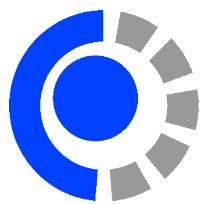




UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE  
FACULTAD DE INFORMÁTICA



TESIS DE LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

**Software libre para el procesamiento de datos de viento  
utilizados en la generación de energía eólica: Diseño y  
desarrollo de una herramienta computacional**

Renzo Arnaldo Garcia

Directora: MSc. Adair Martins

CoDirectora: Mg. Lidia López

NEUQUEN

ARGENTINA

Noviembre de 2013

## PREFACIO

Esta tesis es presentada como parte de los requisitos finales para optar al grado académico de *Licenciado en Ciencias de la Computación*, otorgado por la Universidad Nacional del Comahue, y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otras. La misma es el resultado de la investigación llevada a cabo en el Departamento de Computación Aplicada y el Departamento de Programación de la Facultad de Informática, en el período comprendido entre Febrero del 2012 y Septiembre del 2013, bajo la dirección de *MSc. Adair Martins*, y la codirección de *Mg. Lidia López*.

Renzo Arnaldo García  
FACULTAD DE INFORMÁTICA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE  
*Neuquén, 4 de junio de 2014.*



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

Facultad de Informática

La presente tesis ha sido aprobada el día ....., mereciendo la  
calificación de .....

## DEDICATORIAS

La presente tesis se la dedico muy especialmente a mis padres y hermanos, que han apoyado y ayudado desde un principio a mi formación académica. A mis amigos de la Universidad, de quienes he obtenido consejos y apoyo durante toda la carrera. A mis amigos de la vida, que me han visto avanzar en mis estudios y han compartido mi crecimiento. A mi directora de tesis, quien compartió todo su conocimiento para que la presente tesis salga lo mejor posible. A todos aquellos que de una u otra manera me han ayudado a escribir y concluir esta tesis.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, quienes me han formado con sus principios de respeto y perseverancia, y han apoyado incondicionalmente mis estudios.

Agradezco a mis hermanos que han vivido conmigo toda mi carrera y han ayudado en los momentos difíciles.

Gracias a mis amigos de mi pueblo natal, por estar pendientes de mis avances y apoyarme en todo momento.

Gracias a mis compañeros y amigos de la Universidad, quienes han hecho que toda esta etapa sea mas llevadera y con los cuales nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional; sin ellos todo hubiese sido cuesta arriba.

A los profesores Mg. Claudia Palese y Dr. Jorge Lassig por aportar sus conocimientos y responder a mis inquietudes con todo lo relacionado a la Energía Eólica.

También me gustaría agradecer a la profesora Ing. Jorgelina Giorgetti por sus consejos en los inicios de mi carrera.

Al presidente de la Agencia para la Promoción y Desarrollo de Inversiones del Neuquén el Ing. Pedro Salvatori por proporcionar información del estado actual de Neuquén en materia de Energía Eólica.

Gracias al Ingeniero Luis Mariano Faiella quien ayudó como guía en los principios de definición de esta tesis.

Agradezco a mi CoDirectora de Tesis Mg. Lidia López, por el apoyo brindado, ayuda prestada en el armado y corrección de esta tesis.

Y un agradecimiento especial a mi Directora de Tesis MSc. Adair Martins, por su esfuerzo, dedicación y apoyo, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado que pueda terminar mis estudios con éxito.

A todas y cada una de las personas que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

¡Gracias a todos!

## RESUMEN

Con el avance de la tecnología en las últimas décadas se ha potenciado la utilización de recursos energéticos basados en fuentes renovables para satisfacer la creciente demanda. La energía eólica, energía obtenida de la fuerza del viento, para generar energía eléctrica sin producir contaminantes ambientales, constituye una de las fuentes de energía renovable con mayor potencial de desarrollo por su viabilidad técnica y económica. La potencia eólica instalada en la Argentina viene creciendo exponencialmente, principalmente en la Patagonia, esperándose que en la próxima década se quintuplicue.

El conocimiento estadístico preciso del régimen del viento es el elemento más importante en la especificación de un proyecto para el aprovechamiento de la energía eólica. Para el tratamiento numérico y estadístico de los parámetros del viento existen varios programas computacionales profesionales, pero de alto costo, necesitando licencias para su uso, como llaves físicas o códigos de acceso y además con restricciones del número de usuarios.

Dada la relevancia y actualidad del tema existe la necesidad del desarrollo de programas de uso libre para fines académicos y profesionales. El objetivo principal de este trabajo de tesis fue el estudio, diseño e implementación de una herramienta computacional, como aplicación Web, basada en *software* libre para el procesamiento de datos obtenidos de la medición del viento. Se empleó ingeniería inversa de un *software* especializado en el análisis de recursos eólicos. Se utilizaron las herramientas *Workbench* para el diseño de la base de datos en MySQL y *Emma* para la gestión de la misma, y el framework *Smart GWT* para la construcción de la aplicación Web de la herramienta. El entorno de desarrollo fue el IDE *Eclipse* y lenguaje de programación *Java*. La herramienta fue denominada “VientOline” y será utilizada e integrada a los procesos de enseñanza y aprendizaje colaborativos.

Se realizó el tratamiento estadístico de una base de datos de viento de la Universidad Nacional del Comahue, particularmente datos de velocidad, dirección y altura. Se realizaron gráficos representativos como histogramas de velocidad, rosa de los vientos, perfil vertical de velocidad, perfil mensual y diario, logaritmo de potencia, entre otros. A través del ajuste numérico por mínimos cuadrados, se ajustó la distribución de probabilidad de la velocidad media con la función *Weibull*. Estas informaciones son importantes para realizar los distintos análisis para la definición del régimen del viento y en consecuencia para la aplicación en modelos de energía eólica de una determinada localidad. La herramienta fue validada con un *software* profesional específico, mostrando en base a los cálculos del error relativo porcentual que los mismos fueron nulos o muy pequeños, concluyendo que la herramienta desarrollada implementa y realiza de manera eficiente las funciones específicas dándole confianza al usuario para su utilización.

## ABSTRACT

The notorious advance of technology has fostered the use of resources based on renewable energy to fulfill the growing demand. Wind power, the energy obtained from wind energy to generate electricity without producing environmental contaminants, is one of the renewable energy sources with the greatest developing potential due to its technical and economic viability. The wind power installed in Argentina has been exponentially growing these years, especially in Patagonia, and, it is expected to have a five fold growth for the next decade

The accurate statistical knowledge of the wind regime is the most important element in a project specification for the exploitation of wind energy. For numerical and statistical treatment of wind parameters there are several professional software products. However, they have high costs and require licenses for their use, such as the physical keys or access codes, and also have restrictions on the number of users.

Due to the relevance and topicality of this issue, there is a need to develop free softwares for academic and professional purposes. The main objective of this thesis was the study, design and implementation of a computational tool, as a Web application, based on free software aimed at the data processing from wind measurements. We employed reverse engineering of a software specialized in the analysis of wind resources. *Workbench* tools were used to design the MySQL database and *Emma* to manage it, and we used the framework *Smart GWT* for the Web application tool construction. The IDE *Eclipse It* was used as the development environment and *Java* as the programming language. The tool was called “VientOline” and will be used and integrated into the teaching and collaborative learning.

Statistical analyses were performed in a wind database of the National University of Comahue, in this case, particularly the speed, direction and height data were used. Representative speed histograms, compass rose, vertical speed profile, monthly and daily profile, logarithm of power, etc., were also carried out. Through a numerical least-squares adjustment, we adjusted the distribution probability of the average speed with the Weibull function. This information is not only relevant to perform the different analyzes intended to define the wind regime but also, consequently, to its application in the wind energy modeling in a certain place. The tool was validated with a specific professional software, showing from the percentage relative error that they were null or not significant, concluding that the tool we developed is able to implement and efficiently perfom the specific functions, which gives confidence to the user for its use.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y Antecedentes . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Metodología . . . . .	2
1.4. Estructura de la Tesis . . . . .	3
<b>2. Tratamiento de Datos del Viento</b>	<b>5</b>
2.1. Energía y Potencia . . . . .	5
2.2. Forma de Utilización de la Energía Eólica . . . . .	6
2.3. El Viento y su Origen . . . . .	7
2.3.1. Efecto de la rotación terrestre sobre el movimiento del aire . . . . .	8
2.3.2. Efecto de la fricción sobre el movimiento del aire . . . . .	8
2.4. Potencia del viento . . . . .	9
2.4.1. Algunas consideraciones con respecto al viento . . . . .	10
2.5. Análisis Estadístico de los Datos del Viento . . . . .	11
2.5.1. Cálculo de la Velocidad Media . . . . .	11
2.5.2. Ajuste numérico de la distribución de probabilidad por Mínimos Cuadrados . . . . .	12
2.5.3. Cálculo del Histograma . . . . .	13
2.5.4. Función Logarítmica y de Potencia . . . . .	13
2.5.5. Cálculo de la Rosa de los Vientos . . . . .	17
2.6. Panorama de la Potencia Eólica Instalada en el Mundo . . . . .	17
2.6.1. Potencia Eólica Instalada en América Latina y el Caribe . . . . .	18
2.6.2. Potencia Eólica Instalada en Argentina en 2012 . . . . .	19
2.7. Conclusión . . . . .	19
<b>3. Relevamiento de Software</b>	<b>21</b>
3.1. Tipos de Aplicaciones de Energía Eólica . . . . .	21
3.1.1. Software de Análisis de Datos Eólicos . . . . .	21
3.1.2. Software de Modelado de Flujo de Viento . . . . .	21
3.1.3. Software de Modelado de Granjas Eólicas . . . . .	22
3.2. Software de Análisis de Datos Eólicos . . . . .	22
3.2.1. WindRose . . . . .	22
3.2.2. MINT . . . . .	24
3.2.3. WRPLOT View . . . . .	26
3.2.4. Windographer . . . . .	27
3.3. Comparación del Software de Análisis de Datos Eólicos . . . . .	28
3.3.1. Resultado de la Evaluación . . . . .	29
3.4. Conclusión . . . . .	29
<b>4. Desarrollo de la Herramienta</b>	<b>31</b>
4.1. Justificación . . . . .	31

4.2.	Marco de trabajo para el proceso . . . . .	32
4.2.1.	Comunicación . . . . .	32
4.2.2.	Planificación . . . . .	33
4.2.3.	Modelado . . . . .	34
4.2.4.	Construcción . . . . .	38
4.3.	Modelos Prescriptivos de Proceso . . . . .	42
4.4.	Ingeniería Inversa . . . . .	43
4.5.	Conclusión . . . . .	44
<b>5.</b>	<b>Validación de la Herramienta “VientOnline”</b>	<b>45</b>
5.1.	Caso de Estudio Analizado . . . . .	45
5.2.	Perfil Vertical del Viento Cortante . . . . .	46
5.2.1.	Función Logarítmica y de Potencia . . . . .	46
5.3.	Perfil Temporario . . . . .	49
5.3.1.	Perfil Temporario por Mes . . . . .	49
5.3.2.	Perfil Temporario por Hora (Diurno) . . . . .	50
5.4.	Rosa de los Vientos . . . . .	52
5.5.	Histograma de la Frecuencia Relativa . . . . .	55
5.6.	Conclusión . . . . .	56
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>57</b>
6.1.	Objetivos Alcanzados . . . . .	57
6.2.	Limitaciones . . . . .	58
6.3.	Conclusiones Finales . . . . .	58
6.4.	Trabajos Futuros . . . . .	58
<b>Apéndices</b>		<b>65</b>
<b>A.</b>	<b>Diagramas de Clases</b>	<b>67</b>
A.1.	Diagramas UML . . . . .	67
<b>B.</b>	<b>Relevamiento de Datos</b>	<b>79</b>
B.1.	Datos Relevados . . . . .	79

# Índice de figuras

2.1. Velocidad del Viento en el Mundo . . . . .	7
2.2. Tubo De Aire . . . . .	9
2.3. Ley de Betz . . . . .	10
2.4. Distribución <i>Weibull</i> fuente: <a href="http://www.windpower.org">http://www.windpower.org</a> . . . . .	10
2.5. Comparación de Potencias fuente: <a href="http://www.windpower.org">http://www.windpower.org</a> . . . . .	11
2.6. Distribución Mundial de la potencia eólica instalada por países fines de 2011 . . . . .	17
2.7. Distribución Regional de la potencia eólica instalada por países de América Latina y el Caribe a fines de 2011 . . . . .	19
2.8. Distribución de la potencia eólica por provincia instalada en Argentina en septiembre de 2012 . . . . .	19
2.9. Evolución de la Potencia Eólica instalada entre 1995 y 2012 en MW . . . . .	19
3.1. Ventana del <i>Software WindRose</i> (Resultados) . . . . .	24
3.2. Ventana del <i>Software WindRose</i> (Rosa de los Vientos) . . . . .	24
3.3. Ventana del <i>Software WindRose</i> (Velocidad por día) . . . . .	24
3.4. Ventana del <i>Software MINT</i> (Principal) . . . . .	25
3.5. Ventana del <i>Software MINT</i> (Carga de datos) . . . . .	26
3.6. Ventana del <i>Software WRPLOT View</i> . . . . .	26
3.7. Ventana del <i>Software Windographer</i> . . . . .	28
4.1. Diagrama Simplificado de Tareas . . . . .	34
4.2. Arquitectura de “VientOnline” . . . . .	35
4.3. Modelo de Datos . . . . .	35
4.4. Interface Gráfica de Usuario de VientOnline . . . . .	37
4.5. Interface de VientOnline con Datos de Muestra de la Altura 1 . . . . .	38
4.6. Ventana de lectura del archivo fuente . . . . .	38
5.1. Perfil Vertical con <i>Windographer</i> . . . . .	49
5.2. Perfil Vertical con “VientOnline” . . . . .	49
5.3. Perfil Mensual con <i>Windographer</i> . . . . .	50
5.4. Perfil Mensual con “VientOnline” . . . . .	50
5.5. Perfil Diario (Diurno) con <i>Windographer</i> . . . . .	52
5.6. Perfil Diario (Diurno) con “VientOnline” . . . . .	52
5.7. Rosa de los Vientos en 24 direcciones con <i>Windographer</i> . . . . .	54
5.8. Rosa de los Vientos en 24 direcciones con “VientOnline” . . . . .	54
5.9. Distribución de Probabilidad con <i>Windographer</i> . . . . .	56
5.10. Distribución de Probabilidad con “VientOnline” . . . . .	56
5.11. Comparación de Distribuciones de Probabilidad . . . . .	56
A.1. Diagrama de Clases Proyecto Principal (A1) . . . . .	67
A.2. Diagrama de Clases Proyecto Principal (A2) . . . . .	68
A.3. Diagrama de Clases Proyecto Principal (B1) . . . . .	69

A.4. Diagrama de Clases Proyecto Principal (B2) . . . . .	70
A.5. Primera parte Diagrama de Clases Proyecto Secundario . . . . .	71
A.6. Segunda parte Diagrama de Clases Proyecto Secundario . . . . .	72
A.7. Diagrama de Secuencias de Inicialización del Sistema . . . . .	74
A.8. Diagrama de Secuencias para la Lectura del Archivo Fuente . . . . .	75
A.9. Diagrama de Secuencias para la Solicitud de Tablas de la Base de Datos . . . . .	76
A.10. Diagrama de Secuencias para la Solicitud de Gráficos . . . . .	76
A.11. Diagrama de Secuencias para la Solicitud del Gráfico de Rosa de los Vientos . . . . .	77

# Índice de tablas

2.1.	10 principales países con mayor potencia eólica instalada en 2011 . . . . .	17
2.2.	Los 5 principales países de América Latina y el Caribe con mayor potencia eólica instalada . . . . .	18
3.1.	Tabla de Comparación de Software disponibles . . . . .	29
5.1.	Comparación de resultados entre las herramientas “VientOnline” y <i>Windographer</i> . . . . .	47
5.2.	Comparación de resultados entre las herramientas “VientOnline” y <i>Windographer</i> . . . . .	48
5.3.	Comparación de los resultados para la altura 1 entre “VientOnline” y <i>Windographer</i> . . . . .	49
5.4.	Comparación de los resultados para la altura 2 entre “VientOnline” y <i>Windographer</i> . . . . .	49
5.5.	Comparación de resultados para la altura 1 entre “VientOnline” y <i>Windographer</i> . . . . .	51
5.6.	Comparación de resultados para la altura 2 entre “VientOnline” y <i>Windographer</i> . . . . .	51
5.7.	Comparación de resultados entre “VientOnline” y <i>Windographer</i> . . . . .	53
5.8.	Comparación de resultados entre <i>Windographer</i> y “VientOnline” . . . . .	55
B.1.	Datos de Caso de Estudio - Primeras trece Columnas . . . . .	79
B.2.	Datos de Caso de Estudio - Últimas catorce Columnas . . . . .	79



# **Capítulo 1**

## **Introducción**

### **1.1. Motivación y Antecedentes**

La concientización sobre la utilización de recursos energéticos basados en fuentes renovables con el propósito de satisfacer la creciente demanda de energía viene siendo incrementada cada vez más. En función de esto, una alternativa técnica y económica es la utilización de la energía eólica, para generar energía eléctrica sin producir contaminantes ambientales, promoviendo de esta forma un futuro energético limpio.

La capacidad de generación eólica instalada en el planeta fue calculada en 2012 por la Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA, 2012) y la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2012) para fines de 2011 en aproximadamente 237 GW. La potencia eólica instalada en 2011 se incrementó 152 % con respecto a la energía registrada en 2007. Las formas de energía renovables van pasando progresivamente a un primer plano, la generación de electricidad pasará del 3 % en 2009 al 15 % en 2035.

La potencia eólica total instalada en 2012 en el país muestra un incremento de 131 % respecto al año anterior y de 374 % respecto a 2010 y del 435 % respecto a 2003. Se fundamenta este incremento en el contexto del Plan energético Nacional en los últimos tres años con el desarrollo de nuevos parques de generación de energía eólica. Actualmente la potencia eólica instalada en la Argentina es de aproximadamente 142 MW y se espera que supere los 820 MW en el transcurso de esta década, la mayor parte en la Patagonia CLICET (centro latinoamericano de investigaciones científicas y técnicas)[1]-[3].

La provincia de Neuquén dispone de un recurso eólico bastante significativo. Existen aproximadamente 29.000 km<sup>2</sup> de terreno con un recurso eólico potencial, representando el 30 % de la superficie total de la provincia. El gobierno de la provincia a través de la Agencia para la Promoción y Desarrollo de Inversiones del Neuquén (ADI), mediante el decreto N° 1837/09 reservó de manera permanente tierras de propiedad fiscal para el desarrollo de proyectos de inversión de generación, transporte y distribución de energía eléctrica de fuente eólica. El ADI en una primer etapa ha realizado una convocatoria pública de inversores sobre 4 lotes que abarcan unas 6.600 hectáreas. Tres de ellos están ubicados en proximidades de la ciudad de Zapala y el cuarto en la zona del embalse de la represa de El Chocón. El objetivo fue realizar campañas de medición del recurso eólico que permitan evaluar la factibilidad de instalación y explotación de futuros parques de generación de energía eólica<sup>1</sup>.

El conjunto de datos generados por los equipos de medición del viento, particularmente velocidad, dirección y altura entre otros, debe ser procesado mediante modelos numéricos y estadísticos. Estos modelos permiten clasificarlos y mostrarlos a través de gráficos representativos. Los datos son trata-

---

<sup>1</sup>[http://www3.neuquen.gov.ar/copade/contenido.aspx?Id=gui\\_recursos\\_energeticos](http://www3.neuquen.gov.ar/copade/contenido.aspx?Id=gui_recursos_energeticos)

dos estadísticamente, particularmente su almacenamiento es realizado mediante expresiones analíticas, conocidas como distribución de probabilidades. La más utilizada es la distribución de Weibull, que queda definida por el conocimiento de los parámetros de escala y de forma [4]. Con esta información se pueden realizar análisis diarios, mensuales, estacionales y anuales para la definición del régimen del viento y en consecuencia para la aplicación en modelos de energía eólica [5]- [12].

Del relevamiento de referencias bibliográficas se puede mencionar muchos software especializados de tratamiento estadísticos de datos del régimen del viento pero con un alto costo [13]-[16] y con restricciones con respecto al número de usuarios. También en la literatura se encontraron algunos trabajos relacionados donde mencionan desarrollos de software utilizando el entorno de Matlab [17, 18] y en el lenguaje C++ [19].

Teniendo en cuenta la relevancia del tema, se ha motivado a proponer el diseño y el desarrollo de una herramienta computacional basada en *software libre* [20]-[34] para el tratamiento de datos del viento y su aplicación a la generación de energía eólica.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo fue el estudio, diseño e implementación de una herramienta computacional, basada en *software libre*, para el procesamiento de datos de viento para su aplicación en la evaluación de la generación de energía eólica. Será utilizada e integrada a los procesos de enseñanza y aprendizaje colaborativos.

### Objetivos específicos:

- Identificación del *software* existente para el tratamiento de datos de viento, selección de una o más herramientas apropiadas.
- Análisis de los parámetros característicos (velocidad media, diaria, mensual y anual, variación con la altura, entre otros) utilizados en la definición del régimen del viento y su posterior tratamiento estadístico a través de gráficos representativos (histograma de velocidad, rosa de los vientos, etc), importantes para la aplicación en modelos de energía eólica.
- Integración de las herramientas computacionales a ser utilizadas en el diseño del *software* propuesto. Implementación y gestión de la base de datos con *software libre*.
- Diseño, implementación y validación de la herramienta en base a un caso de estudio.

## 1.3. Metodología

La metodología que se utilizó para lograr los objetivos, se apoyó en un estudio teórico/práctico del tratamiento estadístico de los datos del viento, particularmente su almacenamiento en forma de expresiones analíticas. También se estudió y se analizaron distintas herramientas basadas en *software libre* para el desarrollo, diseño e implementación del *software* propuesto.

El marco de trabajo que guió el desarrollo, se basó en los principios de la ingeniería de software, el cual identifica actividades a cumplir como la comunicación, la planificación, el modelado, la construcción (desarrollo), y el despliegue. Se utilizó ingeniería inversa sobre un producto accesible, estudiando

las funcionalidades que ofrece, la información que refleja, y los gráficos que se obtienen, con el fin de poder diseñar e implementar una herramienta que ofrezca las funcionalidades principales necesarias. Este tipo de ingeniería inversa se denomina de análisis dinámico, donde el sistema es ejecutado y su comportamiento externo es analizado para extraer información sin acceder al código [35]-[37].

## 1.4. Estructura de la Tesis

El contenido de este trabajo de tesis se estructura en 6 capítulos, organizados de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se presentan algunos conceptos y definiciones de viento, energía y el análisis estadístico de los datos del viento con sus ecuaciones características para la construcción de los gráficos representativos para el estudio de la generación de energía eólica. También se presenta un panorama sobre la potencia eólica instalada en el mundo y en la Argentina.

En el capítulo 3 se presenta el relevamiento de las principales herramientas computacionales específicas para el análisis de datos del viento y una comparación teniendo en cuenta las características, ventajas y desventajas de cada una. Finalmente se presenta el *software* elegido para realizar la ingeniería inversa para el desarrollo de la herramienta.

En el capítulo 4 se presenta la arquitectura de la herramienta desarrollada y una descripción de como fueron construidas cada una de las capas de esa arquitectura. También se muestra el modelo de datos, el diagrama de clases y la interface implementada. Se especifica como se lograron cumplir las actividades de ingeniería de software y también se muestran los inconvenientes que se fueron resolviendo durante el desarrollo.

En el capítulo 5 se presenta un caso de estudio con datos de medición del viento de la Universidad Nacional del Comahue. Se muestran los distintos cálculos, ajustes numéricos, y todos los gráficos realizados con la herramienta desarrollada. Se realiza la validación de la misma con un *software* profesional de análisis de recursos eólicos, mostrando las comparaciones realizadas.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones finales, limitaciones encontradas durante el desarrollo y sugerencias para futuros trabajos.



## Capítulo 2

# Tratamiento de Datos del Viento

### Introducción

En este capítulo se presentan los conceptos, fundamentos teóricos, definiciones y la importancia de los datos de medición del viento en la generación de energía eólica. También se desarrollan los cálculos teóricos y prácticos necesarios para el análisis de los parámetros característicos utilizados en la definición del régimen del viento. Conocer esta información permite adquirir los conocimientos necesarios para comprender las variables y los procesos que conformarán el modelo computacional a desarrollar. Se realiza el ajuste numérico por mínimos cuadrados para la aproximación de la distribución de probabilidad de la velocidad media del viento. Los mismos fueron utilizados para la construcción de los gráficos representativos (histograma de velocidad, rosa de los vientos, curva del perfil vertical, entre otros) para el análisis de los datos realizados con la herramienta computacional “VientOnline”.

### 2.1. Energía y Potencia

La energía eólica es la energía cuyo origen proviene del movimiento de masa de aire, es decir, del viento. En la tierra el movimiento de las masas de aire se deben principalmente a la diferencia de presiones existentes en distintos lugares de ésta, moviéndose de alta a baja presión. Este tipo de viento se llama viento geostrófico.

Para la generación de energía eléctrica a partir de la energía del viento interesa mucho más el origen de los vientos en zonas más específicas del planeta, estos vientos son los llamados vientos locales, entre estos están las brisas marinas que se deben a la diferencia de temperatura entre el mar y la tierra, también están los llamados vientos de montaña que se producen por el calentamiento de las montañas y esto afecta en la densidad del aire y hace que el viento suba por la ladera de la montaña o baje por esta dependiendo si es de noche o de día.

Una forma de aprovechar el viento es mediante *aereogeneradores*, que tienen diversas aplicaciones específicas, ya sea eléctricas o de bombeo de agua, mediante el aprovechamiento y transformación de energía eólica en energía mecánica. Esta energía, es inagotable, no contamina; y aunque la instalación de uno de estos aparatos es relativamente costosa y morosa, a la larga se sentirán los resultados positivos, especialmente en el campo económico.

En los últimos diez años del Siglo XX y, gracias a un desarrollo tecnológico y a un incremento

de su competitividad en términos económicos, la energía eólica ha pasado de ser una utopía marginal a una realidad que se consolida como alternativa futura y, de momento, complementaria a las fuentes contaminantes [5]-[8].

## Fuentes de energía

Existen diferentes fuentes de energía, las cuales se pueden clasificar en dos grupos:

- Fuentes renovables: no se agotan por su uso, como la energía del viento y del sol. El agua y la biomasa también se incluyen en esta categoría, aunque son renovables bajo la condición de que la fuente se maneje en forma apropiada, por ejemplo, las cuencas hidrológicas y plantaciones de árboles.
- Fuentes no-renovables: están disponibles en cantidades limitadas y se agotan por su uso, como los combustibles fósiles (carbón mineral, petróleo, gas natural). Estas tienen la característica de que, una vez utilizadas para la generación de energía, no se pueden volver a usar.

## 2.2. Forma de Utilización de la Energía Eólica

La Energía Eólica, energía contenida en el viento, es una forma indirecta de energía solar, por lo tanto es un tipo de energía encuadrada dentro de la definición de Energías Renovables. El origen de la misma se fundamenta en la desigual distribución de la energía solar en la atmósfera, que a su vez incide sobre el movimiento de las masas de aire. La característica que mejor define a la Energía Eólica es el bajo grado de concentración en el que se encuentra en la naturaleza, y a su carácter imprevisible. Estas dos características se traducen en un mayor coste de producción que las energías consideradas como tradicionales.

La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad presenta muy poca incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo, ya que no se produce ningún contaminante que incida sobre el terreno, ni tampoco vertidos o grandes movimientos de tierras. Al contrario de lo que puede ocurrir con las energías convencionales, la energía eólica no produce ningún tipo de alteración sobre los acuíferos ni por consumo, ni por contaminación por residuos o vertidos. La generación de electricidad a partir del viento no produce gases tóxicos, ni contribuye al efecto invernadero ni destruye la capa de ozono, tampoco crea lluvia ácida. Se denominan gases de efecto invernadero (GEI) a los gases cuya presencia en la atmósfera contribuyen al efecto invernadero. Entre ellos tenemos al dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el metano ( $CH_4$ ), el óxido nitroso ( $N_2O$ ), etc.

Además, existe la posibilidad de la venta de los Bonos de Carbono a partir de la generación eólica. Los bonos de carbono son un mecanismo internacional de descontaminación para reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente; es uno de los tres mecanismos propuestos en el protocolo de Kyoto, firmado en 1997, para la reducción de emisiones causantes del calentamiento global o efecto invernadero (GEI o gases de efecto invernadero). Las reducciones de emisiones de GEI se miden en toneladas de  $CO_2$  equivalente, y se traducen en Certificados de Emisiones Reducidas (CER). Cada bono de carbono equivale a una tonelada de  $CO_2$  ( $tCO_2$ ) que ha sido dejada de emitir a la atmósfera. El objetivo de la existencia y uso de los bonos es disminuir los costos de las actividades de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs), ya que estos pueden ser comercializados. Los bonos de carbono son documentos que se cotizan en el mercado internacional. El proponente del proyecto puede cotizar los

bonos en la bolsa, o bien, pueden ser vendidos en el mercado de carbono a países industrializados, de acuerdo a la nomenclatura del protocolo de Kyoto<sup>1</sup>.

## 2.3. El Viento y su Origen

La energía eólica es una transformación de la energía solar. El sol radia por hora una energía de 174.423.- 000.000.000 kWh a la tierra. Esta energía, no llega a la tierra de una manera uniforme, sino que calienta las zonas próximas al Ecuador más que las zonas polares. Además de esto, los continentes se calientan y enfrián más rápido que los océanos.

En la atmósfera el aire caliente es mucho más ligero que el aire frío, por lo que se eleva hasta una altura de aproximadamente 10Km, para posteriormente orientarse dirección norte y sur. De esta manera, las corrientes de aire frío se desplazan por debajo de las corrientes de aire caliente. Asimismo, las masas de agua y aire se mueven en un sistema rotatorio, que no sigue una línea recta sino que, debido a la rotación de la tierra, sigue una trayectoria circular (en sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte, y en sentido contrario en el hemisferio sur). La ley de Coriolis explica esta dirección de giro del viento.

Paralelamente, debido a diferente velocidad de cambio de temperatura del aire en zonas de agua y zonas de continente, se establecen diferencias de presión, que influyen en la formación de corrientes de aire. En resumen, el viento no es más que las corrientes de aire que se forman al intentar compensarse la presión del aire en diferentes regiones. Aproximadamente el 1% o el 2% de la energía que recibimos del sol se transforma en energía eólica. Un estudio americano mostró que esta energía sería suficiente para cubrir la demanda energética del planeta [38].

