ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

Cargador de baterias para aerogenerador Savonius helicoidal

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica Industrial en Electrónica Industrial

AUTOR: Vicente Pichardo Calbet
DIRECTOR: Hugo Valderrama Blavi

Junio de 2010

Índice

1 Memoria descriptiva....1
1.1 Objeto del proyecto....2
1.2 Alcance....2
1.3 Teoría general aerogeneradores....3
1.3.1 Aerogeneradores de eje vertical....3
1.3.2 Conceptos teóricos generales....9
1.3.3 Características del emplazamiento y meteorología....12
1.3.4 Sistemas de corriente continua....14
1.3.5 Sistemas de corriente alterna....17
1.3.5.1 Generadores síncronos....17
1.3.5.2 Generadores asíncronos....20
1.4 Referencias bibliográficas....21
1.4.1 Bibliografía....21
1.5 Análisis de soluciones y resultados finales....22
1.5.1 Construcción de la hélice....22
1.5.2 Elección del generador....25
1.5.3 El punto de máxima potencia en un motor de continua....26
1.5.4 Conexión mediante etapa de adaptación....27
1.5.5 Materiales utilizados para la fabricación de las palas....28
1.5.6 Sistemas de transmisión....30
1.5.7 Diseño del convertidor SEPIC....32
1.5.8 Control en modo deslizamiento....36
1.5.9 Diseño del controlador MPPT....37
1.5.10 Algoritmo de control del MPPT....37
***1.6* Descripción del montaje del prototipo**....40
1.6.1 Elaboración del chasis de la hélice....40
1.6.2 Enfibrado de la hélice....41
1.6.3 Lijado y pintado....42
1.6.4 Montaje final de la hélice en la estructura de soporte....42
1.6.5 Elaboración y montaje de las placas de circuito impreso....44
1.6.6 Montaje de la batería....46
1.7 Puesta en marcha y funcionamiento....47
1.8 Planificación y programación....47
1.9 Orden de prioridad entre los documentos....47

2 Memoria de cálculo....49
2.1 Potencia teórica producida por el prototipo....50
2.2 Cálculos para el sensor de tensión....51
2.3 Cálculos para el sensor de corriente....52
2.4 Perfil de carga de la batería....53
2.5 Medidas experimentales obtenidas con el convertidor SEPIC....55
2.6 Medidas experimentales tomadas con el controlador MPPT....62
3 Planos y esquemas....64
3.1 Situación....65
3.2 Emplazamiento....66
3.3 Planta, alzado y perfil del prototipo....67
3.4 Esquema del convertidor SEPIC....68
3.5 Esquema del controlador MPPT....69
4 Presupuesto....70
4.1 Presupuesto....71
4.1.1 Capitulo 1 Aerogenerador de eje vertical....71
4.1.2 Capitulo 2 Convertidor SEPIC....72
4.1.3 Capitulo 3 Controlador MPPT....74
4.2 Precios unitarios....76
4.2.1 Capitulo 1 Aerogenerador de eje vertical....76
4.2.2 Capitulo 2 Convertidor SEPIC....77
4.2.3 Capitulo 3 Controlador MPPT....79
4.3 Resumen del presupuesto....81
5 Pliego de condiciones....82
5.1 Disposiciones preeliminares....83
5.2 Disposiciones legales y normas aplicadas....84
5.3 Medidas de prevención y protección....85
5.4 Condicionantes de materiales y equipos....87
5.5 Ejecución del montaje del prototipo....88
5.6 Disposiciones finales....90
6 Anexos....91
6.1 Código en C del algoritmo del MPPT para el PIC18F2220....92

Índice de Figuras

Figura 1.3.1 Aerogenerador Darrieus de dos palas....4
Figura 1.3.2 Aerogenerador Darrieus de tres palas con Savonius de arranque....5
Figura 1.3.3 Aerogenerador tipo Giromill....6
Figura 1.3.4 Aerogenerador tipo Savonius....6
Figura 1.3.5 Sistema de fuerzas en un rotor del tipo Savonius....7
Figura 1.3.6 Aerogenerador Savonius triple....7
Figura 1.3.7 Detalle de una turbina Savonius Helicoidal....8
Figura 1.3.8 Rendimiento respecto al limite de Betz....10
Figura 1.3.9 Mapa eólico Europeo....13
Figura 1.3.10 Detalle del principio de funcionamiento de un motor DC....14
Figura 1.3.11 Generador síncrono conectado a una red DC....15
Figura 1.3.12 Generador de imán permanente conectado a una red DC....15
Figura 1.3.13 Rotor del alternador E-112....16
Figura 1.3.14 Generador síncrono conectado a red....17
Figura 1.3.15 Generador síncrono con etapa rectificadora e inversora....18
Figura 1.3.16 Generador síncrono de múltiples polos con etapa de rectificación e inversión....19
Figura 1.3.17 Generador asíncrono conectado a red, mediante un ciclo-conversor.... 20
Figura 1.5.1 Aerogenerador Savonius....22
Figura 1.5.2 Detalle del mecanismo de brazo telescópico para el rotor Giromill....23
Figura 1.5.3 Algunos de los perfiles NACA utilizados en aeronáutica....23
Figura 1.5.4 Angulo de ataque de un perfil alar....24
Figura 1.5.5 Curva característica Par-Velocidad de un motor de corriente continua...26
Figura 1.5.6 Curvas características Par-Velocidad para diferentes cargas....26
Figura 1.5.7 Conexión mediante etapa de adaptación....27
Figura 1.5.8 Representación de un LFR por H.Valderrama-Blavi en el articulo AC-LFR concept applied to modular photovoltaic power chains....27
Figura 1.5.9 Soluciones constructivas para la fabricación de las palas....28
Figura 1.5.10 Estructura típica del convertidor SEPIC....32
Figura 1.5.11 Circuito equivalente durante Ton....33
Figura 1.5.12 Circuito equivalente durante Toff....34
Figura 1.5.13 Graficas de tensión y corriente en la bobina....35
Figura 1.5.14 Diagrama de bloques de un convertidor SEPIC controlado en modo deslizante por V. García Pérez en su proyecto final de carrera....36
Figura 1.5.15 Características T-n para diferentes puntos de trabajo....38
Figura 1.5.16 Organigrama del código fuente del algoritmo del MPPT....38
Figura 1.5.17 Principio de funcionamiento del algoritmo MPPT....39
Figura 1.5.18 Cambio de velocidad en el eje del rotor....39

Figura 1.6.1 Chasis de una hélice Savonius helicoidal de siete segmentos.....41
Figura 1.6.2 Resultado final del montaje de la hélice Savonius helicoidal.....43
Figura 1.6.3 Layout de la placa del convertidor.....44
Figura 1.6.4 Layout de la placa del controlador.....44
Figura 1.6.5 Placa del convertidor SEPIC.....45
Figura 1.6.6 Placa del controlador MPPT.....45
Figura 1.6.7 Detalle de la sujeción de la batería.....46
Figura 1.6.8 Resultado final de la conexión e instalación de los equipos.....46
Figura 2.2.1 Esquema del sensor de tensión.....50
Figura 2.3.1 Esquema del sensor de corriente.....51
Figura 2.4.1 Perfil de carga IUi de una batería de 12 V, 7 Ah.....53
Figura 2.5.1 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 50% y Vin = 10 V.....54
Figura 2.5.2 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 60% y Vin = 10 V.....55
Figura 2.5.3 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 70% y Vin = 10 V.....56
Figura 2.5.4 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 80% y Vin = 10 V.....57
Figura 2.5.5 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 40% y Vin = 16 V.....57
Figura 2.5.6 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 30% y Vin = 16 V.....59
Figura 2.5.7 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 20% y Vin = 16 V.....60
Figura 2.6.1 Medidas experimentales obtenidas con Vin=15 V y Iin= 1 A.....61
Figura 2.6.2 Medidas experimentales obtenidas con Vin=11.2 V y Iin= 0.75 A.....62
Figura 2.6.3 Medidas experimentales obtenidas con Vin=7.5 V y Iin= 0.5 A.....62
Figura 2.6.4 Medidas experimentales obtenidas con Vin=3.75 V y Iin= 0.25 A.....63
Figura 2.6.5 Medidas experimentales obtenidas con Vin=0.3 V y Iin= 0.02 A.....63

Índice de Tablas

1.3.1 Características de los aerogeneradores de eje vertical.....3
1.3.2 Velocidades medias mensuales y anual del viento en m/s.....12
1.5.1 Ventajas e inconvenientes de los sistemas de transmisión por correa.....31
1.5.2 Ventajas e inconvenientes de los sistemas de transmisión por cadena.....31
1.5.3 Ventajas e inconvenientes de los sistemas de transmisión por engranajes.....31
2.2.1 Potencias teóricas producidas por el prototipo de aerogenerador Savonius helicoidal.....50
2.6.1 Tabla de valores de tensión y corrientes de entrada.....61

Abreviaturas

VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
PCB	Printed Circuit Board
MPPT	Maximun Power Point Tracker
LFR	Lost Free Resistor
TSR	Tip Speed Ratio
N.D	No dispone
D	Dutty Cycle
SC	Short Circuit
OC	Open Circuit
GPS	Golbal Positioning System
PMP	Punto de Máxima Potencia
POPI	Power Output = Power Input
PMM	Premanent Magnet Motor
PWM	Pulse Wide Modulation

Agradecimientos

En primer lugar a mis compañeros Josep Espelta, Laura Albiol y a todos los miembros del GAEI por su buena voluntad y colaboración con sus conocimientos.

A mi director de proyecto Dr. Hugo Valderrama Blavi, por haberme guiado durante todo el proyecto y sobretodo, por brindarme la oportunidad de desarrollar este interesante proyecto.

Por ultimo agradecer a mi familia en especial a mis padres que me han transmitido toda la energía y moral necesaria para poder terminar con éxito mis estudios universitarios.

A mi tío Juan José Calbet por despertar mi vocación de electrónico en mi infancia y que posteriormente me hizo decidirme para que eligiera estudiar esta carrera.

A todas las personas que han hecho posible la realización de este proyecto.

Gracias a todos.

Resumen

Este proyecto consiste en la realización de un cargador de baterías para aerogenerador Savonius helicoidal, con seguimiento del punto de máxima potencia. La adaptación entre el generador y la batería se hará mediante un convertidor SEPIC controlado en modo deslizante. De esta forma se obtiene un régimen deslizante de la corriente del inductor de entrada del convertidor. La referencia de este lazo proviene del algoritmo de control implementado con un microcontrolador.

El algoritmo MPPT, se encarga de capturar periódicamente la tensión y la corriente del generador para calcular la potencia entregada. En función de la derivada de la potencia, el algoritmo genera una referencia de corriente que en régimen estacionario forzará a que el punto de trabajo del generador este oscilando indefinidamente entorno al punto de máxima potencia.

El cargador de baterías esta diseñado para aplicaciones portátiles de baja potencia como por ejemplo: PDA's, teléfonos celulares o cámaras de fotos.

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

1 MEMORIA DESCRIPTIVA

Cargador de baterías para aerogenerador Savonius helicoidal

AUTOR: Vicente Pichardo Calbet
DIRECTOR: Hugo Valderrama Blavi

Junio de 2010

1.1 Objeto del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo, el diseño e instalación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical del tipo Savonius helicoidal para el aprovechamiento de la energía eólica.

El montaje del prototipo para realizar las medidas y estudio se efectuará en la azotea del edificio de la planta piloto del **Grup d'Automàtica i Electrónica Industrial** (GAEI) de la Universitat Rovira i Virgili.

Para la generación de energía eléctrica, se ha acoplado un motor de continua a la hélice del aerogenerador capaz de producir hasta 8 W de potencia. La potencia producida se utilizara para realizar la carga de una batería de 12 V y 7 Ah.

Para conseguir el mayor rendimiento del motor en cada instante, se ha diseñado un convertidor del tipo SEPIC que funciona en topología reductora-elevadora y que se controlará, para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia MPPT.

1.2 Alcance

Para estimular el aprovechamiento de las energías renovables en aplicaciones de baja potencia, se ha diseñado un aerogenerador de eje vertical experimental que posee las ventajas que se citarán a continuación.

Sus características morfológicas le permiten funcionar con corrientes de aire turbulento, propios de un entorno urbano, además de no requerir ningún sistema de orientación de las palas.

Otra gran ventaja de este prototipo es que posee una velocidad de corte baja, es capaz de producir energía a velocidades del viento de entre 3 y 5 m/s.

En la actualidad la instalación de este tipo de máquinas, en China, Alemania y Holanda permite satisfacer consumos relacionados con operaciones viales como por ejemplo: iluminación de sectores viales peligrosos y muy aislados, iluminación de carteles publicitarios, o incluso en combinación con otros sistemas como paneles fotovoltaicos, para conseguir la iluminación de pequeñas casas situadas en zonas de difícil acceso sin necesidad de una red eléctrica convencional.

Además en el futuro se pretende diseñar un prototipo de aerogenerador con las mismas dimensiones pero con un diseño con alas plegables hechas con tela de nylon, como se acostumbra a fabricar los paraguas, que podría ser utilizado por alpinistas o cuerpos militares para conseguir recargar las baterías de sus transmisores, linternas o localizadores GPS cuando se encuentran aislados.

1.3 Teoría general sobre aerogeneradores.

1.3.1 Aerogeneradores de eje vertical.

Existen muchos modelos de aerogeneradores de eje vertical o VAWT[1] interesantes en el mercado. La principal ventaja de estos es que pueden ser instalados en las azoteas de los edificios o en lugares urbanos sin peligro por sus bajas emisiones de ruido.

Además, no necesitan una gran altura del mástil que los sostiene. Esta ventaja permite situar el centro de gravedad más cerca del suelo y en consecuencia, su construcción resulta menos costosa.

No obstante, todos los diseños existentes, podemos clasificarlos dentro de dos grandes grupos según su principio de funcionamiento. En primer lugar Existen los del tipo Darrieus, que al igual que los aviones utilizan las fuerzas de sustentación o "lift" para funcionar, como se explicará más adelante. En segundo lugar, encontramos los del tipo Savonius, que aprovechan las fuerzas de arrastre o "drag" que usan para propulsarse en las embarcaciones de vela.

En la siguiente tabla se resumen las principales características de cada uno de los dos grupos.

	SAVONIUS	DARRIEUS
Velocidad de trabajo	Baja	Alta
Par de arranque	Alto	Bajo
Necesitan mecanismos de arranque	No	Si
W/m^2	0-500 W	5-500 kW
Emisiones de ruido	Bajas	Altas
Vibraciones mecánicas	Altas	Bajas

Tabla 1.3.1. Características de los aerogeneradores de eje vertical.

Como se puede observar los dos modelos son completamente diferentes, prácticamente contrarios. Sin embargo, la única característica común entre ambos grupos y principal ventaja de los aerogeneradores de tipo vertical es que, no requieren mecanismos de orientación.

En la navegación a vela diríamos que con un sistema de eje vertical estaríamos navegando siempre con "viento en popa", o con el viento a nuestro favor, mientras que un aerogenerador de eje horizontal ha de navegar "ciñendo", es decir, orientado en la dirección del viento, pero con sus palas inclinadas un cierto ángulo para que pueda girar.

A continuación, analizaremos algunos de los VAWT más conocidos y estudiaremos cuales son sus principales características constructivas y de funcionamiento.

[1] Vertical Axis Wind Turbine

Figura 1.3.1: Aerogenerador Darrieus de dos palas.

