



Proyecto final.

# Diseño de sistema energético para módulos de rescate habitacional.

28 de marzo de 2017.

Realizado por:

Agustín Castella.

Ícaro Zambonini.



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



## Índice:

Objetivos.....	3
Definición de problemática y su contexto.....	4
Capítulo 1: La energía eólica.....	19
Capítulo 2: El Viento.....	44
Capítulo 3: Conceptos del rotor.....	65
Capítulo 4: Principios teóricos.....	76
Capítulo 5: Diseño del aspa.....	102
Capítulo 6: Materiales.....	116
Capítulo 7: Selección y diseño de componentes.....	125
Conclusión.....	144
Bibliografía.....	144
Anexo 1.....	146
Anexo 2.....	151
Anexo 3.....	153
Anexo 4.....	155
Anexo 5.....	157
Anexo 6.....	159
Anexo 7 – Planos.....	160



**Objetivos:**

El objetivo de este trabajo final es sentar las bases para la fabricación de un aerogenerador de baja potencia para ser utilizado en las zonas cercanas a la localidad de Mar del Plata. Para ello se realizará un tratamiento estadístico de los datos del viento; con esto se propondrá un pre-diseño de las aspas del aerogenerador y se corroborará la performance del mismo utilizando herramientas del análisis numérico. Una vez se conozcan los parámetros de diseño, se procederá a dimensionar o seleccionar, según corresponda, el resto de los componentes mecánicos que constituyen el sistema de generación.



## **Definición de problemática y su contexto.**

### **Investigación cualitativa.**

Con el término "investigación cualitativa", entendemos cualquier tipo de investigación que produce hallazgos a los que no se llega por medio de procedimientos estadísticos u otros medios de cuantificación. Puede tratarse de investigaciones sobre la vida de la gente, las experiencias vividas, los comportamientos, emociones y sentimientos, así como al funcionamiento organizacional, los movimientos sociales, los fenómenos culturales y la interacción entre las naciones. Algunos de los datos pueden cuantificarse, por ejemplo con censos o información sobre los antecedentes de las personas u objetos estudiados, pero el grueso del análisis es interpretativo. En realidad, la expresión "investigación cualitativa" produce confusión porque puede tener diferentes significados para personas diferentes. Algunos investigadores reúnen datos por medio de entrevistas y observaciones, técnicas normalmente asociadas con los métodos cualitativos. (Strauss y Corbin, 2002)

Existen muchas razones válidas para realizar investigación cualitativa, pero probablemente la más válida para escoger los métodos cualitativos, es la naturaleza del problema que se investiga. Siendo aquellos de naturaleza social especialmente adecuados para su uso.

Las metodologías cualitativas son apropiadas cuando el investigador se propone investigar la construcción social de significados, las perspectivas de los actores sociales, los condicionantes de la vida cotidiana o brindar una descripción detallada de la realidad. (Wainerman y Sautu, 1997)

En los estudios cualitativos el tamaño de la muestra no es importante desde una perspectiva probabilística, pues el interés del investigador no es generalizar los resultados de su estudio a una población más amplia. Lo que se busca en la indagación cualitativa es profundidad. Por lo tanto, se pretende calidad en la muestra, más que cantidad. (Strauss y Corbin, 2002)



## **Recolección y análisis de los datos**

Los principales métodos para recabar datos cualitativos son la observación, la entrevista, los grupos de enfoque, la recolección de documentos y materiales, y las historias de vida.

- ✓ Observación: No es mera contemplación. Implica adentrarse en profundidad a situaciones sociales y mantener un papel activo, así como una reflexión permanente. Estar atento a los detalles, sucesos, eventos e interacciones. Los propósitos esenciales de la observación en la inducción cualitativa son: a) explorar ambientes, contextos subculturas y la mayoría de la vida social; b) describir comunidades, contextos o ambientes; asimismo las actividades que se desarrollan en éstos, las personas que participan de tales actividades y los significados de las mismas; c) comprender procesos, vinculaciones entre personas y sus situaciones o circunstancias, así como los contextos sociales y culturales en los cuales ocurren las experiencias humanas; d) identificar problemas; e) generar hipótesis para futuros estudios. (Hernández Sampieri, 2006)
- ✓ Entrevistas: Se dividen en estructuradas, semiestructuradas y no estructuradas o abiertas. En las entrevistas estructuradas, el entrevistador realiza su labor con base en una guía de preguntas específicas y se sujeta exclusivamente a ésta. Las entrevistas semiestructuradas, por su parte, se basan en una guía de asuntos o preguntas y el entrevistador tiene la libertad de introducir preguntas adicionales para precisar conceptos u obtener mayor información sobre los temas deseados (no todas las preguntas están predeterminadas). Y las entrevistas abiertas se fundamentan en una guía general de contenido y el entrevistador posee toda la flexibilidad para manejarla. (Hernández Sampieri, 2006)

## **Energías Renovables para un Desarrollo Sustentable**

Las siguientes definiciones y afirmaciones se basan en el Informe Especial del grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el cuál fue realizado por cientos de expertos de distintas regiones y disciplinas.



(Edenhofer et al., 2011) Y la mirada económica de Daly (2008) sobre el Desarrollo Sustentable.

El concepto de "Energía Renovable" abarca categorías heterogéneas de tecnologías. Algunos tipos de energía renovable permiten suministrar electricidad y energía térmica y mecánica, y producir combustibles capaces de cubrir las múltiples necesidades de los servicios energéticos. Algunas tecnologías de la energía renovable pueden ser adoptadas en el lugar de consumo (en régimen descentralizado) en medios rurales y urbanos, mientras que otras son implantadas principalmente en redes de suministro de gran tamaño (en régimen centralizado). Aunque es cada vez mayor el número de tecnologías de la energía renovable técnicamente avanzadas que han sido adoptadas en mediana escala, otras se encuentran en una fase menos evolucionada y su presencia comercial es más incipiente, o bien abastecen nichos del mercado especializados.

En la mayoría de los casos, el costo de las tecnologías de la energía renovable ha disminuido, y los adelantos técnicos esperados podrían permitir reducir aún más el costo. En las últimas décadas ha habido importantes avances de las tecnologías de la energía renovable, con la consiguiente reducción de los costos a largo plazo, aunque durante algunos períodos los precios hayan aumentado (debido, por ejemplo, al aumento de la demanda de la energía renovable en exceso de la oferta). La contribución de diferentes elementos impulsores (por ejemplo, la I+D, la economía de escala, el aprendizaje orientado a la implantación, o el aumento de la competencia entre proveedores de la energía renovable) no siempre es perfectamente conocida. Cabe esperar reducciones en los costos, que mejorarían las posibilidades de implantación y, por consiguiente, redundarían en una mitigación del cambio climático. Algunos aspectos importantes en que podrían conseguirse avances tecnológicos son los relativos a los sistemas de producción y suministro de insumos nuevos y mejorados.

## **Energía Eólica**

La energía eólica explota la energía cinética del aire en movimiento. La aplicación de mayor interés para la mitigación del cambio climático consiste en producir



electricidad a partir de grandes turbinas eólicas instaladas en tierra firme, en el mar o agua dulce. Algunas tecnologías de energía eólica en tierra están siendo ya comercializadas y adoptadas en gran escala. Las tecnologías de la energía eólica aguas adentro ofrecen más posibilidades para conseguir avances técnicos. La energía eólica es, en cierta medida, variable e impredecible, pero la experiencia y ciertos estudios detallados en numerosas regiones indican que la integración de la energía eólica no suele tropezar con obstáculos técnicos insuperables.

### **Potencial técnico mundial.**

El potencial técnico mundial<sup>1</sup> de las fuentes de energía renovables no limitará el crecimiento sostenido de las energías renovables. Aunque las estimaciones publicadas son muy diversas, los estudios coinciden en concluir que el potencial técnico mundial total de las energías renovables es considerablemente superior a la demanda mundial de energía. El potencial técnico de la energía solar es el mayor de todas las fuentes de energía renovables. Incluso en las regiones con potenciales técnicos relativamente bajos de todas las fuentes de energía renovables suele haber abundantes oportunidades para fomentar su implementación. A largo plazo y para usos más asiduos, sin embargo, los potenciales técnicos indican la existencia de un límite a la contribución que pueden aportar ciertas tecnologías de la energía renovable. Otros factores (sostenibilidad, aceptación del público, integración de los sistemas y limitaciones de infraestructura, o factores económicos) pueden limitar también la implementación de las tecnologías de la energía renovable.

---

<sup>1</sup> Las definiciones de potencial técnico varían según los autores. En el Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático, el término "potencial técnico" se utiliza en el sentido de la producción de la energía renovable que es posible obtener mediante la implantación integral de tecnologías o prácticas demostradas. No se hace ninguna referencia explícita a los costos, los obstáculos o las políticas. Sin embargo, los potenciales técnicos indicados en las publicaciones y evaluados en el Informe especial pueden estar condicionados por limitaciones prácticas y, cuando es ese el caso, así se ha señalado explícitamente en el informe de base.





## **Efectos del cambio climático**

El cambio climático afectará, tanto en su extensión como en su distribución geográfica, al potencial técnico de las fuentes de energía renovables, aunque las investigaciones sobre la magnitud de esos posibles efectos apenas han comenzado. Dado que las fuentes de energía renovables son en muchos casos dependientes del clima, el cambio climático mundial afectará al acervo de recursos de la energía renovable, aunque la naturaleza y magnitud exactas de esos efectos son inciertas. De todas formas las investigaciones realizadas hasta la fecha parecen indicar que no es previsible que el cambio climático afecte en gran medida al potencial técnico mundial del desarrollo de la energía eólica, aunque sí son de esperar cambios en la distribución regional de los recursos de esa forma de energía. Y con respecto a la energía solar, pese a que el cambio climático influirá previsiblemente en la distribución y variabilidad de la cubierta de nubes, se espera que el efecto de estos cambios sobre el potencial técnico sea, en conjunto, pequeño.

## **Energía renovable y desarrollo sustentable.**

Históricamente, el desarrollo económico ha estado estrechamente correlacionado con un mayor consumo de energía y un aumento correlativo de la contaminación, y las energías renovables pueden ayudar a romper esa correlación, contribuyendo al desarrollo sostenible. Aunque la contribución exacta de la energía renovable al desarrollo sostenible debe ser evaluada en el contexto de cada país, las energías renovables ofrecen la oportunidad de contribuir al desarrollo social y económico, a un mayor acceso a las fuentes de energía, a un suministro de energía seguro, a la mitigación del cambio climático y a la reducción de los impactos medioambientales y sanitarios negativos.

En condiciones favorables, es posible economizar costos en comparación con el uso de las energías no renovables, particularmente en zonas apartadas y en medios rurales pobres que carecen de acceso centralizado a la energía. En muchos casos, es posible reducir el costo de la importación de la energía



adoptando tecnologías de la energía renovable en pequeña escala que sean ya competitivas. Las energías renovables pueden influir de forma positiva en la creación de empleo, aunque los estudios disponibles difieren con respecto a la magnitud del empleo neto.

Las energías renovables pueden ayudar a conseguir un más rápido acceso a la energía, particularmente para las 1.400 millones de personas que no tienen acceso a la electricidad (Edenhofer et al., 2011). Los niveles básicos de acceso a los servicios energéticos modernos pueden reportar beneficios importantes a nivel de la comunidad o de los hogares. En muchos países en desarrollo, las redes descentralizadas que explotan energías renovables y la incorporación de estas a redes centralizadas han ampliado y mejorado el acceso a la energía. Además, las tecnologías de la energía renovable no eléctricas ofrecen también oportunidades para modernizar los servicios energéticos, por ejemplo, utilizando la energía solar para calentar agua o secar cultivos, biocombustibles para el transporte, tecnologías modernas de biogás y biomasa para la calefacción, la refrigeración, la cocina y el alumbrado, o la energía eólica para el bombeo de agua. El número de personas que carecen de acceso a unos servicios energéticos modernos no variará a menos que se adopten políticas nacionales a tal efecto, que podrían ir acompañadas o complementadas por una asistencia internacional adecuada.

Las opciones de la energía renovable pueden contribuir a un suministro de energía más seguro, aunque es necesario tener en cuenta los problemas específicos que plantea la integración. La implantación de la energía renovable podría atenuar la vulnerabilidad a las alteraciones del suministro y a la volatilidad de los mercados si aumenta la competencia y se diversifican las fuentes de energía. Ciertos estudios basados en escenarios indican que los problemas de seguridad del suministro de energía podrían prolongarse en el futuro a menos que se introduzcan mejoras tecnológicas en el sector del transporte. En ocasiones, el perfil de la generación variable que presentan ciertas tecnologías de la energía renovable hace necesario adoptar medidas técnicas e institucionales adecuadas a las condiciones locales, con el fin de asegurar la fiabilidad del suministro de energía.

## **Definición del contexto y su problemática**

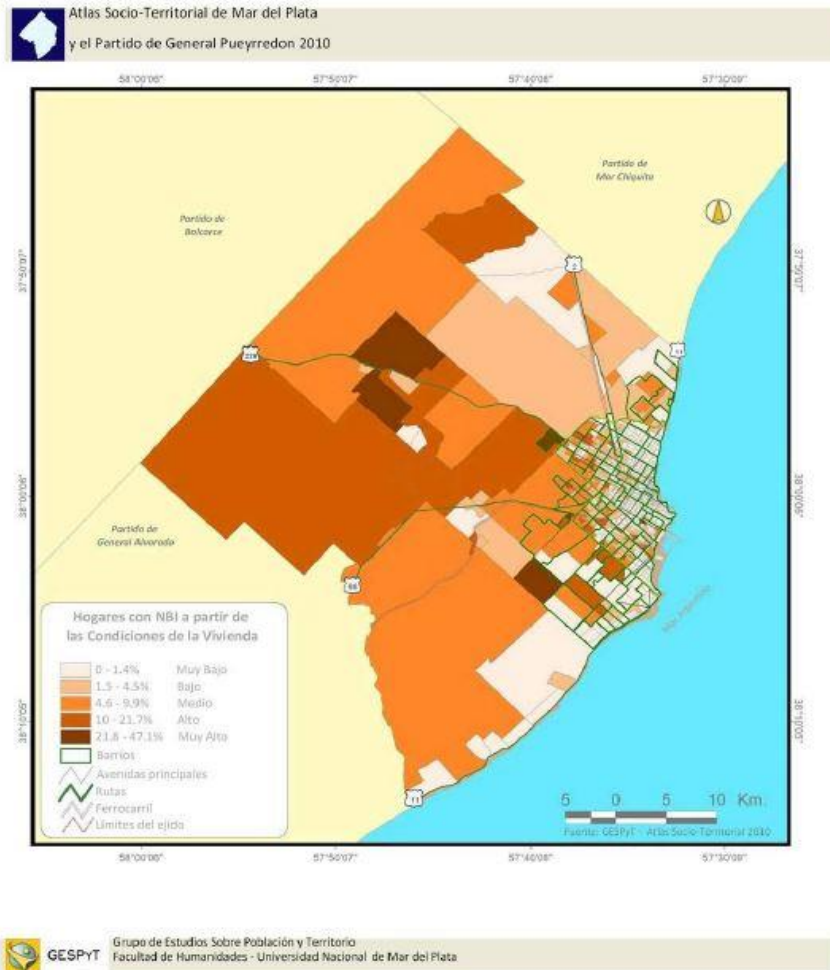
Los miembros del Programa "Hábitat y Ciudadanía" visitan el Barrio todos los jueves por la tarde, lo que genera una constancia en su trabajo, facilitando el ingreso a las viviendas y la interacción con los vecinos. Los autores se acoplaron a colaborar con el grupo que les permitió tener acceso a datos y contactos, internalizándose en la realidad del entorno bajo estudio.

Para identificar la necesidad a solucionar y su contexto, se optó por un método cualitativo teniendo en cuenta la naturaleza social del problema a investigar. Se utilizó la técnica de Observación Directa y se realizaron Entrevistas a informantes calificados del medio en estudio.

Contexto de estudio: barrio Nuevo Golf.

En las visitas al sector en estudio se realizaron anotaciones describiendo el Barrio como resultado de la Observación Directa e interacciones con los residentes del mismo. Se consiguió un grado de confianza con las personas que permitió conocer las dificultades de su cotidianeidad, sus necesidades y características del entorno.

El Barrio de Nuevo Golf es un asentamiento que data del año 2000, ubicado entre las calles Av. Mario Bravo, Posadas, Luissandroni, A. Giannelli, Cabo Corrientes y Laguna de los Padres. Al sur del barrio Santa Celina, en un borde entre los últimos barrios del tejido urbano y las áreas rurales del Sur. En este sector las características generales del hábitat y las viviendas muestran carencias estructurales y de servicios esenciales: sólo cuentan con el servicio de agua potable y el trazado de las calles internas del barrio es de tierra e irregular. Entre las situaciones más críticas existen numerosas viviendas de chapa y madera, que se encuentran en estado de emergencia. En el mapa de la Figura 0.1 se puede observar como el índice de Hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) a partir de las Condiciones de la Vivienda para el Barrio Nuevo Golf se encuentra entre 10% y 21.7%, nivel alto en comparación al resto de la ciudad de Mar del Plata. (Ispizua y Melián, 2015)



**Figura 0.1 – Hogares con NBI a partir de las Condiciones de la Vivienda**

Fuente: Grupo de Estudios sobre Población y Territorio, Departamento de Geografía Facultad de Humanidades - Universidad Nacional de Mar del Plata 2010.

### **Entrevistas a Informantes Calificados.**

Se utilizó la técnica de entrevistas semiestructuradas y se entrevistó a 4 informantes claves del medio en estudio:

Héctor Mario Peralta: Vecino y Presidente de la Sociedad de Fomento del Barrio Nuevo Golf.



Elisa Segovia: Vecina y Emprendedora Social productora de bloques de tierra cemento y polvo de piedra utilizados por los vecinos del Barrio.

Andrea Mansilla: Vecina y Fundadora del Comedor "xxx" que brinda merienda y comida todos los jueves.

Muchi: Vecino del Barrio Nuevo Golf.

Para la recolección de datos se realizó un modelo de entrevista flexible que abordó los aspectos principales del objetivo del proyecto de investigación: conocer las necesidades reales de los habitantes del sector, sus prioridades y validar la hipótesis inicial sobre posibles problemas energéticos.

Las entrevistas fueron llevadas a cabo en el mismo medio en estudio, tuvieron una duración aproximada de 15 minutos y se solicitó permiso para grabarlas, explicando el objetivo de las mismas. Se guió a los entrevistados a hablar espontáneamente, introduciendo los aspectos del guión que no se hubieran tratado. Se considera que la cantidad de entrevistas realizadas fue suficiente para cubrir los objetivos de la investigación.

Modelo de entrevista:

A continuación se listan las preguntas utilizadas como base para disparar los temas de interés en las entrevistas realizadas:

Nombre completo del entrevistado;

Cantidad de habitantes de la vivienda;

Servicios con los que cuenta;

Necesidad prioritaria de su grupo familiar;

(Si tiene servicio de energía eléctrica) ¿Sufre cortes en el suministro?; ¿A qué se deben?; ¿Cada cuánto suceden y cuál fue la máxima cantidad de días sin servicio?;

(Si tiene servicio de energía eléctrica) ¿Cuáles son las tres cosas más importantes que continúen funcionando durante un corte de luz?;

¿Tienen luminarias públicas en la calle?;

¿Es útil un equipo que provea una solución energética básica?; ¿Colaboraría en la instalación y mantenimiento del mismo?;

¿Recibiría una capacitación sobre el uso del equipo?;



¿Cómo le parece que el resto de los vecinos del barrio recibirían al proyecto?.

Análisis de la información obtenida:

Las 4 entrevistas realizadas tuvieron como base las mismas preguntas, lo que permitió encontrar puntos en común entre ellas. Teniendo en cuenta las conversaciones efectuadas durante las entrevistas, se llegó a las siguientes conclusiones sobre la situación de los habitantes del Barrio Nuevo Golf:

Vive un promedio de 5 personas por vivienda.

Cuentan con servicio de agua potable en todo el barrio y energía eléctrica en algunos sectores.

La necesidad prioritaria es Trabajo.

“En 2014 un censo del Barrio realizado por la Universidad Nacional dio que el 47% de los vecinos se encontraban desocupados. Probablemente ese número haya aumentado” - Héctor Mario Peralta

Se sufren cortes en el servicio de energía eléctrica y problemas de baja tensión. Los cortes se deben mayoritariamente a cuestiones climáticas, pero también es una realidad que algunos vecinos realizan conexiones clandestinas que sobrecargan la red. La frecuencia y duración con la que suceden estos cortes tienen mucha variabilidad, siendo la duración histórica máxima de tres días.

“No tiene una frecuencia, puede cortarse una vez en seis meses o cinco veces en una semana cuando hay tormenta” - Elisa Segovia

Según los entrevistados las tres cosas más importantes que continúen funcionando durante un corte de luz son: la heladera (en las viviendas que poseen una) para mantener refrigerados alimentos y medicamentos; iluminación para poder realizar las tareas cotidianas y por seguridad; y comunicación (cargar dispositivos móviles) ante cualquier emergencia.

En el sector relevado hay luminarias públicas pero al estar conectadas a la misma Fase del tendido eléctrico, cuando hay un corte en el sistema domiciliario también se cortan las farolas del alumbrado público.

Los entrevistados se mostraron muy entusiasmados con la instalación de un equipo que provea una solución energética básica, colaborando en su instalación y mantenimiento y aceptarían recibir la capacitación necesaria.



“Si, estaría buenísimo. Tanto por seguridad como comodidad por los chicos si quieren ir al baño o estudiar y para el exterior” – Andrea Mansilla

En cuanto al resto del Barrio se cree que se sumarían al Proyecto.

“Lo nuevo siempre atrae a las personas. Con el tiempo el funcionamiento o no del equipo es lo que los mantiene o los aleja” - Elisa Segovia

Por lo tanto, como conclusión general de las entrevistas a los vecinos del Barrio Nuevo Golf, se validó la hipótesis inicial sobre problemáticas energéticas en el sector.

### **Problemática a solucionar.**

Actualmente hay familias en sectores de la ciudad que no cuentan con servicio eléctrico o por características de su entorno sufren cortes en el suministro de energía. Necesitan con urgencia una solución energética básica apta para instalar en un módulo de rescate habitacional. Esta solución debe ser independiente del proveedor del servicio de energía eléctrica (EDEA) y, en lo posible sus componentes deben estar disponibles en el mercado.

### **Solución planteada a desarrollar.**

Se plantea una solución energética básica para un módulo de rescate habitacional, basada en la utilización de energías renovables debido a sus ventajas para un Desarrollo Sustentable. Como resultado de la interacción con las personas del Barrio, se define por solución básica aquella que le permita a la familia contar con iluminación y recargar baterías de teléfonos móviles.

El sistema no sólo funcionará durante los cortes, sino todo el tiempo; con esto se busca independizar la solución a brindar de toda variable dependiente del proveedor del servicio energético (frecuencia y duración de cortes, fluctuaciones en la tensión, etc). Por lo tanto, éste podrá ser utilizado en cualquier zona cuyas condiciones meteorológicas (viento y radiación solar) sean compatibles a las de diseño.

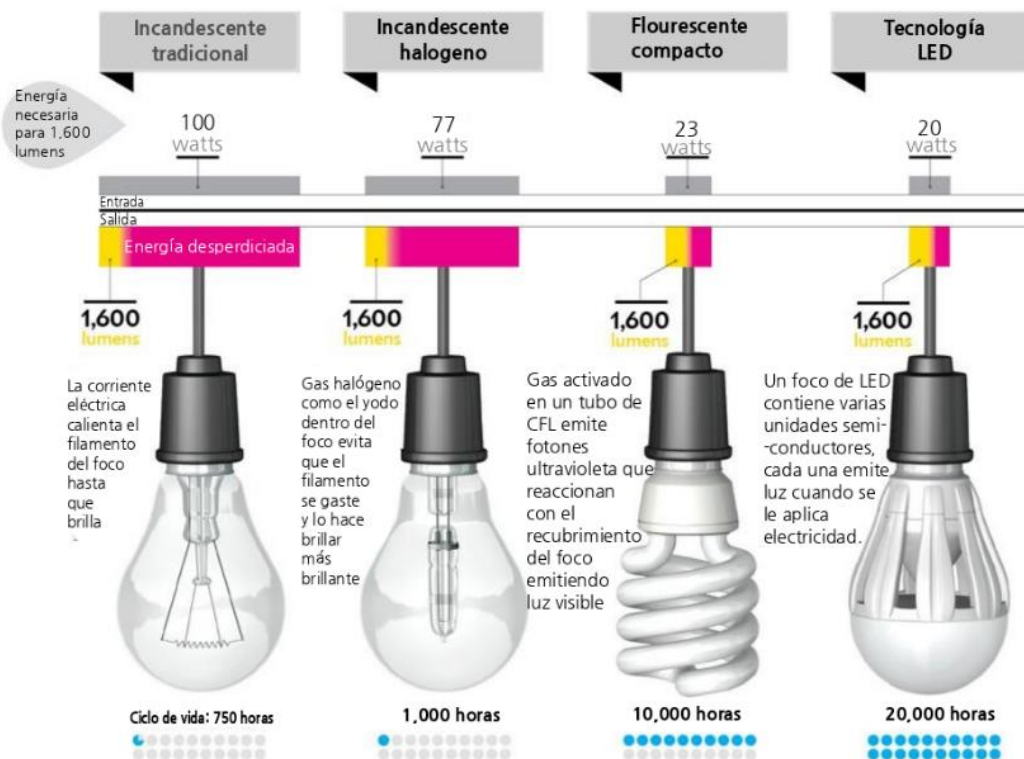
## Tecnología de iluminación.

En el mercado existen diversas tecnologías de iluminación, una gruesa división se podría hacer en cuatro grupos: Incandescente tradicional, Incandescente halógeno, Fluorescente compacto y Tecnología LED.

Para nuestro caso particular tendremos en cuenta dos variables de gran peso: Eficiencia y Duración.

- ✓ Eficiencia: Tiene en cuenta la potencia en vatios que consume el artefacto en relación con la emisión de luz en lúmenes.
- ✓ Duración: Tiene en cuenta la cantidad de horas que el artefacto funcionará de manera correcta y la cantidad de ciclos de encendido/apagado antes de que empiece a fallar.

En la Figura 0.2 se comparan los cuatro grupos de tecnologías de iluminación para una misma cantidad de flujo luminoso (1600 lúmenes). Donde se puede observar que tanto por Eficiencia como por Duración la mejor opción a utilizar es la Tecnología LED.



**Figura 0.2 – Comparación de Tecnologías de Iluminación.**





Fuente: TRC Electrónica, extraído el 4 de Julio de 2016 de <http://trcelectronica.com.ar>

Además se pueden enumerar las siguientes ventajas de la Tecnología LED:

Elevada resistencia a las vibraciones u otras tensiones mecánicas;

Excelente rendimiento a bajas temperaturas;

La luz no parpadea;

Menores emisiones de CO<sub>2</sub>;

No contiene gases ni metales peligrosos para el medio ambiente;

No emite radiaciones infrarrojas (IR) ni ultravioleta (UV);

Seguridad eléctrica;

Resistentes a encendidos y apagados;

Reducción del mantenimiento de la instalación.

Por lo tanto en el diseño del sistema se debe tener en cuenta que las luminarias serán de Tecnología LED y sus respectivos consumos de energía.

### **Cálculo de demanda energética a satisfacer.**

La solución será destinada para un módulo habitacional con las siguientes características: una cocina-comedor de 2m x 3m (6m<sup>2</sup>), una habitación de 3m x 3m (9m<sup>2</sup>) y un baño de 2m x 2m (4m<sup>2</sup>); medidas promedio de una vivienda de dos adultos y tres menores en el sector de estudio. Y el sistema a diseñar proveerá:

Iluminación exterior e interior, con lámparas LED en las que se busca un uso racional de las mismas, siempre teniendo en cuenta las necesidades de los destinatarios.

En el exterior se utilizarán lámparas controladas por un dispositivo fotosensible que optimice su uso. Teniendo durante el invierno, en la condición más desfavorable del año, un uso máximo de 14 horas por día. Además la iluminación exterior en el patio trasero se conectará a un sensor de presencia, limitando considerablemente su consumo.



En el interior también se utilizarán lámparas LED en la cocina y comedor, con un promedio de 6 horas de uso por día, y para el dormitorio y baño con un promedio de 3 horas de uso por día.

Además el sistema permitirá recargar baterías de teléfonos móviles, las cuales necesitan en promedio 5V y 600mA, dando un total de 3W. Se instalarán dos cargadores que permitirán cargar al mismo tiempo dos dispositivos durante 2 horas por día.

Para calcular la cantidad de lámparas por sector y su potencia primero se debe conocer la Intensidad Mínima de Iluminación (medida en lux) para cada sector, de acuerdo a las actividades que se desarrollarán en ellos. Para esto se tendrán en cuenta los valores presentes correspondiente a los artículos 71 a 84 de la Reglamentación aprobada por Decreto N° 351/79 (CAPITULO 12: Iluminación y Color). De acuerdo a este las intensidades mínimas de iluminación en una vivienda son:

Cocina-Comedor: 200 lux.

Habitación: 200 lux.

Baño: 100 lux.

Exterior: 100 lux.

Conociendo los lux mínimos de cada sector y sus áreas se calculan los lúmenes (lm) necesarios a entregar por las lámparas.

Cocina-Comedor:  $200 \text{ lux} \times 6 \text{ m}^2 = 1200 \text{ lm}$ .

Habitación:  $200 \text{ lux} \times 9 \text{ m}^2 = 1800 \text{ lm}$ .

Baño:  $100 \text{ lux} \times 4 \text{ m}^2 = 400 \text{ lm}$ .

Exterior:  $100 \text{ lux} \times 20 \text{ m}^2 = 2000 \text{ lm}$ .

Al realizar un relevamiento de los productos de Iluminación LED en el mercado se descubrió que hay fabricantes de renombre: Philips, Osram, Sylvania, General Electric, etc. Estos fabricantes no solo se aseguran de fabricar bombillas y productos LED de máxima calidad, sino que también tienen que asegurarse una imagen y una reputación intachables. Además de los ya conocidos existen otros fabricantes como Vector, LedAR, Verbatim, BAW, INTERELEC, SICA y Lumenac. Aunque estos últimos tienen un menor costo respecto de los primeros no ofrecen la garantía de funcionamiento necesaria.



Por lo tanto se utilizarán las siguientes lámparas de marca OSRAM (hojas de datos en el anexo v) en cada sector, teniendo en cuenta que poseen una Clase de Eficiencia Energética de A+ y una Vida útil nominal de 25.000 horas:

Cocina-Comedor: 1 de 806 lm (9W) y 1 de 470 lm (6W) = 1276 lm (15W)

Habitación: 4 de 470 lm (6W) = 1880 lm (24W)

Baño: 1 de 470 lm (6W)

Exterior: 2 de 1055 lm (10W) = 2110 lm (20W)

Para la selección de la cantidad de lámparas y su potencia se tuvo en cuenta la comodidad de su utilización. De esta forma se planifica ubicar una lámpara en la Cocina (9W) y otra directamente sobre la mesa (6W). Mientras que en la habitación, al ser la misma compartida por todos los integrantes de la familia, es importante lograr independencia en su uso, optando por colocar 4 lámparas de la misma potencia (6W). Por último en el exterior se podrá colocar una lámpara junto a la puerta de ingreso a la vivienda y otra en el patio trasero para mayor seguridad.

En la siguiente Tabla 0.1 se muestra el cálculo del consumo a satisfacer con el sistema a diseñar:

Elementos	Cantidad (u)	Potencia (W/u)	Horas uso (h/día)	Consumo por día (Wh/día)
Lámpara LED Exterior	1	10	14	140
Lámpara LED Exterior	1	10	2	20
Sensor Presencia	1	0,5	14	7
Lámpara LED comedor	1	6	6	36
Lámpara LED cocina	1	9	6	54
Lámpara LED habitación	4	6	3	72
Lámpara LED baño	1	6	3	18
Cargador Dispositivos móviles	2	3	2	12
Consumo total por día (Wh/día):				359

**Tabla 0.1. Cálculo del consumo total por día.**



## **Capítulo 1: La energía eólica.**

### **1.1 Aerogeneradores: inicios y evolución.**

Hasta la aparición de la máquina de vapor en el siglo XIX, la única energía de origen no animal para realización de trabajo mecánico era la proveniente del agua o del viento.

Los molinos de viento existían ya en épocas remotas. A través de grabados pertenecientes a civilizaciones muy antiguas, se ha podido comprobar que el aprovechamiento del viento con fines energéticos se remonta a por lo menos 3.000 años antes de la era cristiana. Persia, Irak, Egipto y China disponían de máquinas eólicas muchos siglos antes de J.C. Se trataba de primitivas máquinas eólicas.

Los molinos de viento fueron utilizados en Europa en la Edad Media, comenzando a extenderse por Grecia, Italia y Francia. En Europa se imponían fundamentalmente los molinos de eje horizontal, mientras que los molinos orientales eran de eje vertical.

Se encuentran abundantes ejemplos de la importancia que los molinos de viento llegaron a tener en diversas aplicaciones. Como ejemplo relevante los literarios molinos castellanos utilizados para la molienda y los no menos conocidos molinos holandeses usados desde 1430 para la desecación de los polders, todos ellos de eje horizontal.

En el siglo XVIII los holandeses tenían instalados y en funcionamiento 20.000 molinos, que les proporcionaban una media de 20[kW] cada uno, energía nada despreciable para las necesidades de aquella época.

En 1724 Leopold Jacob proyecta un molino de ocho palas que mueve una bomba de pistón; en 1883 aparece el pequeño multipala americano diseñado por Steward Perry. Este molino, de unos 3 metros de diámetro utilizado para bombeo, ha sido el más vendido de la historia, llegándose a fabricar más de seis millones de unidades, de las que existen varios miles en funcionamiento. Como precursor de los actuales aerogeneradores, es necesario citar la aeroturbina danesa de Lacourt (1892), máquina capaz de desarrollar entre 5 y 25[kW].



Hasta ese momento, las velocidades típicas que se habían conseguido con los multipala eran de dos veces la del viento, mientras que los molinos clásicos habrían funcionado con velocidades en el extremo de la pala del mismo orden de magnitud que la del viento.

La teoría de la aerodinámica se desarrolla durante las primeras décadas del siglo XX, permitiendo comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas de las turbinas. Los mismos científicos que la desarrollaron para usos aeronáuticos Joukowski, Drzewiechy y Sabinin en Rusia; Prandtl y Betz en Alemania; Constantin y Enfield en Francia, etc, establecen los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de turbinas eólicas. En el año 1910 Dinamarca tenía instalada una potencia eólica de 200[MW].

En los años 20 se empiezan a aplicar a los rotores eólicos los perfiles aerodinámicos que se habían diseñado para las alas y hélices de los aviones. En 1927, el holandés A.J. Dekker construye el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica, capaz de alcanzar velocidades en punta de pala, cuatro o cinco veces superiores la del viento incidente.

Betz demostró en su famoso artículo "Die Windmuhlen im lichte neverer Forschung", (Berlín 1927), que el rendimiento de las turbinas aumentaba con la velocidad de rotación y que, en cualquier caso, ningún sistema eólico podía superar el 60% de la energía contenida en el viento. Por lo tanto, los nuevos rotores debían funcionar con elevadas velocidades de rotación para conseguir rendimientos más elevados. La teoría demostró también que cuanto mayor era la velocidad de rotación menor importancia tenía el número de palas, por lo que las turbinas modernas podían incluso construirse con una sola pala sin que disminuyera su rendimiento aerodinámico significativamente.

A pesar de los esfuerzos realizados y de la mayor eficacia de las nuevas turbinas, las dificultades de almacenamiento y las desventajas propias de la irregularidad de los vientos fueron la causa de que las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento como recurso energético continuaran declinando hasta el final de la Primera Guerra.

Los combustibles fósiles, y en particular el petróleo, empezaban a imponerse como la principal e insustituible fuente de energía.



Como una consecuencia inmediata de la Primera Guerra, con una fuerte expansión de la electricidad como sistema energético universal y escasez de recursos para importar petróleo, las turbinas eólicas continuaron desarrollándose por dos caminos diferentes. Por un lado, hacia el diseño, construcción y comercialización de aerogeneradores de baja potencia, capaces de generar electricidad en áreas rurales más o menos aisladas, a las que todavía no habían llegado las redes de electrificación. Por otro, y a la sombra de una industria aeronáutica en pleno desarrollo, hacia el diseño y construcción de grandes plantas eólicas capaces de generar electricidad a gran escala.

Durante este período fueron innumerables los trabajos realizados sobre plantas eólicas de gran potencia en Europa y USA, centrando los programas eólicos su interés en aspectos diferentes como, la evaluación de los recursos disponibles, diseño y construcción de plantas de gran potencia, a la vez que intentó crear incentivos que motivasen a la iniciativa privada a fabricar y comercializar pequeñas turbinas con funcionamiento autónomo, que permitiesen cubrir las necesidades de explotaciones agrícolas o industriales situadas en zonas apartadas.

El segundo período de desarrollo de la energía eólica comienza en los años cincuenta y se prolonga hasta mediados de los sesenta en que, una vez restablecida la economía internacional, acaba perdiendo interés al no resultar sus precios competitivos con los de los combustibles fósiles convencionales; y el bajo precio del petróleo, hasta 1973, cerró el camino al desarrollo de la tecnología eólica. A esta etapa siguió otra de precios del petróleo altos que se prolongó hasta 1986 y que favoreció el desarrollo de los aerogeneradores eólicos como fuente de energía alternativa, renovable y no contaminante, capaz de producir electricidad a precios competitivos.

El número de aerogeneradores instalados a finales de 1991 era superior a los 21.000, según datos de la Agencia Internacional de la Energía, con una potencia de 2.200[MW], equivalente a dos centrales nucleares de gran potencia, y de los cuales la mitad estaban instalados en los parques eólicos de California.

En los últimos años se han podido construir aerogeneradores con potencias mayores, desarrollados por las grandes compañías de la industria aeronáutica,

que aumentan la fiabilidad de las máquinas y reducen costes, convergiendo hacia nuevas generaciones de aeroturbinas de 500[kW] a 1,2[MW], lo que demuestra el alto grado de madurez alcanzado por esta tecnología. La fabricación de pequeñas máquinas ha ido perdiendo interés en países con redes de distribución de electricidad muy extendidas.

## 1.2 Aerogeneradores actuales:

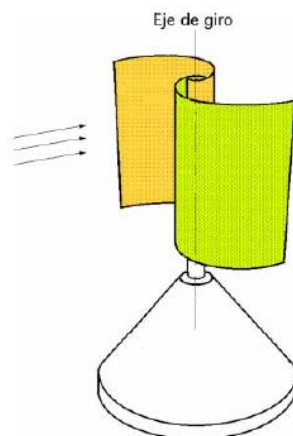
El campo de aplicación de la generación eólica es muy amplio. Se construyen desde aerogeneradores particulares para instalación residencial de unos 200[W], hasta enormes máquinas eólicas de potencias superiores a 1[MW]. De hecho, puede citarse el prototipo Haliade 150 que posee 150[m] de diámetro y estando ubicado a una altura de 176[m] entrega 6[MW] de potencia.

En la actualidad se utilizan tanto generadores de eje vertical como de eje horizontal para baja potencia. En cambio para potencias elevadas, en la generación para la venta de energía eléctrica, se usan únicamente los generadores de eje horizontal, sobre los cuales hubo grandes avances.

### Máquinas eólicas de eje vertical

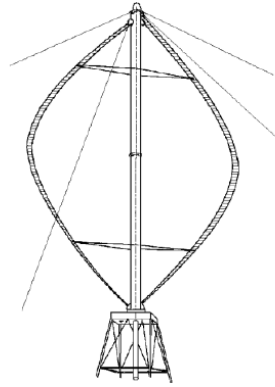
Entre las máquinas eólicas de eje vertical se pueden citar:

**a) El aerogenerador Savonius**, Figura 1.2.1, que puede arrancar con poco viento, siendo muy sencilla su fabricación; tiene una velocidad de giro baja y su rendimiento es relativamente malo.



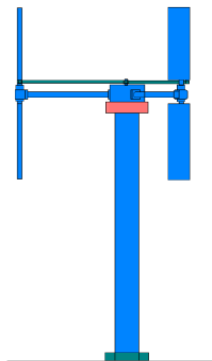
**Figura 1.2.1. Esquema general de un aerogenerador tipo Savonius.**

**b) El aerogenerador Darrieux o de catenaria**, Figura 1.2.2, requiere para un correcto funcionamiento, vientos de 4 a 5[m/s] como mínimo, manteniendo grandes velocidades de giro y un buen rendimiento; se construyen con 2, 3 y 4 láminas.



**Figura 1.2.2. Esquema general de un aerogenerador tipo Darrieux.**

**c) El molino vertical de palas tipo Giromill o Ciclogiro**, Figura 1.2.3, que deriva del Darrieux; tiene entre 2 y 6 palas.