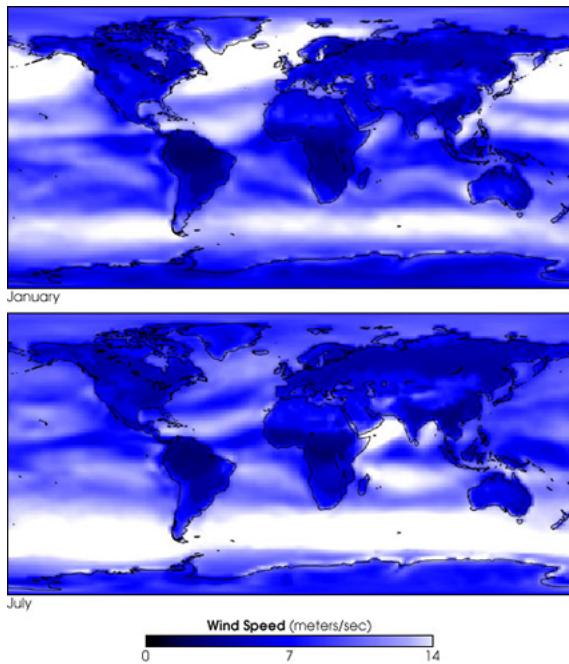
### Origen del Viento

La atmósfera constituida esencialmente por oxígeno, nitrógeno y vapor de agua, se caracteriza por su presión, que varía con la altura. La radiación solar se absorbe de manera muy distinta en los polos que en el ecuador, a causa de la redondez de la tierra. Es, por lo tanto, la energía absorbida en el ecuador mucho mayor a la de la absorbida en los polos. Estas variaciones de temperatura, provocan cambios en la densidad de las masas de aire, por lo que se desplazan en diferentes latitudes. Estas traslaciones se realizan desde las zonas en que la densidad del aire (presión atmosférica) es alta en dirección a las de baja presión atmosférica. Se establece así, cierto equilibrio por transferencia de energía hacia las zonas de temperaturas extremas, que sin esto serían inhabitables. Existen otros factores que afectan al viento. Si la tierra no girara y si no hubiera fricción, el aire se movería directamente desde las áreas de altas presiones a las de baja presión. Pero como ambos efectos existen, el viento es controlado por una combinación de esos factores: la fuerza las variaciones de presión, el efecto de la rotación terrestre y la fricción del aire con la superficie.

#### 2.3.1. Efecto de la rotación terrestre sobre el movimiento del aire

Cuando entre dos masas de aire adyacentes existe una diferencia de densidad, el aire tiende a fluir desde las regiones de mayor presión a las de menor presión. En un planeta sometido a rotación, este flujo de

<sup>1</sup><http://www.un.org/es/climatechange/kyoto.shtml>



**Figura 2.1:** Velocidad del Viento en el Mundo

fuente: <http://www.scienceforums.net/topic/69195-higher-wind-speed-in-winter/>

aire se verá influenciado, acelerado, elevado o transformado por el efecto de Coriolis en cualquier parte de la superficie terrestre en la que nos encontramos. El aire no se mueve directamente del ecuador a los polos y vuelta atrás, como se podría esperar. Los movimientos rotatorios de La Tierra influyen en las direcciones del viento. El viento que sopla del ecuador al Polo Norte es dirigido ligeramente hacia el Este a causa de esta influencia. El viento que sopla del ecuador al Polo Sur es dirigido ligeramente hacia el Oeste. Al viento siempre se le llama como la dirección de la que procede, es por eso que este viento desde el ecuador al Polo Norte se llama viento del Oeste. El aire caliente que es desplazado del ecuador a los polos se enfriará en su camino.

### 2.3.2. Efecto de la fricción sobre el movimiento del aire

La tierra no solo se compone de agua, sino también de suelo. El suelo influye en las direcciones del viento. Esto provoca que el viento sople en una dirección diferente en regiones separadas. El rozamiento o fricción del aire contra la superficie terrestre, produce disminución de la velocidad del viento. Como consecuencia, la fuerza de presión desvía la partícula de aire hacia las bajas presiones. Es por ello que cerca del suelo, el viento real sopla siempre inclinado respecto de las isobaras y dirigido hacia la baja presión. El ángulo existente entre el viento de superficie a 10 m de altura y las isobaras, depende de la rugosidad del suelo.

## 2.4. Potencia del viento

La potencia del viento depende principalmente de 3 factores:

- 1: Área por donde pasa el viento (rotor)
- 2: Densidad del aire
- 3: Velocidad del viento

Para calcular la fórmula de la potencia del viento se debe considerar el flujo másico del viento definido por la ecuación 2.1:

$$M = \rho A V \quad (2.1)$$

donde:

$\rho$ : Densidad del viento

$A$ : Área por donde pasa el viento

$V$ : Velocidad del viento

La potencia debido a la energía cinética del viento se puede expresar por la ecuación 2.2:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.2)$$

Según la Ley de Betz “Sólo puede convertirse menos del 16/27 (aproximadamente el 59%) de la energía cinética del viento en mecánica usando un aerogenerador”<sup>2</sup>.

Un aerogenerador desviarán el viento antes incluso de que el viento llegue al plano del rotor. Este ralentiza el viento al pasar por el rotor hasta 2/3 de su velocidad inicial, lo que significa que no aprovecha toda la energía cinética que el viento aporta al rotor. En la figura 2.2 tenemos el viento que viene desde la derecha y usamos un mecanismo para capturar parte de la energía cinética que posee.

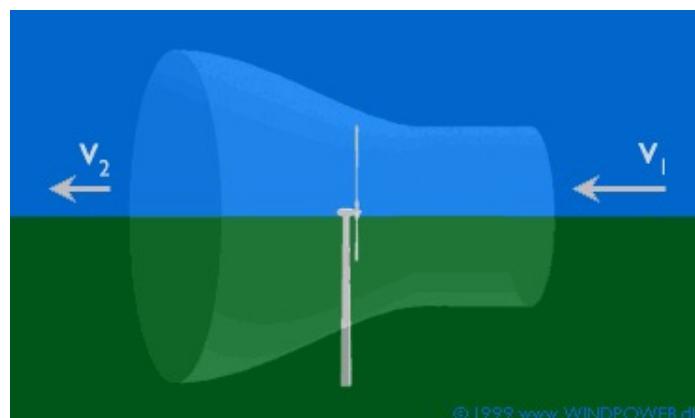


Figura 2.2: Tubo de Aire  
fuente: [http://www.motiva.fi/myllarin\\_tuulivoima/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm](http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm)

<sup>2</sup><http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/manual/manual3.htm>

Para calcular la potencia promedio que es aprovechada por el rotor debemos usar la Ley de Betz que se puede expresar por la ecuación 2.3:

$$P = (\rho/4)(V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2)A \quad (2.3)$$

donde:

$V_1$  es la velocidad del viento que entra al tubo de aire

$V_2$  es la velocidad del viento que sale del tubo de aire

La potencia que lleva el viento antes de llegar al rotor se expresa por la ecuación 2.4:

$$P_0 = (\rho/2)V_1^3 A \quad (2.4)$$

Si la comparamos con la potencia que lleva el viento se puede observar su comportamiento en la figura 2.3:

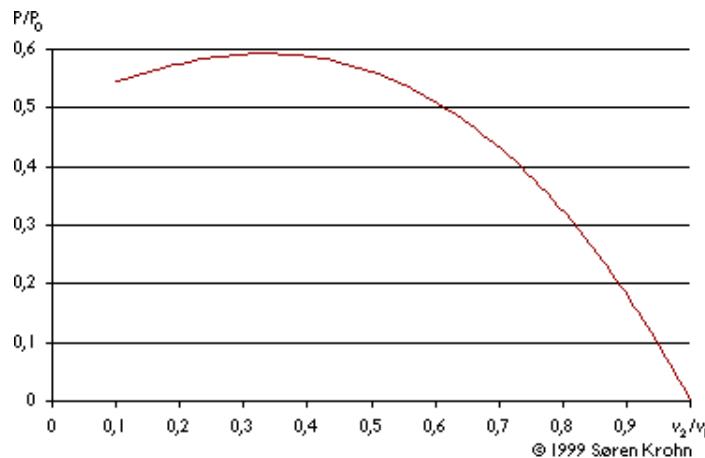


Figura 2.3: Ley de Betz

fuente:[http://www.motiva.fi/myllarin\\_tuulivoima/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm](http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm)

Donde el máximo es aproximadamente 0.59, es decir la máxima potencia que se puede extraer del viento es de 0.59 veces esta potencia.

#### 2.4.1. Algunas consideraciones con respecto al viento

El viento no siempre se mantiene constante en dirección y valor de magnitud, es más bien una variable aleatoria. Algunos modelos han determinado que el viento es una variable aleatoria con distribución *Weibull* como se muestra en la figura 2.4:

En la figura 2.5 se muestran las potencias del viento que consiste en la aplicación de la ecuación 2.4 a la distribución de la probabilidad de la figura 2.4 y también a la potencia extraída por el rotor y la potencia transformada en energía eléctrica. La potencia extraída por el rotor está limitada por la Ley de Betz y la transformada en energía eléctrica está limitada por la eficiencia del generador. Como la potencia

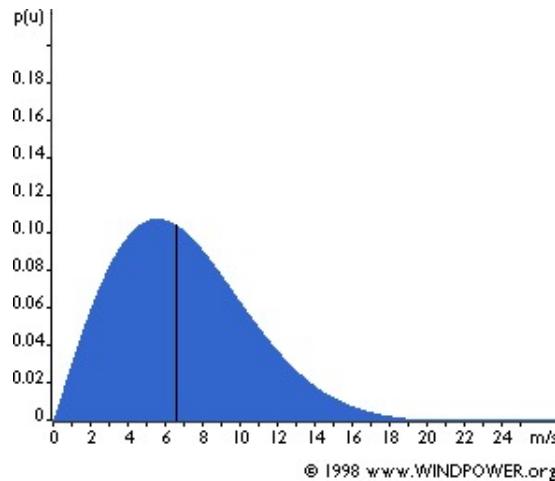


Figura 2.4: Distribución Weibull  
fuente: <http://www.windpower.org>

entregada dada por el generador eólico depende de la velocidad del viento la eficiencia va a depender también de la velocidad del viento registrándose eficiencias máximas del orden de 44 %.

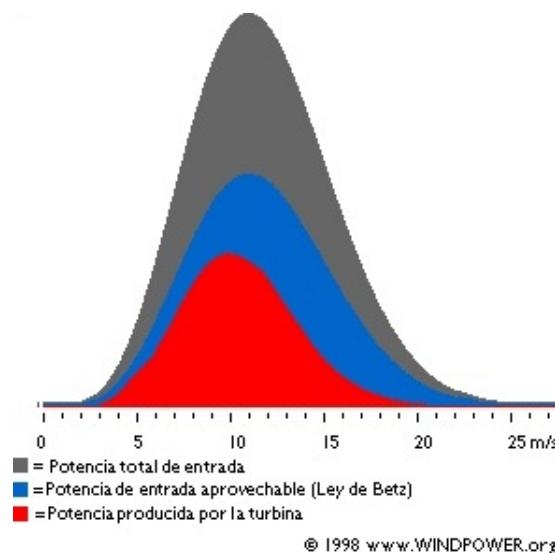


Figura 2.5: Comparación de Potencias  
fuente: <http://www.windpower.org>

Hay que tener en claro que para lograr una alta eficiencia, como la mostrada, son necesarios muchos gastos que aumentarían el costo de producir un kW. más, por lo tanto, máxima eficiencia no implica menor costo de generación.

## 2.5. Análisis Estadístico de los Datos del Viento

En la siguiente sección se presentan algunas definiciones y se desarrollan los cálculos necesarios para el análisis de los parámetros característicos (velocidad media, diaria, mensual, anual, variación con la altura entre otros) utilizados en la definición del régimen del viento. Estos cálculos se utilizaron en el tratamiento estadístico de los datos del viento para la construcción de los gráficos representativos (histograma de velocidad, rosa de los vientos, curva del perfil vertical, ajuste de la distribución de probabilidad de la

velocidad del viento por mínimos cuadrados), con “VientOnline”.

### 2.5.1. Cálculo de la Velocidad Media

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 las condiciones de superficie locales y de los obstáculos. La producción de energía de una turbina eólica variará conforme varíe el viento, aunque las variaciones más rápidas serán hasta cierto punto compensadas por la inercia del rotor de la turbina eólica.

- *Perfil Temporario:* El perfil temporario refleja el comportamiento del viento diurno y/o estacional, lo que permite ver la variabilidad del viento a lo largo del día (promedio horario) y durante las diferentes estaciones del año (promedio mensual).

- Por Mes:

Comportamiento del viento en función de los promedios mensuales (estacional). En zonas templadas los vientos de verano son generalmente más débiles que los de invierno. El consumo de electricidad es generalmente mayor en invierno que en verano en estas regiones. Por lo tanto, en zonas frías del planeta la calefacción eléctrica es perfecta en combinación con la energía eólica, pues el enfriamiento de las casas varía con la velocidad del viento de la misma forma que la producción de electricidad en los aerogeneradores varía con las velocidades del viento.

- Por Hora:

Comportamiento del viento en función de los promedios diurnos (noche y día) del viento. En la mayoría de localizaciones del planeta el viento sopla más fuerte 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. Desde el punto de vista de los propietarios de aerogeneradores, el hecho de que la mayor parte de la energía eólica se produzca durante el día es una ventaja, ya que el consumo de energía entonces es mayor que durante la noche.

### 2.5.2. Ajuste numérico de la distribución de probabilidad de la velocidad media del viento por Mínimos Cuadrados

Es posible utilizar diversos modelos estocásticos para estimar y estudiar las características del viento de un determinado lugar, dentro de las cuales están las distribuciones probabilísticas *Weibull*, *Rayleigh*, *Gama* y *Normal*. A pesar de que la distribución *Weibull* es seleccionada usualmente para caracterizar de forma eficiente las clases de velocidades del viento [9], algunos estudios apuntan a la importancia de evaluar diferentes distribuciones de probabilidades para verificar cuál es la más similar al comportamiento del viento medido [10], [11].

- *Distribución de Weibull:* En general la distribución de *Weibull* es la más utilizada para caracterizar de forma eficiente las características de la velocidad del viento. La misma describe la densidad de velocidades medias horarias de viento. Está caracterizada por dos parámetros  $c$  y  $k$ , siendo  $c$  el factor de escala y  $k$  el factor forma. El factor de escala está directamente relacionado con la velocidad media del viento y el parámetro de forma es adimensional y está relacionado con el desvío estándar de los datos de medición. En la ecuación 2.5 se define la función de densidad de probabilidad:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.5)$$

La función de distribución acumulada para esta distribución es definida en la ecuación 2.6:

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.6)$$

donde:

c, es el factor de escala en unidades de velocidades del viento, directamente relacionado con la velocidad media del viento,

k, es el factor adimensional relacionado con el desvío estándar de los datos obtenidos y  
v, la variable aleatoria de velocidad del viento.

El factor de forma “k” está inversamente relacionado a la variancia  $\sigma^2$  de las velocidades eólicas alrededor de la media. Los parámetros “c” y “k”, pueden ser determinados a partir de la transformación de la ecuación 2.6 en forma lineal como se muestra en la ecuación 2.7:

$$\ln(-\ln(1 - F(v))) = -k \ln(c) + k \ln(v) \quad (2.7)$$

que puede ser representada por la recta de la ecuación 2.8:

$$Y = aX + b \quad (2.8)$$

donde:

$$Y = \ln[-\ln(1 - F(v))] \quad (2.9)$$

$$X = \ln(v) \quad (2.10)$$

$$a = k \quad (2.11)$$

$$b = -k \ln(c) \quad (2.12)$$

Así, la determinación de los parámetros “c” y “k” están condicionados a los cálculos de los coeficientes a y b de la recta. Estos pueden ser obtenidos por el método de *mínimos cuadrados*, usando la regla *cramer* para resolver el sistema de ecuación lineal, aplicada al conjunto de datos  $X = \ln(v)$  y  $Y = \ln[-\ln(1 - F(v))]$  obtenido de los valores de v y  $F(v)$  que, por otra parte, se determinan a partir de las series observadas de velocidad del viento distribuida en “n” intervalos de clase con sus respectivas frecuencias.

### 2.5.3. Cálculo del Histograma

*Histograma de la Frecuencia Relativa:* La frecuencia relativa de una clase es la probabilidad de que los datos considerados se encuentren en dicho intervalo, en nuestro caso se hace en función de la velocidad del viento en metros por segundo (m/s).

En estadística, un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Sirven para obtener una “primera vista” general, o panorama, de la distribución de la población, o la muestra, respecto a una característica, cuantitativa y continua, de la misma y que es de interés para el observador (como la velocidad del viento). De esta manera ofrece una visión en grupo permitiendo observar una preferencia, o tendencia, por parte de la muestra o población por ubicarse hacia una determinada región de valores dentro del espectro de valores posibles (sean infinitos o no) que pueda adquirir la característica. Así pues, podemos evidenciar comportamientos, observar el grado de homogeneidad, acuerdo o concisión entre los valores de todas las partes que componen la población o la muestra, o, en contraposición, poder observar el grado de variabilidad, y por ende, la dispersión de todos los valores que toman las partes, también es posible no evidenciar ninguna tendencia y obtener que cada miembro de la población toma por su lado y adquiere un valor de la característica aleatoriamente sin mostrar ninguna preferencia o tendencia, entre otras cosas.

En general se utilizan para relacionar variables cuantitativas continuas, pero también se lo suele usar para variables cuantitativas discretas, en cuyo caso es común llamarlo diagrama de frecuencias y sus barras están separadas, esto por que en el eje de las  $X$ s ya no se representa un espectro continuo de valores, sino valores cuantitativos específicos como ocurre en un diagrama de barras cuando la característica que se representa es cualitativa o categórica. Su utilidad se hace más evidente cuando se cuenta con un gran número de datos cuantitativos y que se han agrupado en intervalos de clase [39],[40].

#### 2.5.4. Función Logarítmica y de Potencia

- *Perfil Vertical del Viento Cortante:* Debido a que las mediciones preliminares generalmente se realizan a 10 metros, aunque hay casos en que se realizan a menores alturas originalmente con otros fines, tal como monitoreo agrícola, la técnica comúnmente usada para estimar velocidades a mayores alturas es extrapolar los valores obtenidos y de esta manera construir el perfil de velocidad del viento del sitio.
- *Función Logarítmica:* Una de las formas para calcular la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura  $z$  está dada por la ecuación 2.13 de la función logarítmica. Esta función necesita datos de dos alturas para realizar los cálculos.

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.13)$$

$$z_0 = \frac{u_1 \ln z_2 - u_2 \ln z_1}{u_1 - u_2} \quad (2.14)$$

$$u^* = \frac{(u_1 - u_2)k}{\ln \frac{z_1}{z_2} - \varphi(z_1/L) + \varphi(z_2/L)} \quad (2.15)$$

donde:

$z$  es la altura

$z_0$  es la Longitud de Rugosidad

$u^*$  es la Velocidad de Fricción

$\varphi(z/L)$  es el Perfil Adimensional del viento

caso de estabilidad  $Ri_b > 0.01$ , se usa la ecuación 2.16

$$\varphi(z/L) = 6,9z/L \quad (2.16)$$

caso de inestabilidad  $Ri_b < -0.01$  se usa la ecuación 2.17

$$\varphi(z/L) = -2 \ln\left(\frac{1+A}{2}\right) - \ln\left(\frac{1+A^2}{2}\right) + 2 \tan^{-1}\left(A - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.17)$$

caso de neutralidad  $-0.01 < Ri_b < 0.01$  se usa la ecuación 2.18

$$\varphi(z/L) = 0 \quad (2.18)$$

$L$  Longitud de Monin-Obukhov

Caso estable o neutro  $Ri_b > 0.01$  o  $-0.01 < Ri_b < 0.01$ , se usa la ecuación 2.19

$$(z/L) = \frac{1 - 13,8Ri_b^+ \sqrt{1 + 9,2Ri_b}}{95,22Ri_b^- - 18,4} \quad (2.19)$$

Caso inestable  $Ri_b < -0.01$ , se usa la ecuación 2.20

$Ri_b = z/L$  despejando L, se obtiene:

$$L = z/Ri_b \quad (2.20)$$

En estas expresiones cuando aparece z se tiene que utilizar una altura representativa de la capa entre los niveles 1 y 2, por lo que se utilizará el nivel medio  $zm = \sqrt{alt1 \cdot alt2}$ .

En la ecuación 2.21 se calcula el Adimensional de Richardson  $Ri_b$

$$Ri_b = \left[ \frac{g(T_2 - T_1)}{\bar{T}} \right] x \left[ \frac{(z_2 - z_1)}{(u_2 - u_1)^2} \right] \quad (2.21)$$

donde:

$g = 9.8 \text{ m/s}^2$  (aceleración de la gravedad)

$T_1$  = temperatura promedio en altura 1 (altura menor)

$T_2$  = temperatura promedio en altura 2 (altura mayor)

$\bar{T}$  = temperatura promedio

Cuando la Longitud de Rugosidad  $z_0$  es mayor que la separación entre  $z_1$  y  $z_2$  se usan las siguientes funciones para calcular la *longitud de rugosidad* y la *velocidad de fricción*.

donde:

$z_1$  y  $z_2$  son las alturas de donde se obtuvieron los datos.

El cálculo de la Longitud de Rugosidad  $z_0$  se muestra en la ecuación 2.22

$$z_0 = e^{ordenadaalorigen} \quad (2.22)$$

La ordenada al origen se calcula por la ecuación 2.23

$$ordenadaalorigen = \frac{\sum_y - pendiente \sum_x}{n} \quad (2.23)$$

$$pendiente = \frac{\sum_x \sum_y - n \sum_{xy}}{(\sum_x)^2 - n \sum_{x^2}} \quad (2.24)$$

donde:

$n$  es la cantidad de niveles o pares de datos

$x$  es la velocidad media para cada altura

$y$  es el logaritmo de la velocidad media para cada altura

El cálculo de la velocidad de Fricción  $u^*$  se muestra en la ecuación 2.25

$$u^* = \frac{k}{\text{pendiente}} \quad (2.25)$$

donde:

$k$  es la constante de *von Karman* ( $k = 0,4$ )

En este caso la función logarítmica es válida para todos los  $z > z_0$ , y para todo  $z \leq z_0$  el valor de la función es 0.

- **Función de Potencia:** Otra fórmula para calcular el perfil vertical, utilizada en “VientOnline”, es la función de potencia mostrada en la ecuación 2.26, que es más simple y puede dar resultados satisfactorios, aún cuando ellos no son teóricamente exactos. La función de potencia realiza los cálculos con los datos de una altura [12].

$$u(z) = u_I \left( \frac{z}{z_I} \right)^p \quad (2.26)$$

Si se tienen los datos de mediciones de la velocidad del viento a dos alturas  $z_1$  y  $z_2$ ,  $p$  se calcula utilizando la ecuación 2.27

$$p = \frac{\ln(u_2/u_I)}{\ln(z_2/z_I)} \quad (2.27)$$

Para mediciones de velocidad del viento en una sola altura,  $p$  se calcula utilizando la ecuación 2.28

$$p = \frac{l}{\ln(z/z_0)} \quad (2.28)$$

donde:

$z_0$  es la Longitud de Rugosidad

Cuando hay datos de una sola altura, en la práctica se utiliza el valor de  $p = 1/7$ , un valor muy utilizado en los *software* de este tipo.

### 2.5.5. Cálculo de la Rosa de los Vientos

La Rosa de los Vientos es un modo de representación del recurso eólico. Este gráfico permite, de una manera simple, conocer la frecuencia, valores medios de velocidad de viento y la energía en cada dirección. También permite obtener las rosas de potencia y la de energía a partir de la Rosa de los Vientos. Se trata de un diagrama polar que representa el tanto por ciento de viento con la dirección indicada y, en módulo, su escala de velocidad media. Las observaciones generalmente efectuadas permiten deducir que la dirección del viento varía continuamente en torno a una dirección media.

Cada uno de los datos de viento obtenidos por sendas estaciones meteorológicas recoge tanto la velocidad del viento en ese instante como la dirección del viento. Esta información de dirección es continua de 0 a 360º. En “VientOnline” se discretizó en 4, 8, 12, 16, 20 y 24 sectores de dirección. Si esta información se pondera anualmente nos dará la velocidad media del viento en dicha dirección [8].

## 2.6. Panorama de la Potencia Eólica Instalada en el Mundo

En la tabla 2.1 se muestran los diez principales países con su mayor potencia eólica instalada en el año 2011. Según el Report de la Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA) y el Wind 2011 Annual Report de la Agencia internacional de la Energía (IEA) publicados en el año 2012 se puede mencionar que los tres primeros lugares fueron ocupados por la Republica Popular China con 62.364 MW, Estados Unidos con 46.919 MW y por Alemania con 29.075 MW. El total mundial fue calculado en 237.023 MW. En la figura 2.6 se muestra el porcentaje de la mayor potencia eólica instalada para los primeros países y el resto del mundo. Se puede observar China con el 26 %, seguido por Estados Unidos con 20 %, Alemania con 12 %, España con 9 % y con 7 % India. Con 3 % se ubica Italia, Francia y Reino Unido, y con 2 % Canadá y Portugal. Finalmente el resto del mundo se quedó con el 13 % [1]-[3].

Tabla 2.1: 10 principales países con mayor potencia eólica instalada en 2011  
fuente: base de datos del CLICET

Posición	País	Potencia Instalada a fines de 2011	Incremento Observado en 2011	Variación porcentual 2011-2010
		MW	MW	%
1	Rep. Pop. China	62.364	17.631	39,4
2	Estados Unidos	46.919	6.739	16,8
3	Alemania	29.075	1.860	6,8
4	España	21.673	1.017	4,8
5	India	15.880	2.814	21,5
6	Italia	6.878	940	16,2
7	Francia	6.640	980	17,3
8	Reino Unido	6.470	814	15,6
9	Canadá	5.265	1.257	31,4
10	Portugal	4.302	381	10,3
Resto del Mundo		31.557	5.651	n/a
<b>TOTAL MUNDIAL</b>		<b>237.023</b>	<b>40.084</b>	<b>20,3</b>

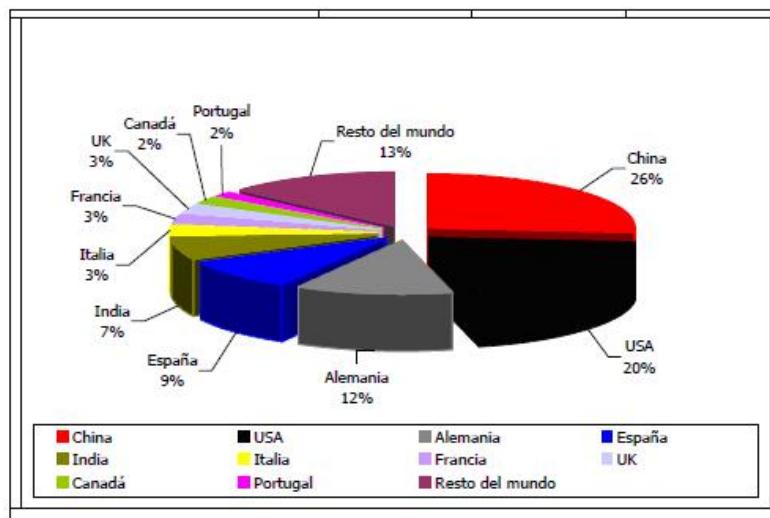


Figura 2.6: Distribución Mundial de la potencia eólica instalada por países fines de 2011  
fuente: base de datos del CLICET

### 2.6.1. Potencia Eólica Instalada en América Latina y el Caribe

En la tabla 2.2 según los datos de la WVEA (2012) y IEA (2012) se muestra en el año 2011 los cinco principales países de América Latina y el Caribe con la mayor potencia eólica instalada. Se puede observar que Brasil ocupaba el primer lugar con 1.429 MW a nivel regional y el vigésimo lugar a nivel mundial. En segundo lugar México con 929 MW a nivel regional y 23º a nivel mundial. Chile presentaba una potencia de 190 MW, Costa Rica de 48 MW y Argentina de 129 MW [1, 2].

Tabla 2.2: Los 5 principales países de América Latina y el Caribe con mayor potencia eólica instalada  
fuente: base de datos del CLICET

Posición Regional	Posición Mundial	País	Potencia Instalada a fines de 2011	Incremento Observado en 2011	Variación porcentual 2011-2010
			MW	MW	%
1	20	Brasil	1.429	499	53,7
2	23	México	929	408	78,3
3	35	Chile	190	20	11,8
4	39	Costa Rica	148	25	20,5
5	42	Argentina	129	75	139,3
Resto de AL %C			327	132	n/a
TOTAL MUNDIAL			3.152	1.159	64

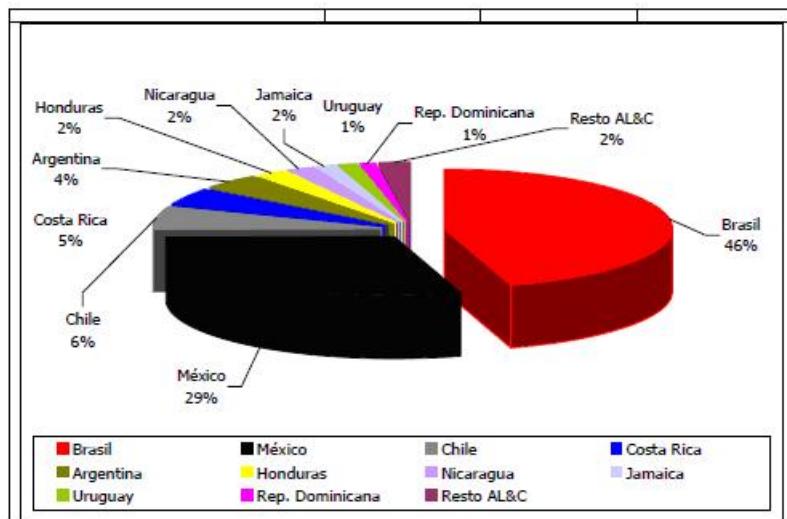


Figura 2.7: Distribución Regional de la potencia eólica instalada por países de América Latina y el Caribe a fines de 2011

fuente: base de datos del CLICET

### 2.6.2. Potencia Eólica Instalada en Argentina en 2012

La potencia eólica total instalada en Argentina en 2012 era de 142 MW. En el gráfico 2.8 se muestra la distribución de la potencia eólica instalada en porcentaje para las provincias Argentinas en el mes de septiembre de 2012. La mayor concentración se encuentra en la provincia de Chubut con el 73 %, le sigue la provincia de La Rioja con el 18 %, y Buenos Aires con 4 %. Santa Cruz con 2 %, Con 1% la provincia de San Juan y La Pampa, finalmente Neuquén con el 0,3 % (0.4 MW)[1, 2].

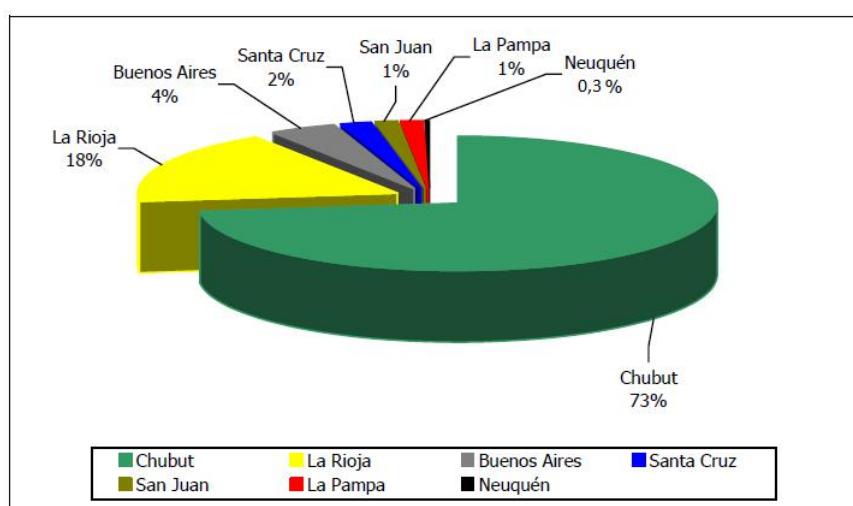


Figura 2.8: Distribución de la potencia eólica por provincia instalada en Argentina en septiembre de 2012

fuente: base de datos del CLICET

En el gráfico 2.9 se muestra la evolución de la potencia eólica total instalada en Argentina entre los años 1995 y 2012. Se puede observar que en el año 2012 hubo un incremento del 131 % respecto

al año 2011 y del 374% aproximadamente respecto al año 2010 y del 435% respecto al año 2003. Se fundamenta este incremento en el contexto del Plan energético Nacional en los últimos tres años con el desarrollo de nuevos parques de generación de energía eólica [1, 2].