En primer término encontramos los aerogeneradores del tipo Darrieus, que debe su nombre al ingeniero francés Georges Jean Marie Darrieus, que patento el modelo en el 1931.

El modelo que se muestra en la figura 1.3.1 esta compuesto por dos palas en forma de "D", característica morfológica que lo distingue. Sin embargo, en la imagen de la figura 1.3.2 se puede observar una versión mejorada, con tres palas de este tipo y dos pequeñas Savonius que facilitan la puesta en marcha del tándem.

Las alas suelen estar fabricadas con chapa de acero por su buena flexibilidad, relación calidad-precio y resistencia a factores meteorológicos como sol, lluvia o granizo. Se han encontrado modelos experimentales hechos con láminas de madera, o incluso PVC (poli-cloruro de vinilo) que es un material muy ligero pero queda descartado su uso en un caso real, pues cualquier impacto lo destruiría por completo por su elevada fragilidad.

Su funcionamiento a velocidades elevadas es muy eficiente, del orden del 40%. Como se dijo antes, sin embargo, este diseño presenta un gran inconveniente, no es capaz de arrancar por si mismo, por eso necesita la ayuda de algún mecanismo complementario ya sea un pequeño motor eléctrico, u otro aerogenerador acoplado, como el del híbrido que se muestra en la imagen siguiente.

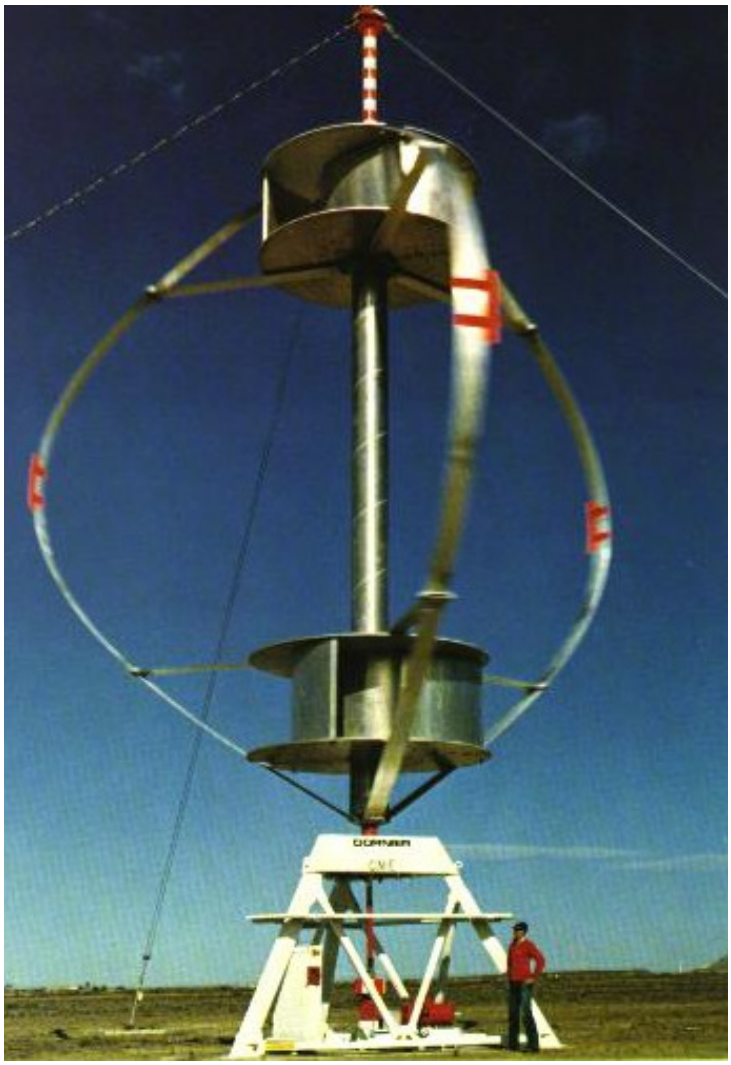


Figura 1.3.2: Aerogenerador Darrieus de tres palas con Savonius de arranque.

Otra variación de los rotores del tipo Darrieus son los denominados Giromill. A primera vista parece bastante sencillo de construir y además, permite realizar modificaciones tanto en la longitud de los brazos que sujetan las palas, como en el ángulo en que se sitúan estas con cierta facilidad.

Podemos encontrar modelos que se construyen con dos palas aunque también se pueden encontrar con tres, cinco o siete. Se acostumbran a escoger un numero impar de alas para conseguir un mejor equilibrio de masas y reducción de vibraciones mecánicas.

Las alas acostumbran a construirse con fibra de vidrio o chapa metálica y los perfiles de las mismas se diseñan teniendo en cuenta conceptos de aerodinámica propios de la ingeniería aeronáutica.

La única ventaja frente a los rotores Darrieus es que los Giromill no necesitan mecanismos para vencer el par de arranque y su velocidad de corte esta entre 9 y 10 m/s dependiendo del diseño, esto quiere decir que a partir de este valor empieza a producir energía.

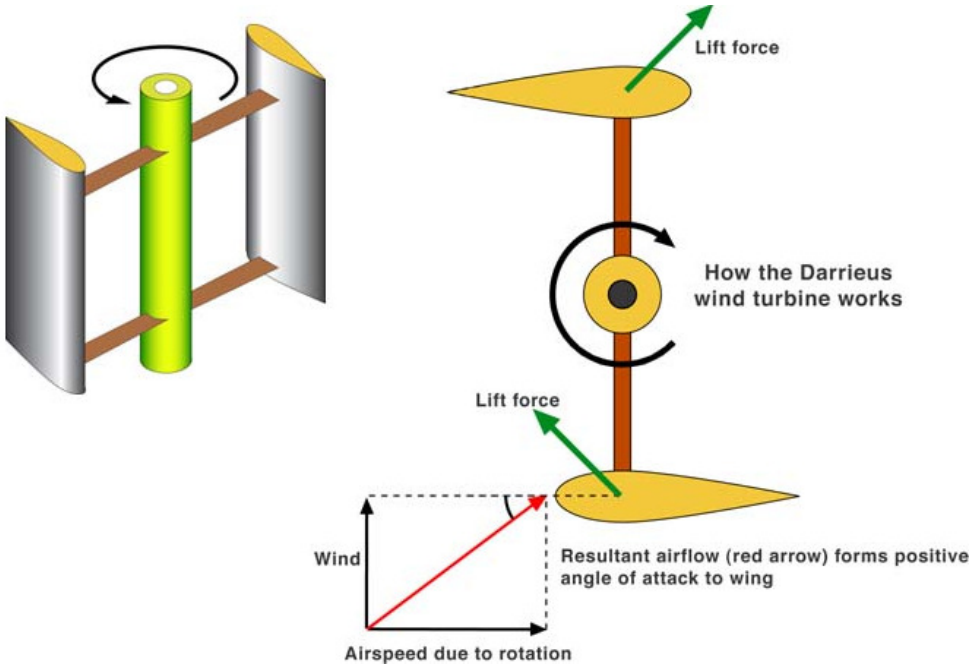


Figura 1.3.3. Aerogenerador tipo Giromill.

En segundo lugar aparecen los VAWT de tipo Savonius, que deben su nombre a su inventor Sigurd J. Savonius. Observándolos desde arriba la posición de sus palas tienen forma de "S".

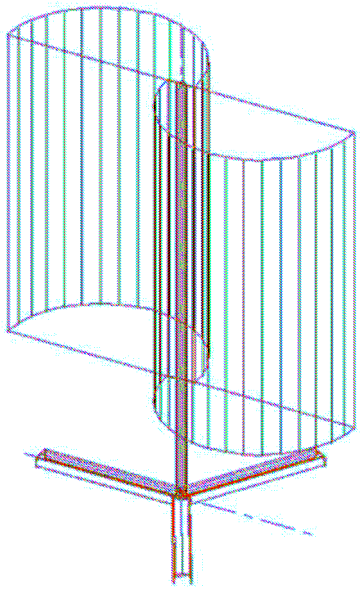


Figura 1.3.4. Boceto de una turbina del tipo Savonius.

Es sin duda la mas sencilla de construir, en su estructura más clásica consta de dos palas, aunque también existen variaciones como veremos más adelante. Es un diseño que proporciona un par de arranque bastante elevado y rendimientos respecto al limite de Betz del 30%.

El único inconveniente que presenta es que debido a la disposición de sus palas, aparece una oscilación en el giro que limita su eficiencia y que le impide trabajar en un margen de velocidades más amplio.

Este factor limitante se puede explicar fácilmente; cuando el rotor esta en funcionamiento siempre hay una pala que se sitúa en contra de la dirección y sentido del viento y otra que se encuentra orientada de cara.

Este fenómeno provoca la aparición de un sistema formado por la fuerza de empuje en cada una de las dos palas, gracias a que la resultante en uno de los extremos es mayor, la turbina puede girar. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la situación.

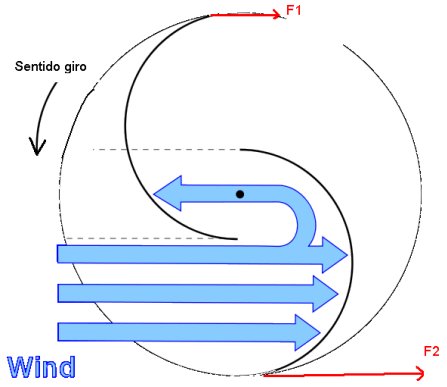


Figura 1.3.5: Sistema de fuerzas en un rotor del tipo Savonius.

Una combinación de varios rotores tipo Savonius en un mismo eje, como se muestra en la figura siguiente proporciona un par de giro más constante y mejora su rendimiento final.

Figura 1.3.6: Aerogenerador Savonius triple.

Con el fin de incrementar otro nivel en el diseño de hélices para aerogeneradores, la empresa finlandesa Windside ha concebido este novedoso modelo que, presenta un giro helicoidal que permite obtener un par de giro más uniforme a lo largo de toda la revolución. Así queda solventado el principal problema presentado por el rotor Savonius en su configuración más básica.

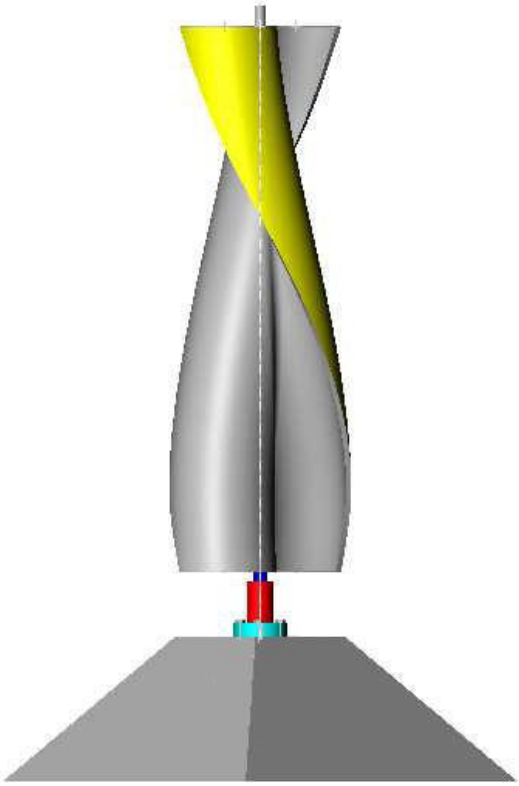


Figura 1.3.7. Detalle de una turbina Savonius Helicoidal.

Este tipo de hélices utiliza los principios de funcionamiento del aerogenerador Savonius, con la ventaja de que cada una de las caras realiza un giro de ciento ochenta grados a lo largo del eje, así la fuerza de empuje máxima no se pierde sino que se desplaza por la longitud del eje principal a medida que avanza en su revolución.

En los rotores Savonius la fuerza de empuje máxima solo se produce cuando la parte cóncava se encuentra situada de cara al viento, como en la figura 1.3.5.

El modelo presenta un par de arranque bueno y es capaz de trabajar a velocidades del viento bajas, es completamente omnidireccional y auto orientable. Se suele fabricar con chapa metálica, materiales derivados del PVC[2] o fibra de vidrio.

Actualmente hay varias empresas que los comercializan, para este diseño en concreto los modelos más parecidos encontrados en la web pertenecen al fabricante "Windside" cuya documentación técnica se puede consultar en su web HTTP://www.windside.com/technical.html y al fabricante "HelixWind" en la web http://www.helixwind.com/en/S322.php#s322specs.

[2] Poli cloruro de Vinilo.

1.3.2 Conceptos teóricos generales.

Energía obtenible del viento

La energía máxima teórica que puede ser extraída de una masa de aire en movimiento viene dada por la expresión siguiente:

$$Ec = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \qquad (1.3.1)$$

donde:

Ec = Energía cinética en Joules.
m = Flujo de aire en kg/s.
v = Velocidad del viento en m/s.

Si suponemos un área de captación A (o área barrida por las palas) perpendicular a la dirección del viento, el flujo de aire circulante que la atraviesa será:

$$m = \delta \cdot A \cdot v \qquad (1.3.2)$$

Siendo:

δ = densidad del aire en kg/m^3.
A = área de captación en m^2.

Finalmente si substituimos el valor de m de la formula (1.3.2) en la formula (1.3.1) obtenemos:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \qquad (1.3.3)$$

Siendo:

P_m la potencia expresada en W.
A el área de barrido de la hélice m^2.
ρ la densidad del aire 1.25 kg/m^3.
v la velocidad del viento en m/s.

Existe un factor que no esta contemplado en la formula (1.3.3) que se mostró anteriormente y que se conoce como limite de Betz. Este científico Alemán publicó en 1926 un libro con el titulo “Wind Energie” en el cual demostraba que, la máxima energía recuperable con un aerogenerador ideal es igual al 60% de la energía total.

En figura 1.3.8 podemos observar las curvas características de algunos de los aerogeneradores más conocidos. Es importante comentar que la gráfica de Betz expresa el coeficiente de potencia en función del TSR[3], factor importante que se explicará detalladamente en el siguiente apartado.

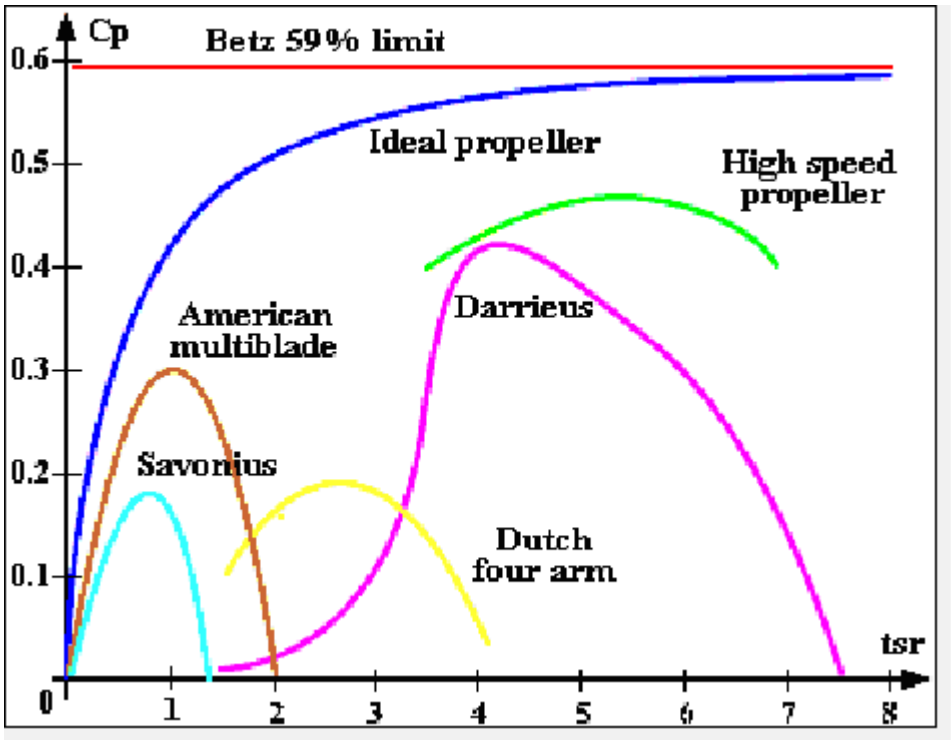


Figura 1.3.8. Rendimiento respecto al límite de Betz.