**Figura 1.2.3. Esquema general de un aerogenerador tipo Giromill.**

El modelo Darrieux arranca con dificultad, mientras que el Savonius se puede poner en funcionamiento con una pequeña brisa; debido a ello se puede hacer una combinación sobre un mismo eje de ambas máquinas de forma que un rotor Savonius actúe durante el arranque (que funciona por el principio de arrastre) y un rotor Darrieux sea el que genere la energía para mayores velocidades del viento (pues utiliza el principio de sustentación).

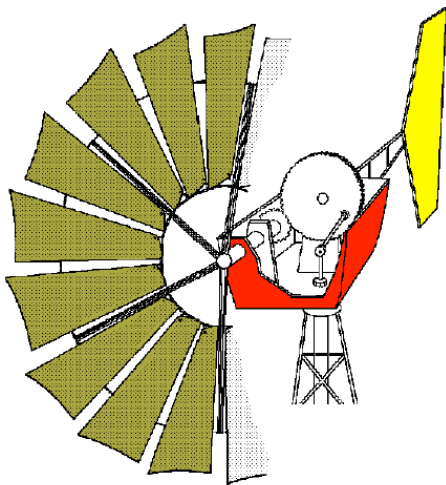


Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal, son:

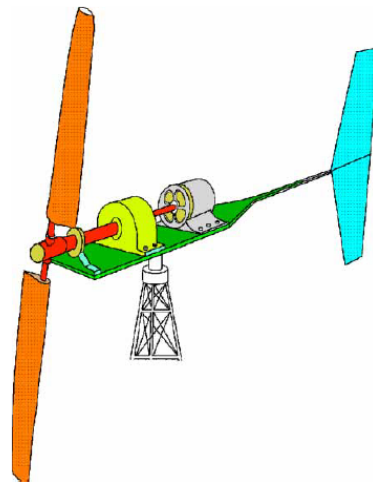
- ✓ No necesitan sistemas de orientación.
- ✓ Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo.

### Máquinas eólicas de eje horizontal

Los aerogeneradores actuales trabajan por el principio aerodinámico llamado sustentación; el mismo principio por el cual se consigue hacer volar un avión. Los antiguos molinos multipala funcionaban por el principio de arrastre, girando por ello a velocidades bajas y con rendimientos bajos, dos características que los dejaron fuera de uso.



**Figura 1.2.4. Molino multipala.**



**Figura 1.2.5. Eje horizontal convencional.**

Los aerogeneradores de eje horizontal se clasifican según su velocidad de giro en rápidos y lentos. Aspecto que está íntimamente relacionado con el número de palas del rotor.

En los aerogeneradores de eje horizontal rápidos, el rotor está constituido por una hélice de dos o más palas, aunque los hay de una (ver Figura 1.2.5). En cambio los lentos se construyen con muchas palas (Figura 1.2.4).

Los perfiles utilizados en los aerogeneradores rápidos normalmente son muy parecidos los perfiles de ala de avión, por cuanto éstos están muy estudiados y



se conocen muy bien sus características. Dichos perfiles se eligen teniendo en cuenta el número de revoluciones por minuto que se desea que adquiera el rotor, y vienen modelos basados en meticulosos diseños aerodinámicos desarrollados por teoría y experimentación. Los más populares son los perfiles NACA (National Advisory Committee for Aeronautics).

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal respecto de los de eje vertical son:

- ✓ Mayor rendimiento.
- ✓ Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos).
- ✓ Menor superficie de pala "S" a igualdad de área barrida "A" (más baratos y livianos).
- ✓ Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa.

Los aerogeneradores de eje horizontal actuales funcionan a velocidades de giro elevadas, lo que era imposible conseguir en los antiguos molinos que funcionaban por arrastre. Esto hace que el torque se vea disminuido, y por lo tanto también disminuye el grosor mínimo que la pala requiere para resistir los esfuerzos de torsión y flexión provocados por el viento. Además, tampoco se necesita que la pala sea ancha para generar buena sustentación.

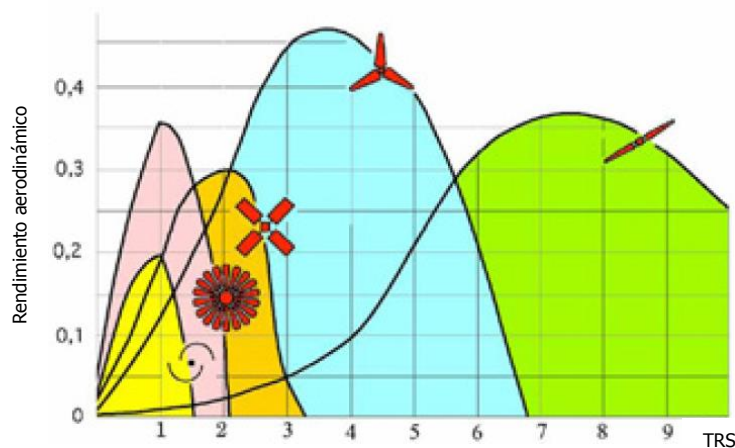
La cantidad de palas dependerá de las velocidades del viento: van de una a cuatro palas para generadores pequeños, mientras que los grandes suelen ser de tres. Para los nuevos aerogeneradores, el número de palas suele ser de sólo 2 ó 3, pues la potencia generada es directamente proporcional a la superficie "A" barrida por la hélice, y es muy poco sensible al número de palas. Este bajo número de palas sumado a lo dicho en el párrafo anterior permite un gran ahorro de material y un menor peso, mejorando las condiciones estructurales y los costos de armado, instalación y operación.

Además, por lo general se requiere de una caja multiplicadora entre el rotor del aerogenerador y el generador eléctrico, y las velocidades de giro elevadas (en generadores pequeños) disminuyen el factor de multiplicación de las cajas, reduciendo las pérdidas que en ellas se generan, su peso y su costo.

La aeroturbina puede accionar dos tipos distintos de generadores eléctricos, de corriente continua (dinamos), o de corriente alterna (síncronos, asíncronos, etc.), bien directamente o mediante un sistema de multiplicación de engranajes.

En la Figura 1.2.6 se puede ver una gráfica comparativa de los distintos tipos de generadores ya mencionados. Se puede apreciar que los de eje horizontal, que funcionan por sustentación, maximizan su rendimiento para valores de TSR mayores a los que funcionan por arrastre.

Por TSR se entiende a la relación entre la velocidad tangencial de la punta de la pala y la velocidad del viento. Este parámetro es muy importante al momento de diseñar el aerogenerador pues influye en el modo en que trabajan aerodinámicamente sus aspas y en la velocidad de giro del mismo; dos factores determinantes sobre las características finales del aerogenerador.



**Figura 1.2.6. Gráfica comparativa de los distintos tipos de aerogeneradores.**

### **1.3 Sistemas de regulación de la velocidad de giro.**

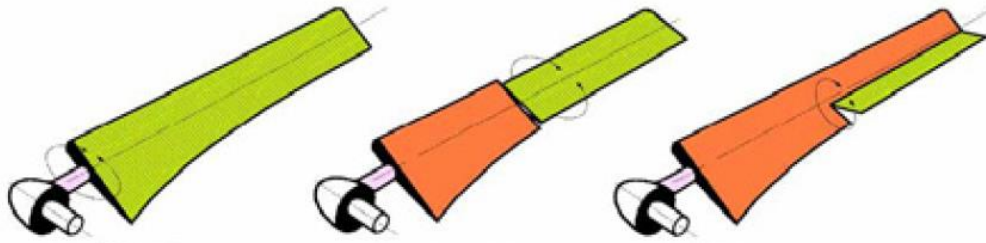
Un dispositivo fundamental en un aerogenerador eólico es el que permite la regulación y control del número de revoluciones, que además sirve de protección de dicha máquina para velocidades del viento superiores a las admisibles bajo el punto de vista estructural.

Cuando una máquina está sometida a una determinada velocidad del viento, comienza a girar; dicha velocidad es la velocidad de conexión, si su giro es lento la máquina estará lejos de generar su máxima potencia.

A medida que la velocidad del viento aumenta el rotor gira más deprisa y la potencia que produce también aumenta; a una determinada velocidad (nominal), el rotor gira a las revoluciones precisas para que la máquina proporcione su potencia nominal y a partir de este momento, aunque aumente la velocidad del viento, no debe aumentar la potencia eléctrica, por lo que hay que actuar regulando la velocidad del rotor eólico.

**a) Regulación por frenos aerodinámicos** que se activan por la acción de la fuerza centrífuga y que actúan cuando el giro del rotor no es el adecuado por sobrepasar un cierto valor.

El sistema implica la regulación por variación del ángulo de inclinación de las palas, que puede ser de toda la pala, de parte de la pala o mediante alerones.

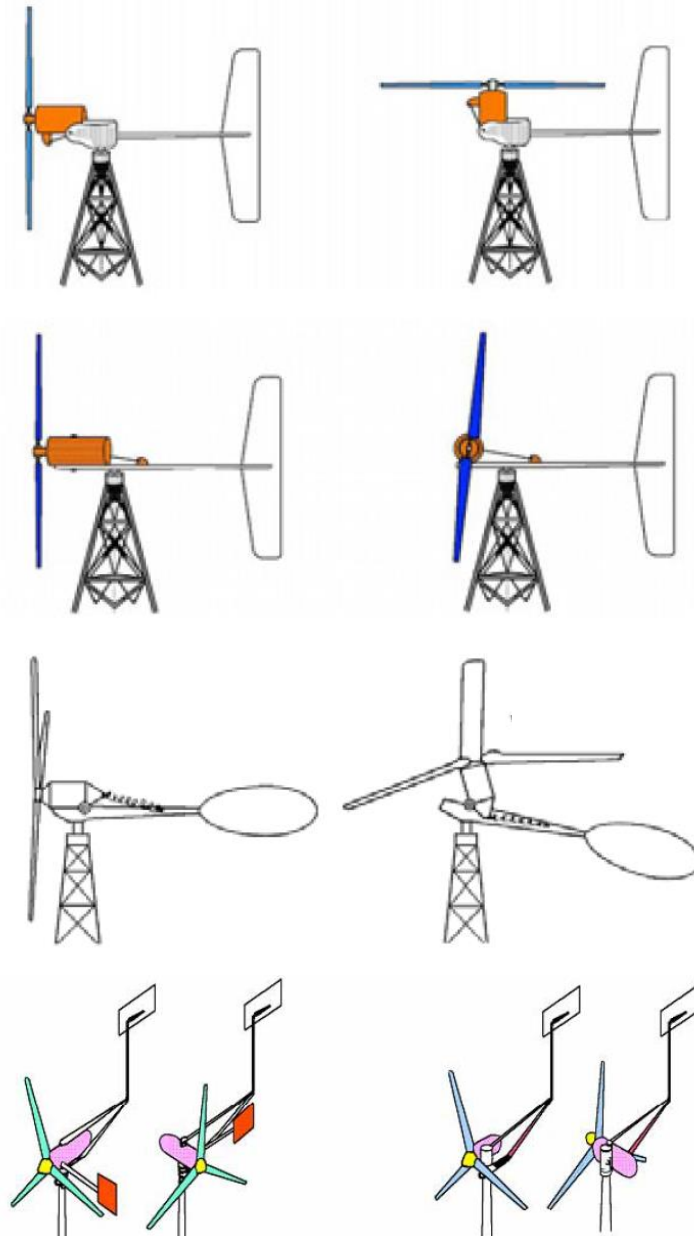


**Figura 1.3.1. Esquema de regulaciones por frenos aerodinámicos.**

La sencillez de los mecanismos de regulación es una de las principales características de los aerogeneradores de baja potencia.

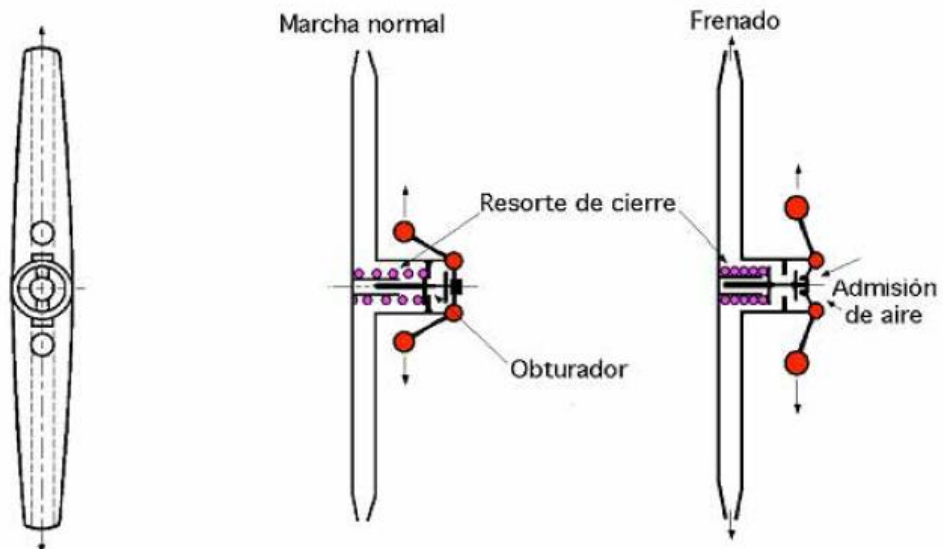
**b) La regulación por medio de palas orientables (Pitch control)** que es la más utilizada en las grandes máquinas; su funcionamiento consiste en actuar sobre el ángulo de calaje de cada pala con lo que se consigue variar la fuerza aerodinámica que actúa sobre la pala. Esto se controla por procedimientos mecánicos relacionados con la velocidad de ataque del viento.

**c) Regulación por orientación del rotor** (en aerogeneradores de baja potencia), cuando la velocidad del viento comienza a ser peligrosa para la hélice, el aerogenerador pone sus palas orientadas de modo que ofrezcan al viento la mínima superficie posible, para que éste no interactúe con ellas.



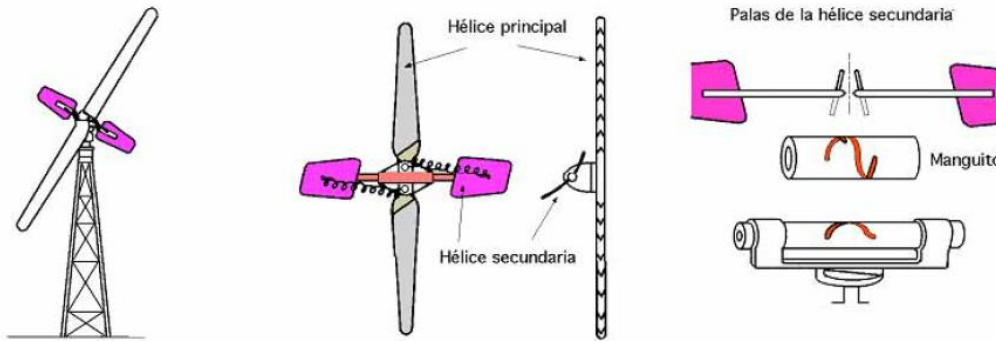
**Figura 1.3.2. Esquemas de diferentes tipos de regulaciones por orientación del rotor.**

d) **El frenado aerodinámico con palas huecas** permitía reducir la velocidad del aerogenerador mediante la aparición de una corriente de aire en la periferia de las palas, en el supuesto de que éstas sean huecas, como en el aerogenerador Andreu-Enfield, Figura 1.3.3.



**Figura 1.3.3. Esquema de un sistema de frenado aerodinámico con palas huecas.**

e) **El frenado aerodinámico con una hélice secundaria** fijada a la hélice principal, Figura 1.3.4: la gran anchura de la hélice secundaria permitía asegurar el arranque de la aeroturbina, así como el frenado cuando el viento era demasiado fuerte. A partir de una cierta velocidad, por efecto de la fuerza centrífuga, las palas del regulador se separan de la hélice principal, de forma que el sentido de rotación alrededor de su propio eje es tal que su ángulo de asiento se anula, adquiriendo a continuación un valor negativo; el par que era motor en el arranque y velocidades pequeñas, pasa a valer cero y después se convierte en par resistente, impidiendo que la máquina se embale.

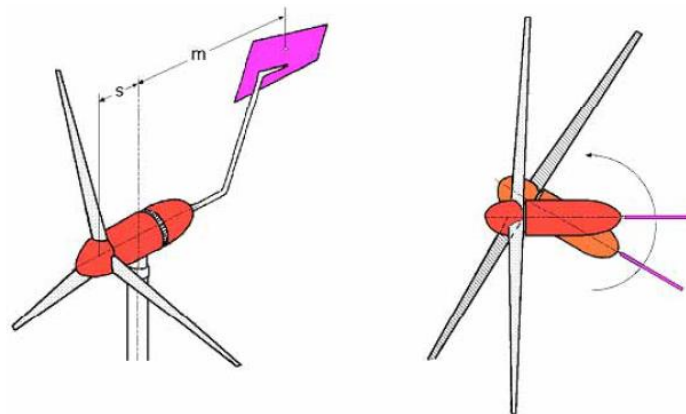


**Figura 1.3.4. Esquema de frenado aerodinámico con una hélice secundaria.**

#### 1.4 Mecanismos de orientación

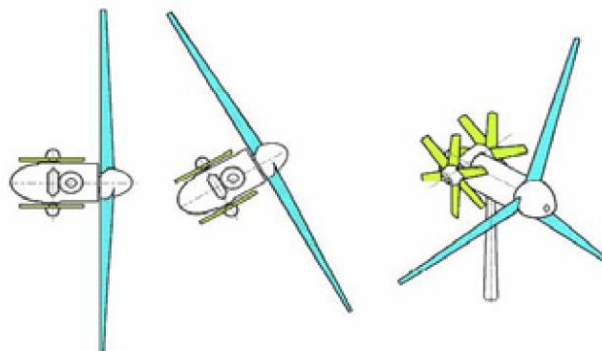
Para pequeños aerogeneradores, existen diversos sistemas que permiten la orientación de la máquina, algunos de ellos son:

a) **Una cola o veleta** que es un método muy eficaz sobre todo en máquinas pequeñas, Figura 1.4.1.



**Figura 1.4.1. Esquema de orientación accionado por veleta.**

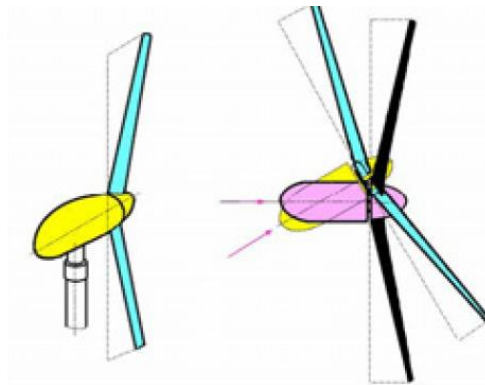
b) **Un sistema de orientación accionado por rotores auxiliares**, Figura 1.4.2.



**Figura 1.4.2. Esquema de orientación accionado por hélices auxiliares.**

c) **Un servomotor controlado electrónicamente**, el cual orienta al rotor en la dirección que le indique alguna señal proveniente de un sensor indicador de la procedencia del viento.

d) **Un sistema de orientación por efecto de la conicidad** que se da a las palas en su disposición y montaje sobre el cubo del rotor a sotavento, tal como se indica en la Figura 1.4.3.



**Figura 1.4.3. Esquema de orientación por efecto de conicidad.**

### **1.5 Tendencias actuales en el diseño de aerogeneradores**

Los factores que influyen en el aprovechamiento de la energía eólica son el emplazamiento y el aerogenerador, y sólo mediante una adecuada combinación de ambos se puede alcanzar un buen rendimiento en un parque eólico.

Una mayor altura permite captar vientos con flujo más laminar, en principio (salvo orografía complicada) de mayor velocidad media y con menor diferencia entre la velocidad del viento en la parte superior e inferior de la circunferencia barrida. Lógicamente el costo es superior, y en ciertos emplazamientos, como las crestas de los montes, puede existir una inversión del perfil de vientos con lo que no siempre es cierto que a mayor altura la velocidad del viento es mayor.

Por otra parte, para un mismo tipo de turbina se pueden usar diversos diámetros del rotor; por ejemplo, para una turbina de 600[kW] se pueden emplear rotores de 39, 42 y 44[m] de diámetro. Un rotor mayor (más caro) permite captar más energía del viento, disminuyendo la velocidad nominal del viento a la que se genera la potencia nominal. Sin embargo la velocidad de corte del viento, a la



que la turbina se detiene por cuestiones de seguridad, es menor con lo que existe el riesgo de desaprovechar horas de vientos fuertes.

En principio, cuanto menor es la velocidad media anual del viento en un emplazamiento se debe elegir un rotor más grande, siempre que la turbulencia del viento en el lugar se mantenga en niveles aceptables.

### **1.5.1 Sistemas de regulación usando las palas**

1) **Aerogeneradores de paso fijo:** Consisten en una aeroturbina de palas fijas y un generador de rotor de jaula bobinada (máquina asíncrona de inducción), conectados mediante una caja multiplicadora de engranajes. El devanado del estator del generador está conectado a la red.

Sus ventajas fundamentales son la simplicidad del equipo y costo, por lo que se utilizan mayoritariamente en sistemas de baja potencia; a velocidades de viento altas no aprovechan óptimamente las propiedades aerodinámicas de las palas, con la consiguiente pérdida de energía captada. Al ser un diseño fijo, a velocidades de viento altas los esfuerzos mecánicos son considerablemente altos, con lo que las palas se deben construir de tal manera que soporten tales tensiones, aumentando su coste. No disponen de un autofrenado, con lo que en caso de embalamiento hay que instalar un freno que sea capaz de absorber toda la energía cinética de las palas. Este tipo de control tiene problemas de par de arranque del rotor, con lo que a veces el arranque es motorizado (utilizando el generador como motor).

2) **Aerogeneradores de paso variable:** En sistemas de alta potencia es rentable instalar un mecanismo de giro para lograr la variación del ángulo de paso de las palas (Pitch control) y de esta forma controlar la potencia que captan las aspas.

El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele ser hidráulico o mediante motores de corriente continua, alojados en el cubo.

3) **Aerogeneradores con control por pérdida aerodinámica, Stall control:** Los aerogeneradores de regulación por pérdida aerodinámica tienen las palas unidas al cubo en ángulo fijo; el perfil de la pala está diseñado



aerodinámicamente para asegurar la pérdida de sustentación al alcanzar la velocidad de diseño.

La principal ventaja de la regulación por pérdida aerodinámica es que se evitan las partes móviles del rotor y el complejo sistema de control.

En contra, presenta un problema de diseño aerodinámico muy complejo, con las complicaciones que se derivan de las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación.

#### **4) Aerogeneradores con control activo por pérdida aerodinámica,**

**Active stall control:** En los aerogeneradores de mayor potencia se ha incorporado un active stall en el que las palas pueden girar sólo unos grados, menos de  $10^\circ$ , "pitch", para ajustar mejor el perfil de stall en la zona de altas velocidades del viento ( $18\sim 25$  [m/s]). Técnicamente estos aerogeneradores se parecen a los de regulación por cambio del ángulo de paso, dado que ambos tienen las palas orientables. Sin embargo, cuando el aerogenerador alcanza la velocidad nominal se aprecia una gran diferencia: si el generador se sobrecarga las palas de la turbina se orientan en sentido contrario al que lo harían las reguladas por cambio del ángulo de paso, es decir, se aumenta el ángulo de paso de las palas para que se produzca antes la pérdida de sustentación, con el fin de consumir el exceso de energía del viento generando turbulencias.

La principal ventaja de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia se controla con más exactitud que con la regulación pasiva y, además, la máquina puede funcionar con mayor eficiencia para un amplio rango de velocidades del viento.

#### **1.5.2 Velocidad de generación.**

La topología empleada para convertir la energía mecánica procedente del viento en energía eléctrica condiciona directamente el comportamiento de la aeroturbina en cuanto a su velocidad de rotación.

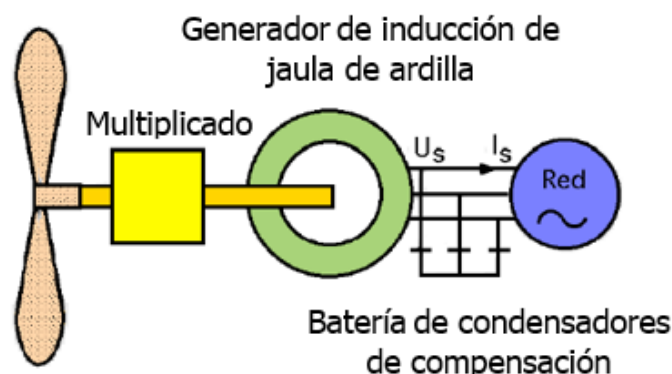
La forma en que dicha velocidad pueda variar es decisiva en cuanto:

- ✓ Al aprovechamiento del recurso eólico, por la variación de la velocidad de giro.
- ✓ Al impacto por la interconexión del aerogenerador a la red eléctrica
- ✓ A las sollicitaciones mecánicas a las que se ve sometido

**1) Aerogenerador de velocidad fija:** En estas máquinas la variación de la velocidad es menor del 2%. La estructura del aerogenerador de velocidad fija consiste en una caja multiplicadora y un generador asíncrono directamente acoplado a la red por su estator, con unas baterías de condensadores para compensar la energía reactiva.

Muchos de los aerogeneradores de gran potencia que operan hoy en día en parques eólicos son de este tipo. Incorporan un generador asíncrono de rotor de jaula estándar. Una variante muy extendida es la de emplear un generador asíncrono con dos devanados, uno de 6 polos para velocidades del viento bajas y otro de 4 polos para velocidades del viento mayores.

Los inconvenientes de funcionar a velocidad fija son las sobrecargas mecánicas que se generan debido a las ráfagas de viento. Estas fluctuaciones de potencia en el viento se traducen, aunque filtradas, en fluctuaciones de la potencia eléctrica generada.



**Figura 1.5.2.1. Esquema simplificado de un aerogenerador de velocidad fija.**

**2) Aerogenerador de deslizamiento variable:** La estructura de deslizamiento variable consta de un sistema multiplicador, generador asíncrono y unas resistencias del rotor variables. Al variar la resistencia del rotor se varía el



deslizamiento, entre un 1% y un 10%, lo que permite a los aerogeneradores absorber los golpes de viento, reduciendo las cargas extremas sobre el multiplicador, a la vez que se genera una potencia eléctrica sin fluctuaciones; este sistema está patentado bajo el nombre de Opti-Slip en el que las resistencias externas van montadas en el propio rotor, junto con el sistema electrónico.

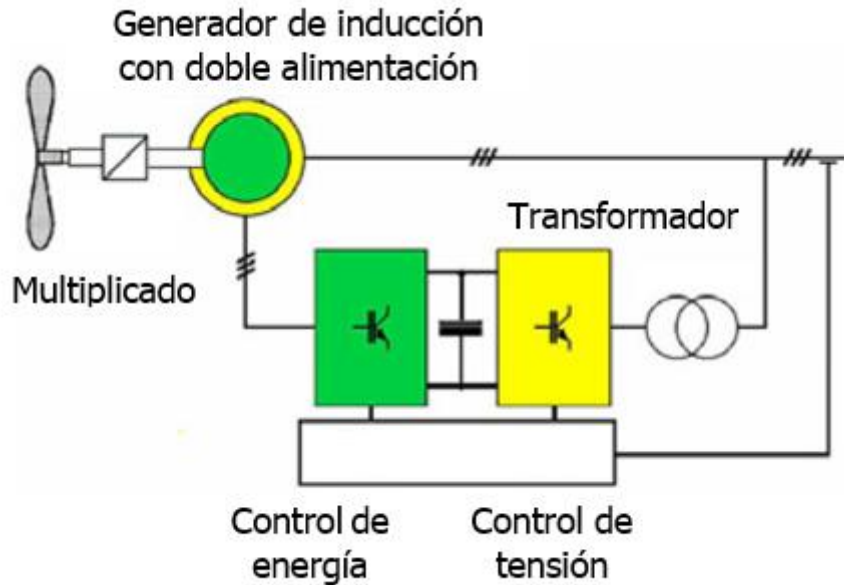
Para evitar la presencia de anillos rozantes, las señales de control se transmiten mediante una conexión óptica (sistema OptiSlip), que es una variante interesante del generador de inducción de deslizamiento variable que evita los problemas que introducen los anillos rozantes, las escobillas, las resistencias externas y el mantenimiento.

La energía de las ráfagas de viento se elimina mediante un ligero aumento de la velocidad de la cadena cinemática y mediante la disipación en resistencias en el rotor. Con una ráfaga de viento, las señales del mecanismo de control hacen que el deslizamiento aumente para permitir que el rotor gire un poco más rápidamente, hasta que el mecanismo regulador del cambio del ángulo de paso de las palas pueda hacer frente a la situación; a partir de este momento, el deslizamiento disminuye.

**3) Aerogenerador de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado:** Este sistema está formado por un sistema multiplicador y un generador asíncrono cuyo estator está conectado directamente a la red y cuyo rotor lo está a través de dos convertidores de frecuencia.

Con esta estructura se consigue regular la velocidad del sistema en un rango del orden de la velocidad nominal. Los convertidores no deben soportar toda la potencia de la máquina, sino sólo una fracción de ella, resultando de esto un equipo electrónico más sencillo. Al poder variar la velocidad, es posible acercarse a puntos de rendimiento aerodinámico mayor.

Las ráfagas no implican sobrecargas en el multiplicador, sino que es una energía que se emplea en aumentar la velocidad.



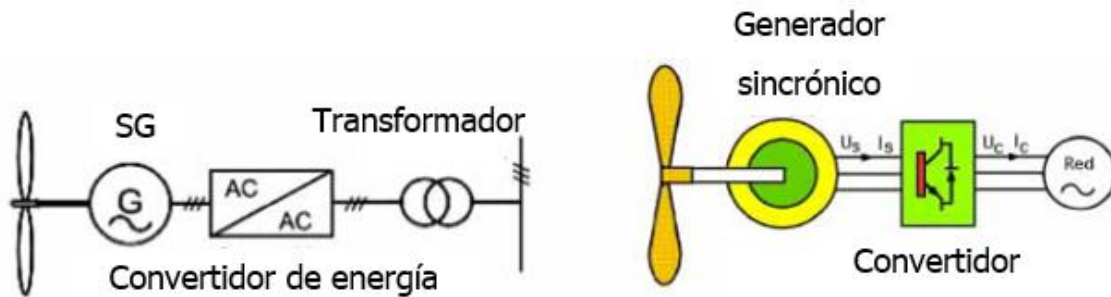
**Figura 1.5.2.2. Esquema simplificado de un aerogenerador de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado.**

**4) Aerogenerador con control Pitch, equipados con generador asíncrono de rotor devanado y convertidor electrónico entre el rotor y la red.** Esta configuración presenta las características de control del generador de inducción doblemente alimentado y del Pitch control. Las variaciones rápidas del viento se controlan y suavizan por el convertidor electrónico por su menor tiempo de respuesta; las variaciones del viento más lentas se gobiernan por la actuación del mecanismo de control de paso, mediante actuadores mecánicos que modifican el ángulo de ataque de la pala.

**5) Velocidad variable con generador síncrono multi-polo.** Este sistema es el más complejo de todos. El sistema multiplicador se puede eliminar gracias a un generador síncrono multi-polo, empleándose para variar la velocidad en el estator dos convertidores que controlan toda la potencia de la máquina. A la salida del generador en alterna de frecuencia variable, se acopla un convertidor electrónico formado por un rectificador y un inversor unidos por un enlace de CC. La salida del inversor se hace a la frecuencia de la red.

Las ventajas de este sistema son:

- ✓ La mejora del rendimiento aerodinámico
- ✓ La potencia de salida sin fluctuaciones
- ✓ El control de la energía reactiva
- ✓ La eliminación del sistema multiplicador



**Figura 1.5.2.3. Esquema simplificado de un aerogenerador de velocidad variable con generador síncrono multi-polo e interface electrónica.**

### 1.5.3 Sistemas de control de potencia

La potencia generada en los aerogeneradores procede del viento, que no es controlable, por lo que se requiere de un sistema de regulación que controle la energía extraída por el rotor. El punto de funcionamiento de la turbina eólica se determina continuamente con la velocidad y la variación del viento, pudiéndose distinguir unos estados operativos básicos, que supervisa continuamente el sistema de control:

- a) Turbina parada, consecuencia de que la velocidad del viento es menor que la velocidad de conexión, o que la velocidad del viento sea muy elevada.
- b) Turbina a carga parcial, en la que interesa capturar del viento la máxima energía posible para llegar cuanto antes a la potencia nominal.
- c) Turbina a plena carga, en la que la velocidad del viento es mayor que la nominal y menor que la de desconexión.

El sistema de control encargado de la supervisión, a partir de mediciones, genera:

- ✓ Valores de referencia para el sistema de control de potencia y de la velocidad.



- ✓ Señales de control secuenciales, haciendo posible que el aerogenerador pase de un estado operativo a otro.
- ✓ Chequeos secuenciales del estado del aerogenerador, realizando las funciones de protección.

A carga parcial se pueden considerar dos tipos básicos de sistemas de control de aero turbinas:

El primero se basa en que la máxima potencia extraíble del viento es para un TSR óptimo. La memoria del sistema de control tiene almacenada la curva característica de potencia de la aero turbina y, como continuamente se están midiendo la velocidad del viento y del rotor, se calcula el TSR correspondiente y se le compara con el óptimo de referencia. La señal de error se transmite al sistema de control que modifica la velocidad de la aero turbina minimizando el error.

El segundo se basa en la potencia máxima. El sistema de control realiza un rastreo continuo de la potencia máxima que se le puede extraer al aerogenerador.

#### **1.5.4 Conexión entre el rotor y el generador**

La conexión rotor-generador está formada por todos los elementos mecánicos que se encargan de transmitir la energía del eje de baja velocidad, hasta el de alta velocidad.

Por lo general es necesario utilizar una caja multiplicadora de velocidad, que permite la conversión entre la potencia de alto par motor, obtenida en el rotor de la turbina eólica que gira lentamente, y la potencia de bajo par de torsión a alta velocidad, que se utiliza en el generador.

#### **1.6 Uso de la energía eólica: leyes y cultura actual**

Desde hace varias décadas el hombre ha adquirido consciencia del daño que sus actividades causan sobre el equilibrio ambiental. Una prueba de ello son las Leyes Nacionales y los Acuerdos Internacionales que tratan el tema, por ejemplo, el Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono.

Dada la problemática de la contaminación ambiental, las energías renovables están en constante desarrollo tecnológico y crecimiento. La energía eólica, como



una de ellas, ha evolucionado mucho en los últimos años y se espera que la potencia mundial instalada crezca considerablemente en los próximos. La energía eólica mundial ha establecido un nuevo récord de 44.700[MW] de nueva capacidad instalada en 2012, según datos del Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC) en su informe "Balance 2012". De esta manera se alcanza la cifra de 282.482[MW] de potencia acumulada a nivel mundial. El consejo también informa que actualmente la energía eólica abastece un 2,5% de la energía eléctrica mundial, y se espera que en el año 2020 esta cifra ascienda a un valor entre 8% y 12%. [2]

Los parques eólicos mundiales generan electricidad libre de CO<sub>2</sub> en más de 80 países, 24 de los cuales tienen al menos 1.000[MW]. Es de destacar que los países con mayor inversión en la materia son EEUU, Alemania, China y España.

### **1.6.1 Uso de la energía eólica: en Argentina:**

Desde que se sancionó la Ley Nacional N° 25.019 en el año 1998 sobre "Régimen Nacional de Energía Eólica y Solar", que declara de interés nacional a la generación de energía eléctrica de origen eólico y solar en todo el territorio nacional, el Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos de la Nación, a través de la Secretaría de Energía, promueve la investigación y el uso de energías no convencionales.

La Ley 26.190 sancionada en el año 2006, modificatoria y complementaria de la ley 25.019/98, establece el "Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica". La ley declara de interés nacional la generación de energía eléctrica a partir del uso de fuentes de energía renovables con destino a la prestación de servicio público, como así también la investigación para el desarrollo tecnológico y fabricación de equipos con esa finalidad.

Entre 1994 y 2002 Argentina contaba con sólo 30[MW] instalados principalmente por cooperativas eléctricas. Esta situación fue cambiando rápidamente a partir de la licitación del Programa de Generación Eléctrica a partir de Energías Renovables (GENREN). El 30 de junio de 2010 tuvo lugar la adjudicación del Programa, licitación que se llevó a cabo a través de la estatal ENARSA y del





Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Resultaron adjudicados proyectos según el siguiente desglose: 754[MW] que corresponden a generación eólica, 110,4[MW] a térmica con biocombustibles, 20[MW] a solar fotovoltaica y 10,6[MW] a pequeños aprovechamientos hidroeléctricos; totalizando 895[MW]. La potencia restante para llegar a los 1000[MW] originariamente licitados serán re-licitados.

Actualmente, la energía eólica en Argentina sigue en estado embrionario. En el año 2012 hubo una producción de sólo 369[GWh] y durante el 2013 alrededor de 465[GWh].

Se estima que el potencial eólico patagónico al sur del paralelo 42° encierra una energía decenas de veces mayor al contenido en toda la producción argentina de petróleo.

Además de la Patagonia, Argentina cuenta con muy buena calidad de recurso eólico en diferentes regiones del país. La costa sur de la provincia de Buenos Aires tiene una calidad de viento comparable con las mejores regiones del norte de Europa, sin los problemas de interconexión que tiene la Patagonia.

A pesar de las excepcionales condiciones naturales que posee Argentina y de contar con herramientas tecnológicas para el desarrollo del sector, el país presenta algunos impedimentos para expandir la industria eólica, siendo el principal de éstos, la dificultad para captar financiamiento para los proyectos.

No obstante, hay un marcado interés en el desarrollo de aerogeneradores de elevada potencia. Como prueba de ello puede citarse el proyecto Cluster Eólico Argentino que consiste en la creación de un cluster industrial de empresas generadoras de energía eólica a través del cual para 2020 se generarán 1.000[MW] eólicos de producción nacional anual, lo que permitirá sustituir US\$ 1.750 millones en equipos, US\$ 500 millones en combustible al año y se generarán 10.000 puestos de trabajo, contando con 32 empresas de 8 provincias asociadas.

Por otra parte, la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, a través del Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC), y según lo establecido por Resolución MinCyT N° 398/10, convoca a consorcios público-privados a presentar proyectos innovadores, destinados a solucionar problemas tecnológicos y a



brindar apoyo al sector productivo de bienes y servicios dedicados al aprovechamiento de la fuente renovable eólica.

El objetivo es financiar parcialmente proyectos en los cuales los consorcios público-privados solicitantes tengan como meta la resolución de problemas y el desarrollo de capacidades tecnológicas, que mejoren la competitividad y brinden apoyo al sector productor de bienes y servicios dedicados al aprovechamiento de la energía eólica. En este sentido, el énfasis está puesto en el desarrollo de al menos una de las siguientes áreas estratégicas:

- ✓ Generación de componentes para aerogeneradores y elementos para sistemas de conexión a la red eléctrica.
- ✓ Fabricación de aerogeneradores de 1[MW] de potencia como mínimo.

Los recursos del FONARSEC administrados en el marco de la presente convocatoria consistirán en aportes no reintegrables de un mínimo de \$ 2.500.000 hasta un máximo de \$ 24.000.000 por proyecto. El plazo de ejecución no podrá superar los 4 años. Los fondos de contraparte deberán ser mayores o iguales al 50% del costo total del proyecto.

El Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) viene realizando un trabajo con fabricantes nacionales de aerogeneradores de baja potencia desde hace varios años. A partir de ello se delinearon acciones en conjunto para fortalecer el sector. Se acordó un listado estándar de certificaciones técnicas que cada uno de los fabricantes debe proveer al usuario y, en función de las normativas internacionales vigentes, se definió un protocolo común de ensayo de aerogeneradores.

En cuanto al estado legislativo de la micro generación, aún falta avanzar. No hay normativas de diseño y construcción para estos pequeños aerogeneradores. Sería razonable pensar en la pronta adopción de normas tales como IEC61400 (61400-2 para micro generación) reconocidas y adoptadas por otros países (UNE-EN 61400 en España).

Sin duda las exigencias impuestas por la legislación adecuada, traerían una mejora en calidad de productos, y posiblemente un incremento del mercado.



## **1.7 Comparación con otros tipos de energías.**

La energía eólica es un tipo de energía renovable, como lo son la fotovoltaica, hidráulica, geotérmica, el hidrógeno y los biocombustibles.

Decir que una energía es renovable significa que es inagotable puesto que es directa o indirectamente obtenida de la energía solar. Si bien el planeta necesita de la energía solar para realizar sus procesos naturales, los cuales mantienen el equilibrio ambiental, las implicancias que puede tener su uso mediante las energías renovables son nulas.

La creciente demanda de energía a nivel global, y el agotamiento de las energías convencionales no renovables (combustibles fósiles, gas natural, energía nuclear) han llevado a la necesidad de utilizar energías renovables.

En particular, la energía eólica y la fotovoltaica no requieren de un proceso químico de combustión y por lo tanto no emiten contaminantes. Sumado a esto, también tienen un aspecto positivo desde el punto de vista socioeconómico:

- ✓ Contribuyen a la diversificación económica dado que están presentes en cualquier lugar (principalmente la solar).
- ✓ Impulsan a una conciencia colectiva sobre el cuidado del planeta.
- ✓ Pueden usarse a pequeña escala para abastecer residencias o cualquier tipo de establecimiento donde el tendido eléctrico no llegue.