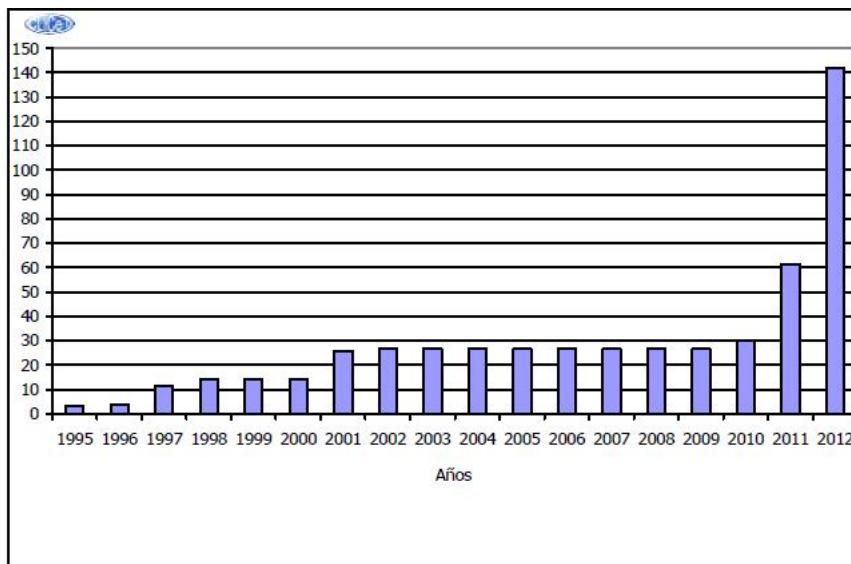


Figura 2.9: Evolución de la Potencia Eólica instalada entre 1995 y 2012 en MW  
fuente: base de datos del CLICET

## 2.7. Conclusión

En este capítulo se presentó una introducción a las distintas fuentes de energía, encuadrando a la energía eólica dentro de las energías de *fuente renovable*. También se describió del origen del viento y como este puede ser utilizado para la generación de energía eólica, con todos los beneficios que esto conlleva.

Para el diseño de la herramienta computacional, es necesario estar familiarizado con la problemática de la energía eólica y la obtención y cálculo de los distintos parámetros que la describen.

Se presentaron las definiciones y los cálculos necesarios para el análisis de los parámetros característicos, para la construcción de los gráficos representativos, mediante su tratamiento estadístico. Los gráficos contemplados fueron: histograma de velocidad, rosa de los vientos, curva del perfil vertical, ajuste de la distribución de la velocidad del viento por mínimos cuadrados. Cada uno de estos cálculos y gráficos fueron validados en el capítulo 5.

Por último se presentó un panorama de la potencia eólica instalada a nivel mundial, dando en primer lugar a la República Popular China con 62.364 MW instalados en el año 2011. A nivel de América Latina y el Caribe el primer lugar es ocupado por Brasil con 1.429 MW instalados a fines del 2011. En Argentina la potencia eólica instalada en el año 2012 era de 142 MW, concentrando un 73% de esa energía en la provincia de Chubut, y un 0.3%(0.4MW) en la provincia del Neuquén.

# Capítulo 3

## Relevamiento de Software de Análisis de Datos Eólicos

### Introducción

En este capítulo se discute el relevamiento realizado sobre las principales herramientas computacionales existentes para el análisis de datos del viento. A continuación se sintetiza una descripción de las aplicaciones relacionadas a la generación de energía eólica: Software de Análisis de Datos Eólicos, Software de Modelado de Flujo de Viento y Software de Modelado de Granjas Eólicas. Luego se realiza una comparación de distintos Software de Análisis de Datos Eólicos para determinar el más adecuado para realizar la ingeniería inversa, para ser utilizado en el presente trabajo de tesis.

### 3.1. Tipos de Aplicaciones de Energía Eólica

#### 3.1.1. Software de Análisis de Datos Eólicos

El *software* de análisis de viento ayuda a eliminar los errores de medición de los datos de viento establecidos y realiza un análisis estadístico especializado. Algunas aplicaciones populares son: *WindRose*<sup>1</sup>, *MINT*<sup>2</sup>, *WRPLOT View*<sup>3</sup> y *Windographer*<sup>4</sup>.

#### 3.1.2. Software de Modelado de Flujo de Viento

Estos predicen importantes características del viento en los lugares donde las mediciones no están disponibles. *WAsP* es el más popular y fue creado en el “Laboratorio Nacional Risø de Dinamarca”. *WAsP* usa un modelo de flujo potencial para predecir cómo el viento fluye sobre el terreno en una ubicación específica. Otros *software* como *Meteodyn WT*, *O.F.Wind*, *WindSim* y *Windie(TM)*, en cambio,

---

<sup>1</sup><http://www.windrose.gr>

<sup>2</sup><http://www.sander-partner.ch/en/mintmain.html>

<sup>3</sup><http://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>

<sup>4</sup><http://www.windographer.com>

usan dinámicas de fluido computacional, que es potencialmente más precisa. Sin embargo, esto tiene la desventaja de tener un mayor costo computacional.

### 3.1.3. Software de Modelado de Granjas Eólicas

Estos tipos de *software* simulan el comportamiento de granjas eólicas, muy útil para calcular la producción de energía. El usuario normalmente puede ingresar datos de viento, líneas de contorno de altura y rugosidad (topografía), las especificaciones del aerogenerador, mapas de fondo y definir restricciones ambientales. Este procesamiento de información produce el diseño de un parque eólico que maximiza la producción de energía teniendo en cuenta las restricciones y cuestiones relativas a la construcción de la misma. Se pueden mencionar: *WindPro*, *WindSim*, *WindStation* entre los más utilizados y otros como *Meteodyn WT*, *openWind*, *WindFarm*, *WindFarmer* y *O.F.Wind*.

- *WindPro*: Es un paquete de *software* basado en módulos adecuados para el diseño y planificación de proyectos tanto de aerogeneradores individuales como de grandes granjas eólicas [41].
- *WindSim*: Es una herramienta de diseño de granjas eólicas. Combina tecnologías avanzadas con el dominio de la energía eólica, permitiendo diseñar parques eólicos más rentables [42].
- *WindStation*: Herramienta de *software* para la simulación del flujo de viento sobre topografía compleja. Es una aplicación para *Windows* [43].

## 3.2. Software de Análisis de Datos Eólicos

En las siguientes subsecciones se presentan algunas herramientas computacionales con una breve descripción de sus características, sus ventajas y desventajas, requerimientos y se muestran las interfaces de cada una.

### 3.2.1. WindRose

*WindRose* es un complemento para *Microsoft Excel* para el análisis de datos de viento. Permite la lectura de datos ASCII (un formato de archivo producido por cada registro de datos, LIDAR (Light Detection and Ranging) o SODAR dando como resultado del análisis los gráficos correspondientes en distintas hojas de cálculo. Los mismos cumplen con las normas vigentes en el sector de Energía Eólica.

*WindRose* es utilizado por la mayoría de los desarrolladores, consultores, instituciones académicas, así como por numerosas empresas en todo el mundo. *WindRose* ofrece una amplia gama de resultados estadísticos especializados dedicados a analistas de datos de viento.

Características:

- Clásicos análisis de datos de viento (valores promedios, ráfagas, rosas de viento de tiempo y energía, la distribución de Weibull, correcciones de densidad de aire, etc).
- Resultados de calibración de anemómetros In-situ.

- Filtrado de datos ( automático o manual ).
- Investigación de cambios y cillazadura de viento (cizalladura del viento: es un cambio en la velocidad o dirección del viento con la altura en la atmósfera).
- Previsualización de datos con capacidad de ampliación.
- Distribuciones diurnas (global o por mes) para la velocidad del viento.
- Tablas de intensidades de turbulencias representativas o características.
- Factor de capacidad y estimación de producción anual de un aerogenerador, en el lugar de medición.
- Acepta periodos de tiempo con diferentes rangos (es decir: 10 minutos, 1 hora, etc).
- Emite datos de resultado en una sola tabla.
- Fácil localización de periodos con correlación de altas/bajas.

La última versión del *software WindRose* se puede descargar desde su Web oficial y el uso es completamente gratuito pero sólo para el análisis de datos que no excedan los 30 días. Para analizar un conjunto de datos mayor ( mayor a un mes ) se debe comprar la licencia de uso. Esta versión de prueba trae un ejemplo donde se pueden ver los distintos gráficos de salida en las distintas hojas de cálculo de excel.

Una desventaja que se presentó para utilizar este *software* fue la necesidad de contar con el *software* propietario *MS-Office*. *WindRose* no se puede instalar en la versión de 64 bits de MS-Office 2010 y su solución está actualmente en investigación.

En la Figura 3.1 se muestra la pantalla principal del *software*, donde refleja algunos resultados que se pueden obtener con el mismo. En la Figura 3.2 se muestra la rosa de los vientos obtenida con los datos de prueba y en la Figura 3.3 se muestra la variación de la velocidad del viento por día. Estos son algunos de los gráficos que se pueden obtener con el *software WindRose*.

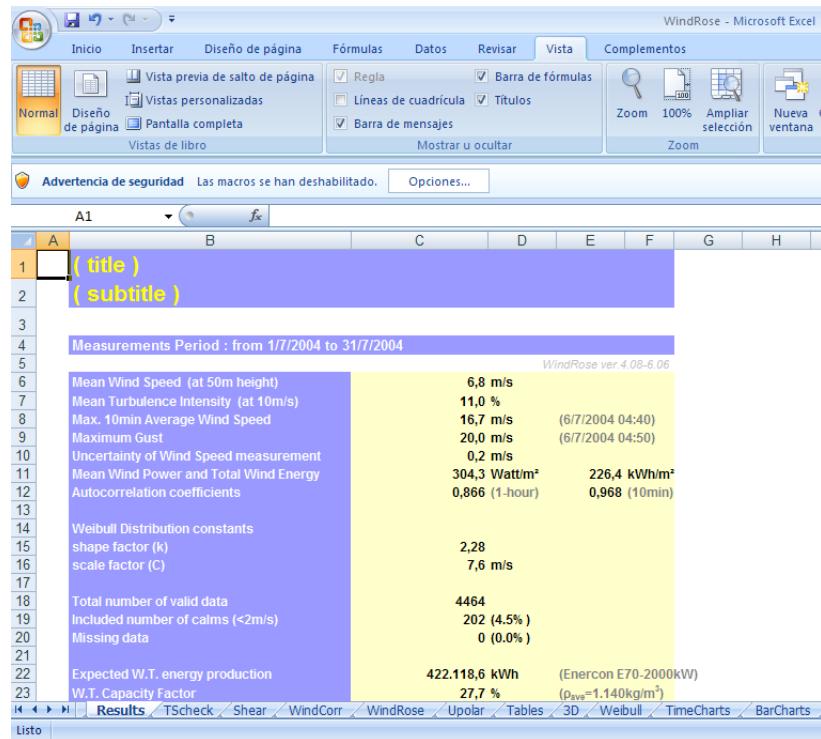


Figura 3.1: Ventana del Software WindRose (Resultados)

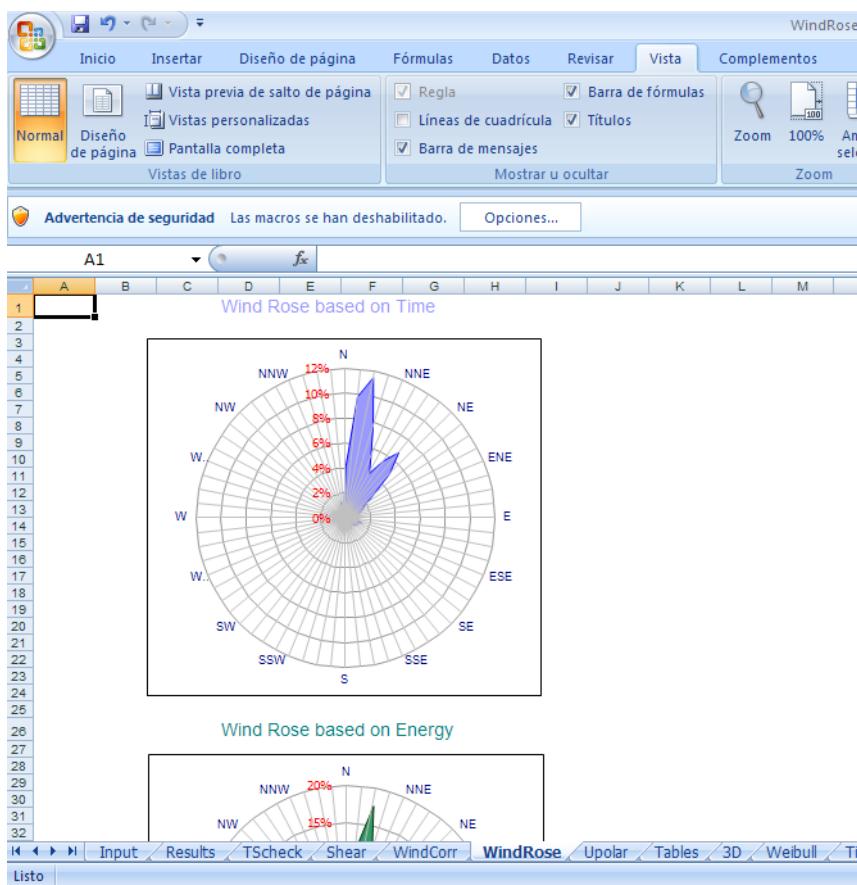
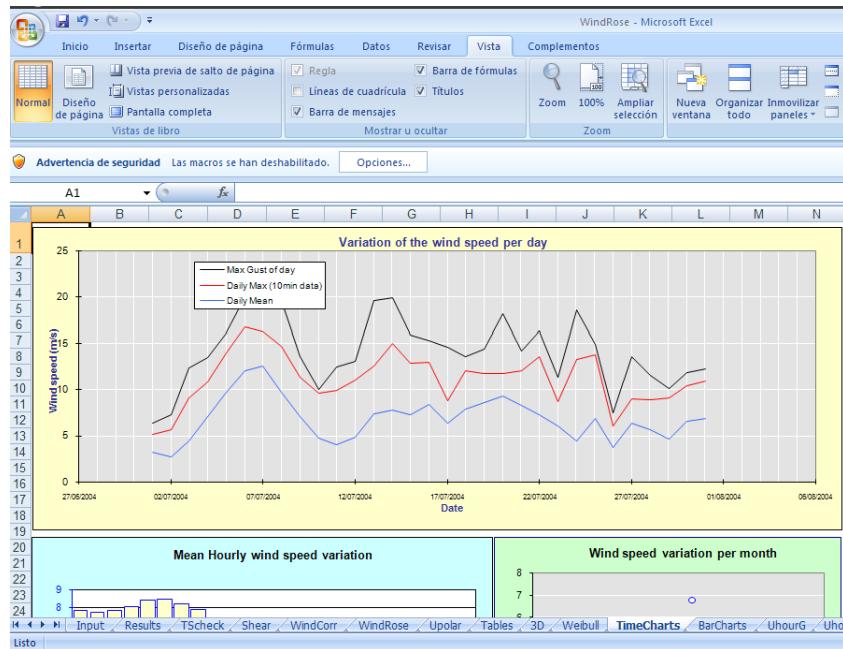


Figura 3.2: Ventana del Software WindRose (Rosa de los Vientos)

Figura 3.3: Ventana del *Software WindRose* (Velocidad por día)

### 3.2.2. MINT

*MINT* (The Math Machine for Wind Data Analysis - La máquina matemática para el análisis de datos de viento). Apropiada para análisis de datos eólicos profesionales, maneja grandes conjuntos de datos y se pueden realizar informes ampliados de los resultados en reportes PDF.

#### Características:

- Permite realizar gráficos de rosa de los vientos, de series temporales y otros, desde uno o varios conjunto de datos. Lee y analiza observaciones LIDAR (Light Detection and Ranging) o SODAR a una resolución de un segundo.
- Deja extrapolar registros de tiempo a la altura del cubo basado en exponencial, como registro o perfiles de cillazadura del viento.
- Este *software* usa el poder de las matemáticas avanzadas. Usa arranque de flejes para estimar el rango de los parámetros de *Weibull*.
- Estima velocidades extremas de viento con *Gumbel* utilizada para modelar la distribución del máximo (o el mínimo), por lo que se usa para calcular valores extremos, GEV (Valores Extremos Generalizados) es una familia de distribuciones de probabilidades continuas desarrollado dentro de la familia de valor extremo para combinar las familias *Gumbel*, *Fréchet* y *Weibull*, o métodos POT (Método de Pico sobre un Umbral de velocidad) considera la serie completa de velocidades y fija un umbral suficientemente alto en vez de valores máximos.
- Calcula la producción de energía anual AEP (producción de energía neta anual), basándose en simulación de Monte Carlo.

La Web oficial de *MINT* permite descargar una versión de prueba que se puede utilizar por 20 días, su uso no es intuitivo, está limitado a la interfaz gráfica de usuario (GUI) y otros *software* no ejecutables directa o indirectamente por el GUI. Para otros programas ejecutables suministrados con el acuerdo, se necesita otro tipo de licencia.

La versión de acceso gratuita no permite el ingreso de datos propios para la evaluación. Los únicos datos que se pueden usar son los que la empresa desarrolladora del *software* provee (datos propietarios) por medio de internet, solicitándolos mediante un usuario y contraseña (los cuales no fueron otorgados al momento de registrarnos para la descarga del *software*) e indicándole datos como: latitud, longitud, altura, y la información que deseamos obtener (velocidad y dirección del viento, temperatura, etc).

La Figura 3.4 muestra la pantalla de inicio del *software*. En la Figura 3.5 se visualiza la pantalla con la información que se solicita para poder descargar los datos que ellos proveen.

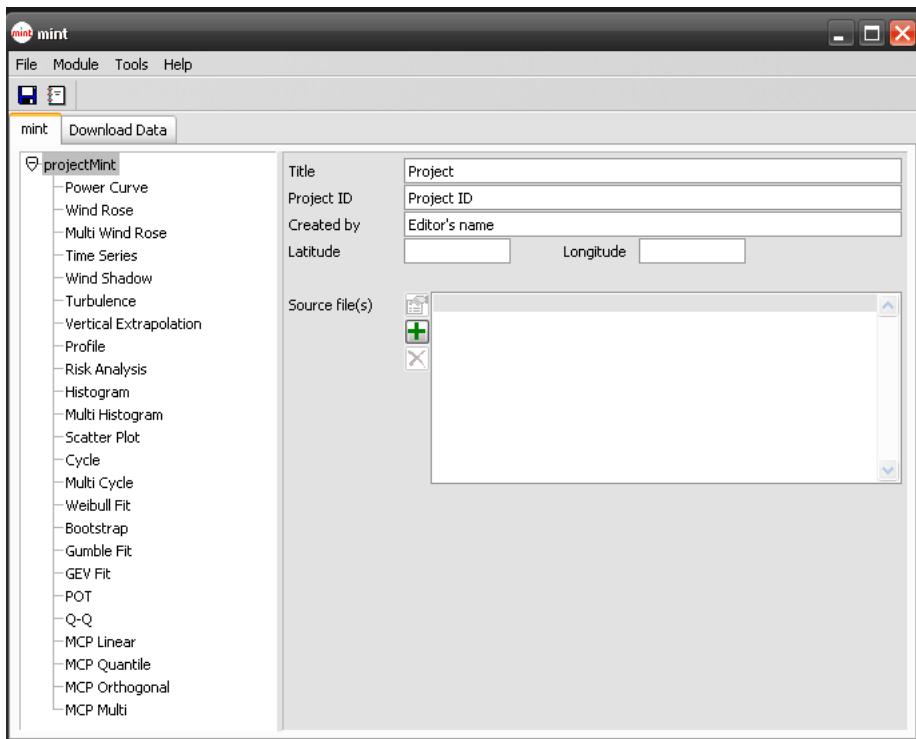


Figura 3.4: Ventana del *Software MINT* (Principal)

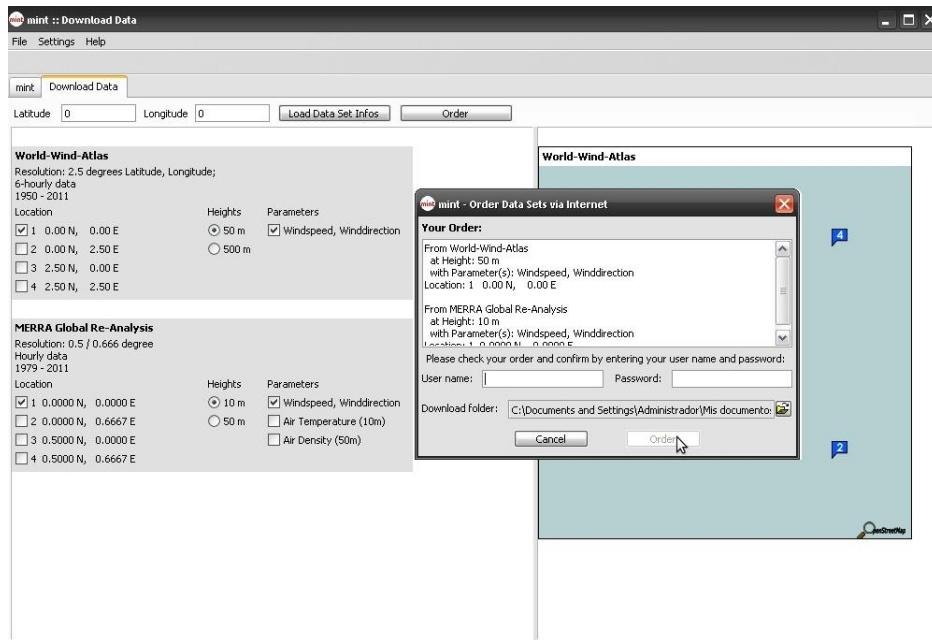


Figura 3.5: Ventana del Software MINT (Carga de datos)

### 3.2.3. WRPLOT View

*WRPLOT View* es un programa completamente operacional para datos meteorológicos. Provee planos visuales de rosa de los vientos, análisis de frecuencia y gráficos para varios formatos de datos metereológicos.

La rosa de los vientos se puede utilizar para representar gráficamente la dirección de transporte dominante del viento para un área. Debido a las influencias del terreno local, los posibles efectos costeros, la exposición de los instrumentos, y la variabilidad temporal del viento, las estadísticas de rosa de los vientos no siempre pueden ser representativas del verdadero transporte para un área. Otras condiciones metereológicas también pueden ser importantes para determinar la formación y el transporte de ciertos contaminantes atmosféricos, en particular para los contaminantes reactivos. Los resultados de este programa por lo tanto deben utilizarse con precaución.

Características:

- *Visualizar la rosa de los vientos:* Visualiza de forma rápida y fácil la rosa de los vientos para los datos metereológicos. Esta es una excelente manera de resumir grandes cantidades de datos eólicos y realizar controles de calidad.
- *Analiza de muchas maneras los datos recolectados:*
  - Planos Windrose.
  - Tablas de distribución de frecuencia.
  - Gráficos de distribución de frecuencias de clase del viento.
- *Soporte para múltiples formatos de archivo:* Los formatos de archivos más comunes son soportados; y para los que no, una utilidad de *import* desde Excel permite una importación simple.

- Visualiza la rosa de los vientos en Google Earth: WRPLOT View permite la fácil exportación de la rosa de los viento para *Google Earth*. Dando el control total de: colores, opacidad, radio máximo, altura.

*WRPLOT View* es completamente gratuito y se puede descargar desde su Web oficial. Para poder iniciar su uso, es necesario solicitar una código de activación en esta Web. La licencia otorgada es por el lapso de un año, y al expirar permite registrarnos nuevamente.

*WRPLOT View* sólo emite gráficos de rosa de los vientos y tablas de distribución de frecuencia. Los demás gráficos necesarios para realizar la comparación final de esta tesis, no están contemplados en este *software*.

En la Figura 3.6 se muestra la pantalla principal de este *software*.

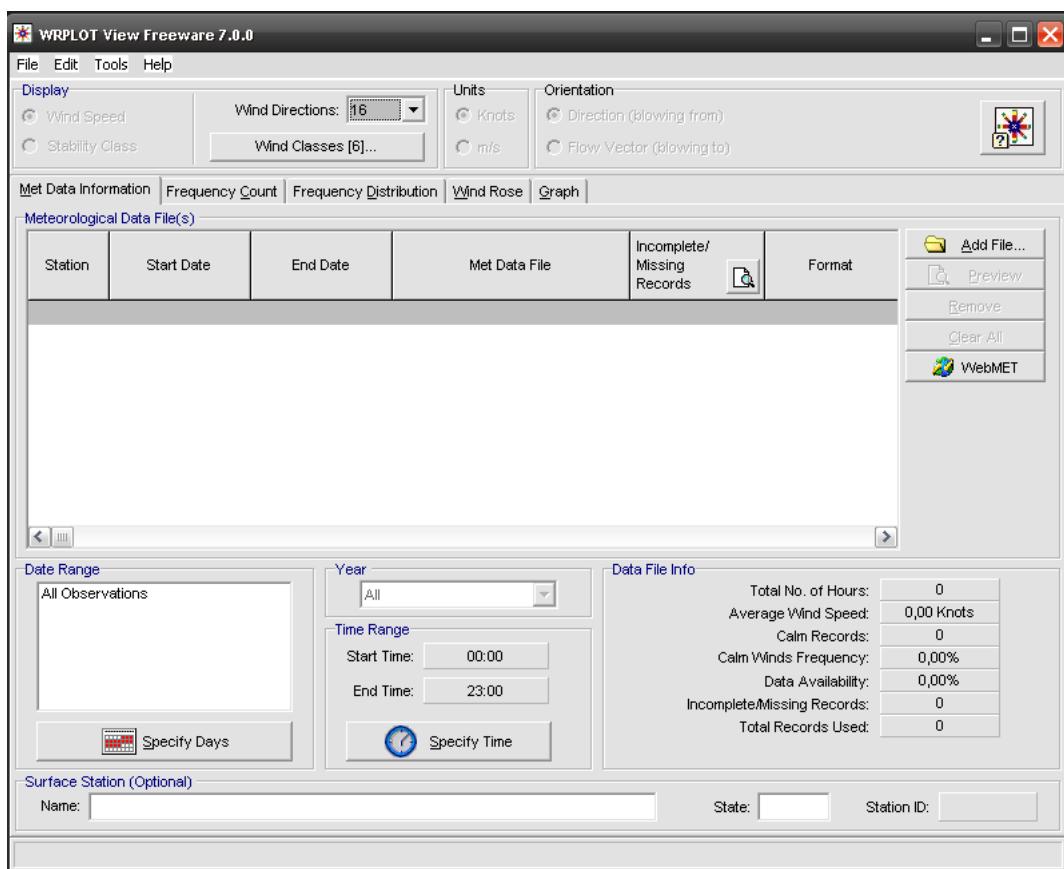


Figura 3.6: Ventana del *Software WRPLOT View*

### 3.2.4. Windographer

Es una herramienta para el análisis de datos de recursos eólicos. Este importa datos crudos, permitiendo un rápido control de calidad y análisis estadístico y exporta a todos los modelos de flujo del viento comunes para la industria de la energía eólica.

Características:

- *Rápido acceso a datos:* Windographer importa datos de manera rápida desde casi cualquier formato y automáticamente determina la estructura de los datos. Los datos pueden ser analizados directamente, en lugar de perder tiempo especificando detalles tales como el paso del tiempo o el formato de la fecha. Windographer automáticamente identifica que columnas contienen la velocidad del viento, la desviación estándar, la velocidad de viento vertical, la dirección, la temperatura, la presión y datos de humedad relativos. Permite la confirmación o modificación de cualquiera de estas decisiones.
- *Visualización de datos:* Proporciona una amplia gama de gráficos y tablas para mostrar, no solamente los datos desde el archivo de datos original, si no también cantidades calculadas como la densidad del aire y la intensidad de turbulencia. Configuraciones flexibles de filtros y de presentación dan un alto grado de control y las rápidas actualizaciones permiten que se pueda modificar la configuración y ver los efectos inmediatamente.
  - *Resumen al estilo de tablero de mandos:* Con una simple mirada podemos ver información clave como el perfil vertical del viento, la frecuencia de rosa de los vientos, perfiles estacionales y diurnos, la temperatura media, la presión, la densidad del aire, la densidad de potencia eólica y coeficientes de cillazadura de viento.
  - *Gráficos de series de tiempo desplazables:* Contiene un gráfico de series de tiempo único que permite acercarse y alejarse, desplazarse hacia adelante o hacia atrás en el tiempo, mostrar u ocultar columnas de datos y comparar lado por lado con simples *clicks*.
  - *Rosa de los Vientos:* Permite crear muchos tipos de rosa de los vientos, incluyendo frecuencia por dirección, el valor medio de cualquier columna de datos por dirección, el total de potencia eólica por dirección, e incluso diagramas de dispersión polar. Subdivide por mes o por hora del día y filtra de varias maneras. La rosa de los vientos se actualiza en tiempo real a medida que cambian sus propiedades.
  - *Perfiles diurnos:* Traza el perfil promedio diurno de cualquier columna de datos. Permite filtrar por fecha, bandera, sector de dirección u otros criterios y elegir entre crear un único gráfico o un gráfico para cada mes.
  - *Histograma de Frecuencia:* Histogramas de frecuencia de dispersión para cualquier columna de datos. Ajusta a la distribución de probabilidad neta del viento con la distribución *Weibull*.
  - *Gráficos de dispersión:* Un diagrama de dispersión permite trazar una columna de datos frente a otra, permitiendo ver las relaciones entre las variables y detectar problemas en los datos.
  - *Tablas:* Windographer produce una gran variedad de tablas de resumen estadísticos, que fácilmente pueden ser exportadas a una hoja de cálculos para su posterior análisis.
- *Mejora la calidad de datos:* Con conjuntos de datos que tienen problemas, se pueden rápidamente detectar problemas tales como sombreado de torre, eventos de formación de hielo o mal funcionamiento de sensores y filtrar datos erróneos de cálculos. Aplicar factores de escala, desvíos o cambios de tiempo e incluso llenar vacíos.

- *Crea salidas profesionales:* Permite realizar un resumen de las conclusiones y exportar datos para un análisis posterior. Crea informes estándar, exporta cualquier gráfico o tabla y permite exportar los modelos de flujo de viento.

En la Web oficial se puede descargar una versión de prueba por 15 días. Tiene como requerimiento instalarse en plataformas Windows, pero utilizando *Wine* (*software* que permite la ejecución de programas diseñados para *MS-DOS* y *Windows*) se pudo instalar en una plataforma *Linux* para su evaluación. Esta versión es completa y tiene todas las opciones habilitadas.

En la Figura 3.7 se muestra la pantalla de resumen con los gráficos de perfil vertical, rosa de los vientos, promedio de velocidad de viento mensual y promedio de velocidad de viento diurno.