No obstante, es importante anotar que los conocimientos de aerodinámica que se tienen en la actualidad aportaran nuevas ideas para conseguir diseños que permitan obtener valores de eficiencia más elevados.

Relación de velocidad periférica TSR

La relación de velocidad específica o periférica TSR, es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto "n" del rotor. Este concepto sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica.

El TSR es la relación entre la velocidad periférica de la pala y la velocidad del viento. Indica, que la periferia de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento.

$$TSR = \frac{Velocidad_de_la_periferia_de_la_pala}{Velocidad_del_viento} \qquad (1.3.4)$$

[3] Tip Speed Ratio

Si se conoce la velocidad del viento, el radio de la pala y el numero de revoluciones a las que funciona, se puede calcular el TSR a cualquier distancia comprendida entre el eje de rotación del rotor y la periferia de la pala, relación entre velocidades que se conoce como SR, y se expresa de la siguiente forma:

$$SR = \frac{2\pi rn}{60kv} = 0.105\frac{rn}{kv} \qquad (1.3.5)$$

donde r = Radio de la pala,
n = Número de vueltas,
v = Velocidad del viento.

Y en la que k, es una constante de ajuste de las diversas unidades que se pueden emplear, tomando los siguientes valores:

k = 1.47, cuando la velocidad del viento venga en millas por hora y el radio en ft.
k = 1, cuando "v" venga en ft/s y el radio en ft.
k = 1, cuando "v" venga en m/s y el radio en metros.
k = 3.6, cuando "v" venga en km/h y el radio en metros.

Eficiencia de una instalación de energía eólica

A través de un ejemplo se explicará la forma de estimar los beneficios que resultan de la instalación de un parque eólico para la producción de electricidad. Esta metodología puede emplearse para cualquier otra fuente renovable de energía.

Considerando que la cantidad de potencia que entrega un aerogenerador depende de la velocidad del viento y su variabilidad. El término "factor de capacidad" se usa para describir la entrega real de energía de la instalación y se expresa como el porcentaje del tiempo que ésta operaría en su potencia nominal.

Una instalación de energía eólica debe trabajar con factores de capacidad mayores de 25% para que sea, preliminarmente factible en el aspecto económico.

Por ejemplo, una instalación eólica de 10 kW con un factor de capacidad de 30% equivale a trabajar 2 628 horas a su potencia nominal y que durante 6 750 horas no entregara ninguna potencia, o bien que la instalación produjera todo el año constantemente una potencia de solo 3 kW.

Generalmente se emplean modelaciones matemáticas para determinar la energía generada por una instalación eólica.

Cuando se dispone de este valor de energía calculado con los modelos matemáticos, los proyectistas pueden entonces estimar los beneficios. Cuando esta información no está disponible, el factor de capacidad resulta una herramienta muy valiosa para realizar esta estimación.

1.3.3 Características del emplazamiento y meteorología.

La instalación del prototipo de aerogenerador helicoidal del presente proyecto se realizará en la azotea del edificio donde se encuentra ubicado el GAEI.

El emplazamiento en concreto, se encuentra ligeramente alejado de la ciudad de Tarragona, frente al Campus de Ses Celades de la Universidad Rovira i Virgili.

A unos cuarenta y cinco metros frente a la azotea donde descansará el prototipo, existe un edificio de cinco plantas situado justo en la cara este del edificio de la planta piloto del GAEI.

Además de este obstáculo, el prototipo se encuentra situado entre dos casetas de tres metros de altura, ambas alejadas de la instalación a diez y a siete metros respectivamente. Otro aspecto importante a tener en cuenta en la elección del tipo de VAWT que finalmente se eligió fue el de las condiciones meteorológicas del lugar.

En las siguientes tablas se pueden observar los valores medios mensuales y anual de tres estaciones meteorológicas situadas cerca del lugar del emplazamiento. Las unidades que aparecen son m/s y los datos han sido facilitados por el Servei Català de Meteorología.

	Gen	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	**Año**
Cambrils	1.9	1.8	1.5	1.6	1.3	1.3	1.5	1.4	1.4	1.8	1.4	1.5	1.5
Constantí	2.2	2.3	1.7	2.1	1.8	1.7	1.9	1.7	1.7	1.8	1.5	1.8	1.8
Torredembarra	3.3	3.9	2.8	3.5	3.2	2.4	3.2	2.5	3.1	3.3	3.0	2.8	3.1

Tabla 1.3.2. Velocidades medias mensuales y anual del viento en m/s.

A primera vista, pueden parecer datos poco esperanzadores, sin embargo, cabe remarcar que estos valores corresponden a velocidades medias anuales. Este hecho no implica que en algún momento del día la velocidad del viento haya alcanzado valores más elevados. Por ejemplo el valor máximo recogido por la estación de Constantí fue de 25 m/s.

La imagen de la figura siguiente ha sido tomada de un atlas, en ella se muestra el mapa eólico de Europa con las velocidades medias anuales del viento.

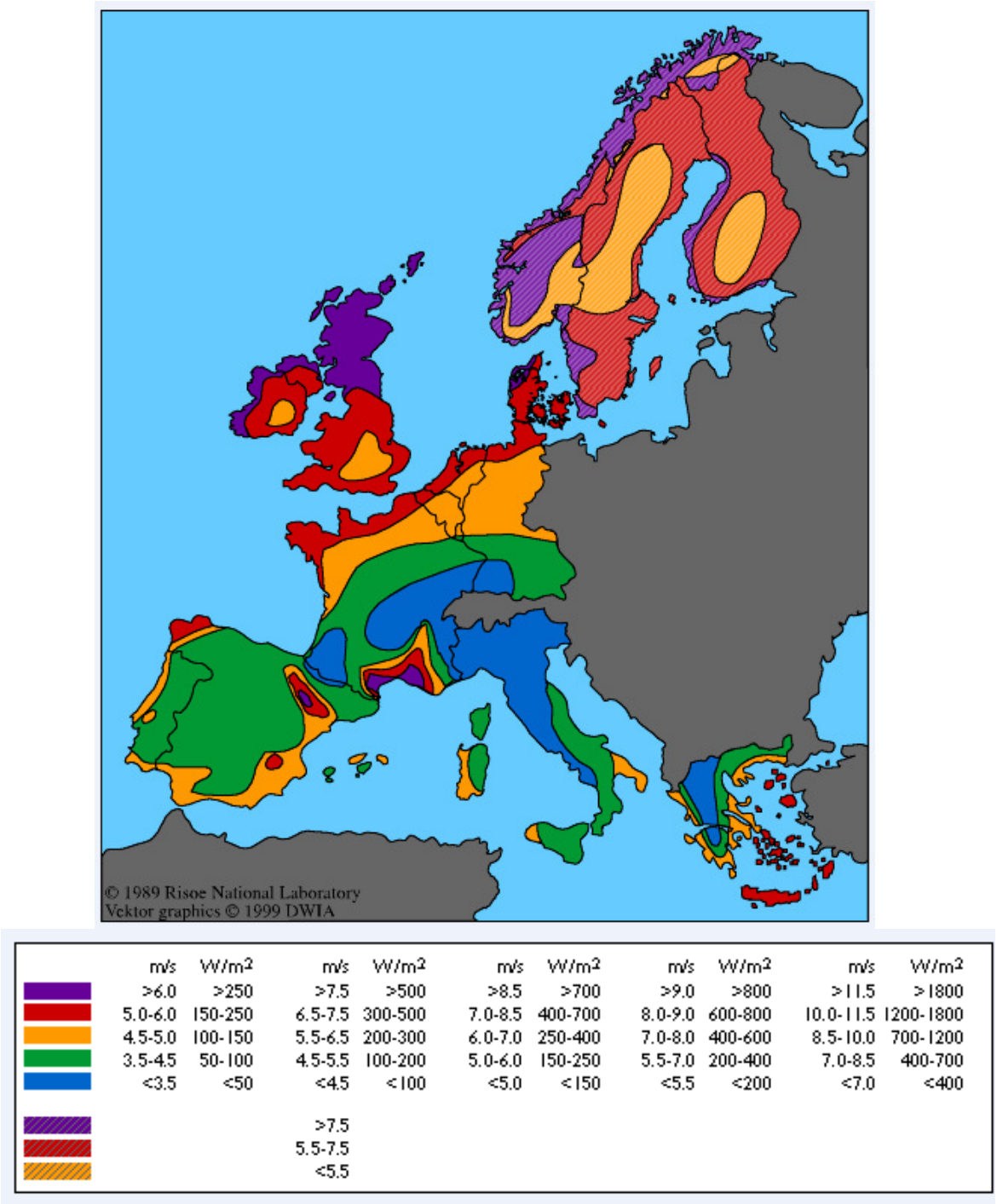


Figura 1.3.9: Mapa eólico europeo.

1.3.4 Sistemas de corriente continua.

Los generadores de corriente continua o dinamos, se utilizan en pequeños aerogeneradores ya que la estructura de delgas y múltiples devanados los hacen complejos y poco eficientes. Al aumentar la potencia generada, aumentan las perdidas que se generan en la transición de las escobillas sobre las delgas.

Como se verá más adelante, obtener corriente continua es factible también trabajando con máquinas alternas, gracias a los puentes rectificadores compuestos por diodos en su forma más elemental.

Hay varias técnicas de control que aprovechan los parámetros eléctricos del alternador para poder manejar las fluctuaciones de la potencia y consecuentemente del voltaje. Entre ellas se encuentran sistemas de control adaptativo y los siempre más utilizados sistemas de lógica difusa.

Los generadores DC o dínamos convierten una energía mecánica de entrada en energía eléctrica de salida en forma de corriente continua. En la actualidad, estos generadores han caído en desuso y han sido sustituidos por rectificadores de silicio (diodos), que transforman la CA en DC de forma estática y con mayor rendimiento.

Consisten en un inductor (embobinado alimentado con DC) colocado en el estator el cual tiene la tarea de generar un campo magnético constante (idealmente podría ser un imán permanente). El rotor, y en este caso inducido giratorio, está provisto de un colector de delgas sobre el cual se deslizan las escobillas.

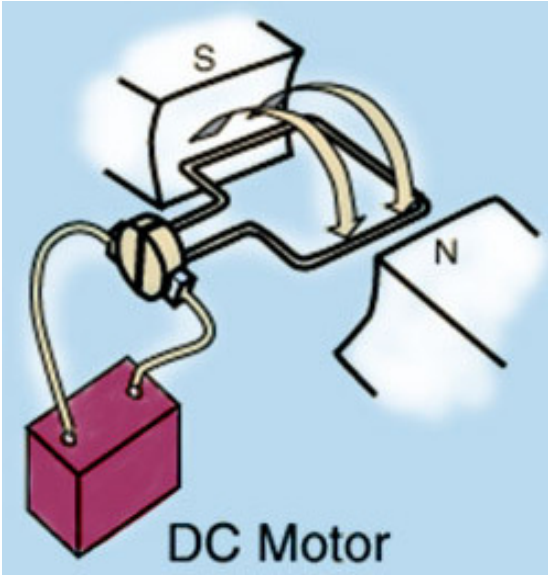


Figura 1.3.10: Detalle del principio de funcionamiento de un motor DC.

Como se mencionó anteriormente es práctica común generar continua con máquinas alternas, típicamente alternadores o máquinas síncronas como se muestra en la imagen siguente.

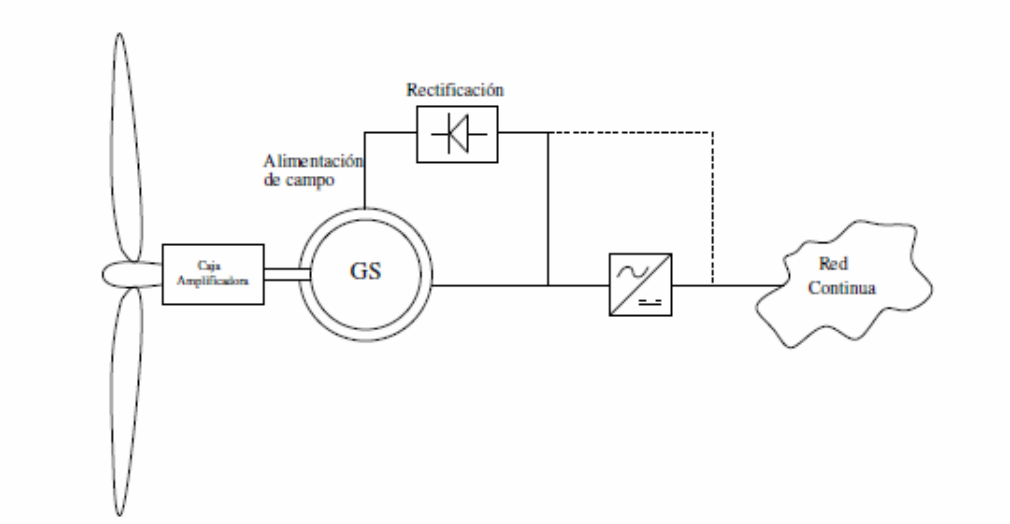


Figura 1.3.11: Generador síncrono conectado a una red DC.

En el ámbito eólico actual, la tendencia es utilizar alternadores de múltiples imanes permanentes o PMM como se muestra en la imagen 1.3.12.

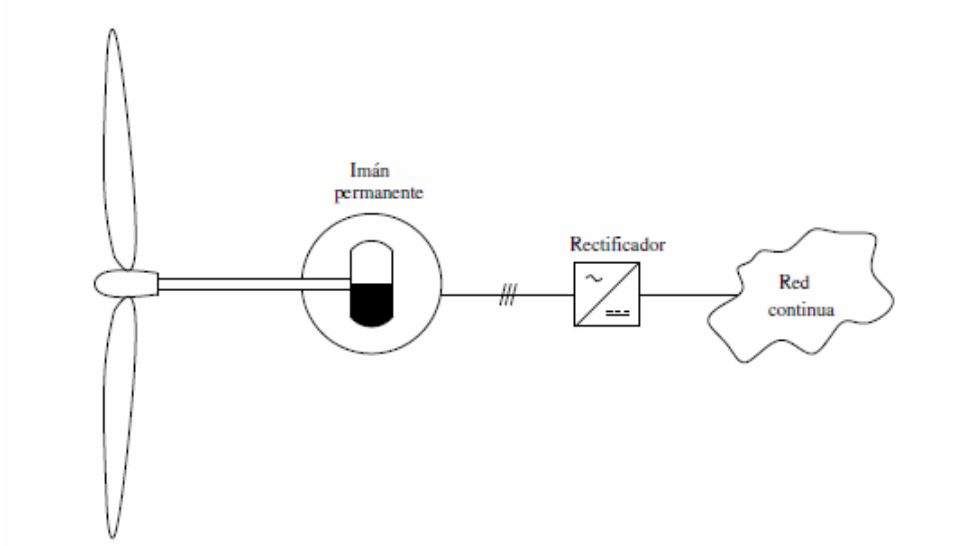


Figura 1.3.12: Generador de imán permanente conectado a una red DC.

