se ajusta bastante bien a una distribución de Weibull. La generación eólica media es alrededor del 25% de la potencia instalada y la generación rara vez supera el 60% de la potencia eólica instalada.

La generación eólica española muestra menores variaciones relativas respecto la velocidad de un emplazamiento. Además, las variaciones de generación se producen a menor frecuencia: la agregación geográfica de parques distantes produce un filtrado de las oscilaciones rápidas. En el sistema español, es poco frecuente observar una variación mayor del 130% de la potencia eólica media (aproximadamente el 32% de la potencia eólica instalada). Además, para que se produzca una variación tan grande es necesario que transcurra más de un día.

El mayor pico del periodograma de la generación no corresponde a las oscilaciones diarias o semidiarias, como suele suceder en una estación meteorológica. Las mayores oscilaciones de generación eólica española son producidas por la alternancia de borrascas y anticiclones. Esto también se refleja en las matrices de transición de la generación, que están más concentradas alrededor de la diagonal que en el caso de estaciones meteorológicas para horizontes de hasta 7 horas.

Para horizontes mayores de unas pocas horas, es necesario aplicar complejos modelos de predicción meteorológica que utilizan masivas cantidades de datos recogidos a lo largo del planeta. Los institutos meteorológicos gubernamentales utilizan modelos numéricos, que utilizan la misma red de estaciones que se ha utilizado en este proyecto. No obstante, la realización de predicciones meteorológicas requiere una sofisticación y unos medios que están fuera del alcance de un proyecto fin de carrera de un estudiante de ingeniería técnica electrónica.

## Capítulo 11. Bibliografía

- <http://www.windygrid.org/software>
- <http://www.educapplus.org/play-269-Vientos-de-España.html>
- <http://www.windpower.org>
- <http://www.ewea.org>
- <http://www.ieawind.org>
- <http://www.aeeolica.org>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Estadística\\_descriptiva](http://es.wikipedia.org/wiki/Estadística_descriptiva)
- <http://es.scribd.com/doc/50086755/GUIA-EOLICA>
- Mur Amada, Joaquín: *Wind Power Variability in the Grid*. Tesis Doctoral, 2009.
- Gonzalez Comendador, Luis: *Estudio de la variabilidad de la generación eólica en diferentes emplazamientos*. Proyecto Master, 2010.
- Lange, Matthias: *Physical Approach to Short-Term Wind Power Prediction*. Springer, 2006.
- Hau, Erich: *Wind Turbines*. Springer, 2006.
- Holton, James R.: *An introduction to Dynamic Meteorology*. Elsevier, 2004.

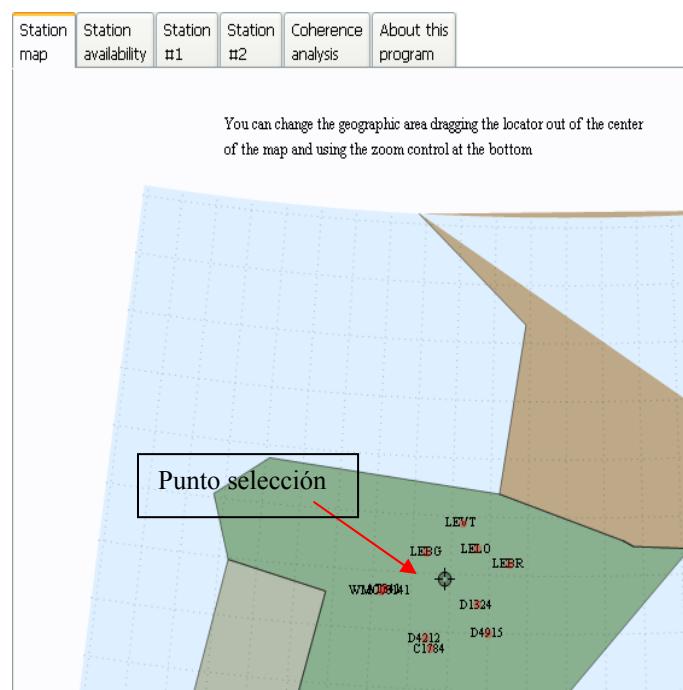
## Anexo I. Manual de usuario de Windfreedom

El motivo de realizar este anexo es documentar el programa experimental Windfreedom. Este programa fue desarrollado para la realización de una tesis doctoral y su uso está poco documentado.