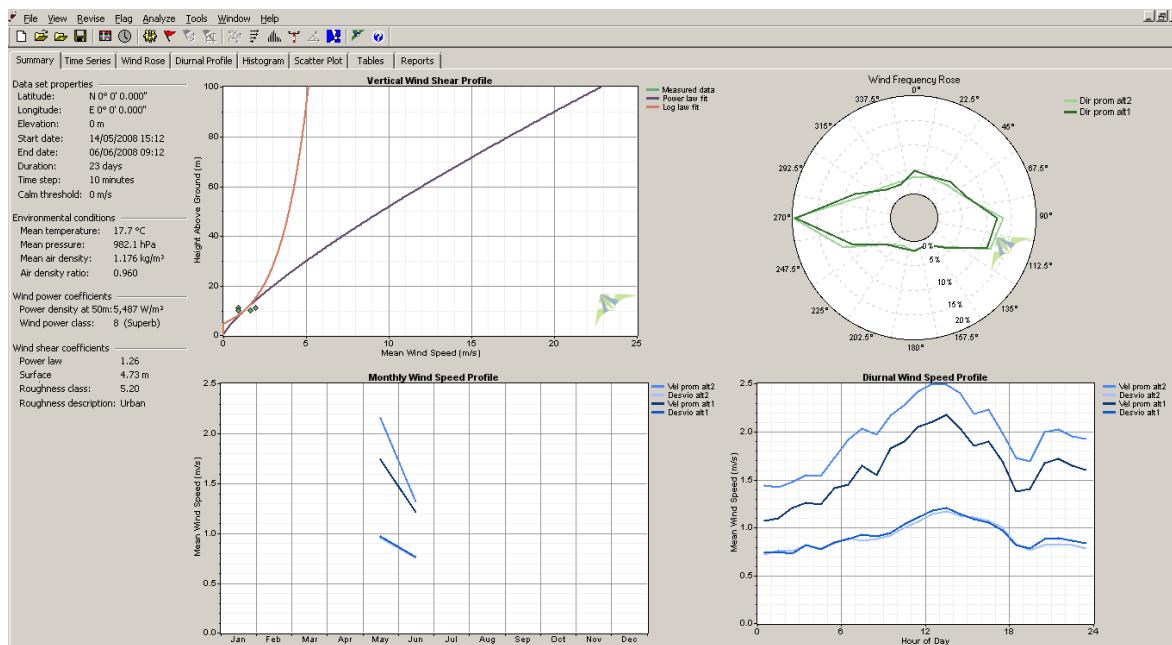


Figura 3.7: Ventana del *Software Windographer*

### 3.3. Comparación del Software de Análisis de Datos Eólicos

En función del análisis realizado de las principales herramientas *WindRose*, *MINT*, *WRPLOT View*, *Windographer*, con respecto a sus funcionalidades, características y versión de prueba en la Web, se puede mencionar que en general la mayoría de ellas son comerciales. En la tabla 3.1 se muestra un resumen de las comparaciones realizadas.

### 3.3.1. Resultado de la Evaluación

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de las versiones de prueba de las distintas herramientas disponibles se optó por adquirir una licencia del *software Windographer* para realizar su reingeniería. Además se consideró que este *software* está siendo utilizado por la cátedra de *Ingeniería del Viento* de la *Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue*, aunque con la restricción de ser utilizado en una sola computadora. Por otro lado este *software* es utilizado en las distintas reparticiones públicas de la Provincia del Neuquén y tiene la ventaja de utilizar los datos de entrada, provistos para su análisis, sin ninguna modificación.

También cabe mencionar que el *software Windographer* cumple con todas las funcionalidades para el análisis de datos de viento (realización de histogramas de velocidad, rosa de los vientos, gráfico del perfil vertical de la función logarítmica y de potencia, perfil temporario, etc) que son necesarias para realizar la validación de la herramienta computacional desarrollada, basada en *software libre*, objetivo principal de este trabajo de tesis.

Tabla 3.1: Tabla de Comparación de Software disponibles

SOFTWARE	Ventajas	Desventajas	Versión de Prueba Disponible
WINDROSE	Utilizado por empresas e instituciones académicas para cálculos estadísticos especializados de datos de viento	* Se necesita usar MS-Office * No se puede instalar en versión de 64 bits	30 días de uso
MINT	Muy utilizado para análisis de datos eólicos profesionales	* Se necesita usar MS Office * No es simple de usar * No se puede utilizar con datos propios	20 días de uso
WRPLOT VIEW	* Visualiza en forma fácil y rápida la rosa de los vientos en <i>Google Earth</i> * Es totalmente gratuito	* No realiza los demás gráficos de interés para el análisis de energía eólica * Problemas de lectura en el número de fecha y hora * Sólo solicita datos separados de la columna (mes y día)	La licencia es por 1 año. Al expirar se puede registrar nuevamente.
WINDOGRAPHER	* Se puede instalar tanto en plataformas <i>Windows</i> como <i>Linux</i> * Muy intuitivo y fácil de usar * No se necesita modificar los archivos de la base de datos * 60% de descuento en una licencia para uso académico.		15 días de uso

## 3.4. Conclusión

En este capítulo se realizó un análisis de los principales *software* existentes en el mercado para el análisis de datos del viento. Se expusieron sus ventajas y desventajas, y por medio de un cuadro comparativo se pudieron observar los beneficios del *software Windographer* con respecto a los demás, por lo cual se optó por su elección para realizar la ingeniería inversa.

En el capítulo 4 se especifica el uso de la ingeniería inversa sobre el *software elegido* para el desarrollo e implementación de “VientOnline”.



## **Capítulo 4**

# **Desarrollo de la Herramienta Propuesta**

### **Introducción**

En este capítulo se detallan los pasos que se llevaron a cabo para el desarrollo de “VientOnline”. Se especifica como se logró cumplir cada una de las actividades que define la Ingeniería de Software. Las actividades de comunicación, planeación, modelado, construcción y despliegue, son actividades genéricas que nos permiten tener un orden en el desarrollo, estableciendo el “qué”, y los métodos de la ingeniería del software proporcionan los “cómo” técnicos para construir *software* [20],[21]. También se detallan los inconvenientes que se presentaron durante el desarrollo y como se fueron resolviendo.

El modelo de desarrollo utilizado inicialmente fue el modelo en cascada. Su utilización se especifica en este capítulo, y se describen las variantes que surgieron debido a modificaciones requeridas y/o nuevos requerimientos en tiempo de desarrollo.

Se presenta, en forma gráfica, la arquitectura de la herramienta desarrollada, el modelo de datos, el diagrama de clases, los diagramas de secuencias y la interface de usuario desarrollada. También se describen los recursos que fueron seleccionados y la fundamentación de la elección de cada uno de ellos para el desarrollo de la herramienta “VientOnline”.

#### **4.1. Justificación**

Se desarrolló una interface tomando como modelo el desarrollo presentado en la Web <sup>1</sup>. Con la interface desarrollada el usuario podrá suministrar datos de recursos eólicos al servidor, por medio de un archivo fuente. Dicho archivo contiene datos, tales como, velocidad media, temperatura, altura, fecha, hora, entre otros. El sistema realizará los cálculos necesarios en las distintas tablas, y el usuario realizará la consulta de los resultados por medio de tablas o gráficos como: perfil temporario diurno y mensual, rosa de los vientos, perfil vertical, etc.

Por el momento la utilización de la herramienta no cuenta con ninguna restricción de acceso hacia los usuarios.

---

<sup>1</sup><http://uptick.com.au/content/build-user-interface>

## 4.2. Marco de trabajo para el proceso

Un marco de trabajo establece la base para un proceso de *software* completo al identificar un número pequeño de actividades del marco de trabajo aplicables a todos los proyectos de *software*, sin importar su tamaño o complejidad [44].

A continuación se describen las actividades de Comunicación, Planificación, Modelado y Construcción, que fueron llevadas a cabo para desarrollar “VientOnline”.

### 4.2.1. Comunicación

Se realizaron entrevistas y videoconferencias con especialistas en el área de generación de energía eólica, para conocer en forma general los pasos necesarios para la implantación de un “Parque Eólico” en una zona específica. Estos pasos comenzaron con la realización de los estudios estadísticos de los datos del viento en el área y la determinación de la factibilidad de implantación del parque, y finaliza con su construcción. También se realizaron entrevistas con docentes investigadores en el área de generación de energía eólica, de la Universidad Nacional del Comahue.

A través de un trabajo colaborativo con la cátedra de Ingeniería del Viento, se obtuvo un panorama de la necesidad de desarrollo de herramientas computacionales para el análisis de datos del viento, para ser utilizadas en el nivel académico. Para el desarrollo de “VientOnline” fue necesario contar con un conjunto de datos de medición del viento como: fecha, hora, temperatura, velocidad media, velocidad promedio altura 1, velocidad promedio altura 2, dirección promedio altura 1, etc; los cuales fueron suministrados por los docentes.

Como conclusión de las entrevistas y viendo la necesidad de una herramienta computacional académica, en el área de energía eólica, se obtuvo la siguiente especificación de requerimientos.

### Requerimientos Funcionales

De acuerdo con la información obtenida en las distintas entrevistas, se obtuvieron los siguientes requerimientos funcionales para la herramienta “VientOnline” a desarrollar:

- Lectura y Procesamiento de un archivo fuente que contiene datos eólicos, de hasta 3 alturas, con un formato específico: Fecha - Hora - Temp prom( $^{\circ}$ C) - Humedad (%) - Presion(hPa) - Temp max( $^{\circ}$ C) - Temp min( $^{\circ}$ C) - Vel prom alt1(m/s) - Dir prom alt1( $^{\circ}$ ) - Temp prom alt1( $^{\circ}$ C) - Desvio alt1(m/s) - Vel max alt1(m/s) - Dir max alt1( $^{\circ}$ ) - Temp max alt1( $^{\circ}$ C) - Vel min alt1(m/s) - Dir min alt1( $^{\circ}$ ) - Temp min alt1( $^{\circ}$ C)
- Tablas con los datos obtenidos
- Gráficos Eólicos: El procesamiento de los datos permite obtener los siguientes gráficos;
  - *Perfil Vertical del Viento Cortante*: Debido a que las mediciones preliminares generalmente se realizan a 10 metros, aunque hay casos en que se realizan a menores alturas originalmente con otros fines, tal como monitoreo agrícola, la técnica comúnmente usada para estimar velocidades a mayores alturas es extrapolar los valores obtenidos y de esta manera construir el perfil de velocidad del viento del sitio.

- *Función Logarítmica:* Su definición se realizó anteriormente en la subsección 2.5.4 y su función se muestra en la ecuación 4.1.

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4.1)$$

- *Función de Potencia:* Su definición se realizó anteriormente en la subsección 2.5.4 y su función se muestra en la ecuación 4.2.

$$u(z) = u_I \left(\frac{z}{z_I}\right)^p \quad (4.2)$$

- *Perfil Temporario:* El perfil temporario refleja el comportamiento del viento diurno y/o estacional, lo que permite ver la variabilidad del viento a lo largo del día (promedio horario) y durante las diferentes estaciones del año (promedio mensual).
  - Por Mes: Comportamiento del viento en función de los promedios mensuales. Su definición completa se realizó en la subsección 2.5.1.
  - Por Hora: Comportamiento del viento en función de los promedios diurnos. Su definición completa se realizó en la subsección 2.5.1.
- *Rosa de los Vientos:* Cada uno de los datos de viento obtenidos por sendas estaciones meteorológicas recoge tanto la velocidad del viento en ese instante como la dirección del viento. Esta información de dirección del viento es continua de 0 a 360°, para la aplicación se discretiza en 4, 8, 12, 16, 20 y 24 sectores de dirección y si se pondera anualmente nos dará la velocidad media del viento en dicha dirección. Su definición completa se realizó en la subsección 2.5.5.
- *Distribución de Weibull:* Con la distribución probabilística *Weibull* es posible estimar y estudiar las características del viento de un determinado lugar. Esta función describe la densidad de probabilidad de velocidades medias horarias de viento. La distribución de *Weibull* de dos parámetros es una de las distribuciones probabilísticas más empleadas para describir las características del viento. Su definición completa se realizó en la subsección 2.5.2.
- *Histograma de la Frecuencia Relativa:* La frecuencia relativa de una clase es la probabilidad de que los datos considerados se encuentren en dicho intervalo, en nuestro caso se hace en función de la velocidad del viento m/s. Dada la importancia de este gráfico, este fue incluido al final, luego de llevar un gran avance en el desarrollo de “VientOnline”. Esto condujo a hacer modificaciones desde la base de datos, hasta los menús mostrados en la aplicación. Su definición completa se realizó en la subsección 2.5.3.

Estos gráficos se calculan mediante el análisis de datos eólicos previamente obtenidos por medio de anemómetros. Los datos, con un formato específico, fueron provistos por la cátedra para su análisis y prueba.

### 4.2.2. Planificación

La planificación de proyectos se refiere a la identificación de actividades, hitos y entregas de un proyecto. Por lo tanto, se debe bosquejar un plan para guiar el desarrollo hacia las metas del proyecto [20], [21].

En un documento sobre procesos y proyectos de *software*, Barry Boehm [45] establece: “Se necesita un principio de organización que se reduzca para proporcionar planes simples para proyectos simples”.

En la Figura 4.1 se presenta un diagrama simplificado de tareas que guió el desarrollo de la herramienta. Cabe mencionar que en este diagrama no se contemplaron fechas de inicio y finalización de las tareas, por desconocimiento de las herramientas que se utilizarían en el desarrollo, la investigación que se debería realizar sobre el dominio de la aplicación y falta de experiencia en la planificación de proyectos.

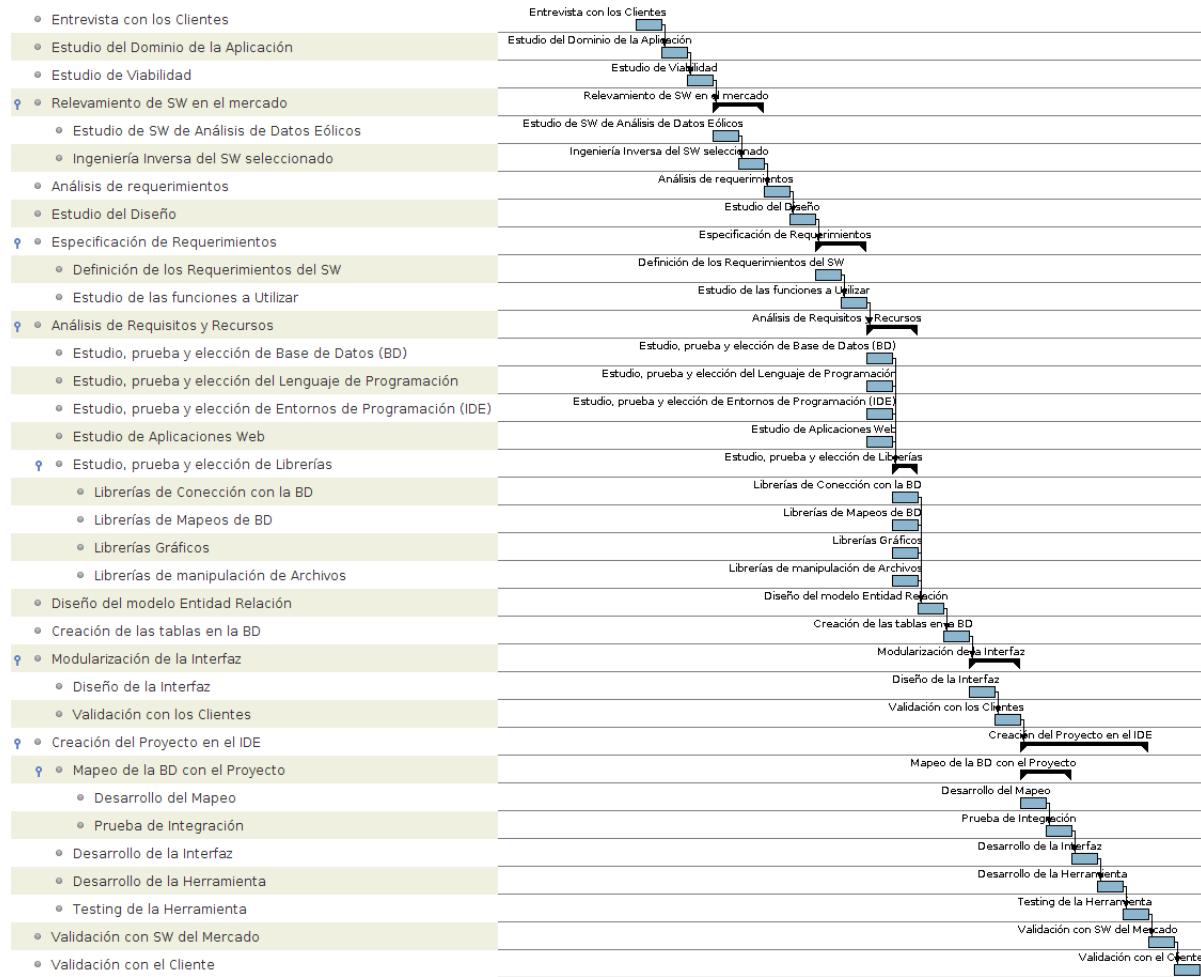


Figura 4.1: Diagrama Simplificado de Tareas

#### 4.2.3. Modelado

Los modelos se crean para obtener un mejor entendimiento de la entidad real que se construirá. El modelo para una entidad *software* debe ser capaz de representar la información que el *software* transforma, la arquitectura y las funciones que permiten que ocurra la transformación.

Para el modelado de “VientOnline” se utilizó el lenguaje de modelado unificado (UML), el cual permite especificar en modo gráfico las funcionalidades del sistema. En las siguientes secciones se presentan algunos modelos para obtener un mejor entendimiento de la entidad real que se construyó.

Se describe la representación arquitectónica, la cual define la estructura del sistema, los componentes de *software*, las propiedades visibles externamente de esos componentes y las relaciones entre ellos [46]. También se representa el modelo de datos que describe las tablas, los tipos de datos y la organización de los mismos. Se muestra el diagrama de clases que refleja las características y las conexiones entre las distintas clases. Y por último, se muestran los distintos modelos de diagramas de secuencias, los cuales reflejan las clases y los métodos que intervienen, a través del tiempo, para realizar una tarea en particular.

### Arquitectura de la Herramienta Desarrollada

Al desarrollar la herramienta se trató de maximizar ciertos requerimientos de calidad como: *variabilidad*, *flexibilidad*, *capacidad de evolución* y *facilidad de mantenimiento*. Esto permitirá que la herramienta se pueda adaptar fácilmente a requerimientos variables, a realizar cambios de manera simple, a que la arquitectura evolucione de acuerdo a los cambios en los requerimientos en el futuro, y a maximizar la capacidad de resolver los cambios en la herramienta, incluyendo encontrar errores fácilmente en ejecución.

Para lograr la capacidad de evolución, se optó por la *separación de aspectos*, es decir, el uso de diferentes capas en una arquitectura para separar aspectos de más bajo y más alto nivel. Para maximizar los requerimientos de *flexibilidad* y *capacidad de evolución*, se eligió un estilo arquitectónico en capas, en el cual cada componente es independiente y se pueden agregar fácilmente nuevos componentes.

En la figura 4.2 podemos observar la arquitectura de “VientOnline”, que se compone de tres capas principales: *Interface de Usuario*, *Procesamiento Eólico* y *Modelo Eólico*. Se pueden observar los componentes que se definieron en cada capa y las dependencias entre ellos.

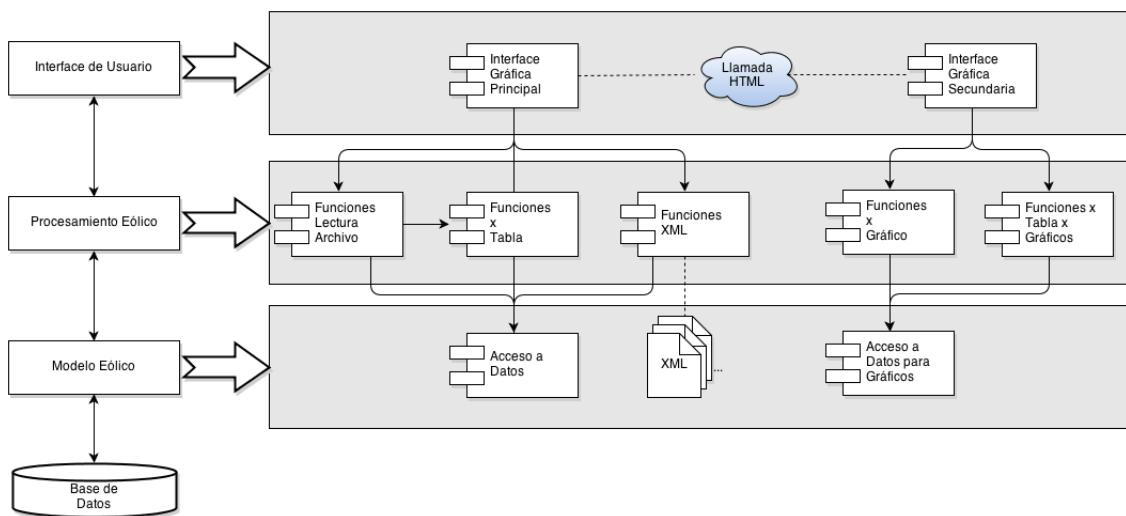


Figura 4.2: Arquitectura de “VientOnline”

En la primera capa, *Modelo Eólico*, se implementa el modelo que permite acceder a una base de datos eólica, diseñada e implementada para “VientOnline”. La segunda capa, *Procesamiento Eólico*, contiene las características que implican procesamiento: procesamiento del archivo fuente con los datos eólicos, procesamiento de los datos para cada una de las tablas, el procesamiento de las tablas para crear archivos XML (utilizados luego como fuente de datos), y el procesamiento para obtener cada uno de los gráficos. Por último, la capa de *Interface de Usuario*, contiene dos interfaces comunicadas por una llamada *HTML*, donde la Interface Gráfica Secundaria es la que desarrolla los gráficos y los retorna como una página Web a la Interface Gráfica Principal, que es la que interactúa con el ambiente.

### Modelo de Datos

En la Figura 4.3 se muestra el modelo de datos, en el cual se puede observar que no hay relación entre las tablas. *DatosTodos* es una tabla principal donde se almacenan todos los datos leídos desde el archivo

fuente. A partir de esta, se generan vistas para las distintas alturas de los datos analizados (se contempla hasta 3 alturas), permitiendo manipular los datos de una manera más simple y ordenada.

Se diseñaron distintas tablas para generar los distintos gráficos, especificados en el tratamiento de datos del viento. Se pueden mencionar las siguientes:

- *DatosPerfilTemporarioHora* y *DatosPerfilTemporarioMes*, permiten mostrar las velocidades medias por mes y por hora del día.
- *DirecciónVientoRangos* es utilizada para obtener la rosa de los vientos.
- *DatosPerfilVertical* se utiliza para obtener la función logarítmica y la función de potencia.
- *DatosFrecuenciaVelocidad* es utilizada para realizar el histograma de las frecuencias relativas.
- La tabla *Usuario* contempla a los usuarios que accederán a la aplicación, creando distintos roles para gestionar su acceso y/o visibilidad.
- *DatosArchivo* será utilizada para futuros trabajos, como por ejemplo, la ubicación en un mapa del lugar donde se obtuvieron los datos eólicos.

### Modelo de Diagrama de Clases

En el desarrollo de “VientOnline” se crearon dos proyectos, debido a una incompatibilidad entre la librería utilizada para crear la interface y la librería desde donde se obtenían los gráficos. El proyecto principal contiene el ingreso y manipulación de los datos, permite la muestra de los datos en tablas, y gestiona las llamadas a los gráficos en el proyecto secundario, donde estos son desarrollados y retornados al proyecto principal como una página *HTML*. El diagrama de clases del proyecto principal fue particionado en cuatro gráficos, A.1, A.2, A.3 y A.4, mostrados en el Apéndice A.

Este proyecto inicia en la clase *MainGraficosEolicosGWT* y tienen su unión, en los gráficos, con la clase *TablaAreaListGrid*. La primera parte del diagrama de clases, contiene toda la interacción para el armado de la interface, las referencias a las tablas de la base de datos (con la búsqueda de sus datos en archivos *XML*), y la llamada a los gráficos del segundo proyecto por medio de *HTML* usando la clase *HTMLView*. La segunda parte del diagrama de clases, del proyecto principal, se une en las clases *FuncionesDatos* “*NombreTabla*” (para cada una de las tablas de la base de datos), que se encargan de actualizar los datos de las tablas de la base de datos, y la clase *TablaEnXML* que genera archivos *XML* con los datos de las tablas. Esta segunda parte comienza en la clase *LecturaDatosWindow* la cual es la que lee el archivo con los datos de entrada, los procesa para cada una de las tablas de la base de datos y genera archivos *XML* con los datos de cada tabla. Este diagrama refleja la llamada *RPC* (*Remote Procedure Call*, que se detalla en la subsección 4.2.4) y la clase que lo implementa se llama *AccesoDatosServiceImpl*.

El proyecto secundario se muestra también en un diagrama de clases particionado en dos gráficos, A.5 y A.6, que también se encuentran en el Apéndice A. Estos gráficos se unen en la clase *AccesoDatosServiceImpl*. La primera parte del diagrama inicia en la clase *VisualGWT* la cual, dependiendo del parámetro de entrada enviado desde el proyecto principal, va a instanciar la clase del gráfico correspondiente. La segunda parte comienza con la clase *AccesoDatosServiceImpl*, de acuerdo a lo mencionado, implementa el modelo *RPC*. Esta clase, en conjunto con otra clase llamada *HibernateUtil*, accede a la base de datos, recupera y manipula los datos, para luego ser pasados al gráfico que lo solicitó.

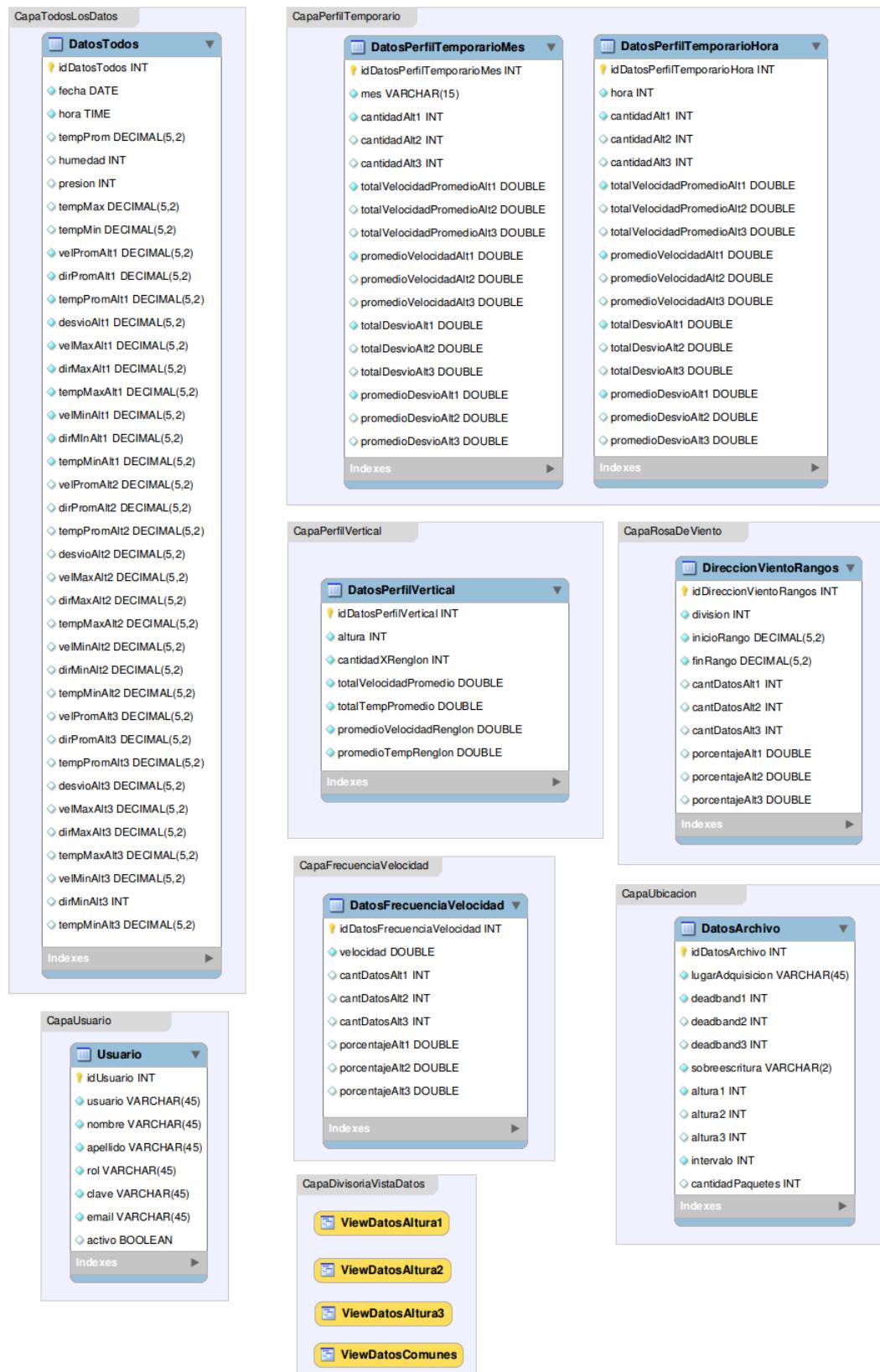


Figura 4.3: Modelo de Datos

## Modelos de Diagramas de Secuencias

En el Apéndice A se muestran los diagramas de secuencias del proyecto principal y del proyecto secundario. En el diagrama A.7 se muestra toda la interacción que se realiza al inicializar la pantalla principal del sistema: cargando su logo de cabecera, creando el menú, y creando los paneles de navegación de solicitud de tablas y gráficos.

En el diagrama A.8 se ven las clases que interactúan al realizar la lectura del archivo fuente con los datos eólicos. Se lee y se procesa el archivo fuente, se realizan los cálculos para cada una de las tablas de la base de datos, y se guardan todos los datos en las distintas tablas. También se procesa cada una de las tablas para obtener archivos XML para usarse posteriormente como fuente de datos.

En el diagrama A.9 se muestran las clases que interactúan cuando un usuario solicita una tabla, el cual recupera los datos desde un archivo XML previamente generado. En el diagrama A.10 se muestran las clases que interactúan cuando un usuario solicita un gráfico, el cual realiza una llamada HTML al proyecto secundario pasando como parámetro el nombre del gráfico. Estos dos diagramas de secuencias tienen la particularidad de contar con un patrón de diseño *Factory Method*, el cual es un constructor virtual que define una interface para crear un objeto, pero las subclases deciden qué clases instanciar. *Factory Method* permite a una clase postergar la instanciación de subclases [47]. El diagrama A.9 instancia la clase *TablasView*, y el diagrama A.10 instancia la clase *GraficoView*.

El diagrama A.11 muestra toda la interacción que se realiza en el proyecto secundario cuando se solicita el gráfico de la Rosa de los Vientos desde el proyecto principal.

## Modelo de Interface de “VientOnline”

El desarrollo de la misma se realizó pensando en conseguir una interface fácil de entender y manipular, agradable a la vista e intuitiva para el usuario.

Se analizaron varias interfaces <sup>2</sup>:

- Menú para el ingreso del archivo fuente con los datos eólicos.
- Paneles de navegación para la selección de tablas y gráficos.
- Área destinada a la muestra de tablas y gráficos.