El descubrimiento de materiales que manifiestan un poder magnético superior ha sido determinante en el desarrollo de pequeños y medianos generadores permitiendo disminuir considerablemente su tamaño sustituyendo los electroimanes.

Colocar un mayor número de imanes en el generador implica rebajar su rango de operación considerando revoluciones en el eje. Rebajar el rango de operación del alternador tiene el objetivo de evitar el uso de una caja mecánica amplificadora de RPM's. Dejar de lado componentes mecánicos significa evitar pérdidas que comprometan la eficiencia global de la conversión energética.

En los últimos años se empezaron a construir enormes generadores con este mismo concepto para lograr una máxima eficiencia. Al tener rotores gigantescos, se ha optado por colocar multitud de electroimanes.

Como se puede apreciar en la figura 1.3.11 el sistema dispone una caja amplificadora de RPM's acoplada al eje principal. Si se diseña un alternador con un número de polos adecuado para que su velocidad de operación coincida con la velocidad de rotación de las aspas, entonces, se puede omitir el uso de la caja amplificadora.

Lo anterior es válido también para la configuración mostrada en la figura 1.3.12 donde el rotor está constituido por imanes permanentes.

Se justifica el uso de estos imanes para lograr alternadores de múltiples polos con un rotor de diámetro razonable. Si se quisiera dotar al rotor de electroimanes manteniendo el número de polos, difícilmente se lograría mantener el diámetro de la máquina y se agregaría, de todas formas, una complejidad estructural importante.

Construir alternadores de múltiples polos con electroimanes es sustentable únicamente para generadores donde es posible concebir un rotor de diámetro muy grande. Para poder entender la magnitud de lo explicado se muestra en la siguiente imagen el detalle del rotor del alternador Enercon E-112, aerogenerador más grande del mundo capaz de generar hasta 6 MW de potencia.

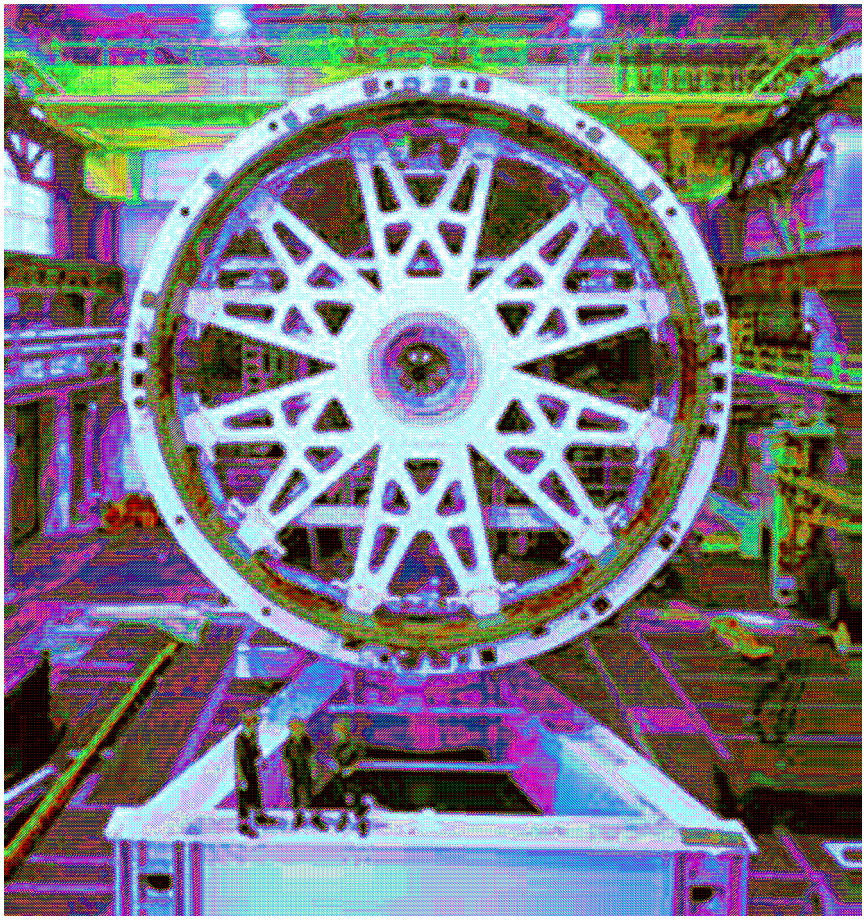


Figura 1.3.13: Rotor del alternador E-112.

1.3.5 Sistemas de corriente alterna.

1.3.5.1 *Generadores síncronos.*

Las máquinas sincrónicas tienen una velocidad de rotación rígidamente vinculada a la frecuencia de la red que alimenta el estator. Esta relación esta definida por la ecuación siguiente.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}; \qquad (1.3.6)$$

Donde:

n = revoluciones por minuto.
f = frecuencia de la red.
p = número de pares de polos en el estator.

También denominadas alternadores, estas máquinas son ampliamente utilizadas en la generación de electricidad, por la facilidad de manejar la magnitud y el tipo de potencia que se inyecta a la red modificando la corriente de campo.

Manejando el punto de operación es posible determinar cuánta potencia activa y reactiva se está aportando a la red o, consumiendo de la red. Esto permite al generador síncrono ir ajustando el factor de potencia de forma fácil y rápida.

Hay varias configuraciones utilizadas en el ámbito eólico, sobre todo para grandes aerogeneradores que se conectan directamente a la red de un sistema interconectado. Estas configuraciones se pueden apreciar en las figuras 1.3.14 y 1.3.15.

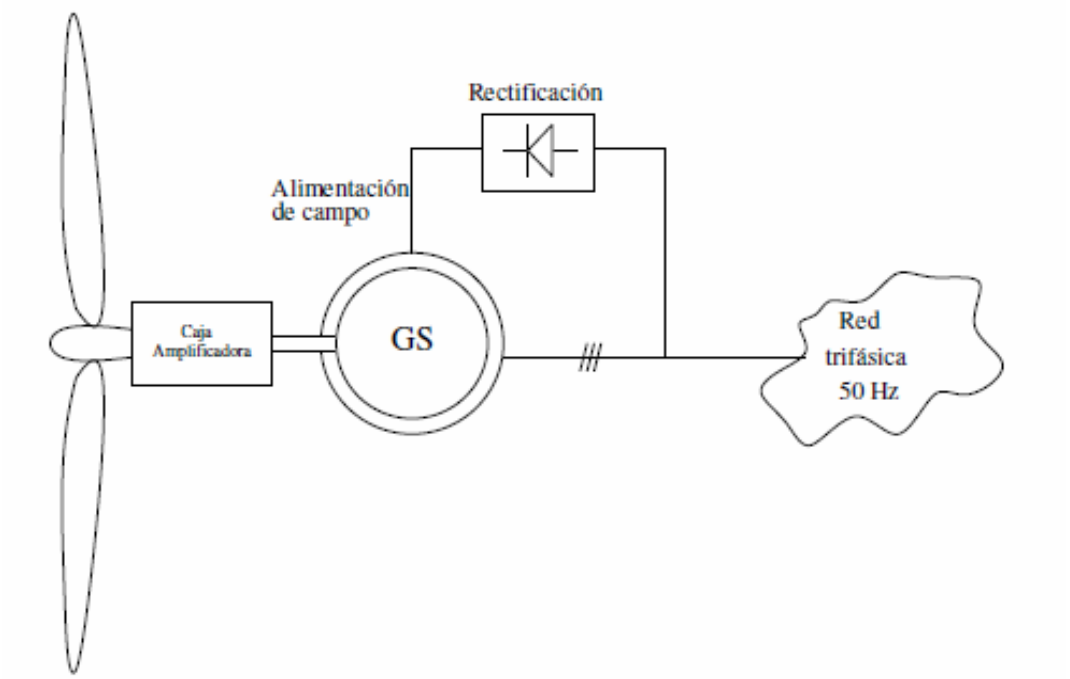


Figura 1.3.14: Generador síncrono conectado directamente a las red.

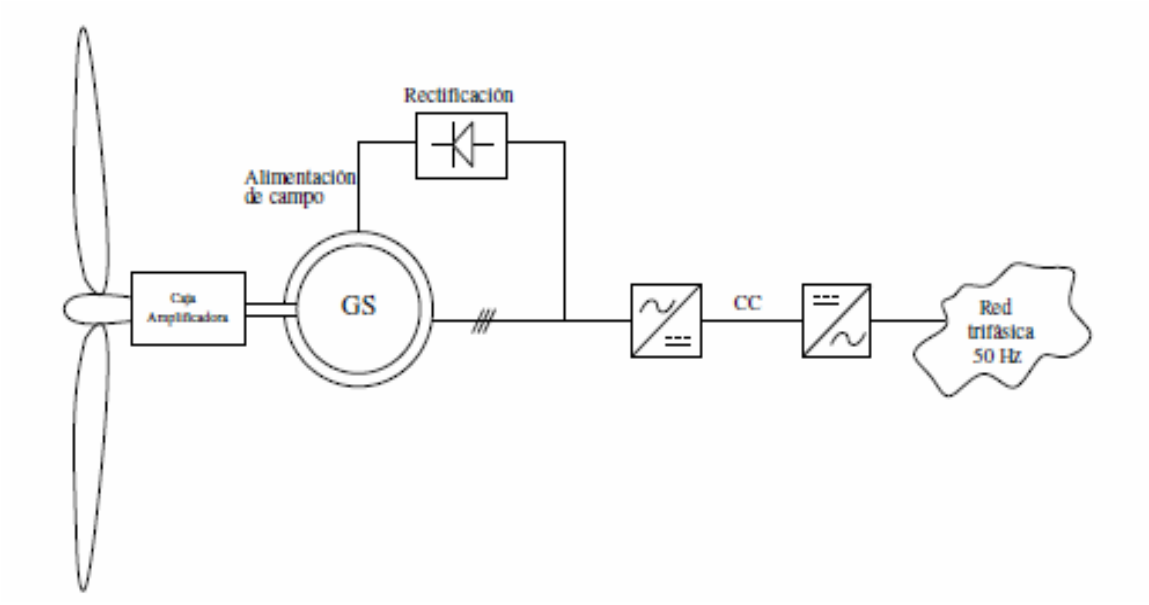


Figura 1.3.15: Generador síncrono con etapa rectificadora e inversora.

La diferencia entre ambos esquemas radica en la forma en que se maneja el generador para que aporte su energía manteniendo la sincronización.

En el caso de la figura 1.3.14, el sincronismo dependerá de la velocidad del rotor del generador, como define en formula 1.3.6, el cual puede ser ajustado con medidas aerodinámicas en el caso de aerogeneradores de eje horizontal como por ejemplo cambio de ángulo de ataque en las aspas y/o con una caja amplificadora de razón variable.

En el segundo caso en la figura 1.3.15 no es muy importante la velocidad de giro del generador ya que, la frecuencia de la señal de voltaje resultante no influirá pues sufrirá una rectificación mediante un puente rectificador trifásico para obtener una señal continua.

Posteriormente se generan nuevamente las tres fases alternas desfasadas en 120 º, típicas de los sistemas trifásicos, con la frecuencia de 50 Hz y en sincronismo con el sistema interconectado.

Todo esto, gracias a un inversor capaz de entregar la frecuencia adecuada y el nivel de voltaje necesario. De esta manera se puede evitar un control bastante complejo como el de la velocidad de giro del aerogenerador la cual está sujeta a una fuente motriz aleatoria como lo es el viento.

Como mencionamos anteriormente, diseñar un alternador de múltiples polos puede otorgar la posibilidad de eliminar la caja amplificadora de RPM's llevando la velocidad de operación de la máquina a la velocidad de rotación de las aspas como en la figura 1.3.16.

Esto permite mejorar la eficiencia ya que se eliminan componentes con perdidas mecánicas asociadas importantes. El control de la frecuencia y del nivel de voltaje puede ser efectuado únicamente con electrónica de potencia.

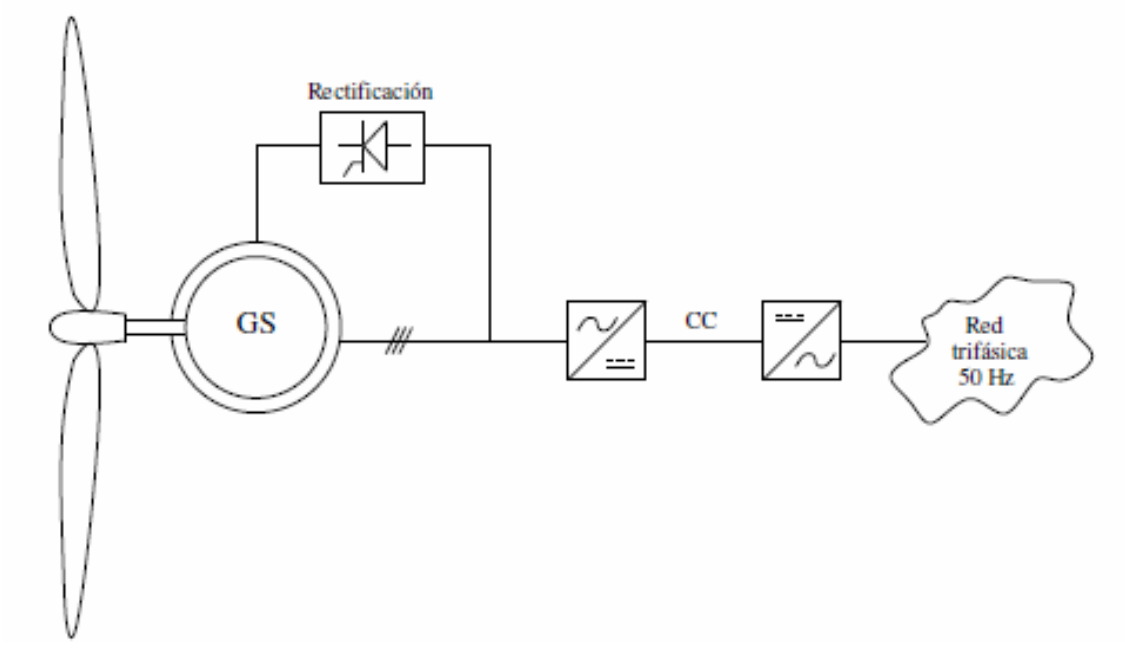


Figura 1.3.16: Generador síncrono de múltiples polos con etapa de rectificación e inversión.

Considerando la ecuación de la formula 1.3.2 y una velocidad de rotación de las aspas de 10 rpm's (válido para el aerogenerador ENERCON-112) se determina que para obtener una frecuencia de 50 Hz se necesitan 300 pares de polos.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}; \qquad (1.3.6)$$

$$10 = \frac{60 \cdot 50}{p};$$

$$p = \frac{60 \cdot 50}{10} = \frac{3000}{10} = 300_pares_de_polos$$

1.3.5.2 Generadores asíncronos.

Se basan en el fenómeno de campo magnético rotatorio resultante, al alimentar los bobinados del estator con voltajes sinusoidales trifásicos desfasados en 120º entre sí.

Se definen como asíncronos porque la velocidad del rotor no es la del sincronismo impuesto por la red. La máquina más popular es claramente el motor de inducción de jaula de ardilla, el que conectado a la red puede operar como generador.

