

**ESTUDIO DE AEROGENERADORES DE BAJA VELOCIDAD PARA SU
IMPLEMENTACIÓN EN EL VALLE DE ABURRÁ**

ALEJANDRO AGUDELO URIBE

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

MEDELLIN

2013

**ESTUDIO DE AEROGENERADORES DE BAJA VELOCIDAD PARA SU
IMPLEMENTACIÓN EN EL VALLE DE ABURRÁ**

ALEJANDRO AGUDELO URIBE

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

CESAR NIETO LONDOÑO

Ph.D en ingeniería

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

MEDELLIN

2013

Nota de aceptación

Firma

Nombre

Presidente del jurado

Firma

Nombre:

Jurado

Firma

Nombre:

Jurado

Medellin, 9 de mayo de 2013

DEDICATORIA

A Dios, mi familia y amigos...

AGRADECIMIENTOS

El Autor expresa sus agradecimientos a:

La ingeniera Liliana Maria Agudelo Gómez, por su decidido apoyo desde el inicio del trabajo.

Al ingeniero Cesar Nieto Londoño, por su constante orientación, dedicación y paciencia durante en desarrollo de este proyecto.

A la ingeniera Beatriz Janeth Galeano, por su colaboración.

Al Laboratorio de Calidad del Aire – CALAIRE, de la Universidad Nacional de Colombia por suministrarme tan valiosa información

CONTENIDO

INTRODUCCION	14
1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	16
1.1 ROSA DE LOS VIENTOS.....	16
1.3 DEFINICIONES DEL VIENTO.....	18
1.4 EL CLIMA Y LOS VIENTOS EN COLOMBIA	22
1.5 LOS VIENTOS EN COLOMBIA.....	22
1.6 EFECTOS AMBIENTALES DE LA ENERGÍA EÓLICA (IMPACTOS ECOLÓGICOS).....	23
1.6 SOMBRA PROYECTADA	26
1.7 LOS VIENTO EN EL VALLE DE ABURRA.....	27
2 TIPO DE AEROGENERADORES UTILIZADOS EN ZONAS URBANAS	30
2.2 BORNAY	31
2.5 KESTREL.....	32
2.6 AEOLOS.....	33
3 INFORMACIÓN SOBRE EL RECURSO EÓLICO EN EL VALLE DE ABURRA 34	
3.1 ESTACION METEOROLOGICA DE GIRARDOTA	34
3.2 ESTACION METEOROLOGICA DEL MUSEO DE ANTIOQUIA EN MEDELLIN	36

3.3	ESTACION METEOROLOGICA DEL POLI-JIC EN MEDELLIN	38
3.4	ESTACION METEOROLOGICA DE SABANETA.....	40
4	MODELOS DE CÁLCULO PARA ESTIMAR EL RECURSO EOLICO.....	42
4.1	SELECCIÓN DE LOS AEROGENERADORES	42
4.2	CALCULO DE LA POTENCIA GENERADA AL AÑO.....	44
5	COSTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE AEROGENERADORES	50
6	CONCLUSIONES	52
7	BIBLIOGRAFIA.....	54
	Anexo 1.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Veleta	Figura 2. Anemómetro	16
Figura 3 .Rosa de los vientos para Medellin.....		17
Figura 4. Distribución de Weibull.....		18
Figura 5. Fuerza de Coriolis		19
Figura 6.Vientos locales		20
Figura 7. Temperaturas, brillo solar y humedad relativa		21
Figura 8. Velocidad del viento en Girardota 2010		35
Figura 9. Histograma de frecuencias de velocidad de los vientos en Girardota 2010		35
Figura 10. GIR-IECO rosa de los vientos		36
Figura 11. Velocidad del viento en el Museo de Antioquia 2012.....		37
Figura 12. Histograma de frecuencias de velocidad de los vientos en el Museo de Antioquia		37
Figura 13. MuseoAnt Rosa de los vientos.....		38
Figura 14. Velocidad del viento en el Poli-JIC.....		38
Figura 15. Histograma de frecuencias de velocidad de los vientos en el poli-JIC .		39
Figura 16, POL-JIC Rosa de los vientos		39
Figura 17. Velocidad del viento en Sabaneta 2011		40
Figura 18. Histograma de frecuencias de velocidad de los vientos en Sabaneta..		40
Figura 19. Sabaneta 2011. Rosa de los vientos.....		41

Figura 20. Windspot 1.5	Figura 21. Enair 30.....	43
Figura 22. Aeolos-V 1kW.....		43
Figura 23. Eddy Gt de UGE		43
Figura 24. Curva de potencia del Bee 800 de Bornay.....		56
Figura 25. Curva de potencia del Bornay 600		56
Figura 26. Curva de potencia del Bornay 1500		57
Figura 27. Curva de potencia del Bornay 3000		57
Figura 28, Curva de potencia del Bornay 6000		58
Figura 29. Curva de potencia del Eddy de Urban Green Energy		58
Figura 30. Curva de potencia del Eddy gt de Urban Green Energy		59
Figura 31. Curva de potencia del Uge 4K de Urban Green Energy.....		59
Figura 32. Curva de potencia del Uge 9m de Urban Green Energy		60
Figura 33. Curva de potencia del Enair 30		60
Figura 34. Curva de potencia del Enair 70		61
Figura 35. Curva de potencia del Enair 160		61
Figura 36. Curva de potencia del Kestrel e230		62
Figura 37. Curva de potencia del Kestrel e300		62
Figura 38. Curva de potencia del Windspot 1.5.....		63
Figura 39. Curva de potencia del Windspot 3.5.....		63
Figura 40. Curva de potencia del Windspot 7.5.....		64

Figura 41. Curva de potencia del Aeolos-V 300W.....	64
Figura 42. Curva de potencia del Aeolos-V 600W.....	65
Figura 43. Curva de potencia del Aeolos-V 1kW.....	65
Figura 44. Curva de potencia del Aeolos-V 2kW.....	66
Figura 45. Curva de potencia del Aeolos-V 3kW.....	66
Figura 46. Curva de potencia del Aeolos-V 5kW.....	67
Figura 47. Curva de potencia del Aeolos-V 10kW.....	67
Figura 48. Curva de potencia del Aeolos-H 5Kw.....	68
Figura 49. bornay 1500 Vs windspot 1.5 Vs Enair 30.....	68
Figura 50. Bornay 3000 Vs Windspot 3.5.....	69
Figura 51. Kestrel e230 Vs Bee 800.....	69
Figura 52. Bornay Vs eddyVs kestrel 160.....	70
Figura 53. Aeolos-V 1kW Vs Eddy Gt.....	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de ruidos comparativos.....	24
Tabla 2. Causas de muertes de aves en EE.UU.....	26
Tabla 3. Aerogeneradores ofrecidos por la empresa Enair	30
Tabla 4. Aerogeneradores ofrecidos por la empresa Bornay, velocidad de arranque 3.5 m/s	31
Tabla 5. Aerogeneradores ofrecidos por la empresa Windspot, velocidad de arranque 3 m/s	31
Tabla 6 Aerogeneradores ofrecidos por Urban green Energy	32
Tabla 7 Aerogeneradores ofrecidos por Kestrel	32
Tabla 8 Aerogeneradores ofrecidos por Aeolos	33
Tabla 9. Estaciones meteorológicas en el valle de aburra	34
Tabla 10.Girardota con Windspot 1.5.....	45
Tabla 11. Girardota con Enair 30	45
Tabla 12. Museo de Antioquia con Windspot 1.5	46
Tabla 13. Museo de Antioquia con Enair 30.....	46
Tabla 14. Poli-JIC con Windspot 1.5	47
Tabla 15. Poli-JIC con Aeolos-V 1kW	47
Tabla 16. Sabaneta con Eddy Gt	48

Tabla 17. Sabaneta con Aeolo-V 1kW	48
Tabla 18. Resumen de datos sobre energía generada	49
Tabla 19. Costo de producción de energía con Aerogeneradores	50

RESUMEN

Debido al inminente agotamiento de los recursos fósiles como el petróleo y el gas, se han tenido en cuenta fuentes alternas de producción de energía limpia como la eólica. La obtención de energía a partir del viento surge como una de las mejores opciones para tratar de reemplazarlos, debido al daño ecológico que se causa a los ecosistemas por la explotación indiscriminada de dichos recursos, entonces, la energía eólica surge como posible solución. Si bien estas tecnologías se han desarrollado en el resto del mundo, a nivel nacional es poco lo que se ha avanzado en este tema. El trabajo se centra en el estudio de aerogeneradores de baja velocidad para su posible implementación en ambientes urbanos, más específicamente en el Valle de Aburrá. Se comienza con una descripción de los fenómenos climáticos por los cuales se generan las distintas clases de viento, cómo son los vientos en Colombia y cómo se originan según las condiciones particulares de la geografía y más concretamente se habla del comportamiento de los vientos en el Valle de Aburrá. Luego se ilustran los tipos de aerogeneradores utilizados en zonas urbanas y cuáles son los que comercialmente son ofrecidos por algunas de las empresas más importantes del mundo. En esta parte del trabajo se recolectan los datos de los aerogeneradores que más adelante nos servirán para la selección del más apropiado de acuerdo con las condiciones específicas. A continuación se muestran los datos obtenidos de cuatro estaciones meteorológicas del Valle de Aburrá para poder saber qué clase y en qué dirección soplan los vientos locales. Más adelante se seleccionaron los aerogeneradores más adecuados según el recurso eólico disponible y con la curvas de potencia de las turbinas, se procedió al cálculo de la posible producción de energía al año según los datos que se tienen, y se saca un costo de cuánto valdría producir energía de acuerdo con la inversión que tendría que hacerse.

PALABRAS CLAVE: VIENTO, AEROGENERADOR, ESTACIÓN METEOROLÓGICA, AMBIENTES URBANOS.

INTRODUCCION

Si bien la escasez de los recursos no renovables, tales como el petróleo, es una realidad, esta no es tan preocupante como lo era hace unos años, debido a que los países industrializados se han venido preparando para una transición a energías amigables con el medio ambiente. Colombia es un país privilegiado ya que cuenta con gran potencial hídrico, y gracias a su geografía la mayor parte de la producción de energía, especialmente en Antioquia, se hace a través de hidroeléctricas. Es necesario decir que los grandes embalses requieren de la inundación de inmensas extensiones de tierra con el daño ecológico que esto conlleva, además de la gran inversión inicial por lo cual el Estado casi siempre participa en su ejecución.

Asimismo, dada la crisis energética en el país causada por el fenómeno del niño hace unos años, el país ha aumentado esfuerzos para la inclusión de generación térmica, la cual no depende de los niveles de lluvia pero sí de los precios internacionales de los combustibles fósiles. La energía eólica surge como una gran opción de producción de energía limpia que podría coadyuvar a dejar de lado nuestra dependencia de los recursos no renovables. A nivel mundial esta tecnología ha avanzado en gran medida, pero en Colombia sólo se han efectuado algunos pequeños avances con la implementación del parque eólico en la Guajira, que constituye una región privilegiada, junto con los Llanos Orientales, en donde las velocidades de los viento son relativamente altas, en contraposición con el resto del país que no cuenta con tales ventajas, por lo que cobran importancia las investigaciones que se realizan alrededor del aprovechamiento de los recursos eólicos de baja velocidad.

La posible implementación de aerogeneradores de baja velocidad en Colombia tendría gran relevancia ya que esta tecnología brinda muchas ventajas respecto a los grandes aerogeneradores y el sistema nacional interconectado, ya que estos

generadores no requieren de altas velocidades para su funcionamiento, y debido a que la energía se produce en el mismo sitio en donde se consumiría no requeriría gran cantidad de cableado para llevarlo hasta el sitio de consumo, lo cual evita las pérdidas por transmisión, sin mencionar que podría aplicarse en lugares donde no llega el sistema interconectado nacional.

Las grandes ciudades y concretamente el Valle de Aburrá, generan consumos gigantescos de energía que se ve reflejada en la quema de combustibles, y demanda de electricidad, entre muchas otras, que implican una gran contaminación de los ecosistemas, por lo cual el desarrollo e implementación de la tecnología para el aprovechamiento del recurso eólico en esta zona del país, es de gran importancia ya que contribuirá en gran medida a que disminuyera el impacto ambiental.

Inicialmente se desea estudiar con datos de cuatro de las estaciones meteorológicas del Valle de Aburrá, la posible implementación de varios tipos de aerogeneradores para finalmente seleccionar la mejor opción respecto a lo más rentable y eficiente.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.1 ROSA DE LOS VIENTOS

El viento es un fenómeno climático que se da por la translación y rotación de la tierra, en donde la radiación solar produce diferentes temperaturas en la atmósfera que generan diferencias de presión lo que hace que el aire fluya. Los primeros instrumentos para medir la dirección del viento fueron las veletas las cuales giraban según la dirección en que soplabla éste. Las veletas como se puede observar en la figura 1 contaban con una placa giratoria, un señalador y una cruz fija que indicaba los cuatro puntos cardinales; más adelante se creó el anemómetro, instrumento meteorológico más sofisticado el cual tiene múltiples aplicaciones como la navegación, entre otras. Algunos de los anemómetros actuales lucen como el de la figura 2.

El viento está compuesto por dos variables: la dirección y la velocidad por lo que los climatólogos crearon una forma de visualizar ambas características, a esta herramienta la llamaron la Rosa de los vientos.

Figura 1. Veleta



Fuente:<http://www.arteyfotografia.com.ar>
25 de enero de 2013

Figura 2. Anemómetro

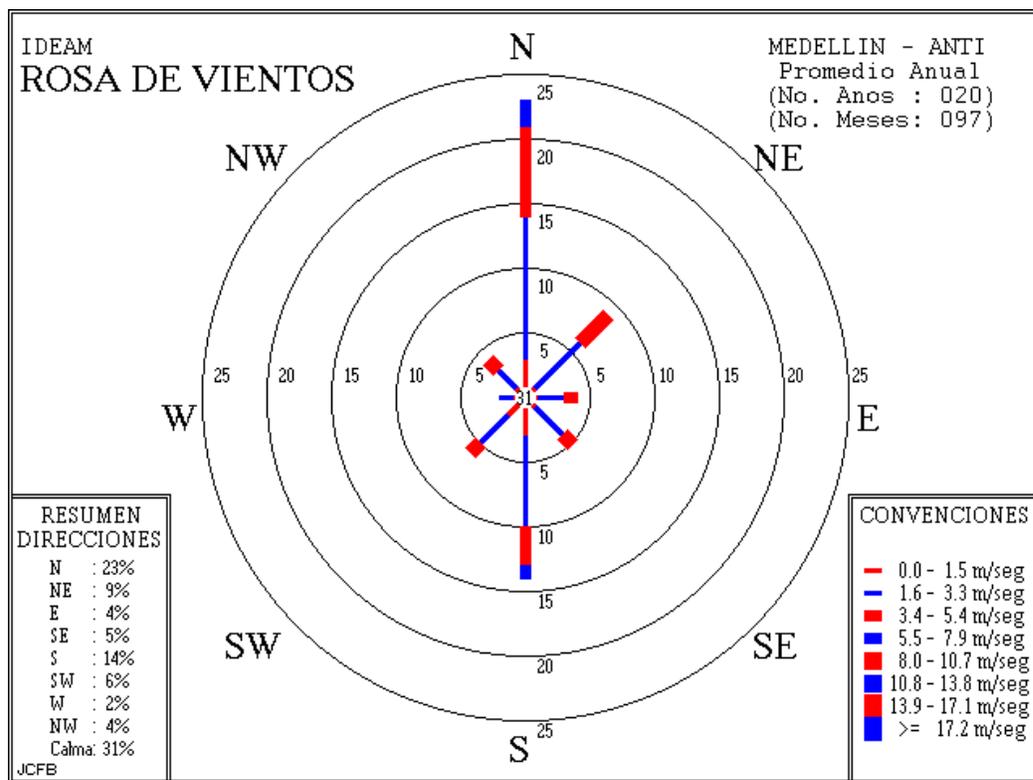


Fuente:<http://www.mimeteo.com>
25 de enero de 2013

La rosa de los vientos toma al viento como un vector en donde la escala más comúnmente utilizada es la Beaufort, que permite apreciar tres características importantes: el porcentaje de viento en calma, periodo y lugar donde se hizo la medición y un esquema de colores para caracterizar las velocidades del mismo.

La rosa de los vientos representa gráficamente la dirección dominante en un área determinada, en la figura 3 se puede observar la rosa de los vientos para Medellín [1]

Figura 3 .Rosa de los vientos para Medellín



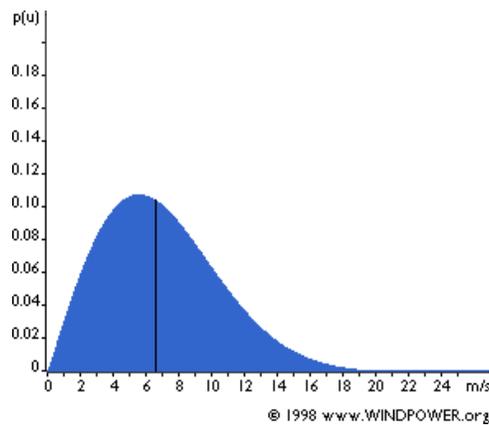
Fuente: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/rosas/viento.htm>, 25 de enero de 2013

1.2 Distribución de Weibull

Es una distribución de probabilidad continua, utilizada en diferentes ámbitos de la ciencia entre ellos la eólica; las velocidades del viento en casi cualquier parte del mundo pueden ser descritas y modeladas por el análisis de Weibull. Con esta herramienta estadística se puede saber con qué frecuencia los vientos de

velocidades distintas se presentaran en un lugar determinado con cierto promedio o media, lo que puede facilitar la escogencia de una posible turbina eólica con el punto de corte óptimo en velocidad. Entiéndase por punto de corte la velocidad del viento en donde el aerogenerador comienza a producir energía utilizable. Y la velocidad de corte es la velocidad a la que la turbina llega al límite de su alternador donde ya no se puede producir mayor potencia con el aumento de la velocidad del viento, la figura 4 se muestra una distribución de Weibull donde la velocidad promedio está entre 6 y 7m/s [2].