En la Figura 4.4 se muestra la interface de “VientOnline”. Esta cuenta con el menú *Archivo*, donde se encuentra la opción de *Leer Archivo* que veremos más adelante. También cuenta con dos paneles de navegación a la izquierda de la interface. En el primer panel se encuentran los nombres de las tablas de la base de datos. Al realizar un click izquierdo con el mouse, se mostrará a la derecha de la interface, la tabla seleccionada con sus datos. En el segundo panel, el de gráficos, se comportará de la misma manera pero retornará el gráfico seleccionado. Al ir seleccionado tablas o gráficos, estos se irán apilando en fichas a la derecha de la interface, lo que permitirá cambiar de una ficha a otra solamente haciendo click sobre su pestaña.

En la Figura 4.5 se muestra un ejemplo de como se visualizan los datos. Por cada opción seleccionada en el panel izquierdo, se crea una ficha a la derecha en la interface, la cual contiene la tabla o el gráfico

---

<sup>2</sup><http://uptick.com.au/content/build-user-interface>

seleccionado. En dicha figura se muestran los datos de la tabla “Altura 1”, mostrando su nombre en la pestaña.

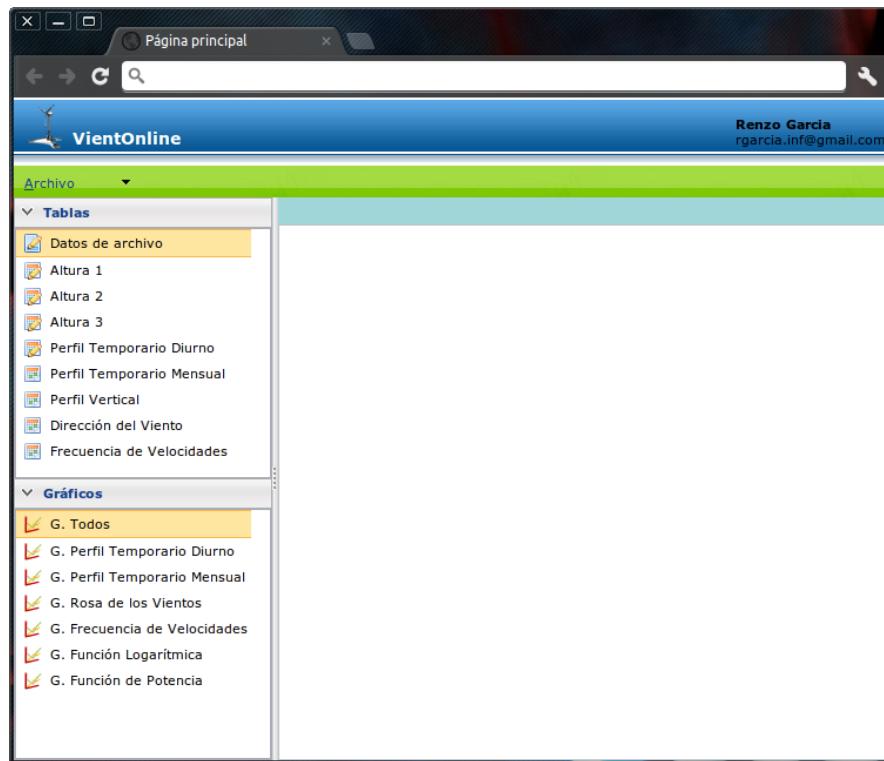


Figura 4.4: Interface Gráfica de Usuario de VientOnline

The screenshot shows the same VientOnline interface as Figure 4.4, but now the 'Altura 1' table is displayed in the main content area. The table has columns: Fecha, Hora, Vel. Prom. Altura Uno, Dir. Prom. Altura Uno, and Temp. Prom. Altu. The data is as follows:

Fecha	Hora	Vel. Prom. Altura Uno	Dir. Prom. Altura Uno	Temp. Prom. Altu
11/30/2009	21:00:00	4.84	243.00	0.00 °C
11/30/2009	21:10:00	5.53	238.00	0.00 °C
11/30/2009	21:30:00	5.80	244.00	0.00 °C
11/30/2009	21:40:00	5.80	245.00	0.00 °C
11/30/2009	21:50:00	5.74	242.00	0.00 °C
11/30/2009	22:00:00	5.30	245.00	0.00 °C
11/30/2009	22:10:00	4.66	246.00	0.00 °C
11/30/2009	22:20:00	4.86	242.00	0.00 °C
11/30/2009	22:30:00	4.97	245.00	0.00 °C
11/30/2009	22:40:00	5.03	245.00	0.00 °C
11/30/2009	22:50:00	4.80	247.00	0.00 °C
11/30/2009	23:00:00	4.16	253.00	0.00 °C
11/30/2009	23:10:00	4.13	247.00	0.00 °C
11/30/2009	23:20:00	4.36	236.00	0.00 °C
11/30/2009	23:30:00	4.52	232.00	0.00 °C
11/30/2009	23:40:00	5.29	234.00	0.00 °C
11/30/2009	23:50:00	5.28	238.00	0.00 °C
11/30/2009	00:00:00	5.59	239.00	0.00 °C

Figura 4.5: Interface de VientOnline con Datos de Muestra de la Altura 1

Para la lectura del archivo fuente se creó un formulario, en el cual se ingresan algunos datos como Altura 1 (en metros), Altura 2 (en metros), etc, y permite seleccionar el archivo fuente para luego realizar su procesamiento. En la Figura 4.6 se muestra el formulario de lectura de “VientOnline”. La apertura de este formulario de carga, se realiza desde el menú *Archivo* y se selecciona la opción *Leer Archivo*. Se ingresan cada uno de los campos y se busca el archivo a leer, presionando el botón *Seleccionar archivo*. Una vez seleccionado el archivo desde el disco y presionando el botón *Enviar*, comienza el proceso de validación de los datos y la carga de los mismos en las distintas tablas de la base de datos.

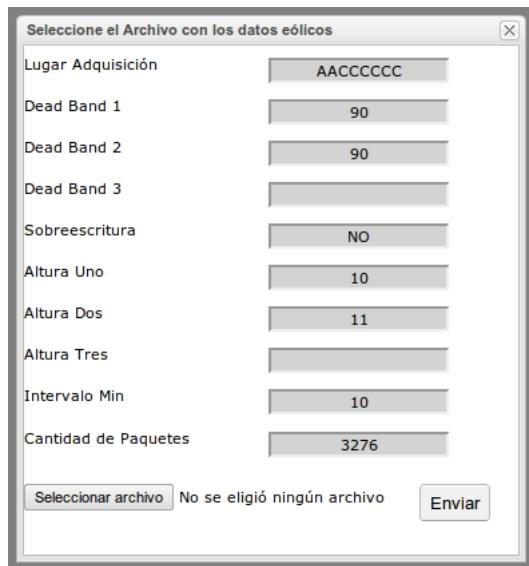


Figura 4.6: Ventana de lectura del archivo fuente

#### 4.2.4. Construcción

La actividad de construcción abarca una serie de tareas de codificación y realización de pruebas que conducen al *software* operativo a que esté listo para entregarlo al cliente o usuario final. Cada una de las capas y sus módulos definidos en la arquitectura de la herramienta desarrollada en la subsección 4.2.3, fueron implementados completamente para esta aplicación, utilizando librerías gráficas y *frameworks* para aplicaciones Web como complemento al desarrollo. En esta sección se definen los recursos utilizados en el desarrollo de “VientOnline”, se describe la utilización de cada uno de ellos y su integración.

“VientOnline” se desarrolló como una aplicación Web, ya que las aplicaciones Web son independientes de la plataforma, mucho más flexibles a cambios y no requieren actualizaciones en los clientes. Ellas pueden ser igual de rápidas que una aplicación de escritorio, se puede disponer de ellas en cualquier lugar (hoteles, cibercafés, universidades, etc) sin necesidad de instalar absolutamente nada. Son accesibles desde cualquier clase de dispositivos (ordenadores, PDAs, portátiles, celulares), solamente se necesita una conexión a internet [33].

El entorno de desarrollo *Eclipse*<sup>3</sup> y el lenguaje de programación *Java* [28], [29], en conjunto con los distintos *plug-ins* (*MySQL Connector/J*<sup>4</sup>, *FileUpload*<sup>5</sup>, *Hibernate*<sup>6</sup>, *Google Web Toolkit (GWT)*<sup>7</sup> y

<sup>3</sup><http://www.eclipse.org>

<sup>4</sup><http://dev.mysql.com/doc/refman/5.1/en/connector-j-overview.html>

<sup>5</sup><http://commons.apache.org/fileupload/>

<sup>6</sup><http://mundogeek.net/archivos/2007/01/27/hibernate/> - <http://www.hibernate.org/>

<sup>7</sup><https://developers.google.com/web-toolkit/>

*Smart GWT*<sup>8</sup>, *GWT Visualizations*<sup>9</sup> y *Charts4j*<sup>10</sup>), fueron la base para la construcción de “VientOnline”.

*Eclipse* es un *Integrated Development Environment (IDE)* y fue utilizado para el desarrollo de la aplicación, ya que facilita enormemente las tareas de edición, compilación y ejecución de programas durante la fase de desarrollo.

*GWT (Google Web Toolkit - Kit de Herramientas Web de Google)* es un *framework* de *Google* que permite la integración con *Eclipse* para el desarrollo de aplicaciones Web utilizando *Java* como lenguaje para la creación del código y el compilador lo traducirá a *HTML* y *JavaScript* para su ejecución en navegadores. El *SDK* de *GWT* proporciona un conjunto de *APIs de Java* central y *Widgets*. Estos permiten crear aplicaciones *AJAX* en código fuente *Java* y luego compilar el código fuente generando para cada navegador un archivo *JavaScript* distinto, altamente optimizado, que se cargará de forma automática en el navegador adecuado, incluyendo los navegadores móviles de *Android* y *iPhone*<sup>11</sup>.

También se utilizó *Smart GWT*, que es un *framework* basado en *GWT* que permite utilizar su librería completa de *Widgets* de interface de usuario para la aplicación en desarrollo, y también *Widgets* del lado del servidor para la gestión de datos. *Smart GWT* ayuda a construir y mantener aplicaciones Web más usables, portables, eficientes y rápidas. Debido a que el código *Java* se ejecuta como *JavaScript* dentro del navegador, se pueden construir fácilmente interfaces de usuario de alta productividad que responden instantáneamente a los usuarios y eliminar el incesante ida y vuelta del servidor, típica de tecnologías centradas en servidor.

Anteriormente en la subsección 4.2.3 se especificó la arquitectura de la herramienta desarrollada, y en esta subsección se detallará como fueron construidas cada una de las capas.

## Base de Datos

Se utilizó la base de datos *MySQL*<sup>12</sup>, disponible en los repositorios de *Ubuntu*, lo cual facilitó su instalación. Para manipular la base de datos se utilizó el *software Emma*<sup>13</sup>, en el cual se configura una conexión *MySQL* suministrando los parámetros: nombre de la conexión, nombre del host, puerto, usuario, contraseña, y nombre de la base de datos.

*MySQL Workbench*<sup>14</sup> se utilizó para crear el Modelo de Datos (MD) en modo gráfico, definido en la subsección 4.2.3, con cada una de las tablas de la base de datos, definiendo sus atributos, tipos de datos (Date, Integer, etc), claves primarias, vistas de las tablas y si el atributo es auto incrementable (usado para las claves primarias). Al terminar de desarrollar el MD, se utilizó la funcionalidad de ingeniería hacia adelante (Forward Engineer), generando un script de creación de base de datos, el cual fue ejecutado en la consola SQL de *Emma*.

## Modelo Eólico

Para el acceso a la base de datos y creación automática de las clases haciéndolas corresponder con las tablas de la base de datos se utilizó el *plugin Hibernate*. Este se utiliza para hacer persistir los objetos

<sup>8</sup><http://code.google.com/p/smartgwt/>

<sup>9</sup><http://code.google.com/p/gwt-google-apis/wiki/VisualizationGettingStarted>

<sup>10</sup><http://code.google.com/p/charts4j/>

<sup>11</sup><https://developers.google.com/web-toolkit/overview>

<sup>12</sup><http://www.mysql.com/why-mysql/>

<sup>13</sup><http://freecode.com/projects/emma>

<sup>14</sup><http://www.mysql.com/products/workbench>

en una base de datos relacional realizando el mapeo de Objeto a Relacional, y a este *framework* se le denomina *ORM (Object-Relational Mapping)*. Permite, por ejemplo, guardar un objeto en la base de datos simplemente con *session.save(miObjeto)* o borrarlo con *session.delete(miObjeto)*.

Para utilizar *Hibernate* se debe crear un archivo *XML* (*hibernate.cfg.xml*) para la configuración, una serie de *JavaBeans* que son las clases a persistir y en las que cada campo se asociará con una columna de la base de datos, y un archivo *XML* por cada una de estas clases (*NombreClase.hbm.xml*) que indica el mapeo entre objetos y relaciones.

Para conectar la base de datos con la aplicación se utilizó el *plugin MySQL Connector/J*. MySQL proporciona conectividad para las aplicaciones de cliente desarrolladas en el lenguaje de programación *Java* a través de un driver *JDBC (Java Database Connectivity)* que se denomina *MySQL Connector/J*. La versión del driver utilizado para la conexión con la base de datos fue *mysql-connector-java-5.1.17*.

Para la comunicación con el servidor (acceso a los datos) se implementó un procedimiento denominado *GWT RPC* (Llamada a Procedimiento Remoto de *GWT*), el cual cuenta con las siguientes características<sup>15</sup>:

- Mecanismo mediante el cual el cliente y el servidor comparten objetos *Java* a través de *HTTP*.
- El cliente debe estar implementado en *Java*.
- En el paquete *client* se crea una interface (*EjemploService*) que, a su vez, implemente *RemoteService*.
- Los métodos que se definan en la interface corresponden a servicios que se invocan en el servidor.
- En el paquete *server* se crea la clase *EjemploServiceImpl* que herede de *RemoteServiceServlet* e implemente la interface que hemos creado *EjemploService*.
- *EjemploServiceImpl* es un *servlet*. Hay que añadirlo al descriptor *Web.xml*.

Esto es *AJAX* y necesita *callbacks* que se ejecuten cuando el servicio haya dado una respuesta.

- Se añade un parámetro *callback* a los servicios que se han definido en *EjemploService* utilizando el patrón *Proxy*, el cual proporciona un sustituto para otro objeto que controla el acceso a este [47].
- Se crea una interface con el mismo nombre pero añadiendo la terminación *Async* en el mismo paquete, *EjemploServiceAsync*.
- Tendrá los mismos métodos, pero para cada uno de ellos el tipo de resultados será *void* y tendrá un nuevo parámetro *AssyncCallback<T>*, donde *T* es el tipo de resultado.
- *GWT* implementará esta interface por nosotros mediante generadores.
- Instanciación: *EjemploServiceAsync ejempSvc = GWT.Create(EjemploService.class);*
- Cuando se invoca a los métodos de *ejempSvc* se crea una clase *AssyncCallback* anónima.
- La implementación de esta clase conlleva a la implementación de dos métodos: *onFailure* y *onSuccess*.

---

<sup>15</sup><http://www.slideshare.net/BABELGrupo/gwt-y-smartgwt-desarrollo-de-interfaces-web>

## Procesamiento Eólico

Los datos provistos para el análisis y la producción de gráficos están en un archivo denominado de texto plano (.txt). Este archivo debe ser leído, analizado y sus datos guardados en la base de datos. Para poder realizar esto, se utiliza la librería *Open Source FileUpload* la cual provee un *framework* más avanzado para el manejo de archivos.

La forma de suministrar datos al sistema, se realiza mediante la implementación de un formulario con *Smart GWT* que contiene, un *FileUpload* y un botón de *Submit*. Un *Servlet* dentro del formulario es el encargado de procesar el archivo. Este archivo es leído y guardado en un buffer para luego ser copiado en otro archivo dentro del proyecto. Luego, este último es analizado, se recuperan los datos, se procesan, y se guardan en la base de datos según corresponda mediante la utilización de *HQL* (lenguaje de consulta de *Hibernate*).

Para el desarrollo de “VientOnline” se utilizó el *Widgets ListGrid* de *SmartGWT*, el cual es una tabla muy potente que permite reordenar sus columnas, ordenar filas por cualquier columna, filtrar filas en tiempo real por cualquier columna y agrupar filas por campos. Se puede cargar todo el contenido simultáneamente o bajo demanda. También permite anidar tablas fácilmente, incorporar íconos, botones o cualquier otro elemento de forma trivial y tiene una interface para crear filtros (Criteria). Se puede editar sobre el, añadir validación a los campos y se puede conectar al servidor, haciendo transparente el proceso de alta, baja y modificación. El método para ingresar datos en un *ListGrid* es implementando la utilización de un *DataSource*. Un *DataSource* es un proveedor independiente de datos de un conjunto de objetos que pueden ser cargados, editados y guardados dentro de la interface de usuario de la aplicación. Cada uno de estos consiste de una lista de campos que componen un registro de *DataSource*, junto con los tipos de campos, reglas de validación, relaciones con otros *DataSource*, y otros metadatos. Los *DataSources* se pueden declarar en cualquier JavaScript o formato *XML*, y también se pueden importar de formatos de metadatos existentes, incluyendo XML Schema.

Para trabajar con *ListGrid* y *DataSource* se creó un archivo *XML* para cada tabla de la base de datos. Al finalizar la carga de los datos mediante *FileUpload*, se crean archivos *XML* utilizando una de las funcionalidades de *Hibernate* denominada *DOM4J*. Este inicia una nueva sesión que permite interactuar con documentos *W3C* - framework *XML* flexible para *Java*. Se realiza la consulta a la base de datos, la cual devuelve la respuesta como objetos en una lista de objetos con tags *XML* y estos se guardan en un archivo *XML*. Luego para poblar una tabla *ListGrid*, se le indica cuáles son los campos que se quieren mostrar, y se le provee al *DataSource* la ubicación del archivo *XML* que contiene la fuente de datos.

Para la realización de los gráficos se utilizaron dos *APIs*, debido a que *GWT Visualizations* no permite realizar el gráfico de rosa de los vientos, necesario para esta aplicación. Para resolver esta dificultad se optó por utilizar la librería gráfica *Charts4j*, específicamente utilizando la clase *RadarChart*.

Para poblar los gráficos y las tablas que provee *GWT Visualizations* se implementó la utilización de la clase *DataTable*, recuperando los datos de la base de datos *MySQL* mediante *Hibernate*. El resultado de la consulta es retornado en modo de lista, con cada una de las filas de la tabla agregadas como miembros de la lista. Estos elementos son leídos y almacenados como objetos (el objeto que se crea depende de la tabla a consultar para el gráfico solicitado), luego, de acuerdo a los datos que se quieren mostrar, se obtienen los valores de cada elemento, por ejemplo: promedio de velocidad de la altura x, y se guardan en la columna y fila correspondiente en el *DataTable*. Al gráfico se le indica cual es su fuente de datos, es decir, el *DataTable* poblado y se personaliza el tamaño, la altura, el color, etc.

Un inconveniente que se presentó al utilizar *GWT Visualizations* en conjunto con *SmartGWT* fue que los gráficos no se reflejaban, es decir, se mostraba una página en blanco. Para resolver este inconveniente, se creó un nuevo proyecto exclusivo para los gráficos. Se utilizó la clase *HTMLPane* de *SmartGWT* en

el proyecto principal. Esta clase hace referencia, con la función *setContentsURL(<http://..>)*, al proyecto secundario, pasándole como parámetro el nombre del gráfico solicitado. El segundo proyecto retorna el gráfico solicitado al proyecto principal mediante una *URL*.

Para la rosa de los vientos se utilizó la clase *RadarChart* que pertenece a la librería *Charts4j*. En esta se parametriza el tamaño, los colores y la fuente de los datos por medio de otras clases como: *RadialAxisLabels* para definir las etiquetas radiales, *AxisLabels* para definir las etiquetas del eje y *RadarPlot* para ingresar los datos. Una vez creado y parametrizado el objeto *RadarChat*, se recupera la *URL* que se creó con los parámetros. Esta misma es pasada a un objeto *Frame* de *GWT* con la función *setUrl()*, la cual ubica la *URL* dentro del *Frame* y la muestra.

A continuación se muestran algunos ejemplos de URLs creadas por el objeto *RadarChart*, obtenidos en la implementación de la herramienta:

- <http://chart.apis.google.com/chart?cht=r&chxt=y,x&chl=2,3,0&chs=530x530&chco=CC3366&chts=000000,20&chg=5.0,5.0,2,2&chxr=0,0.0,37.0&chd=e:Sb2eIj..Sb&chdl=Altura%2010m&chxp=0,0,10,32,5,37,10&cht=Rosa%20de%20Viento&chxs=0,000000,12,1|1,000000,12,0&chm=o,CC3366,0,-1,7,0|B,FF008733,0,0,0&chxl=1:|0%C2%B0|90%C2%B0|180%C2%B0|270%C2%BO>
- <http://chart.apis.google.com/chart?cht=r&chxt=y,x&chl=2,3,0&chs=530x530&chco=CC3366&chts=000000,20&chxr=0,0.0,16.0&chg=5.0,5.0,2,2&chdl=Altura%2010m&cht=Rosa%20de%20Viento&chxs=0,000000,12,1|1,000000,12,0&chm=o,CC3366,0,-1,7,0|B,FF008733,0,0,0&chd=e:LmJiJbOfTcIyerZXEEcYEmEHEHLHg9..fZKoF7GxLm&chxp=0,0,2,2,2,3,4,9,7,6,1,0,1,1,1,2,8,16,7,2,1,1,2&chxl=1:|0%C2%B0|18|36|54|72|90%C2%B0|108|126|144|162|180%C2%B0|198|216|234|252|270%C2%BO|288|306|324|342>
- <http://chart.apis.google.com/chart?cht=r&chxt=y,x&chl=2,3,0&chs=530x530&chco=CC3366&chts=000000,20&chg=5.0,5.0,2,2&chxr=0,0.0,14.0&chdl=Altura%2010m&cht=Rosa%20de%20Viento&chxs=0,000000,12,1|1,000000,12,0&chm=o,CC3366,0,-1,7,0|B,FF008733,0,0,0&chd=e:MKJDIGJuPiTtzbifMIpCKDhDyEdHGFQeqZ..g8OuF8FRGWMK&chxp=0,0,2,2,1,2,3,4,8,6,7,1,0,0,0,1,0,1,3,7,14,7,3,1,1,1,2&chxl=1:|0%C2%B0|15|30|45|60|75|90%C2%B0|105|120|135|150|165|180%C2%B0|195|210|225|240|255|270%C2%B0|285|300|315|330|345>

## Interface Gráfica

Los *plugins GWT* y *Smart GWT* se utilizaron para desarrollar el “front-end” de “VientOnline” y mediante *GWT RPC* (Remote Procedure Call - Llamada a Procedimiento Remoto) junto con *Hibernate* se accede a la base de datos para su consulta y modificación. En esta capa se desarrolló toda la interface de usuario para la aplicación que se presentó anteriormente en la subsección 4.2.3. La utilización de una llamada *HTML* entre ambos proyectos, se explica con detalle en la capa de *Procesamiento Eólico*.

Durante todo el desarrollo se realizaron pruebas de integración, pruebas de validación, y pruebas de aceptación. A medida que se avanzaba en el desarrollo de “VientOnline”, se realizaban pequeñas pruebas de integración en diferentes navegadores, para verificar que al mostrar la página Web todo se mostrara correctamente y que funcionara la comunicación con la base de datos. Para las pruebas de validación se utilizó el *software Windographer* y una explicación mas detallada de este análisis se realizó en el capítulo 5. Las pruebas de aceptación con los profesores de la cátedra de Ingeniería de Software se realizaron durante todo el proceso de desarrollo, verificando cálculos, gráficos y la interface de usuario.

### 4.3. Modelos Prescriptivos de Proceso

Los modelos prescriptivos de procesos definen un conjunto distintivo de actividades, acciones, tareas, fundamentos y productos de trabajo que se requieren para desarrollar *software* de alta calidad. Estos modelos de proceso no son perfectos, pero proporcionan una guía útil para el trabajo de ingeniería de software [44].

En un primer momento se comenzó con un modelo en cascada, llevando un desarrollo secuencial, desde la especificación de requerimientos, planeación, modelado, hasta la construcción y despliegue de la aplicación.

Por la necesidad de validar el desarrollo intermedio, el producto se presentaba a los profesores de la cátedra de Ingeniería del Viento y con el resultado de la evaluación se desarrollaban incrementos de la aplicación o modificaciones según se requería. También sucedió que luego de llevar un gran avance en el desarrollo, se obtuvieron requerimientos nuevos (como el gráfico de histograma de frecuencia relativa) al final del desarrollo, esto llevó a modificaciones de la base de datos, de la comunicación con Hibernate, de la interface de usuario y la creación de clases a implementar. Esto podría verse como un *modelo de proceso incremental* o como un *modelo en espiral* que presenta prototipos a evaluar y en cada evaluación se presentan prototipos cada vez mas completos del sistema desarrollado hasta que se haya elaborado el producto completo.

Para el desarrollo de esta aplicación, se utilizaron librerías como *Smart GWT* y *GWT* para la interface de usuario, *GWT Visualizations* y *Charts4j* para los gráficos, *Hibernate* para la comunicación con la base de datos y *FileUpload* para la lectura de archivos. Cada una de estas librerías podria verse como un *Componente de software*. El desarrollo aislado de una segunda aplicación para generar los gráficos, podría verse como un *Componente* desde la aplicación principal. El uso de componentes puede interpretarse como un *desarrollo basado en componentes*, donde se identificaron los componentes candidatos, se realizaron las llamadas a funciones con parámetros, y se esperaron resultados, sin tener conocimiento de su procesamiento interno, permitiendo la reutilización de *software*. La implementación para el acceso a la base de datos en ambos proyectos se desarrolló en forma similar.

### 4.4. Ingeniería Inversa

Ingeniería inversa abarca una amplia gama de actividades destinadas a la extracción de información sobre la función, la estructura y el comportamiento de los artefactos hechos por el hombre o naturales. Aplicar ingeniería inversa a algo supone profundizar en el estudio de su funcionamiento, hasta el punto de que podamos llegar a entender, modificar y mejorar dicho modo de funcionamiento. Es útil en varias tareas como documentación, mantenimiento, y reingeniería [48], [35].

En el área de ingeniería de software, el uso de la ingeniería inversa ha sido explorado para directamente derivar modelos desde sistemas interactivos existentes usando análisis estáticos y dinámicos. El análisis estático es realizado sobre el código fuente sin ejecutar la aplicación. Enfoques estáticos son adecuados para extraer información sobre la estructura interna del sistema, y sobre las dependencias entre elementos estructurales: clases, métodos, e información variable que puede ser obtenida desde el análisis del código fuente. Al contrario, el análisis dinámico extrae información de la aplicación por medio de la ejecución. Dentro de un enfoque dinámico, el sistema es ejecutado y su comportamiento externo es analizado [35]-[37].

Se realizó ingeniería inversa de análisis dinámico del *software Windographer* para determinar, me-

diente la ejecución, como es su funcionamiento de forma externa, observando las entradas y salidas del *software*.

Con este análisis se estableció la forma de lectura de los datos eólicos, solicitando información adicional relevante para los cálculos necesarios para los gráficos solicitados. La lectura del archivo fuente con los datos eólicos, se realizó mediante un formulario *pop-up*, donde se debe ingresar información del lugar donde se obtuvieron los datos, metros donde se obtuvieron los datos de la altura uno, dos y tres, intervalo de lectura en minutos y cantidad de líneas de datos leídos.

En el programa *Windographer*, se observó que se presentaban los gráficos en diferentes pestañas y se tomó ese requerimiento para el desarrollo. Dichos gráficos no mostraban los datos que los generaban, estos se obtenían presionando el botón derecho del mouse sobre el gráfico y creando un archivo para guardarlo. Se propuso como mejora que al mostrar un gráfico en la aplicación, también se muestren los datos correspondientes en una tabla, para ser copiados y analizados posteriormente.

Otra mejora que se propuso fue que la herramienta desarrollada sea una aplicación Web y por lo tanto el acceso a esta solamente esté limitado por la conexión a internet. Esto presenta la ventaja de no tener que contar con muchos recursos de *hardware* o *software* desde el lado del cliente para poder utilizar la aplicación.

## 4.5. Conclusión

En este capítulo se presentó la metodología y fundamentación para el desarrollo de “VientOnline”, describiendo de manera sintetizada las etapas de desarrollo, y como fueron realizadas. Se describió como, luego de las entrevistas, se obtuvieron los requerimientos funcionales. Para la etapa de planificación se presentó un diagrama de tareas simplificado y los inconvenientes que se presentaron para definir tiempos, como lo fue el desconocimiento de las herramientas que se utilizaron en el desarrollo. También se presentó el modelo de datos, el cual presenta las tablas de la base de datos y sus propiedades. Las figuras correspondientes a la representación del diagrama de clases del proyecto principal y del secundario, se encuentran en el Apéndice A, así también como los distintos diagramas de secuencias. La interface fue definida, reflejada en imágenes y se describió como es su utilización, es decir, como debe interactuar el usuario con la herramienta.

En la subsección 4.2.4 se definió como se utilizaron los recursos en el desarrollo, como interactúan entre ellos y los inconvenientes que se presentaron con algunos de ellos. Los recursos utilizados fueron: base de datos *MySQL*, *software Emma* para manipular la base de datos, *MySQL Workbench* para crear el modelo entidad relación. Los *plugins GWT* y *Smart GWT* para desarrollar el *front-end*, las librerías *GWT Visualizations* y *Charts4j* para implementar los gráficos y *FileUpload* para la lectura de archivos. También se describió la utilización de *Widgets* para mostrar tablas con datos, y como se utilizaron archivos *XML* para poblar esos *Widgets*.

Por último se describió como se aplicó *ingeniería inversa*, de análisis dinámico, sobre el *software Windographer*. Dicha elección de *software* se realizó previamente en el capítulo 3, en el cual se expusieron ventajas y desventajas de los principales *software* existentes en el mercado para el análisis de datos del viento.

## Capítulo 5

# Validación de la Herramienta “VientOnline”

### Introducción

En el capítulo 4 se presentó el diseño de “VientOnline” y su implementación. Durante su desarrollo, se realizaron testing de caja blanca para comprobar los flujos de ejecución dentro de cada unidad del *software*, y testing de caja negra para comprobar que las entradas que recibe y las salidas, o respuestas que produce, son las esperadas. En el capítulo 3 se relevaron y se compararon distintos *software* especializados en el análisis de recursos eólicos, optando, por sus ventajas, utilizar al *software Windographer*. Este *software* se utilizará en esta unidad para validar los datos de salida de “VientOnline”. La comparación entre estas dos herramientas es muy importante, por que según los resultados que se obtengan, podremos saber si los cálculos y gráficos que se obtienen con “VientOnline” son correctos. En las siguientes secciones se mostrarán los distintos gráficos, y se hará una comparación en base al cálculo del error relativo porcentual. Los cálculos fueron redondeados y se muestran con tres cifras decimales.

### 5.1. Caso de Estudio Analizado

Se analizó un caso de estudio con datos de medición del viento de la Universidad Nacional del Comahue. En el Apéndice B se muestra una porción de estos datos con los cuales se realizaron los casos de prueba. En total se utilizaron 3276 líneas con información de fecha, hora, velocidad promedio Altura 1, velocidad promedio Altura 2, etc. El *software* desarrollado permite importar datos de un archivo con extensión “.txt”, en un formato tipo texto previamente definido, con columnas preestablecidas separadas con tabuladores.