Generalmente estas máquinas se utilizan como motores trifásicos y no como generadores. Los motores de inducción se utilizan como generador al estar conectados a la red trifásica manejando el deslizamiento. No necesitan control, salvo el manejo de la potencia mecánica y por su estructura de rotor de jaula de ardilla no tienen escobillas conectadas, lo cual los exenta de las mantenciones típicas que tienen las máquinas eléctricas de rotor bobinado.

Otra práctica, quizá no tan extendida consiste en utilizar un ciclo-conversor en la salida que permite bajar el nivel de voltaje generado adaptándolo al nivel de la red (ver figura 1.3.17).

Existe otra familia de máquinas de inducción que sí utilizan embobinado de rotor, el cual puede estar en cortocircuito, para operar como jaula de ardilla. La ventaja de tener embobinados de rotor es, la posibilidad de controlar la magnitud de la corriente que circula por ellos y así modificar el deslizamiento favorablemente.

Algunos grandes aerogeneradores utilizan la técnica de modificación de deslizamiento y las soluciones para lograr esto se muestran en los esquemas 1.3.18 y 1.3.19.

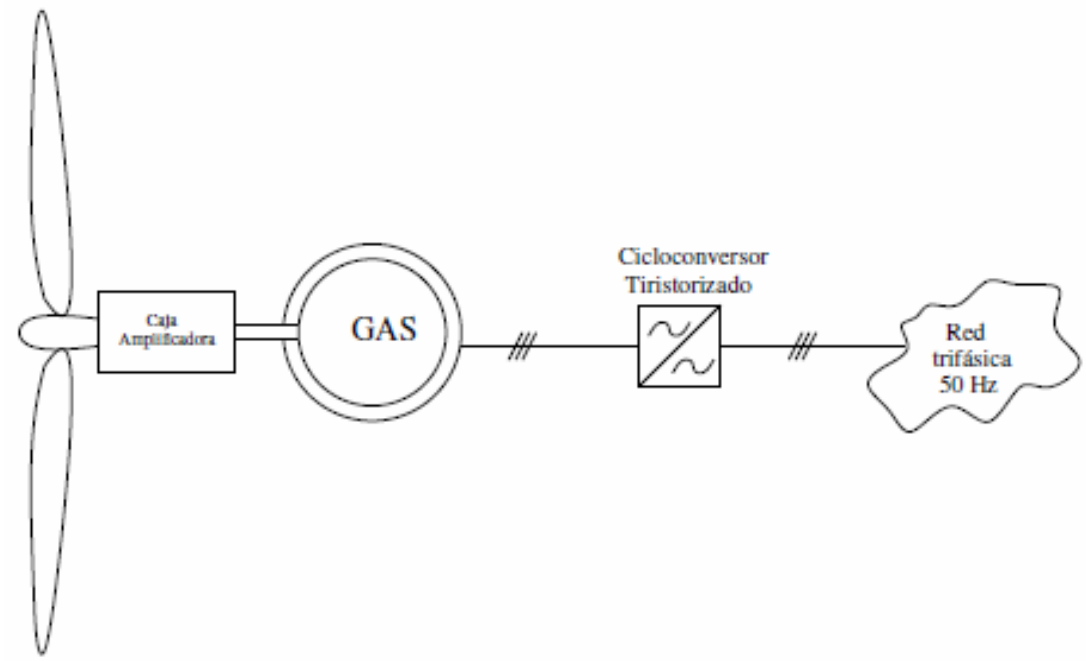


Figura 1.3.17: Generador asíncrono conectado directamente a la red alterna mediante ciclo conversor.

1.4 Referencias bibliográficas.

1.4.1 Bibliografía.

R. Comolet.- MECANIQUE DES FLUIDES EXPERIMENTALE
Masson & cie 1969.- 120 Boulevard Saint-Germain, París, VI.

M Sedille.- TURBO-MACHINES HIDRAULIQUES ET THERMIQUES
Masson & cie 1969.- 120 Boulevard Saint-Germain, París, VI.

F. de Matha Santanna.- LES MOULINS A VENT ET L'ENERGIE DE DEMAIN
Ecole Polytechnique de Montreal, Canada,1975.

J. Park.- THE WIND POWER BOOK (ISBN 0-917352-05-X)
Published by Cheshire Books, 514 Bryant Street, Palo Alto, CA 94301 USA

M. Hackleman.- WIND AND WINDSPINERS
Culver City, California: Peace Press, 1974.
C. G. Justus.- WINDS AND WINWIND SYSTEM PERFORMANCE
Philadelphia: Franklin Institute Press, 1978.

D. Le Gourières.- ENERGÍA EÓLICA (ISBN 84-311-0326-4)
Ed. Masson S.A. Barcelona (1983).

P. F. Díez.- ENERGÍA EÓLICA
Art. Revista Metalurgia y Electricidad 1980.

M. G. Galludo.- ENERGÍA EÓLICA (ISBN 84-86505-05-4)
Ed. Artes Gráfica Gala S.L. Avenida República Argentina, 1 (41011) Sevilla.
G.G Pipers.- EUROPEAN WINDFARM PROJECTS (ISBN 0-08-034315-5)
Past Chairman EWEA. Het Vierkant 2, 1852 RA HEILOO, Holanda.
International Solar Energy Society. Congerss (10 th 1987, Hamburgo, Alemania)
Editado por W.H Bloss.- Pergamon Press.

Wang Cheng Xu.-THE OPERATIONAL STUDY OF A DARRIEUS WIND TURBINE GENERATOR FOR APPLICATION DEMONSTRATION (ISBN 0-08-034315)
Dpto de Ingeniería Eléctrica, Tsinghua Univ. Beijing, China.
International Solar Energy Society. Congerss (10 th 1987, Hamburgo, Alemania)
Editado por W.H Bloss.- Pergamon Press.

Víctor García Perez.- Seguimiento del punto de máxima potencia de un panel solar para la carga de baterías de sistemas portátiles.
Departamento de Ingenieria Electrica, Electrónica y Automática de la URV
Noviembre de 2008.

Hugo Jorge Valderrama Blavi.- AC-LFR concept applied to modular photovoltaic power conversion chains.
Novembre de 2002.

1.5 Análisis de soluciones y resultados finales.

1.5.1 Construcción de la hélice.

Considerando los estudios previos efectuados, se pensó que el diseño de aerogenerador Savonius podría funcionar bien por las condiciones meteorológicas que se daban en el emplazamiento.

Además este tipo de diseño presenta una gran simplicidad a la hora de construir el prototipo, pues bastaba con conseguir ensamblar dos semicilindros a una base giratoria.

No obstante, su construcción quedo descartada a priori, ya que como se explico en el apartado 1.3.1 de la memoria descriptiva del presente proyecto, los aerogeneradores tipo Savonius presentan un inconveniente que limita su eficiencia.

El giro presenta cierta oscilación debida al desequilibrio producido por la corriente de viento cuando incide en la cara cóncava de la estructura. La única manera de solucionar el problema consiste en incorporar al mismo eje otra pala que ayude a que el empuje y como consecuencia el par de giro fuera más regular y así, eliminar las vibraciones mecánicas que reducirían la vida útil de los rodamientos y de la estructura de soporte.

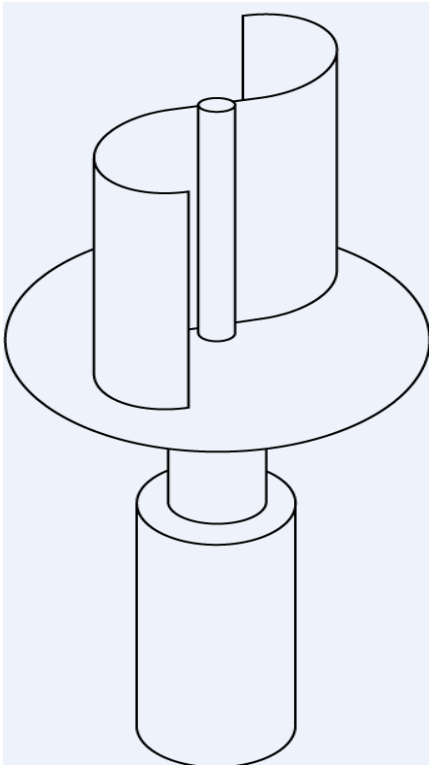


Figura 1.5.1: Aerogenerador Savonius.

El segundo modelo de aerogenerador que se pretendió construir fue el tipo Giromill.

Para este diseño, se pensó en un mecanismo formado por dos tubos metálicos uno dentro del otro, como en las máquinas del gimnasio que permiten ajustar la altura a gusto del usuario. Así del mismo modo este aerogenerador permitiría variar su radio de giro modificando la longitud de los brazos que sujetan las alas.

En la siguiente figura se muestra un boceto del mecanismo de "brazo telescópico" para el aerogenerador Giromill.

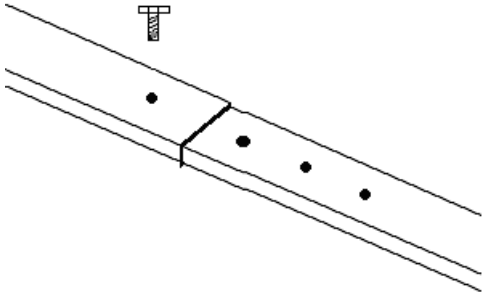


Figura 1.5.2: Detalle del mecanismo de brazo telescópico para el rotor Giromill.

Al parecer este modelo de hélice presentaba la ventaja de proporcionar un buen par de arranque, sin embargo su diseño entrañaba ciertas dificultades.

Se encontraron modelos en el mercado con dos, tres palas, o incluso con cinco, pero en ningún caso se mencionaba el tipo perfil que era más adecuado utilizar para las alas, pues existen muchos perfiles alares conocidos como perfiles NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) y que se utilizan en aviación.

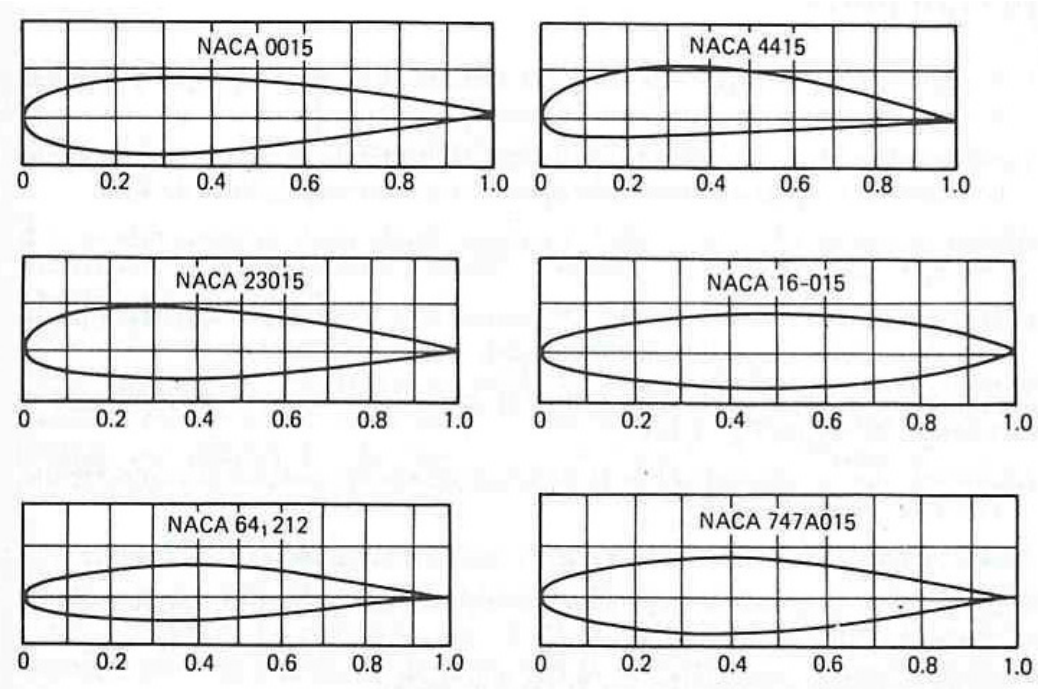


Figura 1.5.3: Algunos de los perfiles NACA utilizados en aeronáutica.

Tampoco se encontraron datos sobre el ángulo de ataque optimo para colocar las palas. El ángulo de ataque no debe sobrepasar nunca los 16º porque al igual que un avión entraría en pérdida, lo que provocaría que las alas funcionaran de manera inversa.

Se puede entender más claro con un ejemplo, en la actualidad los aviones están provistos de alerones tanto en la parte trasera como en la delantera del ala donde incide el viento cuando la nave se haya en movimiento.

Estos alerones conocidos como flaps, pueden variar su posición respecto a la posición del ala para modificar el ángulo de ataque, la longitud del intradós (parte inferior de un ala) o extradós (parte superior) en las maniobras de aterrizaje y despegue, pues la velocidad incidente del viento en esos instantes es inferior a la normal de crucero.

En nuestro caso, las palas de los aerogeneradores de pequeña o mediana potencia no es necesario que estén provistos de flaps, no obstante es imprescindible conocer el ángulo en que se colocaran las alas para que el rendimiento sea el máximo.

Como una imagen vale más que mil palabras a continuación la figura que resume lo dicho. La flecha negra indica la dirección y sentido del viento, el ángulo alfa corresponde al ángulo de ataque de un perfil alar, tomando como referencia la tangente al la circunferencia que dibuja el molino al girar. El ángulo de ataque en este tipo de aerogeneradores determinara la velocidad de funcionamiento de la máquina.

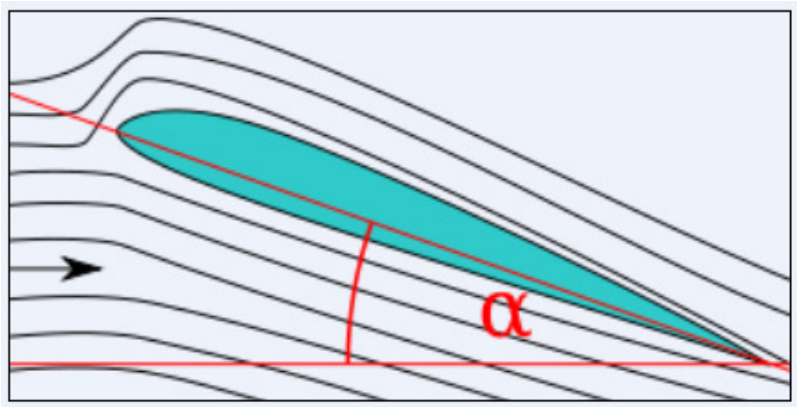


Figura 1.5.4: Angulo de ataque de un perfil alar.

1.5.2 Elección del generador

Se contemplaron dos alternativas diferentes para dotar a la instalación de un generador eléctrico adecuado. La primera, consiste en la construcción de un alternador propio diseñado exclusivamente para el tipo de hélice finalmente elegido. El motor se diseñaría con las características nominales óptimas para permitir la omisión de los sistemas de transmisión.

Sin embargo, construir un generador con rendimientos superiores al 20 % requiere de maquinaria y operarios especializados en el arte de tornear, por eso dicha opción quedo descartada en primera instancia.

La segunda opción contemplada, fue localizar un fabricante de motores eléctricos cuyas características nominales se ajustaran a las especificaciones de diseño del prototipo. Para la búsqueda se tuvieron en cuenta tres parámetros; la potencia nominal, el par resistente, o par de freno en circuito abierto y en corto circuito y la velocidad nominal.