Figura 4. Distribución de Weibull



Fuente:www.windpower.org, 30 enero 2013

1.3 DEFINICIONES DEL VIENTO

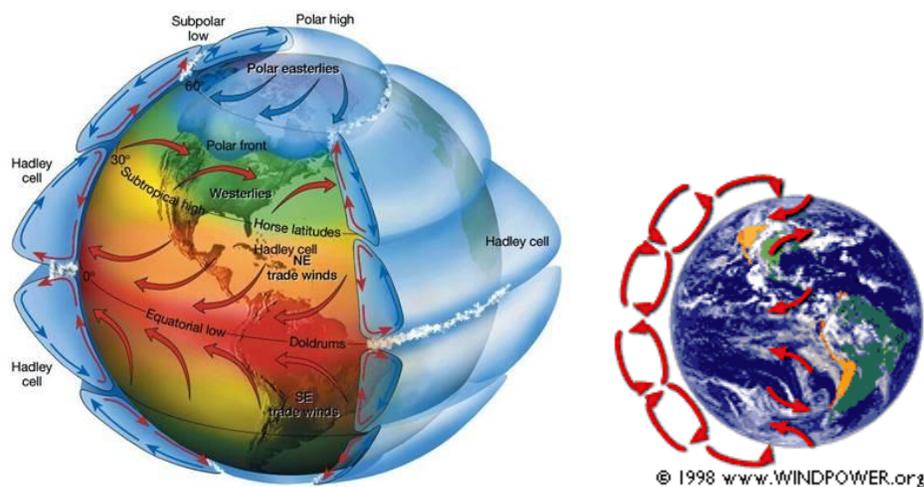
Orígenes de los vientos:

El viento, más comúnmente conocido como el aire en movimiento, tiene diversos factores que lo afectan: el más importante de todos es la radiación solar, ésta en última instancia influye en todas las energías renovables exceptuando la energía mareomotriz y la geotermia; el calentamiento desigual de la tierra y variaciones de presión en distintas zonas hace que fluya el aire. Las zonas de la tierra cercana al ecuador por recibir de forma más directa los rayos del sol se calientan más que las

otras zonas del globo, haciendo que el aire caliente que es más ligero que el aire frío suba a mas de 10 km de altura y se extienda hacia el norte y el sur.

También influyen la fuerza de Coriolis, llamada así por el matemático e ingeniero francés Gustave Gaspard Coriolis (1792-1843), la cual describe que debido a la rotación del globo cualquier movimiento que se realice en el hemisferio norte de la tierra será desviado en el sentido de las manecillas del reloj mira desde la posición actual en el suelo y en el hemisferio sur en contra de las manecillas del reloj. Al calentarse el viento en las zonas del ecuador éste subirá hacia las partes más altas de la atmósfera, viajará en sentido norte y sur creando zonas de baja presión atrayendo los vientos fríos de los polos. Al llegar los viento cálidos del ecuador a una latitud aproximada de 30 grados la fuerza de Coriolis evitará que sigan avanzando y descenderán creando zonas de la alta presión haciendo que el viento fluya, repitiéndose el ciclo nuevamente como se muestra en la figura 5. El espesor de la atmósfera es de aproximadamente 10 km y es en la tropósfera donde ocurren los efectos climáticos incluyendo el efecto invernadero.

Figura 5. Fuerza de Coriolis



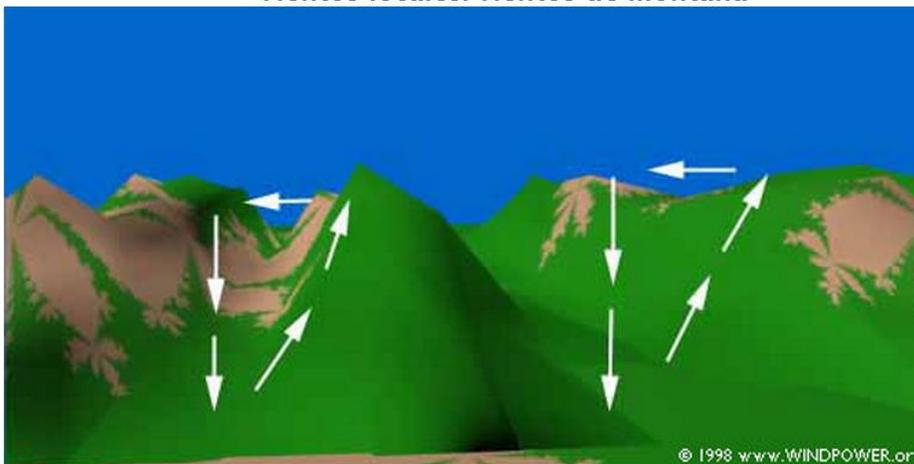
Fuente: www.creacinseisdas.blogspot.com, 30 enero 2013

Las variaciones de los vientos se pueden dar también en zonas cercanas al mar. Esto ocurre por un efecto llamado brisas marinas, el cual consiste en la generación de unas corrientes debido a que la tierra se calienta y enfría más rápidamente que el mar, por lo que en el día el aire que se encuentra cerca de la tierra tiende a calentarse más rápidamente que el que se encuentra cerca al mar, y por tanto el aire caliente comienza a subir dejando un vacío a nivel del suelo y atrayendo el aire frío del mar. Luego, llega un momento en que las temperaturas del suelo y del mar se igualan y reina la calma, mas tarde el efecto se invierte, pero la brisa es menos intensa ya que las diferencias de temperatura no son tan grandes, la tierra comienza a enfriarse más rápidamente que el mar lo que hace que los vientos circulen en sentido contrario, por eso se dice que el mar es un termorregulador por naturaleza y cambia de temperatura más lentamente que la tierra.

En las montañas y los valles sucede un fenómeno similar al que ocasiona la brisa marina, por el calentamiento desigual de la tierra ya que dependiendo de la hora del día habrá expuestas al sol diferentes superficies de tierra creando deltas de temperaturas y por lo tanto de presiones, haciendo que fluya el viento como lo ilustra la figura 6.[3]

Figura 6.Vientos locales

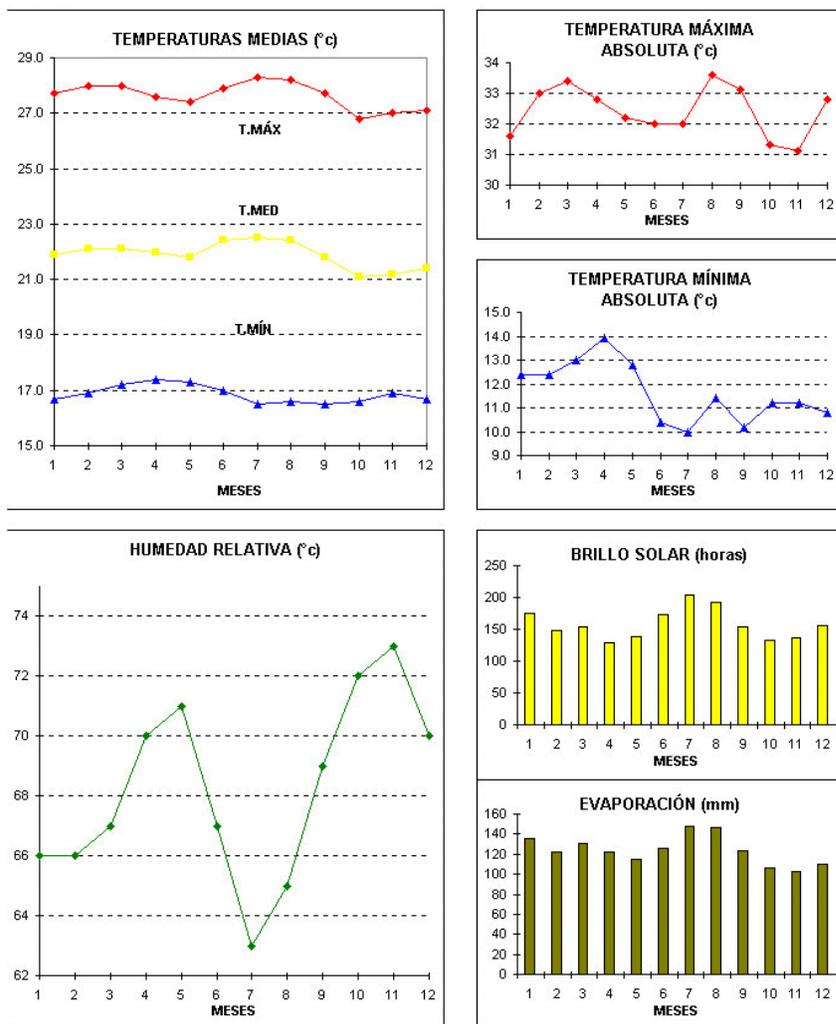
Vientos locales: vientos de montaña



Fuente: windpower.org 30 enero 2013

A continuación en la figura 7 se puede observar algunas de las variables climáticas del valle de aburra producidas directamente por el sol o que están influenciadas en gran medida.

Figura 7. Temperaturas, brillo solar y humedad relativa



Fuente: www.bart.ideam.gov.co, 30 enero 2013

1.4 EL CLIMA Y LOS VIENTOS EN COLOMBIA

La temperatura en Colombia está directamente influenciada por los factores que la afectan como la altitud, la ubicación geográfica y las diferentes corrientes de vientos que penetran el territorio, por lo que se pueden encontrar todo tipo de temperaturas y pisos térmicos, la mayor parte del territorio excede los 24° C más específicamente las regiones Caribe, Pacífica, Orinoquía y Amazonía las cuales representan un 80 % del territorio.

La humedad atmosférica en Colombia está estrechamente ligada a la altitud y la temperatura del aire. El aire a mayor temperatura es capaz de absorber más humedad y viceversa, el aire frío es capaz de absorber menor cantidad de humedad. Por lo tanto, a mayor temperatura mayor humedad. Aunque toda regla tiene su excepción, este es el caso de la alta Guajira en donde la temperatura es muy alta y la humedad muy baja debido a la geografía tan árida del lugar. Las zonas más húmedas del país en su orden son: la Costa Pacífica, la Selva Amazónica, el Pie de Monte Llanero, las Márgenes de Orinoco y el Magdalena Medio.

1.5 LOS VIENTOS EN COLOMBIA

El régimen de los vientos en Colombia es algo particular ya que en gran parte están influenciados por los fenómenos ambientales mundiales, con mayor predominancia en las partes planas del territorio. Debido a que la ubicación geográfica de Colombia, está sometida a la influencia de los vientos alisios que soplan desde el sureste del hemisferio sur y los vientos de noreste del hemisferio norte. Cabe decir, que en el país estos vientos no siempre tienen las direcciones descritas debido a la acción de la fuerza de Coriolis ya que al estar tan cerca

del ecuador no cobra mayor importancia, pero sí la tiene la orografía del país haciendo que los fenómenos climáticos locales dependan en gran parte por las condiciones del terreno. En primer lugar, por rozamiento con las diferentes irregularidades del terreno que en Colombia están dadas principalmente por las tres ramificaciones de los andes que se extienden a la largo del país; además, el hecho de que el país se encuentre bañado por los océanos Atlántico y Pacífico hacen que las condiciones de viento sean únicas y cambien durante todo el año de un lugar a otro.

La variedad del comportamiento de los fenómenos climáticos puede ser explicada en gran medida por el movimiento de la zona de convergencia intertropical ZCIT durante las distintas épocas del año. Esta zona está definida como un cinturón de baja presión donde se encuentran los vientos alisios del hemisferio norte y sur. Los desplazamientos del viento se hacen más lentos cuando se encuentran cerca de la ZCIT y más rápidos mientras más lejos se encuentren de ella, de esta manera se puede explicar que cuando la ZCIT se encuentra en el extremo norte del país entre julio y agosto los vientos en esta zona son relativamente calmados y que en el sur del país tengan mayor velocidad y viceversa. [4]

1.6 EFECTOS AMBIENTALES DE LA ENERGÍA EÓLICA (IMPACTOS ECOLÓGICOS)

Los efectos ambientales de la construcción y operación de turbinas eólicas están relacionados con que dichas construcciones se hacen en espacios abiertos en donde el ambiente se ve afectado en el aspecto visual, el ruido y los efectos potenciales en la fauna y la flora del lugar.

Los efectos ambientales en el impacto visual están relacionados con que los aerogeneradores en su gran mayoría son de gran tamaño por lo que ocupan un espacio considerable y normalmente están emplazados en espacios abiertos por

lo que se pueden apreciar desde grandes distancias lo que algunas personas les preocupa ya que dicen que se está modificando el paisaje con el emplazamiento de estas turbinas. Dichas modificaciones el hombre las viene haciendo desde hace muchísimo tiempo y con consecuencias mucho más perjudiciales para el medio ambiente como se puede apreciar en la explotación minera, la tala de árboles, la explotación petrolífera y de gas, entre muchas otras; de lo que puedan llegar a ser los aerogeneradores. Otras personas sin embargo, manifiestan que los aerogeneradores son el símbolo de la producción de energía limpia con cero emisiones por lo que apoyan la instalación de parques eólicos.

El ruido generado por los aerogeneradores puede dividirse en dos tipos: el ruido mecánico el cual es producido por los elementos propios del aerogenerador como son el mecanismo de orientación de la góndola, el multiplicador y el generador como tal. El otro tipo de ruido es el aerodinámico el cual es generado por las palas del rotor. El ruido que producen estos elementos exceptuando el del mecanismo de orientación solo está presente cuando el aerogenerador está en funcionamiento. Cabe anotar que el sonido producido es comparativamente más bajo que el que se produce en las actividades propias de una ciudad como el tráfico por una autopista y los ruidos propios de la construcción, entre muchos otros como se puede notar en la tabla 1 descrita a continuación:

Tabla 1. Niveles de ruidos comparativos

Niveles de ruidos comparativos entre diferentes fuentes	
Fuente/actividad	Nivel de ruido indicativo dB(A)
Umbral de molestia	140
Avión Jet a 250 mts.	105
Taladro neumático a 7 mts.	95
Camión a 48 km/h a 100 mts	65
Oficina trabajando	60
Automóvil a 64 km/h 100 mts	55
Turbina Eólica a 350 mts	35-45
Dormitorio tranquilo	45
Fondo rural en la noche	20-40

Fuente: "Wind power in the UK", Sustainable Development Commission 2005

Sin embargo, gracias al desarrollo actual de la industria de los aerogeneradores se puede decir que se han logrado enormes avances en la construcción de estos y se han mejorado muchísimo la insonorización y los aislamientos logrando que los sean mucho más silenciosos que sus predecesores.

El nivel de ruido en las turbinas eólicas modernas para aplicaciones urbanas por ejemplo está entre 52 y 55 decibeles, lo que quiere decir que no supera el ruido que hace un refrigerador y que la única forma de poder percibir dicho ruido habría que concentrarse en distinguirlo de los demás ruidos del ambiente urbano.[5]

Las medidas ambientales que en la actualidad se toman con respecto al ruido consisten en que la autoridades ambientales realizan estudios que ruido existente en el lugar antes del emplazamiento de un aerogenerador, para así poder ubicar dicha tecnología lo suficientemente lejos de manera que no genere molestias indeseadas

Las aves pueden llegar a ser afectadas por el emplazamiento de un parque eólico ya que se verían afectados los lugares donde se crían y alimentan las distintas especies de aves del lugar, pero está científicamente comprobado que las aves que habitualmente viven en el lugar donde hay un aerogenerador se acostumbran a su presencia y evitan colisionar con sus aspas. El inconveniente se presenta cuando existen este tipo de emplazamientos justo en la ruta de migración de las aves, para lo cual las autoridades ambientales convinieron detener los aerogeneradores en los momentos más críticos de la migración de aves. Además, la mayoría de las muertes de aves se registraron con los aerogeneradores de las anteriores generaciones que giran a más altas revoluciones que los actuales. Pero con la actual tecnología, la velocidad de giro es mucho menor por lo que lo que se generan muchos menos colisiones con la aves.[6]

La población de aves en entornos urbanos es comparativamente menor que la se puede encontrar en ambientes rurales y el tipo de aves que se encuentran en las ciudades en su mayoría no son aves que estén en peligro de extinción, sin

embargo, el área barrida por un aerogenerador urbano es muchísima menor que la que ocupa un aerogenerador convencional por lo que las probabilidades de colisión disminuyen en gran medida, además dependiendo del emplazamiento y del tipo de aerogeneradores, se pueden instalar cierto tipo de mayas protectoras para evitar el posible contacto con cualquier ave del lugar, en la tabla 2 se puede observar las diferentes causas de las muertes de aves en Estados Unidos

Tabla 2. Causas de muertes de aves en EE.UU.