Sin embargo, la energía eólica tiene también sus desventajas:

- ✓ El viento es irregular y puede ser demasiado bajo durante períodos largos de tiempo (incluso meses), dependiendo de las características de la zona. Esto imposibilita la utilización de esta energía por sí sola; por lo que sólo puede ser usada como un apoyo a una fuente de energía más estable y confiable.
- ✓ Provoca un cierto impacto ambiental, no solo durante su utilización sino también durante su proceso de fabricación.
- ✓ Tiene baja rentabilidad, debido a la baja densidad de energía que hay en el aire y al pobre rendimiento de las aero turbinas actuales. Esto hace que las compañías pierdan interés en invertir.



## **1.8 Los impactos sobre el medioambiente.**

**Impacto sobre la avifauna:** Las aves pueden colisionar con las aspas en movimiento o pueden electrocutarse en determinados casos. Esto es más frecuente en los aerogeneradores de gran potencia. De todos modos, las cifras de aves afectadas son bajas.

**Impacto visual:** depende en gran medida de la cantidad, tamaño y proximidad a las personas que tenga el parque eólico. En la generación de particulares, en ciudades, esto puede ser un problema importante.

**Impactos por infraestructura:** es inevitable y está dado por la construcción de caminos, cimientos, edificios, etc. que son necesarios para el parque eólico. Esto no ocurre en aerogeneradores pequeños.

**Impacto de ruido:** el ruido puede hacerse imperceptible con un correcto diseño mecánico (aerodinámica, vibración, velocidad, tamaño, etc.). Pero puede dificultarse de acuerdo a las velocidades del viento en las que se pretenda operar a la máquina.



## **Capítulo 2: El viento.**

Se considera viento a toda masa de aire en movimiento, que surge como consecuencia del desigual calentamiento de la superficie terrestre.

La Tierra funciona como una gran máquina térmica que transforma parte del calor solar en la energía cinética del viento. Bajo la acción de la presión, el aire de la atmósfera se desplaza de un lugar a otro a diferentes velocidades, dando lugar al viento.

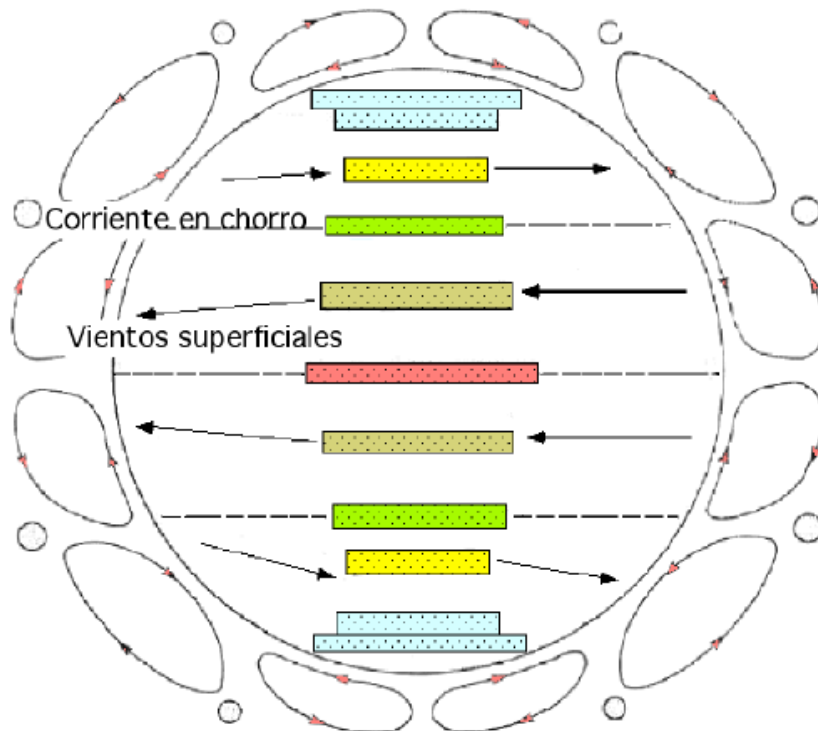
El gradiente de velocidades es mayor cuanto mayor es la diferencia de presiones y su movimiento viene influenciado por el giro de la Tierra.

### **2.1 Las causas principales del origen del viento.**

#### **a) La radiación solar que es más importante en el Ecuador que en los Polos.**

En el Ecuador y zonas cercanas, donde la radiación solar es más intensa, el globo terrestre acumula más calor que en los Polos y sus alrededores. La diferencia de densidades entre estas gigantescas masas de aire impulsa al aire en movimientos de convección.

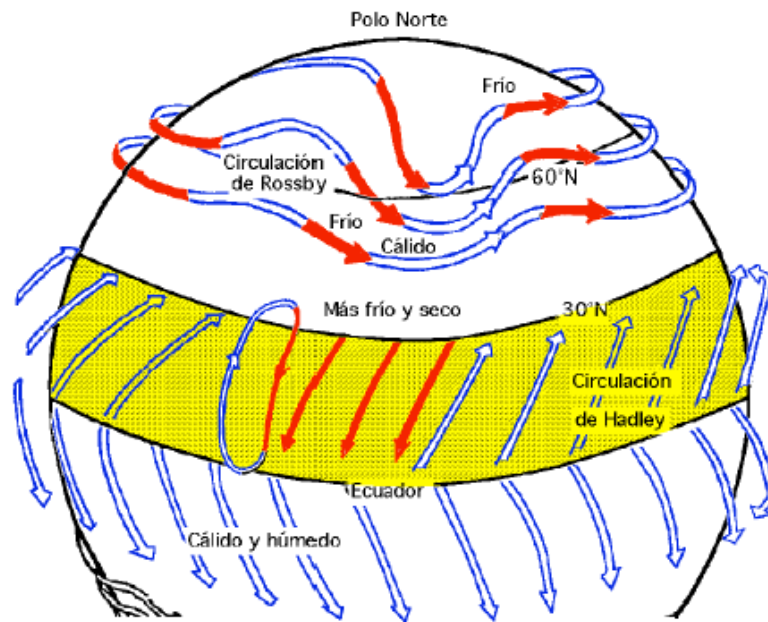
#### **b) La rotación de la Tierra que provoca desviaciones hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur.**



**Figura 2.1.1 – Direcciones de circulación del viento debido a la rotación de la Tierra.**

### **Vientos alisios**

Al calentarse el aire en el Ecuador asciende y es sustituido por el aire más próximo a los Polos, formándose la llamada circulación de Hadley, que se hace inestable a unos  $30^\circ$  de latitud y origina unos vientos generales. Este flujo no se proyecta directamente sobre los Polos debido a la aceleración de Coriolis que aparece como consecuencia del movimiento de rotación de la Tierra, y modifica su curso. Esta aceleración depende de la velocidad del viento y de la rotación de la Tierra, por lo que las masas de aire caliente se desplazan por esta circunstancia hacia el Este; la circulación general es semejante y simétrica en cada uno de los dos hemisferios, Figura 2.1.2, yendo de O a E en el hemisferio Norte.



**Figura 2.1.2 – Esquema de circulación de Hadley de los vientos.**

Un esquema de vientos generales es el siguiente:

- Entre  $90^{\circ}\text{N}$  y  $60^{\circ}\text{N}$ , aire ártico (muy frío) (Circulación de Rossby)
- Entre  $60^{\circ}\text{N}$  y  $40^{\circ}\text{N}$ , aire polar (frío)
- Entre  $40^{\circ}\text{N}$  y  $5^{\circ}\text{N}$ , aire tropical (templado)
- Entre  $5^{\circ}\text{N}$  y  $5^{\circ}\text{S}$ , aire ecuatorial (cálido)

En el límite de estas diferentes masas de aire existen zonas conflictivas o zonas frontales como:

- El frente ártico entre el aire ártico y el aire polar.
- El frente polar entre el aire polar y el aire tropical.
- La zona de convergencia intertropical, entre el aire tropical y el aire ecuatorial, en la que soplan vientos regulares (alisios) del Nordeste, contorneando el anticiclón de las Azores, (Corriente de Hadley).

Las diferentes masas de aire, así como los ejes de depresión ( $60^{\circ}$ ) y anticiclónicos ( $30^{\circ}$ ), se desplazan según las estaciones en el sentido del movimiento aparente del Sol; en el hemisferio Norte existe, en invierno, una traslación general hacia el Norte, y en verano hacia el Sur. En el hemisferio Sur sucede al revés; estos vientos se denominan monzones.



### **c) Las perturbaciones atmosféricas.**

Las corrientes generales de aire son modificadas localmente por temporales y gradientes de temperatura originados por los desiguales calentamientos de superficies de tierra y agua o por diversos accidentes orográficos. Se puede considerar que los vientos vienen dirigidos por determinados centros de acción de la atmósfera, siendo lo más frecuente que su desplazamiento sea en sentido horizontal.

La atmósfera no es homogénea, estando fraccionada en un número bastante grande de masas de aire más o menos calientes; la transición entre dos masas de aire puede ser lenta y continua o, por el contrario, brusca, constituyendo entonces una superficie frontal que forma una cierta pendiente en la que el aire caliente, más ligero, está por encima del aire frío.

La proyección sobre el suelo de una superficie frontal se denomina frente; un ejemplo típico lo constituye, en el hemisferio Norte, el frente polar atlántico.

Los frentes no son estacionarios porque el aire frío tiende a descender hacia el Ecuador, mientras que el aire caliente tiende a remontar hacia el Polo, originándose en un punto una ondulación que se desarrolla y acentúa, al tiempo que es apresada por las corrientes de aire del Oeste, acompañada de una depresión móvil. Cuando el aire caliente remonta se crea un frente cálido; cuando el aire frío desciende se crea un frente frío. El conjunto frente cálido-frente frío constituye una perturbación; el frente frío alcanza al frente cálido, y el aire caliente es proyectado hacia arriba, formándose un frente ocluido. Una sucesión de perturbaciones, o familia de perturbaciones, suele estar ligada a diferentes sistemas nubosos característicos, que determinan así los diferentes tipos de vientos.

### **2.2 Tipos de vientos.**

El conocimiento de los vientos generales no es suficiente para una correcta utilización y ubicación de máquinas accionadas por el viento, por cuanto existen factores que modifican el régimen general y que deben ser conocidos y tenidos en cuenta a la hora de realizar un proyecto de este tipo.



Los vientos regionales están regidos también por desplazamientos a la escala sinóptica de las masas de aire, (que es más fina y precisa que la circulación general de Hadley).

Tanto los vientos generales, como los vientos sinópticos están ligados a la circulación atmosférica y mantienen las mismas características sobre grandes extensiones de terreno.

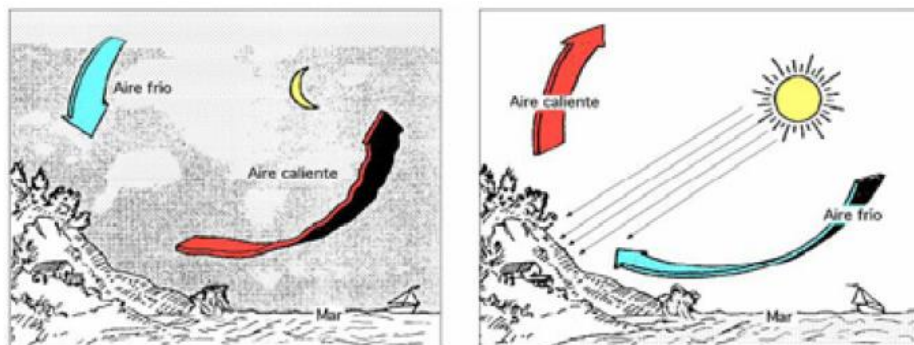
El viento sinóptico sopla prácticamente en la horizontal. Sus características vienen determinadas en función de situaciones meteorológicas dadas y muy precisas, como son la configuración isobárica y posición de los frentes, teniendo en cuenta también para cualquier lugar, tanto las condiciones geográficas regionales, como las locales.

La dirección del viento a nivel del suelo, medida generalmente a algunos metros sobre el mismo, está fuertemente influenciada por la situación topográfica del lugar considerado.

La frecuencia de las direcciones es algo que en este tipo de vientos también se ve, no siendo exclusiva de los vientos generales.

### **Tipos de vientos sinópticos:**

**a) Brisas de mar.** Lo dicho en el párrafo anterior respecto de la direccionalidad se ve en el caso del movimiento del aire tierra-mar en las costas, o tierra-agua en los lagos durante el día y la noche, Figura 2.2.1.

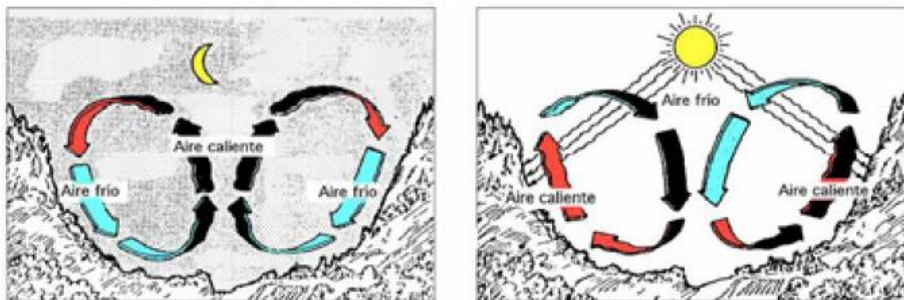


**Figura 2.2.1. Brisas de mar**

El viento diurno o brisa marina, es debido a un descenso hacia la tierra del gradiente de presión barométrica, como consecuencia del calentamiento diurno

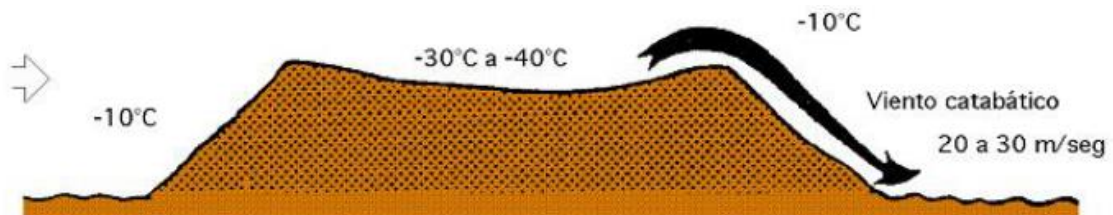
de la capa inferior del aire que está en contacto con la tierra. Durante el día, como la superficie del mar adyacente no se calienta con tanta intensidad, permanece relativamente más fría. En respuesta al gradiente de presión local, el aire se dirige hacia la tierra a baja altura. Por la noche se invierte el gradiente de temperatura debido al más rápido enfriamiento de la superficie del terreno; el gradiente de presión es ahora de la tierra hacia el mar, motivando un flujo de aire hacia el océano (la brisa terrestre).

**b) Vientos de valles y montañas.** En las montañas el aire se calienta durante el día y se va hacia las alturas, mientras que en la noche el aire frío, más pesado, baja hacia los valles, Figura 2.2.2.



**Figura 2.2.2. Vientos de valles y montañas.**

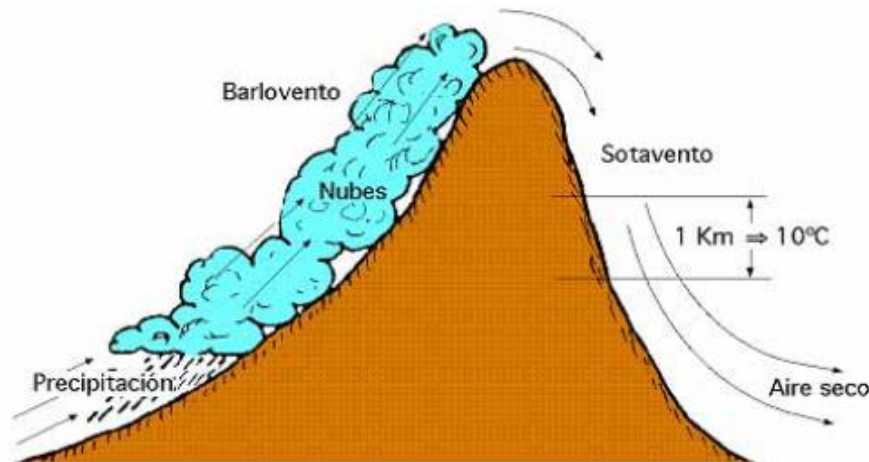
**c) Vientos catabáticos y anabáticos.** Es el producido por el descenso de aire fresco desde regiones elevadas a otras más bajas, en forma de brisas, a través de laderas y valles.



**Figura 2.2.3. Viento catabático.**

Viene regido principalmente por la dirección de los valles a través de los cuales desciende. El viento anabático es el que presenta una componente vertical ascendente, siendo el término opuesto a catabático.

**d) Föhn.** Es un viento fuerte, seco y cálido, que se produce en ocasiones en la ladera de sotavento (contraria a la que sopla el viento) de los sistemas montañosos, Figura 2.2.4.



**Figura 2.2.4 – Viento Föhn.**

Cuando este sistema se acerca a una montaña, el aire sube por la ladera de barlovento, enfriándose por debajo de la temperatura de condensación, formando nubes que se mantienen adosadas a las cimas de las montañas, que provocan precipitaciones, por lo que el contenido de humedad del aire baja y así el aire que desciende por sotavento es seco.

Superficies de pendientes suaves y desnudas de obstáculos son los mejores lugares de potencial eólico, puesto que se van juntando las líneas de corriente del fluido y hacen que la velocidad no baje por turbulencia.

### 2.3 Análisis estadístico:

La velocidad del viento varía con la altura, siguiendo aproximadamente una ecuación de tipo estadístico, conocida como ley exponencial de Hellmann: Ecuación 2.3.1.

$$V_h = V_{10} \left( \frac{h}{10} \right)^\alpha$$

**Ecuación 2.3.1.**

En la que  $v_h$  es la velocidad del viento a la altura  $h$ ,  $v_{10}$  es la velocidad del viento a 10 metros de altura y  $\alpha$  es el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno, y cuyos valores vienen indicados en la Tabla 2.3.1. En la Figura 2.3.1, se indican las variaciones de la velocidad del viento con la altura según la ley exponencial de Hellmann:

Tipo de terreno	Valor del coef. $\alpha$
Lugares llanos con hielo o hierba	0,08 ~ 0,12
Lugares llanos (mar, costa)	0,14
Terrenos poco accidentados	0,13 ~ 0,16
Zonas rústicas	0,28
Terrenos accidentados o bosques	0,2 ~ 0,26
Terrenos muy accidentados y ciudades	0,25 ~ 0,4

**Tabla 2.3.1.**

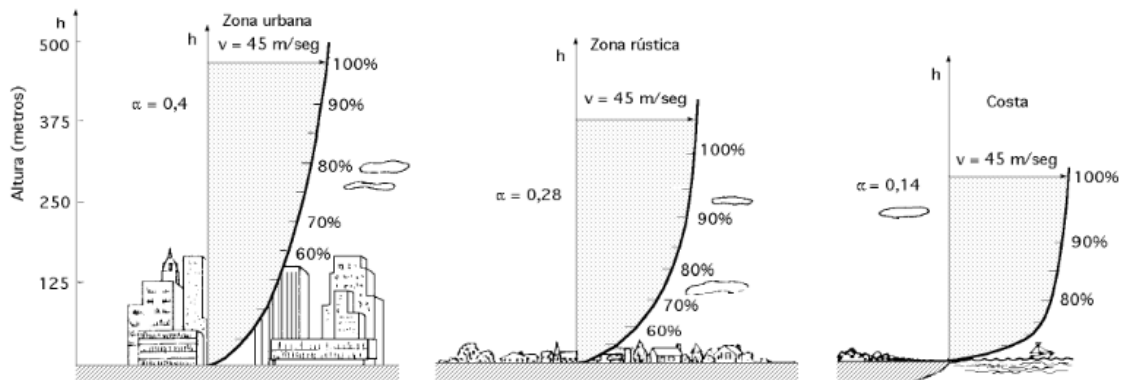


Fig 1.11.- Variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno, según la ley exponencial de Hellmann

**Figura 2.3.1.**

En nuestro caso, la altura del aerogenerador será de 6 metros, por lo que debemos llevar todas las mediciones<sup>2</sup> a este valor para poder realizar su análisis estadístico. Estos cálculos se pueden apreciar en la Tabla 2.3.2.

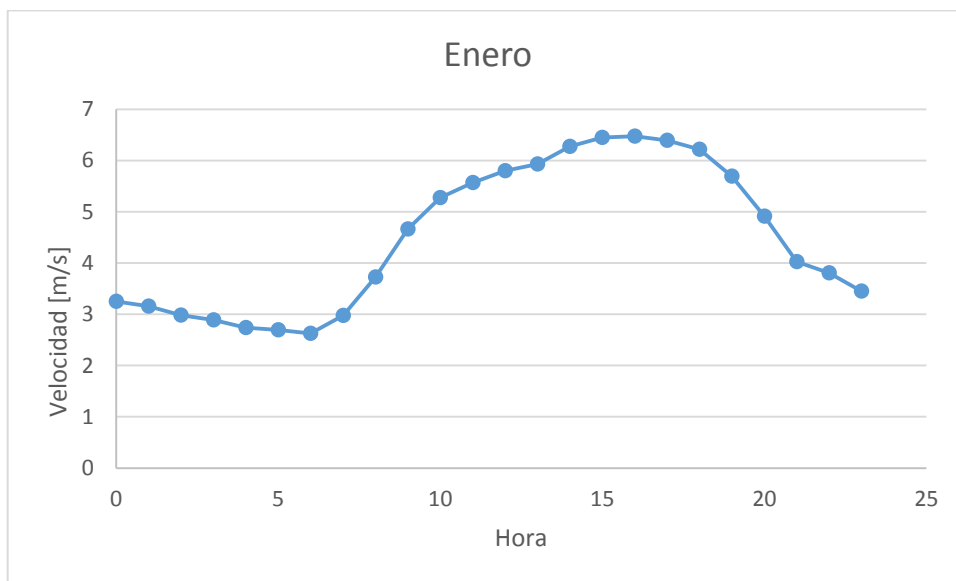
<sup>2</sup> Las mediciones fueron suministradas por el Servicio Meteorológico nacional. Los datos corresponden a la magnitud y dirección del viento, tomadas a 10 metros de altura y con frecuencia de una hora; desde el 1/1/2006 hasta el 1/1/2016.



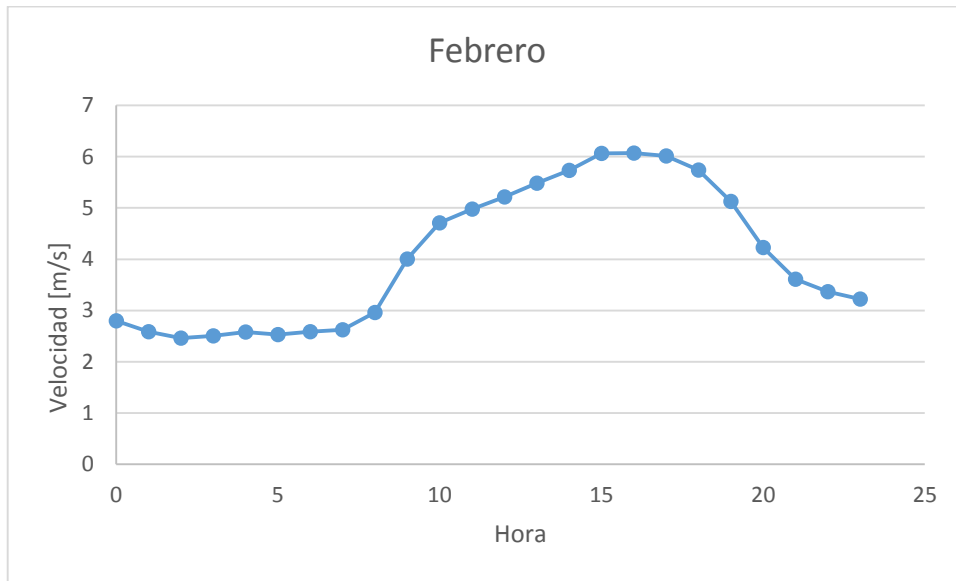
<b>V<sub>10</sub> promedio en un día (m/s)</b>	<b>V<sub>6</sub> promedio en un día (m/s)</b>	<b>Hora</b>
3,003	2,603	0
2,912	2,524	1
2,860	2,479	2
2,856	2,475	3
2,856	2,475	4
2,865	2,483	5
2,901	2,514	6
3,052	2,645	7
3,363	2,915	8
3,952	3,425	9

**Tabla 2.3.2.**

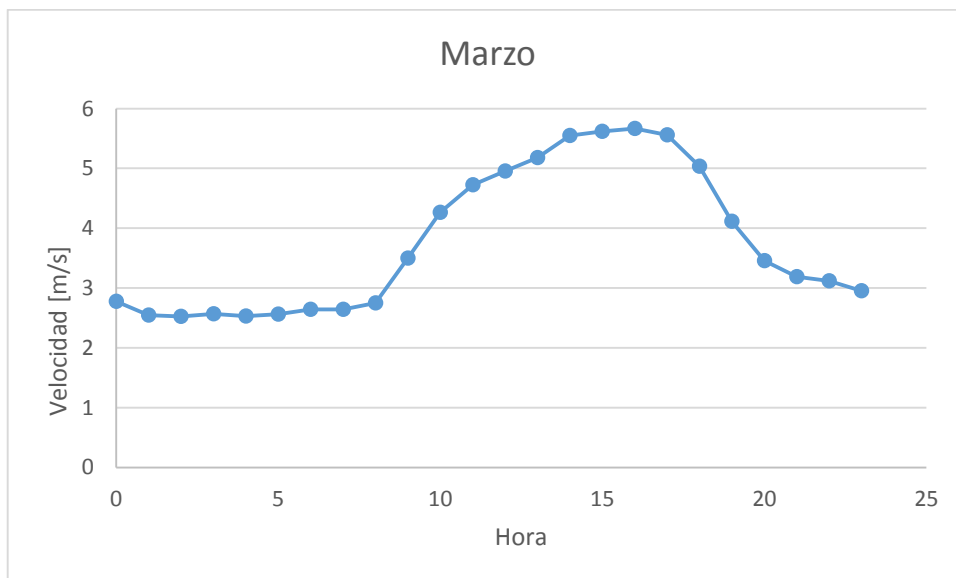
A partir de los datos del viento suministrados se procedió a calcular el promedio total (de los 10 años) del viento para cada hora del día, para cada mes del año. Los resultados se muestran en los Gráficos 2.3.1 al 2.3.13.



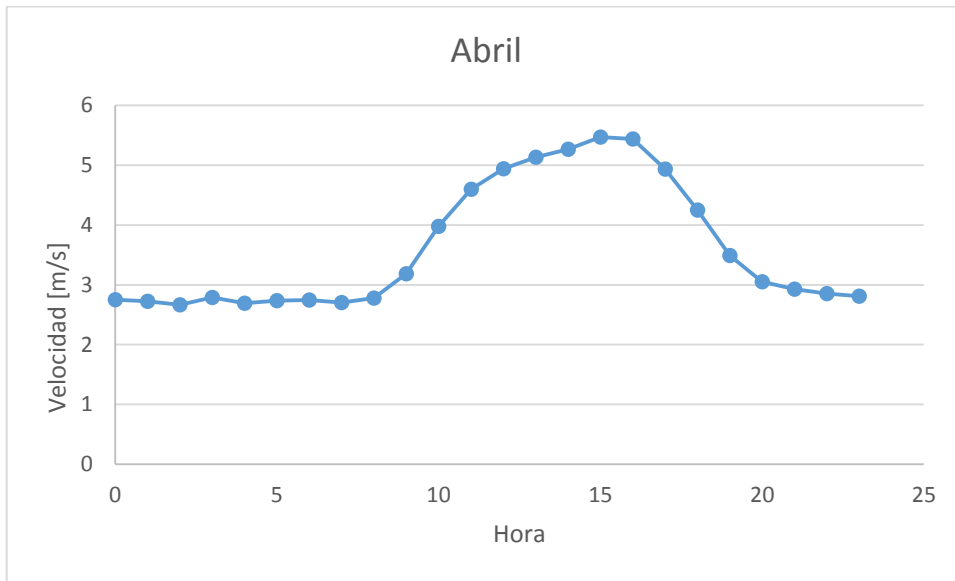
**Gráfico 2.3.1. Mes de enero.**



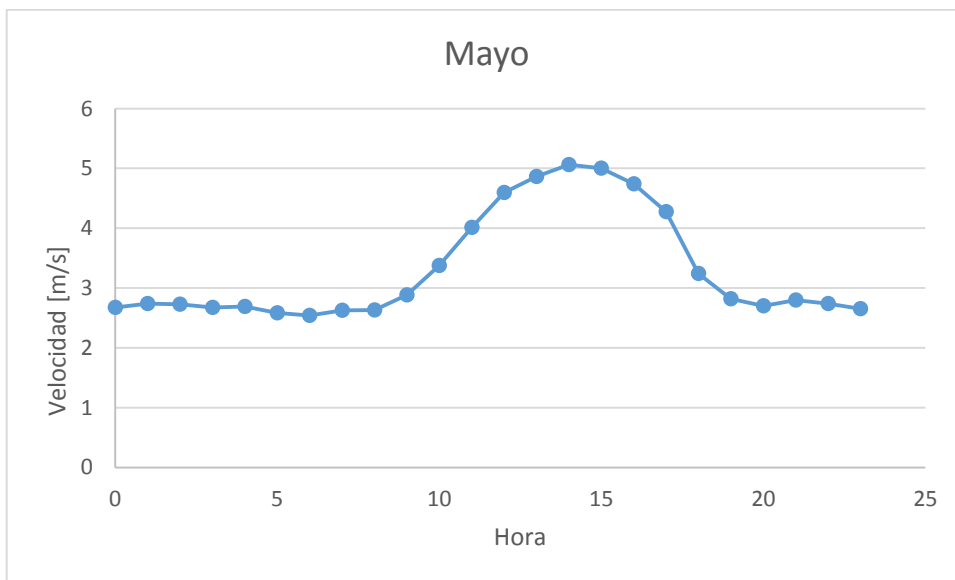
**Gráfico 2.3.2. Mes de febrero.**



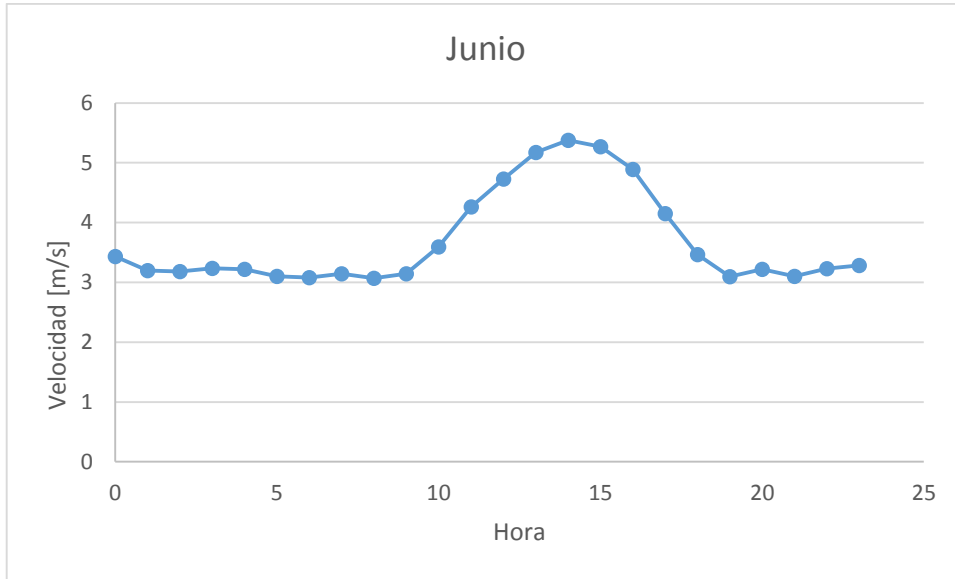
**Gráfico 2.3.3. Mes de marzo.**



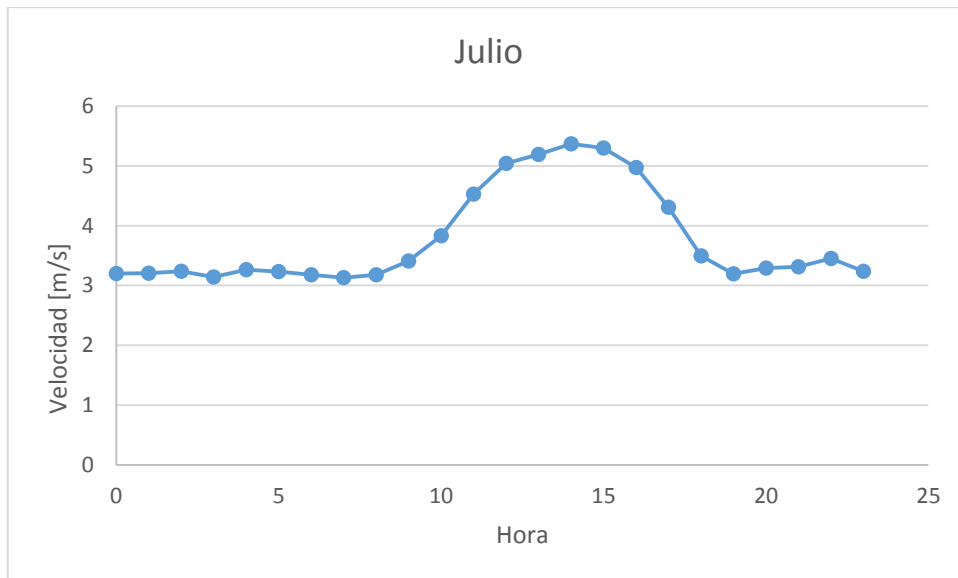
**Gráfico 2.3.4. Mes de abril.**



**Gráfico 2.3.5. Mes de mayo.**

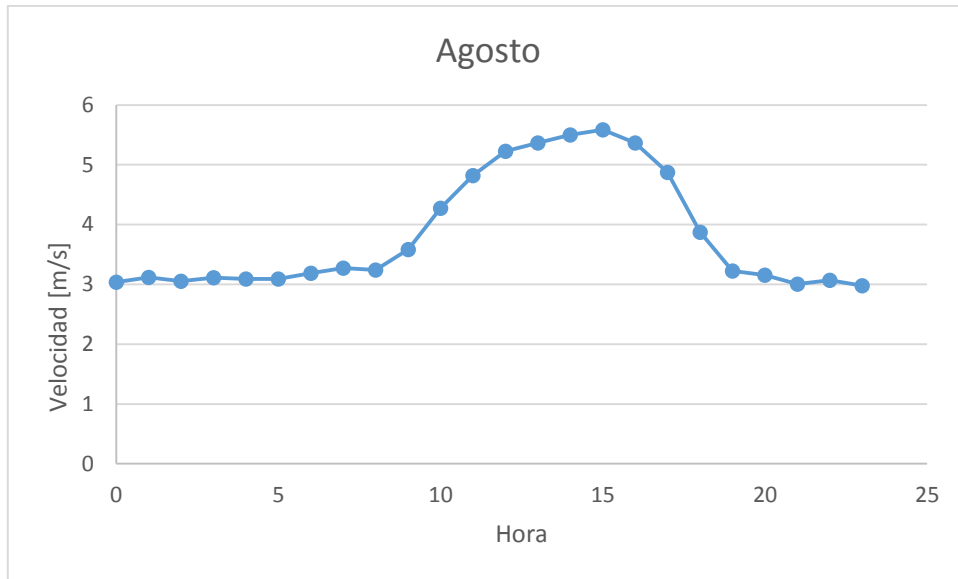


**Gráfico 2.3.6. Mes de junio.**

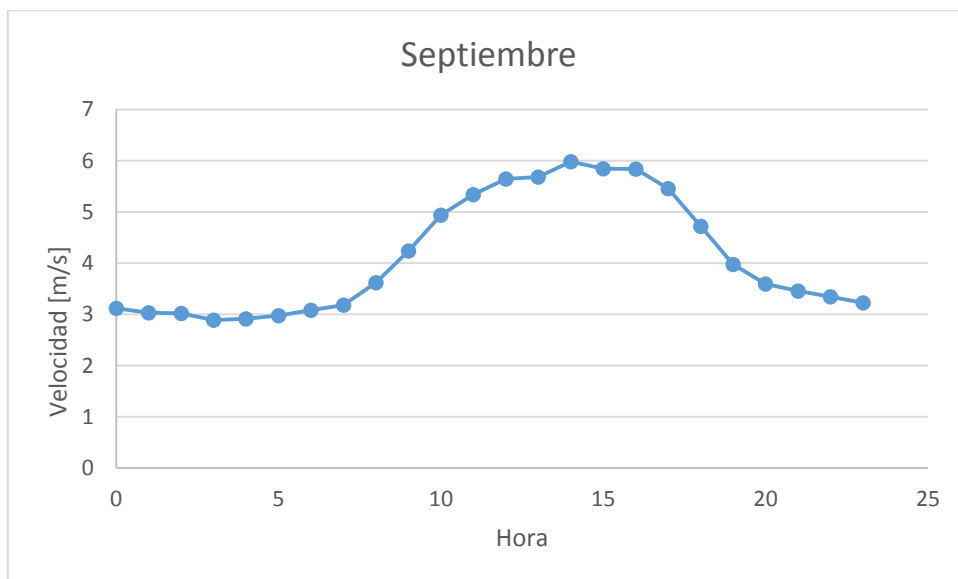


**Gráfico 2.3.7. Mes de julio.**

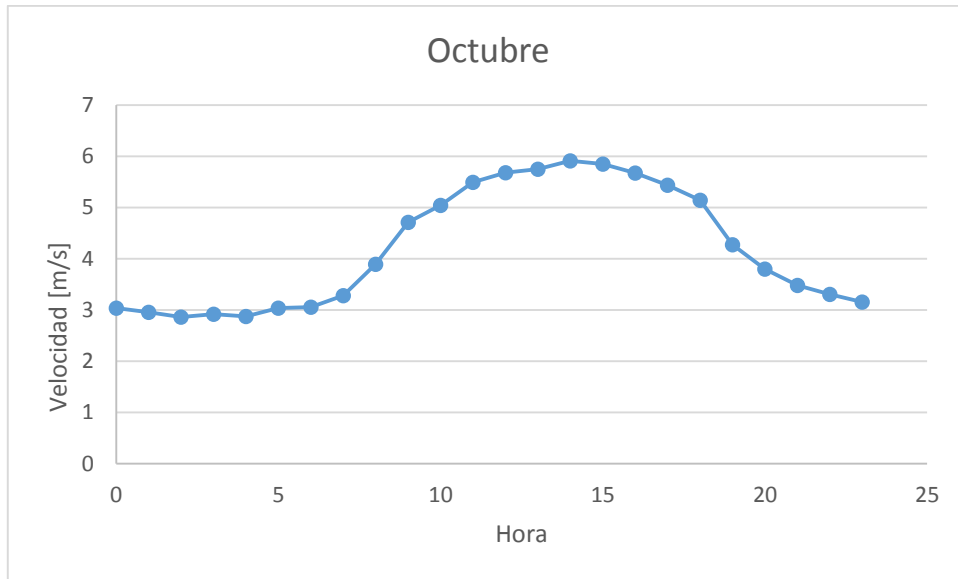




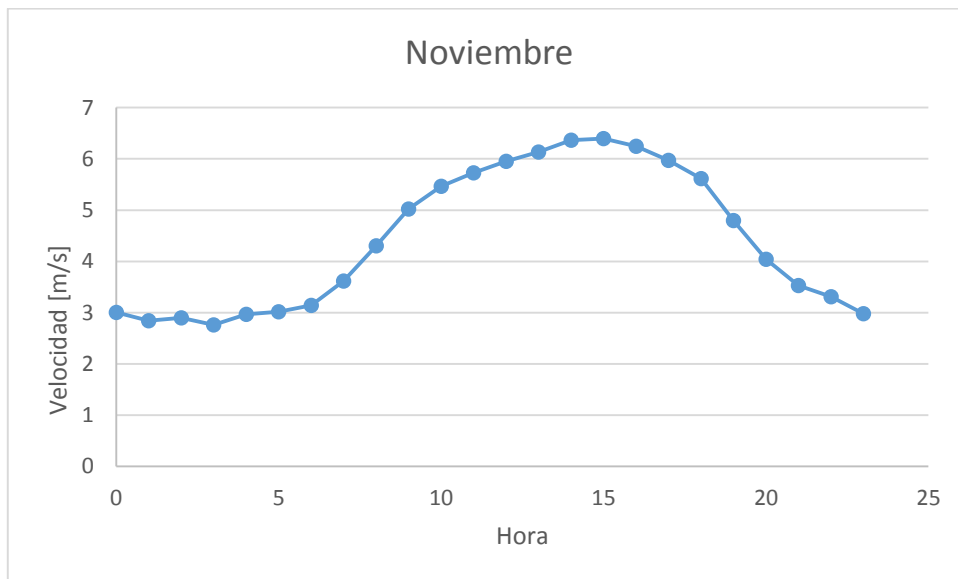
**Gráfico 2.3.8. Mes de agosto.**



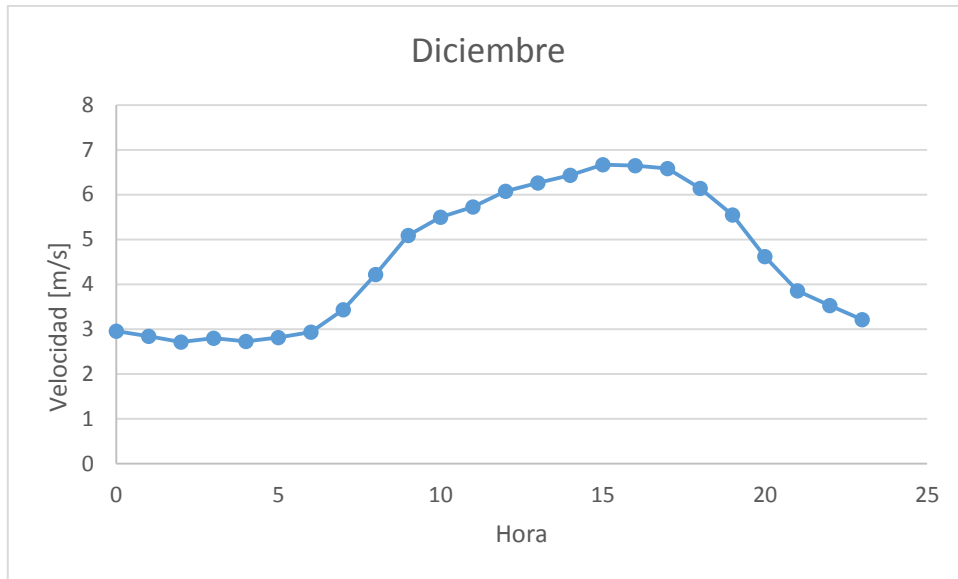
**Gráfico 2.3.9. Mes de septiembre.**



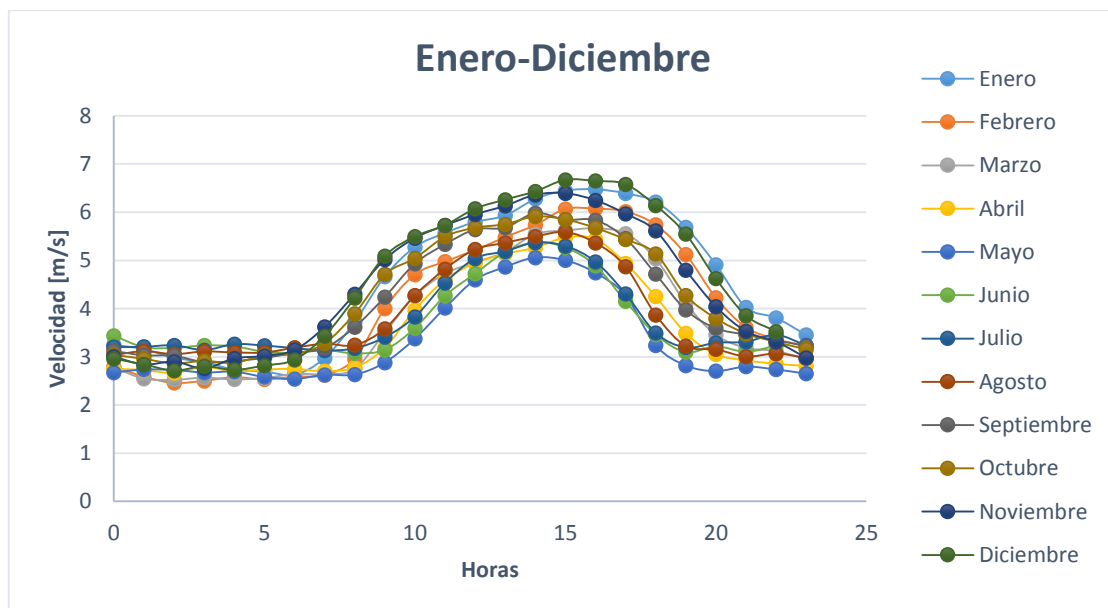
**Gráfico 2.3.10. Mes de octubre.**



**Gráfico 2.3.11. Mes de noviembre.**



**Gráfico 2.3.12. Mes de diciembre.**



**Gráfico 2.3.13. Todos los meses del año.**

Como se puede apreciar en el gráfico 2.3.13, la magnitud de la velocidad sigue una tendencia en función de las horas del día similar en todos los meses analizados.