Debido a las limitaciones fijadas por el área de barrido del prototipo, se opto por instalar una dinamo compuesta por un motor DC de 6V y una caja de engranajes incorporada. El conjunto es capaz de entregar hasta 8 W de potencia a régimen máximo de funcionamiento. Los motores de continua tienen una curva característica Par-Velocidad que determina su comportamiento y unos parámetros que a continuación se describen:

- ***Intensidad de corto circuito*** (Icc), es aquella que se produce a tensión cero. Esta puede ser medida directamente con un amperímetro conectado en los bornes del motor, y variara en función del par(T) con el que este girando el mismo.

- ***Tensión de circuito abierto*** (Vca), esta se puede medir directamente de los bornes del motor, cuando este se halla girando sin conectar a la carga y es proporcional a la velocidad(n).

- ***Potencia de pico*** (Wp), es la potencia máxima que puede suministrar el motor, y viene determinada por el punto de la curva T-n, donde el producto de la intensidad por la tensión producida es máximo.

En la imagen de la figura siguiente se muestra la curva característica de Par-Velocidad del motor de corriente continua con el que se ha dotado al prototipo. Los valores de corriente de cortocircuito y de tensión de circuito son de 900 mA y de 15 voltios respectivamente.

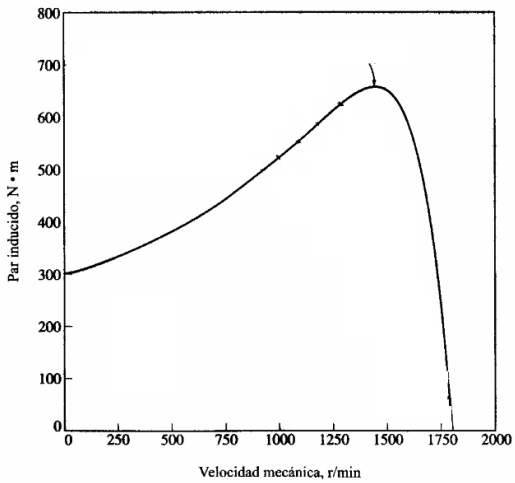


Figura 1.5.5: Curva característica Par-Velocidad de un motor de corriente continua.

1.5.3 El punto de máxima potencia en un motor de continua

La característica Par-Velocidad de un motor de corriente continua, presenta un punto de máxima potencia (PMP). El punto de funcionamiento de un motor de continua es resultado de la intersección de la característica T-n del motor y la de la carga.

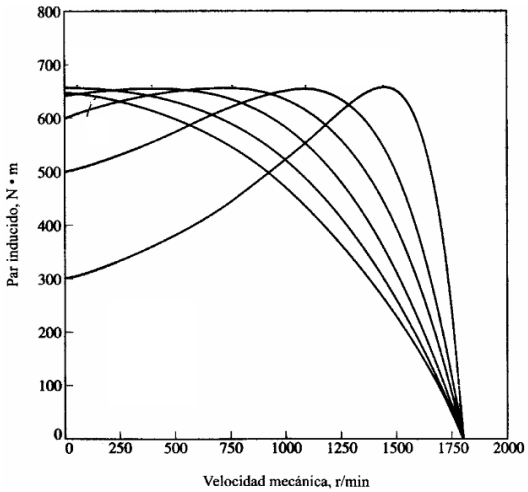


Figura 1.5.6: Curvas características Par-Velocidad para diferentes cargas.

En la figura 1.5.6 se puede observar, como en función de resistencia de la carga se trabaja a un nivel u otro en función de la velocidad con la que gira el motor.

1.5.4 Conexión mediante una etapa de adaptación

Si se desea maximizar la transferencia de potencia entre el generador eléctrico y la carga se deberá introducir una etapa de adaptación que permita a ambos a trabajar en condiciones optimas.

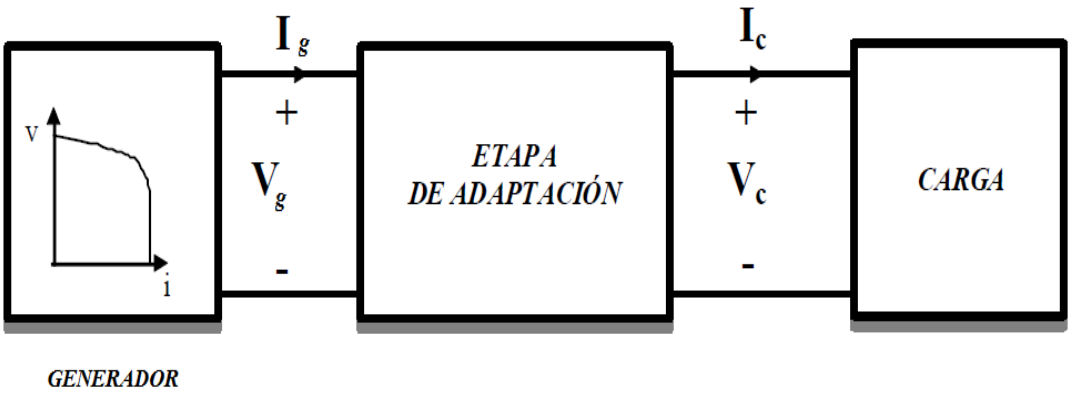


Figura 1.5.7: Conexión mediante etapa de adaptación.

En nuestro caso la etapa de adaptación deberá operar imitando el comportamiento de un resistor sin perdidas (LFR) que se encargará de ajustar su conductancia para lograr alcanzar en cada instante, independientemente de la fuerza con la que sople el viento, el punto de máxima transferencia de potencia.

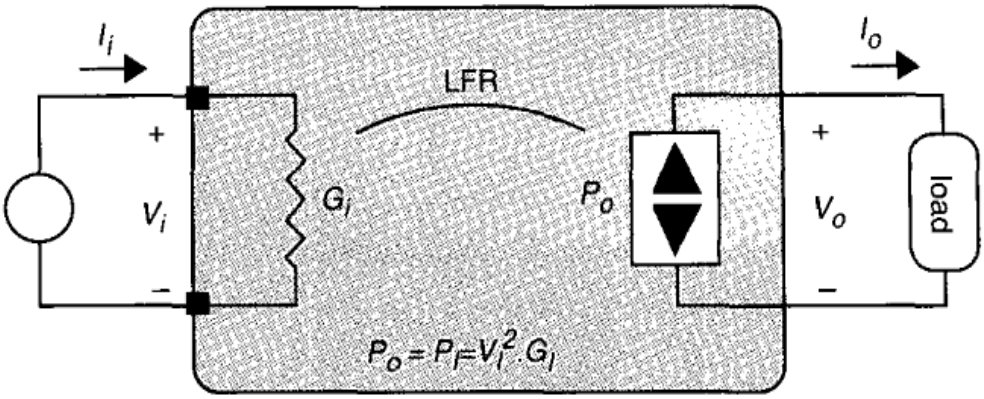


Figura 1.5.8: Representación de un LFR por H.Valderrama-Blavi en el articulo AC-LFR concept applied to modular photovoltaic power chains.

1.5.5 Materiales utilizados para la fabricación de las palas.

Una cuestión que hay que tener muy en cuenta en el diseño de un rotor es el problema estructural, siempre es posible diseñar una pala muy buena desde el punto de vista aerodinámico, pero que no sea capaz de resistir los esfuerzos a que esté sometida.

Otra cuestión importante es el proceso de fabricación del rotor, puesto que una disminución de costes en este sentido tiene que rebajar el coste de la instalación.

A continuación se muestran una serie de imágenes con los materiales más utilizados a lo largo de la historia para la construcción de alas.

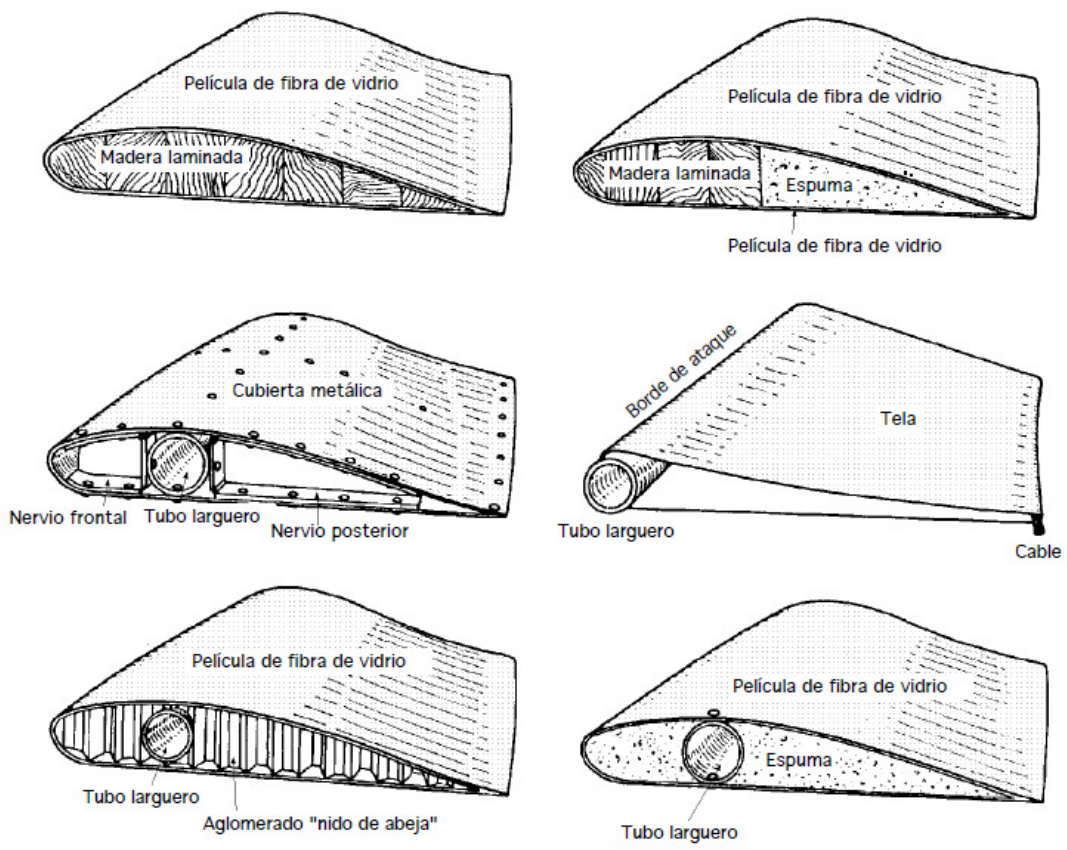


Figura 1.5.9: Soluciones constructivas para la fabricación de las palas.

En la actualidad los diseños de las palas en los aerogeneradores de grandes dimensiones son diseñados de manera que sean capaces de soportar resistencias a fatigas, torsiones producidas por los cambios en la velocidad del viento. Contrariamente a lo que se cree frecuentemente, no es la propia aerodinámica en donde está la dificultad, sino en la construcción y en la resistencia de los materiales de la pala.

En la mayoría de los aerogeneradores actuales, se está estudiando el método de construcción de las palas que se deben hacer para aumentar la seguridad del funcionamiento, manteniendo los precios sin que las máquinas se transformen en prototipos eternos que no puedan llegar a comercializarse.

Los materiales utilizados en las palas son esenciales y deben combinar flexibilidad y dureza además de un reducido peso que facilitara tanto su instalación, como su transporte.

El material utilizado para las palas debe responder en los aerogeneradores modernos a frecuentes velocidades de rotación y a otras exigencias, en algunos casos contradictorias.

- Ligero.
- Perfectamente homogéneo para facilitar la producción en serie.
- Indeformable.
- Resistente a la fatiga mecánica (debidas a las vibraciones).
- Resistente a la erosión y a la corrosión.
- DE uso y producción sencillos.
- Coste bajo para que el aeromotor se pueda construir y vender.

Actualmente encontramos principalmente cuatro tipos de materiales para hacer las palas de la hélice:

- ***Madera***

Presenta ciertas ventajas: Es sencilla, ligera, fácil de trabajar y resiste bien a la fatiga.

La falta de homogeneidad obliga a los constructores a elegir las palas en función de su masa, la cual puede variar a lo largo del tiempo de diferente manera para dos palas iguales cuando están en servicio. Estas variaciones de masa y estas deformaciones son el origen de vibraciones destructoras para los aeromotores.

Para conservar las ventajas de la madera y reducir los inconvenientes, se puede recurrir a tratamientos o protecciones de la madera antes o después de hacer la pala:

- Chapas encoladas o chapas reforzadas con baquelita.
- Protección contra la humedad por tratamiento hidrófugo.
- Protección del borde de ataque por un perfil pegado o clavado.
- Protección total por un recubrimiento ligero.
- Pro revestimiento sintético duro (resinas de poliéster).
- Por revestimiento de neopreno.

- ***Metal***

Por lo general en las palas se emplea una aleación ligera con silicio o con magnesio, ya que con estos materiales se pueden obtener costes muy bajos si se producen grandes series (aluminio moldeado, hilado o repujado).

Sin embargo, hay que destacar que el aluminio resiste bastante mal la fatiga, lo cual limita su empleo. También existen materiales ligeros con características mecánicas superiores, pero su coste hace difícil su uso.

- ***Materiales sintéticos, resinas, fibras y otros***

Algunos aeromotores funcionan con palas de materiales plásticos (10 kW bipala, fabricado en Alemania Federal, bajo la dirección de M.U. Hutter, Lübing), pero estos materiales, siendo muy interesantes en ciertos aspectos como:

- Poco peso.
- Insensibilidad a la corrosión.
- Buena resistencia a la fatiga.

Presentan ciertos inconvenientes que podrían resumirse a:

- Elevado coste.
- Falta de homogeneidad en la construcción.

Las características dimensiónales pueden variar de una pala a otra.

Los aeromotores realizados por ERDA (Energy research and development administration), en colaboración con la NASA, están equipados con palas de fibra de carbono, según la tecnología utilizada en los helicópteros.

- ***Palas compuestas***

Las palas con diferentes materiales son una buena solución, en particular para los aeromotores de pequeña y mediana potencia. Por ejemplo:

- Aleación ligera + espuma de poliuretano
- Aleación ligera + poliéster y fibra de vidrio
- Madera + poliéster
- Madera + metal

Las palas son la parte del aerogenerador que sin duda tiene que evolucionar más.

1.5.6 Sistemas de transmisión.

Desde el primer momento se intento buscar un motor eléctrico cuyas características nos permitieran evitar la intervención de mecanismos de transmisión. Esta práctica hace que el diseño final del aerogenerador sea mucho más sencillo y eficiente.

Por otro lado, un acoplamiento directo entre el rotor de la turbina y el rotor de generador eléctrico garantiza que no existan pérdidas mecánicas debidas al rozamiento de los engranajes multiplicadores.

Los tres métodos más utilizados para la transmisión de potencia mecánica son: la transmisión por correa o banda, la transmisión por cadena y la transmisión por medio de engranajes. A continuación se explican las ventajas e inconvenientes de cada sistema.

Transmisión por correa o banda.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Funcionamiento suave y silencioso.	Grandes dimensiones exteriores.
Bajo mantenimiento, no requiere lubricación.	Inconstancia de la relación de transmisión cinemática debido al deslizamiento elástico.
Diseño sencillo y fácil instalación.	Grandes perdidas de potencia por fricción.
Posibilidad de unir el árbol conductor al conducido a distancias relativamente largas.	Vida de la banda relativamente corta.
Absorbe los impactos favorablemente.	