A la hora de hacer una predicción de la disposición del viento es necesario conocer su variabilidad y los factores influyentes. Para ello he considerado el uso del programa Windfreedom, basado en el análisis interactivo de series de datos. El usuario puede seleccionar las estaciones meteorológicas a estudiar y el programa genera las gráficas. La otra opción que nos permite el programa es comparar las variaciones de dos series de datos meteorológicos en el dominio de la frecuencia (coherencia de señales).

Como apoyo al lector voy a detallar como poder hacer uso del programa dando unas nociones básicas de funcionamiento así como las posibles irregularidades que nos podremos encontrar.

Una vez abierto el programa lo primero que nos encontramos es una pantalla de selección de estaciones (solapa station map), en ella podemos mover el cursor por todo el mapa mundial y el programa irá actualizando las estaciones más cercanas a nuestro punto de selección.



**Figura 107: Station map**

Cargando a su vez los datos meteorológicos obtenidos de las asociaciones citadas en apartados anteriores, teniendo un tiempo de demora en relación a nuestro PC y conexión a Internet.

Una vez hemos localizado nuestras estaciones para el estudio pasamos a la siguiente solapa, es la de disponibilidad de estaciones aquí obtenemos una información vinculada a la localización así como su viento medido en el último mes y lo más importante, la fechas entre las tenemos datos medidos de las estaciones. Esta pestaña tiene gran relevancia ya que cuando queramos comparar emplazamientos entre sí, tenemos que tener un mismo periodo de disponibilidad ya que si no el programa dará errores en el cálculo de funciones.

	Latitude	Longitude	Elevation [m]	$\langle \text{Wind} \rangle$ in last month [m/s]	Date availability
LEBG	42.358	-3.621	891.	4.47	1 Jan 1973 → 19 Jul 2011
D1324	41.483	-2.268	110.	---	30 Dec 2008 → 3 Jan 2009
D4212	40.883	-3.597	1054.	---	12 Jan 2010 → 19 Jul 2011
LELO	42.454	-2.321	363.	1.76	1 Jan 1973 → 19 Jul 2011
AT341	41.694	-4.688	688.	---	7 Dec 2009 → 2 Jul 2011
WMO08141	41.65	-4.767	739.	---	1 Jan 1973 → 19 Jul 2011
LEV D	41.706	-4.852	846.	3.59	1 Jan 1973 → 19 Jul 2011
LEV T	42.883	-2.724	510.	1.98	1 Jan 1973 → 19 Jul 2011
C1784	40.699	-3.449	752.	---	1 Mar 2008 → 19 Jul 2011
LECV	40.65	-3.73	998.	2.77	6 May 1997 → 19 Jul 2011

Figura 108: Disponibilidad de las estaciones meteorológicas

Dando un ejemplo, tomaremos las estaciones de Logroño y Valladolid, ya que ambas aportan un mismo periodo de datos, estas estaciones han sido ya estudiadas de forma precisa en los capítulos 6 y 7. La siguiente pestaña nos permite la selección de la estación, así como su periodo de estudio, la variable y el tipo de análisis a calcular.