Columnas necesarias en el archivo fuente:

- *Columnas Principales:* Fecha - Hora - Temp prom( $^{\circ}$ C) - Humedad(%) - Presion(hPa) - Temp max( $^{\circ}$ C) - Temp min( $^{\circ}$ C).
- *Columnas que se repiten por Altura:* Vel prom altx(m/s) - Dir prom altx( $^{\circ}$ ) - Temp prom altx( $^{\circ}$ C) - Desvio altx(m/s) - Vel max altx(m/s) - Dir max altx( $^{\circ}$ ) - Temp max altx( $^{\circ}$ C) - Vel min altx(m/s) - Dir min altx( $^{\circ}$ ) - Temp min altx( $^{\circ}$ C) .

El software desarrollado maneja datos de hasta 3 alturas y se debe respetar cada una de las columnas 5.1 y su orden, para cada altura analizada, es decir, si se tienen datos de dos alturas y una columna requerida no está en el archivo fuente, la lectura del archivo fuente dará error.

El caso de estudio utilizado en esta validación, contiene el análisis de datos a dos alturas (10 y 11 metros), realizado durante 2 meses, con un intervalo de recolección de datos de 10 minutos.

## 5.2. Perfil Vertical del Viento Cortante

Debido a que las mediciones preliminares generalmente se realizan a 10 metros, aunque hay casos en que se realizan a menores alturas originalmente con otros fines, tal como monitoreo agrícola, la técnica comúnmente usada para estimar velocidades a mayores alturas es extrapolar los valores obtenidos y de esta manera construir el perfil de velocidad del viento del sitio.

En esta sección se muestran los gráficos y el análisis de los datos que reflejan como sería el comportamiento de la velocidad promedio del viento a otras alturas distintas de donde se realizó el análisis inicial.

### 5.2.1. Función Logarítmica y de Potencia

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos con el *software Windographer* y con la herramienta “VientOnline”. Se puede observar que son muy similares y la diferencia es mínima. Las funciones utilizadas para obtener los datos para la implementación de este gráfico se explicaron en la subsección 2.5.4.

#### Función Logarítmica:

Existen diversas expresiones teóricas usadas para determinar el perfil de velocidad del viento. Una de las formas para calcular la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura  $z$  está dada por la ecuación 5.1:

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5.1)$$

donde  $z$  es la altura,  $z_0$  la longitud de rugosidad, que es una característica de la rugosidad aerodinámica de las superficies y está relacionada con la altura de los elementos que se encuentran sobre la superficie que producen la rugosidad del mismo,  $u^*$  la velocidad de fricción, que es una medida de las tensiones de corte o del flujo turbulento de cantidad de movimiento,  $k$  es la constante de *von Karman* (normalmente se asume 0.4). Esta función necesita datos de dos alturas para realizar los cálculos. En nuestra herramienta se tomaron los datos de la altura menor y de la mayor que se encuentren en el archivo fuente [12].

### Validación de la Función Logarítmica

En la tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos del cálculo de la función logarítmica con las herramientas “VientOnline” y *Windographer* para distintas alturas. Se puede observar que para la mayoría de los puntos el error relativo porcentual resultó nulo o muy pequeño, concluyéndose que “VientOnline” realiza los cálculos de forma muy similar a *Windographer* permitiendo validar la herramienta desarrollada para esta función.

Tabla 5.1: Comparación de resultados entre las herramientas “VientOnline” y *Windographer*

Altura (m)	Windographer Mean Wind Speed (m/s)	VientOnline Velocidad Viento Promedio (m/s)	Error Relativo %
0	0	0	0,000 %
1	0	0	0,000 %
2	0	0	0,000 %
3	0	0	0,000 %
4	0	0	0,000 %
5	0	0	0,000 %
6	0	0	0,000 %
7	0,3390	0,3390	0,000 %
8	0,8166	0,8166	0,000 %
9	1,2379	1,2379	0,000 %
...	...	...	...
48	7,2259	7,2259	0,000 %
49	7,2996	7,2997	0,001 %
50	7,3719	7,3719	0,000 %
51	7,4427	7,4428	0,001 %
52	7,5122	7,5122	0,000 %
53	7,5803	7,5804	0,001 %
...	...	...	...
95	9,6679	9,6679	0,000 %
96	9,7053	9,7054	0,001 %
97	9,7424	9,7424	0,000 %
98	9,7791	9,7791	0,000 %
99	9,8154	9,8154	0,000 %
100	9,8513	9,8514	0,001 %

### Función de Potencia:

Otra fórmula para calcular el perfil vertical, es la función de potencia, que es más simple y puede dar resultados satisfactorios, aún cuando ellos no son teóricamente exactos. Dicha función se encuentra reflejada en la ecuación 5.2 y realiza los cálculos con los datos de una altura. Para nuestra herramienta se eligieron los datos de la menor altura. La función utilizada para calcular el exponente “*p*” (coeficiente de fricción) depende de si en el archivo fuente existen datos de dos alturas o de sólo una. Este coeficiente está en función del tipo de terreno sobre el cual se está midiendo la velocidad del viento, frecuentemente se toma como un valor de 1/7 para terrenos abiertos [12]. Por el momento cuando hay datos de una sola altura se toma este último valor, en implementaciones futuras se dará la opción al usuario para que introduzca el valor de este coeficiente.

$$u(z) = u_I \left( \frac{z}{z_I} \right)^p \quad (5.2)$$

Si se tienen los datos de mediciones de la velocidad del viento a dos alturas  $z_1$  y  $z_2$ ,  $p$  su cálculo se realiza

según la ecuación 5.3:

$$p = \frac{\ln(u_2/u_1)}{\ln(z_2/z_1)} \quad (5.3)$$

Para mediciones de velocidad del viento en una sola altura,  $p$  se calcula con la ecuación 5.4 :

$$p = \frac{1}{\ln(z/z_0)} \quad (5.4)$$

### Validación de la Función de Potencia

En la tabla 5.2 se muestra que los resultados obtenidos para las distintas alturas con las herramientas *Windographer* y “VientOnline” fueron muy similares. Se puede observar que el error relativo porcentual fue nulo o muy pequeño en la mayoría de los casos, permitiendo validar la función de potencia implementada con la herramienta de “VientOnline”.

Tabla 5.2: Comparación de resultados entre las herramientas “VientOnline” y *Windographer*

Altura (m)	Windographer Mean Wind Speed (m/s)	VientOnline Velocidad Viento Promedio (m/s)	Error Relativo %
0	0	0	0,000 %
1	0,0158	0,0158	0,000 %
2	0,0636	0,0636	0,000 %
3	0,1436	0,1436	0,000 %
4	0,2561	0,2561	0,000 %
5	0,4010	0,4010	0,000 %
6	0,5784	0,5784	0,000 %
7	0,7885	0,7885	0,000 %
8	1,0312	1,0312	0,000 %
9	1,3066	1,3066	0,000 %
...	...	...	...
48	37,7804	37,7812	0,002 %
49	39,3789	39,3798	0,002 %
50	41,0107	41,0116	0,002 %
51	42,6758	42,6768	0,002 %
52	44,3742	44,3752	0,002 %
53	46,1059	46,1070	0,002 %
...	...	...	...
94	145,8459	145,8506	0,003 %
95	148,9809	148,9857	0,003 %
96	152,1495	152,1544	0,003 %
97	155,3515	155,3566	0,003 %
98	158,5870	158,5922	0,003 %
99	161,8561	161,8614	0,003 %
100	165,1587	165,1641	0,003 %

En la figura 5.1 se muestra el gráfico del Perfil Vertical de la velocidad media realizado con el *software Windographer*, y en la figura 5.2 se muestra el mismo gráfico obtenido con “VientOnline”.

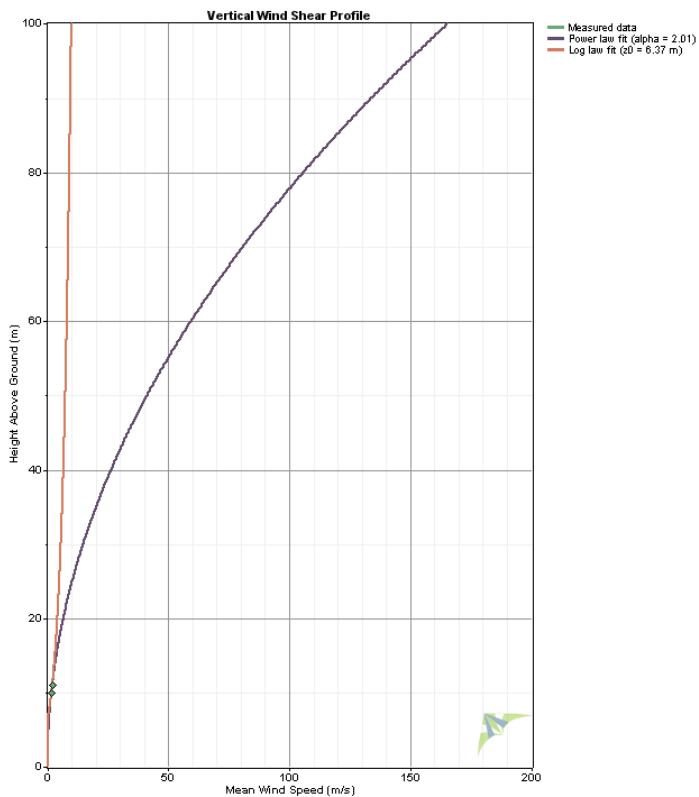
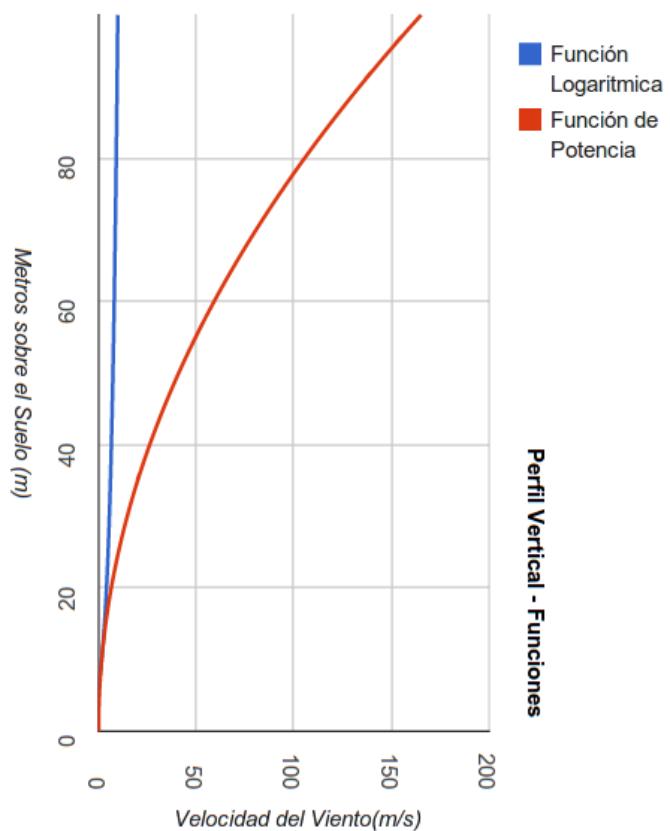
Figura 5.1: Perfil Vertical con *Windographer*

Figura 5.2: Perfil Vertical con “VientOnline”

En la figura 5.1 y figura 5.2 se muestran los gráficos realizados con las dos herramientas. Se puede observar que los mismos son muy similares, lo que permite validar las dos funciones implementadas por la herramienta “VientOnline”.

### 5.3. Perfil Temporario

El perfil temporario se definió en la subsección 2.5.1. Este refleja el comportamiento del viento diurno y/o estacional, lo que permite ver la variabilidad del viento a lo largo del día (promedio horario) y durante las diferentes estaciones del año (promedio mensual). Primero se analizó el perfil temporario por mes (estacional). Para la comparación se trabajó con un registro de datos de los meses de Mayo y Junio.

#### 5.3.1. Perfil Temporario por Mes

Primero se analizó el perfil temporario por mes (estacional). Para la comparación se trabajó con un registro de datos de los meses de Mayo y Junio.

#### Validación del Cálculo del Perfil Temporario Mensual

En la tabla 5.3 y tabla 5.4 se comparan los promedios de la velocidad del viento (perfil mensual) obtenidos para las alturas de 10 metros y 11 metros.

Tabla 5.3: Comparación de los resultados para la altura 1 entre “VientOnline” y *Windographer*

Mes	Windographer	VientOnline	Error Relativo %
	Mean Wind Speed (m/s)	Velocidad Viento Promedio (m/s)	
Mayo	1,7395	1,7395	0,000 %
Junio	1,2108	1,2124	0,132 %

Tabla 5.4: Comparación de los resultados para la altura 2 entre “VientOnline” y *Windographer*

Mes	Windographer	VientOnline	Error Relativo %
	Mean Wind Speed (m/s)	Velocidad Viento Promedio (m/s)	
Mayo	2,1532	2,1532	0,000 %
Junio	1,3168	1,3185	0,129 %

Se puede observar que los resultados obtenidos fueron muy similares para el cálculo en las dos alturas, con errores porcentuales máximos del orden del 0,13 %.

En la figura 5.3 se muestra el gráfico del Perfil Temporario Mensual realizado con el software *Windographer*, y en la figura 5.4 se muestra el mismo gráfico obtenido con “VientOnline”.

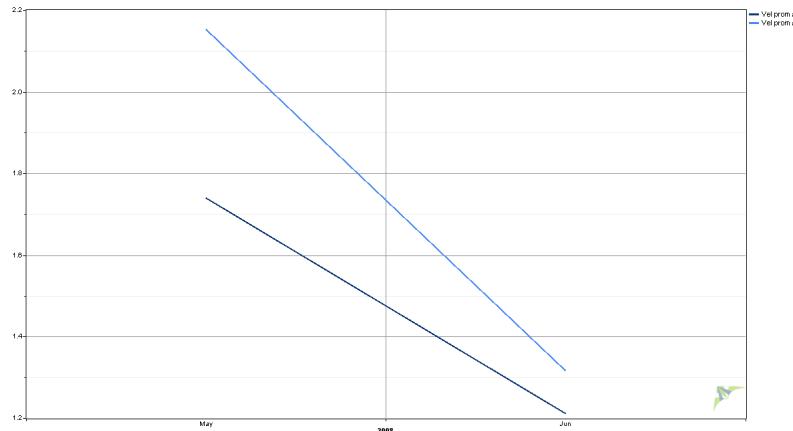
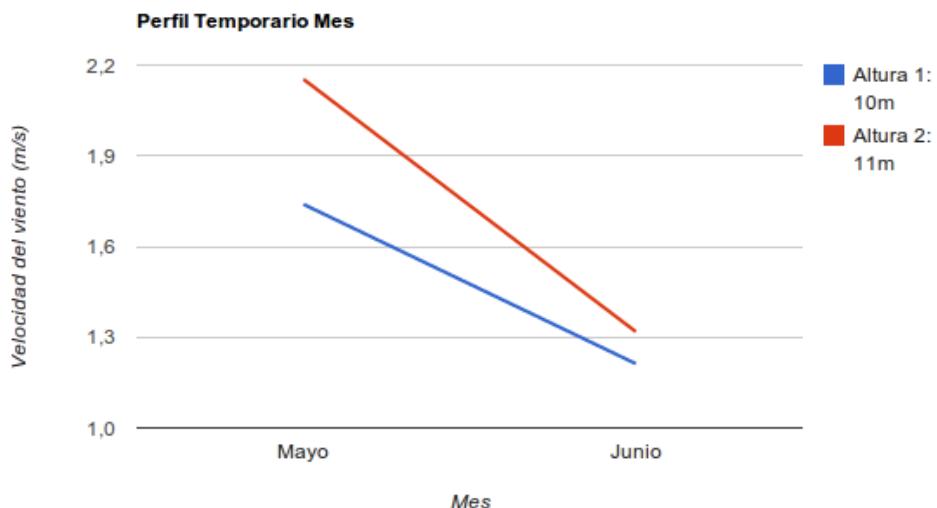
Figura 5.3: Perfil Mensual con *Windographer*

Figura 5.4: Perfil Mensual con “VientOnline”

Se puede observar que los gráficos obtenidos con ambas herramientas son muy similares, lo que permite validar la función del Perfil Temporario Mensual implementada con la herramienta “VientOnline”.

### 5.3.2. Perfil Temporario por Hora (Diurno)

En esta sección se observa el comportamiento diario del viento para los dos meses analizados. Se utiliza el sistema horario de 24 horas, tomando como inicio la hora 0,5 (0:30 am), es decir, se toman todos las velocidades que se obtuvieron en el rango entre 24 horas (12 pm) y 1 hora (1am), y se calcula su velocidad promedio. Como hora final del día se toma la hora 23,5 (11:30 pm).

#### Validación del Cálculo del Perfil Temporario Diario

En las tablas 5.5 y 5.6 se muestran los resultados de los cálculos del perfil diurno de la velocidad media

del viento para la altura de 10 metros y de 11 metros obtenidos con “VientOnline” y con *Windographer*.

Tabla 5.5: Comparación de resultados para la altura 1 entre “VientOnline” y *Windographer*

Hora del Día	Windographer Mean Wind Speed (m/s)	VientOnline Velocidad Viento Promedio (m/s)	Error Relativo %
0,5	1,0746	1,0746	0,000 %
1,5	1,0928	1,0928	0,000 %
2,5	1,2014	1,2014	0,000 %
3,5	1,2609	1,2609	0,000 %
4,5	1,2370	1,2370	0,000 %
5,5	1,4116	1,4116	0,000 %
6,5	1,4457	1,4457	0,000 %
7,5	1,6413	1,6413	0,000 %
8,5	1,5500	1,5500	0,000 %
9,5	1,8226	1,8226	0,000 %
10,5	1,9000	1,9000	0,000 %
11,5	2,0500	2,0500	0,000 %
12,5	2,1023	2,1023	0,000 %
13,5	2,1742	2,1742	0,000 %
14,5	2,0326	2,0326	0,000 %
15,5	1,8511	1,8511	0,000 %
16,5	1,8964	1,8964	0,000 %
17,5	1,6949	1,6949	0,000 %
18,5	1,3761	1,3761	0,000 %
19,5	1,4022	1,4022	0,000 %
20,5	1,6754	1,6754	0,000 %
21,5	1,7210	1,7210	0,000 %
22,5	1,6478	1,6478	0,000 %
23,5	1,5978	1,5978	0,000 %

Tabla 5.6: Comparación de resultados para la altura 2 entre “VientOnline” y *Windographer*

Hora del Día	Windographer Mean Wind Speed (m/s)	VientOnline Velocidad Viento Promedio (m/s)	Error Relativo %
0,5	1,4377	1,4377	0,000 %
1,5	1,4232	1,4232	0,000 %
2,5	1,4775	1,4775	0,000 %
3,5	1,5471	1,5471	0,000 %
4,5	1,5413	1,5413	0,000 %
5,5	1,7297	1,7297	0,000 %
6,5	1,9174	1,9174	0,000 %
7,5	2,0312	2,0312	0,000 %
8,5	1,9688	1,9688	0,000 %
9,5	2,1699	2,1699	0,000 %
10,5	2,2742	2,2742	0,000 %
11,5	2,4167	2,4167	0,000 %
12,5	2,5000	2,5000	0,000 %
13,5	2,4939	2,4939	0,000 %
14,5	2,4023	2,4023	0,000 %
15,5	2,1854	2,1854	0,000 %
16,5	2,2304	2,2304	0,000 %
17,5	1,9899	1,9899	0,000 %
18,5	1,7232	1,7232	0,000 %
19,5	1,6949	1,6949	0,000 %
20,5	1,9957	1,9957	0,000 %
21,5	2,0203	2,0203	0,000 %
22,5	1,9507	1,9507	0,000 %
23,5	1,9261	1,9261	0,000 %

Se observan que los cálculos realizados para las dos alturas fueron idénticos con diferencias porcentuales nulas. Los gráficos realizados con *Windographer* se muestra en la figura 5.5 y con “VientOnline” en la figura 5.6.

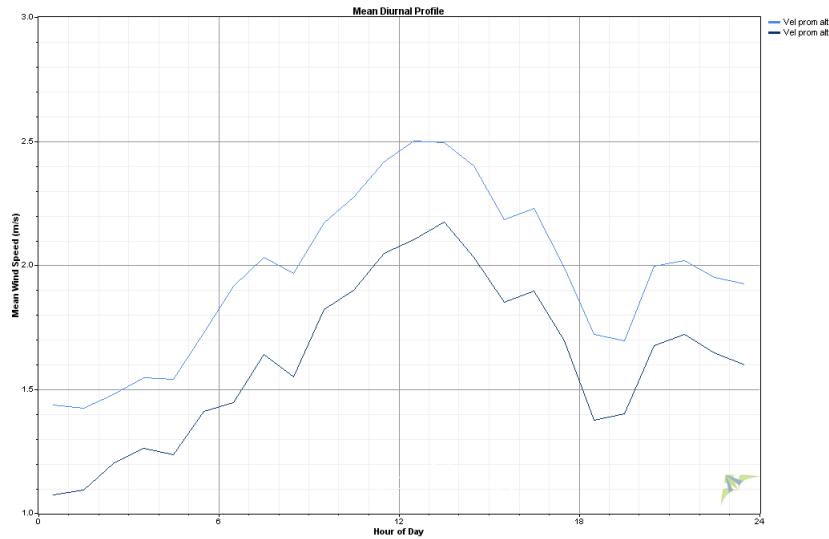


Figura 5.5: Perfil Diario (Diurno) con *Windographer*

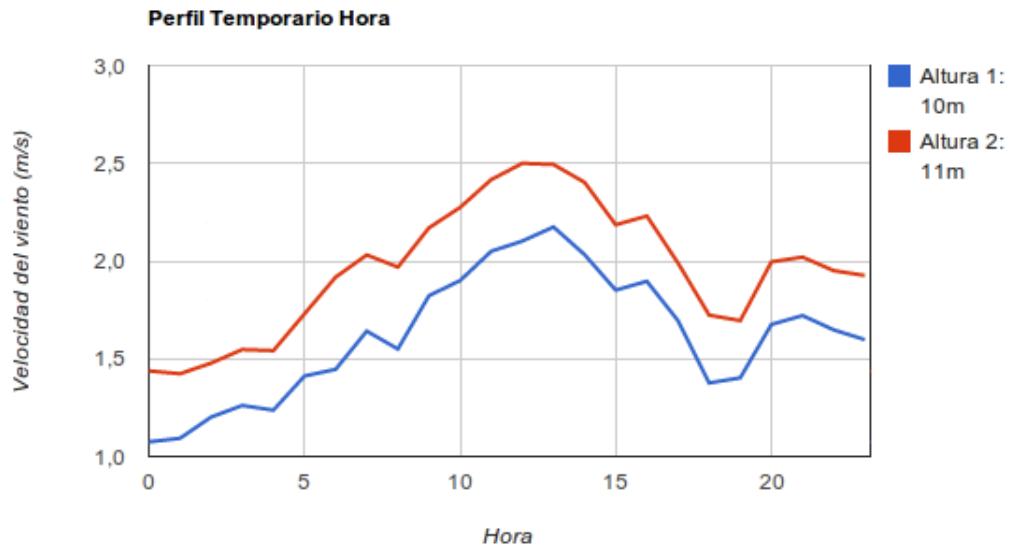


Figura 5.6: Perfil Diario (Diurno) con “VientOnline”

Se puede observar que los gráficos obtenidos con ambas aplicaciones son idénticos lo que permite validar los cálculos para la función del Perfil Temporario Diurno de “VientOnline”.

## 5.4. Rosa de los Vientos

La Rosa de los Vientos definida en la subsección 2.5.5 permite representar las direcciones predomi-

nantes del viento en una determinada localidad. Con este modo gráfico conoceremos la frecuencia, valores medios de velocidad de viento y la energía en cada dirección. Es un diagrama polar que representa el tanto por ciento de viento con la dirección indicada y en módulo su escala de velocidad media. Las observaciones generalmente efectuadas permiten deducir que la dirección del viento varía continuamente en torno a una dirección media.

Con la herramienta desarrollada “VientOnline” se puede obtener el gráfico de la rosa de los vientos con 4, 8, 12, 16 y 24 divisiones de orientación. También se pueden obtener las Rosas de Potencia y la de Energía a partir de la Rosa de los Vientos.

### Validación de la Rosa de los Vientos

En la tabla 5.7 se comparan los promedios obtenidos con las dos herramientas considerando la orientación de 24 puntos cardinales para la altura de 10 metros.

Tabla 5.7: Comparación de resultados entre “VientOnline” y *Windographer*

Orientación Punto Medio(°)	Windographer	VientOnline	Error Relativo %
	Frequency (%)	Frecuencia (%)	
0°	2,7473	2,7473	0,000 %
15°	2,0452	2,0452	0,000 %
30°	1,9231	1,9231	0,000 %
45°	2,1978	2,1978	0,000 %
60°	3,5104	3,5104	0,000 %
75°	4,4567	4,4567	0,000 %
90°	8,5470	8,5470	0,000 %
105°	6,2271	6,2271	0,000 %
120°	7,0513	7,0513	0,000 %
135°	1,9536	1,9536	0,000 %
150°	0,4884	0,4884	0,000 %
165°	0,7937	0,7937	0,000 %
180°	0,8547	0,8547	0,000 %
195°	1,0073	1,0073	0,000 %
210°	0,7021	0,7021	0,000 %
225°	1,4652	1,4652	0,000 %
240°	3,7241	3,7241	0,000 %
255°	7,3260	7,3260	0,000 %
270°	14,4689	14,4689	0,000 %
285°	7,4481	7,4481	0,000 %
300°	3,3272	3,3272	0,000 %
315°	1,3431	1,3431	0,000 %
330°	1,1905	1,1905	0,000 %
345°	1,4347	1,4347	0,000 %

Se observa que los resultados obtenidos con las dos herramientas son idénticos con errores porcentuales nulos. En la figura 5.7 se muestra el gráfico de la Rosa de los Vientos realizada con *Windographer* y en la figura 5.8 el mismo gráfico con “VientOnline”.

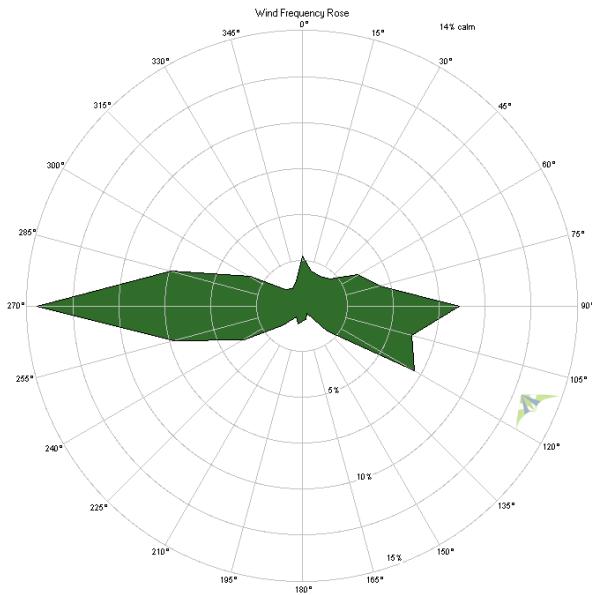


Figura 5.7: Rosa de los Vientos en 24 direcciones con *Windographer*

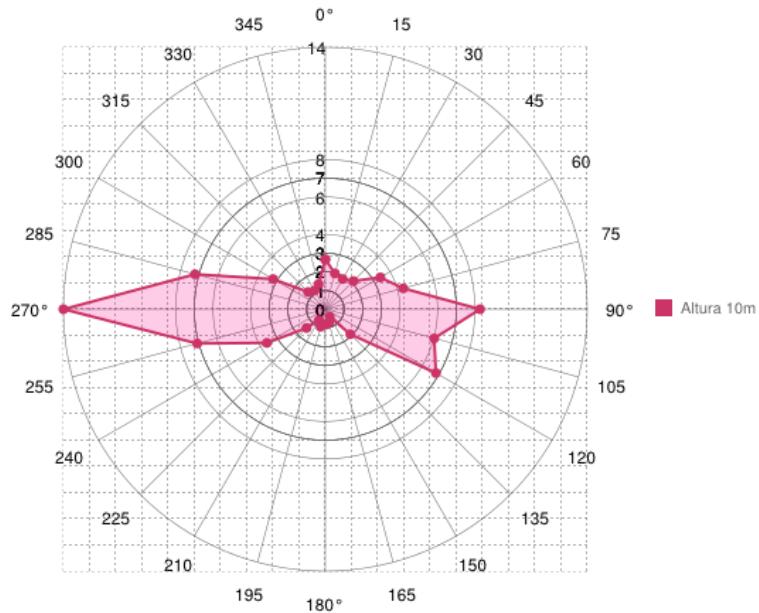


Figura 5.8: Rosa de los Vientos en 24 direcciones con “VientOnline”

Se puede observar que los gráficos obtenidos con las dos herramientas son idénticos lo que permite validar la función implementada de la Rosa de los Vientos con “VientOnline”.

## 5.5. Histograma de la Frecuencia Relativa

En la figura 5.9 y figura 5.10 se muestran los gráficos de los histogramas y de la densidad de probabilidad con la función *Weibull*. El histograma ilustra la variación que se presenta en el conjunto de datos analizados lo cual permite dar una idea de la frecuencia con la que aparecen las distintas velocidades. La función *Weibull*, definida en la subsección 2.5.2 describe la densidad de probabilidad de velocidades medias horarias de viento.

Se puede mencionar que el ajuste realizado por la función *Weibull* se realizó al final del desarrollo de la herramienta “VientOnline”, por este motivo se tuvieron que hacer modificaciones en la base de datos, en los menús mostrados, en la lectura del archivo fuente, etc., utilizándose un conjunto ampliado de datos (14449) para obtener un ajuste más representativo con mayor precisión.

### Validación de la Función *Weibull*

En la tabla 5.8 se comparan las variables  $k$  y  $c$  ( $k$  es el factor forma y  $c$  es el factor de escala) obtenidas desde el software *Windographer* y desde “VientOnline”. Estas variables fueron definidas en la subsección 2.5.2 de ajuste numérico de la distribución de probabilidad por Mínimos Cuadrados.

Tabla 5.8: Comparación de resultados entre *Windographer* y “VientOnline”

	Windographer	VientOnline	Error Relativo %
$k$	1,3430	1,3270	1,191 %
$c$	3,5440	3,5430	0,028 %

Se puede observar que el error relativo porcentual, obtenido en los cálculos de los parámetros  $k$  y  $c$ , con el software *Windographer* y con “VientOnline”, fueron muy pequeños y no tienen ninguna importancia práctica. Para el parámetro  $k$  fue del orden del 1 %, y para el parámetro  $c$  fue aproximadamente del orden del 0,03 %.

En la figura 5.9 se muestra la distribución de probabilidad del software *Windographer*, y en la figura 5.10 se muestra el gráfico obtenido desde “VientOnline”, los cuales reflejan la relación entre la velocidad y la frecuencia.