Principales causas de las muertes de aves en los Estados Unidos	
Causas	Muertes estimadas al año
Líneas de transmisión y distribución	130-174 millones
Colision con vehículos en la ruta	60-80 millones
Colision con edificios	100-1000 millones
Torres de telecomunicaciones	40-50 millones
Pesticidas agrícolas	67 millones
Gatos	39 millones

Fuente: Asociación Americana de Energía Eólica

1.6 SOMBRA PROYECTADA

Los aerogeneradores como la mayoría de las estructuras altas producen sombras a su alrededor especialmente al principio y al final del día cuando el sol se encuentra en un ángulo bajo Este efecto es conocido como parpadeo de sombra y ocurre cuando las palas de la turbina eólica emiten una sombra sobre la ventana de alguna casa cercana, creando una interferencia entre la luz del sol y la ventana debido a la rotación de las palas provocando un parpadeo mientras estas están rotando, dicho efecto dura poco tiempo ya que para que se produzca deben ocurrir varias situaciones a la vez, tales como

- El sol brille y se encuentre en un ángulo bajo como en el amanecer el anochecer
- Que haya suficiente cantidad de viento para que las palas se estén moviendo

- Que la turbina este en entre el sol y la propiedad afectada

El efecto de parpadeo de sombra en la actualidad no se encuentra muy reglamentado, pero como regla general se tiene que para una propiedad que se encuentre a menos de 500 metros de la turbina, dicho efecto no debe sobrepasar las 30 horas al año ni 30 minutos por día. Para distancias superiores a 10 veces el diámetro del aerogenerador, la probabilidad de ocurrencia de este efecto es casi nula.

Este efecto se puede evitar en gran medida con una buena planeación del emplazamiento de la turbina, ya que en el mercado se pueden conseguir simuladores de sombra proyectada por un aerogenerador, a cual se le ingresan los datos del aerogenerador (tamaño, altura, tipo, etc), y la ubicación del emplazamiento en coordenadas y así podrá predecir en que lugares se producirá el efecto de parpadeo de sombra.

1.7 LOS VIENTO EN EL VALLE DE ABURRA

En Colombia la norma que regula la energía eólica es la NTC 2050 desarrollada por el comité N° 185 ENERGÍA EÓLICA. En dicho comité se encuentra normalizado el campo de la energía eólica y sus aplicaciones. También, cabe mencionar las normas y guías técnicas colombianas que hacen referencia a esta tecnología como son:

- GTC 113, Guía para la utilización de energía eólica para bombeo de agua.
- GTC 172, Guía para generación de energía eléctrica.
- GTC 139, Sistemas de aerogeneradores protección contra descargas eléctricas atmosféricas.
- NTC 5343, Aerogeneradores. Ensayo de curva de potencia.
- NTC 5363, Aerogeneradores. Requisitos de seguridad.
- NTC 5467, Aerogeneradores. Técnicas de medida de ruido acústico.

La mayoría de estas normas, se elaboraron basadas en referentes internacionales como ISO-IEC.

CRITERIO PARA LA MEDICIÓN DEL VIENTO: con el fin de que las mediciones hechas en diferentes estaciones meteorológicas puedan ser comparables, se ha convenido internacionalmente que el viento de superficie corresponde al medido a una altura normalizada de 10 m sobre el suelo en un terreno descubierto. Se entiende por este tipo de terreno aquel en el cual la distancia entre el instrumento de medida y cualquier obstáculo es mayor o igual a 10 veces la altura del obstáculo.

VELOCIDAD DEL VIENTO: La velocidad del viento determina el desplazamiento del aire en un tiempo determinado.

DIRECCIÓN DEL VIENTO: La dirección del viento se define como la orientación del vector del viento en la horizontal expresada en grados, contados a partir del norte geográfico, en el sentido de las manecillas del reloj. Para propósitos meteorológicos, la dirección del viento se define como la dirección desde la cual sopla el viento. Por ejemplo, un viento que sopla del oeste, esta a 270° a partir del norte; un viento del norte sopla desde una dirección de 360°

Para la elaboración del Atlas Eólico Nacional y los datos utilizados en este trabajo, las mediciones fueron tomadas cada hora y numeradas desde las 0 hasta las 23 horas. [7]

Los vientos en el valle de Aburrá son estudiados mediante diversas estaciones meteorológicas repartidas a lo largo y ancho su geografía y están provistos de diversos instrumentos de medición que arrojan datos de gran utilidad, en este caso gracias al Laboratorio de Calidad del Aire – CALAIRE, de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, quien ha operado los equipos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire propiedad del Área Metropolitana del Valle de Aburrá mediante los convenios 543 de 2008 y CA243 de 2012 y los contratos 471 de 2010 y 185 de 2011

Estos laboratorios, suministraron información de cuatro estaciones meteorológicas a lo largo del valle de aburra para el desarrollo de este proyecto de grado. Las estaciones se encontraban las siguientes posiciones a lo largo del valle de Aburrá: en un colegio en Girardota, en el museo de Antioquia en Medellín, en el politécnico Jaime Isaza Cadavid en Medellín y en la alcaldía de Sabaneta. En total se obtuvieron ocho archivos de datos que contienen la dirección en grados, la magnitud en m/s del viento tomados cada hora, de los cuales se tomó un archivo por cada estación los cuales se seleccionaron teniendo en cuenta que contuvieran la mayor cantidad de información.

2 TIPO DE AEROGENERADORES UTILIZADOS EN ZONAS URBANAS

La mini eólica está definida como la producción de energía limpia proveniente del viento con aerogeneradores que no superen los 100 kW ni los 200 m² de área de barrido, los cuales sirven para el autoabastecimiento de energía y/o suministro a la red. [8]

Los aerogeneradores más comunes para estas aplicaciones son los de eje horizontal bipala y tripala en su mayoría con diámetro promedio de alrededor de 3 m, y en segundo lugar los aerogeneradores de eje vertical.

En este capítulo se muestran algunas de las opciones de aerogeneradores pequeños que se pueden encontrar en el mercado, y ciertas características de cada uno de ellos que podrían dar criterios a la hora de seleccionar alguno para determinadas condiciones

2.1 ENAIR

Empresa española creada por el señor David Bornay con más de 30 años de experiencia en mini eólica. Ofrecen tres tipos de aerogeneradores de eje horizontal, tripala que comienzan a generar energía a partir de una velocidad de viento de 2 m/s, los tres modelos ofrecidos son el Enair 30, 70 y 160.

Tabla 3. Aerogeneradores ofrecidos por la empresa Enair

Nombre	Disposición de eje	Velocidad de arranque (m/s)	Potencia	Fabricante	Precio
Enair 30	Horizontal tripala	2	3000 W	Enair	5989,5€
Enair 70	Horizontal tripala	2	5500W	Enair	8935,85€
Enair 160	Horizontal tripala	2	10500W	Enair	19341,85€

Fuente: ENAIR. Aerogeneradores [En línea] s.l.: enair, 2013.disponible en internet <<http://www.enair.es/energia/eolica>>[Consulta 2 feb.2013]

2.2 BORNAY

Empresa española con más de 40 años en el mercado de los pequeños aerogeneradores, ofrece cinco modelos, todos de eje horizontal con una velocidad de viento para el arranque de 3.5 m/s.

Tabla 4. Aerogeneradores ofrecidos por la empresa Bornay, velocidad de arranque 3.5 m/s

Nombre	Disposición de eje	Velocidad de arranque(m/s)	Potencia	Fabricante	Precio*
Bee 800	Horizontal de 5 aspas	3,5	800w	Bornay	3342,63€
Bornay 600	Horizontal de 2 aspas	3,5	600W	Bornay	3136,93€
Bornay 1500	Horizontal de 2 aspas	3,5	1500W	Bornay	3388,91€
Bornay 3000	Horizontal de 2 aspas	3,5	3000W	Bornay	6392,13€
Bornay 6000	Horizontal de 3 aspas	3,5	6000W	Bornay	8676,61€

*El precio no incluye el regulador. Fuente:Bornay. Aerogeneradores [En línea] s.l.: bornay, 2013.disponible en internet < <http://www.bornay.com/>>[Consulta 2 feb.2013]

2.3 WINDSPOT

Empresa española del grupo Sonkyo Energy dedicada a la producción y comercialización de aerogeneradores de baja escala los cuales ofrecen en el momento cuatro modelos de aerogeneradores

Tabla 5. Aerogeneradores ofrecidos por la empresa Windspot, velocidad de arranque 3 m/s

Nombre	Disposición de eje	Velocidad de arranque(m/s)	Potencia	Fabricante	Precio
Windspot 1.5	Horizontal	3	1.5 kw	Sonkyo energy	4700 €
Windspot 3.5	Horizontal	3	3.5 kw	Sonkyo energy	7285 €
Windspot 7.5	Horizontal	3	7.5 kw	Sonkyo energy	26579 €

Fuente:Windspot. Aerogeneradores [En línea] s.l.: windspot, 2013.disponible en internet < <http://www.windspot.es/>>[Consulta 31Ene.2013]

2.4 UGE URBAN GREEN ENERGY

Compañía dedicada a la producción y comercialización de aerogeneradores de eje vertical, (entre otros productos) para la generación de energía en centros urbanos. En la actualidad ofrecen cuatro distintos modelos de turbinas

Tabla 6 Aerogeneradores ofrecidos por Urban green Energy

Nombre	Disposición de eje	Velocidad arranque (m/s)	Potencia	Fabricante	Precio
Eddy	Vertical	3.5	600 W	UGE	3393,45€
Eddy GT	Vertical	3	1000 W	UGE	6138,33€
UGE 4K	Vertical	3.5	4000 W	UGE	16932,26€
UGE 9M	Vertical	3.5	10000 W	UGE	69646€

Fuente:Urban Green Energy. Productos [En línea] s.l.: urban green energy, 2013.disponible en internet < <http://www.urbangreenenergy.com/es/>>[Consulta 27Ene.2013]

2.5 KESTREL

Empresa cuya sede está ubicada en Puerto Elizabeth, Sudáfrica, diseña, construye y comercializa aerogeneradores desde 2006 en su planta certificada internacionalmente, y siendo filial de la empresa Eveready ha heredado su gran experiencia y trayectoria en el ámbito energético

Tabla 7 Aerogeneradores ofrecidos por Kestrel

Nombre	Disposición de eje	Velocidad de arranque (m/s)	Potencia	Fabricante	Precio
E 160i	Horizontal de 5 palas	2.5	700 W	Kestrel	1,725 USD
E 230i	Horizontal de 3 palas	2.5	850 W	Kestrel	2,273 USD
E 300i	Horizontal de 3 palas	2.5	1000 W	Kestrel	3,209.95 USD

Fuente:Kestrel Renewable Energy. Productos/Aerogeneradores [En línea] s.l.: Kestrel wind, 2013.disponible en internet < <http://www.kestrelwind.co.za/>>[Consulta 31Ene.2013]

2.6 AEOLOS

Empresa fundada en Dinamarca en 1986, con más de 20 años de experiencia en el medio de los aerogeneradores pequeños, el equipo de Aeolos tiene en sus haberes siete patentes de aerogeneradores, sistemas de control, inversor y diseño de aspa.

Tabla 8 Aerogeneradores ofrecidos por Aeolos

Nombre	Disposición de eje	Velocidad de arranque	Potencia	Fabricante	Precio
Aeolos-V 300w	Vertical tipo H	1.5	300w 24v	Aeolos	1.480 USD*
Aeolos-V 600w	Vertical tipo H	1.5	600w 48v	Aeolos	2.270 USD*
Aeolos-V 1kw	Vertical tipo H	1.5	1kw 48v-110v	Aeolos	3.100 USD*
Aeolos-V 2kw	Vertical tipo H	1.5	2kw 48v-110v	Aeolos	4.100 USD*
Aeolos-V 3kw	Vertical tipo H	1.5	3kw 120/220v	Aeolos	5.820 USD*
Aeolos-V 5kw	Vertical tipo H	1.5	5kw 220v	Aeolos	11.800 USD*
Aeolos-V 10kw	Vertical tipo H	1.5	10kw 300/380v	Aeolos	19.980 USD*
Aeolos-H 5kw	Horizontal tripala	3	5kw 216v	Aeolos	3.493 USD*

Fuente:Aeolos. Productos [En línea] s.l.: Windturbinestar, 2013.disponible en internet

< <http://www.windturbinestar.com/Aerogeneradores.html>>[Consulta 28Ene.2013]

*El precio no incluye el controlador ni el inversor, los cuales varían según el modelo del aerogenerador

En el anexo 1 se pueden encontrar todas las curvas de potencia de los aerogeneradores anteriormente descritos y varias comparaciones entre algunos de capacidades similares

3 INFORMACIÓN SOBRE EL RECURSO EÓLICO EN EL VALLE DE ABURRA

En este capítulo se mostrará la recopilación de datos de las cuatro estaciones meteorológicas a lo largo del Valle de Aburrá. Los datos están compuestos por la magnitud y la dirección de los vientos. La información de ubicación de las estaciones se presenta en la tabla 9.

Tabla 9. Estaciones meteorológicas en el valle de aburra

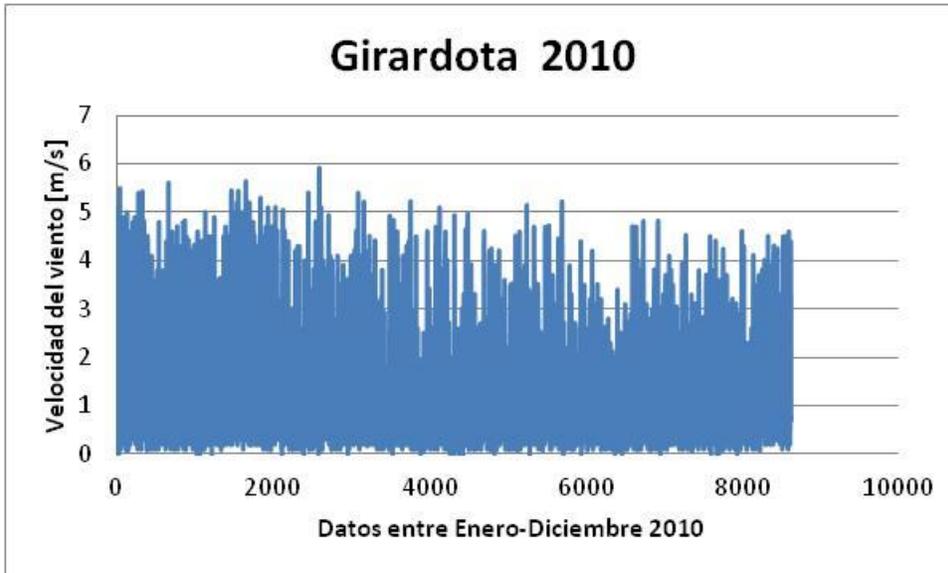
GIR-IECO	Estación ubicada en la institución educativa Colegio Colombia en Girardota
MED-MANT	La estación opera en el parqueadero del museo de Antioquia en Medellin
MED-PJIC	Estación que opera contiguo a la piscina del politécnico Colombiano JIC en Medellin
SAB-CAM	Estacione ubicada en la terraza de la alcaldía de Sabaneta

De cada una de las estaciones se pueden encontrar tres tipos de figuras. La primera es la distribución de velocidad del viento versus los datos recolectados, la segunda es histograma de frecuencias en donde se observa el porcentaje en que el viento sopló a cierta velocidad y la tercera es la rosa de los vientos para cada lugar, la cual nos indica la dirección en soplaron los vientos durante el periodo de recolección de los datos

3.1 ESTACION METEOROLOGICA DE GIRARDOTA

En la figura 10 se puede observar la fluctuación de los vientos en esta estación donde los picos más altos no superan los 6 m/s y la mayoría del tiempo hubo viento con velocidad de 1 a 2 m/s

Figura 8. Velocidad del viento en Girardota 2010



En la figura 9 se puede ver que casi un 60% del tiempo el viento sopló a una velocidad cercana a 1 m/s y donde la velocidad máxima fue de 6m/s lo que es considerado viento moderado según la escala de Beaufort

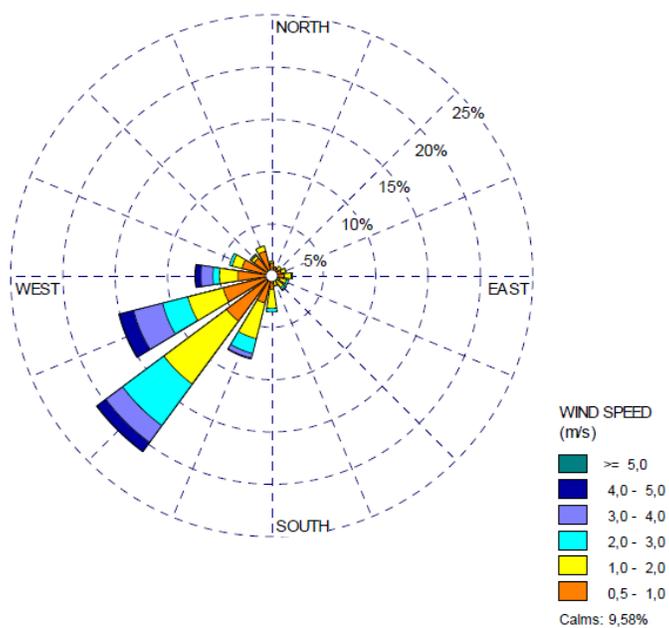
Figura 9. Histograma de frecuencias de velocidad de los vientos en Girardota 2010



La rosa de los vientos de Girardota descrita en la Figura 10 nos muestra que la dirección predominante es la sur-oeste y que la mayoría de los viento se

encuentran concentrados en esta dirección, lo que llevaría a pensar que un aerogenerador de eje horizontal sería el apropiado para esta estación como más adelante se hablará.