Station map Station availability Station #1 Station #2 Coherence analysis About this program

Select weather station:  End date: 19/07/11 Days: 30 Analysis: Time series plot Histogram Wind rose Transition Matrix Gust detector Spectrogram

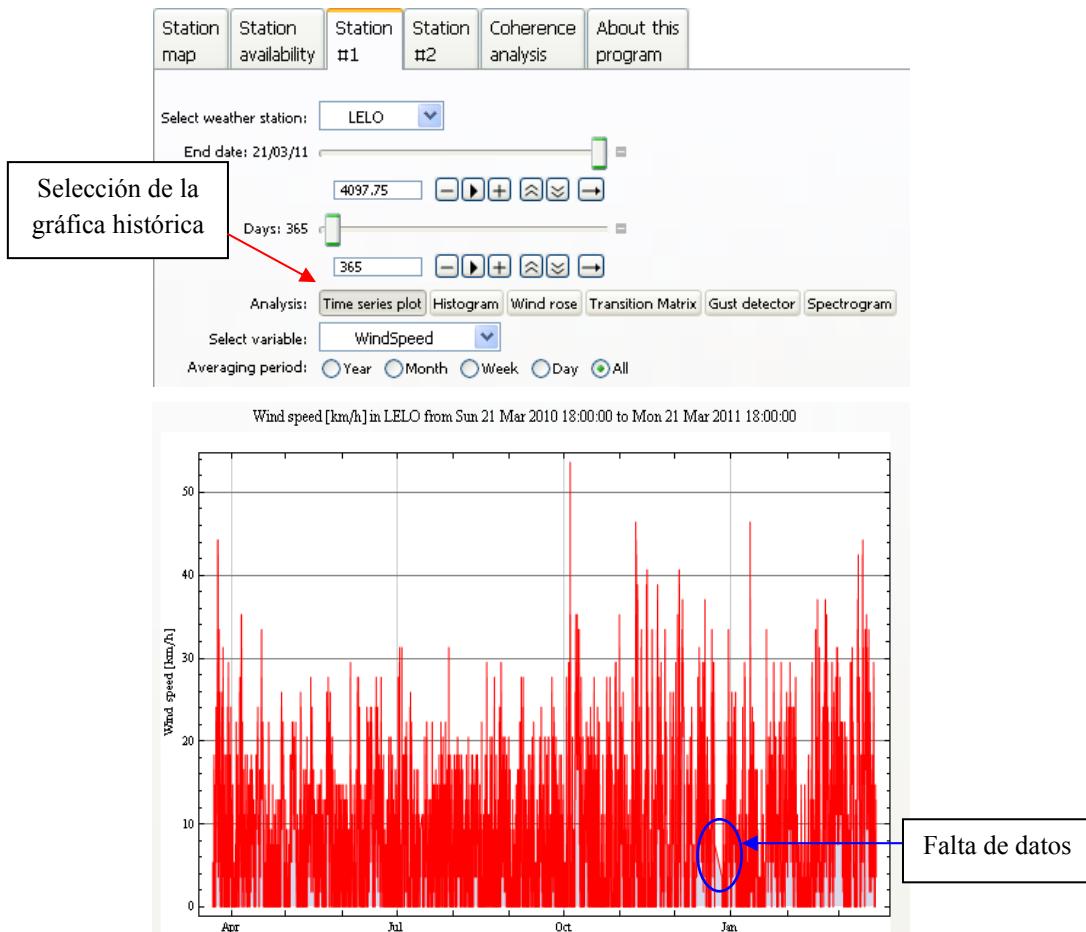
Select variable:  Averaging period:  Year  Month  Week  Day  All

WindSpeed  
WindDirection  
WindGusts  
Temperature  
Pressure  
StationPressure  
Humidity  
PrecipitationRate  
DewPoint  
CloudCoverFraction  
CloudHeight  
Visibility  
WindChill

Figura 109: Selección de la estación nº 1 y de la variable a estudiar

Una vez hemos seleccionado nuestras preferencias, pasamos a realizar el primer análisis, la representación histórica de la variable a estudiar mediante el botón “time series plot”. Así detectaremos posibles anomalías en la serie, el programa muestra todos los datos disponibles, consiguiendo una información de forma global de las velocidades