### **Distribución de Weibull:**

Para el diseño de las aspas del aerogenerador necesitamos conocer la velocidad para la cual optimizaremos las aspas. Para conocer dicha velocidad recurrimos a la distribución de Weibull donde obtenemos la probabilidad que exista una determinada velocidad.

En la ecuación 2.3.2 podemos observar la función de densidad de probabilidad de esta distribución.

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

#### **Ecuación 2.3.2. Función de densidad de probabilidad**

Donde  $v$  es la velocidad del viento,  $c$  y  $k$  son los parámetros de escala y el factor de forma, respectivamente.

La función de distribución se observa en la ecuación 2.3.3.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

#### **Ecuación 2.3.3. Función de distribución.**

Para la determinación de los parámetros  $c$  y  $k$ , se utilizó una aproximación de mínimos cuadrados; partiendo de la función de distribución de Weibull, ecuación 2.3.3. Luego se procedió a aplicar a ambos miembros logaritmos dos veces como se muestra a continuación:

$$1 - F(v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \rightarrow -\ln [1 - F(v)] = \left(\frac{v}{c}\right)^k$$

$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} = k \cdot \ln(v) - k \cdot \ln(c)$$

Con lo cual obtenemos una recta donde:

$$y = m \cdot x + b \begin{cases} y = \ln\{-\ln[1 - F(v)]\} \\ x = \ln(v) \\ b = -k \cdot \ln(c) \end{cases}$$

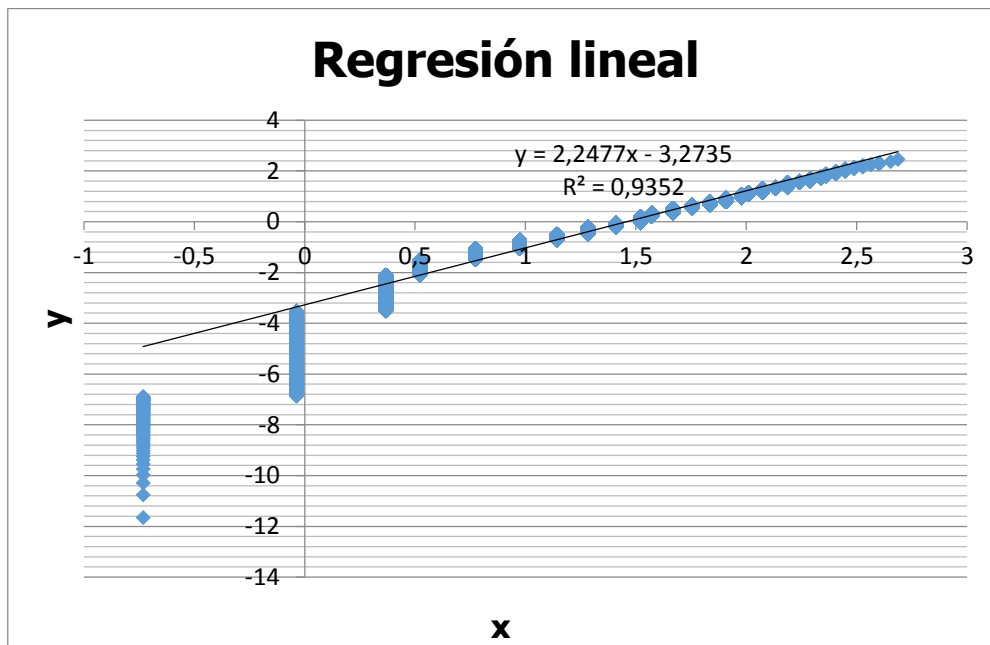
**Ecuación 2.3.4.**

De la ecuación 4 deducimos que:

$$\begin{aligned} k &= m \\ c &= e^{-b/k} \end{aligned}$$

**Ecuación 2.3.5.**

A continuación se muestra en el gráfico 2.3.14 la recta planteada en la ecuación 2.3.4.



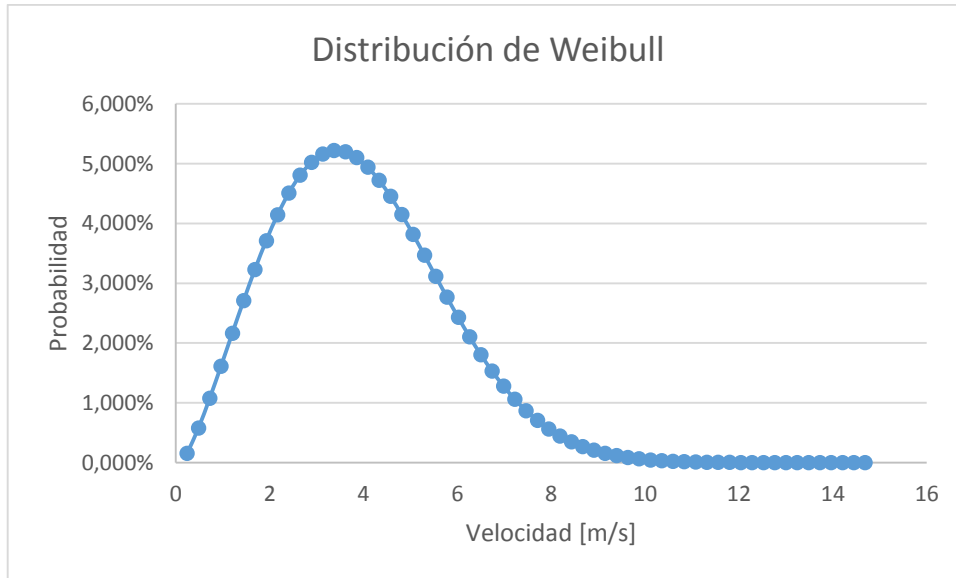
**Gráfico 2.3.14.**

Con lo cual obtenemos:

$$k = m = 2,2477$$

$$c = e^{-b/k} = 4,2903$$

Calculados c y k procedemos a graficar la distribución de Weibull utilizando la ecuación 2.3.3.



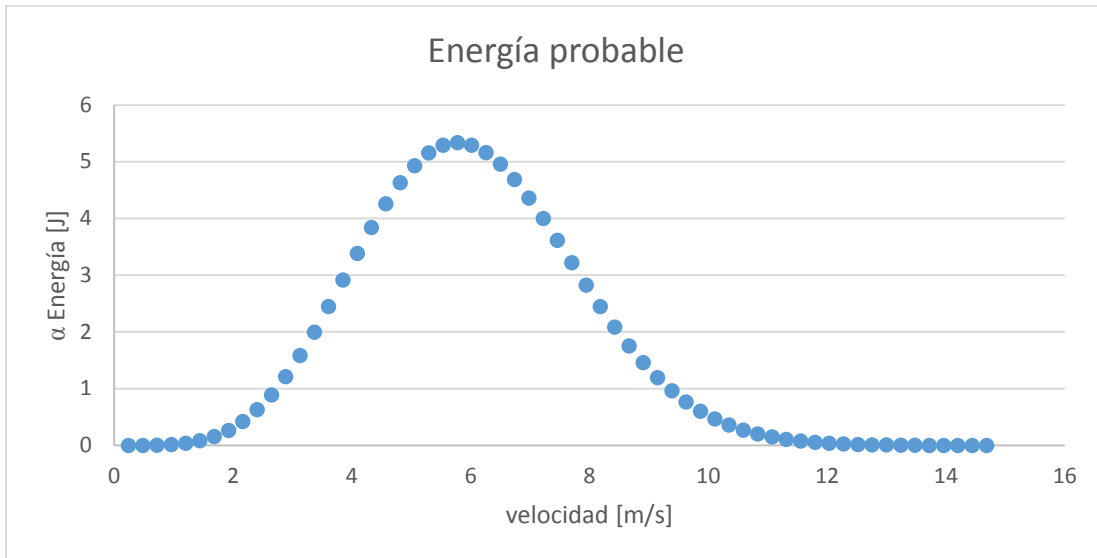
**Gráfico 2.3.15. Distribución de Weibull.**

A partir del gráfico 15 es posible obtener otro en el que se indica la energía probable para cada velocidad del viento a lo largo del año. Para ello se debe multiplicar la velocidad al cubo, por la probabilidad de aparición que tiene esta velocidad como se muestra en la ecuación 6.

$$E \propto v^3 \cdot f(v)$$

**Ecuación 2.3.6.**

En el gráfico 16 se muestra la energía probable según la velocidad.



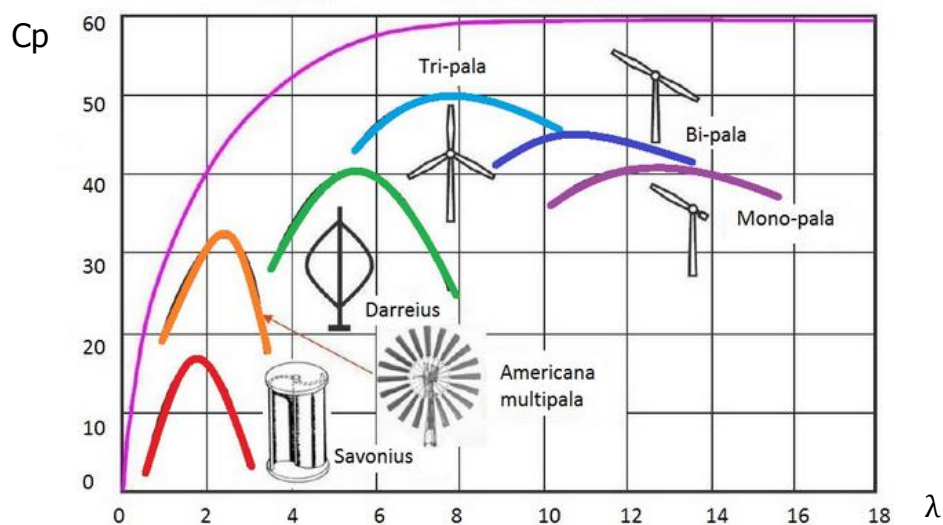
**Gráfico 2.3.16.**

Con lo cual del gráfico 2.3.16 podemos establecer una velocidad de diseño del aerogenerador de  $5,7 [m/s]$

### Clasificación de los aerogeneradores.

Existen distintos tipos de aerogeneradores: Savonius, Darrieux, de eje horizontal bipala, de eje horizontal tripala, etc.

En la figura 2.3.2 se observa el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) versus la velocidad específica, también conocida como TRS ( $\lambda$ ).



**Figura 2.3.2.**



El aerogenerador seleccionado fue de eje horizontal tripala ya que es el aerogenerador con mayor rendimiento.

### **Energía utilizable:**

Como bien se indicó en la ecuación 2.3.6 la energía disponible del viento es proporcional a la velocidad al cubo. La ecuación de la potencia disponible en el viento se indica en la ecuación 2.3.7.

$$N_{disponible\ viento} = \frac{1}{2} \rho_{aire} A_{aspas} V_{viento}^3$$

#### **Ecuación 2.3.7.**

Siendo esta potencia la que nos proveería una maquina ideal ya que toda máquina tiene asociada un rendimiento. Si lo multiplicamos por el rendimiento obtenemos la potencia utilizable como se muestra en la ecuación 8.

$$N_{disponible\ viento} = \frac{1}{2} \rho_{aire} A_{aspas} V_{viento}^3 \eta$$

#### **Ecuación 2.3.8.**

Para una primera aproximación descomponemos el rendimiento en tres partes asumiendo valores estimativos:

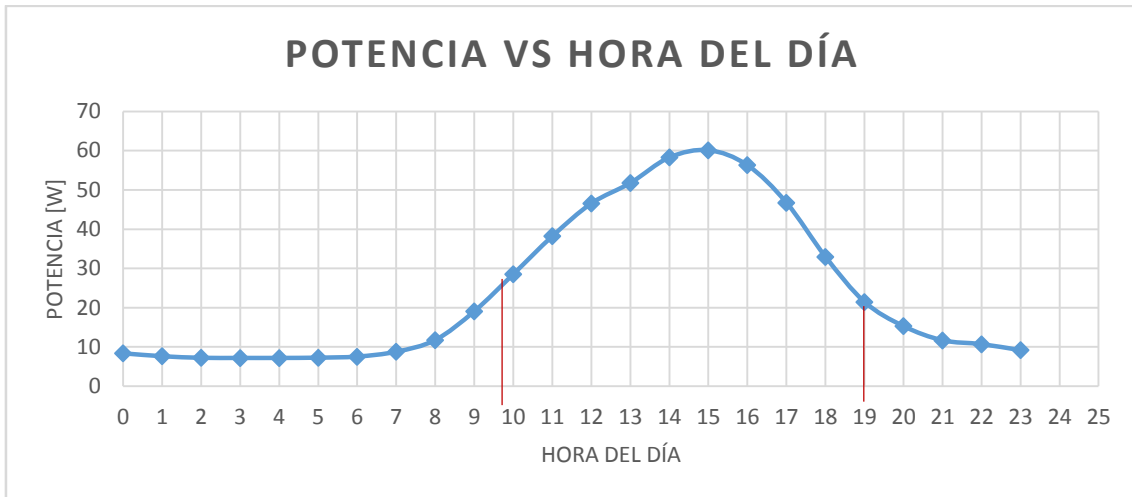
- ✓ Rendimiento del aspa. (0,49)
- ✓ Rendimiento del generador eléctrico. (0,9)
- ✓ Rendimiento sistema electrónico. (0,9)

El rendimiento se observa en la ecuación 2.3.9.

$$\eta = \eta_{aspa} \eta_{g.e.} \eta_{s.e.} = 0,3969$$

Adoptaremos un radio de 0,8 [m] y  $\rho_{aire}=1,19 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$ . La gráfica 2.3.17 nos muestra la potencia utilizable por hora del día.





**Gráfico 2.3.17.**

Con la velocidad de diseño, el área de las aspas, con la densidad del aire y el rendimiento obtenemos potencia de diseño.

$$N_{diseño} = 87,93 [w]$$

Tomando un intervalo de trabajo de aproximadamente 10 horas, la energía aprovechable nos da 441,13 [w.h].



## **Capítulo 3: Conceptos del rotor.**

### **3.1 Principio de funcionamiento de un aerogenerador.**

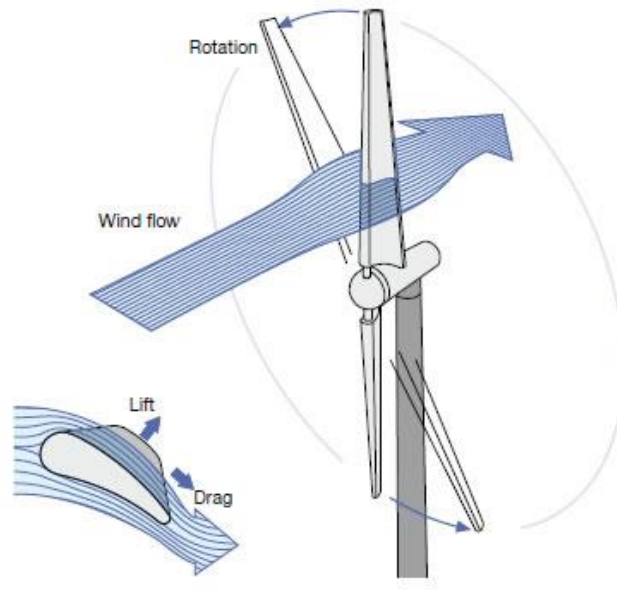
Un aerogenerador o turbina eólica transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica sin usar combustible, a través de las palas que transforman parte de la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación.

Los aerogeneradores pueden ser de "sustentación" o de "resistencia" en función de cuál de las fuerzas generadas por el viento se use como "fuerza motriz".

Las turbinas de uso más extendido en la actualidad funcionan por sustentación. En ellas el viento circula por ambas caras de las aspas, las cuales tienen perfiles geométricos distintos, creando de esta forma un área de depresión en la cara superior respecto a la presión en la cara inferior. Esta diferencia de presiones produce una fuerza llamada sustentación (Lift) aerodinámica (figura 3.1.1) sobre la superficie de la pala, de forma parecida a lo que sucede en las alas de los aviones.

La sustentación en las alas de un avión es capaz de levantarlo del suelo y mantenerlo volando, mientras que en un aerogenerador, dado que las palas son solidarias con el terreno, provoca su rotación alrededor de un eje.

Al mismo tiempo se genera una fuerza de resistencia (Drag) que se opone al movimiento y es perpendicular a la sustentación. En los aerogeneradores diseñados correctamente, la relación sustentación-resistencia es grande dentro del rango normal de operación.

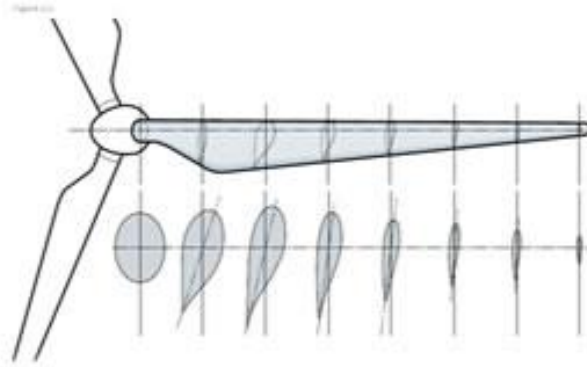


**Figura 3.1.1 Principio de funcionamiento.**

### **3.2 Aspas de un aerogenerador:**

Las aspas, o palas, son los componentes que interactúan con el viento, por lo que se diseñan con un perfil que maximice su eficiencia aerodinámica. En la Figura 3.2.1 se muestra la forma característica de una pala, así como sus secciones transversales, definidas por el perfil aerodinámico del aspa. Esta pala presenta una curvatura de perfil de unos  $25^\circ$  entre la base y su extremo.

Dado que las fuerzas aerodinámicas varían con el cuadrado de la velocidad relativa, estas crecen rápidamente con la distancia al buje. Por ello es que un correcto diseño aerodinámico del aspa, con buena sustentación y baja resistencia aerodinámica, y por tanto capaz de extraer elevada potencia del viento, tiene un aspecto como el mostrado en la figura 3.2.1, con una sección transversal menor cuanto más alejada esté esta de la base.



**Figura 3.2.1 Forma característica de una pala y sus secciones transversales.**

La sección transversal de la base de la pala es mayor que el extremo, permitiendo a la vez obtener la rigidez necesaria para resistir las cargas mecánicas variables que se dan en el funcionamiento normal y que contribuyen a su deterioro.

El viento ejerce una fuerza variable por las fluctuaciones debidas a las turbulencias; además, durante la rotación, una pala en posición elevada se somete a un viento más intenso que cuando está en una posición baja, con las consiguientes fluctuaciones de carga con cada giro. Por otra parte, la fuerza centrífuga debida a la rotación ejerce una tracción sobre las distintas partes de la pala; y su propio peso crea un momento de flexión sobre la base de forma alternativa en cada rotación.

Las palas se fabrican con materiales ligeros, como son los plásticos reforzados con fibra, con buenas propiedades de resistencia al desgaste. En las palas de los aerogeneradores de tamaño medio y pequeño se acostumbra a usar fibra de vidrio o aluminio, mientras que en las palas más grandes se utiliza fibra de carbono para aquellas partes sometidas a las cargas más críticas.

Las fibras se introducen en una matriz de poliéster, resina epoxi, o vinil éster, formada por dos mitades unidas y reforzadas mediante una matriz interna. La superficie exterior de la pala se recubre con una capa de gel coloreado, con el fin de prevenir el envejecimiento del material compuesto, causado por la radiación ultravioleta.

En función de la tecnología usada por el fabricante, las palas podrán dotarse de elementos adicionales, tales como reguladores de pérdida para estabilizar el flujo

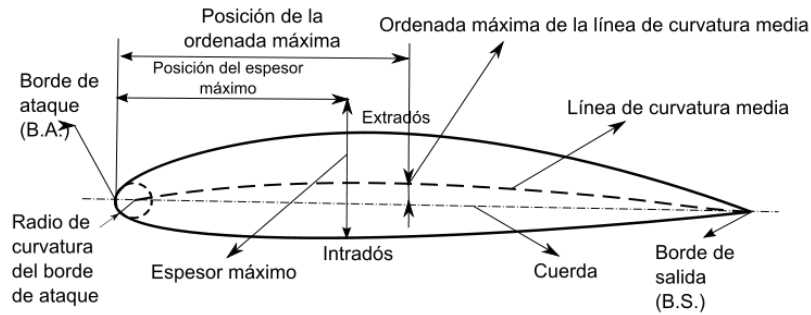
de aire, generadores de vórtice para aumentar la sustentación, o alerones en las puntas para reducir la pérdida de sustentación y el ruido.

### **El perfil aerodinámico:**

El perfil aerodinámico del aspa es su sección transversal (ver Figura 3.2.2). Su geometría permite crear una fuerza de sustentación y trabajar con bajas pérdidas. Existe una gran cantidad de perfiles, y son optimizados de acuerdo a las condiciones de trabajo tales como velocidad del viento y velocidad de giro del aerogenerador.

En el diseño de palas es necesario mantener claro una serie de conceptos:

- i. La línea de cuerda es una línea recta que une el borde de ataque y el borde de fuga del perfil.
- ii. La cuerda es la longitud de la línea anterior. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda.
- iii. La línea de curvatura media es la línea media entre el extradós y el intradós.
- iv. La curvatura máxima es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda. La posición de la curvatura máxima es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.
- v. El espesor máximo es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós).
- vi. El radio del borde de ataque es una medida delafilamiento del borde de ataque. Puede variar desde 0, para perfiles supersónicos afilados, hasta un 2% de la cuerda para perfiles más bien achatados.



**Figura 3.2.2 Características principales de un perfil aerodinámico.**

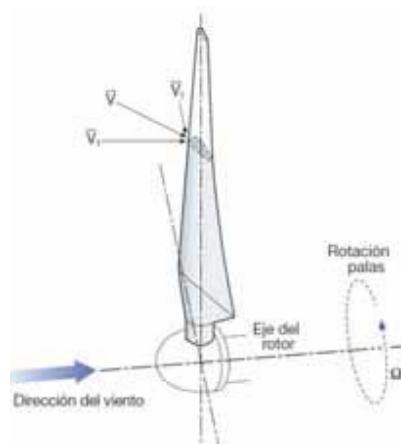
En la figura anterior se observa un extremo romo, que es el borde de ataque mientras que el otro extremo, de forma afilada, es el borde de salida.

Los perfiles tienen distintos nombres según su geometría. Se denominan biconvexos si el intradós y el extradós son convexos, plano-convexos si tienen el extradós convexo y el intradós plano, de doble curvatura si el intradós y el extradós son cóncavos.

### **Análisis aerodinámico de la pala:**

Una pala es esencialmente un ala sobre la cual actúan dos flujos de aire los cuales dependen de:

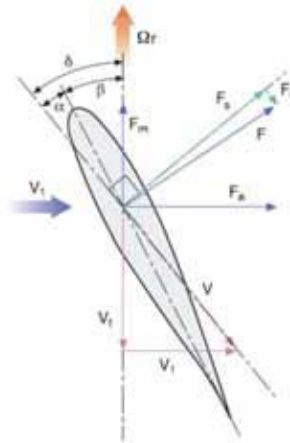
1. El viento que circula por el tubo de flujo con velocidad  $\vec{V}_1$  paralela al eje del aerogenerador.
2. La rotación de la propia pala que crea una componente de velocidad aparente  $\vec{V}_t$  perpendicular a la velocidad anterior.



**Figura 3.2.3 Esquema de velocidades en la pala.**

Como consecuencia del flujo de aire resultante ( $V$ ) sobre el perfil de la pala, se generan dos fuerzas aerodinámicas que se definen como:

- Fuerza de sustentación  $F_s$ , perpendicular a la línea de cuerda del perfil.
- Fuerza de arrastre  $F_r$ , paralela a la línea de cuerda.



**Figura 3.2.4 Diagrama de fuerzas de la pala.**

Siendo:

- $\alpha$  : ángulo de ataque o de incidencia, que es la diferencia angular entre la dirección del flujo de aire resultante y la línea de cuerda de la sección de la pala
- $\beta$  : ángulo de paso, que es la diferencia angular entre el plano de rotación del eje de la pala y la línea de cuerda
- $\delta = \alpha + \beta$  : ángulo constructivo

La sustentación y la resistencia se expresan, respectivamente, mediante las siguientes fórmulas:

$$F_s = \frac{1}{2} C_l A \rho V^2$$

$$F_r = \frac{1}{2} C_d A \rho V^2$$

**Ecuación 3.2.1**



Siendo:

- $V$ : Velocidad aparente del viento incidente sobre el perfil de la pala.
- $\rho$ : Densidad del aire.
- $A$ : Superficie de la pala.
- $C_l$ : Coeficiente de sustentación.
- $C_d$ : Coeficiente de resistencia.

Descomponiendo las fuerzas de sustentación y de resistencia en las direcciones paralela y perpendicular al eje del aerogenerador se obtienen (figura 3.2.4):

- La componente de la fuerza motriz  $F_m$ , que genera el par en el eje principal:

$$F_m = F_s \sin \delta - F_r \cos \delta$$

### **Ecuación 3.2.2**

- La componente de la fuerza axial  $F_a$ , que no genera par útil pero sí tensión sobre el rotor:

$$F_a = F_s \cos \delta + F_r \sin \delta$$

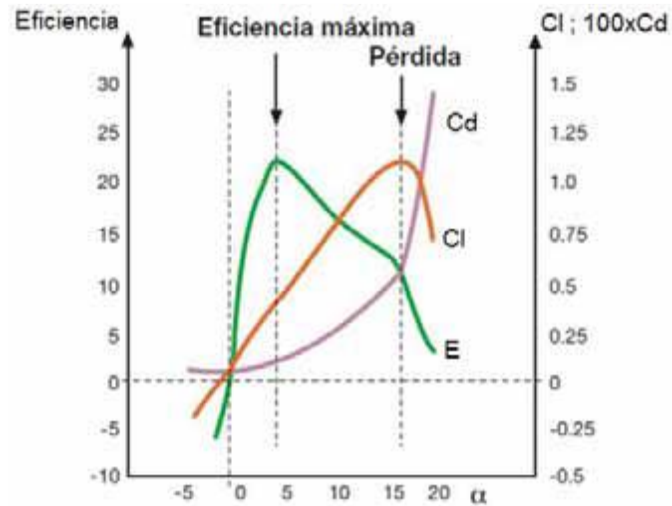
### **Ecuación 3.2.3**

En la figura 3.2.5 se muestran las curvas polares del perfil, que representan las variaciones de los coeficientes y en función del ángulo de ataque.

En condiciones de pérdida, la eficiencia / del perfil se reduce considerablemente y el comportamiento aerodinámico se vuelve inestable, formándose una estela turbulenta.

Como puede observarse en la Figura 3.2.5, el coeficiente de sustentación es aproximadamente proporcional al ángulo de ataque para valores inferiores a unos  $15^\circ$  (varía con el perfil) y, a diferencia del coeficiente de arrastre, puede ser negativo de manera que la fuerza de sustentación puede invertirse.





**Figura 3.2.5 Eficiencia, CI y Cd en función de  $\alpha$ .**

Tanto la curva del coeficiente de sustentación como el de arrastre varían para diferentes números de Reynolds.

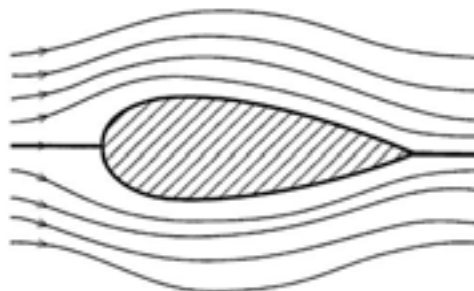
En un perfil aerodinámico el número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\rho c V}{\mu}$$

**Ecuación 3.2.4**

Siendo:

- $\rho$ : Densidad del aire.
- $c$ : Cuerda del perfil.
- $V$ : Velocidad incidente al perfil (Como se indica en la figura 8).
- $\mu$ : Viscosidad del aire.



**Figura 3.2.6 Perfil inmerso en una corriente de aire**

### 3.3 Recopilación de perfiles para aerogeneradores de baja potencia.

Los perfiles utilizados en el presente trabajo fueron seleccionados en base a las recomendaciones de un trabajo de investigación en micro-generación, realizado también para la ciudad de Mar del Plata. En el mismo, partiendo de seis investigaciones sobre el tema (en otros sitios de aplicación), se pre-seleccionan de cada una algunos perfiles a ensayar. Tenemos entonces como resultado de este proceso, 14 geometrías distintas, cada una con sus parámetros característicos. A continuación, se presenta una tabla reuniendo esta información:

Perfiles	Espesor máximo	Máxima curva	Fuente
S822	16% a 39.2% de la cuerda	1.8% a 59.5% de la cuerda	The National Renewable Energy Laboratory.
S823	21,2% a 24,3% de la cuerda	2,4% a 70,5% de la cuerda	The National Renewable Energy Laboratory.
S8036	16% a 36,8% de la cuerda	1,3% a 40,4% de la cuerda	<i>University of Illinois at Urbana-Champaign.</i>
SD2030	8.6% a 35.5% de la cuerda	2.2% a 45.3% de la cuerda	<i>University of Illinois at Urbana-Champaign.</i>
SG6040	16% a 35.3% de la cuerda	2.3% a 60.5% de la cuerda	The National Renewable Energy Laboratory.
SG6041	10% a 34.9% de la cuerda	1.6% a 49.7% de la cuerda	The National Renewable Energy Laboratory.
SG6042	10% a 33.5% de la cuerda	3.3% a 51.5% de la cuerda	The National Renewable Energy Laboratory.
SG6043	10% a 32.1% de la cuerda	5.1% a 53.3% de la cuerda	The National Renewable Energy Laboratory.
SG6050	16% a 31.5% de la cuerda	3.1% a 48.9% de la cuerda	The National Renewable Energy Laboratory.
SG6051	12% a 35.7% de la cuerda	3.1% a 49.9% de la cuerda	The National Renewable Energy Laboratory.
NACA4412	12% a 30% de la cuerda	4% a 40% de la cuerda	Instituto Politécnico nacional
MH106	13.1% a 27.4% de la cuerda	0.9% a 27.4% de la cuerda	<i>University of Illinois at Urbana-Champaign.</i>
FX63-137	13,7% a 30,9% de la cuerda	6% a 53,3% de la cuerda	<i>University of Illinois at Urbana-Champaign.</i>
E387	9.1% a 31.1% de la cuerda	3.2% a 44.8% de la cuerda	<i>University of Illinois at Urbana-Champaign.</i>

**Tabla 3.3.1. Perfiles elegidos según fuentes citadas.**

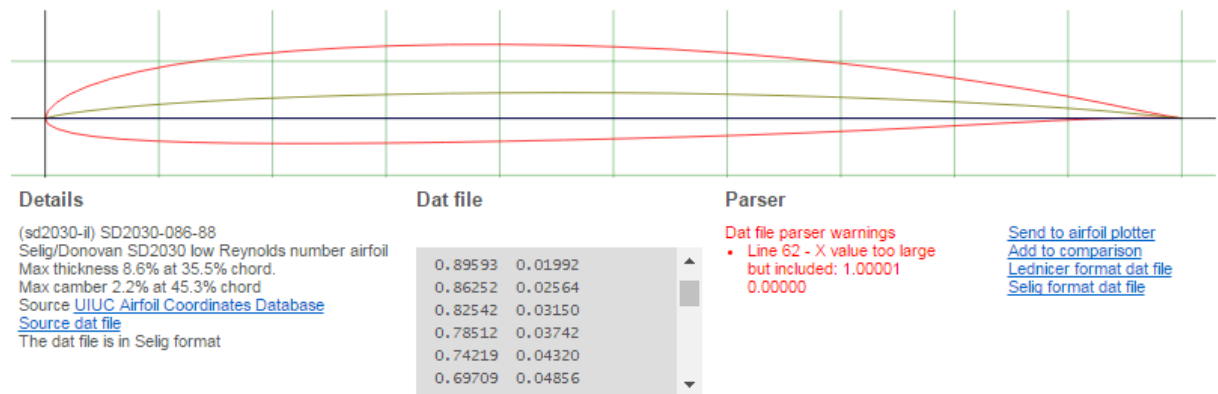
***Volumen II:Diseño del Aspa E.A.Cáceres G.Dasso M.N.Perez***

Los datos característicos de los perfiles seleccionados se obtuvieron de los siguientes sitios de internet:

- <http://airfoiltools.com> [2]
- <http://worldofkrauss.com> [3]

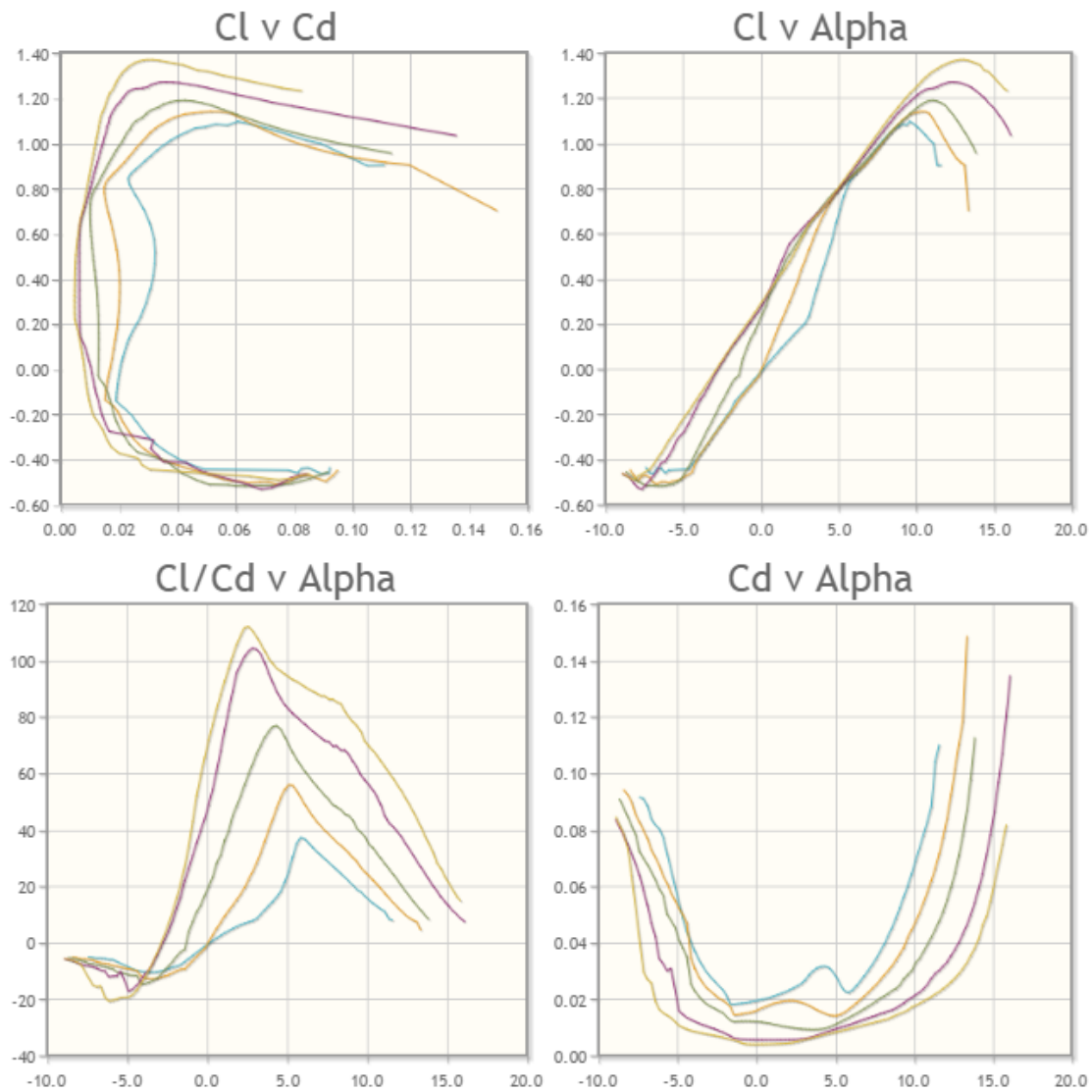
Estos sitios proporcionan información de más de 1600 y 1500 perfiles aerodinámicos respectivamente. Con datos derivados de simulaciones, proporcionan información sobre las curvas polares para distintos valores de Reynolds, pudiendo descargarlas en forma de archivos de texto. Además hay disponibles tablas de los puntos coordenados de las geometrías del perfil.

A modo de ejemplo se muestran a continuación la figura 3.3.1 y la figura 3.3.2, que son imágenes del sitio web <http://airfoiltools.com>. Se aprecia parte de la información dada para el perfil SD2030.