Figura 10. GIR-IECO rosa de los vientos



Fuente: VALLE DE BURRA. AREA METROPOLITANA. Evaluar y monitorear la calidad del aire en el valle de aburra. Medellin: El autor, s.f.p. 60

3.2 ESTACION METEOROLOGICA DEL MUSEO DE ANTIOQUIA EN MEDELLIN

Los mejores vientos que se registraron en el Valle de Aburrá a través de estas cuatro estaciones se dieron en el museo de Antioquia como se puede observar en las figuras 13 y 14, en donde se puede observar que el promedio de vientos estuvo alrededor de 3 m/s y en donde la velocidad máxima fue de 6.2 m/s

Figura 11. Velocidad del viento en el Museo de Antioquia 2012

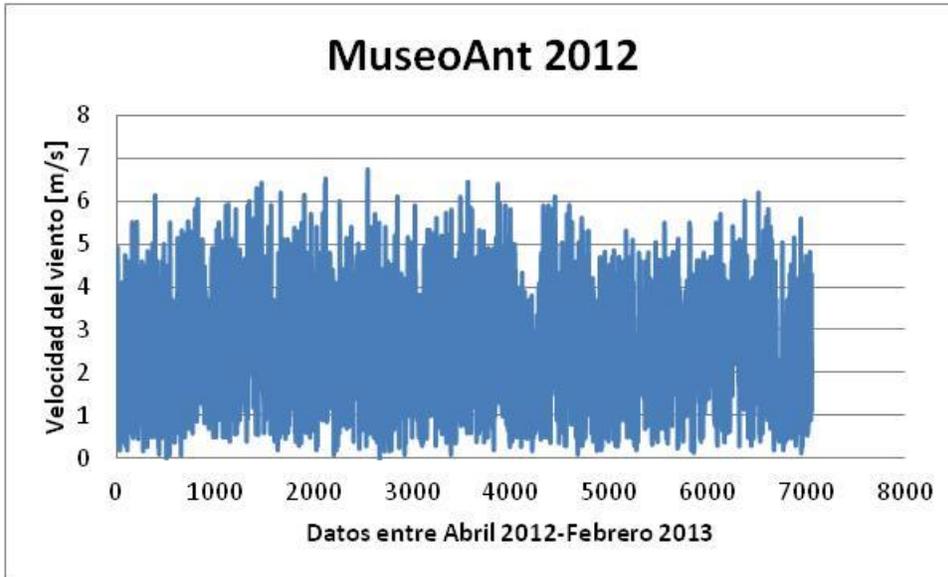
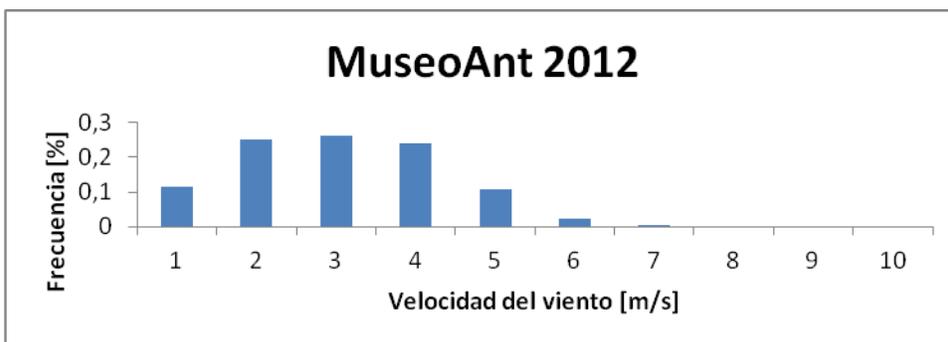
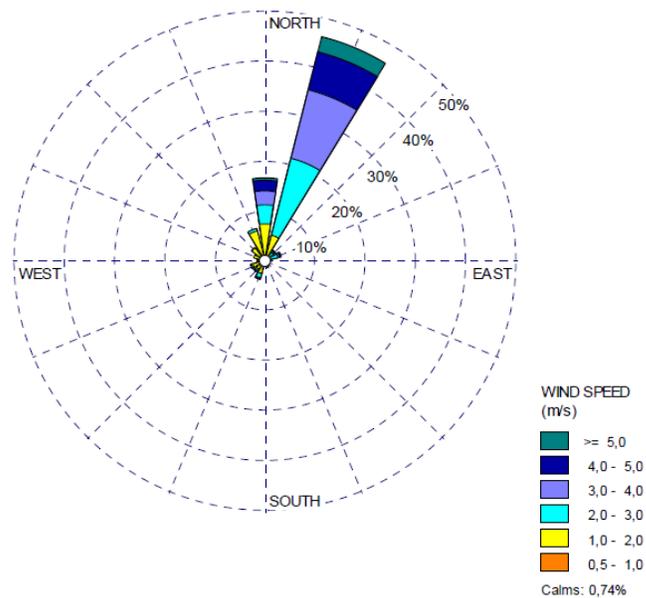


Figura 12. Histograma de frecuencias de velocidad de los vientos en el Museo de Antioquia



En la rosa de los vientos de la estación del Museo de Antioquia muestra claramente una dirección definida Nor-nor-este lo que es ideal para un aerogenerador de eje horizontal como mas adelante se expondra

Figura 13. MuseoAnt Rosa de los vientos



Fuente: VALLE DE BURRA. AREA METROPOLITANA. Evaluar y monitorear la calidad del aire en el valle de aburra. Medellin: El autor, s.f.p 68

3.3 ESTACION METEOROLOGICA DEL POLI-JIC EN MEDELLIN

En las figuras 14 y 15 se puede observar como la mayoría del tiempo el viento mantuvo una velocidad de 1m/s y llegando a una velocidad máxima de 6.4 m/s lo que corresponden a vientos moderados

Figura 14. Velocidad del viento en el Poli-JIC

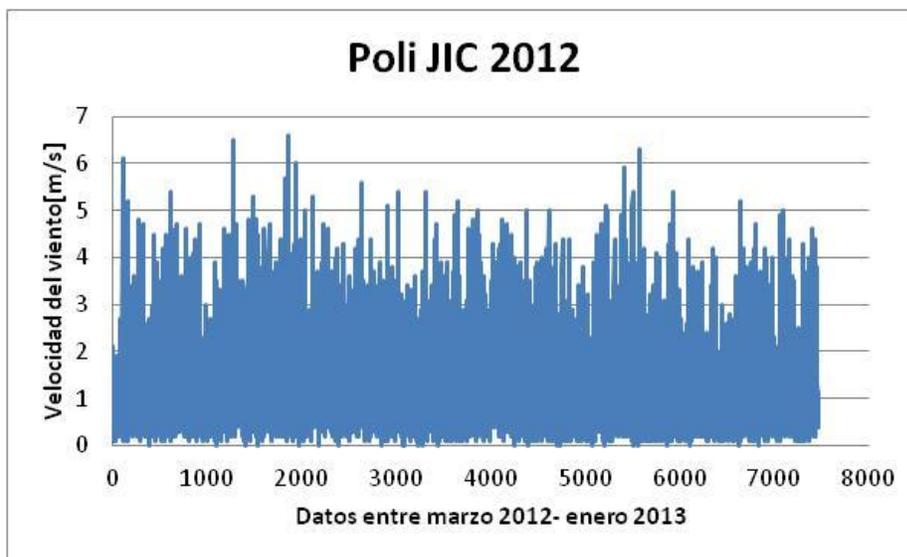
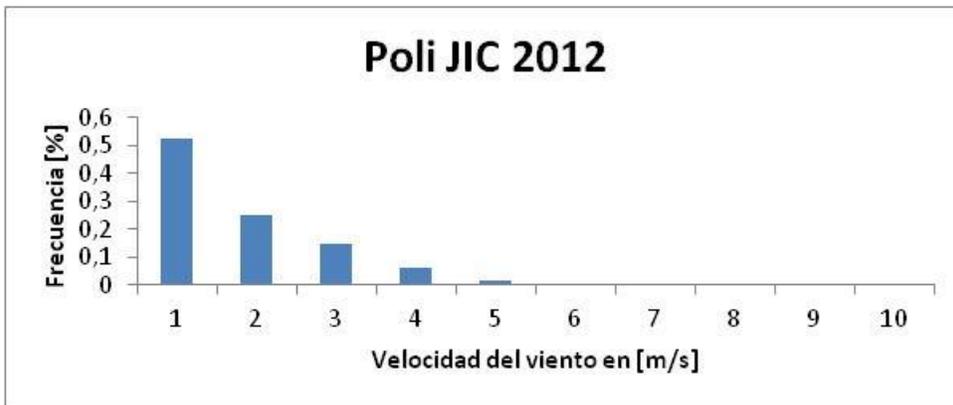
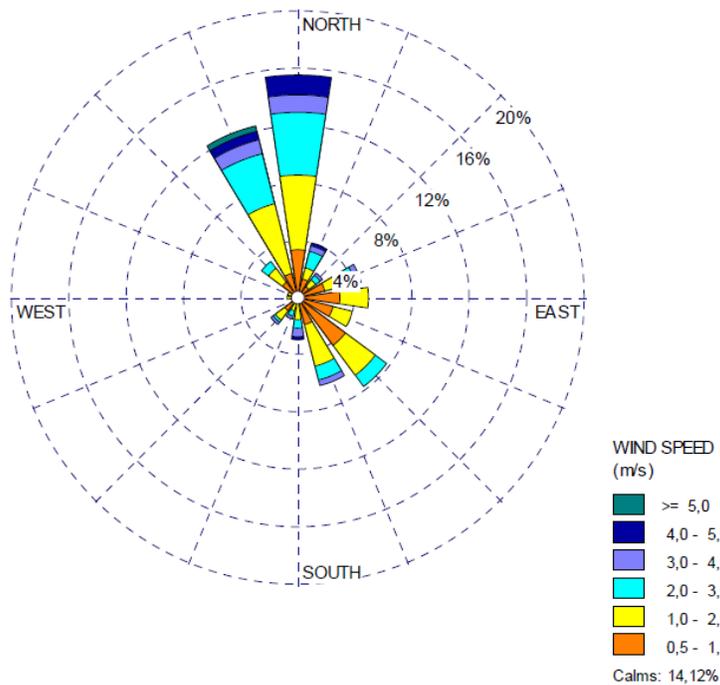


Figura 15. Histograma de frecuencias de velocidad de los vientos en el poli-JIC



La rosa de los vientos del politécnico indica que la dirección de los vientos está dividida en varias direcciones por lo que sería conveniente hacer la comparación entre un aerogenerador de eje vertical y otro horizontal como se indica más adelante.

Figura 16, POL-JIC Rosa de los vientos



Fuente: VALLE DE BURRA. AREA METROPOLITANA. Evaluar y monitorear la calidad del aire en el valle de aburra. Medellín: El autor, s.f.p 69

3.4 ESTACION METEOROLOGICA DE SABANETA

En la estación meteorológica ubicada en Sabaneta y como se puede observar en las figuras 17 y 18 la velocidad del viento fue muy variada llegando a un máximo de 7.2 m/s

Figura 17. Velocidad del viento en Sabaneta 2011

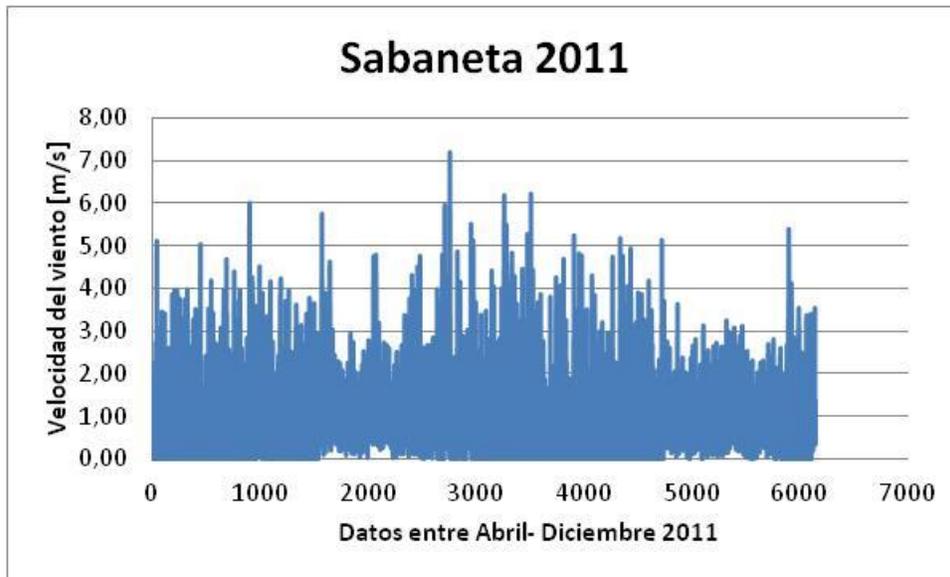
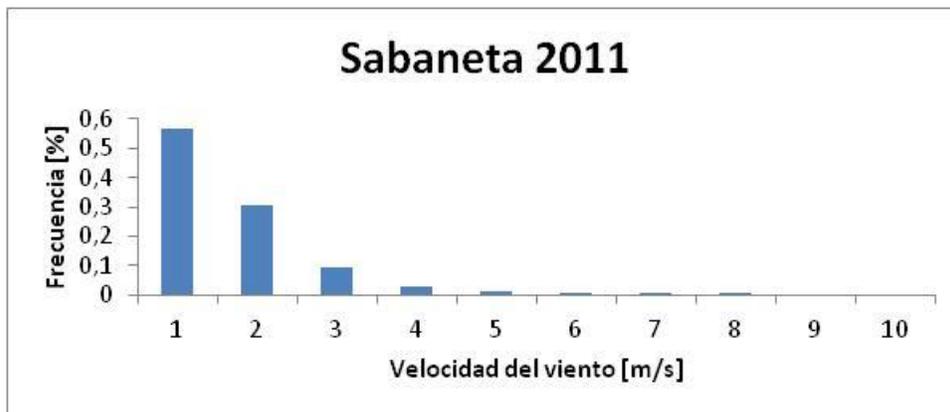
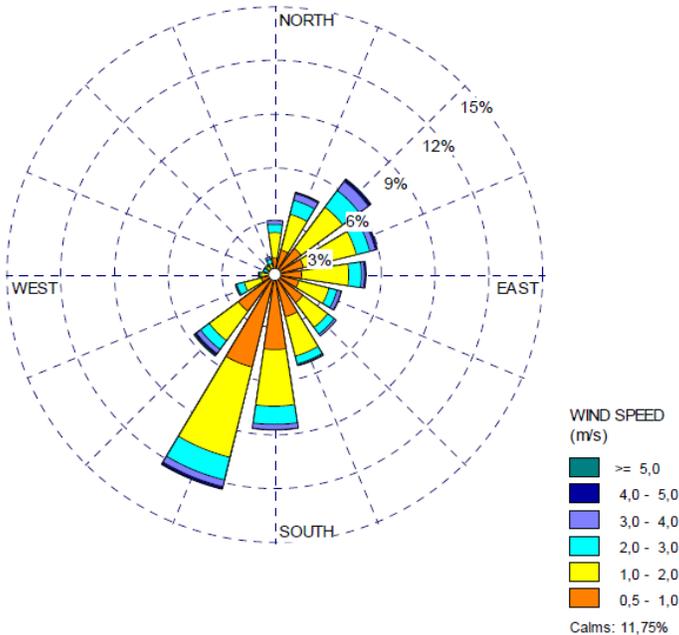


Figura 18. Histograma de frecuencias de velocidad de los vientos en Sabaneta



En la figura 19 se puede observar como la estación meteorológica de Sabaneta se registraron vientos en múltiples direcciones por lo que convendría utilizar aerogeneradores de eje vertical ya que como es bien sabido este tipo pueden utilizar vientos en todas las direcciones de viento.

Figura 19. Sabaneta 2011. Rosa de los vientos



Fuente: VALLE DE BURRA. AREA METROPOLITANA. Evaluar y monitorear la calidad del aire en el valle de aburra. Medellin: El autor, s.f.p 72

Los posibles factores que afecten las mediciones de viento en el valle de aburra pueden ser obstáculos. Para los cual existe el protocolo para el monitoreo y el seguimiento de la calidad del aire del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en donde se encuentra estipulado la manera técnica de cómo se deben hacer estas mediciones, el diseño y la operación de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire

4 MODELOS DE CÁLCULO PARA ESTIMAR EL RECURSO EOLICO

En este capítulo se ilustrará el modelo matemático para calcular la energía producida por un aerogenerador, la cual depende de la curva de potencia del aerogenerador y la energía que se produzca a ciertas velocidades lo que es un dato intrínseco de cada máquina y que está determinado por el tipo de aerogenerador, la configuración, la eficiencia de los distintos elementos que los constituyen, entre otras muchas variables. El recurso eólico del lugar y el porcentaje del viento que sopla a las distintas velocidades influye en el cálculo de este potencial. También se mostrará un modelo matemático para trasladar datos de estaciones meteorológicas a lugares cercanos teniendo en cuenta diversas variables del lugar y la superficie del terreno.

4.1 SELECCIÓN DE LOS AEROGENERADORES

La selección de los aerogeneradores se hizo teniendo en cuenta varios aspectos, entre ellos la rosa de vientos de cada uno de los sitios que permite decidir si debía ser de eje horizontal o vertical, las curvas de potencia para saber cuáles eran más eficientes, la velocidad de arranque, debido a que los vientos que se tienen en el Valle de Aburrá son de velocidades bajas, es importante que los aerogeneradores tuvieran una velocidad baja de arranque y el costo.