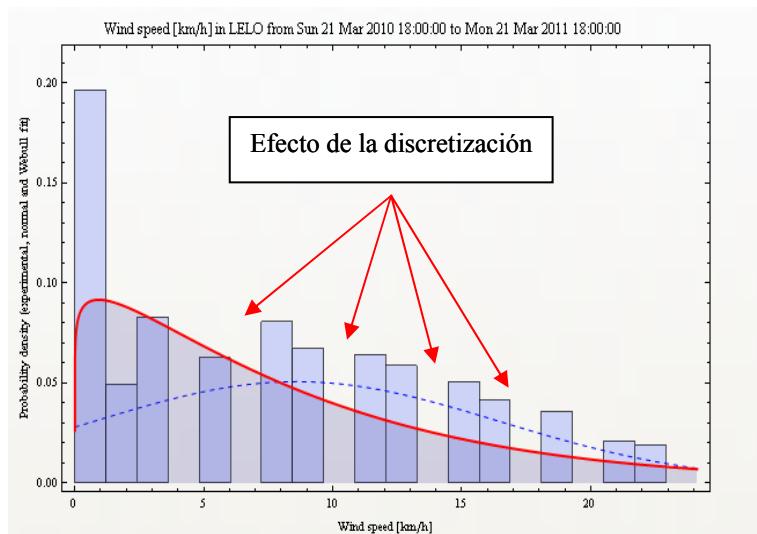
de viento en nuestro periodo de muestreo. Quedando rellenados todos los campos como aparecen en la imagen.



**Figura 110:** Selección de la gráfica histórica de la serie de datos

En ocasiones se producen fallos internos en la recopilación de los datos, lo podemos apreciar en la figura 110, aquí vemos una pérdida de información en el periodo de finales de Diciembre, representado por una recta de pendiente negativa y un espacio en blanco en la serie temporal. Si no queremos que afecte en el análisis tendremos que ir a la base de datos interna del programa y modificar esa información o cambiar el periodo de estudio para no vernos afectados.

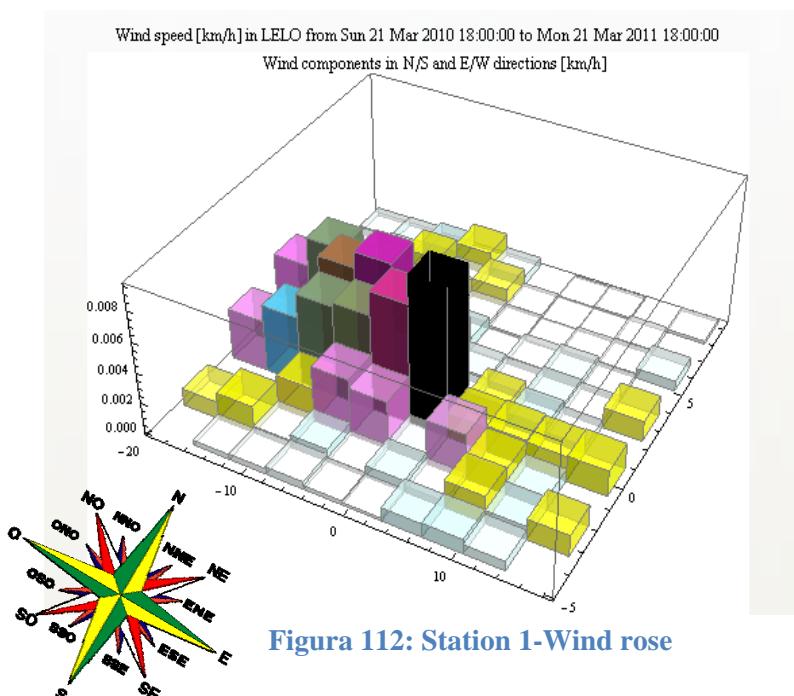
Siguiendo el orden establecido en los tipos de análisis de la anterior figura ahora pulsamos sobre el histograma. Para caracterizar las regiones con potencial eólico de nuestro emplazamiento, hacemos uso de las técnicas implementadas por la estadística descriptiva. Las medidas de tendencia central y de dispersión se complementan con los modelos de probabilidad (normal y Weibull). Para generar conocimiento del comportamiento del viento de la zona estudiada. En la gráfica siguiente se muestra un histograma representando la variable Windspeed, comparando con la distribución normal (línea azul discontinua) y Weibull (línea roja continua), ajustada a partir de la media y varianza de los datos.