**Figura 3.3.1. Geometría y algunos datos del perfil SD2030.**

La página también brinda la opción de descargar la geometría cartesiana del perfil en un archivo formato “.dat”, en forma de puntos que la componen. Con estos puntos, utilizando alguna función de aproximación para unirlos, se puede graficar el perfil en la mayoría de los programas de dibujo asistido por computadora (CAD).



**Figura 3.3.2. Curvas características del perfil SD2030.**

El número de *Reynolds* es muy influyente en la performance aerodinámica del perfil. En la Figura 1.3.2, cada color representa un *Re* distinto. Los valores de *Re* son: 50.000 (azul), 100.000 (naranja), 200.000 (verde), 500.000 (violeta) y 1.000.000 (marrón).

Lo ideal es que el perfil opere a máxima relación  $C_l/C_d$  para obtener máxima potencia. Este punto de operación óptima se da para un ángulo de ataque que puede leerse de las curvas polares mostradas arriba.

El coeficiente  $C_m$  que muestra la Figura 1.3.2 es el coeficiente de torsión que permite calcular el momento torsor generado sobre el perfil.



## Capítulo 4: Principios teóricos.

### 4.1 Energía del viento.

Como se ha visto en el primer volumen del trabajo, puede calcularse la potencia disponible en el viento, que proviene de su energía cinética, planteando la potencia del viento como la derivada de la energía con respecto al tiempo:

$$N_{viento} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm v^2 - 0}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\rho(A v dt)v^2 - 0}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

#### Ecuación 4.1.1

Siendo:

- $N_{viento}$ : Potencia del viento.
- $dm$ : Masa de aire ingresante (y saliente) en el volumen de control durante un  $dt$ .
- $v$ : Velocidad del viento.
- $A$ : Área transversal al viento (área del aerogenerador).
- $\rho$ : Densidad del aire.

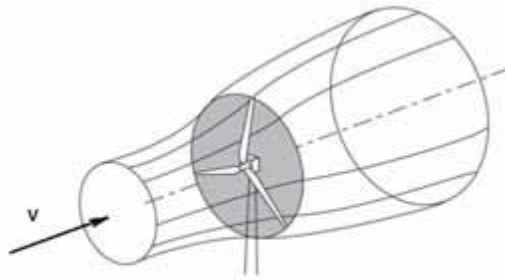
Este resultado representa la potencia que puede extraer una máquina ideal de área  $A$  perpendicular a la dirección del viento, que absorba toda su energía cinética.

### 4.2 Límite de Betz.

Considérese que se interrumpe el paso del viento con una máquina eólica ideal de área  $A$ , como la analizada anteriormente, la cual genera un salto de presión sobre el flujo de aire que la atraviesa.

Cuanto menor sea la velocidad del flujo de aire luego de pasar por dicha máquina, mayor será la energía extraída a cada partícula de aire, pero menor será el caudal de partículas. Si se intenta detener el aire hasta velocidad cero, no se obtendrá potencia útil pues el caudal tenderá a cero también. El rendimiento óptimo de la máquina se dará para una velocidad de salida del viento no nula, como se demuestra a continuación.

La situación se esquematiza en la siguiente figura:



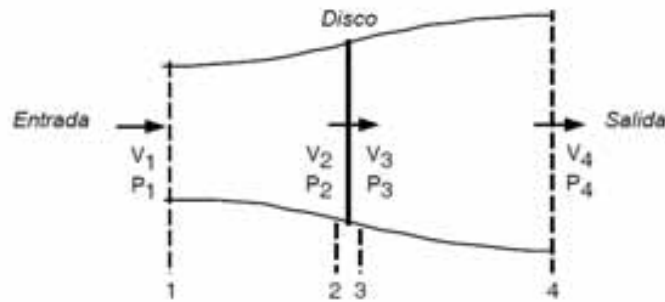
**Figura 4.2.1 Volumen de control considerado por Betz.**

Si bien se ha dibujado un aerogenerador de eje horizontal de tres palas, esto es solo con fines esquemáticos, valiendo el límite de Betz para cualquier máquina eólica.

Superpuesto al aerogenerador se ha dibujado un disco actuador que representa una máquina eólica cualquiera. Tal disco tiene espesor infinitesimal, área transversal  $A$ , y presenta una resistencia a ser atravesado por el aire generando un salto de presión.

El salto de presión generado por el disco, se supone aprovechado en su totalidad como fuerza activa sobre la máquina eólica, esto equivale a decir que la máquina es ideal.

La condición de operación será la siguiente:



**Figura 4.2.2. Puntos de interés para el análisis**

El punto "1" se supone no influenciado por el disco actuador. De él proviene el viento.

El punto "2" es inmediatamente antes del disco y el punto "3" es inmediatamente después.

El punto "4" es aquel donde la presión ha alcanzado el valor de la presión atmosférica.

Se debe notar que cualquier punto ubicado entre 3 y 4 posee la misma energía y representa la misma condición de salida del flujo, sin embargo es conveniente elegir el punto de salida en 4 donde se conoce la presión. Más allá del punto 4 el aire aumentará su velocidad hasta alcanzar la velocidad del viento  $V_1$ , tras adquirir energía cinética del aire circundante; pero plantear el punto 4 más allá de donde se lo ha hecho no es útil pues, por lo recién comentado, no podría plantearse conservación de la energía entre 3 y 4.

En este análisis se considera que las velocidades del viento antes y después del disco sólo poseen componente axial.

Se cumple entonces que:

$$V_1 > V_4$$

**Ecuación 4.2.1**



Ya que parte de la energía cinética es extraída por el disco.

$$P_1 = P_4 = P_0$$

#### **Ecuación 4.2.2**

Siendo  $P_0$  presión atmosférica.

Si se asume válida la forma dibujada para el tubo imaginario por donde circula el aire que atraviesa el disco, entonces:

$$A_2 = A_3$$

#### **Ecuación 4.2.3**

Y por consiguiente, suponiendo que el fluido es incompresible y planteando conservación de la masa se tiene:

$$A_2 V_2 = A_3 V_3$$

$$V_2 = V_3$$

#### **Ecuación 4.2.4**

Lo cual es correcto porque no puede existir diferencia de velocidades entre el punto 2 y el punto 3, ya que el disco tiene espesor infinitesimal.

Además se supone que el disco genera un salto de presión uniforme y que los perfiles de velocidades y presiones son uniformes en cualquier sección del tubo imaginario.

A continuación se realizan los balances necesarios sobre el volumen de control esquematizado en la Figura 9, con el fin de obtener el rendimiento óptimo de Betz.

Por conservación de la masa:

$$A_1 V_1 = A_4 V_4$$





### **Ecuación 4.2.5**

La variación de la energía cinética en el tiempo viene dada por la variación en la entrada menos la de la salida:

$$\frac{d E_c}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} V_1^2 - \frac{1}{2} \dot{m} V_4^2 = \frac{1}{2} \rho A V_2 (V_1^2 - V_4^2)$$

### **Ecuación 4.2.6**

Donde:

- $\dot{m}$ : caudal másico
- $\rho$ : densidad del Aire
- $A$ : área transversal del disco actuador ( $A = A_2 = A_3$ )

El caudal másico se ha calculado en el punto 2 (o 3), en el cual sabemos que la masa de aire atraviesa una sección de área  $A$ , a una velocidad  $V_2$ .

Por otro lado, si se plantea sumatoria de fuerzas igual a la variación del ímpetu en el tiempo, se obtiene:

$$T = \dot{m} \Delta V = \rho A V_2 (V_1 - V_4)$$

### **Ecuación 4.2.7**

Donde  $T$  es la fuerza que ejerce el aire sobre el disco, la cual causa el salto instantáneo de presión.

Suponiendo que el disco capta toda esta potencia sin pérdidas, se tiene que la potencia útil es:

$$N_{\text{útil}} = T V_2 = \rho A V_2^2 (V_1 - V_4)$$

### **Ecuación 4.2.8**

Se iguala entonces la potencia útil con la variación de la energía cinética:



$$\rho AV_2^2 (V_1 - V_4) = \frac{1}{2} \rho AV_2 (V_1^2 - V_4^2)$$

#### **Ecuación 4.2.9**

Despejando  $V_2$  de la ecuación queda entonces:

$$V_2 = \frac{V_1 + V_4}{2}$$

#### **Ecuación 4.2.10**

Se define un factor de inducción axial  $b$ , relacionando las velocidades de entrada y salida:

$$V_4 = b V_1$$

#### **Ecuación 4.2.11**

Reemplazando las ecuaciones 4.2.10 y 4.2.11 en la ecuación 4.2.8, obtenemos:

$$N_{\text{útil}} = \rho A \left( \frac{V_1 + bV_1}{2} \right)^2 (V_1 - bV_1) = \frac{\rho AV_1^3}{4} (1 + b)^2 (1 - b)$$

#### **Ecuación 4.2.12**

Derivando con respecto a  $b$  e igualando a cero la ecuación anterior, se obtiene que el máximo rendimiento se da para  $b = \frac{1}{3}$ .

En estas condiciones, la potencia útil será:

$$N_{\text{útil máx}} = \frac{\rho AV_1^3}{4} \left( 1 + \frac{1}{3} \right)^2 \left( 1 - \frac{1}{3} \right) = \frac{8}{27} \rho AV_1^3$$

#### **Ecuación 4.2.13**

Dada la Ecuación X que indicaba la potencia disponible en el viento, puede obtenerse el rendimiento óptimo de funcionamiento para una máquina eólica ideal, trabajando en las condiciones que se han supuesto. Este rendimiento es conocido como límite de Betz:



$$\eta_{Betz} = \frac{N_{\text{útil máx}}}{N_{\text{viento}}} = \frac{\frac{8}{27} \rho A V^3}{\frac{1}{2} \rho A V^3} = \frac{16}{27} \cong 0,59$$

#### **Ecuación 4.2.14**

Sin embargo, los aerogeneradores reales operan a rendimientos bastante menores. Estas diferencias aparecen por no haber considerado las siguientes cuestiones en el análisis previo:

- El aire posee viscosidad, generándose fuerzas de naturaleza viscosa sobre las palas entre partículas de aire, lo que resulta en el desprendimiento de vórtices
- El aire es un fluido compresible.
- Los perfiles de las aspas no tienen un diseño óptimo.
- Al pasar el aire a través del aerogenerador, el fluido rota, por lo que se forma una estela.
- Los aerogeneradores están compuestos por un número finito de palas, de tal forma que las distribuciones de presiones y velocidades no resultan uniformes.

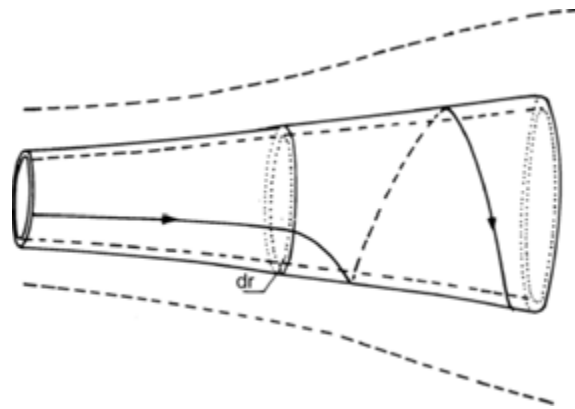
#### **4.3 Modelo de Rankine-Froude.**

La Teoría de Momento de Disco Actuador es una teoría en dinámica de fluidos que predice el comportamiento de una hélice, considerándola como un disco plano (disco actuador). Esta teoría fue desarrollada por el escocés William John Macquorn Rankine y los ingleses G. G. Alfred y R.E. Froude.

El disco actuador gira e induce una rotación (en sentido opuesto) sobre el flujo de aire que lo atraviesa. Para obtener una mejor aproximación de la potencia que desarrolla un aerogenerador respecto del análisis hecho por Betz, es necesario considerar dicha rotación del fluido.

Retomando la idea planteada al obtener el límite de Betz, se interpone en la corriente de aire un disco delgado y de área  $A$ . Tras pasar el flujo de aire por el disco sucede que:

1. Hay una brusca disminución en la presión.
2. El perfil de la velocidad en el sentido axial (perpendicular al disco) es continuo. Es decir que la velocidad axial justo a la entrada del disco es la misma que justo a la salida, pues el disco es delgado.
3. La velocidad de rotación pasa de valer cero, justo en la entrada del disco, a un valor finito no nulo en su salida.



**Figura 4.3.1. Volumen de control del modelo de Betz con el agregado de la rotación.**

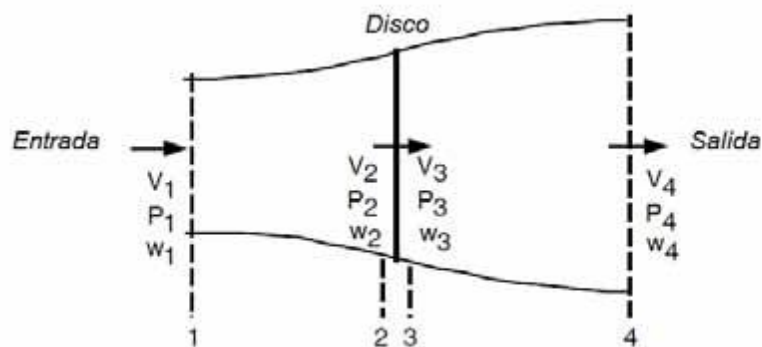
De las tres aseveraciones anteriores, la primera y la segunda se explicaron en la demostración del límite de Betz; la tercera se explica brevemente a continuación:

Entre el punto 2 y el punto 3 (ver Figura 4.3.2) existe una inducción en la velocidad angular del fluido que hace que el fluido pase de una velocidad  $\omega_2$ , al entrar al disco, a una  $\omega_3$  al salir de este. Este cambio es provocado por el par transmitido al disco, y se da gradualmente a medida que el aire atraviesa el espesor del disco.

Se supone que el fluido es ideal, sin viscosidad, por lo que si el fluido aguas arriba (punto 1) es irrotacional ( $\omega_1 = 0$ ), permanecerá así en la medida que sólo interactúe con sí mismo. Esto significa que hasta el punto 2 no existe rotación

( $\omega_2 = 0$ ); pero el fluido podrá adquirir rotación cuando choque con las aspas. Esto es debido a que los cambios de vorticidad en un elemento de fluido pueden ser producidos sólo por fuerzas tangenciales en su frontera, lo que no ocurre en un fluido ideal sin viscosidad. Por el contrario, en un fluido real ocurren fuerzas tangenciales, particularmente donde el fluido está en proximidad cercana a un cuerpo rígido, y por lo tanto la vorticidad puede elevarse.

La generación de energía cinética rotacional en la estela resulta en una menor extracción de energía por el rotor que aquella esperada cuando no hay estela rotacional. En general, la energía cinética extra contenida en la estela será mayor cuanto mayor sea el torque generado por el rotor. Por ello las turbinas lentas experimentan mayores pérdidas por rotación de la estela que las máquinas de alta velocidad y bajo torque.



**Figura 4.3.2. Puntos del volumen de control que resultan de interés para el análisis considerando rotación.**

De ahora en más se usa el símbolo  $V$  para la velocidad del viento sin perturbar.

El punto 1 no es afectado por el aerogenerador, con lo cual  $V_1 = V$ .

El flujo de aire disminuirá su velocidad axial en un valor  $a'$  en las cercanías del disco y en un valor  $c'$  en el punto 4.



$$V_2 = V - a'$$

$$V_4 = V - c'$$

### **Ecuación 4.3.1**

Al mismo tiempo, en el disco se inducen velocidades tangenciales. Estas velocidades serán  $2b'$  inmediatamente a la salida del disco.

La aparición del giro en la estela agrega una dificultad para resolver las ecuaciones del fluido, ya que debido a su característica rotacional genera:

- Una dispersión de la estela, que tiende a dispersar el flujo a medida que avanza desde el punto 3 hacia el punto 4.
- Una alteración del campo de presión, tendiente a reducir las presiones en los distintos puntos de la estela, y con mayor intensidad en el eje de rotación de la misma.

Sin embargo estas dos dificultades pueden solventarse de acuerdo a los siguientes criterios:

- Según H. Glauert [4] se puede suponer que, para valores no tendientes a cero de  $c'$ , puede despreciarse la dispersión del flujo debida a la rotación del aire. Esto significa que una partícula de aire que viaja del punto 3 al punto 4, con una determinada rotación, lo hace con un radio de giro constante, cumpliéndose la igualdad de radios  $r_3 = r_4$  y también la igualdad de velocidades de rotación  $\omega_3 = \omega_4$ .
- Según R.E. Wilson, B.S Lissaman y S. N. Walker [5], si la velocidad de rotación impartida al flujo ( $\omega_3$ ) es pequeña comparada con la velocidad de giro del rotor ( $\Omega$ ), entonces la presión de la estela en el punto 4 puede aproximarse a la del punto 1 (presión atmosférica). Esta simplificación es válida en aerogeneradores de TSR elevado, como es el caso del que se está diseñando.



Dicho esto se tiene:

$$P_1 = P_4 = P_0$$

$$\omega_1 = \omega_2 = 0$$

### **Ecuación 4.3.2**

Utilizando las ecuaciones (4.3.1) y (4.3.2), se procederá a obtener las expresiones para fuerza axial y torque sobre el disco.

Planteando *Bernoulli* entre los puntos 1 y 2:

$$\frac{1}{2}\rho(V - a')^2 + P_2 = \frac{1}{2}\rho V^2 + P_1$$

### **Ecuación 4.3.3**

Haciendo lo mismo entre 3 y 4:

$$\frac{1}{2}\rho[(V - a')^2 + (\omega_3 r_3)^2] + P_3 = \frac{1}{2}\rho[(V - c')^2 + (\omega_4 r_4)^2] + P_4$$

Por lo dicho anteriormente, sabemos que  $\omega_3 = \omega_4$  y  $r_3 = r_4$ , entonces:

$$\frac{1}{2}\rho(V - a')^2 + P_3 = \frac{1}{2}\rho(V - c')^2 + P_4$$

### **Ecuación 4.3.4**

Restando las ecuaciones (4.3.3) y (4.3.4), y considerando la igualdad de presiones de (4.3.2):

$$\frac{1}{2}\rho(V - a')^2 + P_2 - \left[ \frac{1}{2}\rho(V - a')^2 + P_3 \right] = \frac{1}{2}\rho V^2 + P_0 - \left[ \frac{1}{2}\rho(V - c')^2 + P_0 \right]$$

$$P_2 - P_3 = \frac{1}{2}\rho[V^2 - (V - c')^2]$$

$$P_2 - P_3 = \Delta P = \rho \left( V - \frac{c'}{2} \right) c'$$

### **Ecuación 4.3.5**



El valor de la fuerza axial (en dirección normal a la superficie  $A$  del disco) que ejerce el flujo de aire sobre un diferencial de superficie anular del disco se obtiene con:

$$dT = \Delta P dS$$

**Ecuación 4.3.6**

Siendo:

$$dS = 2\pi r dr$$

**Ecuación 4.3.7**

Reemplazando (4.3.7) y (4.3.5) en (4.3.6):

$$dT = 2\pi r dr \rho \left( V - \frac{c'}{2} \right) c'$$

**Ecuación 4.3.8**

Hasta aquí se ha conseguido una expresión para  $dT$  en función de la velocidad axial inducida en el punto 4 ( $c'$ ). Sin embargo es de mayor utilidad una expresión de  $dT$  en función de la velocidad inducida axial en el disco ( $a'$ ). Para determinar dicha expresión se comienza por plantear la segunda ley de Newton:

$$dT = d\dot{m} \Delta V_{axial}$$

**Ecuación 4.3.9**

Siendo  $d\dot{m}$  el flujo másico que atraviesa el  $dS$ , y puede ser evaluado en el disco:

$$d\dot{m} = \rho(V - a')dS$$

**Ecuación 4.3.10**





Por otro lado,  $\Delta V_{axial}$  es la variación de velocidad axial en el volumen de control analizado:

$$\Delta V_{axial} = V - (V - c') = c'$$

**Ecuación 4.3.11**

Reemplazando (4.3.10) y (4.3.11) en (4.3.9):

$$dT = 2\pi r \rho (V - a') c' dr$$

**Ecuación 4.3.12**

Igualando (4.3.8) con (4.3.12):

$$2\pi r dr \rho \left( V - \frac{c'}{2} \right) c' = 2\pi r \rho (V - a') c' dr$$

$$2a' = c'$$

**Ecuación 4.3.13**

Reemplazando (4.3.13) en (4.3.12) se obtiene la expresión final para el diferencial de fuerza axial:

$$dT = 4\pi r \rho (V - a') a' dr$$

**Ecuación 4.3.14**

Este resultado es el mismo que se obtiene en el análisis de *Betz* en (4.2.7).

Ya obtenida una expresión para el diferencial de fuerza axial  $dT$ , resta obtener una para el diferencial de torque  $dQ$  que genera el par del rotor eólico.

Planteando la segunda ley de Newton (conservación del momento angular):

$$dQ = d\dot{m} \Delta V_t r$$

**Ecuación 4.3.15**



La variación de velocidad tangencial  $\Delta V_t$  en el fluido es:

$$\Delta V_t = 2b$$

#### **Ecuación 4.3.16**

Sustituyendo  $d\dot{m}$  y  $\Delta V_t$  en (4.3.15):

$$dQ = 4\pi\rho r^2(V - a')b' dr$$

#### **Ecuación 4.3.17**

Resumiendo, se han obtenido las ecuaciones para el esfuerzo de arrastre y para el torque en base a balances de energía, masa y las leyes de Newton aplicados sobre el fluido, y considerando la rotación del flujo. Sin embargo no se ha considerado la geometría del rotor y su roce con el aire, lo cual influye en la eficiencia y en los valores de  $a'$  y  $b'$  que aún son incógnitas.

#### **Comparación con el límite de Betz.**

Con el fin de interpretar las repercusiones que la rotación del viento tiene sobre la eficiencia del aerogenerador, puede compararse el rendimiento obtenido en el Modelo de Rankine-Froude con aquel deducido del análisis de Betz donde se supuso que el fluido no adquiere velocidad rotacional.

Para hallar una relación entre las velocidades inducidas,  $a'$  y  $b'$ , se puede expresar la fuerza de arrastre en función de la velocidad inducida tangencial y compararla con (4.3.14).

La fuerza de arrastre puede calcularse como:

$$dT = \Delta P dS = \Delta P 2\pi r dr$$

#### **Ecuación 4.3.18**



Para calcular  $dT$  en función de  $b'$  debe calcularse primero  $\Delta P$  en función de  $b'$ . Para ello se toma un volumen de control rotacional que gira a la misma velocidad  $\Omega$  que las aspas del aerogenerador.

Teniendo en cuenta que ahora el trabajo entregado por el flujo es cero, pues con respecto al nuevo sistema de referencias las aspas permanecen quietas y sólo guían al flujo, puede plantearse *Bernoulli* entre el punto 2 y el punto 3:

$$\frac{1}{2}\rho[(V - a')^2 + (\Omega r)^2] + P_2 = \frac{1}{2}\rho[(V - a')^2 + ((\omega + \Omega) r)^2] + P_3$$

#### **Ecuación 4.3.19**

Despejando:

$$\Delta P = P_2 - P_3 = \frac{1}{2}\rho\omega r^2(2\Omega + \omega)$$

#### **Ecuación 4.3.20**

Reemplazando (4.3.20) en (4.3.18):

$$dT = \rho\omega r^2(2\Omega + \omega)\pi r dr$$

O lo que es equivalente ( $\omega = 2b'$ ):

$$dT = 4\rho b'(r\Omega + b')\pi r dr$$

#### **Ecuación 4.3.21**

Igualando entonces (4.3.14) y (4.3.21):

$$4\pi r\rho(V - a')a' dr = 4\rho b'(r\Omega + b')\pi r dr$$

#### **Ecuación 4.3.22**

Simplificando y acomodando términos:

$$b' = \frac{1}{2}\left[\sqrt{(r\Omega)^2 + 4a'(V - a')} - r\Omega\right]$$

#### **Ecuación 4.3.23**



La ecuación anterior muestra cómo la velocidad inducida tangencial disminuye con el aumento de la velocidad de giro  $\Omega$ .

Ahora puede escribirse el diferencial de torque retomando la ecuación (4.3.17) y reemplazando en ella  $b'$  según (4.3.23):

$$dQ = 2\pi\rho r^2(V - a') \left[ \sqrt{(r\Omega)^2 + 4a'(V - a')} - r\Omega \right] dr$$

Multiplicando el diferencial de torque anterior por la velocidad de giro  $\Omega$  del disco se obtiene el diferencial de potencia:

$$dN = 2\pi\rho\Omega r^2(V - a') \left[ \sqrt{(r\Omega)^2 + 4a'(V - a')} - r\Omega \right] dr$$

#### **Ecuación 4.3.24**

La potencia disponible en el viento para ese diferencial de superficie es:

$$dN_{viento} = \pi\rho r V^3 dr$$

#### **Ecuación 4.3.25**

Expresando la eficiencia como el cociente entre el diferencial de potencia de la máquina y el diferencial de potencia disponible:

$$\eta = \frac{dN}{dN_{viento}} = 2 \frac{\Omega r}{V} \frac{(V - a')}{V} \left[ \sqrt{\left(\frac{r\Omega}{V}\right)^2 + \frac{4a'(V - a')}{V^2}} - \frac{r\Omega}{V} \right]$$

#### **Ecuación 4.3.26**

Se definen:

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V}$$

$$A' = \frac{a'}{V}$$

Siendo  $\lambda_r$  el TSR (Tip-speed Ratio) local del diferencial de radio  $dr$  analizado.



Entonces la expresión para la eficiencia queda:

$$\eta = 2\lambda_r(1 - A') \left[ \sqrt{(\lambda_r)^2 + 4A'(1 - A')} - \lambda_r \right]$$

#### **Ecuación 4.3.27**

La ecuación anterior es muy importante pues permite deducir que, dado un valor de  $A'$ , el rendimiento mejora con el aumento del TSR local  $\lambda_r$ , es decir con el aumento de la velocidad de giro con respecto a la velocidad del viento sin perturbar.

Si se efectúa el límite para  $\lambda_r$  tendiendo a infinito:

$$\eta_{\lambda_r \rightarrow \infty} = 4A'(1 - A')^2$$

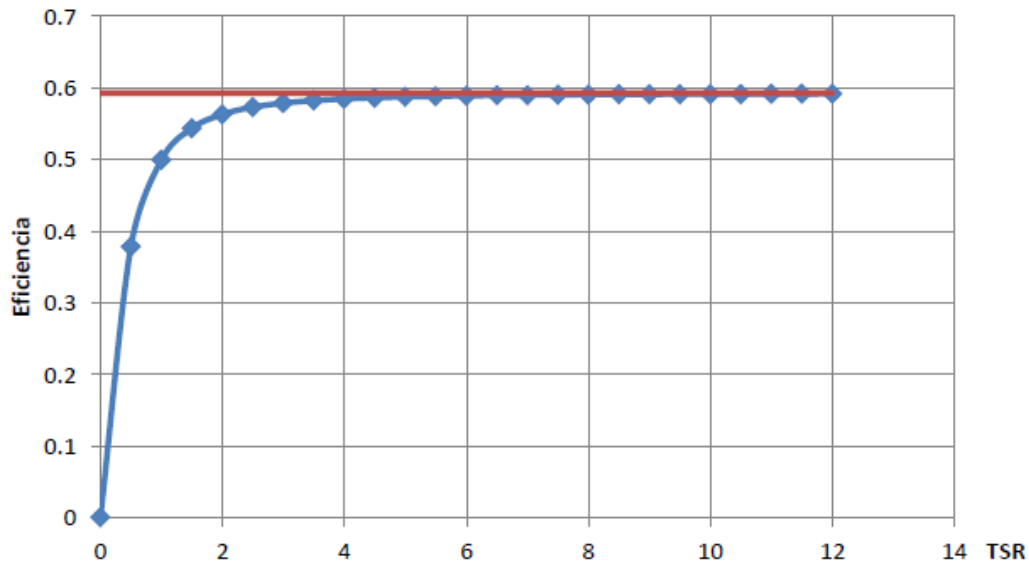
#### **Ecuación 4.3.28**

Derivando la ecuación anterior con respecto a  $A'$  e igualando a 0 para hallar el valor de  $A'$  que proporciona el rendimiento, máximo se obtiene  $A' = 1/3$ . Reemplazando este valor en (4.3.28):

$$\eta_{\lambda_r \rightarrow \infty; A' = 1/3} = 4 \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{1}{3} \right)^2 = \frac{16}{27}$$

Es decir que se llega al mismo valor calculado por Betz, lo cual es correcto pues la suposición de  $\lambda_r \rightarrow \infty$  es equivalente a suponer  $b' \rightarrow 0$ , es decir, plantear que no existe rotación del fluido a causa de la interacción con las aspas.

En la figura 4.3.3 puede apreciarse cómo el TSR local afecta el rendimiento del aerogenerador.



**Figura 4.3.3. Comparación entre el modelo de Betz (recta roja) y el modelo de Rankine-Froude (serie de datos, azul) en función del TSR.**

Este gráfico da una idea de por qué se busca que los aerogeneradores operen a velocidades elevadas. Sin embargo existen otros factores que limitan las velocidades de diseño.

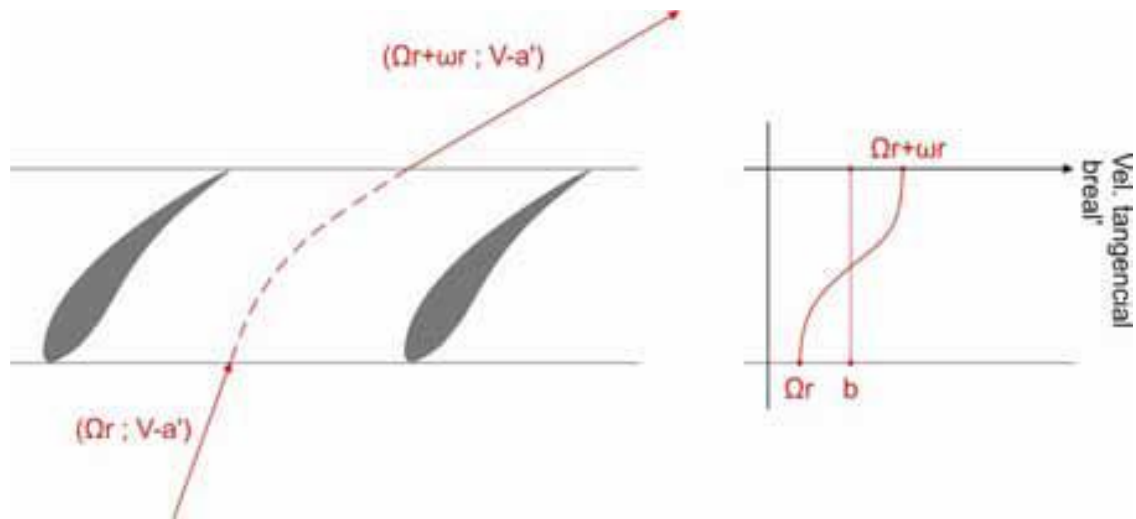
Como comentario final se puede aclarar que todo lo analizado en la *Comparación con el límite de Betz* no se usa en la práctica, pues todos los cálculos se han hecho en base a suponer que en el fluido no hay pérdidas de energía por roce, ni siquiera al pasar entre las aspas del rotor, y que los perfiles aerodinámicos utilizados transforman perfectamente la energía cinética quitada al aire.

#### **4.4 Modelo del elemento de pala.**

Este modelo fue desarrollado por William Froude, David W. Taylor y Stefan Drzewiecki. Consiste en dividir a la pala en infinitos elementos diferenciales y analizar las fuerzas desarrolladas en cada uno, para luego integrarlas a lo largo de toda el aspa y obtener la potencia del aerogenerador, entre otras cosas.

En esta teoría se modela la interacción entre el fluido y las aspas, lo cual no se había hecho en el modelo de Rankine-Froude. Para hacer esto, se utilizan coeficientes aerodinámicos  $C_l$  y  $C_d$  que caracterizan al perfil usado en el aspa.

La velocidad inducida tangencial  $b_{real}'$  varía desde cero en la entrada del disco, hasta en la salida,  $2b'$  como puede verse en la siguiente figura:



**Figura 4.4.1. Representación esquemática de la velocidad tangencial del fluido al atravesar el rotor.**

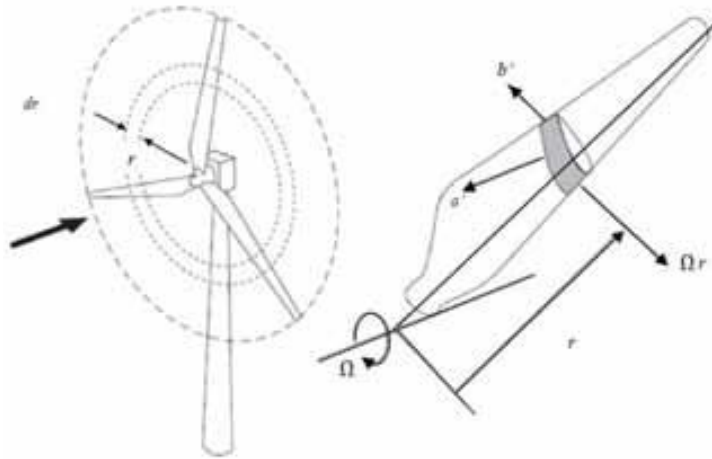
La distribución real de la velocidad inducida tangencial depende de la interacción entre el aspa y el viento, y no es posible obtenerla matemáticamente.

De forma aproximada lo que suele hacerse, y lo que se adoptará en este trabajo, es tomar como velocidad inducida tangencial en el aspa el promedio entre la velocidad inducida tangencial entre el punto 2 y el punto 3 (ver Figura 4.3.2). Así, el valor adoptado es  $b'$ .

Según la ecuación (4.3.13) la velocidad inducida axial  $a'$  es la mitad de la velocidad inducida axial en el punto 4,  $c$ . Notar que  $a'$  está tanto en el punto 2 como en el punto 3.

Es importante recordar que las velocidades inducidas fueron calculadas por las ecuaciones de balances del fluido, suponiéndolas uniformes respecto del eje de rotación del disco. En cambio en la realidad se tienen campos de velocidades y

presiones no uniformes, lo cual implica un error al combinar los resultados obtenidos en el Modelo de Rankine-Froude con la Teoría del Elemento de Pala, para la cual deberían conocerse específicamente las condiciones del viento que recibe la pala. Sin embargo estas aproximaciones son aceptables en aerogeneradores que funcionan a elevado TSR.



**Figura 4.4.2. Modelo del elemento de pala.**

En la figura anterior puede verse un elemento de pala de longitud radial  $dr$  ubicado a una distancia  $r$  del centro del rotor. Sobre él, el aire no tiene la velocidad  $V$  (velocidad del viento sin perturbar, punto 1), sino que allí está perturbado por las velocidades de inducción. Esta velocidad perturbada será denominada de ahora en más  $V'$ :

$$\vec{V}' \equiv (V - a'; b')$$

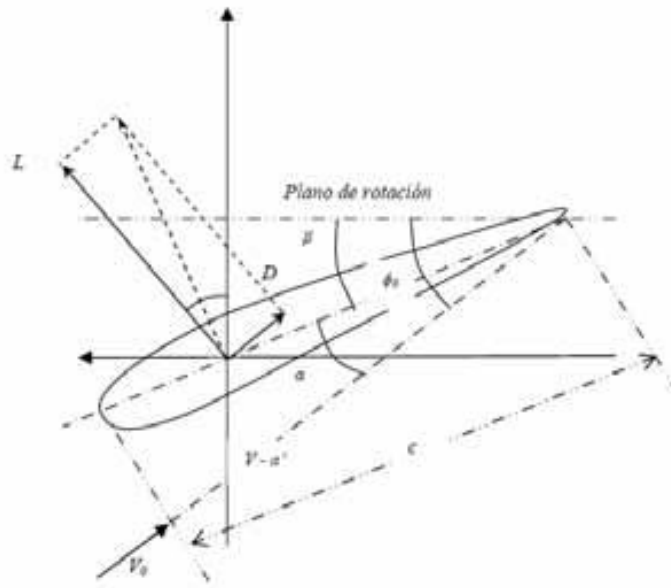
**Ecuación 4.4.1.**

En este análisis se debe evaluar la velocidad del viento relativa al perfil aerodinámico  $V_0$ , que es la velocidad perturbada  $V'$  menos la velocidad del elemento de pala  $u$ :

$$\vec{V}_0 = \vec{V}' - \vec{u} = \vec{V}' - \vec{\Omega r}$$

**Ecuación 4.4.2.**





**Figura 4.4.3. Nomenclatura para el Modelo del elemento de pala.**

En la figura anterior se esquematiza la velocidad relativa a las palas  $V_0$  y las fuerzas de arrastre  $D$  y sustentación  $L$ , que son paralela y perpendicular a  $V_0$  respectivamente. También se muestra el ángulo  $\alpha$  (entre la cuerda del perfil y  $V_0$ ), el ángulo  $\Phi_0$  (entre  $V_0$  y el plano de rotación) y el ángulo  $\beta$  (entre la cuerda y el plano de rotación); cumpliéndose:

$$\Phi_0 = \alpha + \beta$$

**Ecuación 4.4.3.**

Por definición de los coeficientes de sustentación  $C_l$  y de arrastre  $C_d$ , los esfuerzos en cada elemento de pala pueden calcularse como:

$$dL = \frac{1}{2} \rho c V_0^2 C_l dr$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho c V_0^2 C_d dr$$

**Ecuación 4.4.4.**

A partir de éstas, puede obtenerse el diferencial de fuerza de empuje  $dT$  y el de torque  $dQ$  generados en el elemento de pala:

$$dT = \frac{1}{2} \rho Z c V_0^2 (C_l \cos \Phi_0 + C_d \sin \Phi_0) dr$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho Z c V_0^2 r (C_l \sin \Phi_0 - C_d \cos \Phi_0) dr$$

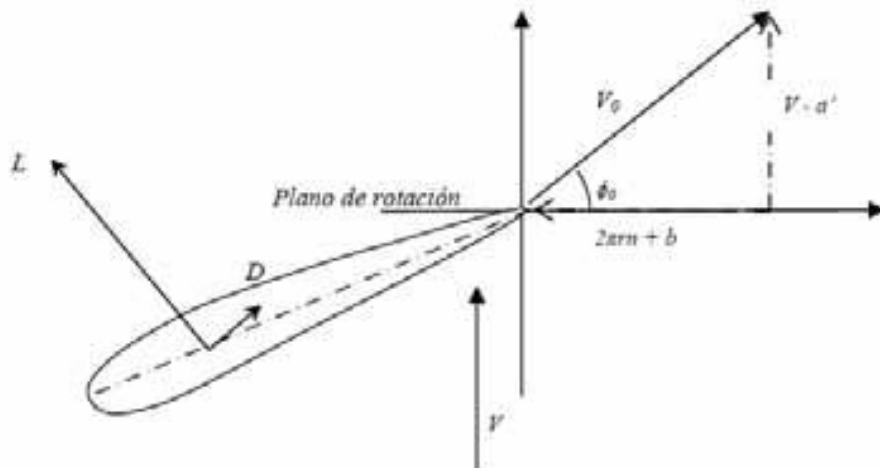
#### Ecuación 4.4.5.

Donde se ha introducido el número de palas  $Z$  para obtener  $dT$  y  $dQ$  como los esfuerzos diferenciales del rotor en su totalidad.

#### 4.5 Modelo combinado.

Este modelo es la combinación de las dos teorías explicadas hasta ahora: Modelo de Rankine-Froude y Modelo del Elemento de Pala.

Con él se puede diseñar por completo el rotor, preestableciendo el número de palas, tipo de perfil y el ángulo de ataque.



**Figura 4.5.1. Componentes de la velocidad del viento relativa al perfil.**

Las dos ecuaciones obtenidas para calcular la fuerza de empuje fueron:

$$dT = 4\pi r \rho (V - a') a' dr$$

#### Ecuación 4.3.14



$$dT = \frac{1}{2} \rho Z c V_0^2 (C_l \cos \Phi_0 + C_d \sin \Phi_0) dr$$

#### **Ecuación 4.4.5.**

Además puede verse de la Figura 2.5.1 que:

$$V_0 \sin \Phi_0 = V - a'$$

#### **Ecuación 4.5.1.**

Igualando (4.3.14) con (4.4.5) y reemplazando  $V_0$  de acuerdo a (4.5.1):

$$4\pi r \rho (V - a') a' dr = \frac{1}{2} \rho Z c \left( \frac{V - a'}{\sin \Phi_0} \right)^2 (C_l \cos \Phi_0 + C_d \sin \Phi_0) dr$$

Simplificando:

$$8\pi r a' = Z c \left( \frac{1}{\sin \Phi_0} \right)^2 (V - a') (C_l \cos \Phi_0 + C_d \sin \Phi_0)$$

Finalmente, despejando la cuerda:

$$c = \frac{8\pi r a' \sin^2 \Phi_0}{Z (V - a') (C_l \cos \Phi_0 + C_d \sin \Phi_0)}$$

#### **Ecuación 4.5.2.**

Esta ecuación será utilizada luego en una planilla de cálculo para el diseño de la pala. Además vincula tres incógnitas presentes en el elemento de pala ubicado en el radio  $r'$ : su cuerda ( $c$ ), el ángulo entre la velocidad relativa del viento y el plano de rotación ( $\Phi_0$ ), y la velocidad inducida axial ( $a'$ ). La velocidad del viento sin perturbar y el número de palas son datos conocidos. También son conocidos los coeficientes de sustentación y de arrastre pues estos surgen de la elección del perfil y del ángulo de ataque al que operará, lo cual se determina previamente.