Tabla 1.5.1: Ventajas e inconvenientes de los sistemas de transmisión por correa.

Transmisión por medio de cadenas.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Larga duración o vida útil.	Son ruidosas.
Consigue transmitir potencias relativamente altas.	Transmiten vibraciones.
No existe deslizamiento.	Montaje más complicado que la correa.
No requiere grandes dimensiones.	Mantenimiento más minucioso, requiere lubricación.

Tabla 1.5.2: Ventajas e inconvenientes de los sistemas de transmisión por cadena.

Transmisión por medio de engranajes.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Posibilidad de transmitir movimiento en ejes que se cortan o cruzan.	Posibilidad de transmitir bajas potencias.
No existe deslizamiento.	Elevado desgaste.
	No puede trasmitir potencia a distancias grandes.
	Coste elevado.

Tabla 1.5.3: Ventajas e inconvenientes de los sistemas de transmisión por medio de engranajes.

1.5.7 Diseño del convertidor SEPIC.

Considerando que los valores de tensión proporcionados por el generador de continua van desde cero hasta dieciséis Voltios, 0 V <Vg<16, dependiendo de la velocidad con la que se halle girando la hélice. Y que la batería que se utilizara como carga opera con una tensión de 12 Vdc, utilizaremos un convertidor DC-DC que nos permita trabajar en topología elevadora y reductora (buck-boost).

Por lo tanto el convertidor Buck-Boost que se utilizara para este proyecto se conoce como SEPIC. Este convertidor funciona como elevador y reductor, no inversor y es del tipo DC-DC. Algunas de sus aplicaciones comunes, en la actualidad son para cargadores de baterías de teléfonos móviles, ordenadores portátiles y alimentación de circuitos integrados.

Su diseño puede entenderse como la conexión en cascada de un convertidor reductor(buck), con otro elevador(boost). El esquema del convertidor SEPIC utilizado es el que se muestra en la imagen siguiente.

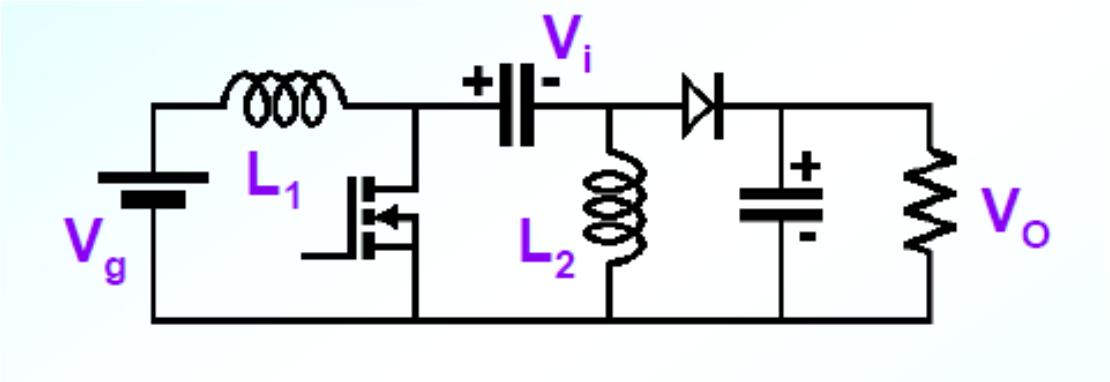


Figura 1.5.10: Estructura típica del convertidor SEPIC.

El convertidor conmutado SEPIC es un circuito no-lineal, por lo tanto para su caracterización nos ayudaremos de cos circuitos equivalentes cuyo funcionamiento sea lineal.

En todos los convertidores conmutados existen dos modos de funcionamiento, dependiendo de la continuidad o no de la corriente que circula por el inductor de entrada, reciben el nombre de modo de conducción continuo y discontinuo.

El modo continuo se da mientras la corriente del inductor L1, sea siempre mayor que cero durante todo el periodo de conducción. El modo discontinuo por el contrario, se da cuando la corriente en algún instante sea nulo. A continuación nos centraremos en el análisis del modo de conducción continuo.

Los convertidores conmutados operando en modo de conducción continua poseen dos tramos en cada periodo de conmutación, uno durante el estado de conducción Ton y otro durante el estado de no conducción Toff.

Para garantizar que se opera en modo de conducción continua se supone que el tamaño de la bobina es el adecuado para que el valor de la corriente en régimen permanente sea siempre superior a cero.

Además, el condensador deberá ser lo suficientemente grande como para obtener una tensión de salida constante. Que el interruptor se encuentra cerrado durante un tiempo DT y que está abierto durante D'T y que todos los elementos son ideales.

Circuito equivalente durante Ton:

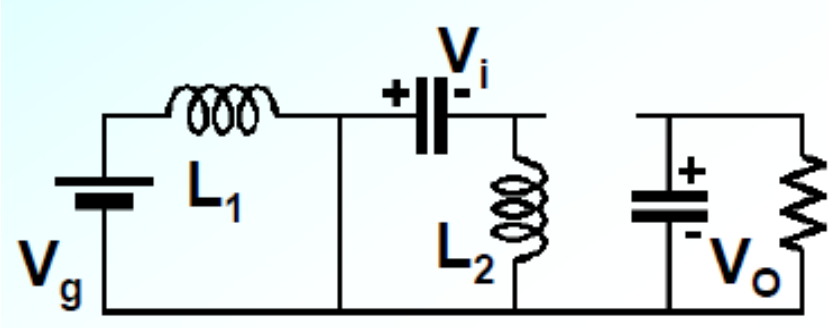


Figura 1.5.11: Circuito equivalente durante Ton.

En este estado, la tensión en la bobina es:

$$V_L = V_g = L\frac{di_L}{dt} \xrightarrow{despejando} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_g}{L}; \qquad (1.5.1)$$

Puesto que el ritmo de variación de la corriente en la bobina es una constante y por tanto aumenta linealmente, podemos expresar la ecuación anterior de la forma siguiente:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{Vg}{L}; \qquad (1.5.2)$$

Donde Δi_{L1} es el incremento de corriente en la bobina y Δt es la duración del estado Ton dentro de un periodo.

Despejando Δi_{L1} durante el intervalo en que el interruptor permanece cerrado obtenemos la siguiente expresión:

$$(\Delta i_L)_{on} = \frac{V_g \cdot D \cdot T}{L}; \qquad (1.5.3)$$

Circuito equivalente durante Toff:

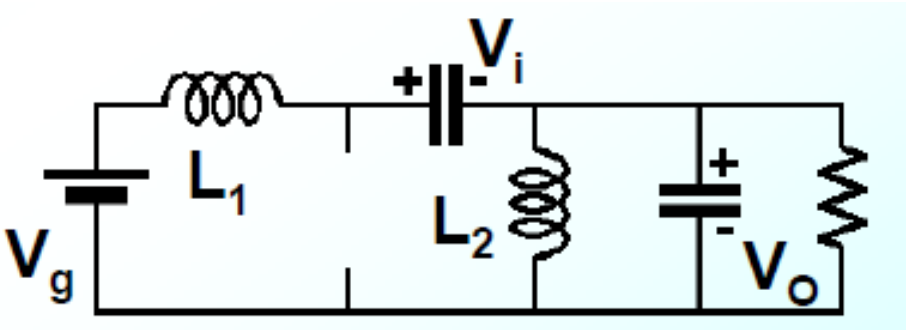


Figura 1.5.12: Circuito equivalente durante Toff.

En este estado, la tensión en la bobina es:

$$V_L = V_O = -L\frac{di_L}{dt} \xrightarrow{despejando} \frac{di_L}{dt} = \frac{-V_O}{L}; \qquad (1.5.4)$$

De nuevo, el ritmo de variación de la corriente es constante, y la variación de corriente para el intervalo se calcula como:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-Vo}{L}; \qquad (1.5.5)$$

Despejando para obtener Δi_L :

$$(\Delta i_L)_{off} = \frac{-V_O(1-D)T}{L}; \qquad (1.5.6)$$

Al funcionar en régimen permanente la variación de corriente durante un periodo completo debe ser igual a cero. Si igualamos la ecuación 1.5.3 y la 1.5.6 obtenemos la función de transferencia del convertidor SEPIC.

$$(\Delta i_L)_{on} + (\Delta i_L)_{off} = 0; \qquad (1.5.7)$$

$$\frac{V_g \cdot D \cdot T}{L} + \frac{-V_O(1-D)T}{L} = 0;$$

$$Despejando:$$

$$V_O = Vg\left[\frac{D}{1-D}\right]; \qquad (1.5.8)$$

Donde D es el ciclo de trabajo de la señal de control que provoca el disparo del interruptor y su valor es un número comprendido entre cero y uno.

$$D = \frac{Ton}{T};$$ siendo T la inversa de la frecuencia.

En la figura 1.5.13 se muestran las graficas de tensión y corriente durante los disparos del interruptor.

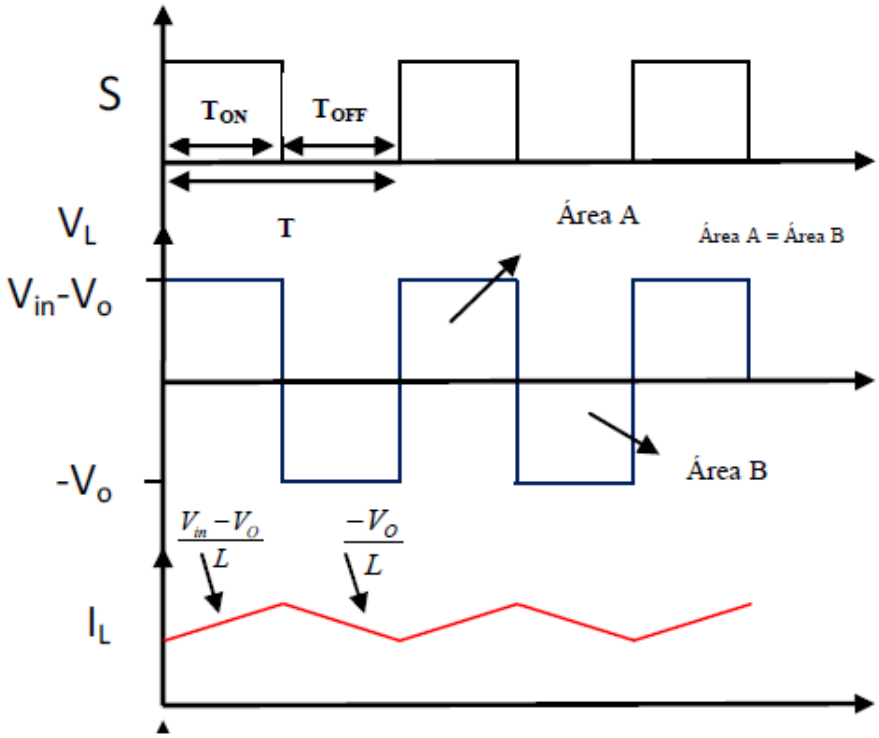


Figura 1.5.13: Graficas de tensión y corriente en la bobina.

1.5.8 Control en modo deslizamiento.

El control en modo deslizante del convertidor consiste en variar la corriente de salida del convertidor en función de la corriente de referencia. Esta corriente la proporciona el algoritmo MPPT de modo que la potencia entregada por el generador sea máxima.

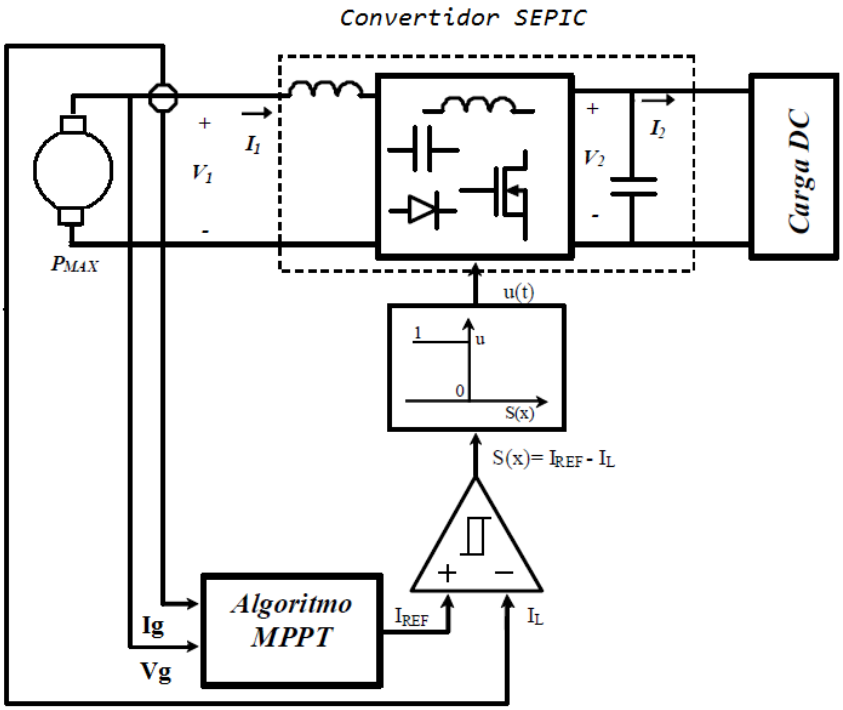


Figura 1.5.14: Diagrama de bloques de un convertidor controlado en modo deslizante por V. García Pérez en el proyecto "Seguimiento del punto de máxima potencia de un panel solar para la carga de baterías de sistemas portátiles".

Para implementar el control en modo deslizante se utiliza un circuito comparador por histéresis cuya superficie de deslizamiento se encuentra entre dos valores máximos que reciben el nombre de $\pm\Delta$.

A la salida del circuito comparador por histéresis se conecta un flip-flop, set-reset para conseguir una señal de pulsos que después de pasar por el driver se encargara del disparo del interruptor.

1.5.9 Diseño del controlador MPPT.

La etapa de control se encarga de obtener el MPPT (Maximun Power Point Tracker) aplicando un algoritmo de control implementado por software gracias a un micro controlador PIC18F2220 de Microchip.

Las dos señales procedentes de los sensores situados en la PCB de potencia son llevadas a sendas entradas del conversor Analógico-Digital del micro. Una vez convertidas las señales analógicas a digitales, se realiza por software el cálculo de la potencia producida por el motor en un instante determinado de muestreo.

Una vez ejecutado el algoritmo del seguimiento de máxima potencia el microcontrolador proporciona por el pin RB3, una señal por modulación de anchura de pulsos.

Esta señal corresponde con la tensión de referencia "iref" recalculada por el PIC y que se utiliza para compararla con la corriente que circula por la bobina de entrada del convertidor y así determinar el error.

Finalmente esta señal de error será utilizada por el comparador por histéresis para producir un set, o un reset y conseguir el disparo del MOSFET situado en la placa de potencia.

1.5.10 Algoritmo de control del MPPT.

Para explicar el funcionamiento del algoritmo de control MPPT es necesario conocer la función de transferencia del convertidor para determinar la evolución del punto de trabajo del generador.

En el apartado 1.5.7 se vio que la función de transferencia del convertidor dependía del ciclo de trabajo del interruptor y de la tensión de la batería. De modo que:

$$Vin = Vbat \frac{D}{1-D}; \qquad (1.5.7)$$

A continuación se estudiara la variación del punto de potencia del generador a cualquier otro mediante variaciones en el ciclo de trabajo. En la figura 1.5.15 se puede apreciar la correspondencia entre dos puntos de potencia del generador con las velocidades para cada curva corresponde un ciclo de trabajo diferente.