**Figura 111: Histograma de la serie de datos**

Si nos encontramos ante un histograma que no llega a representar todos los datos de forma continua, sino que se deja alguno como es éste caso tenemos una discretización de puntos.

Continuando el proceso de estudio pasamos a la rosa de los vientos, que me ayuda a representar gráficamente la dirección de los vientos de un área. Un vistazo a la rosa de los vientos es extremadamente útil para situar aerogeneradores. Si una gran parte de la energía del viento viene de una dirección particular, lo que deseará, cuando coloque una turbina eólica en el paisaje, será tener la menor cantidad de obstáculos posibles en esa dirección, así como un terreno lo más liso posible.



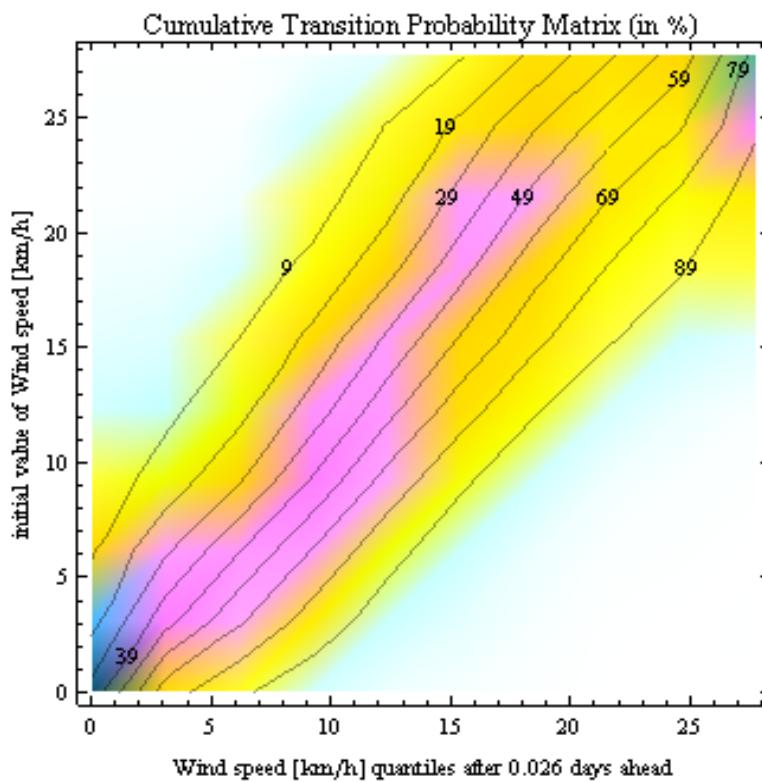
**Figura 112: Station 1-Wind rose**

En el ejemplo visto anteriormente, la mayor parte de la energía viene del oeste, por lo que no necesitaríamos preocuparnos de los obstáculos al este, norte y sur del aerogenerador, ya que apenas llegaría nada de energía desde esas direcciones.

Continuando el proceso de análisis de nuestra variable, pasamos a la matriz de transición, a grosso modo representa la probabilidad de tener un viento después de un periodo de tiempo a través de mediciones de vientos anteriores. En la gráfica 113 representamos el último valor de la velocidad del viento medida en el eje vertical y en el eje horizontal la posible velocidad después de un tiempo definido. Las diferentes tonalidades nos indican que el color más oscuro es el cambio que se ha producido más veces, representándose en la zona media.

La matriz de transición queda representada mediante líneas que unen los cuantiles de probabilidad, entre las líneas 9% y 89% tenemos el 80% de las transiciones de viento observadas.

Cada línea de los cuantiles incrementa el 10% de dichas transiciones, a mayor amplitud entre líneas de los cuantiles menor es el número de transiciones observadas en un rango de viento menor, bajando la probabilidad cosa que ocurre en los cuantiles del 9% y del 89%, teniendo un color más claro.