Utilizando la ecuación (4.5.2) se puede dejar de forma explícita la velocidad inducida axial:

$$a' = \frac{V}{\frac{8\pi r \sin^2 \Phi_0}{Zc(C_l \cos \Phi_0 + C_d \sin \Phi_0)} + 1}$$

**Ecuación 4.5.3.**

Las dos expresiones obtenidas para el diferencial de torque fueron las siguientes:

$$dQ = 4\pi r^2 (V - a') b' dr$$

**Ecuación 4.3.17**

$$dQ = \frac{1}{2} \rho Zc V_0^2 r (C_l \sin \Phi_0 - C_d \cos \Phi_0) dr$$

**Ecuación 4.4.5.**

Igualando (4.3.17) con (4.4.5) y reemplazando  $V_0$  de acuerdo a (4.5.1):

$$4\pi r^2 (V - a') b' dr = \frac{1}{2} \rho Zc \left( \frac{V - a'}{\sin \Phi_0} \right)^2 r (C_l \sin \Phi_0 - C_d \cos \Phi_0) dr$$

Simplificando:

$$8\pi r b' = Zc \left( \frac{1}{\sin \Phi_0} \right)^2 (V - a') (C_l \sin \Phi_0 - C_d \cos \Phi_0)$$

La incógnita  $a'$  puede reemplazarse usando (4.5.3):

$$8\pi r b' = Zc \left( \frac{1}{\sin \Phi_0} \right)^2 \left( V - \frac{V}{\frac{8\pi r \sin^2 \Phi_0}{Zc(C_l \cos \Phi_0 + C_d \sin \Phi_0)} + 1} \right) (C_l \sin \Phi_0 - C_d \cos \Phi_0)$$



Despejando la velocidad inducida tangencial  $b'$ :

$$b' = \frac{V}{\frac{8\pi r \sin^2 \Phi_0}{Zc(C_l \sin \Phi_0 - C_d \cos \Phi_0)} + \frac{(C_l \cos \Phi_0 + C_d \sin \Phi_0)}{(C_l \sin \Phi_0 - C_d \cos \Phi_0)}}$$

#### **Ecuación 4.5.4.**

La ecuación anterior vincula dos de las incógnitas ya mencionadas, el ángulo  $\Phi_0$  y la cuerda  $c$ , con la velocidad inducida  $b'$  tangencial que también es una incógnita. Al igual que (4.5.2) será utilizada en el diseño de las aspas.

De la Figura (4.5.1) puede deducirse la siguiente expresión:

$$\tan \Phi_0 = \frac{(V - a)}{2\pi r n + b'}$$

#### **Ecuación 4.5.5.**

Esta última ecuación también se utilizará en el cálculo de las aspas. En ella se ha introducido la velocidad de rotación en revoluciones por segundo  $n$ .

En resumen, existen cuatro incógnitas y tres ecuaciones, como se lista a continuación.

Ecuaciones:

$$c = \frac{8\pi r a' \sin^2 \Phi_0}{Z(V - a)(C_l \cos \Phi_0 + C_d \sin \Phi_0)}$$

$$b' = \frac{V}{\frac{8\pi r \sin^2 \Phi_0}{Zc(C_l \sin \Phi_0 - C_d \cos \Phi_0)} + \frac{(C_l \cos \Phi_0 + C_d \sin \Phi_0)}{(C_l \sin \Phi_0 - C_d \cos \Phi_0)}}$$

$$\tan \Phi_0 = \frac{(V - a)}{2\pi r n + b'}$$



Incógnitas:

*Velocidad inducida axial:  $a'$*

*Velocidad inducida tangencial:  $b'$*

*Ángulo entre la velocidad relativa  $V_0$  y el plano de rotación:  $\Phi_0$*

*Cuerda del perfil aerodinámico:  $c$*

Como se ve, aun habiendo definido el perfil aerodinámico y el ángulo de ataque  $\alpha$  con que el flujo de aire debe ingresar en él, el problema no está determinado pues aún existe un grado de libertad. Una opción simple y bastante utilizada es seleccionar un valor de cuerda arbitrario para cada radio  $r$ , siendo lo más común utilizar una recta. No obstante, lo que se pretende en este diseño es maximizar la potencia obtenida por el aerogenerador cuando éste opere a velocidad nominal. Imponiendo esta condición de máxima potencia extraída se obtiene una cuarta ecuación que permite el cálculo de las aspas:

$$N = N_{m\acute{a}x}$$

Como este sistema de ecuaciones es trascendental, no puede resolverse de forma algebraica. Por ello, se utilizarán métodos numéricos de aproximación a la solución de carácter iterativo.

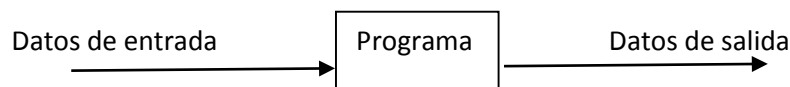
## Capítulo 5: Diseño aspa.

### Resolución del sistema de ecuaciones

Para obtener el diseño de las aspas, simplemente se procedió a realizar un programa que resolviera las ecuaciones diferenciales. Para el mismo se utilizó lenguaje Fortran<sup>3</sup>. A continuación podemos ver dicho sistema de ecuaciones no lineales:

$$\left\{ \begin{array}{l} c = \frac{8 \cdot \pi \cdot r \cdot a'}{Z \cdot (V - a')} \frac{\sin^2 \varphi_0}{(C_l \cdot \cos \varphi_0 + C_d \cdot \sin \varphi_0)} \\ b' = \frac{\frac{8 \cdot \pi \cdot r \cdot \sin^2 \varphi_0}{Z_c \cdot (C_l \cdot \sin \varphi_0 - C_d \cdot \cos \varphi_0)} + \frac{C_l \cdot \cos \varphi_0 + C_d \cdot \sin \varphi_0}{C_l \cdot \sin \varphi_0 - C_d \cdot \cos \varphi_0}}{V - a'} \\ \text{tg } \varphi_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n + b'}{N = N_{max}} \end{array} \right.$$

Para poder resolver las ecuaciones diferenciales se divide el aspa en "n" elementos diferenciales, si "n" tiende a infinito la solución será más exacta. Para cada uno de dichos elementos se aplican las ecuaciones de la teoría combinada, sin perder de vista que nuestro objetivo es maximizar la potencia de cada elemento. Este procedimiento se realiza para distintas velocidades de rotación. En la figura 5.1 podemos observar una interpretación del programa utilizado:



**Figura 5.1.**

<sup>3</sup> Formula Translating System es un lenguaje de programación de alto nivel de propósito general.



Datos de entrada:

Son los parámetros necesarios para el perfilado del aspa. Estos son:

- Velocidad del viento de diseño:  $V = [5,7 \text{ m/s}]$ .
- Densidad másica del aire:  $\rho = 1,19 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ .
- Viscosidad dinámica del aire:  $\mu = 18 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$ .
- Radio del rotor eólico:  $R = 0,8[\text{m}]$ .
- Cantidad de aspas:  $Z = 3$ .
- Longitud radial del elemento de pala:  $dr = 0,01[\text{m}]$ .
- Ángulo de ataque óptimo del perfil aerodinámico:  $\alpha_0$ .
- Coeficiente de sustentación para  $\alpha_0$ :  $C_{l0}$ .
- Coeficiente de arrastre para  $\alpha_0$ :  $C_{d0}$ .

Datos de salida:

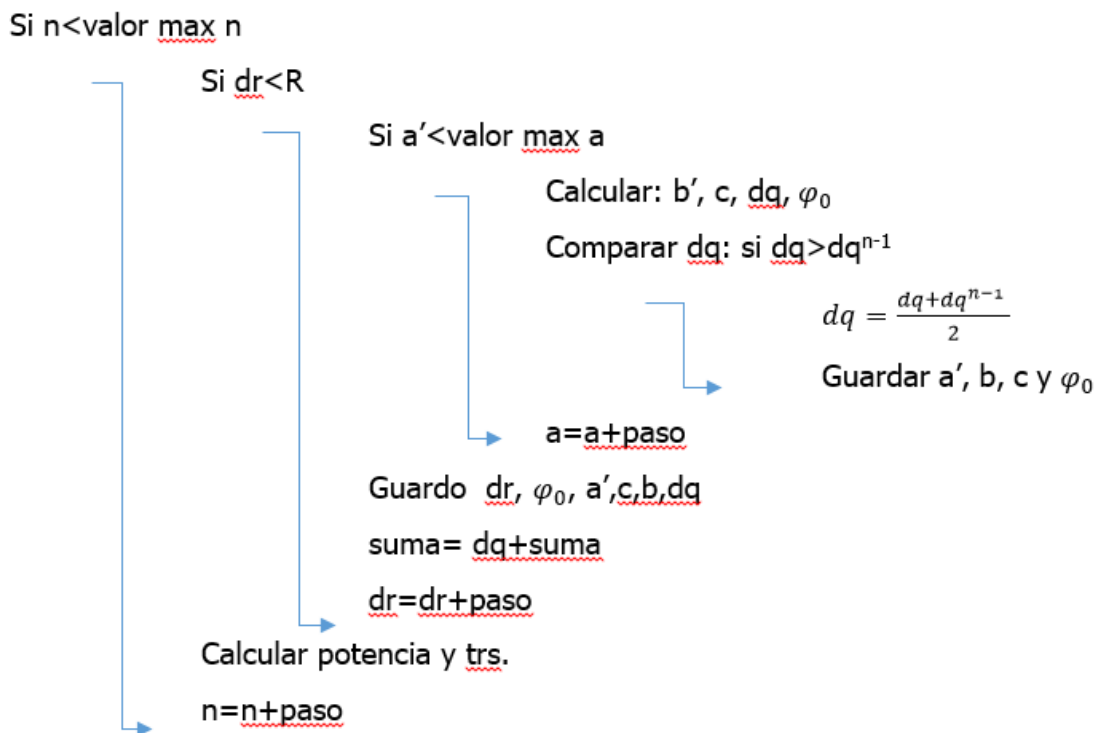
- Cuerda de cada uno de los elementos de pala:  $c$ .
- Inclinação de cada uno de los elementos de pala:  $\beta$ .
- Potencia total desarrollada por el rotor:  $P$ .
- Torque motor desarrollado por el rotor:  $Q$ .
- Fuerza axial sobre el rotor:  $T$ .
- Torque motor desarrollado por cada uno de los elementos de pala:  $dQ$ .
- Fuerza axial sobre cada uno de los elementos de pala:  $dT$ .
- Rendimiento del rotor:  $\eta$ :  $Re$ .
- Velocidad inducida axial y tangencial de cada elemento de pala:  $a'$  y  $b'$ .
- Ángulo  $\varphi_0$  para cada elemento de pala.

### Resolución:

El código del programa utilizado se lo puede encontrar en el anexo I. El procedimiento se puede observar en la figura 5.2. Se parte de suponer un intervalo de la velocidad de rotación donde encontraremos el máximo de potencia, esto se logra gracias a experiencias pasadas. Luego se fracciona el alabe en diferenciales de radio. Para cada diferencial se encuentra la potencia

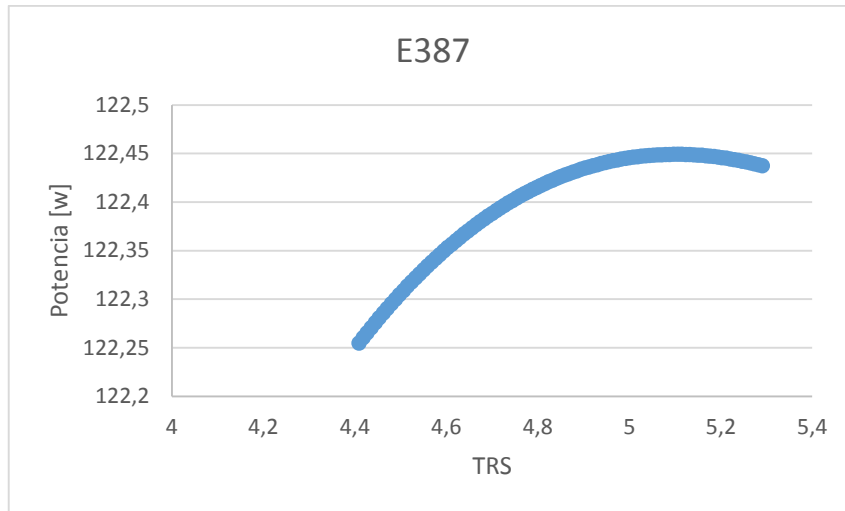


máxima iterando en la velocidad inducida axial ( $a'$ ), nuevamente, el valor de  $a'$  se encuentra acotado en un intervalo conocido. Una vez hallado el valor de la potencia máxima en dicho diferencial se procede al siguiente. Para calcular la potencia total en el alabe solo debemos sumar los diferenciales de potencia. Entonces el programa nos devuelve para cada velocidad de rotación y diferencial de radio: la velocidad inducida axial ( $a'$ ), la velocidad inducida tangencial ( $b'$ ), el ángulo ( $\varphi_0$ ) entre la velocidad relativa ( $V_c$ ) y el plano de rotación y la potencia, antes mencionada.

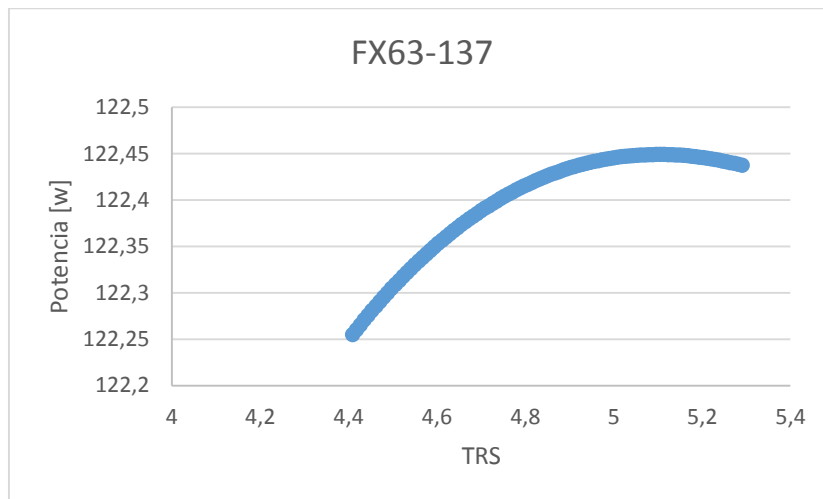


**Figura 5.2.**

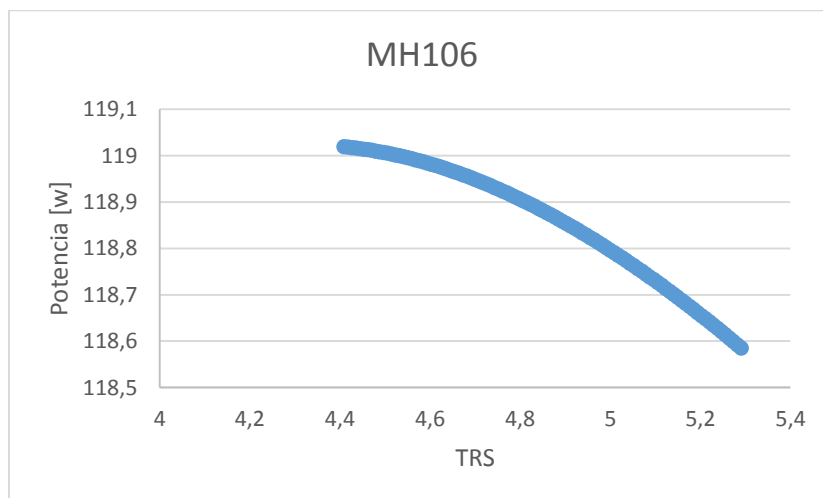
Con la potencia y la velocidad de rotación pudimos evaluar la performance de cada perfil alar y de esta manera elegir el más conveniente. Continuación en los gráficos 5.1 al 5.13 podemos visualizar las curvas de performance obtenidas.



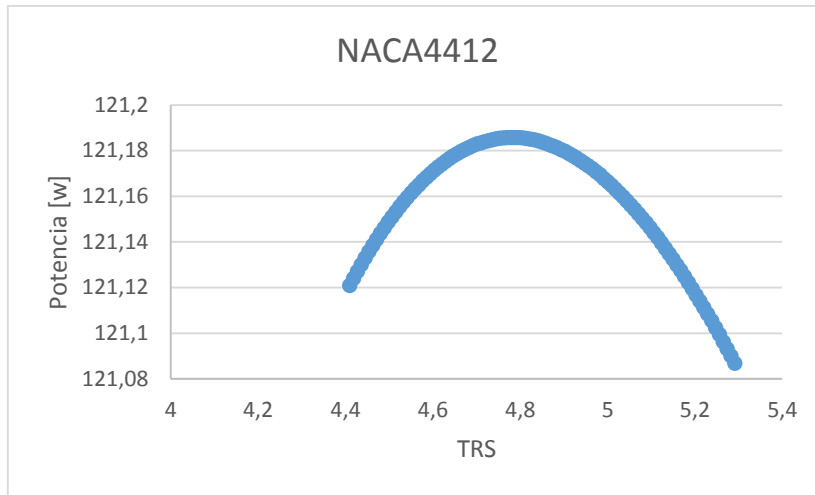
**Grafico 5.1: Perfil E387**



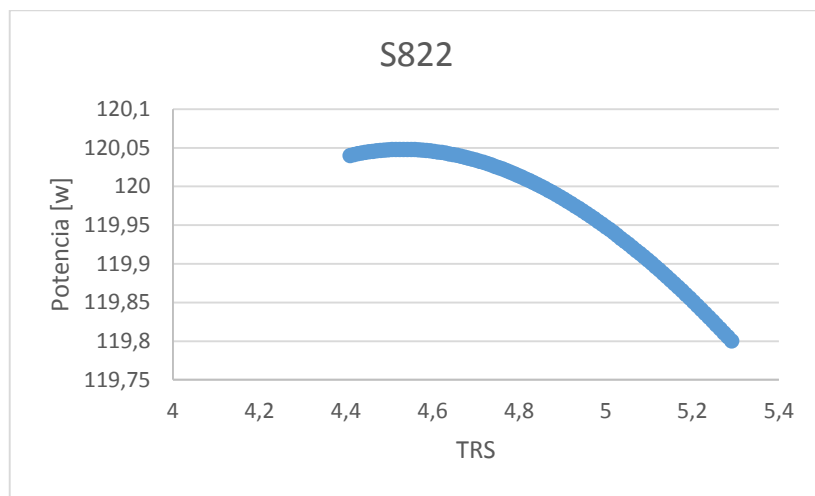
**Grafico 5.2: Perfil FX63-137.**



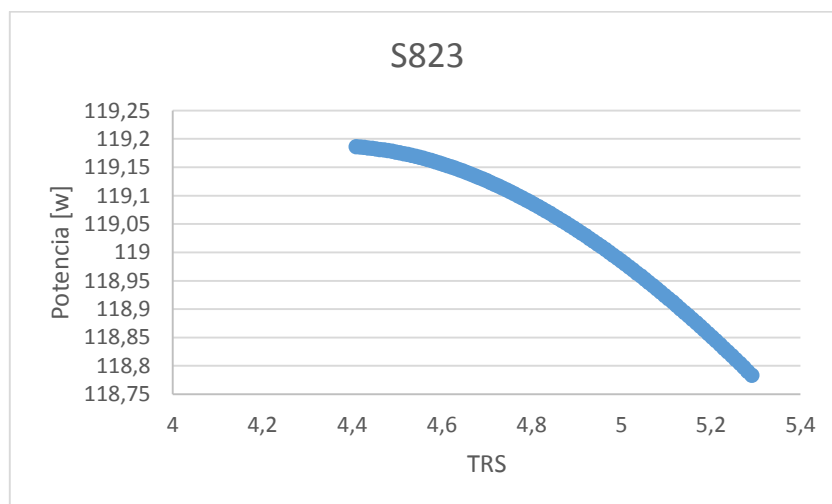
**Grafico 5.3: Perfil MH106.**



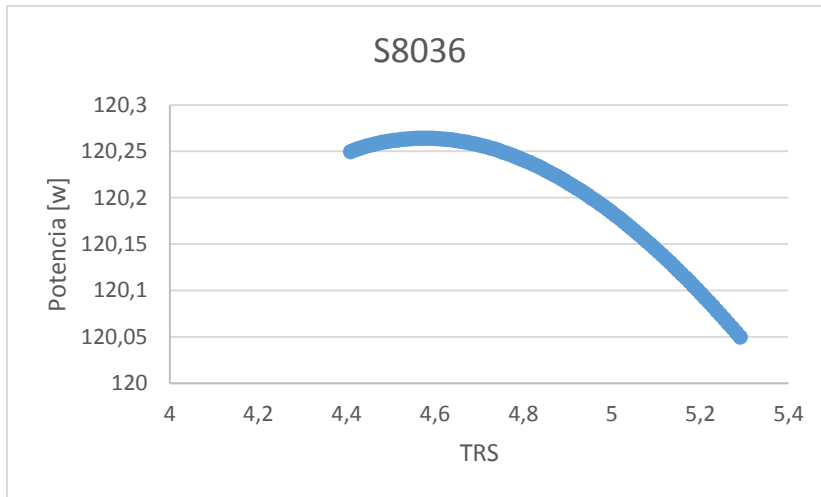
**Grafico 5.4: Perfil NACA4412.**



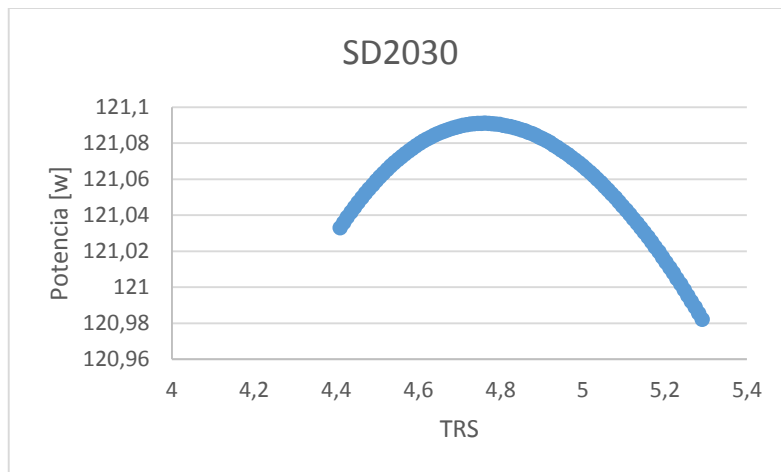
**Grafico 5.5: Perfil S822**



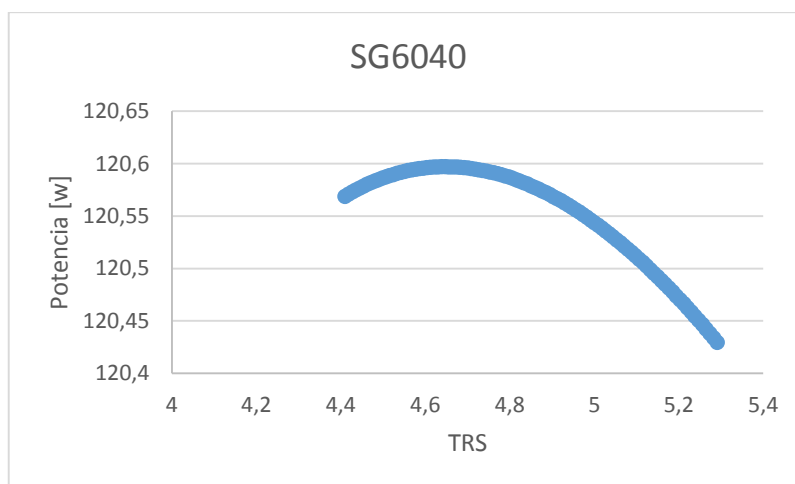
**Grafico 5.6: Perfil S823.**



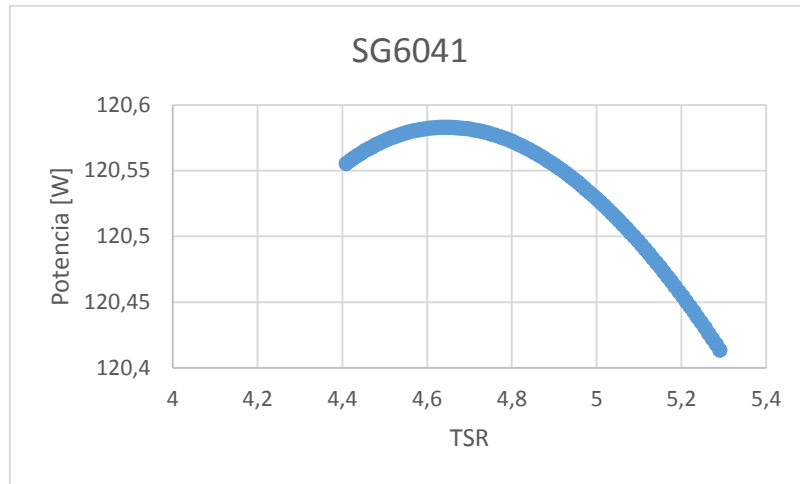
**Grafico 5.7: Perfil S8036.**



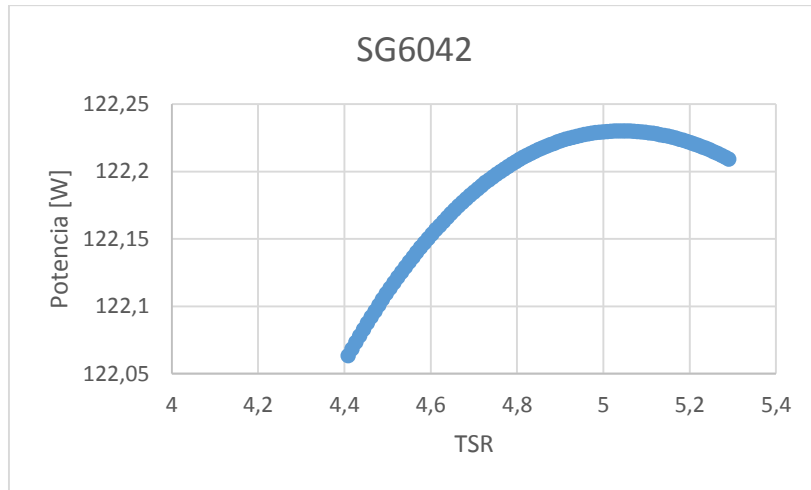
**Grafico 5.8: Perfil SD2030.**



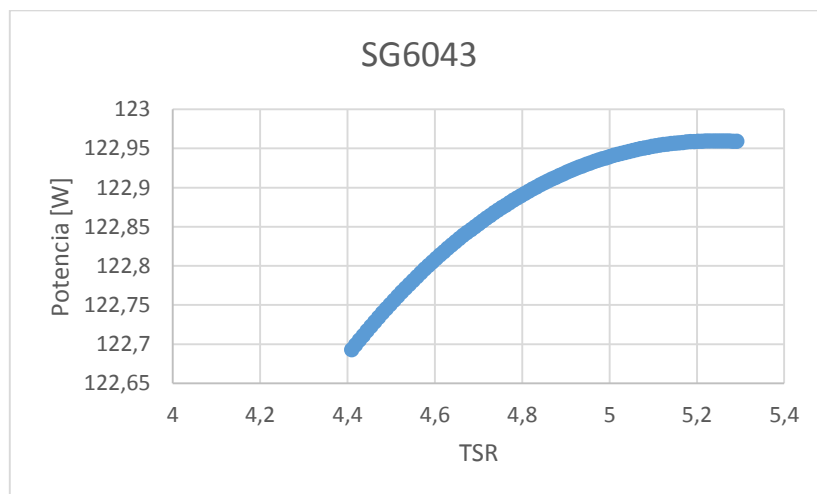
**Grafico 5.9: Perfil SG6040.**



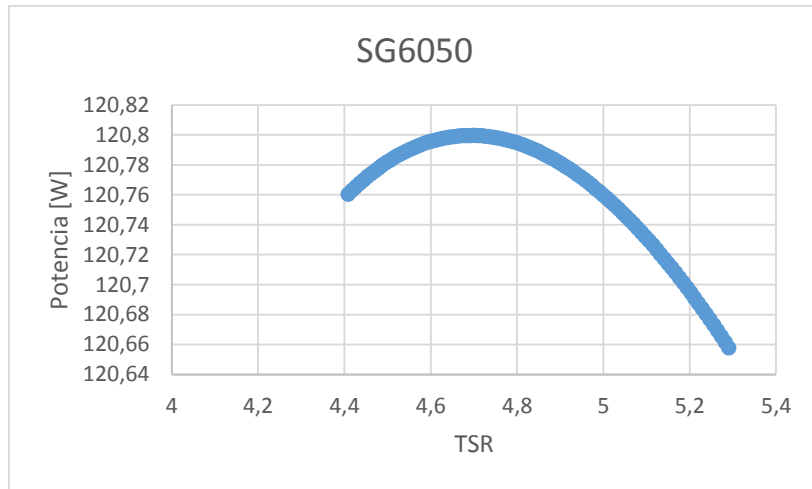
**Grafico 5.10: Perfil SG6041.**



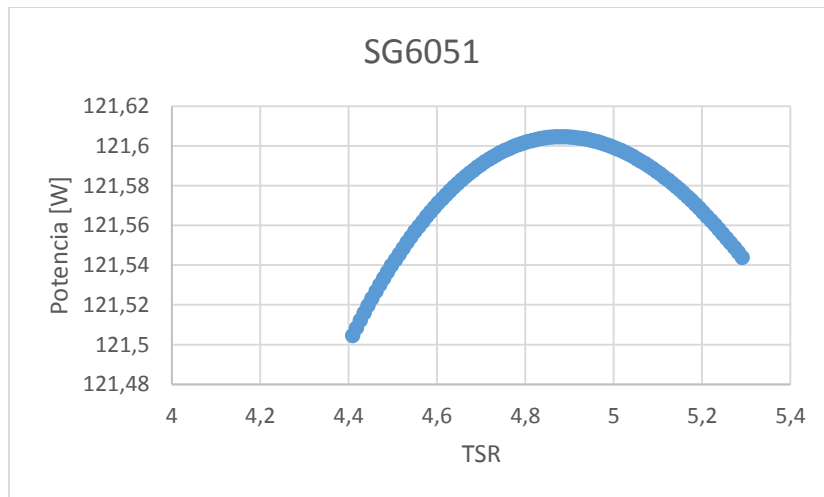
**Grafico 5.11: Perfil SG6042.**



**Grafico 5.12: Perfil SG6043.**

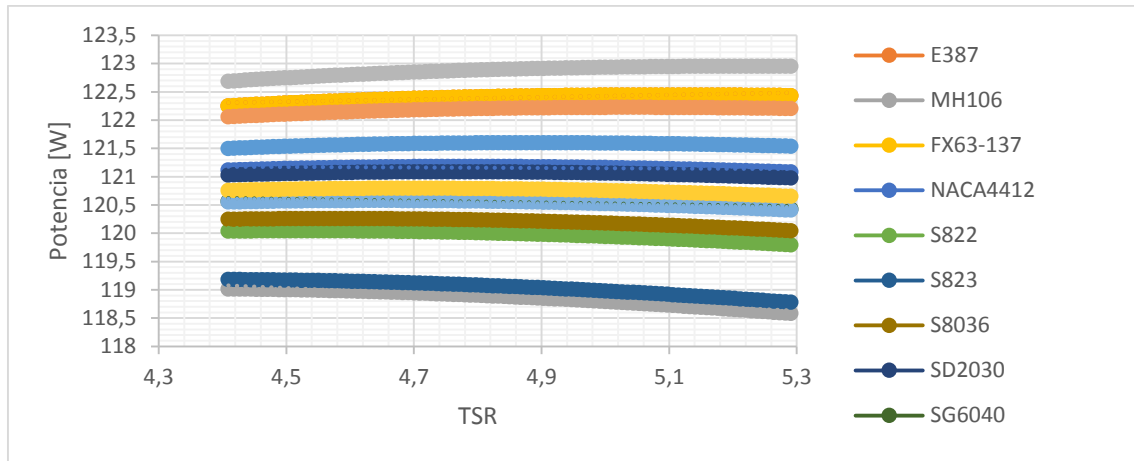


**Grafico 5.13: Perfil SG6050.**



**Grafico 5.13: Perfil SG6051.**

A fin de una mejor visualización en el gráfico 5.14 podemos observar la performance de todos los perfiles alares.



**Gráfico 5.14.**

Del gráfico 5.14 observamos que la mejor opción es el perfil SG6043. Sin embargo en la tabla 5.1 encontramos ver las características de los perfiles alares ordenados por performance decreciente.

Perfil	Cl/Cd máx			
	$\alpha$	Cl	Cd	Cl/Cd
SG6043	5,50	1,2878	0,01314	98,0
FX63-137	5,75	1,4627	0,01598	91,5
SG6042	4,75	1,0008	0,01125	89,0
SG6051	6,50	1,0844	0,01319	82,2
NACA4412	7,00	1,2002	0,01536	78,1
SD2030	4,25	0,7587	0,00982	77,3
SG6050	7,75	1,2192	0,01633	74,7
SG6040	7,75	1,1312	0,01551	72,9
SG6041	4,00	0,7267	0,00998	72,8
S8036	6,25	1,0134	0,01443	70,2
S822	7,00	0,9872	0,01440	68,6
S823	8,00	1,1454	0,01833	62,5
MH106	8,25	0,9613	0,01565	61,4

**Tabla 5.1. Valores de Cl/Cd máx y el correspondiente ángulo de ataque para cada perfil, para un Re=200000.**

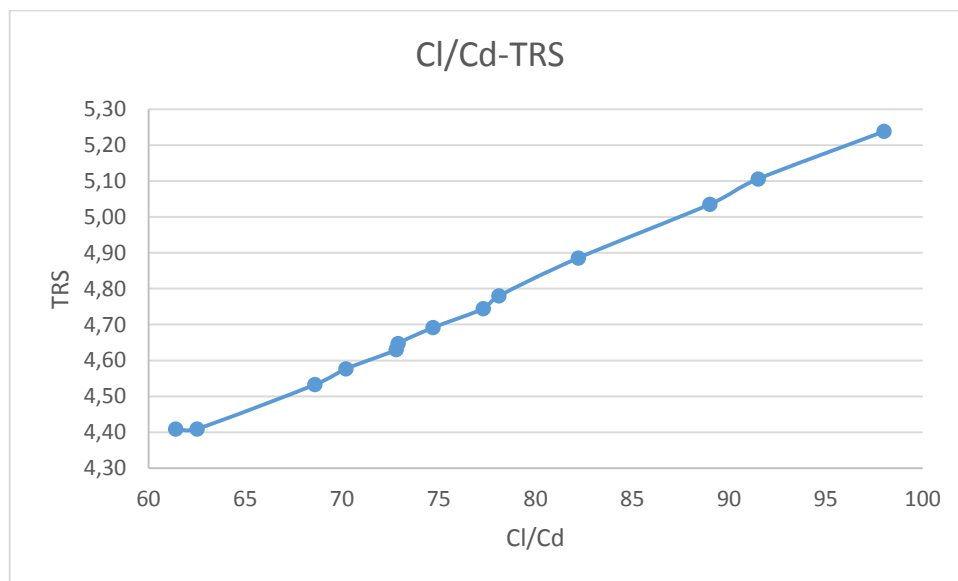
En la Tabla 5.2 se presentan parte de los resultados obtenidos. Para la comparación se muestran la cuerda y el ángulo correspondientes a la raíz del aspa y a la punta.

Perfil	$\alpha$ [°]	Cl	Cd	Cl/Cd	TRS	P [W]	Q [N.m]	$\phi$ (0,8) [°]	C (0,8) [m]	$\phi$ (0,02) [°]	C (0,02) [m]
SG6043	5,5	1,2878	0,01314	98	5,24	122,96	3,289	0,127	0,041	0,962	0,056
FX63-137	5,75	1,4627	0,01598	91,5	5,11	122,44	3,366	0,131	0,038	0,966	0,049
SG6042	4,75	1,0008	0,01125	89	5,04	122,23	3,407	0,131	0,057	0,967	0,072
SG6051	6,5	1,0844	0,01319	82,2	4,89	121,60	3,494	0,137	0,055	0,966	0,067
NACA4412	7	1,2002	0,01536	78,1	4,78	121,19	3,559	0,140	0,052	0,972	0,061
SD2030	4,25	0,7587	0,00982	77,3	4,74	121,09	3,582	0,141	0,084	0,972	0,096
SG6050	7,75	1,2192	0,01633	74,7	4,69	120,80	3,607	0,142	0,053	0,973	0,060
SG6040	7,75	1,1312	0,01551	72,9	4,65	120,60	3,642	0,144	0,058	0,974	0,065
SG6041	4	0,7267	0,00998	72,8	4,63	120,58	3,649	0,144	0,091	0,974	0,101
S8036	6,25	1,0134	0,01443	70,2	4,58	120,26	3,688	0,146	0,067	0,975	0,072
S822	7	0,9872	0,0144	68,6	4,53	120,05	3,717	0,147	0,070	0,976	0,074
S823	8	1,1454	0,01833	62,5	4,41	119,19	3,794	0,151	0,064	0,978	0,064

**Tabla 5.2.**

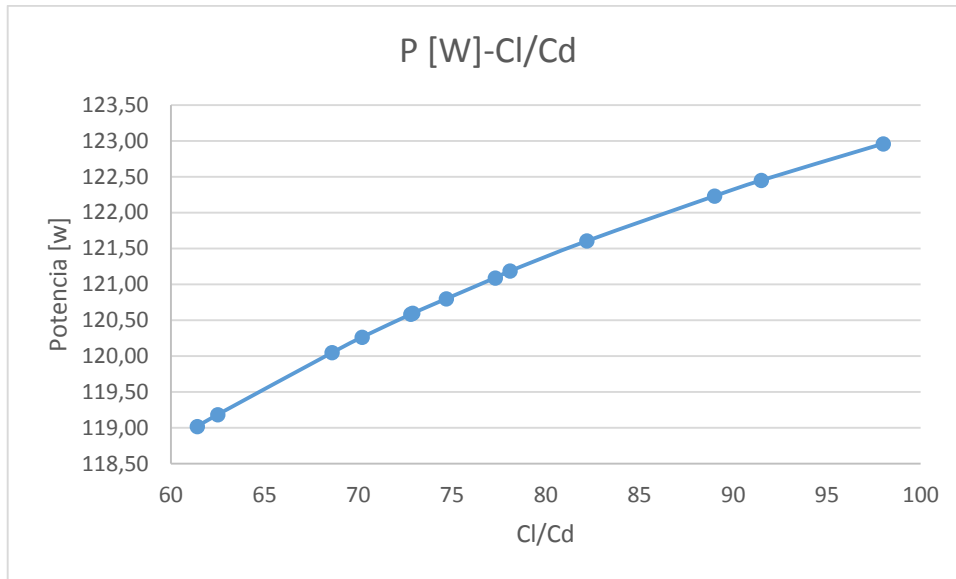
En función de los resultados conseguidos, se puede concluir:

- ✓ A mayor relación Cl/Cd, se obtiene mayor TSR, mayor potencia y menor torque. Como vemos en el gráfico 5.15, 5.16 y 5.17.