Para las estaciones ubicadas en Girardota y en el museo de Antioquia en Medellín se escogieron dos aerogeneradores de eje horizontal, un Windspot 1.5 como el que se aprecia en la figura 20 y Enair 30 como el de la figura 20, los cuales producen en promedio 1.5kW.

Figura 20. Windspot 1.5



Fuente:<http://www.ireland.windspot.es>
5 de febrero de 2013

Figura 21. Enair 30



Fuente:<http://www.sol-i-vent.es>
5 de febrero de 2013

Para la estación ubicada en el politécnico JIC se seleccionaron un aerogenerador de eje horizontal, el Windspot 1.5, y uno de eje vertical el Aeolos-V 1kw es cual produce 1.5kW aproximadamente

Y finalmente para la estación de Sabaneta debido a la gran variedad de direcciones en que sopla el viento como se pudo observar en la rosa de vientos, se selecciono dos aerogeneradores de eje vertical, un Aeolos-V 1kW como el que se aprecia en la figura 22 y un Eddy Gt de Urban Green Energy como el que se puede ver de la figura 23.

Figura 22. Aeolos-V 1kW



Fuente:<http://www.windturbinestar.com>
5 de febrero de 2013

Figura 23. Eddy Gt de UGE



Fuente:<http://www.pavanaservices.com>
5 de febrero de 2013

4.2 CALCULO DE LA POTENCIA GENERADA AL AÑO

Para este cálculo debemos tener en cuenta que:

Pot= potencia que genera el aerogenerador a cierta velocidad. Este dato se obtiene de la curva de potencia de cada equipo. Esta dada en Kilovatios (kW)

F= frecuencia, es el porcentaje de tiempo que el viento sopla a la velocidad establecida. Este dato lo obtenemos del histograma de frecuencias, se da en porcentaje (%)

H= horas del año en que el aerogenerador está disponible para la producción de energía, en nuestro caso está un 100% disponible o sea 8760 horas

E= producción de energía, y resulta de la multiplicación de los tres factores anteriores, dada en kilovatios

Ettotal= Es la producción anual de energía del aerogenerador y se obtiene de la sumatoria de los E parciales, se da en Kilovatios hora al año (kW*h/año)

$$E=Pot \cdot F \cdot H$$

$$Ettotal=\sum E$$

En la tabla 10 se puede observar los datos y los cálculos anteriormente descritos en donde se calcula la producción anual al año utilizando los datos de la estación meteorológica de Girardota y un aerogenerador Windspot 1.5, en donde la producción anual de energía total es $Ettotal= 1164,287$ kWh/año con estas condiciones

Tabla 10. Girardota con Windspot 1.5

Vel viento [m/s]	Potencia [kW]	Frecuencia [%]	Horas/Año	Producción anual de energía (kWh/año)
1	0,000	0,5918	5184	0,000
2	0,000	0,1943	1702	0,000
3	0,231	0,1106	969	223,630
4	0,469	0,0637	558	261,623
5	0,639	0,0364	319	203,627
6	0,915	0,0032	28	26,032
7	1,115	0,0000	0	0,000
8	1,308	0,0000	0	0,000
9	1,392	0,0000	0	0,000
10	1,469	0,0000	0	0,000

En la tabla 11 se trabajo con las mismas condiciones de vientos de la estación meteorológica de Girardota pero con la curva de potencia dada por el Enair 30 con lo que la producción anual de energía es de $E_{total} = 803,458$ kWh/año

Tabla 11. Girardota con Enair 30

Vel Viento [m/s]	Potencia [kW]	Frecuencia [%]	Horas/Año	Produccion anual de energia kWh/año)
1	0,000	0,5918	5184	0,000
2	0,081	0,1943	1702	137,166
3	0,179	0,1106	969	173,536
4	0,330	0,0637	558	184,061
5	0,528	0,0364	319	168,291
6	0,772	0,0032	28	21,951
7	0,993	0,0000	0	0,000
8	1,272	0,0000	0	0,000
9	1,487	0,0000	0	0,000
10	1,562	0,0000	0	0,000

En la tabla 12 se ilustra los cálculos hechos con los datos de los vientos registrados por la estación meteorológica del Museo de Antioquia y con el aerogenerador Windspot 1.5 con el que se produce $E_{total} = 2590,731$ kWh/año

Tabla 12. Museo de Antioquia con Windspot 1.5

Vel viento[m/s]	Potencia [kW]	Frecuencia[%]	Horas /Año	Producción anual de energía (kWh/año)
1	0,000	0,1137	996	0,000
2	0,000	0,2523	2210	0,000
3	0,231	0,2623	2298	530,381
4	0,469	0,2399	2102	986,190
5	0,639	0,1074	941	600,863
6	0,915	0,0225	197	180,698
7	1,115	0,0018	16	17,995
8	1,308	0,0000	0	0,000
9	1,392	0,0000	0	0,000
10	1,469	0,0000	0	0,000

En la tabla 13 se puede apreciar el mismo cálculo con los datos meteorológicos del Museo de Antioquia pero con el aerogenerador Enair 30 en donde la producción anual estimada es de 1971,208 kWh/año

Tabla 13. Museo de Antioquia con Enair 30

Vel Viento [m/s]	Potencia [kW]	Frecuencia [%]	Horas/Año	Producción anual de energía (kWh/año)
1	0,000	0,1137	996	0,000
2	0,081	0,2523	2210	178,071
3	0,179	0,2623	2298	411,574
4	0,330	0,2399	2102	693,822
5	0,528	0,1074	941	496,594
6	0,772	0,0225	197	152,371
7	0,993	0,0018	16	16,025
8	1,272	0,0000	0	0,000
9	1,487	0,0000	0	0,000
10	1,562	0,0000	0	0,000

A continuación en la tabla 14 se presenta los cálculos hechos con los datos de la estación meteorológica ubicada en el Politécnico JIC utilizando un aerogenerador Windspot 1.5 el cual produciría una $E_{total} = 1137,674$ kWh/año

Tabla 14. Poli-JIC con Windspot 1.5

Vel viento [m/s]	Potencia [kW]	Frecuencia [%]	Horas/Año	Producción anual de energía [kWh/año]
1	0,000	0,5216	4569	0,000
2	0,000	0,2485	2177	0,000
3	0,231	0,1493	1308	301,783
4	0,469	0,0596	522	244,851
5	0,639	0,0178	156	99,585
6	0,915	0,0028	25	22,543
7	1,115	0,0005	5	5,230
8	1,308	0,0000	0	0,000
9	1,392	0,0000	0	0,000
10	1,469	0,0000	0	0,000

En la tabla 15 se muestran los datos que se utilizaron para los cálculos de producción de energía anual utilizando un Aeolos-V 1kW, el cual produjo $E_{total} = 161,241$ kWh/año

Tabla 15. Poli-JIC con Aeolos-V 1kW

Vel Viento [m/s]	Potencia [kW]	Frecuencia [%]	Horas/Año	Producción anual de energía [kWh/año]
1	0,000	0,5216	4569	0,000
2	0,006	0,2485	2177	13,875
3	0,051	0,1493	1308	66,685
4	0,096	0,0596	522	49,899
5	0,147	0,0178	156	22,865
6	0,249	0,0028	25	6,122
7	0,383	0,0005	5	1,794
8	0,561	0,0000	0	0,000
9	0,771	0,0000	0	0,000
10	1,001	0,0000	0	0,000

En la tabla 16 se puede observar los datos con que se hizo el cálculo de la energía anual producida con los datos de la estación meteorológicas de sabaneta con un aerogenerador Eddy Gt de Urban Green Energy la Energía total fue $E_{total}=1514,367$ kWh/ año

Tabla 16. Sabaneta con Eddy Gt

Vel viento [m/s]	Potencia [kW]	Frecuencia [%]	Horas/Año	Producción anual de energía (kWh/año)
1	0,000	0,5656	4954	0,000
2	0,000	0,3030	2654	0,000
3	0,301	0,0915	801	240,865
4	0,409	0,0279	245	99,999
5	0,516	0,0093	81	41,893
6	0,609	0,0023	20	12,132
7	0,698	0,0003	3	1,985
8	0,809	0,0002	1	1,152
9	0,902	0,0000	0	0,000
10	1,010	0,0000	0	0,000

En la tabla 17 se puede observar los datos utilizados para calcular la energía total generada con el viento registrado en sabaneta y el aerogenerador Aeolos-V1kW que produjo $E_{total}= 99,927$ kWh/año

Tabla 17. Sabaneta con Aeolo-V 1kW

vel viento [m/s]	Potencia [kW]	Frecuencia [%]	Horas /Año	Producción anual de energía (kWh/año)
1	0,000	0,5656	4954	0,000
2	0,006	0,3030	2654	16,921
3	0,051	0,0915	801	40,865
4	0,096	0,0279	245	23,407
5	0,147	0,0093	81	11,893
6	0,249	0,0023	20	4,953
7	0,383	0,0003	3	1,089
8	0,561	0,0002	1	0,798
9	0,771	0,0000	0	0,000
10	1,001	0,0000	0	0,000

En la tabla 18 se puede observar un resumen de los sitios y los dos tipos de aerogeneradores por cada lugar, que se les calculo la energía que producirían

Tabla 18. Resumen de datos sobre energía generada

Sitio	Generador	Etotal [W]
Girardota	1. Windspot 1.5	714,91
	2. Enair 30	685,01
Museo de Antioquia	1. Windspot 1.5	2.316,13
	2. Enair 30	1.948,46
Politécnico JIC	1. Windspot 1.5	673,99
	2. Aeolos-V 1kW	161,24
Sabaneta	1. Eddy Gt	398,03
	2. Aeolos-V 1kW	99,92

En la tabla anterior se puede observar decir que el lugar donde más se produjo energía fue el Museo de Antioquia con el aerogenerador Windspot 1.5, debido a que es el lugar donde se tiene mejor recurso eólico y que este generador tiene mejor desempeño que el Enair 30 para las mismas condiciones de viento.

También se puede decir que el peor comportamiento lo tuvo el Aerogenerador Aeolos-V 1kW el cual comparado con el Eddy Gt que también es de eje vertical, no se comporta de la mejor manera para el recurso eólico disponible, habría que analizar qué tal se comporta para vientos de mayor velocidad

5 COSTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE AEROGENERADORES

Para estimar el costo de generación de energía eléctrica a partir del viento en el Valle de Aburrá y de acuerdo con los aerogeneradores seleccionados para esta aplicación se deben tener en cuenta principalmente el valor del equipo y todos los periféricos donde están incluidos el aerogenerador como tal, el inversor, el controlador y las baterías.

Se debe tener en cuenta el costo del mantenimiento y la vida útil del equipo, en donde se utilizo la ecuación 1

En la tabla 19 se seleccionar tres de los lugares en donde se obtuvieron mejor desempeño con el aerogenerador descrito, los primeros dos fueron en el Museo de Antioquia y el tercero en Girardota

Tabla 19. Costo de producción de energía con Aerogeneradores

	Precio (\$)	Edad útil (años)	kW h/año producidos máximos	valor de la batería (\$)	valor de controlador (\$)	valor del inversor (\$)	manto (\$)	valor total de la inversión	valor anual de la inversión	valor del kW
Windspot 1.5	11280.000	20	2316,13	500.000	1584.000	810.000	2000.000	16174.000	808.700	349
Enair 30	14373.600	20	1948,46	500.000	1584.000	810.000	2000.000	18767.600	938.380	482
Windspot 1.5	11280.000	20	714,91	500.000	1584.000	810.000	2000.000	15674.000	783.700	1096

Ecuación 1

$$\frac{A + B + I + C + M}{V * E_{total}} = \text{Valor kWh}$$

A = Valor del Aerogenerador

B = Valor de la Batería

I = Valor del inversor

C = Valor del controlador

M = Valor del mantenimiento

V = Vida útil del Aerogenerador

E_{total} = Energía total producida en el lugar analizado

Aunque la energía en la bolsa tuvo un precio de 182 pesos a 28 de febrero de 2013, habría que tener en cuenta que este precio varía mes a mes y no incluye distribución, comercialización y otros cargos regulados a la tarifa de energía eléctrica, se debe tener en cuenta que la comparación se hace entre la energía que se puede obtener justo en el sitio donde se necesita, y en este caso es donde se haría el emplazamiento del aerogenerador, por lo que se tienen en cuenta los siguientes valores.

El valor actual del kWh a marzo de 2013 esta en 291 pesos en promedio, pero según el estrato podrían variar, por ejemplo en zona residencial estrato 4 el kWh vale 337 pesos

Con lo que se puede decir que dependiendo de las zona en donde posiblemente se vaya a hacer el emplazamiento del aerogenerador, y sabiendo que se tiene un buen potencial eólico, podría competir en precio la energía eólica con la hidráulica, que en su mayoría se produce en Antioquia

6 CONCLUSIONES

En el mercado actual se puede adquirir variedad de información de aerogeneradores de pequeña escala para aplicaciones de tipo urbano en donde se puede escoger diferentes configuraciones, de eje horizontal o vertical, desde 300 w hasta 10kW o mas, con velocidades de arranque desde 1.5 m/s en adelante, la mayoría de ellos son fabricados y/o diseñados en Europa o Estados Unidos, lo que puede ayudar a encontrar una apropiada solución de diversas necesidades energéticas

En el todo el Valle de Aburra hay siete estaciones meteorológicas de las cuales se obtuvieron datos de cuatro de ellas, ya que no siempre están en funcionamiento las siete estaciones; estas cuatro nos indican que la mayoría del recurso eólico es de baja velocidad y que varía la dirección y la magnitud dependiendo del lugar de las mediciones. Por lo que no se puede establecer un patrón único que defina todo el Valle de Aburrá.

A partir de los modelos matemáticos disponibles en la literatura se pudo estimar el potencial de producción de energía a través del viento según el recurso eólico propio de los cuatro lugares analizados y los datos de potencia obtenidos de las distintas curvas características de los aerogeneradores comparados, que arrojó como resultado que el mejor lugar para el emplazamiento de los cuatro estudiados es el Museo de Antioquia en Medellín ya que registró las velocidades más altas y la dirección de viento más constante por lo que se podría instalar al menos un aerogenerador de eje horizontal. En Girardota y en el Poli-JIC se podrían instalar de eje horizontal también pero no con tan buenos resultados como en el Museo de Antioquia, y en Sabaneta definitivamente tendría que ser un aerogenerador de eje vertical debido a la gran variedad de direcciones de donde sopla el viento.

Los costos de generación de energía eléctrica a partir del viento son un poco más altos que los obtenidos en el Valle de Aburra producido por las hidroeléctricas en

su mayoría, pero estos precios podrían llegar a ser más competitivos con el avance de los aerogeneradores y la disminución de los costos de la inversión inicial en cuanto se popularice esta tecnología en el mundo y especialmente en Colombia

7 BIBLIOGRAFIA.

COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. Atlas de viento y energía eólica de Colombia. Bogotá: El autor, s.f.

MORA MADRIGAL, Helena Patricia C. A. (2009). Sistema Híbrido Eólico-Solar y Eólico-diesel. medellin.

MANCHA, u. d. energía eólica . [En línea] s.l. Mancha , 2012. Disponible en internet:http://www.uclm.es/PROFESORADO/ajbarbero/FAA/EEOLICA_Febrero2012_G9.pdf [Consulta 30 enero 2013]

PEACE, g. green peace españa. [En línea] s.l: peace 2010 Disponible en internet: <<http://www.greenpeace.org/espana/es/reports/perspectivas-globales-de-la-en/>> [Consulta: 07 de Feb de 2013]

SANZ, D. B. (2012). La minieólica en españa y en el mundo. Madrid.

SOLUTIONS, r. [En línea]. repowering solutions, 2012 Disponible en internet: http://www.repoweringsolutions.com/productos/aerogeneradores_domesticos/ [consulta el 1 de Mar de 2013]

VONESCHEN, M. F. (2009). Introducción al teoría de la turbinas eolicas. Berlin.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Bogotá, Octubre de 2010: El autor, s.f.

HULSHORST, Walter. Manual práctico de evaluación de una instalación de energía eólica a pequeña escala. Madrid: El Autor, 2012. 14 p.

GUZMAN GUTTMAN, Claudia. Estudio de factibilidad para la construcción de un parque eólico en Colombia. Bogotá: El Autor, 2003.

PINILLA, Álvaro. El poder del Viento. Bogotá: El Autor, 2008

ARTEZANA MUÑOZ, J.C.(2004). Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical. Chile: Universidad de Chile.

EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN.(2004). La energía eólica como posibilidad de aprovechamiento. Medellin, Colombia

FERNANDEZ POSADA, M.