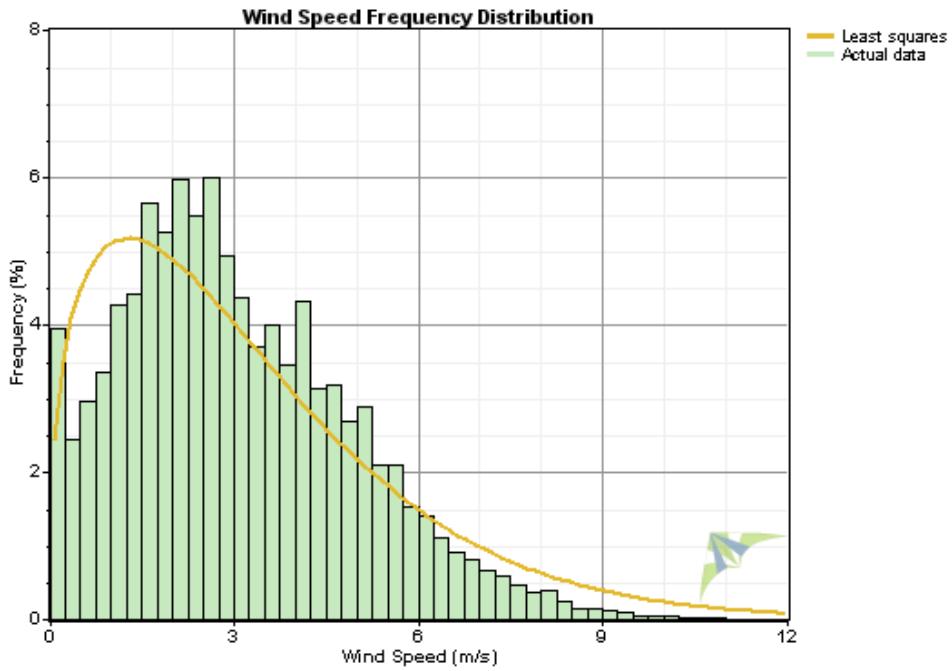
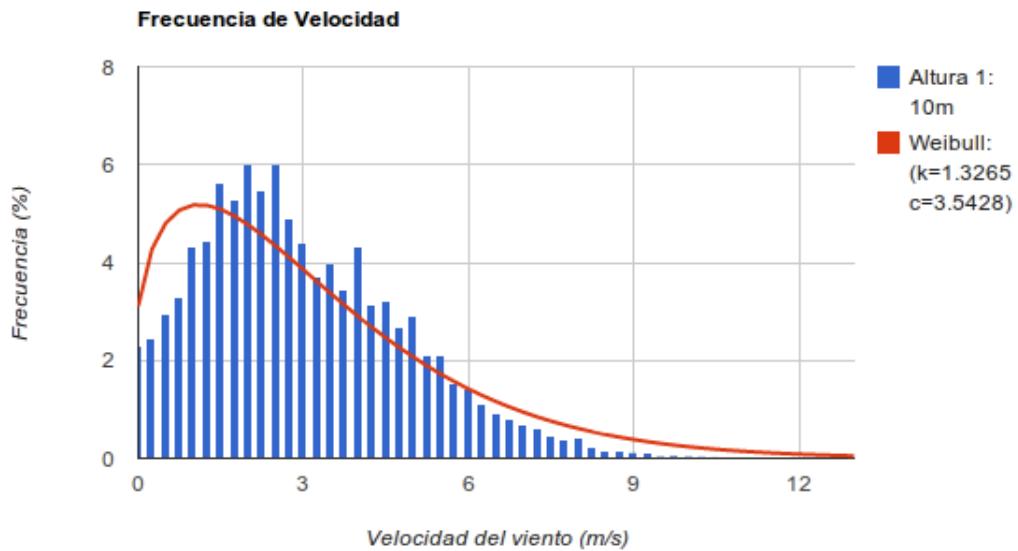
Figura 5.9: Distribución de Probabilidad con *Windographer*

Figura 5.10: Distribución de Probabilidad con “VientOnline”

Los gráficos obtenidos son muy similares en sus valores y proporciones. Esto permite validar el Ajuste de la Distribución de Probabilidad de la velocidad media del viento con la Función *Weibull* implementada con “VientOnline”.

Para una mejor visualización, se muestra en la figura 5.11 el gráfico del ajuste de la distribución *Weibull* con sus parámetros  $k$  y  $c$ , obtenida con las dos herramientas. La línea de color rojo muestra los datos de la misma obtenidos con la herramienta “VientOnline” y en color verde los datos obtenidos con el software *Windographer* usado para la validación. Se puede observar que los mismos son casi idénticos.

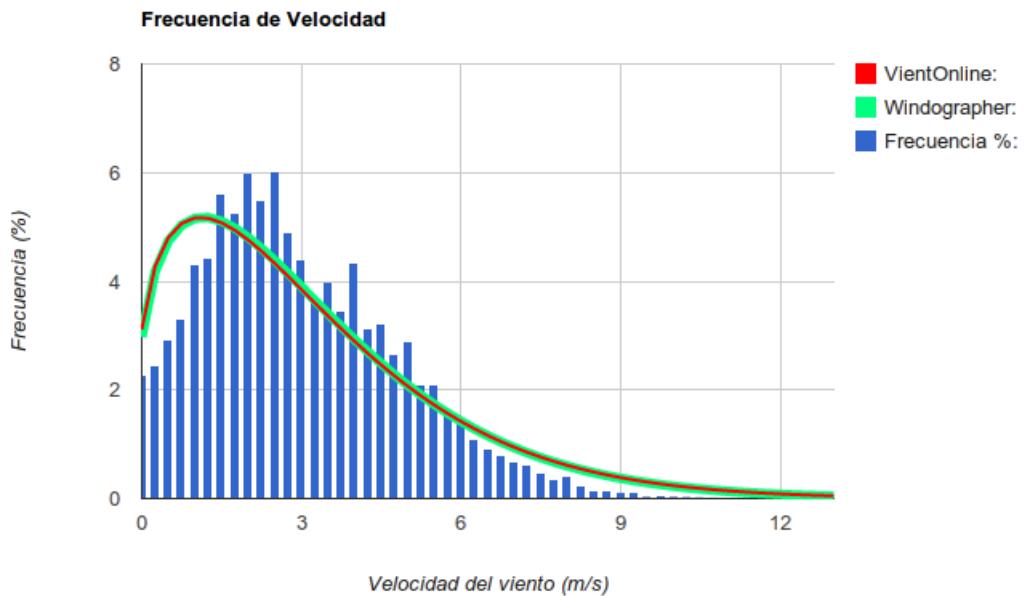


Figura 5.11: Comparación de Distribuciones de Probabilidad

## 5.6. Conclusión

En este capítulo se presentaron los distintos cálculos, ajustes numéricos por el método de los mínimos cuadrados y los gráficos realizados en este trabajo de tesis. Se ha realizado una comparación entre los cálculos y los gráficos obtenidos con “VientOnline” y con el software *Windographer*, el cual, es muy utilizado en el área de energía eólica. Se pudo observar en la comparación, a través del cálculo del error porcentual, que el mismo fue muy pequeño o nulo en la mayoría de los cálculos realizados. Esto permite concluir que “VientOnline” implementa de manera eficaz los cálculos de todas las funciones validadas, lo que le da al usuario final la confianza necesaria, de que su utilización permite hacer los cálculos en forma correcta. Esta información es muy importante para hacer análisis posteriores, como por ejemplo la factibilidad de implantación de un parque eólico u obtener conclusiones sobre el área analizada.

# Capítulo 6

## Conclusiones

En este capítulo se presentan los aportes y las principales conclusiones obtenidas en este trabajo de tesis. Se discuten las limitaciones y dificultades encontradas durante el desarrollo del mismo. Se analiza el cumplimiento de los objetivos planteados en el capítulo 1 y se sugieren futuras líneas de trabajo.

### 6.1. Objetivos Alcanzados

El objetivo principal planteado fue el “Estudio, diseño e implementación de una herramienta computacional, basada en *software* libre para el procesamiento de datos de viento utilizados para generación de energía eólica”.

A continuación se analiza cada uno de los objetivos propuestos en términos de los logros obtenidos:

- *Análisis de la situación actual e identificación de software existentes para el tratamiento de datos de viento y reingeniería de una herramienta:*

De la investigación realizada sobre las principales herramientas computacionales para el tratamiento estadísticos de datos del viento, en base a comparaciones sobre funciones específicas, costo, interface amigable y facilidad de uso, se ha seleccionado la más adecuada para realizar la ingeniería inversa y se utilizó esta información para el desarrollo de la herramienta propuesta. La utilización de los conceptos de la Ingeniera de Software y la utilización de la ingeniería inversa ha posibilitado obtener conocimientos para comprender los procesos, datos y las interrelaciones existentes para un desarrollo claro y eficiente de la herramienta “VientOnline”. En la literatura se han encontrado algunos artículos relacionados al desarrollo de *software* de análisis de recursos eólicos utilizando el entorno Matlab, lenguaje C++, entre otros. Se puede mencionar que no se encontró información sobre herramientas similares a la propuesta en este trabajo.

- *Estudio y análisis de los parámetros característicos (velocidad media, diaria, mensual y anual, variación con la altura, entre otros) utilizados en la definición del régimen del viento y su posterior tratamiento estadístico a través de gráficos para la aplicación en modelos de energía eólica:*

Se analizaron y se implementaron los cálculos necesarios para el análisis de los parámetros característicos del régimen del viento. Estos fueron utilizados para la construcción de los gráficos representativos como histograma de velocidad, rosa de los vientos, perfil de velocidad, perfil mensual y diario, logaritmo de potencia, entre otros. Además, se realizó el ajuste de la distribución de la velocidad media con la función *Weibull* por medio del método numérico de mínimos cuadrados.

Estas informaciones son fundamentales en la realización de los distintos análisis de las características del viento y para su aplicación en modelos de generación de energía eólica.

- *Integración de las herramientas computacionales a ser utilizadas en el diseño del software propuesto. Implementación y gestión de la base de datos con software libre:*

En el capítulo 4 se realizó una descripción de la arquitectura de la herramienta desarrollada y como se implementaron cada una de sus capas y módulos. Se definieron los distintos recursos computacionales utilizados en el desarrollo de la herramienta propuesta, fundamentando la elección de cada uno de ellos y siendo el principal criterio para su utilización la condición de ser de uso libre. Se seleccionó la herramienta *Workbench* para el diseño de la base de datos en MySQL y *Emma* para la gestión de la misma, y el framework *GWT* junto con *Smart GWT* para la construcción de la aplicación Web. Fue utilizado el entorno IDE *Eclipse* y el lenguaje de programación *Java*. Por las ventajas de las aplicaciones Web mencionadas en la sección se optó por el desarrollo de la herramienta como una aplicación Web.

- *Validación, diseño e implementación de casos de prueba en base a un caso de estudio:*

La herramienta fue validada con un *software* profesional muy utilizado en el ambiente de energía eólica. Fue utilizado como caso de estudio una base de datos de mediciones del viento de la Universidad Nacional del Comahue (UNCo). Para la comparación entre las dos herramientas se utilizó el cálculo del error relativo porcentual, obteniéndose resultados nulos o muy pequeños y concluyendo que “VientOnline” implementa de manera eficiente las funciones específicas dándole confianza al usuario para su utilización.

## 6.2. Limitaciones

Se puede mencionar que se realizó una investigación previa sobre el dominio eólico por no contar con los conocimientos sobre el mismo. También para el aprendizaje de los recursos computacionales usados en el desarrollo de la herramienta, se debieron consultar numerosos tutoriales, manuales y foros en la Web.

## 6.3. Conclusiones Finales

La herramienta desarrollada “VientOnline”, basada en *software* libre, será utilizada en primera instancia con fines académicos en la cátedra de Ingeniería del Viento de la UNCo, quedando abierta la posibilidad de su utilización en otras universidades o institutos de investigación, organismos públicos, particularmente aquellos que son decisores en materia de política energética y empresas involucradas en la temática de energía eólica, fomentándose de esta manera el trabajo colaborativo e interdisciplinario entre la universidad y el medio.

## 6.4. Trabajos Futuros

En función de la herramienta desarrollada en este trabajo para el tratamiento estadísticos de datos del viento y del creciente avance tecnológico para la explotación de los recursos energéticos basados en

fuentes renovables para producir energía limpia, aún se necesita continuar con el desarrollo e implementación de nuevos módulos computacionales que puedan ser reutilizados en otros programas para el procesamiento de datos meteorológicos.

Se sugieren las siguientes líneas de investigación como trabajos futuros:

- Estimación de la producción de energía eléctrica, la cual es importante para la localización de los sistemas eólicos y en el análisis de las granjas eólicas.
- Simulación del comportamiento de distintas máquinas eólicas en una determinada área.
- Evaluación de la influencia de las condiciones topográficas locales en el régimen del viento



# Bibliografía

- [1] R. Dicco. *Avances del Plan Energético Nacional 2004-2019*. CLICET (Centro Latinoamericano de Investigaciones Científicas y Técnicas), 2013.
- [2] R. Dicco. *Diagnóstico y Perspectiva del Sector Eólico en Argentina*. CLICET, 2012.
- [3] C. Palese N. Warchomicka G. Pedro, H. Mattio and J. Lassig. *Recurso Eólico de la Provincia de Neuquén, ISSN 0329-5184, vol. 10, pp. 6-15*. Asades, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 2006.
- [4] H. Rinne. *The Weibull Distribution:a Handbook*. CrcPress, Taylor & Francis, 2009.
- [5] G. L. Johnson. *Wind Energy Systems*. Electronic Edition, Manhattan, KS, 2001.
- [6] American Meteorological Society. <http://journals.ametsoc.org>, Último acceso: 15 de Mayo de 2013.
- [7] S. Bin D. Ting and S. Sheng-wen. Study on the wind energy resources assessment in wind power generation. *Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, pp. 6804-6807, August 2011.
- [8] L. L Freris. *Wind Energy Conversion Systems*. Prentice Hall, UK, 1990.
- [9] M. R. B. Neto G. L. B. Ramalho A. P. Moreira, P. C. M. Carvalho and S. V. Dias. Avaliação e potencial eólico utilizando mínimos quadrados baseados na distribuição de weibull. *8th Latin-American Congress on Electricity, Generation and Transmission - CLAGTEE*, pp. 1-6, Ubatuba, Brasil, 2009.
- [10] C. A. Sansigolo. Distribuições de probabilidade de velocidade e potência do vento. *Revista Brasileira de Meteorologia* vol. 20, no. 2, pp. 207-215, 2005.
- [11] J. S. Virgens Filho P. A. Adacheski G. C. Beruski, M. L. Leite and A. V. Oliveira. Análise probabilística da velocidade média e caracterização da direção predominante do vento no município da lapa/pr. *R.RA'EGA, Curitiba*, no. 17, pp. 65-75, Editora UFPR, 2009.
- [12] J. A. S. García F. B. Ruedas, C. A. Camacho and D. E. M. Morales. Análisis y validación de metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento. *Comité de generación del capítulo de potencia del IEEI sección México, RVP-AI, Acapulco, México*, 2008.
- [13] Windrose. <http://www.windrose.gr>, Último acceso: 20 de Junio de 2012.
- [14] Mint. <http://www.sander-partner.ch/en/mintmain.html>, Último acceso: 22 de Junio de 2012.
- [15] Wrplot view. <http://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>, Último acceso: 23 de Junio de 2012.
- [16] Windographer. <http://www.windographer.com>, Último acceso: 15 de Julio de 2013.

- [17] P. S. Leão F. O. Oliveira Segundo J. B. Almadam C. F. P. Lima M. C. O. Rêgo, R and A. S. Ribeiro Neto. *Desenvolvimento de Software para Seleção da Distribuição de Velocidade do Vento e Estimação da Energia Gerada em Um Aerogerador*. 9º IEEE/IAS International Conference on Industry Application, Induscon, Escola Politécnica de São Paulo, 2011.
- [18] J. M. Carrera Velenta J. R Hernandez Barajas E. Magaña Villegas, S. Ramos Herrera and A. Valdez Manzanilla. *Diseño del Software de Análisis de Datos Meteorológicos: Fase de Prueba*, vol. XVI, no. 30. UJAT, 2010.
- [19] D. Souza Guillermitti and N. Nery de Andrade Filho. *Sistema Monitorador de Regime de Ventos, Tesis de Maestría*. Universidad Mato Grosso do Sul, 2011.
- [20] I. Sommerville. *Software Engineering*. 9a ed., Addison-Wesley Iberoamericana, 2011.
- [21] I. Sommerville. *Ingeniería del Software*. 7a ed., Pearson Educación, S.A., 2005.
- [22] Eclipse. <http://www.eclipse.org/>, Último acceso: 10 de Julio de 2013.
- [23] Gwt Project. <http://www.gwtproject.org/>, Último acceso: 24 de Julio de 2013.
- [24] Smart GWT. <http://code.google.com/p/smartgwt/>, Último acceso: 24 de Julio de 2013.
- [25] Smart GWT Showcase. <http://www.smartclient.com/smartgwt/showcase/#main>, Último acceso: 15 de Junio de 2013.
- [26] MySQL. <http://www.mysql.com/>, Último acceso: 10 de Julio de 2013.
- [27] MySQL Workbench. <http://www.mysql.com/products/workbench/>, Último acceso: 7 de Marzo de 2013.
- [28] W. Savitch and K. Mock. *Java: An Introduction to Problem Solving & Programming*. 6a ed., Pearson Prentice-Hall, 2012.
- [29] M. A. Weiss. *Data Structures & Algorithm Analysis in Java*. 3a ed., Prentice Hall, 1997.
- [30] Hibernate. <http://www.hibernate.org/>, Último acceso: 16 de Abril de 2013.
- [31] Google API - GWT Visualizations. <http://code.google.com/p/gwt-google-apis/wiki/VisualizationGettingStarted>, Último acceso: 26 de Julio de 2013.
- [32] Charts4j. <http://code.google.com/p/charts4j/>, Último acceso: 26 de Julio de 2013.
- [33] P. V. Aranda D. R. Martinez and O. P. Lopez. *Aplicaciones Web: Un enfoque Práctico*. RA-MA, 2010.
- [34] R. Stallman. *Software libre para una sociedad libre*. Traficantes de sueños, 2004.
- [35] A. C. Telea. *Reverse Engineering - Recent Advances and Applications*. InTech, 2012.
- [36] P. Tonella and A. Potrich. *Reverse Engineering of Object-Oriented Code*. Springer, 2005.
- [37] T. Systa. *Static and Dynamic Reverse Engineering for Java Software Systems*. Ph. D. University Tempere, Finland, 2000.
- [38] J. B. Inzunza. *Meteorología Descriptiva*. Universitaria S.A., 2012.
- [39] D. C. Montgomery, G. R. Runger. *Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería*. 2a ed., Limusa S.A. De C.V., 2002.

- [40] S. M. Ross. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientist*. 3a ed., Elsevier Academic Press, 2004.
- [41] WindPro. <http://www.emd.dk/WindPRO/Modules/>, Último acceso: 10 de Junio de 2012.
- [42] WindSim. <http://www.windsim.com/>, Último acceso: 17 de Junio de 2012.
- [43] WindStation. <http://www.easycfd.net/windstation/default.htm>, Último acceso: 20 de Junio de 2012.
- [44] R. S. Pressman. *Ingeniería del Software - Un enfoque práctico*. 6a ed., McGraw-Hill Interamericana, 2005.
- [45] B. Boehm. Anchoring the software procces. *IEEE Software*, vol. 13, no. 4, pp. 73-82.
- [46] R. Kazman L. Bass, P. Clements. *Software Architecture in Practice*. 2a ed., Addison-Wesley Profesional, 2003.
- [47] R. Johnson J. Vlissides E. Gamma, R. Helm. *Design Patterns - Elements of Reusable Object-Oriented Software*. 1a ed., Addison-Wesley Profesional, 1994.
- [48] P. Iglinksi E. Stroulia, M. El-Ramly and P. Sorenson. User interface reverse engineering in support of interface migration to the web. *Automated Software Engineering - Kluwer Academic Publishers Hingham, MA, USA*, July 2003.



# **Apéndices**



# Apéndice A

## Diagramas de Clases

### A.1. Diagramas UML

#### Diagrama de Clases UML Proyecto Principal

A continuación se muestra el diagrama de clases del proyecto principal, el cual fue particionado en cuatro gráficos, A.1, A.2, A.3 y A.4.

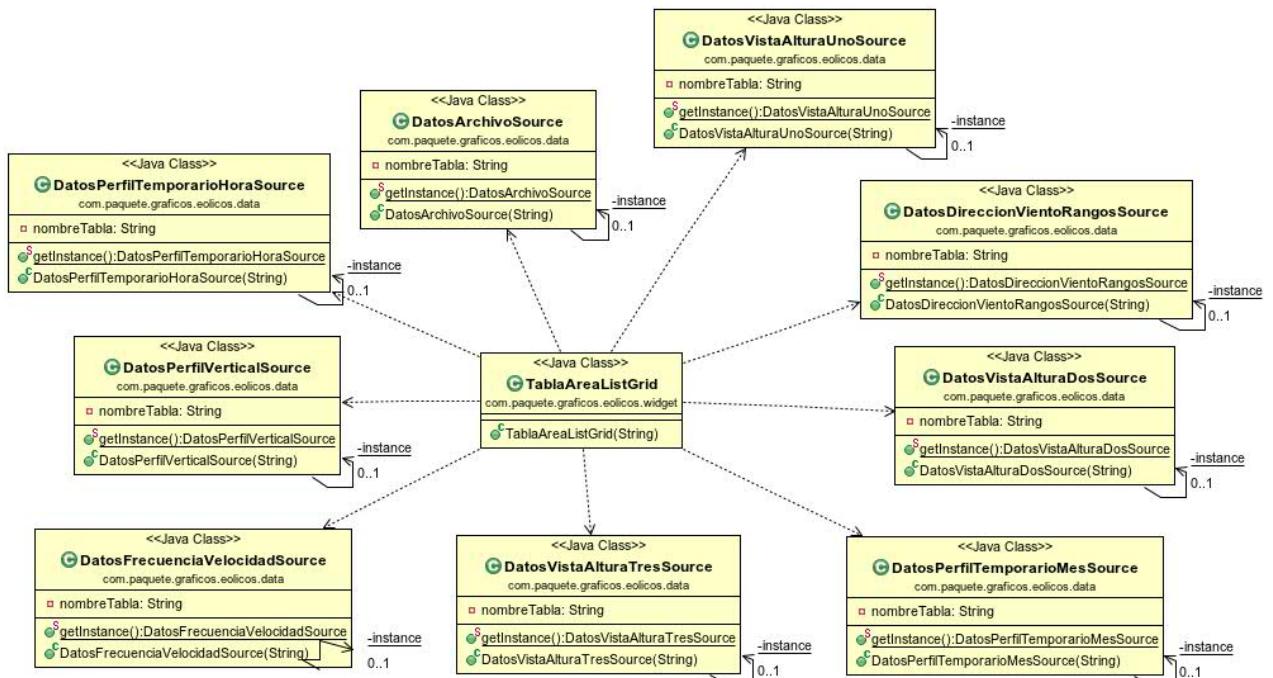


Figura A.1: Diagrama de Clases Proyecto Principal (A1)

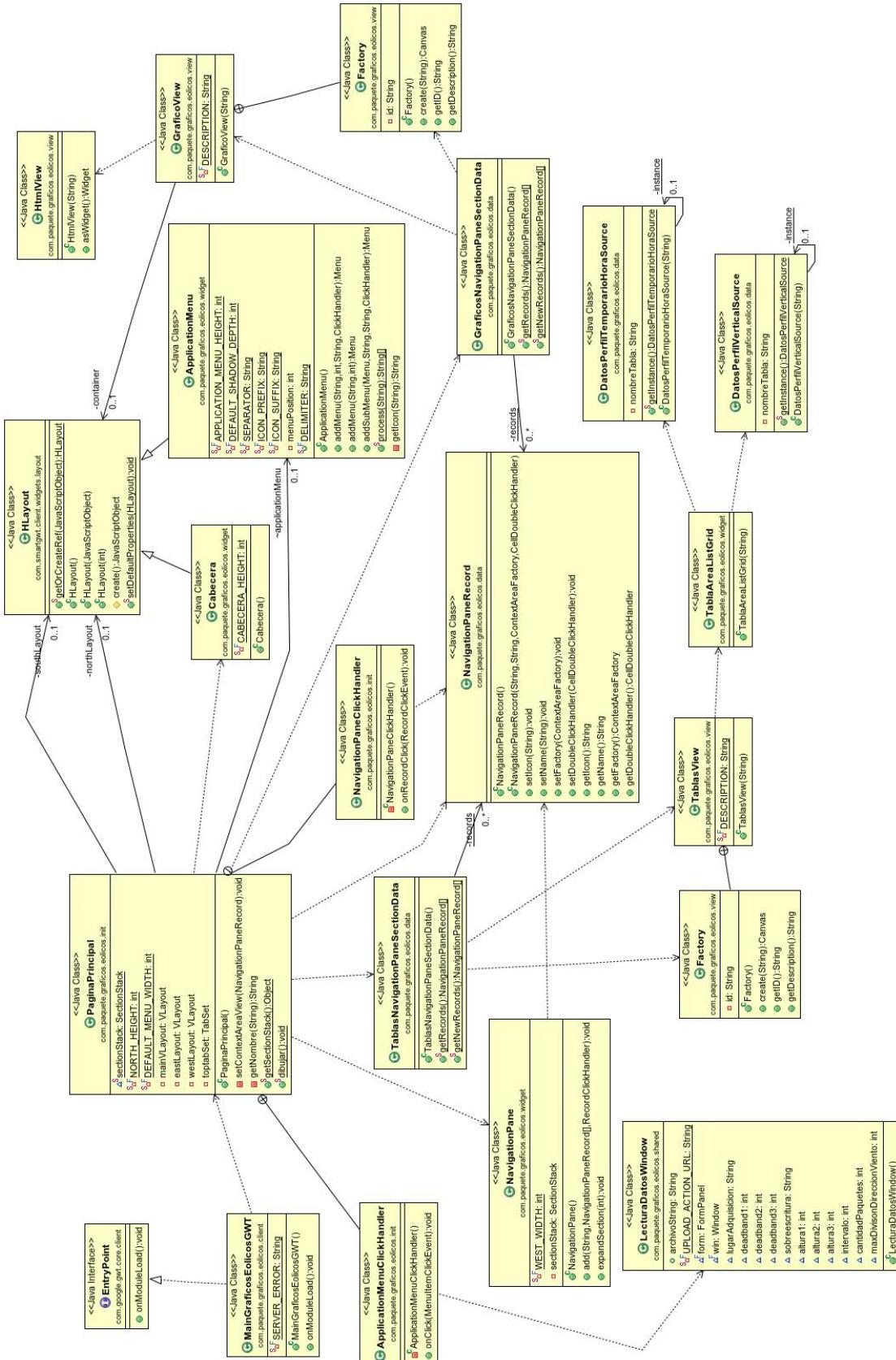


Figura A.2: Diagrama de Clases Proyecto Principal (A2)

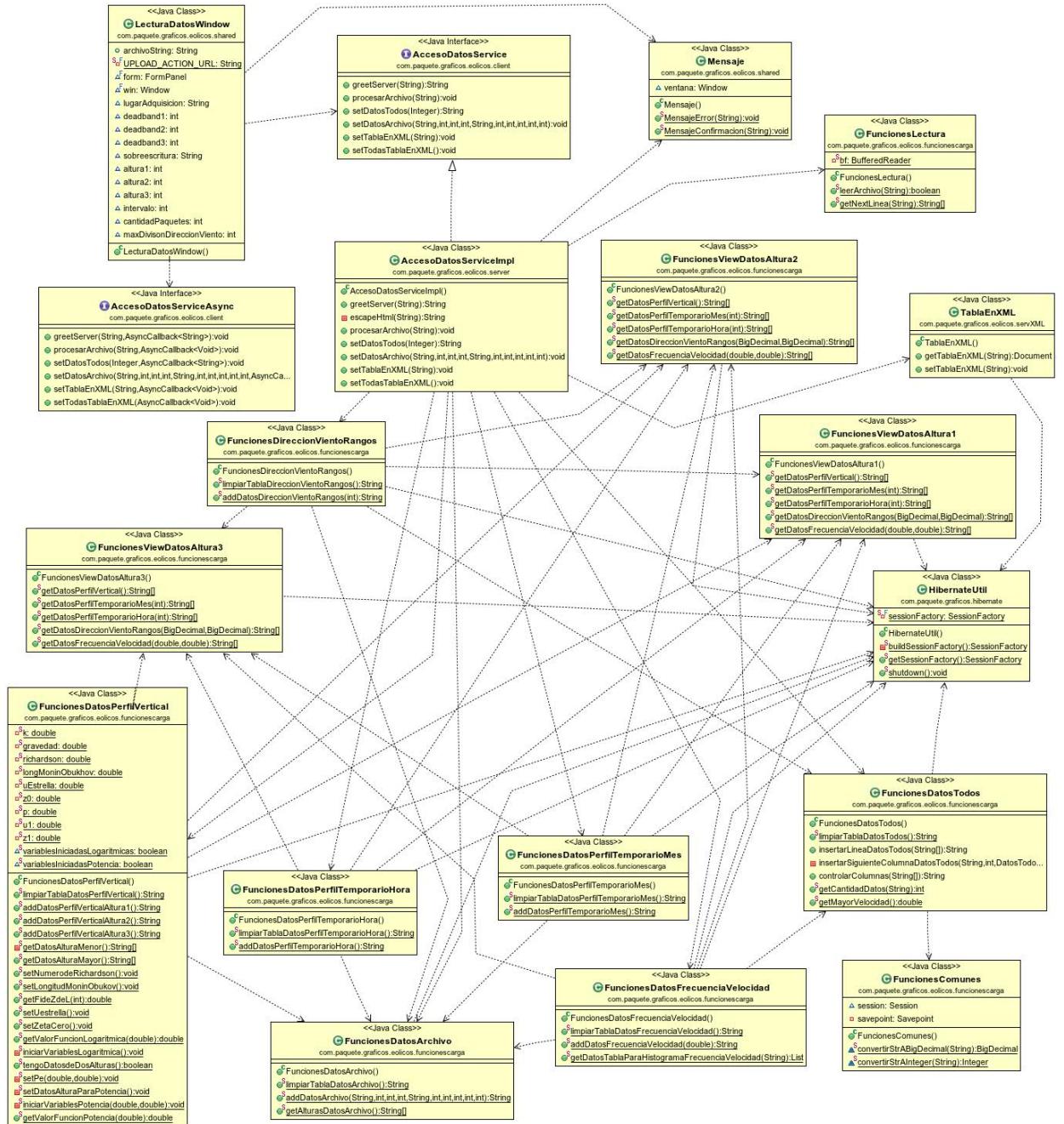


Figura A.3: Diagrama de Clases Proyecto Principal (B1)

## APÉNDICE A. DIAGRAMAS DE CLASES

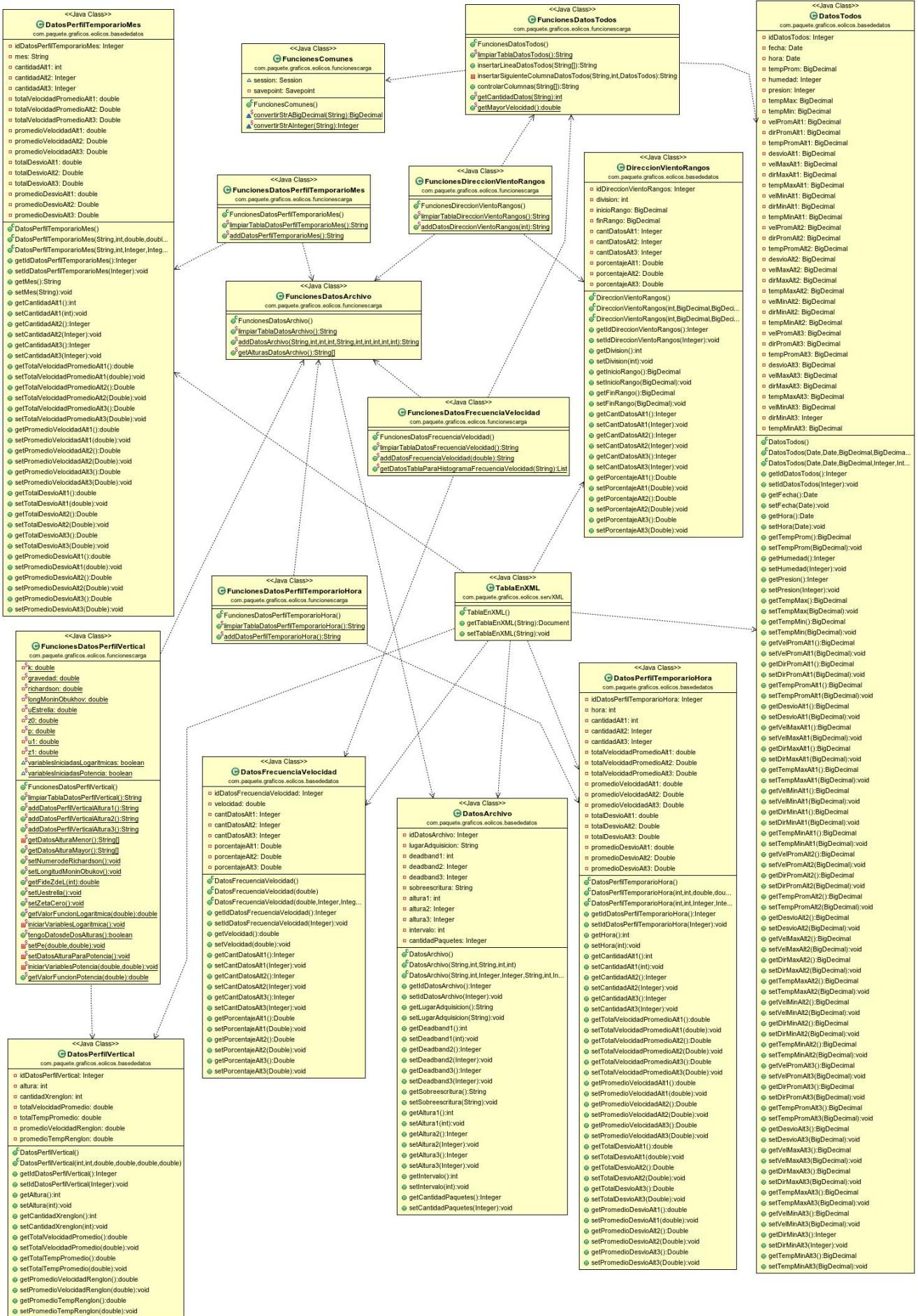


Figura A.4: Diagrama de Clases Proyecto Principal (B2)

# Diagrama de Clases UML Proyecto Secundario

A continuación se muestra el diagrama de clases del proyecto secundario, el cual fue particionado en dos gráficos, A.5 y A.6.