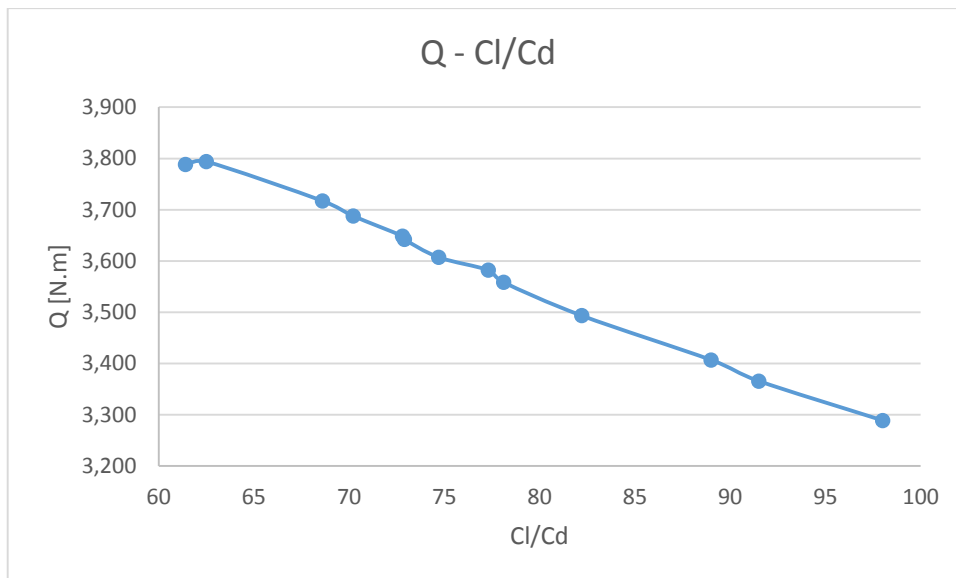


**Gráfico 5.15. TRS-Cl/Cd**



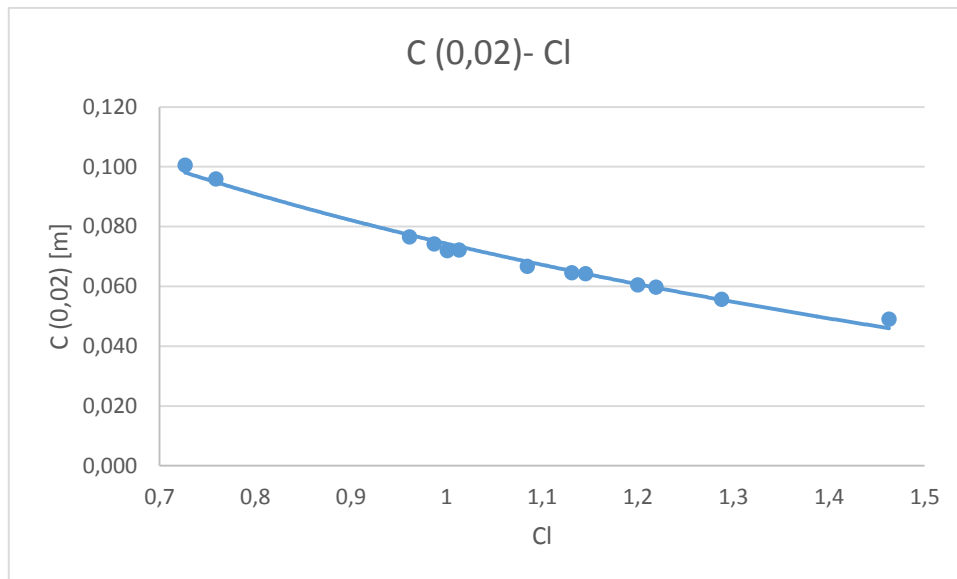


**Gráfico 5.16. P-Cl/Cd**



**Gráfico 5.17. Torque-Cl/Cd**

- ✓ Valores de Cl mayores conducen a menores cuerdas. Lo podemos observar en el gráfico 5.18.



**Gráfico 5.18. Longitud de la cuerda para una distancia radial de 0,02 [m] de la raíz-CI.**

En base a esto se puede decir que para la selección del perfil se debe tener en cuenta los perfiles que presentan mayor relación  $CI/C_d$ , pero es muy importante tener presente el valor de  $CI$ , ya que para valores pequeños de éste, se obtienen longitudes de cuerda irracionales. Por ejemplo, el perfil SG6041 presenta una potencia cercana a la potencia máxima conseguible con el perfil SG6043, pero el aspa necesaria es mucho más grande como se puede ver en la tabla 5.2.

Perfil	Potencia [w]	Cuerda en la raíz	Cuerda en el extremo
SG6043	122,96	0,056	0,041
SG6041	120,58	0,091	0,101

**Tabla 5.2. Si bien la potencia es del perfil SG6041 es un 98% la del SG6043, la longitud de la cuerda en la raíz y en el extremo son, respectivamente, un 62% y 146% mayor.**

Un mayor tamaño de cuerda a lo largo del aspa causa un aumento en el peso de la misma con lo cual deberá resistir fuerzas centrífugas mayores, además crea un aumento de la inercia lo acarrea mayores esfuerzos para que el aerogenerador comience a girar.

Por lo dicho, se optó por el perfil FX63-137, el cual solo presenta 0,66[W] menos que el perfil de máxima potencia SG6043, pero al tener el mayor valor de  $C_l$ , presenta la menor cuerda a lo largo de todo el aspa, con un valor de 5,6 [cm] en la raíz y 4,1 [cm] en la punta.

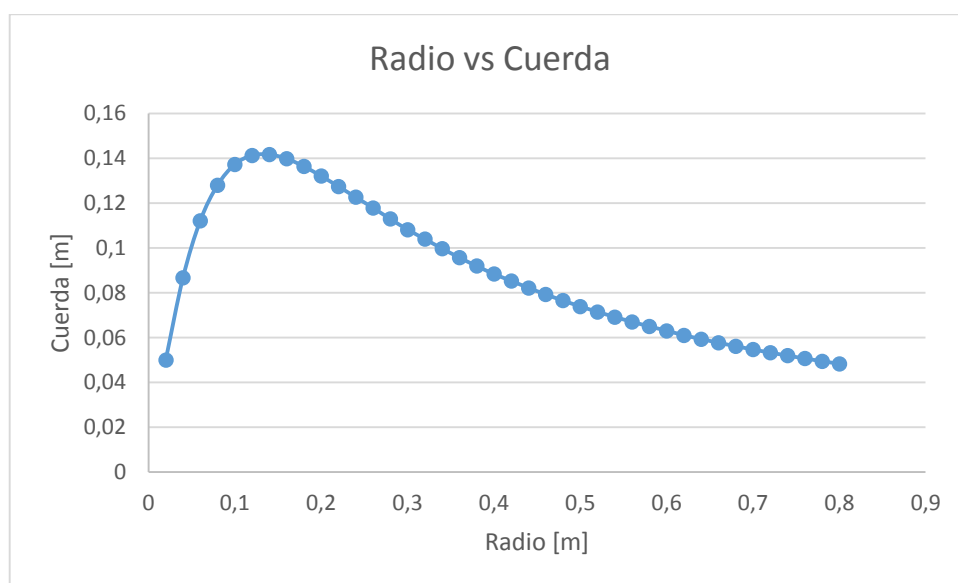
En la tabla 5.3 podemos observar las variaciones de los parámetros del alabe en función del radio.

n	dr	fi	c	a	b	dq
5,79	0,02	0,966388	0,049123	1,52	2,159252	0,00108
5,79	0,04	0,883165	0,083449	1,6	1,912439	0,003752
5,79	0,06	0,805614	0,105399	1,66	1,697159	0,007382
5,79	0,08	0,735527	0,117685	1,7	1,509992	0,011561
5,79	0,1	0,670639	0,12364	1,74	1,353987	0,016035
5,79	0,12	0,613113	0,124999	1,77	1,220422	0,020656
5,79	0,14	0,562768	0,123328	1,79	1,105361	0,025334
5,79	0,16	0,51908	0,119745	1,8	1,005483	0,030022
5,79	0,18	0,479003	0,115691	1,82	0,92281	0,034695
5,79	0,2	0,444497	0,110929	1,83	0,849664	0,039336
5,79	0,22	0,414833	0,105791	1,83	0,784405	0,04394
5,79	0,24	0,3874	0,101071	1,84	0,729488	0,048506
5,79	0,26	0,363798	0,096265	1,84	0,679574	0,053032
5,79	0,28	0,341759	0,091986	1,85	0,637193	0,05752
5,79	0,3	0,322751	0,087715	1,85	0,598013	0,06197
5,79	0,32	0,305584	0,083727	1,85	0,563041	0,066385
5,79	0,34	0,290026	0,080014	1,85	0,53166	0,070765
5,79	0,36	0,275877	0,076559	1,85	0,503366	0,075113
5,79	0,38	0,262293	0,073553	1,86	0,478984	0,079432
5,79	0,4	0,250505	0,070556	1,86	0,455616	0,083719
5,79	0,42	0,239682	0,067766	1,86	0,434279	0,087977
5,79	0,44	0,229715	0,065165	1,86	0,414726	0,092208
5,79	0,46	0,220511	0,062739	1,86	0,396747	0,096413

5,79	0,48	0,21199	0,060472	1,86	0,380165	0,100591
5,79	0,5	0,204081	0,058351	1,86	0,364824	0,104744
5,79	0,52	0,196722	0,056364	1,86	0,350595	0,108872
5,79	0,54	0,190351	0,054346	1,85	0,336485	0,112974
5,79	0,56	0,183922	0,052598	1,85	0,324182	0,117055
5,79	0,58	0,177903	0,050953	1,85	0,312686	0,121113
5,79	0,6	0,172255	0,049403	1,85	0,301923	0,125149
5,79	0,62	0,166947	0,047941	1,85	0,291824	0,129162
5,79	0,64	0,16195	0,046558	1,85	0,282332	0,133153
5,79	0,66	0,157237	0,04525	1,85	0,273394	0,137122
5,79	0,68	0,152785	0,044011	1,85	0,264962	0,14107
5,79	0,7	0,148574	0,042835	1,85	0,256997	0,144996
5,79	0,72	0,144586	0,041719	1,85	0,24946	0,148901
5,79	0,74	0,140802	0,040657	1,85	0,242318	0,152786
5,79	0,76	0,137563	0,039534	1,84	0,234932	0,156647
5,79	0,78	0,134137	0,038573	1,84	0,228511	0,160491
5,79	0,8	0,130875	0,037657	1,84	0,222404	0,164315

**Tabla 5.3**

En el gráfico 5.19 podemos observar la variación de la cuerda a lo largo del alabe.



**Gráfico 5.19.**

## Capítulo 6: Materiales.

### 6.1 Selección del material para la fabricación de las aspas.

Para realizar las aspas se suelen utilizar distintos materiales, tales como: aleaciones de aluminio, madera, aceros, titanio y materiales compuestos. Los más empleados actualmente son los denominados materiales compuestos o composites, pues presentan muy buenas propiedades estructurales y facilitan la manufactura de las aspas. Se denominan composites a aquellos materiales compuestos por dos o más no miscibles, y de diferente estructura, que unidos entre sí, tienen propiedades mecánicas superiores a su presentación de forma individual. Los más comunes en la construcción de aspas son la fibra de vidrio y la fibra de carbono. En la tabla 6.1.1 se muestran propiedades mecánicas estimativas de algunos materiales:

Material	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Resistencia a la tracción [kg/mm <sup>2</sup> ]	Módulo [10x3 kg/mm <sup>2</sup> ]
Fibra de carbono / Epoxi	1,5	180	12
Fibra de boro / Epoxi	2,0	180	24
Kevlar / Epoxi	1,45	90	7
Fibra de vidrio / Epoxi	1,9	180	3,5
Aleación de aluminio de alta resistencia	2,8	55	7,2
Aleación de titanio de alta resistencia	4,5	100	11

**Tabla 6.1.1 Propiedades de los materiales.**

Como se observa en la tabla anterior, en general los composites son más resistentes y más livianos que aleaciones con excelente propiedades mecánicas como las de titanio o aluminio. Esta característica es muy importante ya que permite reducir notablemente el peso del rotor eólico. Sin embargo los materiales compuestos presentan como desventaja una menor resistencia a la fatiga



respecto de los metales, lo que es importante pues la fatiga es la principal causa de falla de las aspas de aerogeneradores. En la Tabla 6.1.1 también se ve que, entre los composites, el de mayores cualidades mecánicas es el compuesto por fibras de carbono. No obstante este material posee un precio mucho mayor al de la fibra de vidrio, lo que lo hace viable sólo en proyectos que requieran elevada performance, principalmente bajo peso y buena resistencia a la fatiga, las dos características en las cuales la fibra de carbono sobrepasa claramente a la fibra de vidrio.

En este proyecto se ha optado por la fibra de vidrio pues:

- ✓ Posee elevada resistencia mecánica y baja densidad de masa.
- ✓ Tiene elevada relación características / precio.
- ✓ No se corroe.
- ✓ Posibilita realizar aspas con formas complejas mediante métodos de fabricación simples.

Como desventajas presenta:

- ✓ Baja resistencia a la fatiga.
- ✓ Sensibilidad a rayos UV.

### **Fibra de vidrio.**

La fibra de vidrio es un composite bifásico consistente en un polímero resinoso conocido como epoxi (fase continua) mezclado con pequeñas fibras de vidrio (fase discontinua). Posee una excepcional dureza, buena resistencia eléctrica, resistencia a la corrosión e intemperie, baja conductividad térmica, baja densidad másica y baja inflamabilidad.

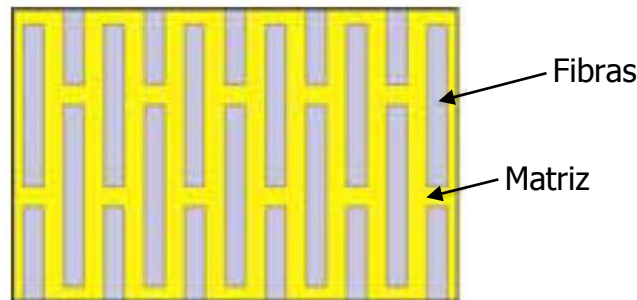
La fase discontinua es la encargada de conferir resistencia mecánica, por ello se compone de un material de elevada dureza. La fase continua se conoce como matriz y cumple las siguientes funciones:

- ✓ Alinear las fibras en las direcciones importantes de los esfuerzos y permitir la "acción compuesta" en tracción, compresión y corte.
- ✓ Separar las fibras de modo de prevenir que las fisuras se propaguen rápidamente de una fibra a la otra a través del compuesto.
- ✓ Proteger las fibras del daño mecánico y ambiental.

- ✓ Si es dúctil, la matriz actúa frenando el movimiento de las fisuras.

### **Mecanismos de transmisión de esfuerzos en la fibra de vidrio / epoxy:**

En cualquier composite la fase discontinua es de mayor rigidez que la fase continua, permitiendo que sea la primera la que tome la mayor parte de la carga. Dado esto, puede utilizarse una matriz de baja resistencia mecánica, pero con otras propiedades tales como: flexibilidad, resistencia al impacto, hermeticidad, etc. De esta forma el material compuesto puede combinar las mejores características de sus dos fases, siempre que el entramado de la fase discontinua y su unión con la matriz sean los adecuados para permitir la correcta transmisión de los esfuerzos internos.



**Figura 6.1.1 Disposición de las fibras y la matriz**

La Figura 6.1.1 esquematiza la unión entre las dos fases de la fibra de vidrio. En este caso la disposición de las fibras es unidireccional, con lo que se consigue una elevada resistencia a la tracción en el sentido de la orientación de las mismas y una baja resistencia en cualquier dirección perpendicular.

Observando la figura es posible entender cómo funciona la transmisión de esfuerzos en el composite. Al aplicar tracción en la dirección de las fibras, estas quedan traccionadas en tal dirección. Cada fibra transmite un esfuerzo de corte a la fase continua, la cual a su vez transmite este esfuerzo a otras fibras contiguas. La fase continua es más elástica (menor módulo de Young) que la discontinua, por ello las tensiones de tracción son menores en la matriz, lográndose aprovechar de la dureza de las fibras de vidrio.

Para que el mecanismo descrito en el párrafo anterior sea factible se debe cumplir que:



-Las fibras estén orientadas en la dirección de la tensión de tracción aplicada al material.

-Exista una adherencia suficiente entre las dos fases del composite, de modo de que la transmisión de esfuerzos de corte sea posible.

-La longitud de las fibras sea suficiente para conseguir una transferencia de carga hacia la matriz mayor a la que ellas pueden soportar, logrando un aprovechamiento de la capacidad de carga de las fibras.

Por otro lado, cuando se aplican esfuerzos de tracción en la dirección transversal a las fibras, estas no absorben los esfuerzos, sino que lo hace la matriz, con lo cual el material compuesto presenta baja resistencia a la tracción. Esto evidencia que las fibras de la fase discontinua se deben orientar principalmente en las direcciones que reciban mayores esfuerzos de tracción.

Por lo descrito hasta ahora queda en evidencia que la fabricación del composite repercute muy fuertemente en las propiedades finales del mismo. Factores tales como alineación de las fibras, adherencia entre las dos fases, largo de las fibras, homogeneidad y cantidad de cada fase, serán de elevada importancia.

### **Mecanismos de falla:**

Existen cuatro micromodos de falla que se dan a consecuencia de:

- ✓ -Concentración de tensiones en los agujeros creados por la rotura de fibras.
- ✓ -Alta concentración de tensiones de corte en la matriz en los extremos.
- ✓ -Un aumento de la tensión normal promedio en las fibras adyacentes.

Los cuatro micromodos de falla son los siguientes:

1. Despegado de la fibra
2. Microfisurado de la matriz
3. Microfluencia de la matriz
4. Rotura de fibras

Estos mecanismos de falla difieren de los encontrados en materiales metálicos, con lo cual la resistencia a la fatiga de los composites tiene un comportamiento diferente.





En general los composites no alcanzan vida infinita (número de ciclos de carga tendiente a infinito) por más baja que sean las tensiones de trabajo.

### **Métodos de fabricación de aspas con fibra de vidrio.**

Si bien existen distintas formas de fabricar una pieza con fibra de vidrio, todas ellas constan de tres pasos:

- ✓ Conformar la geometría deseada con las fibras.
- ✓ Impregnar las fibras con el epoxi.
- ✓ Endurecimiento del material.

Para fabricar aspas de aerogeneradores se pueden citar tres métodos usados en la actualidad.

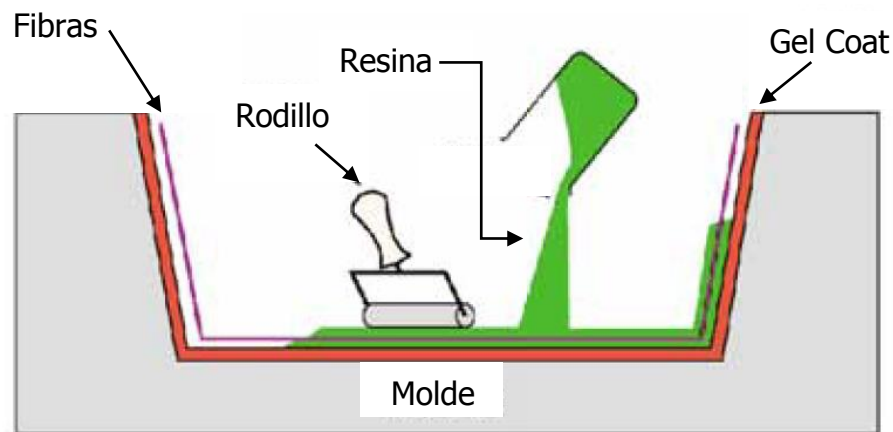
### **Moldeo por contacto.**

Consiste en ir impregnando manualmente sucesivas capas de fibra con la resina sobre un molde para que adquieran la forma de éste, como se puede ver en la Figura 6.1.2.

1. La primera operación es la aplicación de un desmoldante, estos son principalmente Ceras, Films, Siliconas o Frekote. Las Ceras y Frekote se aplican varias veces para la primera pieza y se va dosificando hasta llegar a 1 capa cada 10 a 15 piezas.
2. Una vez curado el desmoldante se limpia y cura el molde.
3. Posteriormente se pinta con una capa de Gel Coat, cuya misión es la de dejar un buen acabado y proteger a las piezas contra su medio. Su aplicación se realiza a pistola o bien brocha o rodillo a una temperatura ambiente no excesivamente baja. Su espesor suele ser del orden de 0,5[mm].
4. La primera capa se coloca sobre la capa de Gel una vez que este ha adquirido el estado de curado adecuado. Previamente a la aplicación de una fibra se aplica la resina para evitar burbujas de aire. En esta primera capa, se pasa un rodillo con sumo cuidado para evitar que quede marcado en el Gel.

5. Posteriormente ya se realiza un moldeo con una fibra no muy gruesa, velo de superficie o mat. Las capas posteriores se moldearán con mats o tejidos, en función de las características de la pieza y según la ficha técnica, después de los posteriores moldeos se pasará el rodillo para evitar burbujas.

Con este procedimiento es difícil conseguir una correcta orientación de las fibras. Es difícil llegar a contenidos de fibra de un 45 % en volumen (60 % en peso si el refuerzo es vidrio), por lo que no se pueden obtener piezas de alto rendimiento mediante el laminado manual. Las piezas conseguidas por este proceso tienen unas características mecánicas inferiores.



**Figura 6.1.2. - Moldeado manual.**

### **Moldeo por proyección:**

Es un sistema evolucionado del moldeo por contacto, la aplicación de gel Coat es similar, en este sistema el moldeo se realiza proyectando la mezcla de resina catalizador y trozos de roving cortados por la propia máquina que son impulsados sobre el abanico de resina anterior. Ver Figura 6.1.3.

Los roving son filamentos ensamblados entre ellos con un ensimaje dado. Hay dos tipos, de ensamblado sin torsión de filamentos y por hilos de vidrio.

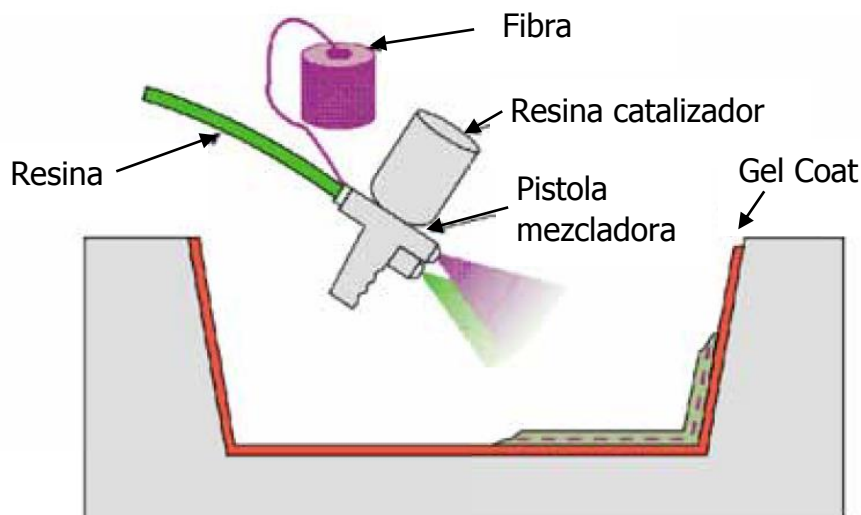
El refuerzo utilizado en el proceso de proyección es el roving ensamblado, es decir, el roving cuya mecha está compuesta por hilos de base de título menor, bobinados sin torsión en paralelo, de modo que al utilizarlos con la máquina de corte se pueda obtener un tapiz de hilos cortados cuyo efecto en la pieza final

sea equivalente al de un material de hilos cortados. El Moldeo por proyección ahorra material al utilizar roving, a la vez que se consiguen mejores tiempos de producción. Para conseguir espesores homogéneos se requiere una cierta habilidad.

Las pistolas de aplicación realizan la operación de mezcla, resina catalizador, y corte de la fibra simultáneamente.

Al igual que en el procedimiento manual para eliminar las burbujas se utiliza un rodillo laminar o se coloca una película sobre el estratificado y se elimina el aire, de modo que escapen las burbujas ocluidas y se aplique presión.

Las propiedades mecánicas obtenidas son inferiores al procedimiento por contacto, incluso en igualdad de refuerzos.



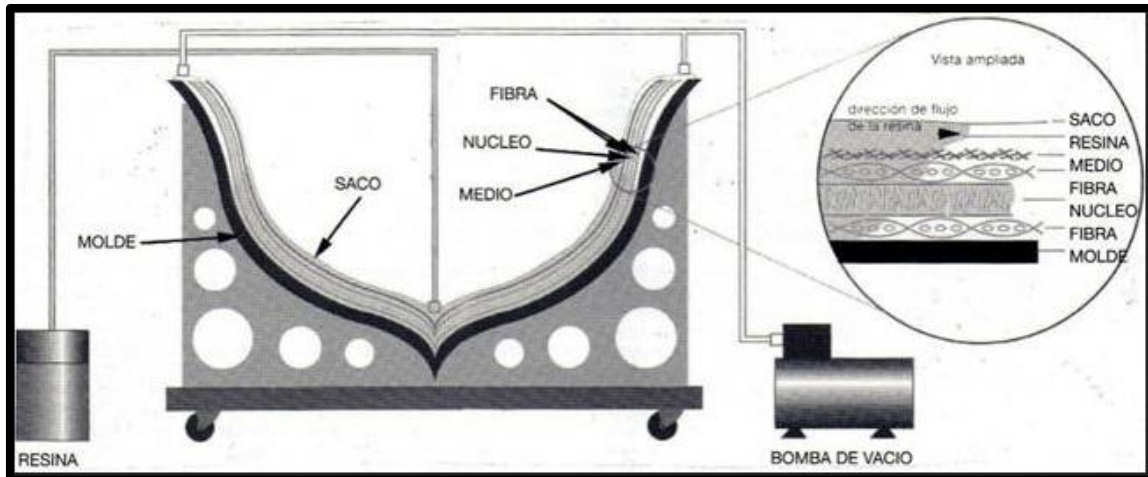
**Figura 6.1.3. Moldeo por proyección.**

### **Moldeo por bolsa de vacío**

Este proceso utiliza un tipo de molde similar a los procedimientos anteriores pero en los bordes utiliza un pequeño canal para conducir el aire al exterior, lo que persigue una buena eliminación de burbujas, además de reproducir dos caras con un buen acabado.

El proceso consiste en colocar sobre el molde pintado con gel las capas de tejidos de fibras pre impregnados a utilizar y los núcleos de refuerzo. Una vez moldeada la pieza se coloca una bolsa con cañerías distribuidas estratégicamente que se adaptará lo más fielmente posible al molde, siendo esta una de las operaciones

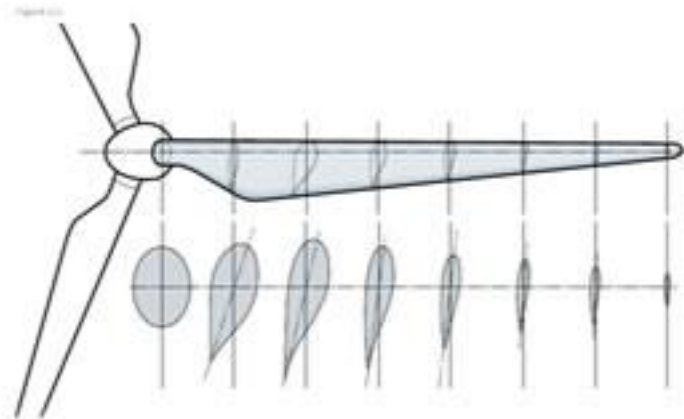
clave de este proceso. Se sella y se aplica el vacío, con lo que la resina es inyectada a través de la cañería y se homogeneizará ayudada por la presión que se crea por el vacío.



**Figura 6.1.4. Moldeo por bolsa de vacío.**

## 6.2 Proceso de fabricación.

Para la fabricación del álabe se propone realizar dos medios moldes en resina reforzada con fibra de vidrio. Para la fabricación de los mismos se propone cortar por láser en madera de 1 mm de espesor las secciones del álabe como indica la figura 6.2.1. Como resultado de este proceso se obtienen 80 secciones que aproximan al álabe en su forma. Éstas luego se pegan entre sí y se lija la superficie para evitar los escalonados entre secciones.



**Figura 6.2.1. Secciones del álabe para elaborar las costillas.**



Con este modelo en madera, se construyen dos medios moldes de yeso, los que servirán para fabricar el modelo en resina. Esta parte del proceso es necesaria ya que no podemos utilizar el modelo de madera para fabricar los moldes de resina debido a la dificultad de desmoldado.

Una vez que se tiene el modelo en resina, se le da la terminación superficial requerida mediante lijado y se procede a construir los dos medios moldes de resina reforzada con fibra de vidrio. Éstos moldes servirán para fabricar la pieza final, también construida en resina reforzada con fibra de vidrio, ya que el desmoldado en este caso no representa un problema.

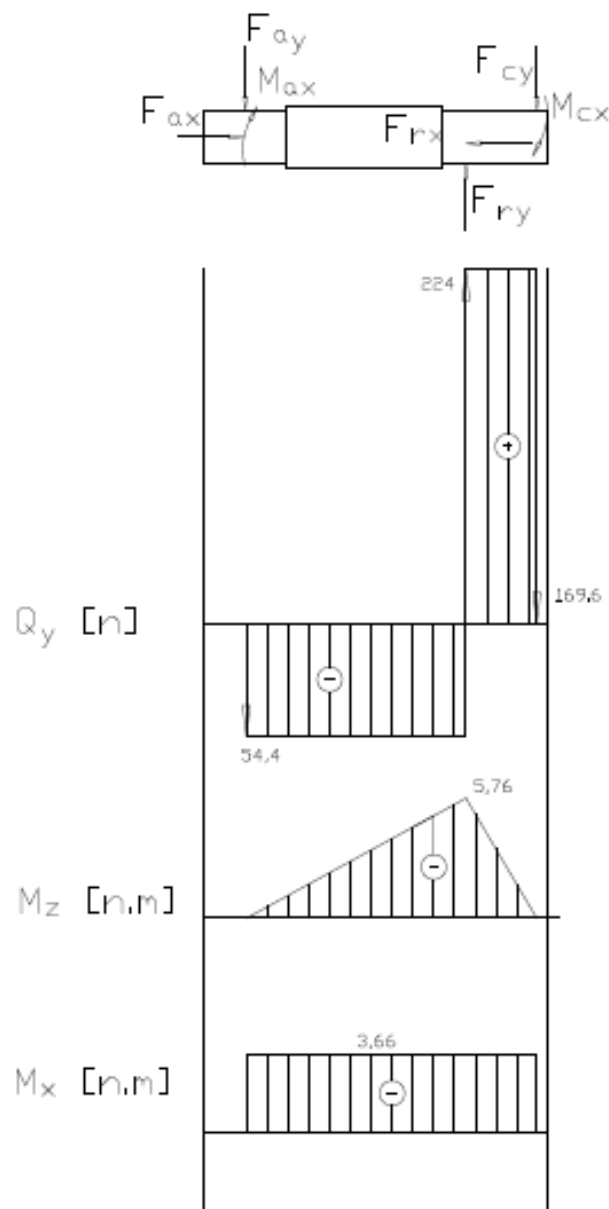
La pieza en cuestión se fabrica entonces laminando sobre el molde en dos partes, las que luego se pegan entre sí con un adhesivo. Se propone utilizar resina poliéster reforzada con fibras de vidrio de arreglo bi-direccional.

Debido a las dificultades existentes a la hora de dimensionar los espesores para estos materiales, sería de utilidad realizar un modelo en algún software de simulación para materiales compuestos, que contemple todas las variables que interactúan en las propiedades mecánicas de los mismos (orientación de las fibras, composición química y cantidades relativas de agente reforzante y fase matriz, proceso de fabricación, etc.). Aun así, se llegaría a un pre-diseño, el cual debería ser probado y ajustado a las condiciones reales de aplicación. Dichas tareas exceden el alcance de este proyecto. Queda abierta entonces la posibilidad de encarar esta tarea como un trabajo final de un alumno de ingeniería en materiales.

## Capítulo 7. Selección y diseño de componentes.

### 7.1 Dimensionamiento del eje mayor.

En esta sección del trabajo procederemos a definir las dimensiones y apoyos del eje, así como la fijación de los elementos al mismo. Comenzamos por definir las sollicitaciones a las cuales está sometido. A continuación, en la figura 7.1.1, podemos observar los diagramas de fuerzas y momentos.



**Figura 7.1.1. Gráfico de momentos y fuerzas.**



Siendo:

- $F_{ax}$ : fuerza axial de las aspas.
- $F_{ay}$ : peso de las aspas.
- $M_{ax}$ : momento torsor de las aspas.
- $F_{ry}$ : fuerza del rodamiento en la dirección "y".
- $F_{rx}$ : fuerza del rodamiento en la dirección "x".
- $F_{cy}$ : fuerza en el acoplamiento.
- $M_{cx}$ : momento torsor que se transmite al acoplamiento.

Una fórmula aproximada para determinar la fuerza axial de las aspas del aerogenerador es la expresión 7.1.1.

$$F_{ax} = 0,062 \cdot v^2 \cdot A = 39,7 [N]$$

#### **Ecuación 7.1.1.**

Donde "v" es la velocidad del viento y "A" es el área frontal barrida por las aspas.

Como simplificación del problema adoptaremos que dicha fuerza axial será absorbida por el rodamiento porque creemos que esta consideración se acerca más a la realidad.

Con dichas solicitaciones se calculan las tensiones para cada sección. La sección del eje se determinó en función de lograr una buena superficie de contacto entre el cubo en donde se montan los alabes y el mismo a los fines de su anclaje. Los rebajes en el eje se pensaron con el fin de poder posicionar las piezas a montar con mayor facilidad. Las dimensiones de los mismos se resaltan en la tabla 7.1.1. En la tabla 7.1.2 podemos observar las solicitaciones sobre el mismo.

	Sección		
	0 - 1	1 - 2	2 - 3
D [mm]	25	30	25

**Tabla 7.1.1. Secciones del eje.**



Solicitación	0 - 1	1 - 2	2 - 3
Nx [n]	39,7	39,7	39,7
My [n.m]	0	0	0
Mz [n.m]	1,088	5,068	5,76
Mx [n.m]	3,66	3,66	3,66
$\tau$ [Pa]	1192975	690378,8	1192975
$\sigma_x$ [Pa]	790141,9	1968098	3835812
meq (mf)	1,088	5,068	5,76
$\sigma$ Von Mises [Mpa]	2,212	2,303	4,357

**Tabla 7.1.2. Tensiones en el eje.**

De la tabla 7.1.2 podemos observar que la sección más solicitada resulta la 2 - 3. Siendo el límite elástico el aluminio  $\sigma = 200$  [Mpa], la tensión aplicada resulta casi 50 veces menor a este valor.

### **Vida a la fatiga.**

Se procede a corroborar la vida a la fatiga, para ello en primera instancia se calculan las tensiones en las cercanías a los concentradores de tensión. En la tabla 7.1.3 podemos observar los dichas tensiones.





	1 - 2	2 - 3
D [cm]	3,00	3,00
d [cm]	2,50	2,50
r [cm]	0,20	0,20
D/d	1,20	1,20
r/d	0,08	0,08
Kt	1,70	1,70
q	0,50	0,50
Kf	1,35	1,35
Cs	1,05	1,05
Ct	0,85	0,85
Cc	0,81	0,81
$\sigma_{total}$ [Mpa]	7,68	14,52

**Tabla 7.1.3.**

Con lo cual podemos observar que en ninguna situación se supera la tensión admisible del material.

En la tabla 7.1.4 se muestra el diámetro calculado bajo las hipótesis de Soderberg.

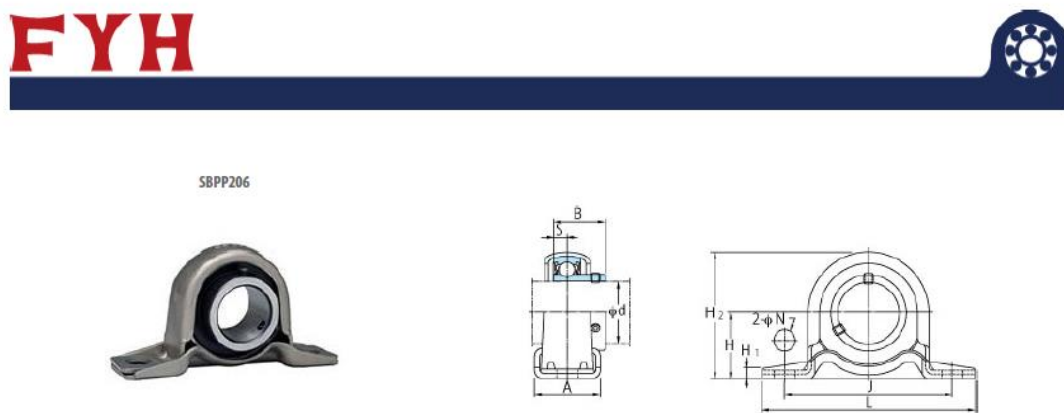
Seccion	0 - 1	1 - 2	2 - 3
Coef. seguridad	3	3	3
Mt [Kg . cm]	37,30	37,30	37,3
Mf [Kg . cm]	11,09	51,66	58,71
Ktot	1	2,295	2,295
$\sigma_f$ [ $Kgf/cm^2$ ]	2038	2038	2038
$\sigma_w$ [ $Kgf/cm^2$ ]	1222,8	1222,8	1222,8
$\sigma_{wc}$ [ $Kgf/cm^2$ ]	1222,8	887,36	887,36
d [cm]	0,85	1,44	1,50

**Tabla 7.1.4.**

Como se ve el diámetro de todas las secciones del eje supera el mínimo para un coeficiente de seguridad 3, con lo que la vida a la fatiga del eje no representa un problema.

### **Dimensionamiento de los apoyos: selección de rodamientos.**

Para la selección de los apoyos se optó por utilizar el software de asistencia al usuario de la firma FYH. El mismo recomienda conjuntos de rodamiento-bastidor con sistema de montaje en función de los requerimientos, como podemos ver en la figura 7.1.3.



**Figura 7.1.3. Recomendación del fabricante.**

Se propuso este sistema de bastidor debido a la baja carga que tanto los rodamientos como los apoyos deben soportar. Además, dentro de la gama de productos disponibles, se trató de seleccionar el que mejores propiedades ante la corrosión tenga. El sistema de montaje para este producto es con tornillo prisionero, dado que se recurre al sistema más simple posible acorde a las condiciones de carga. A continuación, en la figura 7.1.4, se muestra una tabla con las características técnicas del rodamiento.

Specifications	
Housing Number	PP205
Bearing Number	SB205
Shaft Size	25 mm
Bolt Size	M10 3/8 in
Weight	0.28 kg 0.62 lb
Locking Style	Set Screw Locking

Dimensions	
H	28.6 mm 1-1/8 in
L	108 mm 4-1/4 in
A	32 mm 1-1/4 in
J	86 mm 3-25/64 in
N	11.5 mm 29/64 in
H1	4 mm 5/32 in
H2	56.6 mm 2-7/32 in
B	27 mm 1.063 in
S	7.5 mm 0.295 in

Basic Load Rating	
Cr	14.0 kN 3147 lbf
Cor	7.85 kN 1765 lbf
Factor fo	13.9

**Figura 7.1.4. Características técnicas del rodamiento.**

Como podemos ver, siendo la carga en el apoyo  $F_{ry} = 224 [N]$  el rodamiento cumple sin problemas las exigencias de carga dinámica y estática (C y  $C_0$ , respectivamente). Al no tener carga axial que comprobar, queda seleccionado el apoyo propuesto.

Para corroborar la carga axial admitida por el conjunto bastidor-rodamiento, el fabricante recomienda utilizar la ecuación 7.1.2:

$$F_{ap} = 0,003 \cdot B \cdot d = 0,003 \cdot 27 \cdot 25 = 2,025 [kN]$$

**Ecuación 7.1.2. Carga axial admitida por el rodamiento**

Siendo B y d los parámetros geométricos del rodamiento definidos en la figura 5.

Como podemos observar, el rodamiento soporta sin problemas la carga axial de diseño  $F_{ax} = 39,7 [N]$ . Por ende, se corrobora que el rodamiento sugerido por el fabricante es apto para ser utilizado.

## 7.2 Montaje de los elementos al eje.

Para el montaje del cubo de los álabes al eje se propone el uso de adhesivos anaeróbicos para fijación de partes cilíndricas. Se procede entonces a seleccionar, de la firma LOCTITE, el producto más adecuado para el caso de aplicación. A continuación, en la figura 7.2.1 podemos ver un fragmento del catálogo que resulta de interés.

	609	620	638
Características	Ajustes con interferencia Alta velocidad de curado	Ajustes deslizantes Altas temperaturas	Alta resistencia Alta flexibilidad Alta velocidad de curado
Color	Verde	Verde	Verde
Holgura diametral máxima [mm]	0,12	0,38	0,38
Resistencia al corte [Kg/cm <sup>2</sup> ]	162	267	316
Viscosidad [cP]	125	8500	2500
Temp. de Trabajo [°C]	-54 a 150	-54 a 230	-54 a 150
Velocidad de curado (fijación - total)	10 min - 24 hs	30 min - 24 hs	5 min - 24 hs
Primer Recomendado	7471 ó 7649	7471 ó 7649	7471 ó 7649
Códigos y Presentaciones	10 gr - 284493 (601) 50 gr - 388799 250 gr - 388800	50 gr - 388795 250 gr - 388796	50 gr - 229969 250 gr - 220692

Figura 7.2.1. Catálogo del fabricante.



Se selecciona entonces el producto 638, debido a que el ajuste entre las partes es deslizante y no se requiere resistencia a las temperaturas.

Se procede a comprobar que el adhesivo cumpla con los requerimientos mecánicos. Para esto, se utiliza la ecuación 7.2.1:

$$F_{ad} = A_c \cdot \tau = \pi \cdot D \cdot l \cdot \tau$$

$$F_{ad} = 3,14 \cdot 2,5 \cdot 4 \cdot 316 = 9927,43 [Kg] = 97,3 [KN]$$

### **Ecuación 7.2.1. Resistencia al corte del adhesivo.**

Siendo:

- ✓  $F_{ad}$  la fuerza resistente al corte del adhesivo.
- ✓  $A_c$  el área de contacto entre superficies a pegar.
- ✓  $\tau$  la resistencia al corte del adhesivo.