Anexo 1

Figura 24. Curva de potencia del Bee 800 de Bornay

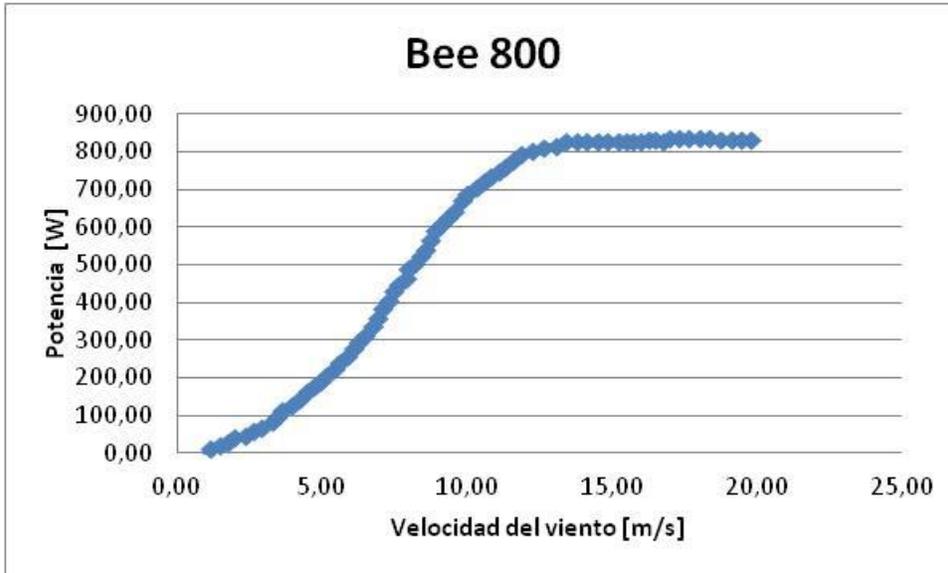


Figura 25. Curva de potencia del Bornay 600

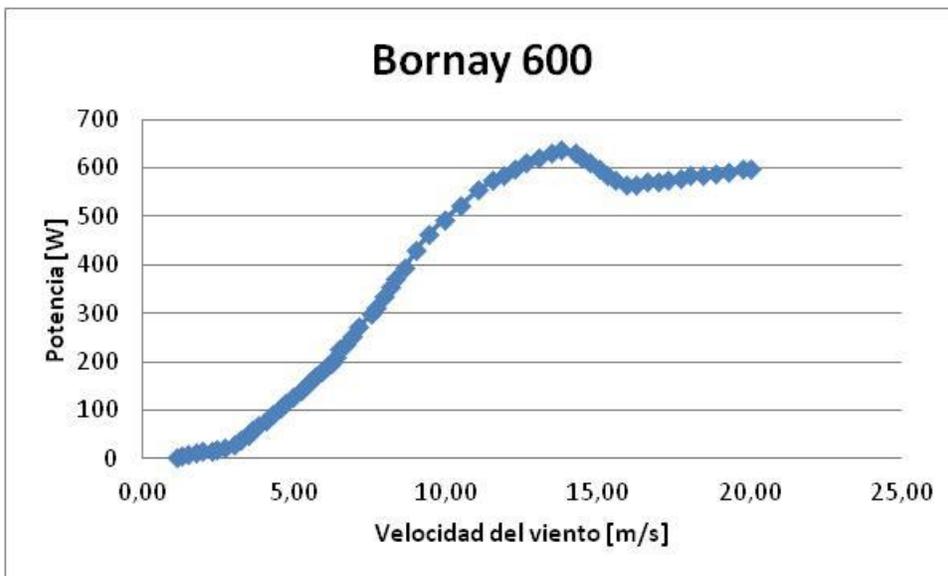


Figura 26. Curva de potencia del Bornay 1500

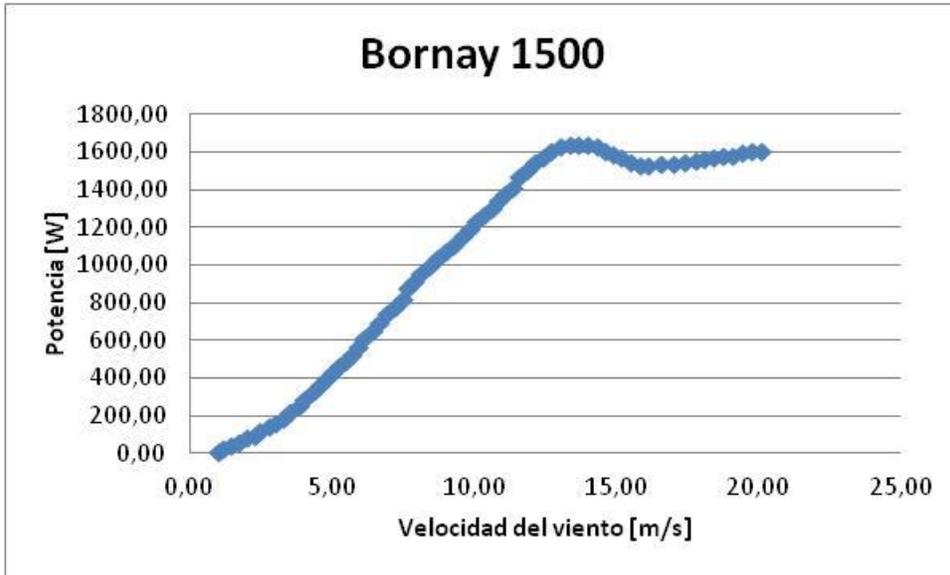


Figura 27. Curva de potencia del Bornay 3000

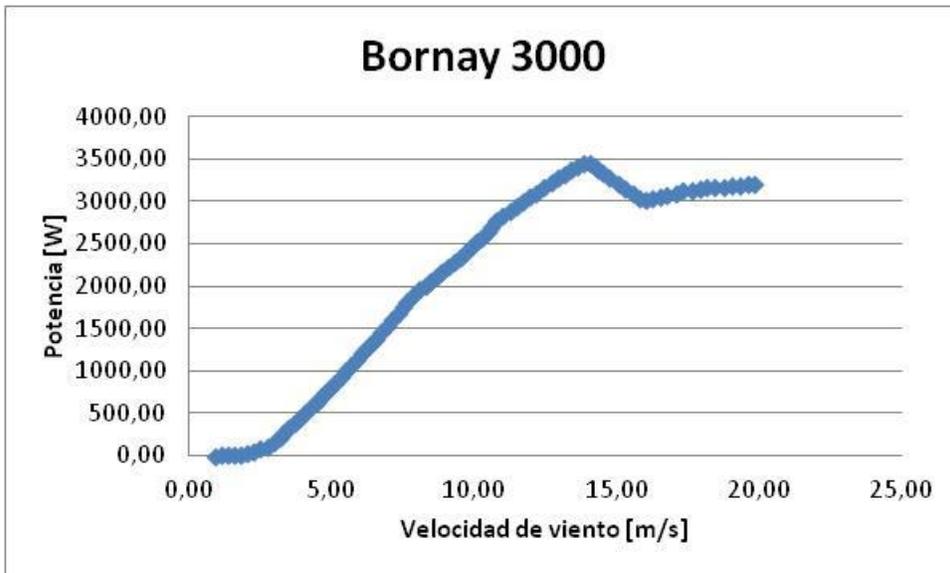


Figura 28, Curva de potencia del Bornay 6000

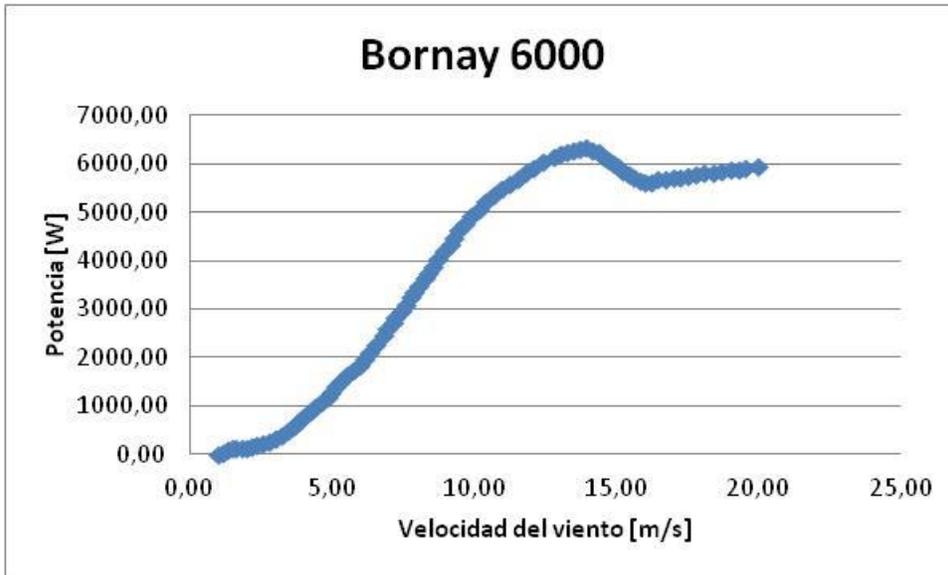


Figura 29. Curva de potencia del Eddy de Urban Green Energy

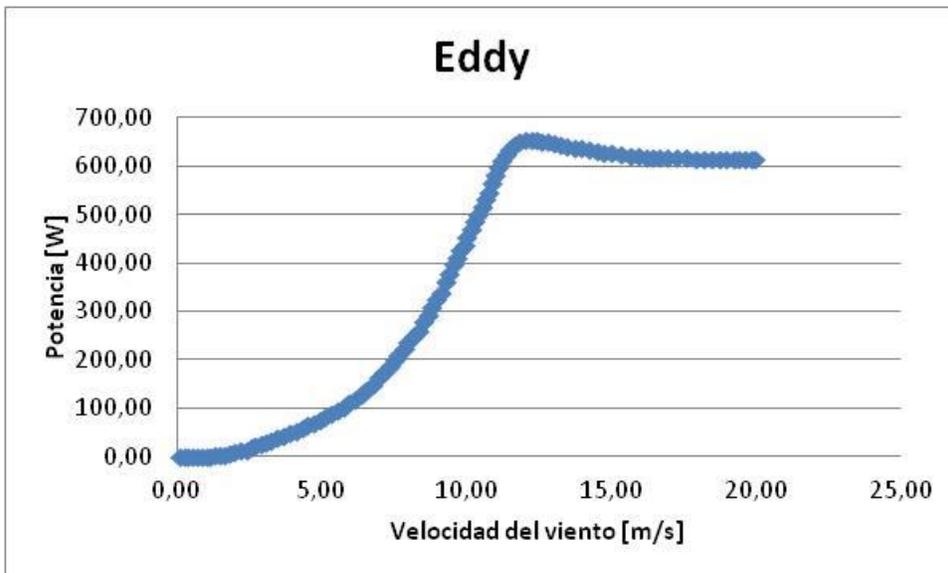


Figura 30. Curva de potencia del Eddy gt de Urban Green Energy

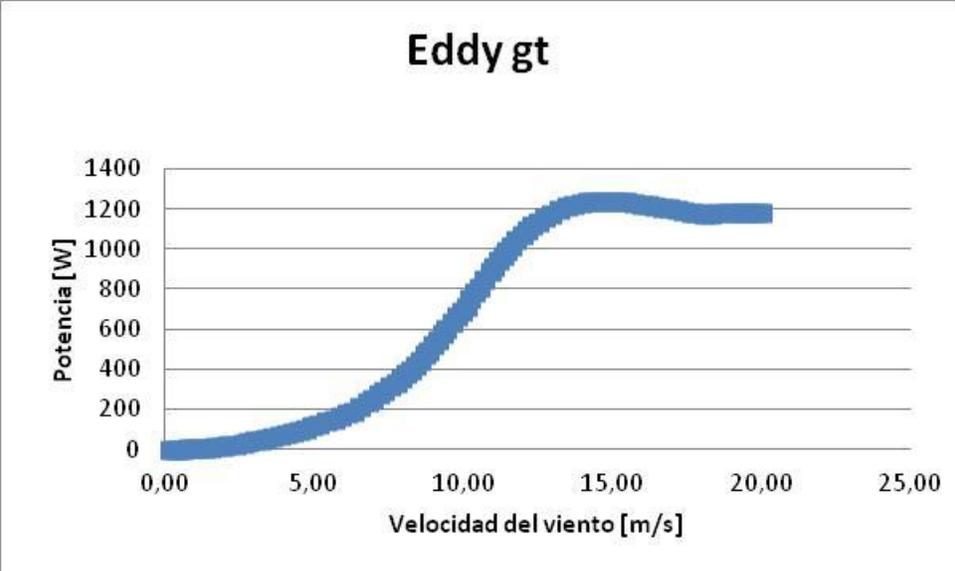


Figura 31. Curva de potencia del Uge 4K de Urban Green Energy

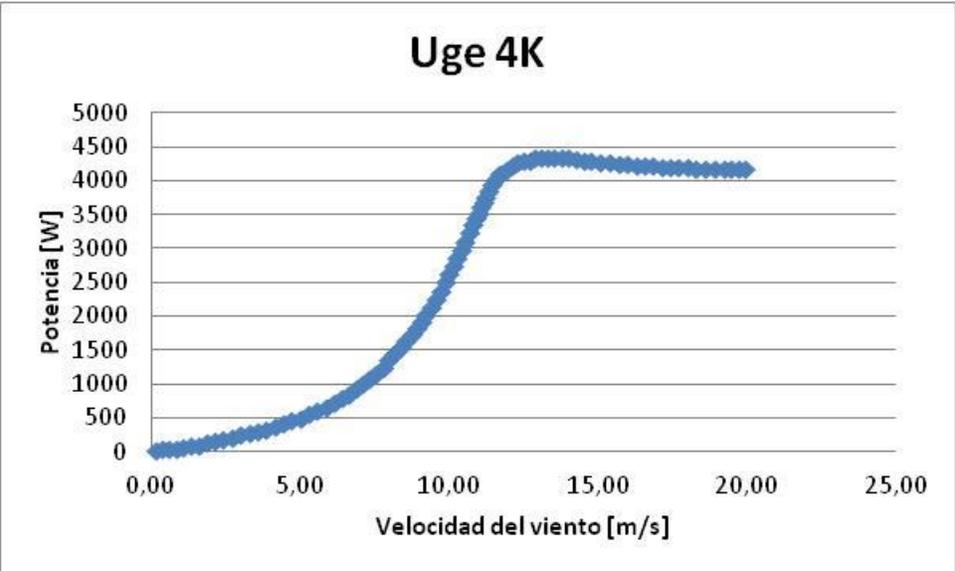


Figura 32. Curva de potencia del Uge 9m de Urban Green Energy

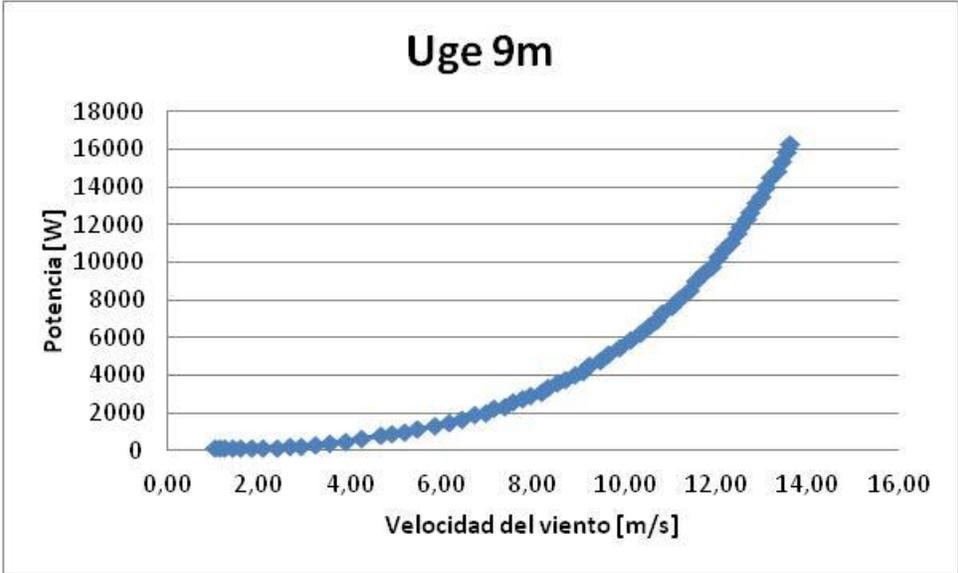