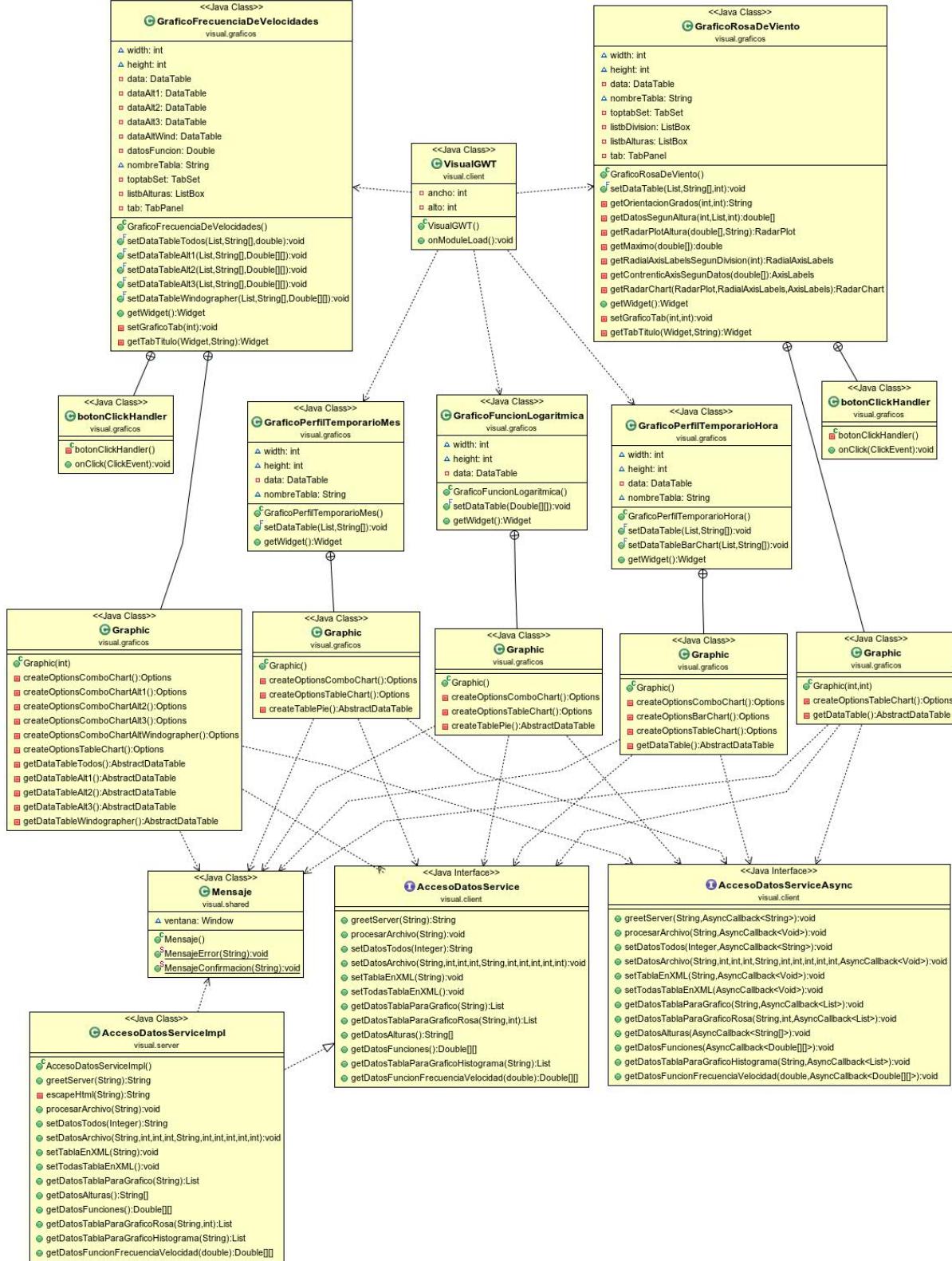


Figura A.5: Primera parte Diagrama de Clases Proyecto Secundario

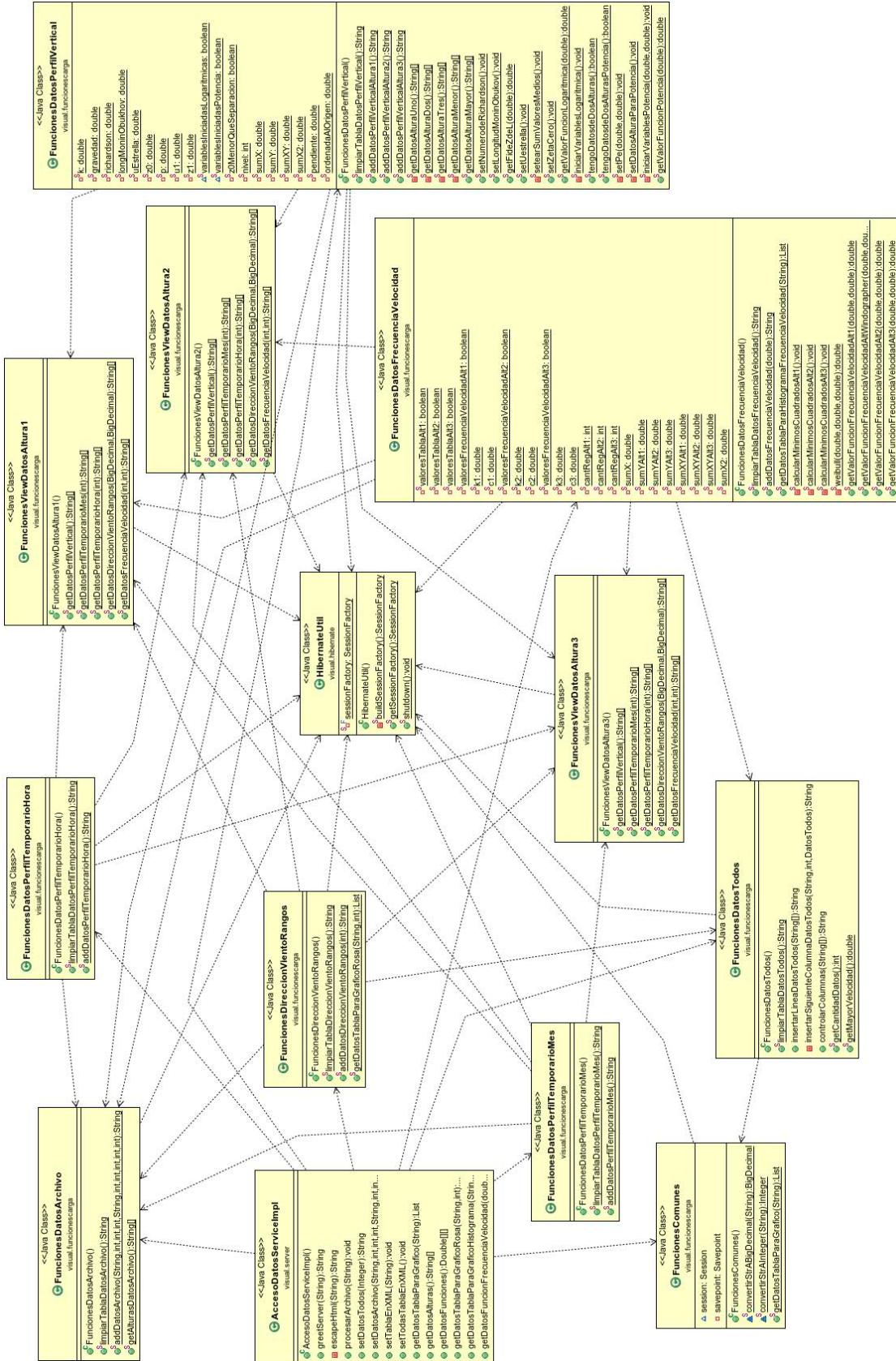


Figura A.6: Segunda parte Diagrama de Clases Proyecto Secundario

### Diagramas de Secuencias UML del Proyecto Principal

A continuación se muestran los diagramas de secuencias del proyecto principal. El diagrama A.7 muestra la inicialización de la pantalla principal del sistema.

El diagrama A.8 muestra la lectura y el procesamiento del archivo fuente con los datos eólicos y se guardan todos los datos en las distintas tablas. También se procesa cada una de las tablas para obtener archivos XML para usarse posteriormente como fuente de datos.

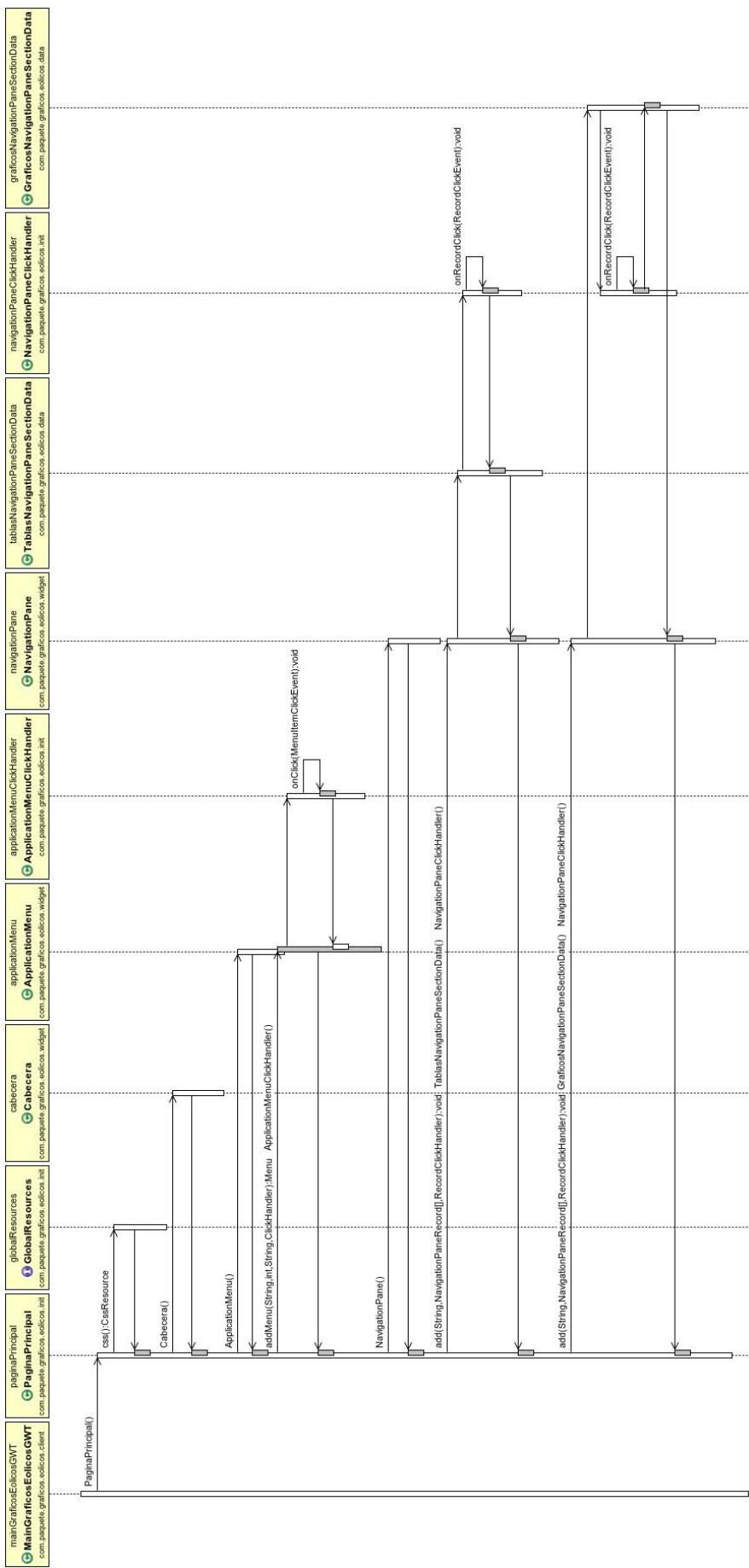


Figura A.7: Diagrama de Secuencias de Inicialización del Sistema

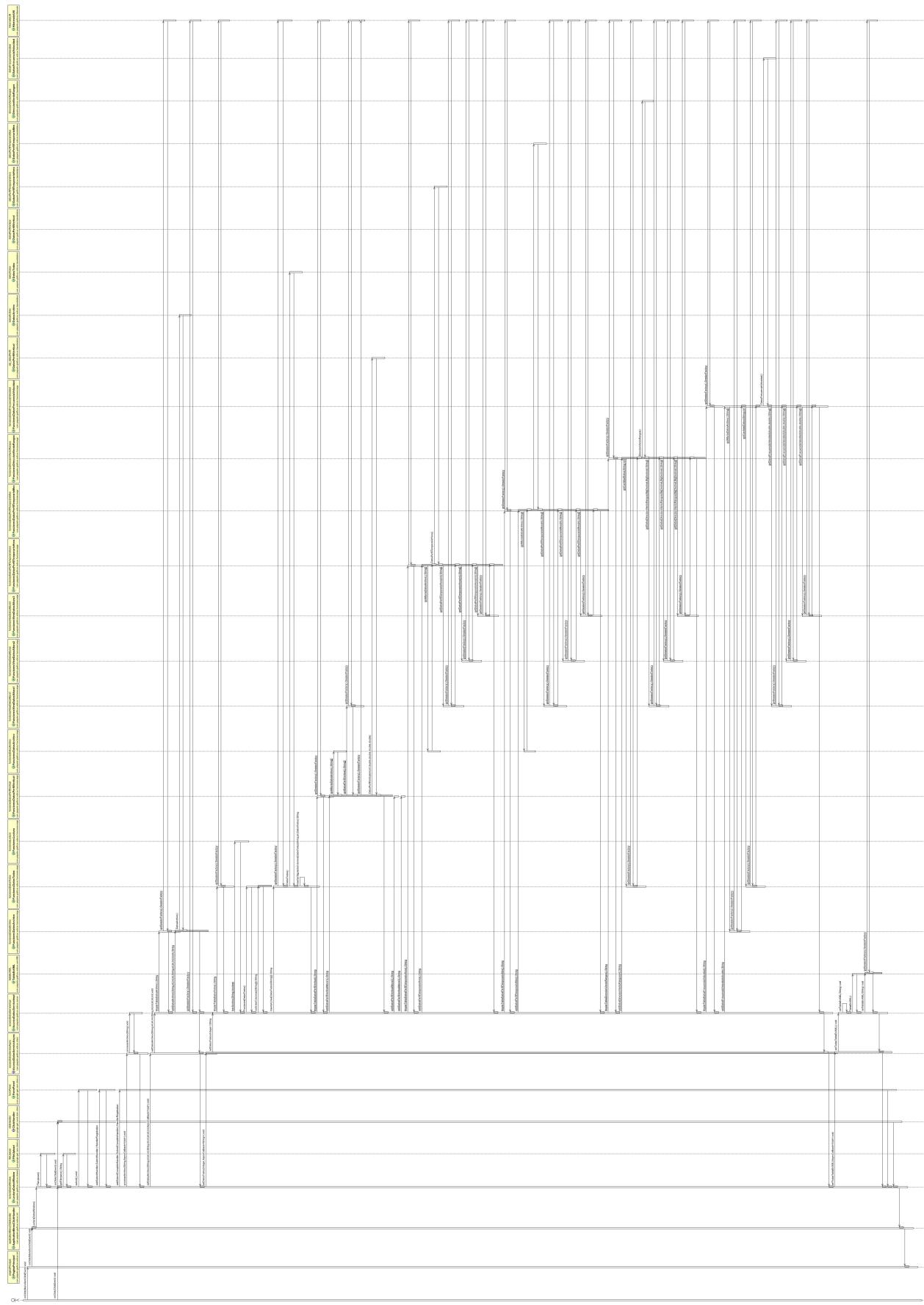


Figura A.8: Diagrama de Secuencias para la Lectura del Archivo Fuente

En el diagrama A.9 se muestra la solicitud de una tabla, el cual recupera los datos desde un archivo XML (previamente generado) para rellenarla.

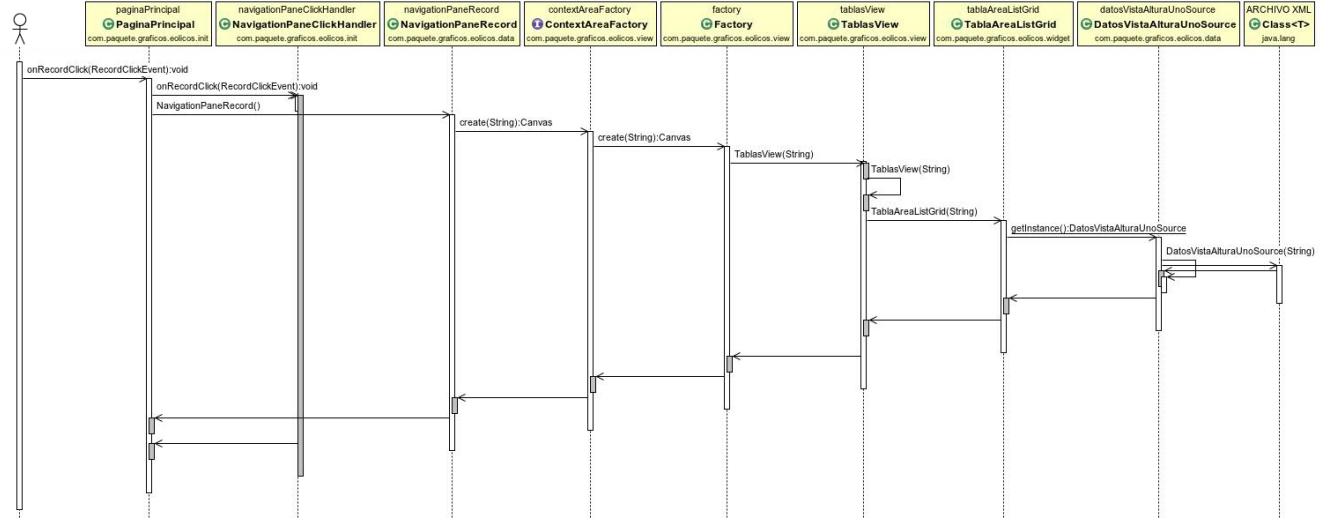


Figura A.9: Diagrama de Secuencias para la Solicitud de Tablas de la Base de Datos

En el diagrama A.10 se muestra la solicitud de un gráfico, el cual realiza una llamada HTML al proyecto secundario pasando como parámetro el nombre del gráfico.

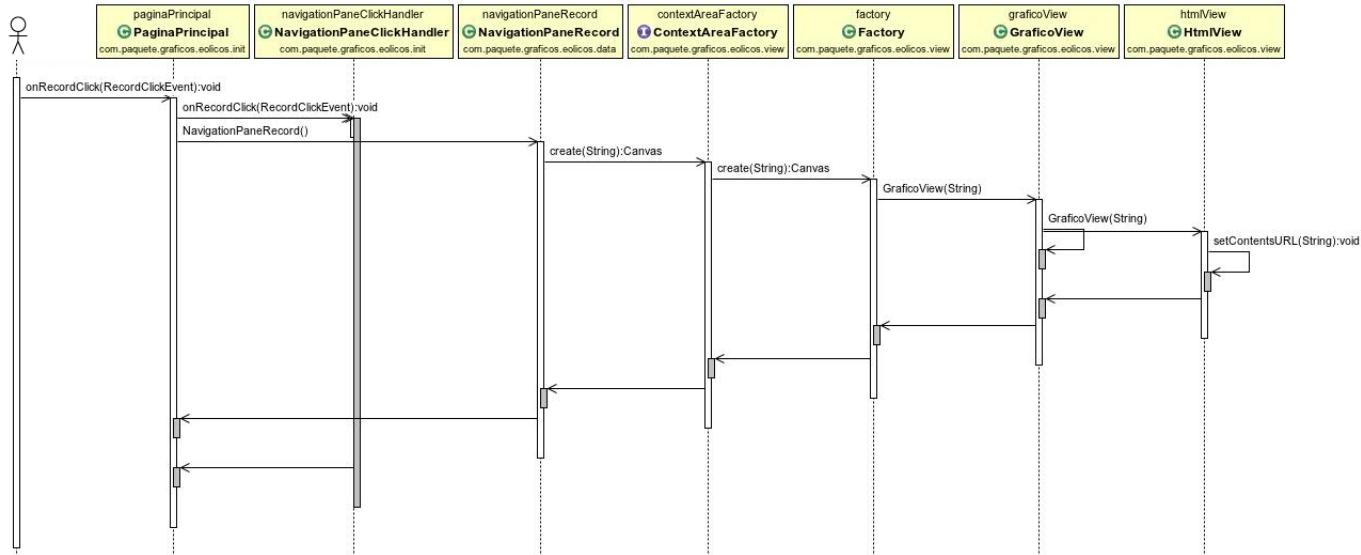


Figura A.10: Diagrama de Secuencias para la Solicitud de Gráficos

## Diagramas de Secuencias UML del Proyecto Secundario

A continuación se muestra un diagrama de secuencia del proyecto secundario. El diagrama A.11 muestra la solicitud del gráfico de la Rosa de los Vientos en el proyecto secundario.

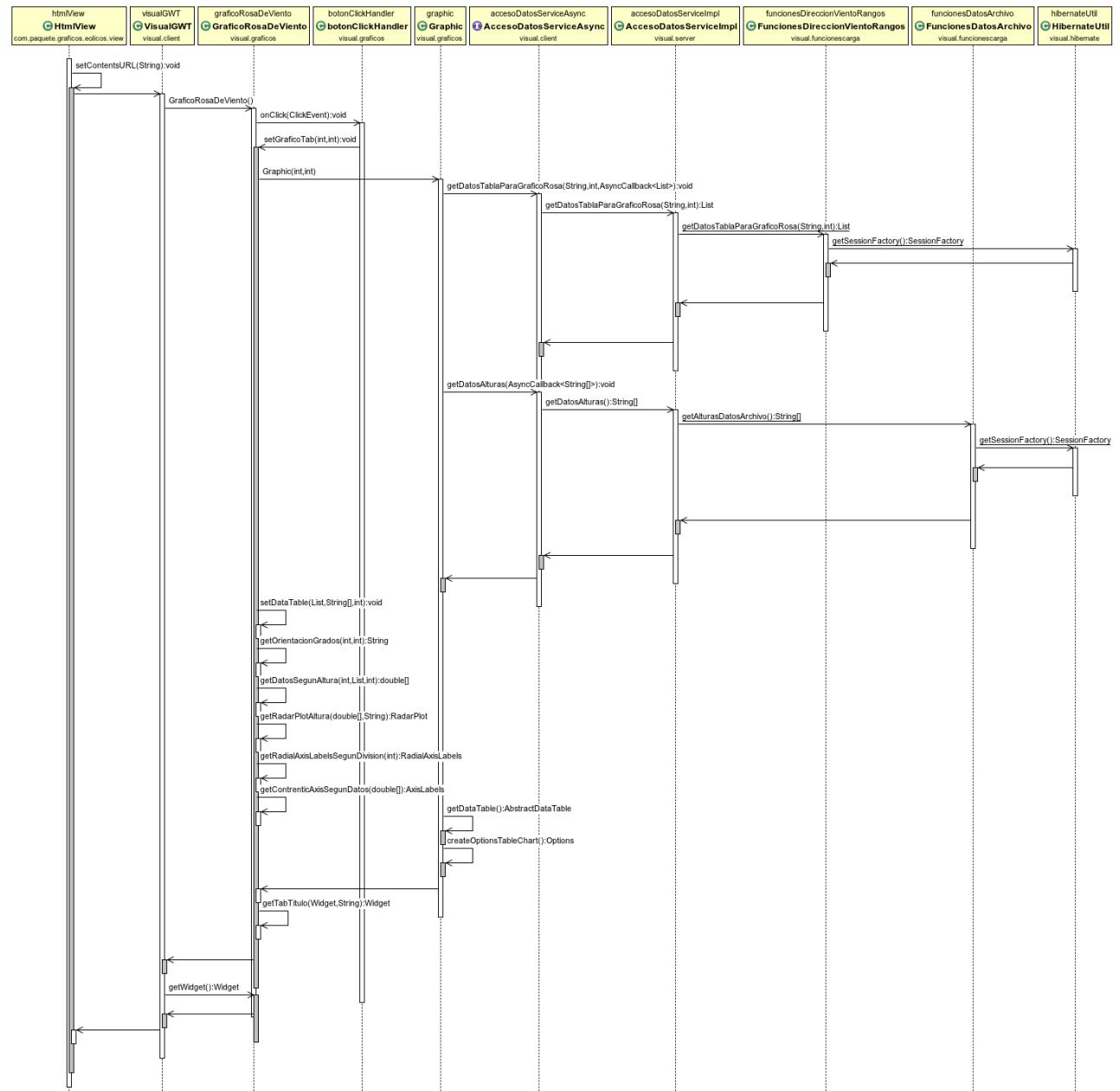


Figura A.11: Diagrama de Secuencias para la Solicitud del Gráfico de Rosa de los Vientos



# Apéndice B

## Relevamiento de Datos

### B.1. Datos Relevados

#### Datos Suministrados y Utilizados para Validación

A continuación se muestra una tabla con una porción de los datos que fueron suministrados como caso de estudio. Por la magnitud ha sido dividida en dos tablas B.1 y B.2. Dicha tabla cuenta con datos de dos alturas, donde las primeras siete columnas son datos comunes a ambas alturas. De la columna 8 a la columna 17 son datos correspondientes a la Altura 1, y los restantes son datos de la Altura 2.

Tabla B.1: Datos de Caso de Estudio - Primeras trece Columnas

Fecha	Hora	Temp prom (°C)	Humedad (%)	Presión (hPa)	Temp max (°C)	Temp min (°C)	Vel prom alt1 (m/s)	Dir prom alt1 (°)	Temp prom alt1 (°C)	Desvío alt1 (m/s)	Vel max alt1 (m/s)	Dir max alt1 (°)
14/05/08	15:12:12	19,7	44	976	19,9	19,4	1,5	277	22,7	1,2	3,9	277
14/05/08	15:22:12	19,9	44	975	19,9	19,8	1,5	276	22,5	1,2	4	293
14/05/08	15:32:12	20	41	975	20,1	19,9	1,9	266	22,8	1	4,5	253
14/05/08	15:42:12	20	41	975	20,1	19,9	0,7	264	23,4	0,9	3,2	278
14/05/08	15:52:12	20	40	975	20	19,9	0,4	233	22,9	0,8	2,9	236
14/05/08	16:02:12	20	40	975	20,1	19,9	0,5	260	22,9	0,8	2,5	253
14/05/08	16:12:12	20	41	975	20	19,9	0,3	284	23,3	0,7	2,2	284
14/05/08	16:22:12	20,1	42	975	20,2	20	0,8	292	24,4	1,2	5,3	258
14/05/08	16:32:12	20,2	41	975	20,3	20,2	1	293	25,6	1,2	5,4	288

Tabla B.2: Datos de Caso de Estudio - Últimas catorce Columnas

Temp max alt1 (°C)	Vel min alt1 (m/s)	Dir min alt1 (°)	Temp min alt1 (°C)	Vel prom alt2 (m/s)	Dir prom alt2 (°)	Temp prom alt2 (°C)	Desvío alt2 (m/s)	Vel max alt2 (m/s)	Dir max alt2 (°)	Temp max alt2 (°C)	Vel min alt2 (m/s)	Dir min alt2 (°)	Temp min alt2 (°C)
22,9	0	251	22,4	2,1	280	22,3	1	4,2	267	22,5	0	230	22
22,6	0	279	22,4	2	279	22	1,1	4,2	280	22,2	0	319	21,9
23,3	0	233	22,5	2,3	268	22,4	0,8	4,3	255	22,8	0	259	21,9
23,6	0	295	23,1	1,1	264	22,8	1	3,5	264	23,2	0	286	22,5
23,3	0	239	22,6	0,7	233	22,5	0,9	3	233	22,8	0	261	22,1
23,1	0	231	22,6	1	262	22,6	0,9	2,7	252	22,9	0	226	22,1
24,1	0	285	22,9	0,6	285	23,1	0,8	2,5	292	23,9	0	272	22,8
24,8	0	275	24,1	2	299	24,1	1,1	4,9	283	24,5	0	305	23,9
26,1	0	258	24,8	1,8	298	25,2	1,1	5,2	280	25,6	0	255	24,5