**Figura 113: Station 1-Transition matrix**

Para ver con claridad las variaciones del viento en duración y amplitud recurrimos al análisis de variaciones de viento. La señal de entrada se filtra digitalmente

con un determinado tiempo de respuesta en función del tiempo (eje de ordenadas) y se obtiene la diferencia de la variable entre puntos alejados por el intervalo correspondiente a la escala temporal. La duración se representa en el eje vertical mientras que la amplitud se representa con la tonalidad de las rampas. Las rampas de subida están en color rojo y las de bajada en azul, a mayor viveza del color mayor valor absoluto tiene la variación.

En la gráfica 114 se puede ver tanto las variaciones producidas por las oscilaciones diarias como las producidas por las brisas valle, esto es normal dada la localización del emplazamiento. Lo que resalta a la vista y que es importante comentar, es el bug que implementa el programa entre el 22 y 27 de Diciembre, dando una lectura falsa de los cambios en nuestro viento, como en errores internos anteriores se soluciona cambiando esos datos afectados en la librería del programa o si bien se opta por una solución más rápida, haremos caso omiso a esas fechas y las consideraremos idénticas a la semana posterior.

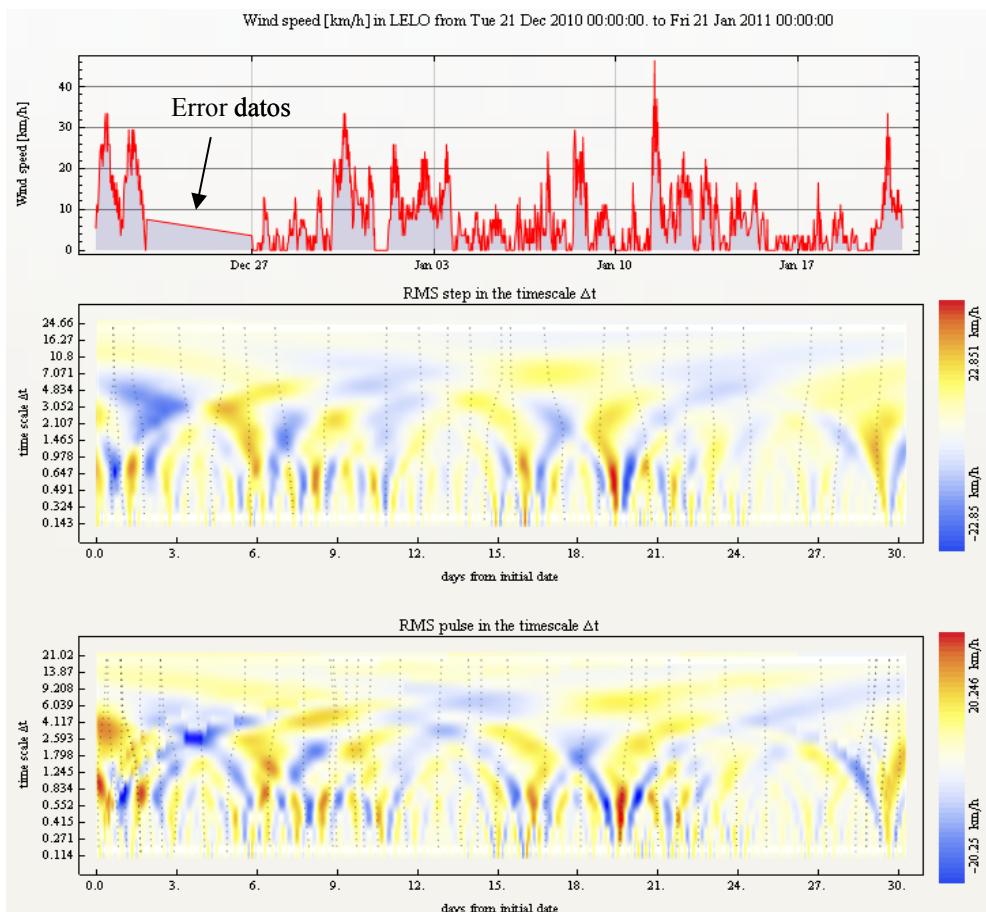


Figura 114: Station 1-Gust detector

Concluyendo los tipos de análisis posibles tenemos el espectrograma. Es una representación visual de las variaciones de la señal a lo largo del tiempo, para su obtención se aplica la transformada de Fourier a la señal. El periodograma es el