Figura 33. Curva de potencia del Enair 30

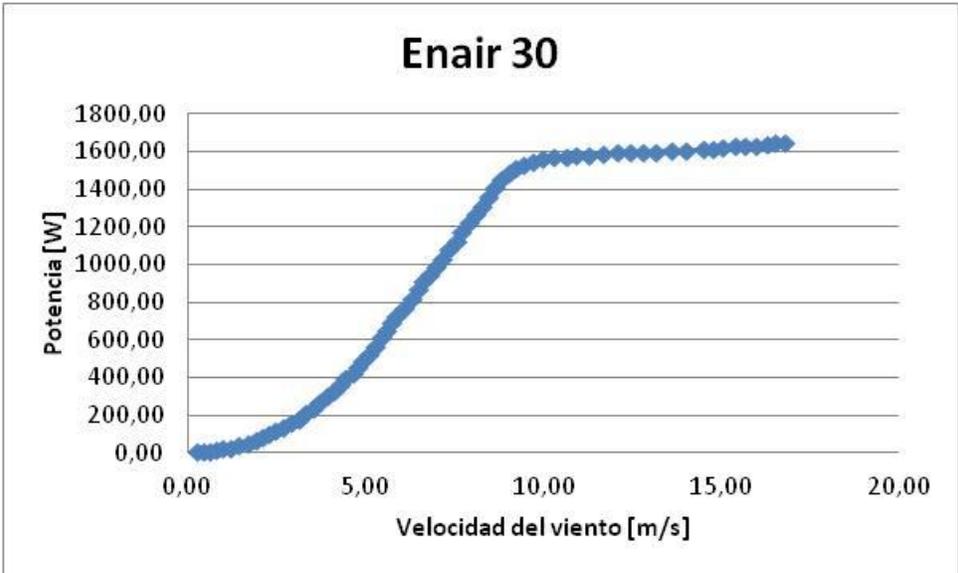


Figura 34. Curva de potencia del Enair 70

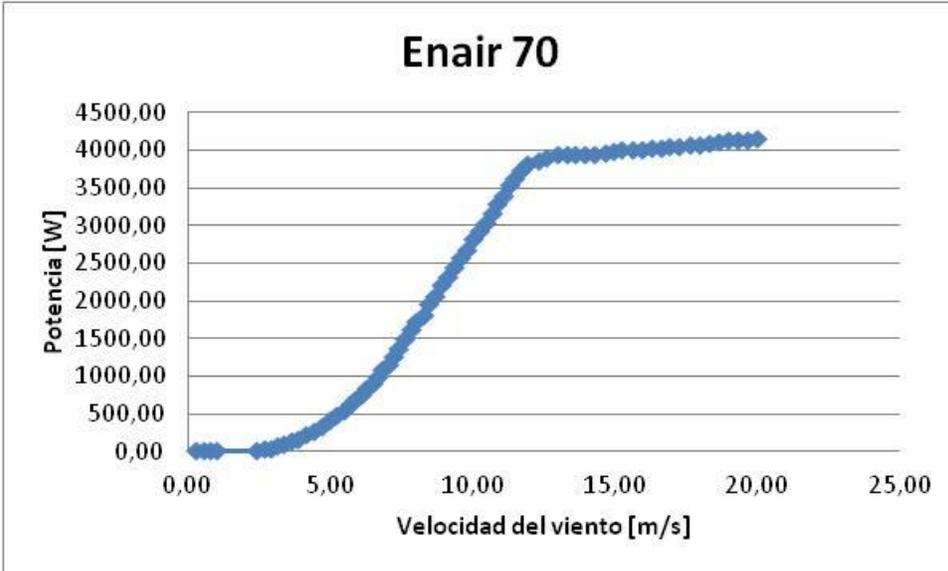


Figura 35. Curva de potencia del Enair 160

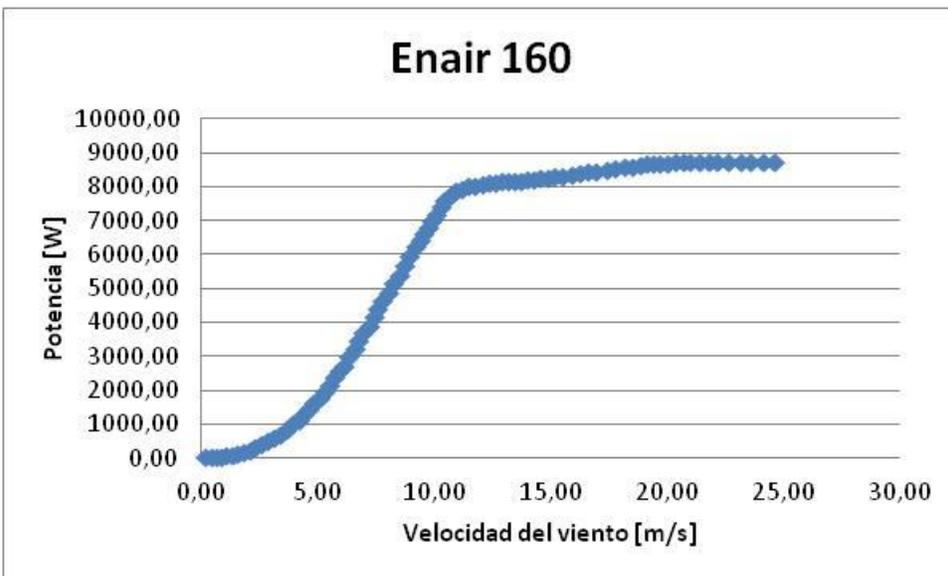


Figura 36. Curva de potencia del Kestrel e230

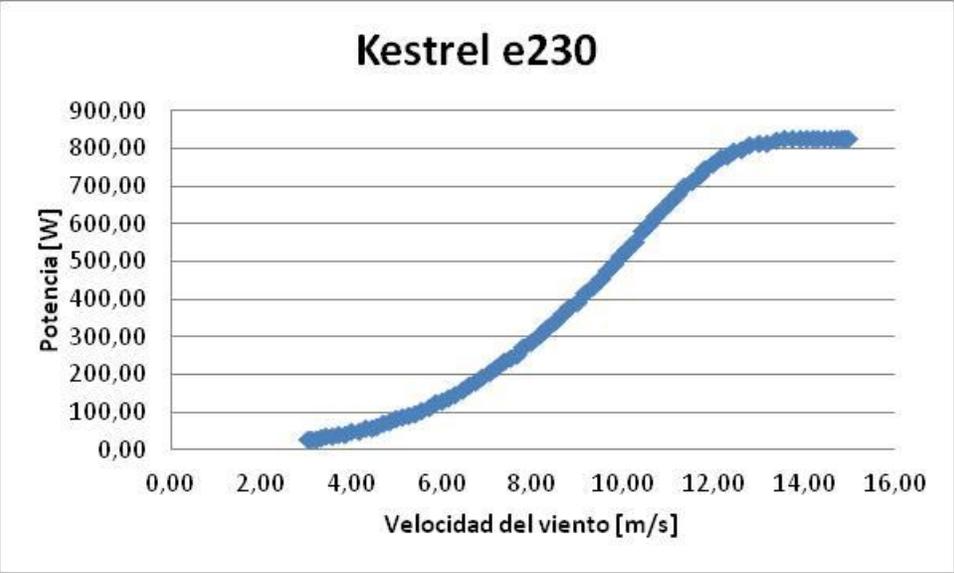


Figura 37. Curva de potencia del Kestrel e300

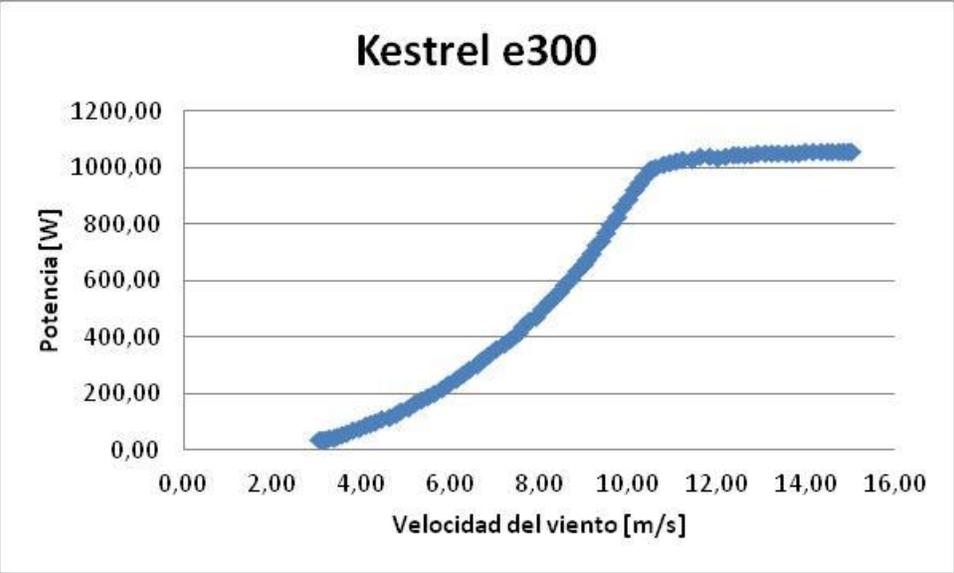


Figura 38. Curva de potencia del Windspot 1.5

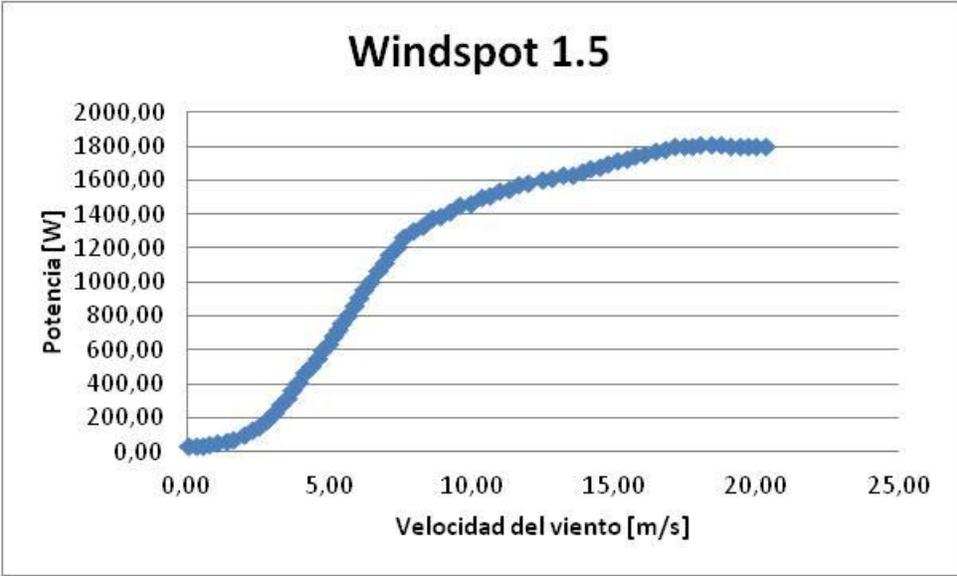


Figura 39. Curva de potencia del Windspot 3.5

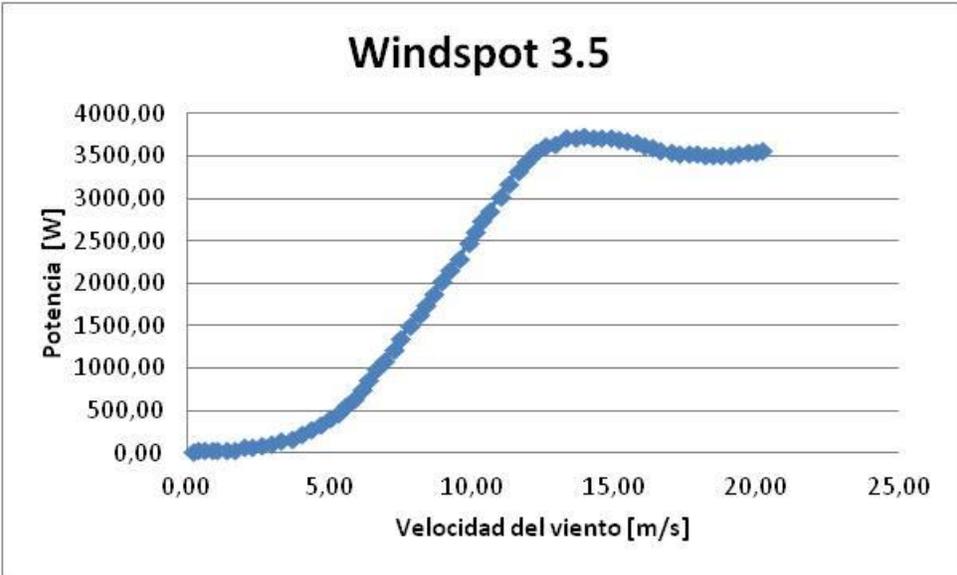


Figura 40. Curva de potencia del Windspot 7.5

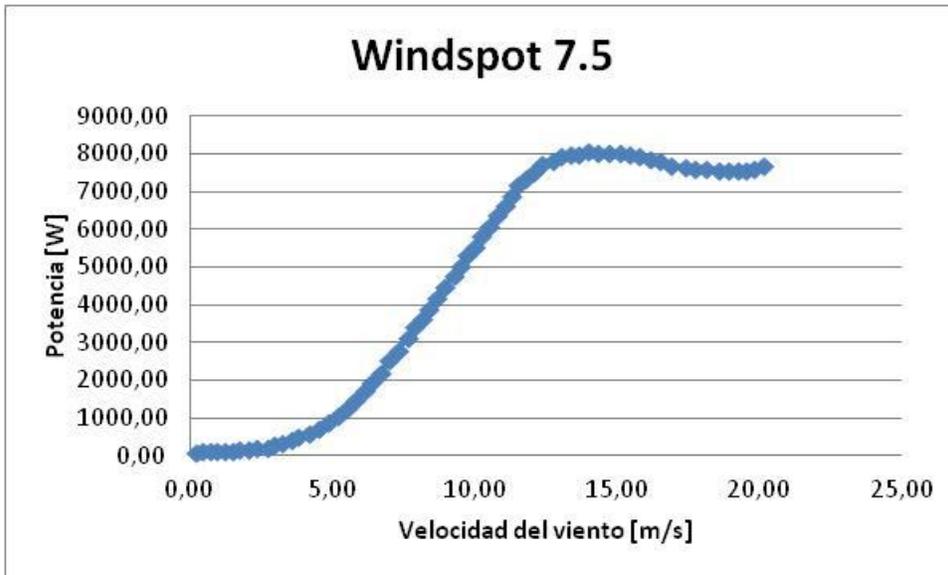


Figura 41. Curva de potencia del Aelos-V 300W

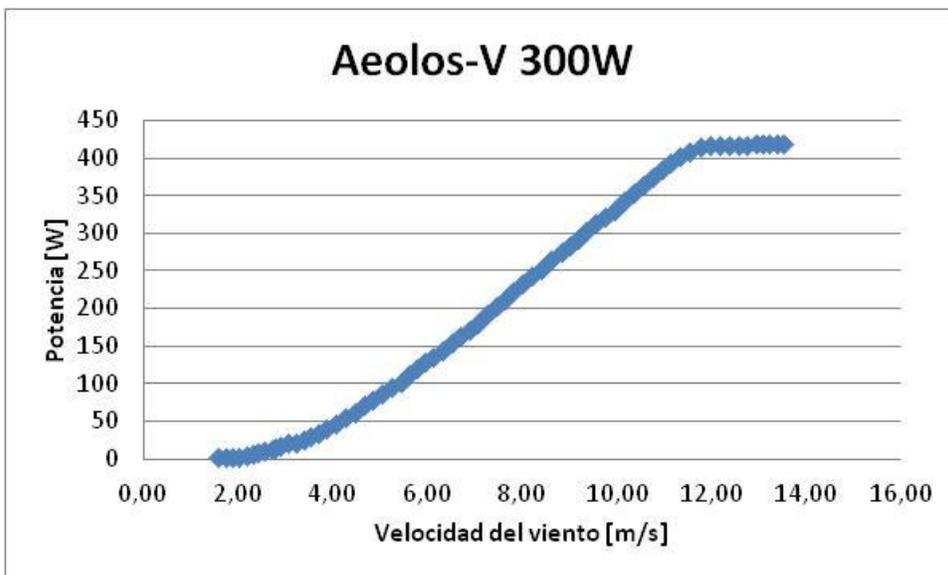


Figura 42. Curva de potencia del Aeolos-V 600W

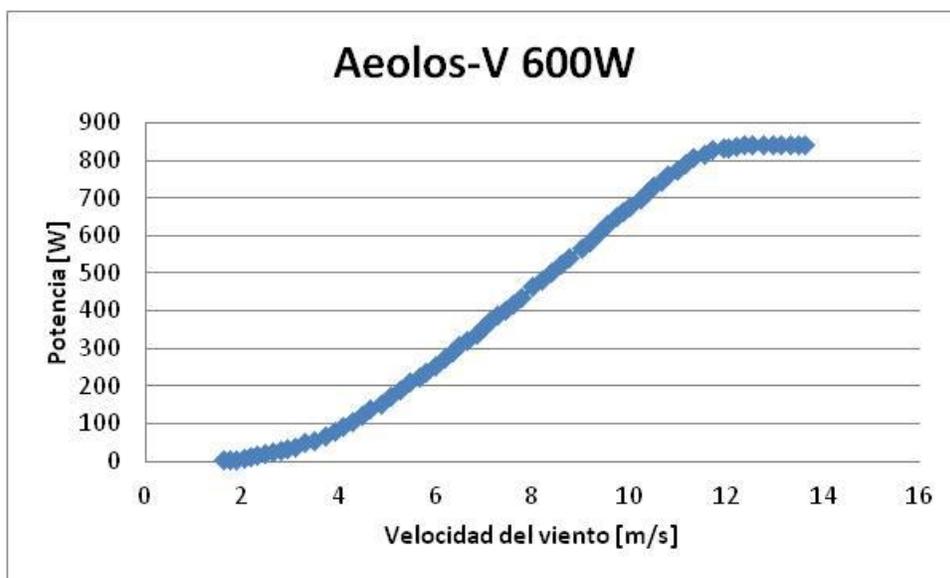