Se verifica, con la ecuación 2 que este valor sea superior a la fuerza de corte aplicada debido al torque a transmitir.

$$F_t = \frac{T}{D} = \frac{3,66 [N.m]}{0,025 [m]} = 146,4 [N]$$

### **Ecuación 7.2.2. Fuerza de corte a transmitir.**

Podemos afirmar entonces que el adhesivo cumple sin problemas los requerimientos del caso de aplicación.

Como se explicó en el apartado de dimensionamiento de los ejes, el rodamiento irá montado al eje con sistema de tornillo prisionero. Los ejes irán vinculados al reductor con los acoplamientos de sistema de anillo elástico ajustable con tornillo.

## **7.3. Selección del reductor**

Para la selección del reductor a utilizar en la cadena cinemática, se siguió la secuencia de cálculo propuesta por el fabricante "Etcsa".

Para seleccionar el mismo se debe partir de la potencia a transmitir:

$$P = 122,44 [W]$$



Una vez se tiene este valor, se procede a corregir el mismo utilizando factores que dependen de la condición de aplicación de la carga.

### Coeficiente de corrección de la potencia

Este coeficiente considera los siguientes factores: tipo de motor, máquina conducida y horas de servicio.

$$P_c = P \times F_{cp}$$

Siendo:

$P_c$ : Potencia corregida.

$P$ : Potencia a transmitir.

$F_{cp}$ : Factor de corrección de potencia.

NATURALEZA DE LA CARGA	
<b>UNIFORME</b>	Agitadores de líquidos y semilíquidos, Bombas rotativas y de engranajes (densidad constante); alternativas con descarga libre. Compresores centrífugos, cintas transportadoras ligeras, Elevadores, Embaladoras, Envasadoras, Máquinas de lavado y embotelladoras. Mecanismos de elevación. Transportadores de rodillos, rosca, cinta de acero. Ventiladores centrífugos ligeros, de pequeño diámetro de hélice.
<b>SOBRECARGAS MODERADAS</b>	Agitadores de densidad variable, Amasadoras, Batidoras, Bombas rotativas y de engranajes (densidad variable) Bombas centrífugas, Cabrestantes, Calandras, Cordas de ind. textil, Cribas rotativas, Elevadores de cangilones, Enrolladoras, Mezcladoras de hormigón, Molinos de harina y pastas, Transportadores, Telares, Trituradores de mineral y piedra, Ventiladores para torres de refrigeración.
<b>CHOQUES FUERTES</b>	Arrastradores de cadena (Laminación), Bombas alternativas (un cilindro), Calandras, Cribas, Cangilones, Caminos de rodillos, Grúas, Máquinas plegadoras, Machacadoras, Molinos de bolas, de barras, Moldeadoras, Laminadoras, Prensas, Trenes de laminación, Tronzadoras, Tambores de pulir.

**Tabla 7.3.1. Naturaleza de la carga.**

De la tabla 7.3.1, se concluye que la condición más acercada a la realidad es la de "sobrecargas moderadas".



Con esta suposición se entra a la tabla 7.3.2, de la que, en función del número de arranques por hora y las horas de funcionamiento diario nos devuelve un valor para el factor de corrección.

NATURALEZA DE LA CARGA	Arranques Hora	Horas de funcionamiento diario		
		hasta 2 h.	de 2 a 12 h.	de 12 a 24 h.
Uniforme	≦ 10	0,70	1,0	1,2
	= 30	0,85	1,1	1,4
	≧ 60	1,00	1,3	1,5
Sobrecargas moderadas	≦ 10	1,00	1,2	1,3
	= 30	1,20	1,3	1,6
	≧ 60	1,30	1,6	1,8
Choques fuertes	≦ 10	1,30	1,5	1,8
	= 30	1,60	1,7	1,9
	≧ 60	1,80	1,9	2,0

**Tabla 7.3.2. Factor de corrección de potencia en función de parámetros de funcionamiento.**

De esta tabla, con un número de arranques por hora menor a 10 y de 12 a 24 horas de funcionamiento diario, se obtiene un Fcp de 1,3.

$$P_c = P \times F_{cp} \rightarrow P_c = 122,44 \cdot 1,3 = 159,12 [W]$$

Con este valor de potencia corregida, se procede a seleccionar de tabla el reductor más adecuado para el caso de aplicación.

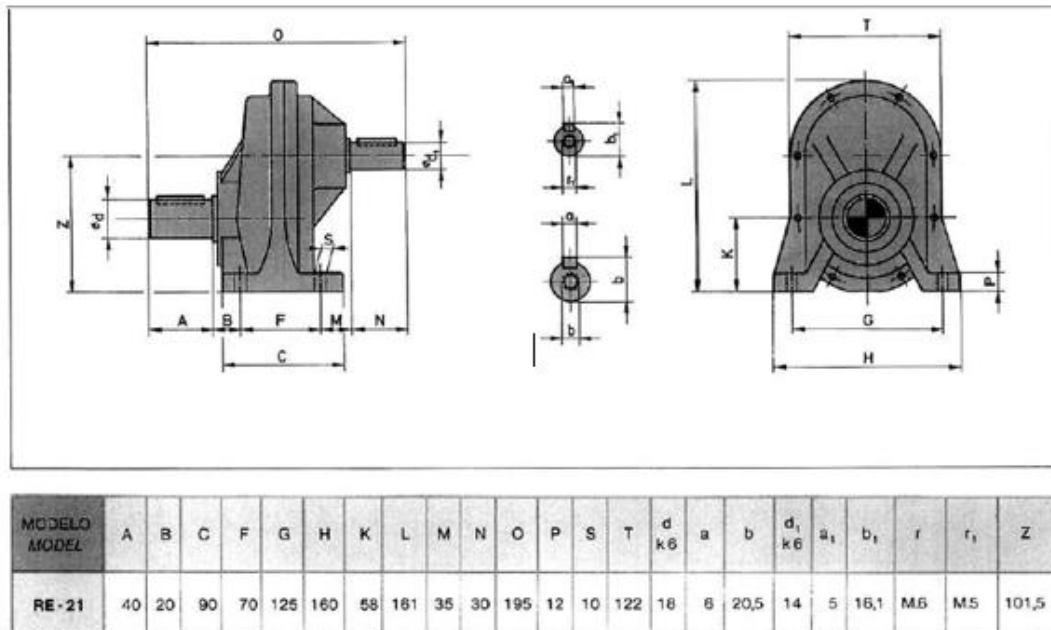
### Selección del reductor.

A continuación, en la tabla 7.3.3 se pueden observar los datos técnicos del reductor seleccionado.

Modelo	Pot. [W]	Vel. salida	Vel. entrada	Rel. Reducc.	Par [Kg.m]
EB - 21	180	666,6	1500	2,2	0,26

**Tabla 7.3.3. Datos técnicos del reductor.**

En la figura 7.3.1 se muestra un esquema del elemento seleccionado junto con sus parámetros geométricos.



**Figura 7.3.1. Datos del elemento seleccionado.**

Queda entonces seleccionado el componente RE – 21 de la firma “Etcsa” para hacer las veces de reductor entre los ejes.

#### 7.4 Selección del generador:

Para la selección del generador en primer momento se pensó modificar un alternador de automóvil basándonos en un trabajo final anterior. Dicha idea no prosperó puesto que esta máquina eléctrica, incluso a altas revoluciones posee una eficiencia baja.

Por ende se optó en utilizar un motor de corriente continua de imanes permanentes.

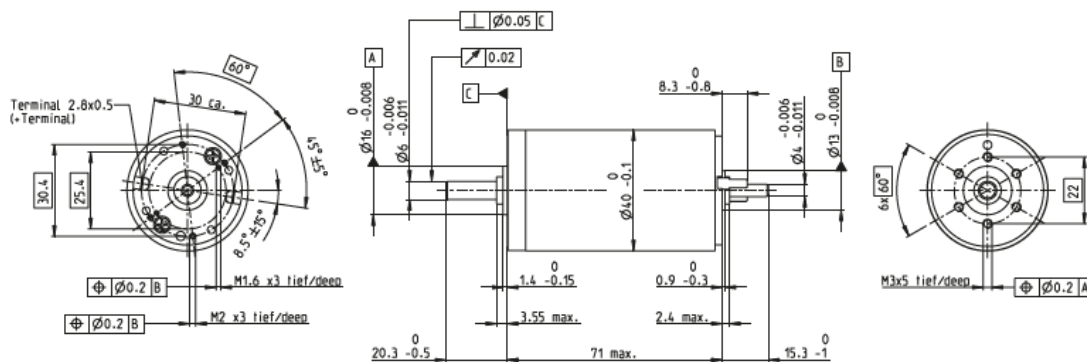


El motor de corriente continua es una máquina reversible que convierte la energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción que se genera del campo magnético.

Los motores y los generadores de corriente continua están constituidos esencialmente por los mismos elementos, diferenciándose únicamente en la forma de utilización. Por reversibilidad entre el motor y el generador se entiende que si se hace girar al rotor, se produce en el devanado inducido una fuerza electromotriz capaz de transformarse en energía en el circuito de carga. En cambio, si se aplica una tensión continua al devanado inducido del generador a través del colector delga, el comportamiento de la máquina ahora es de motor, capaz de transformar la fuerza contra electromotriz en energía mecánica.

Los motores de imán permanente tienen algunas ventajas de rendimiento frente a los motores con estator bobinado o sin escobillas. Son más pequeños, más ligeros, más eficaces y fiables que otras máquinas eléctricas alimentadas individualmente.

Se seleccionó el motor 218014 de la firma Maxon. En la figura 7.4.1 podemos visualizar un esquema del motor seleccionado.



**Figura 7.4.1. Dimensiones motor.**

En la tabla 7.4.1 podemos visualizar los datos técnicos del fabricante<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> En el anexo II se adjunta el catálogo del fabricante.



Valores a tensión nominal	
Tensión nominal	48 V
Velocidad en vacío	1420 rpm
Corriente en vacío	7.76 mA
Velocidad nominal	781 rpm
Par nominal (máx. par en continuo)	190 mNm
Corriente nominal (máx. corriente en continuo)	0.6 A
Par de arranque	424 mNm
Corriente de arranque	1.32 A
Máx. rendimiento	85 %
Datos característicos	
Resistencia entre terminales	36.3 $\Omega$
Inductancia en terminales	9.32 mH
Constante de par	321 mNm/A
Constante de velocidad	29.8 rpm/V
Relación velocidad/par	3.37 rpm/mNm
Constante mecánica de tiempo de arranque	4.16 ms
Momento de inercia del rotor	118 gcm <sup>2</sup>

**Tabla 7.4.1. Datos técnicos del motor.**

A continuación se destacan los datos por los cuales se optó por elegir esta máquina:

- ✓ Par nominal (máx. en continuo) 190 [mN.m].

Dicho valor es de importancia ya que denota el esfuerzo consumido para la velocidad y la tensión especificadas al hacer funcional la máquina como generador.

- ✓ Par arranque: 424 [mN.m].

Es muy importante este punto ya que se debe verificar que el torque disponible en los alabes del aerogenerador sea mayor que el par de arranque.

- ✓ Velocidad nominal: 781 [r.p.m.].

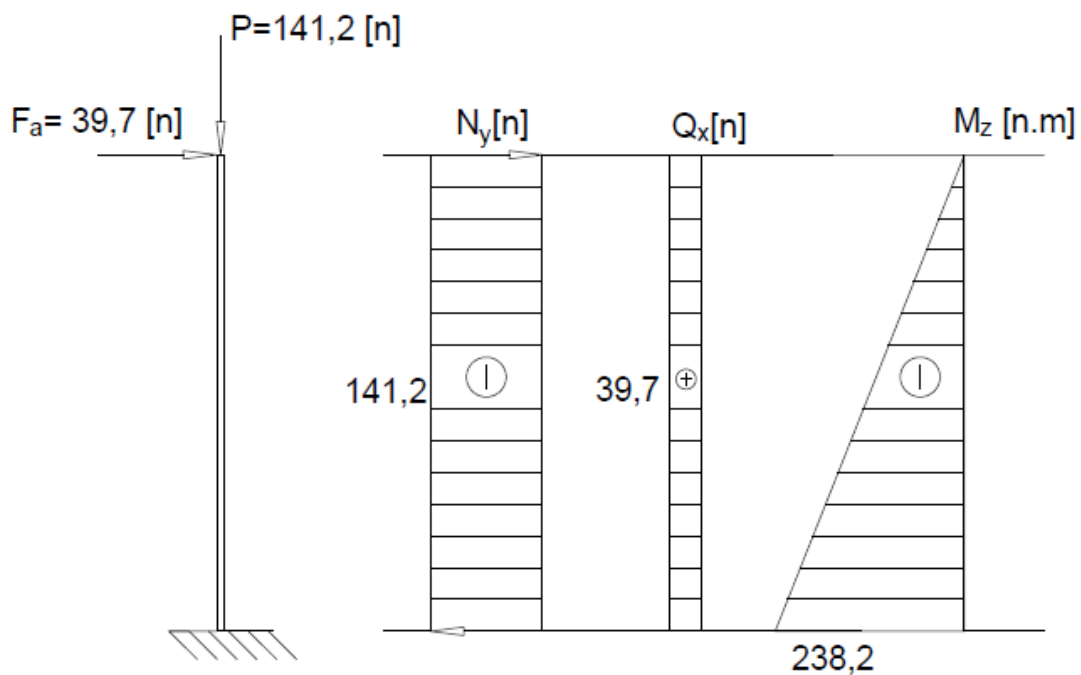
Esta velocidad nos indica el régimen para el cual la máquina fue diseñada. Este valor se tendrá en cuenta a la hora de calcular la cadena cinemática.

- ✓ Máx. rendimiento: 85%.

Esto valor nos da una idea de la eficiencia de conversión energética de la máquina supondremos que el valor funciona a ambos sentidos, es decir cuando transformemos energía mecánica en eléctrica.

### 7.5 Cálculo estructura.

Para la estructura de sostén del aerogenerador se propone utilizar tres tramos de igual largo de tubo comercial de sección circular con una construcción similar a los postes de alumbrado, fabricado en acero al carbono. Para poder dimensionar el tubo tendremos que estimar el peso del aerogenerador. La longitud del mismo como ya se mencionó es de 6 [m]. A continuación en la figura 7.5.1 podemos observar las solicitaciones y gráfico de momentos de dicha estructura.



**Figura 7.5.1. Gráfico de momentos.**

Con dichas solicitaciones se procede a calcular la sección resistente requerida en cada tramo de la estructura, utilizando un coeficiente de seguridad 3 debido a las condiciones de carga. A continuación, en la tabla 7.5.1, se presentan las tensiones en cada tramo para diámetros estándar con un espesor de pared de  $e = 3 \text{ [mm]}$ :

Tramo	1	2	3
Ny [N]	141,2	141,2	141,2
Mz [N.m]	79,4	158,8	238,2
$\sigma$ traccion [Pa]	554880,9	404913,1	318761,4
$\sigma$ flector [Pa]	50735331	52874760	48488776
$\sigma$ apl [MPa]	51,3	53,3	48,8
D [m]	0,03	0,04	0,05

**Tabla 7.5.1. Diámetro propuesto.**

Siendo la tensión admisible para el caso  $\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{mat}}{s} = \frac{210 [Mpa]}{3} = 70 [Mpa]$ , se comprueba que en ningún tramo se supera este valor.

Se procede entonces a calcular la resistencia de esta estructura al pandeo. A los fines del cálculo y como una simplificación del problema real, se supuso que la estructura tiene la sección más esbelta a lo largo de toda su sección, ya que de lo contrario deberíamos realizar los cálculos del desplazamiento para cada tramo y resulta complejo definir con claridad qué coeficiente de reducción de longitud se debe aplicar.

Con la sección antes dicha se calcula una carga crítica la que no debe ser superada por la carga axial debido al peso del conjunto. Para esto se utiliza la ecuación 7.5.1:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(2L)^2} = 337,88 [N]$$

**Ecuación 7.5.1. Carga crítica al pandeo**

Siendo:

- ✓ E el módulo de elasticidad lineal del material.
- ✓ I el momento de inercia de segundo orden.
- ✓ L el largo de la estructura.

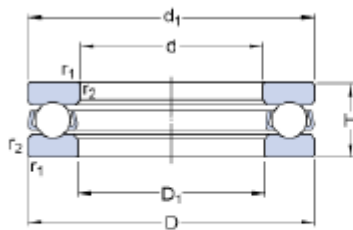
Se verifica entonces que la carga axial Ny aplicada es menor a la carga crítica al pandeo por lo que la estructura planteada no presenta problemas de resistencia mecánica.

### Selección del rodamiento axial.

Para el sistema de pivote de las aspas del aerogenerador se propone utilizar un rodamiento axial comúnmente conocidos como crapodinas. Para su selección se parte de las condiciones de montaje, ya que debe ir situado sobre el final de la estructura, donde el tubo tiene una sección de 30 [mm].

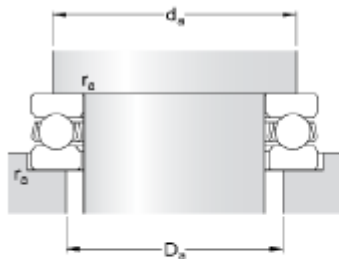
Dado que las condiciones de carga son leves, teniendo la cota interior de la crapodina se selecciona el producto del catálogo SKF que tenga menor diámetro exterior para optimizar el espacio y simplificar el montaje. A continuación, en la figura 7.5.2 se adjunta la ficha técnica del producto seleccionado:

#### Dimensiones



d	30	mm
D	47	mm
H	11	mm
$d_1$	≈ 47	mm
$D_1$	≈ 32	mm
$r_{1,2}$	min. 0.6	mm

#### Dimensiones de los resaltes



$d_a$	min. 40	mm
$D_a$	max. 37	mm
$r_a$	max. 0.6	mm

#### Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica	C	19	kN
Capacidad de carga estática básica	$C_0$	43	kN
Carga límite de fatiga	$P_u$	1.6	kN

**Figura 7.5.2. Ficha técnica del rodamiento axial.**

Como se puede apreciar en la figura 7.5.2, la capacidad de carga del rodamiento resulta mayor a la carga axial aplicada al mismo  $N_y$ , por lo que se comprueba que el rodamiento es apto para el caso de aplicación. El fabricante también brinda



datos útiles para los apoyos del mismo, que fueron tenidos en cuenta a la hora de dimensionar los apoyos tanto en el eje como en el alojamiento. Se fijará el rodamiento axial a los resaltes por medio de adhesivos anaeróbicos, de manera similar a la explicada para el caso del cubo de los álabes y el eje. El producto seleccionado para este fin es el adhesivo 638 de la firma LOCTITE.

## **7.6 Potencia del conjunto de generación.**

Como resultado de todo el proceso de diseño y selección de componentes para el armado del conjunto, podemos establecer el valor de la potencia a la salida del generador de imanes permanentes, valor que resulta útil para el sistema de regulación de la carga del banco de baterías. Este valor se obtiene de la ecuación 7.6.1.

$$Pot_{gen} = Pot_{aero} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{gen} = 122,44 \cdot 0,96 \cdot 0,85 = 99,91[W]$$

### **Ecuación 7.6.1. Potencia de salida del generador.**

El rendimiento mecánico se calculó teniendo en cuenta la eficiencia del reductor y el roce en los rodamientos. El rendimiento del generador se obtuvo del catálogo del mismo.

## **7.7 Regulación de energía**

Para la regulación de la carga y descarga del banco de baterías se seleccionó un equipo de alto rendimiento especializado para la aplicación de la firma MORNIGNSTAR. Este dispositivo protege al banco de baterías ante sobre-cargas y sobre-descargas profundas, prolongando su vida útil.

El controlador tiene bajo costo, alta confiabilidad, posee protecciones electrónicas completas, es fácil de usar, proporciona control e información de la batería, realiza una carga más eficiente de la batería, calidad acorde a normas internacionales y posee control automático de iluminación. Las especificaciones

y parámetros de funcionamiento se pueden apreciar a continuación en la figura 7.7.1.

<b>INFORMACIÓN TÉCNICA</b>			
<b>CAPACIDADES NOMINALES: (TODOS A 12 VOLTIOS)</b>			
SHS-6	100 W ó 6 A PARA EL SISTEMA DE CARGA SOLAR Y LA CARGA		
SHS-10	170 W ó 10 A PARA EL SISTEMA DE CARGA SOLAR Y LA CARGA		
SHS NIGHT LIGHT-6	100 VATIOS O 6 AMPERIOS PARA SOLAR Y LA LUZ		
SHS NIGHT LIGHT-10	170 VATIOS O 10 AMPERIOS POR SOLAR Y LA LUZ		
• Punto de regulación	14.3 V	• Indicaciones de los LED	Verde: en carga Niveles de batería: verde, amarillo y rojo Rojo: advertencia de bajo voltaje y desconexión Los 3 LED destellando — indicación de errores
• Desconexión por bajo voltaje	11.5 V	• Terminales	Para tamaños de cable de hasta 4 mm <sup>2</sup>
• Reconexión por bajo voltaje	12.6 V	• Dimensiones	15.1 x 6.6 x 3.6 cm
• Tipo de carga	PWM Serie (modulación de ancho de pulso) 4 etapas: En bruto, PWM, por incremento o "Boost" y flotante Carga compensada en temperatura	• Peso	113 g
• Protecciones electrónicas	Cortocircuito y exceso de corriente — sistema de carga solar y carga Polaridad inversa — en sistema de carga solar, en la carga y en la batería Corriente inversa por la noche Alto voltaje — en la carga Rayos — en sistema solar, en la carga y en la batería	• Consumo propio	8 mA máximo
• Tropicalización	Placa de circuito — recubrimiento según norma Terminales — protegidos contra corrosión	• Temperatura	-25°C a +50°C
		• Humedad	100% sin condensación
		• Encapsulado	IP 22
		• Cumple con normas de	CE, Banco Mundial

**Figura 7.7.1. Características del regulador.**

El equipo seleccionado para este fin es el SHS-10, con potencia nominal de 170 [W], para prever situaciones donde la velocidad del viento sea superior a la de diseño, y en consecuencia se genere más potencia que la calculada anteriormente.



### **Conclusión:**

En la realización de este trabajo nos encontramos con muchos problemas y dificultades relacionados con problemas de ingeniería. Resolver algunos de ellos fue sencillo ya que, gracias a la formación recibida durante nuestros estudios, se contaba con las herramientas y se conocía la forma correcta de abordar el problema. Al no tener los conocimientos para resolver el resto de los problemas, la primera reacción es pensar que no es un problema de ingeniería o que no corresponde a las incumbencias de la especialidad mecánica; pero después de consultar material al respecto e interiorizarnos en el tema a solucionar se pudieron resolver estas cuestiones. Esto demuestra que en la formación no sólo aprendemos a solucionar problemas específicos de algunas áreas de la ingeniería, sino que también se “aprende a aprender”, para que en el ámbito profesional resulte fácil adaptarse a cualquier rol y área en el que pueda desarrollarse un ingeniero.

Relacionando la experiencia de este trabajo final con el desempeño profesional, fue muy útil ver todos los obstáculos que aparecen al encarar un proyecto desde cero. Se tuvo que desglosar el problema en partes más pequeñas para poder resolverlas de manera individual, como se hace con cualquier proyecto de mediana o gran complejidad. Luego hubo que integrar todas las partes en un sistema, realizando las correcciones necesarias para que este funcione como debe. También se puede apreciar la evolución que sufre cualquier proyecto desde su inicio hasta su fin, haciendo modificaciones en el proceso para acercarse al resultado final, el cuál puede distar de lo que se esperaba en un principio; y ser incluso mejor o más simple.

Desde lo personal, la experiencia fue totalmente positiva, ya que algo que parecía muy complejo desde lo técnico se pudo resolver sin problemas llegando a un resultado que creemos bastante acercado a la realidad. Este trabajo implica el cierre de un ciclo y el comienzo de otro. Creemos que fue una buena formación para encarar la vida profesional con más herramientas que, de no haberlo realizado, hoy por hoy no tendríamos.





## **Bibliografía:**

- [1] Fernández Diez P. Energía Eólica, Universidad de Cantabria, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, 1/7/1993.
- [2] Consejo Mundial de la Energía Eólica <http://www.gwec.net/>
- [3] Wikipedia, energía eólica  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_e%C3%B3lica](http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica)
- [4] Wikipedia, energía eólica en Argentina  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_e%C3%B3lica\\_en\\_Argentina](http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica_en_Argentina)
- [5] Ley Nacional 25019 y 26190 sobre energías renovables  
<http://infoleg.mecon.gov.ar/>
- [6] Resolución MinCyT N° 398/10 sobre energías renovables  
<http://www.agencia.mincyt.gob.ar/>
- [7] ABB. Cuaderno de Aplicaciones Técnicas N° 12. Plantas Eólicas. (2012).
- [8] Manwell J. F, McGowam J. G., Rogers A. L. Wind Energy Explained, Theory, Design and application. (2009)
- [9] Wikipedia, Distribución de Weibull  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n\\_de\\_Weibull](http://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_de_Weibull)
- [10] Palacio L. Cálculo de los Parámetros de la Distribución de Weibull, (2011)
- [11] ABB. Cuaderno de Aplicaciones Técnicas N° 12. Plantas Eólicas. (2012).
- [12] Villanueva Iván. S. Análisis Dinámico de las P alas (Ehecamani) de un Aerogenerador en un Túnel de Viento, 28 de octubre del 2010.
- [13] Medina Noguerón R. Cálculo y Diseño de la Pala (Ehecamani) de un aerogenerador. Enero de 2011.
- [14] González-Longatt F. Perfiles Aerodinámicos Empleados en Turbinas de



- Viento: Introducción para no cultos, Reporte de investigación. Enero de 2007.
- [15] Carantoña A.J.O. Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles Empleados en Aerogeneradores de Baja Potencia. 2009.
- [16] Migliore P., Oerlemans S. Wind Tunnel Aeroacoustic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines. The National Renewable Energy Laboratory. Diciembre de 2003.
- [17] Guigére P., Selig M.S. New Airfoils for Small Horizontal Axis Wind Turbines. University of Illinois. Mayo de 1998.
- [18] Guigére P., Broeren A.P., Selig M.S., Guglielmo J.J. Low Speed Airfoil Data, Volume 1. University of Illinois. Junio de 1995.
- [19] Perfiles aerodinámicos. Base de datos, <http://airfoiltools.com>
- [20] Perfiles aerodinámicos. Base de datos, <http://www.worldofkrauss.com>
- [21] Glauert H. The Elements of Airfoil and Airscrew Theory, Second Edition. 1947
- [22] Wilson R.E., Lissaman P.B.S, Walker S.N. Aerodynamic Performance of Wind Turbines. Junio de 1976.
- [23] B. Parra Díaz. Estudio comparativo de los Sistemas de Calentamiento de los Moldes para Palas de Aerogeneradores. Junio de 2006.
- [24] Cátedra de Propiedades Estructurales II. Materiales Compuestos, apunte de cátedra. Universidad Nacional de Mar del Plata. 2013
- [25] Wind Turbine Blade Structural Engineering. Boletín técnico de Gurit.
- [26] International Electrotechnical Commission. IEC61400-2:2006 "Design Requirements for Small Wind Turbines". Norma técnica de la IEC. 2006



## Anexo I.



**PROGRAM** Diseño

**IMPLICIT NONE**

real(8), allocatable :: rq(:,:),ma(:,:),q(:),pot(:)

real(8) :: l,r,v,z,c1,cd,rho,dr,h,c,b,fi,pi,a,nmax,potmax,suma,n,g,trs

integer :: e,j,inter,m,k

! SECCION EJECUTABLE

**OPEN**(UNIT=2,FILE='grafico.dat',STATUS='Replace')

**OPEN**(UNIT=5,FILE='datos.dat',STATUS='Replace')

pi=3.1415

v=6 !m/s

rho=1.19 !kg/m3

r=0.75!m

z=3

g=0.01

h=0.001

inter= 75!cantidad intervalos

**allocate** (rq(20000000,6),ma(20000000,4),q(6),pot(20000000))

q(1)=0

q(2)=0

l=r/inter

dr=l

e=1

c1=1.46

cd=0.01598

fi=1

a=0

n=6.60

j=1

ma=0

m=2

pot(1)=0



```
do while (n<6.65)
do while (dr<=r)
do while (a<3)
    c=fc(dr,a,fi,z,v,c1,cd,pi)
    b=fb(v,fi,c,c1,cd,pi,dr)
    fi=ffi(v,a,dr,n,b,pi)
    q(1)=dq(rho,dr,l,a,v,b,pi)
    ma(e,1)=q(1)
    if (a>0.5) then
        if (ma(e,1)>ma(e-1,1)) then
            q(2)=(ma(e,1)+ma(e-1,1))*0.5
            q(3)=fi
            q(4)=c
            q(5)=a
            q(6)=b
        end if
    end if
    a=a+h
    e=e+1
end do
rq(j,1)=dr
rq(j,2)=q(3) !fi
rq(j,3)=q(4) !c
rq(j,4)=q(5) !a
rq(j,5)=q(6) !b
rq(j,6)=q(2) !dq

write(5,'(7F20.15)',advance='yes')n,rq(j,1),rq(j,2),rq(j,3),rq(j,4),rq(j,5),rq(j,6)
suma=rq(j,6)+suma
dr=dr+l
j=j+1
ma(:,:)=0
```



```
e=1
a=0
fi=1
q(:)=0
end do
pot(m)=suma*n*2*pi
if (pot(m)>pot(m-1)) then
  nmax=n
  potmax=0.5*(pot(m)+pot(m-1))
end if
write(*,*) n,suma,pot(m)
trs=r*n*2*pi/v
write(2,'(3F20.5)',advance='yes') trs,pot(m),n
n=n+g
k=1
suma=0
dr=l
end do
CALL SYSTEM ("gnuplot -persist script.p")
```

## CONTAINS

! SUBROUTINAS Y FUNCIONES INTERNAS

**Function** fa(pi,r,fi,z,c,c1,cd)

real(8)::pi,r,fi,z,c,c1,cd,fa

fa=v/(((8\*pi\*r\*(sin(fi))\*\*2)/(z\*c\*(c1\*cos(fi)+cd\*sin(fi))))+1)

**end function**

**Function** fc(r,a,fi,z,v,c1,cd,pi)

real (8)::r,a,fi,z,v,c1,cd,fc,pi

fc=(8\*Pi\*r\*a\*(sin(fi))\*\*2)/(z\*(v-a)\*(c1\*cos(fi)+cd\*sin(fi)))

**end function**



**Function** fb(v,fi,c,c1,cd,pi,r)

real(8)::v,fi,c,c1,cd,fb,pi,r

fb=(v/((((8\*r\*pi\*(sin(fi))\*\*2)/(z\*c\*(c1\*sin(fi)-  
cd\*cos(fi))))+((c1\*cos(fi)+cd\*sin(fi))/(c1\*sin(fi)-cd\*cos(fi))))))

**end function**

**Function** ffi(v,a,r,n,b,pi)

real(8)::v,a,r,b,ffi,pi,n

ffi=atan((v-a)/(2\*pi\*r\*n+b))

**end function**

**Function** dq(rho,r,dr,a,v,b,pi)

real(8)::rho,r,dr,a,v,b,pi,dq

dq=4\*rho\*pi\*r\*\*2\*(v-a)\*b\*dr

**end function**

**Function** dT(rho,z,c,v0,c1,cd,fi,dr)

real(8)::rho,z,c,v0,c1,cd,fi,dr,dt

dt=(0.5\*rho\*z\*c\*v0\*\*2\*(c1\*cos(fi)+cd\*sin(fi)\*dr))

**end function**

**Function** fdn(ma,TRS,v,r)

real(8)::TRS,v,r,ma,fdn

fdn=ma\*(TRS\*v)/r

**end function**

**END PROGRAM**

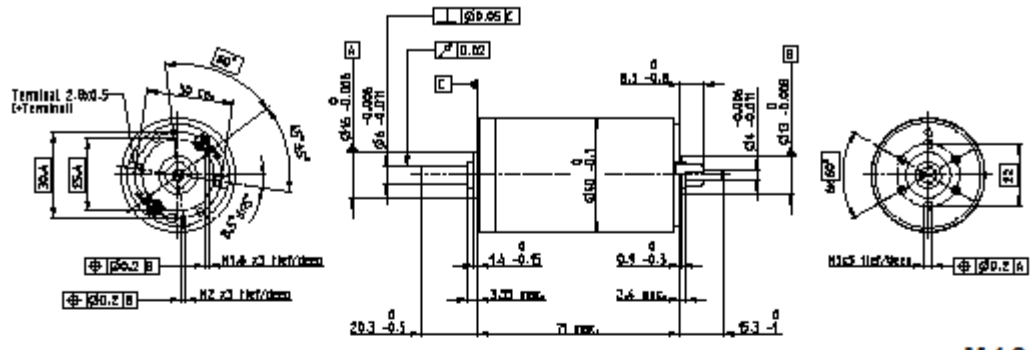


## Anexo II.



maxon DC motor

## RE 40 Ø40 mm, Graphite Brushes, 150 Watt



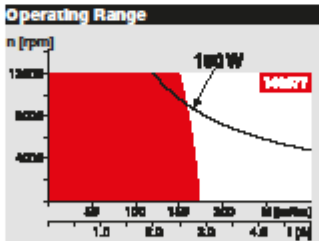
M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers									
148800	148867	148877	218006	218009	218010	218011	218012	218013	218014

Motor Data		148800	148867	148877	218006	218009	218010	218011	218012	218013	218014
Values of nominal voltage											
1 Nominal voltage	V	12	24	48	48	48	48	48	48	48	48
2 No load speed	rpm	6920	7580	7590	6420	5560	3330	2090	2130	1720	1420
3 No load current	mA	241	137	68.6	53.7	43.7	21.9	16.6	12.5	9.66	7.76
4 Nominal speed	rpm	6380	6940	7000	5810	4930	2710	2000	1510	1080	781
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	94.9	177	187	196	189	189	190	192	192	190
6 Nominal current (max. continuous current)	A	6	6	3.17	2.66	2.23	1.4	1.13	0.909	0.73	0.6
7 Stall torque	mNm	1720	2420	2560	2040	1620	1020	814	655	528	424
8 Stall current	A	105	80.2	42.4	28.6	19.7	7.43	4.79	3.06	1.97	1.32
9 Max. efficiency	%	88	91	92	91	91	89	89	88	86	85
Characteristics											
10 Terminal resistance	Ω	0.115	0.299	1.13	1.08	2.44	6.46	10	15.7	24.4	36.3
11 Terminal inductance	mH	0.024	0.062	0.33	0.46	0.613	1.7	2.62	4.14	6.41	9.32
12 Torque constant	mNm/A	16.4	30.2	60.3	71.3	82.2	137	170	214	266	321
13 Speed constant	rpm/V	581	317	158	134	110	60.7	56.2	44.7	35.9	29.8
14 Speed / torque gradient	rpm/mNm	4.05	3.14	2.97	3.16	3.45	3.29	3.31	3.27	3.29	3.37
15 Mechanical time constant	ms	5.89	4.67	4.28	4.2	4.19	4.16	4.15	4.15	4.15	4.16
16 Rotor inertia	gcm <sup>2</sup>	139	142	137	127	116	121	120	121	120	118

Specifications	
<b>Thermal data</b>	
17 Thermal resistance housing-ambient	4.7 K/W
18 Thermal resistance winding-housing	1.9 K/W
19 Thermal time constant winding	41.5 s
20 Thermal time constant motor	809 s
21 Ambient temperature	-30...+100°C
22 Max. winding temperature	+155°C
<b>Mechanical data (ball bearings)</b>	
23 Max. speed	12000 rpm
24 Axial play	0.05 - 0.15 mm
25 Radial play	0.025 mm
26 Max. axial load (dynamic)	5.6 N
27 Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	110 N
28 Max. radial load, 5 mm from flange	28 N



**Comments**

Continuous operation  
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient. = Thermal limit.

Short term operation  
The motor may be briefly overloaded (recuring).

— Assigned power rating

Other specifications	
29 Number of pole pairs	1
30 Number of commutator segments	13
31 Weight of motor	480 g
Values listed in the table are nominal. Explanation of the figures on page 151.	
<b>Option</b>	
Preloaded ball bearings	
* Industrial version with radial shaft seal ring (resulting in increased no load current). IP54 protection only if mounted on brush side, in compliance with maxon modular system.	

**maxon Modular System**

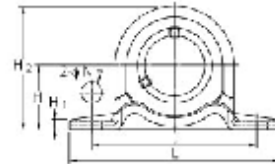
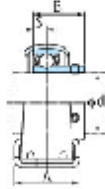
<ul style="list-style-type: none"> <li>Planetary Gearhead Ø42 mm 3 - 15 Nm Page 349</li> <li>Planetary Gearhead Ø52 mm 4 - 30 Nm Page 354</li> </ul>		<p><b>Recommended Electronics:</b> Page 24</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ESC0N Mod. 50/5 417</li> <li>ESC0N 50/5 418</li> <li>ESC0N 70/10 418</li> <li>EPOS2 24/5 425</li> <li>EPOS2 50/5 425</li> <li>EPOS2 70/10 425</li> <li>EPOS2 P 24/5 428</li> <li>EPOS4 Module 50/8 431</li> <li>EPOS4 Comp. 50/8 CAN 431</li> <li>MAXPOS 50/5 435</li> </ul>	<p><b>Overview on page 20-27</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Encoder MR 256 - 1024 CPT, 3 channels Page 393</li> <li>Encoder HEDL 5540 500 CPT, 3 channels Page 399/402</li> <li>Brake AB 28 24 VDC 0.4 Nm Page 446</li> <li>Industrial Version IP54* Encoder HEDL 0140 Page 405</li> <li>Brake AB 28 Page 447</li> <li>End cap Page 451</li> </ul>
--	--	--	--



## Anexo III.



SBPP205



Specifications	
Housing Number	PP205
Bearing Number	SB205
Shaft Size	25 mm
Bolt Size	M10 3/8 in
Weight	0.28 kg 0.62 lb
Locking Style	Set Screw Locking

Dimensions	
H	28.6 mm 1-1/8 in
L	108 mm 4-1/4 in
A	32 mm 1-1/4 in
J	86 mm 3-25/64 in
H	11.5 mm 29/64 in
H1	4 mm 5/32 in
H2	56.6 mm 2-7/32 in
B	27 mm 1.063 in
S	7.5 mm 0.295 in

Basic Load Rating	
Cr	14.0 kN 3147 lbf
Cor	7.85 kN 1765 lbf
Factor fo	13.9



## Anexo IV.



**m**ecanizaciones,  
**m**ontajes y  
**m**antenimientos, S.L.

DIRECCION POSTAL:  
48960 - Galdakao  
FABRICA Y OFICINAS:  
Barrio Bekea, s/nº, Pabellón 6K  
GALDAKAO - BIZKAIA  
Teléfono: 944 522 195 ; Fax: 944 520 003  
E-mail: [reductores@mmmantenimiento.com](mailto:reductores@mmmantenimiento.com)  
Web: [www.mmmantenimiento.com](http://www.mmmantenimiento.com)

**motorreductores  
y reductores  
E / EB**



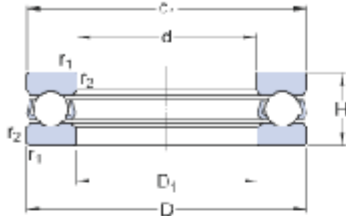
**transmisión industrial**



## Anexo V.

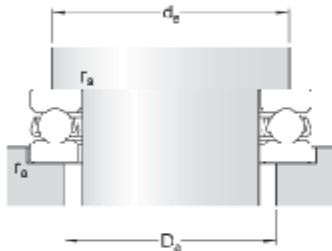
## 51106

### Dimensiones



d	30	mm
D	47	mm
H	11	mm
d <sub>1</sub>	≈ 47	mm
D <sub>1</sub>	≈ 32	mm
r <sub>1,2</sub>	min. 0.6	mm

### Dimensiones de los resaltes



d <sub>a</sub>	min. 40	mm
D <sub>a</sub>	max. 37	mm
r <sub>a</sub>	max. 0.6	mm

### Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica	C	19	kN
Capacidad de carga estática básica	C <sub>0</sub>	43	kN
Carga límite de fatiga	P <sub>u</sub>	1.6	kN
Velocidad de referencia		6000	r/min
Velocidad límite		8500	r/min
Factor de carga mínima	A	0.0096	

### Masa

Rodamiento de masa (incluida la arandela de asiento, cuando corresponde)	0.063	kg
--	-------	----



## Anexo VI.



Hoja de datos de producto

**OSRAM**

### PARATHOM CLASSIC A 60 ADV 9 W/827 E27 FR

PARATHOM advanced CLASSIC A | Lámparas LED regulables, forma de bombilla clásica



#### Áreas de aplicación

- Aplicaciones domésticas
- Iluminación general
- Aplicaciones en exteriores solo en luminarias adecuadas

#### Beneficios del producto

- Poco consumo de energía
- Luz instantánea al 100 %, sin tiempo de calentamiento

#### Características del producto

- Buena calidad de luz; índice de reproducción cromática  $R_a \geq 80$ ; cromaticidad constante
- Elevada consistencia del color:  $< 6$  SDCM
- Regulable (con numerosos reguladores comunes, véase también [www.osram.com/dim](http://www.osram.com/dim))
- Lámparas libres de mercurio