promedio de las oscilaciones de la señal. El proceso se realiza mediante la determinación de la función de densidad espectral (PSD) indicando como se reparte nuestra señal en base a la frecuencia. Para así poder distinguir las oscilaciones diarias semidiarias, brisas marinas, valle etc.

Las fluctuaciones de una magnitud aleatoria estacionaria (cuyas propiedades no varían en el tiempo) se pueden realizar calculando la densidad espectral de varianza o PSD (del inglés “*Power Spectral Density*”). La densidad espectral de varianza indica en qué frecuencias se reparte la varianza de la señal. Esto permite cuantificar que porción de la varianza de la magnitud se debe a las oscilaciones diurnas, semidiurnas y de unos cuantos días.

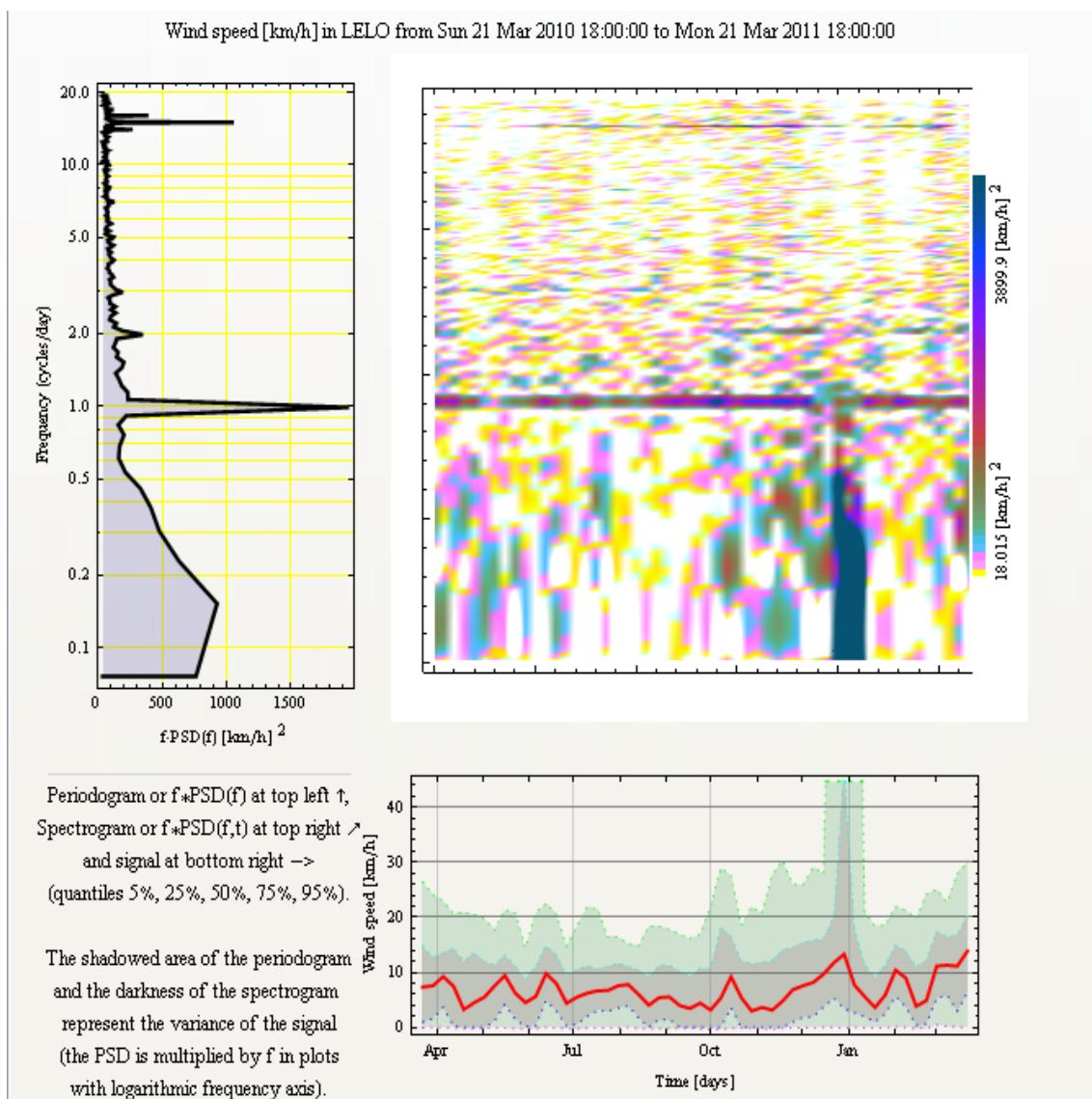


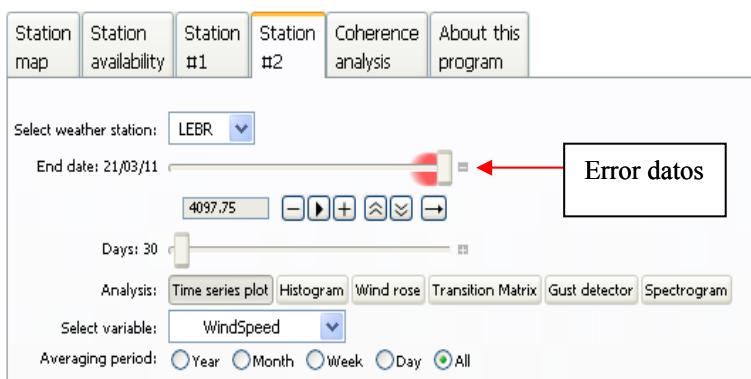
Figura 115: Station 1-Spectrogram

En la práctica, las propiedades del viento y de otras variables meteorológicas cambian en función de la situación atmosférica. Por ello, es conveniente dividir series

largas de tiempo en porciones de unos pocos días y observar la distribución de la varianza en la frecuencia. Esto permite constatar si se producen patrones diferentes a lo largo del tiempo.

En la figura 115, tenemos el espectrograma (arriba a la derecha), el periodograma (arriba a la izquierda) y el recorrido intercuantil junto a su media (abajo a la derecha). Se usa frecuencia logarítmica para representar la frecuencia, así se distingue mejor para períodos bajos, se representa la densidad espectral de la varianza multiplicada por la frecuencia,  $f^*PSD$ . Definiendo la varianza de la señal en tonalidades oscuras del espectrograma es decir un cambio de la disposición del viento.

Una vez vistos los análisis de la primera estación, si queremos realizar un estudio comparativo con otra estación, pasamos a la siguiente pestaña y rellenamos los campos pertinentes, y muy importante seleccionamos el mismo periodo de estudio. También hemos de habernos fijado al principio cuando veímos los datos disponibles de cada estación para no llevarnos las manos a la cabeza cuando el programa no pueda realizar los cálculos por problemas de información y haber perdido un tiempo en dicho proceso. Como por ejemplo en el caso de la figura 116, vemos que en Lebrija no tenemos los datos necesarios para realizar los análisis, con lo que el programa nos informará que no es posible manejar esas fechas y el mismo realizará un autoajuste con un periodo de estudio viable.



**Figura 116: Station 2**

Visto hasta aquí todos los posibles métodos de estudiar la variable seleccionada, otra solapa que facilita el programa es hacer un análisis de coherencia. Es la correlación que existe entre dos variables e informa sobre los componentes frecuenciales comunes a ellos, junto con la magnitud de su asociación. Sus elementos son: el espectro de potencia, el espectro de coherencia y el espectro de fase. En esta parte del documento se ha optado por no entrar en estos análisis ya que el manejo del programa es idéntico a los estudiados con anterioridad.