Figura 43. Curva de potencia del Aeolos-V 1kW

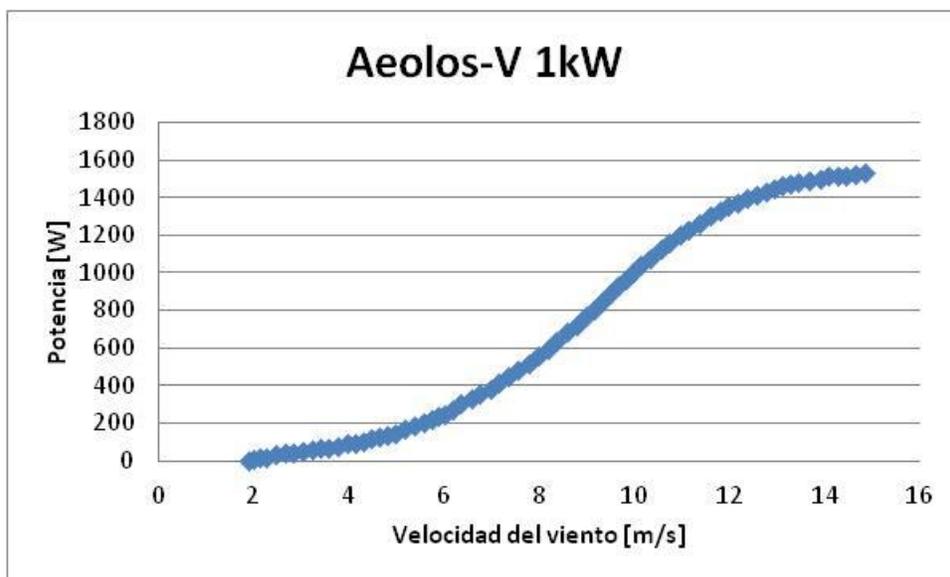


Figura 44. Curva de potencia del Aeolos-V 2kW

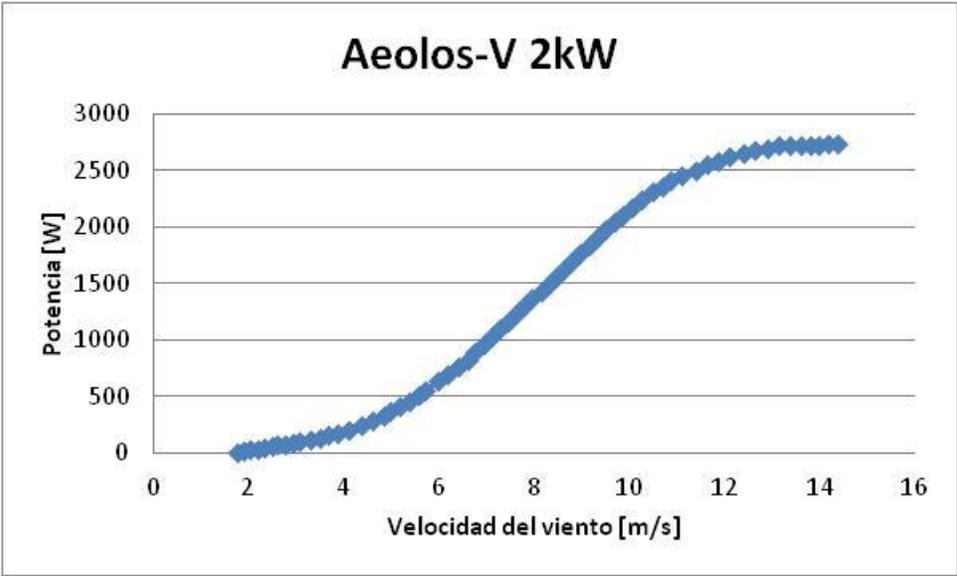


Figura 45. Curva de potencia del Aeolos-V 3kW

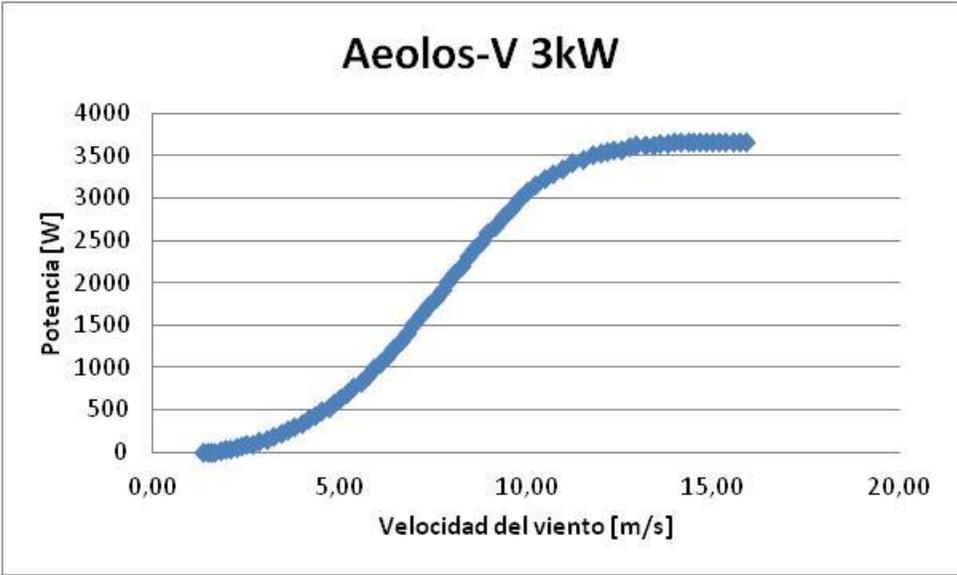


Figura 46. Curva de potencia del Aeolos-V 5kW

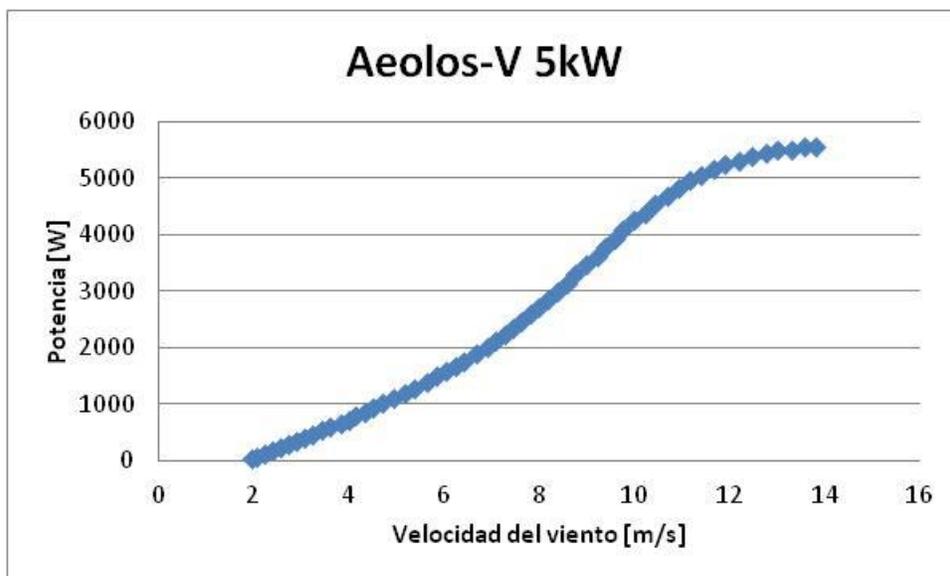


Figura 47. Curva de potencia del Aeolos-V 10kW

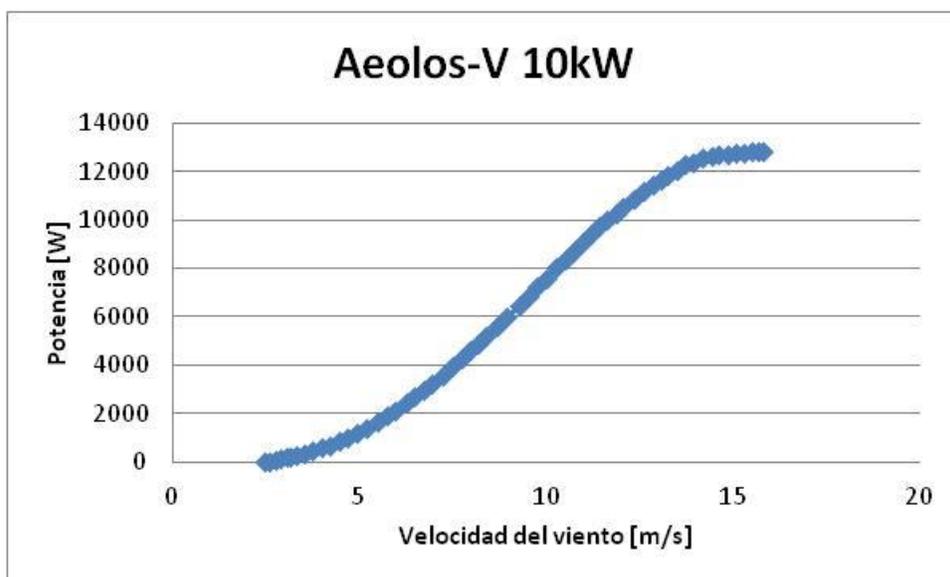


Figura 48. Curva de potencia del Aeolos-H 5Kw

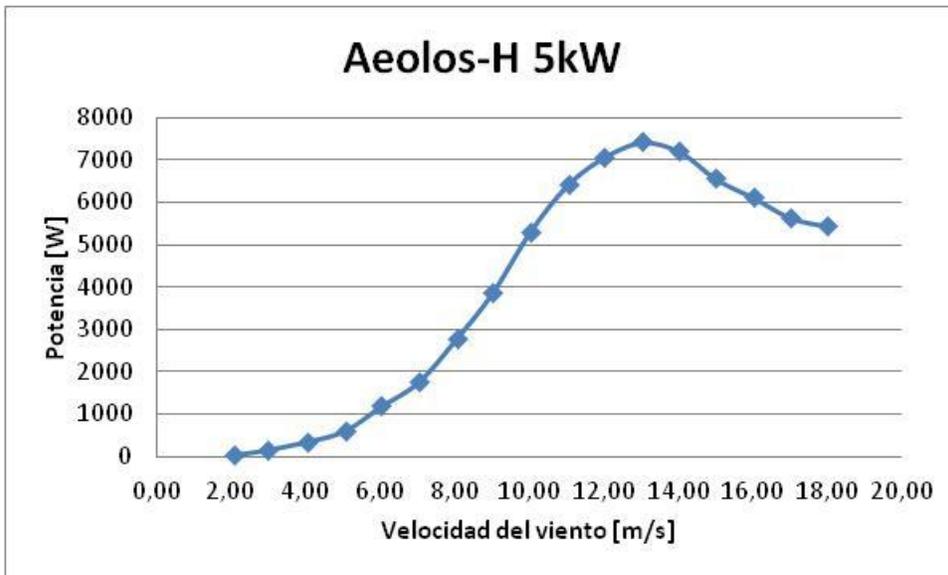


Figura 49. bornay 1500 Vs windspot 1.5 Vs Enair 30

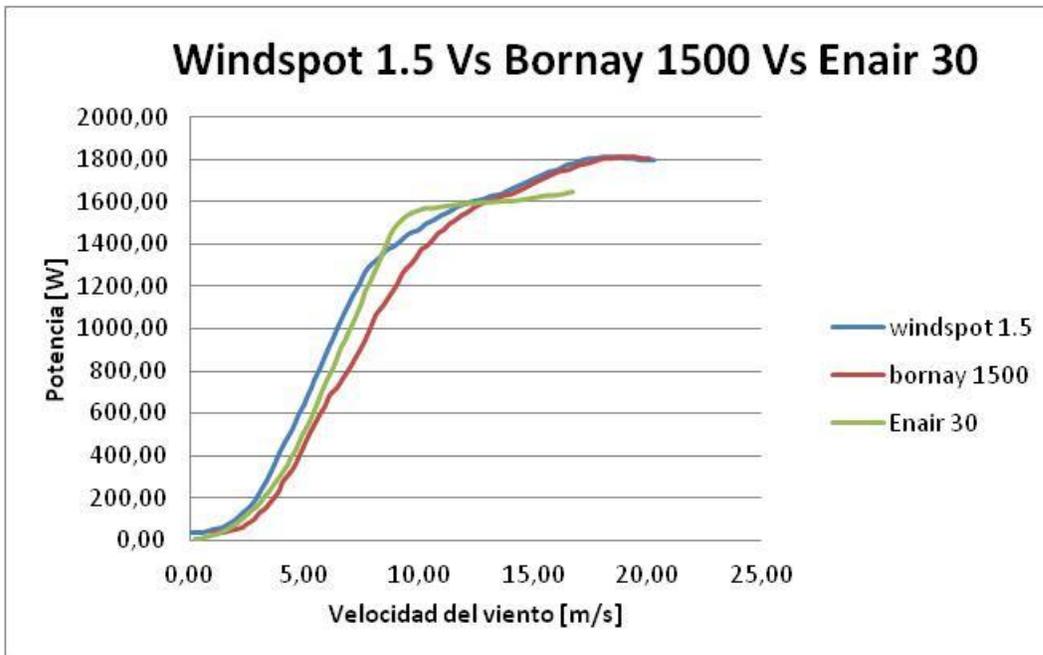


Figura 50. Bornay 3000 Vs Windspot 3.5

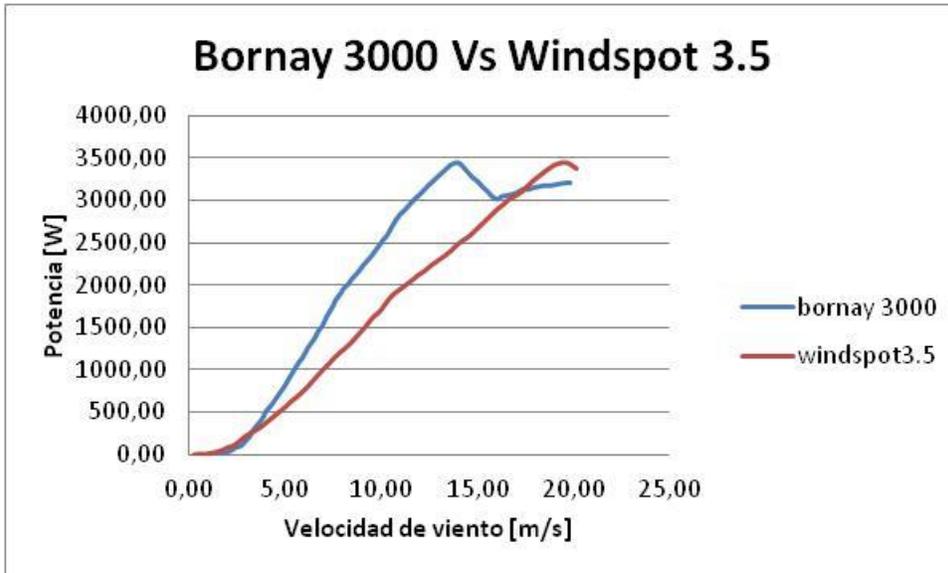


Figura 51. Kestrel e230 Vs Bee 800

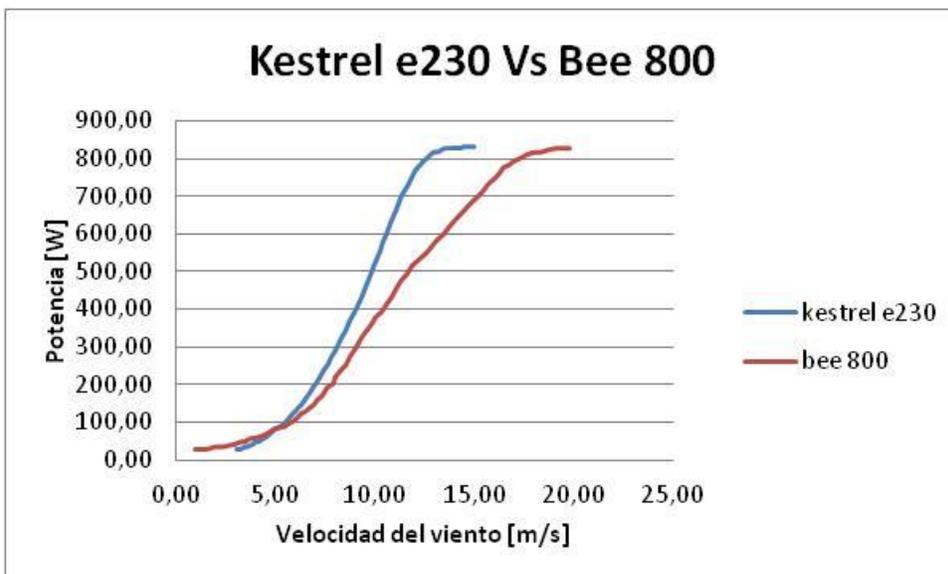


Figura 52. Bornay Vs eddyVs kestrel 160

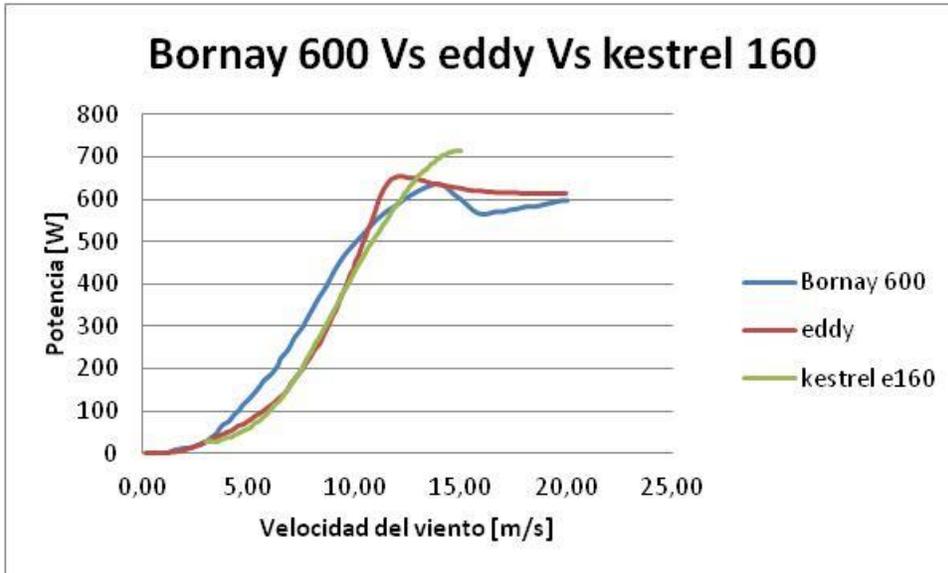


Figura 53. Aeolos-V 1kW Vs Eddy Gt