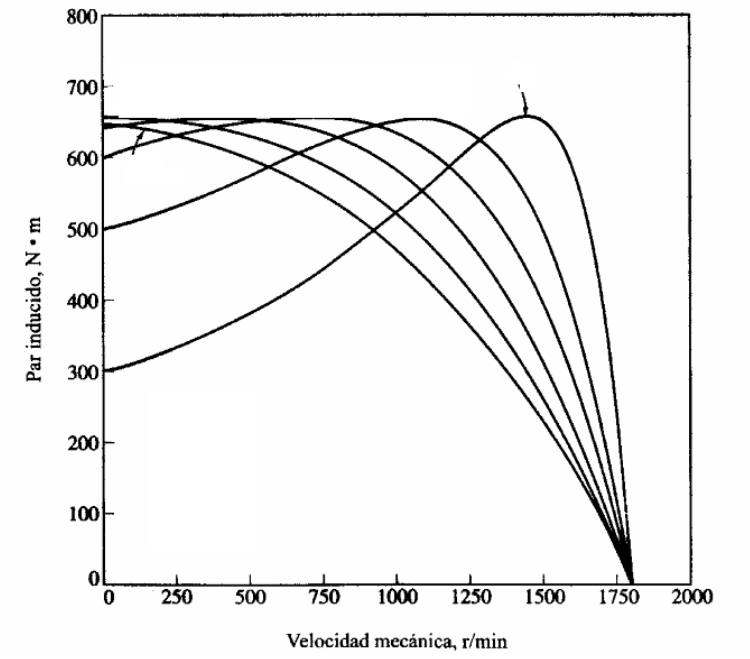


Figura 1.5.15: Características T-n para diferentes puntos de trabajo.

Como se dijo en el apartado 1.5.9 el algoritmo de control se ha implementado con un microcontrolador PIC programado para efectuar el seguimiento de máxima potencia. El siguiente diagrama de flujo describe el comportamiento del código fuente escrito para realizar el algoritmo de control.

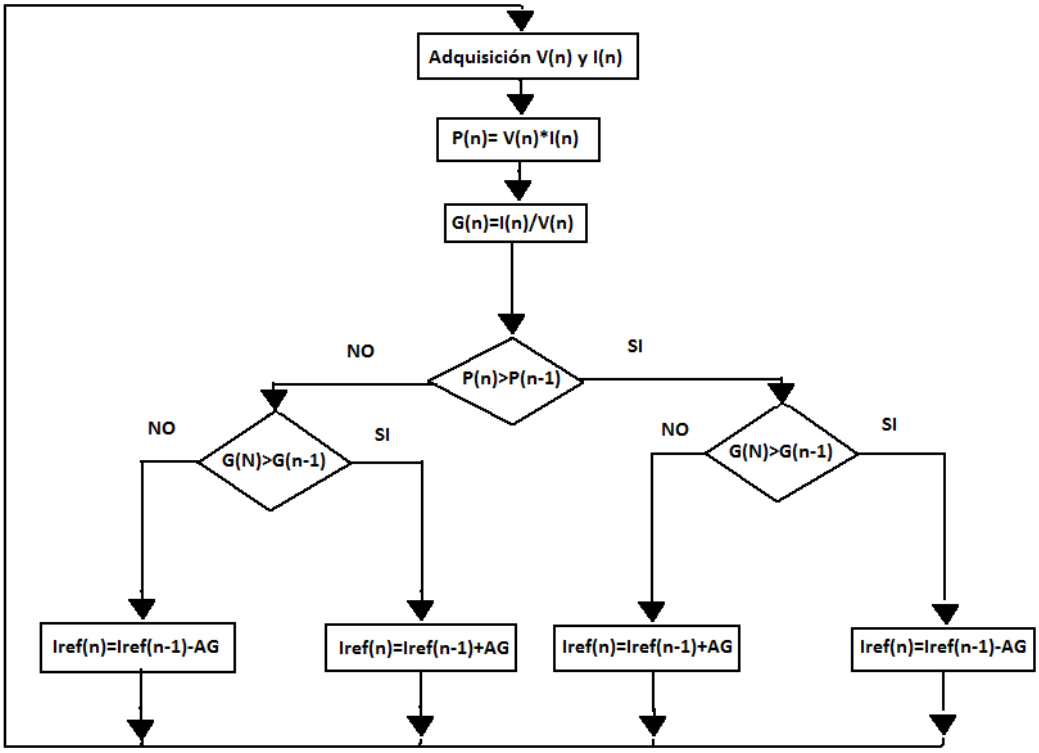


Figura 1.5.16: Organigrama del código fuente del algoritmo del MPPT.

En el ejemplo siguiente se explica como funciona el algoritmo. Para poder lograr alcanzar el punto de máxima potencia el controlador deberá conocer la potencia en dos instante diferentes de tiempo para poder determinar el si el sentido de búsqueda se esta realizando de izquierda a derecha o viceversa. Para ello habrá que evaluar cual es el signo de la derivada de la potencia. Si la derivada es positiva la búsqueda es correcta, si por el contrario la derivada de la potencia es negativa significara que el punto máximo ya fue alcanzado y que el sentido de búsqueda no es correcto.

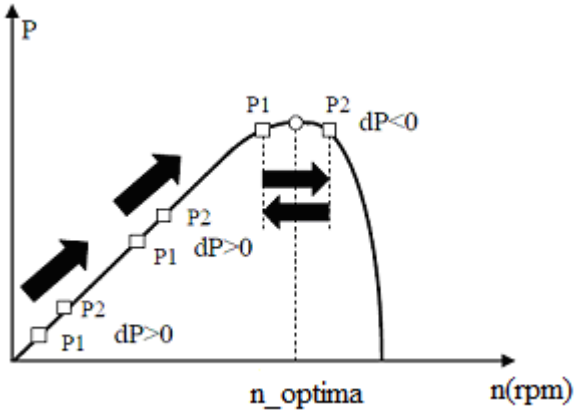


Figura 1.5.17: Principio de funcionamiento del algoritmo MPPT.

Los cambios bruscos en la velocidad del viento, suceden de forma aleatoria. Esto hace suponer que el generador tendrá un PMP diferente para cada una de las situaciones, como se puede ver en la figura 1.5.18.

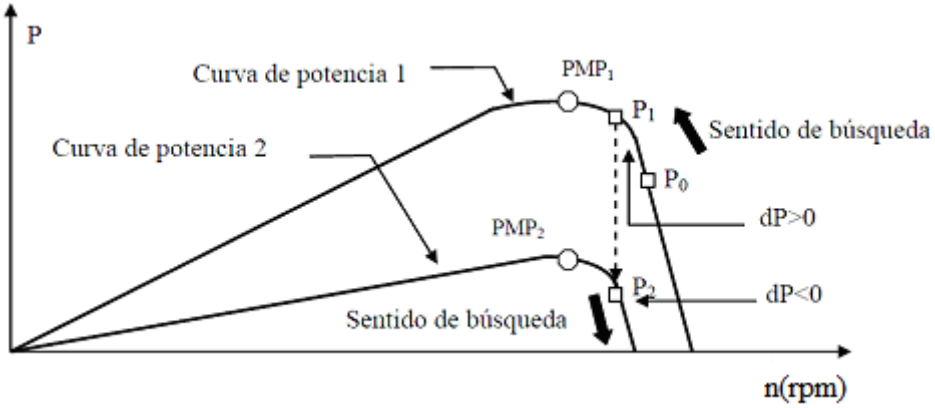


Figura 1.5.18: Cambio de velocidad en el eje del rotor.

En el ejemplo de la imagen 1.5.18, la búsqueda de potencia se había alejado en el instante t-1 donde la potencia Po había pasado el máximo, por ello el algoritmo de control invierte el sentido de búsqueda y en el instante t cuando la potencia corresponde a P_1 se produce un cambio en la velocidad del viento y pasa al nivel de potencia P_2 donde ésta es menor, lo cual indica que la derivada de la potencia será negativa, y el algoritmo tenga que cambiar el sentido de la búsqueda, alejándose aún más del PMP. Pero cuando vuelva a evaluar la derivada cambiará de nuevo el sentido de la búsqueda para volver a encontrar el máximo de nuevo.

1.6 Descripción del montaje del prototipo.

1.6.1 Elaboración del chasis de la hélice.

Para la elaboración del chasis de la hélice se han seguido varios pasos que se describen a continuación. Como ya se dijo en el apartado 1.3 de la memoria descriptiva del presente proyecto, las palas de los aerogeneradores Savonius tienen forma de S.

El primer paso consiste en cortar las piezas de madera que se dispondrán a lo largo del eje principal del rotor del prototipo. Para ello, marcaremos con la ayuda de una plantilla las once piezas en forma de S, sobre un tablero de contra chapado náutico y seguidamente efectuaremos el corte de las mismas con la ayuda de una sierra de calar.

Tanto la forma, como las medidas de la costilla se pueden consultar en el plano nº3 del proyecto.

Después, taladraremos el centro de cada pieza con una corona de 30 mm para poder insertar las costillas en el eje principal. Es recomendable que el número de costillas sea un número impar siete, nueve u once, esto no es mas que para conseguir que la pieza central quede en el centro geométrico de la estructura.

Una vez preparadas las once costillas que conformaran el esqueleto de la hélice, se procederá a pegar las piezas al eje con la ayuda de la resina epoxídica, dejando una distancia de 9 cm de separación entre una y otra, puesto que la longitud total de nuestro eje principal es de un metro.

De manera que si multiplicamos la distancia de separación por el número total de costillas obtendremos un valor muy próximo al metro de longitud.

Para conseguir el efecto helicoidal de la turbina, las piezas se irán girando en cada piso incrementando un ángulo de dieciséis grados respecto a la anterior para completar con la última un total de 180º.

Para facilitar la maniobra se marcaran con la ayuda de un regle líneas longitudinales en el eje de madera, tantas como piezas tengamos. El ángulo de desfase entre las piezas se calcula fácilmente dividiendo el 180º entre el número de costillas disponibles.

En la imagen de la figura 1.6.1 se muestra un ejemplo de cómo se fabrico la hélice, aunque en este caso la hélice solo disponía de siete segmentos la técnica para calcular la distancia entre pieza y pieza sigue siendo la misma.

Figura 1.6.1: Chasis de una hélice Savonius helicoidal de siete segmentos.

1.6.2 Enfibrado de la hélice.

El siguiente paso para la elaboración del prototipo consiste en recubrir de fibra de vidrio cada una de las caras de la hélice. El proceso es laborioso y debe efectuarse con la mayor rapidez posible, pues el tiempo de polimerización de la resina es de 15 a 20 minutos.

Debido a la falta de experiencia arte del enfibrado las capas fueron aplicadas en varias sesiones, aunque lo ideal seria haberlo podido realizar todo el proceso en una sola capa para conseguir un aspecto más uniforme y mejor acabado.

Antes de añadir el catalizador a la resina hay que tener preparados los trozos de fibra cortados en tiras de unos 8 x 60 cm de largo. Así, una vez preparada la mezcla, colocaremos las tiras longitudinalmente sobre las costillas del chasis de la hélice impregnándolas con la ayuda de una brocha con la mayor rapidez posible.

El proceso de enfibrado deberá realizarse de manera que se respeten los tiempos de secado de 24 a 48 horas y cristalización de la resina de seis a siete días.

1.6.3 Lijado y pintado de la hélice.

Por último, cuando la resina haya cristalizado por completo se procederá a lijar ambas caras de la hélice. Primero con una lija de grano medio para eliminar los restos de fibra más relevantes y después con una lija de grano fino.

Para el proceso de lijado fino se puede utilizar un poco de agua. Esto permitirá conseguir un acabado más brillante y además servirá para refrigerar la superficie de fricción puesto el proceso debe ser realizado manualmente.

Finalmente aplicaremos una capa de GelCoat[4] con la ayuda de un rodillo y esperaremos a que seque. El GelCoat posee unas características de elasticidad, resistencia a los agentes ambientales muy elevadas. Por eso se utiliza para pintar los cascos de los barcos y es capaz de resistir largos periodos de tiempo a la intemperie sin sufrir desperfectos.

1.6.4 Montaje final de la hélice en la estructura de soporte.

La estructura que soportará la hélice, el motor, la batería y las placas de circuito impreso esta formada por dos cuadrados de madera de tablero marino de 40x40 cm.

La tapa superior ha sido torneada en el centro de su cara superior para poder alojar el cojinete que permitirá que la hélice gire libremente en su interior.

La base de la estructura también esta torneada por la cara superior con la intención de permitir el alojamiento del segundo cojinete, que además de sostener la hélice a una cierta distancia de la base permite que el rotor gire sobre si mismo.

Ambas tapas o bases, irán unidas con ayuda de tornillos y cola blanca a los cuatro listones de 50x30 y de 104 cm de longitud que llamaremos patas.

Esta medida es justo la suficiente para poder extraer la hélice en el caso que hubiera que realizar reparaciones de mantenimiento sin necesidad de desmontar toda la caja.

[4] El GelCoat es una resina que se utiliza para acabados de alta calidad en superficies compuestas por fibra de vidrio.

El resultado final del proceso de elaboración de la hélice Savonius helicoidal se muestra en la figura 1.6.2.

Figura 1.6.2: Resultado final del montaje de la hélice Savonius helicoidal.

Todas las dimensiones del prototipo fabricado para llevar a cabo la ejecución de este proyecto pueden ser consultadas en el apartado 3, correspondiente a planos y esquemas del proyecto.

1.6.5 Elaboración y montaje de las placas de circuito impreso.

Para la realización de las placas de circuito impreso se ha utilizada el programa para diseño electrónico Layout de Orcad v14.1. Las placas del convertidor SEPIC y del controlador MPPT se harán a doble capa por el método de fabricación por fresadora porque es la técnica que dispone el laboratorio de la Universidad.

Con este método se utiliza una fresa mecánica para eliminar el cobre del sustrato. Una fresadora para circuitos impresos funciona de manera similar a un plotter, recibiendo ordenes desde un programa que controla el cabezal de la fresa en los ejes x e y. Los datos generados por el programa de diseño son almacenados en un archivo con formato .MAX.

En las siguientes imágenes se muestran los dos archivos .MAX correspondientes a ambos placas de circuito impreso.

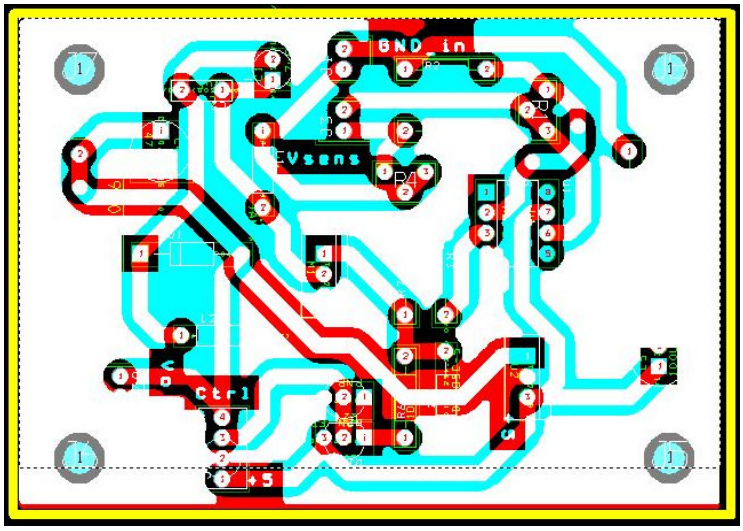


Figura 1.6.3: Layout de la placa del convertidor.

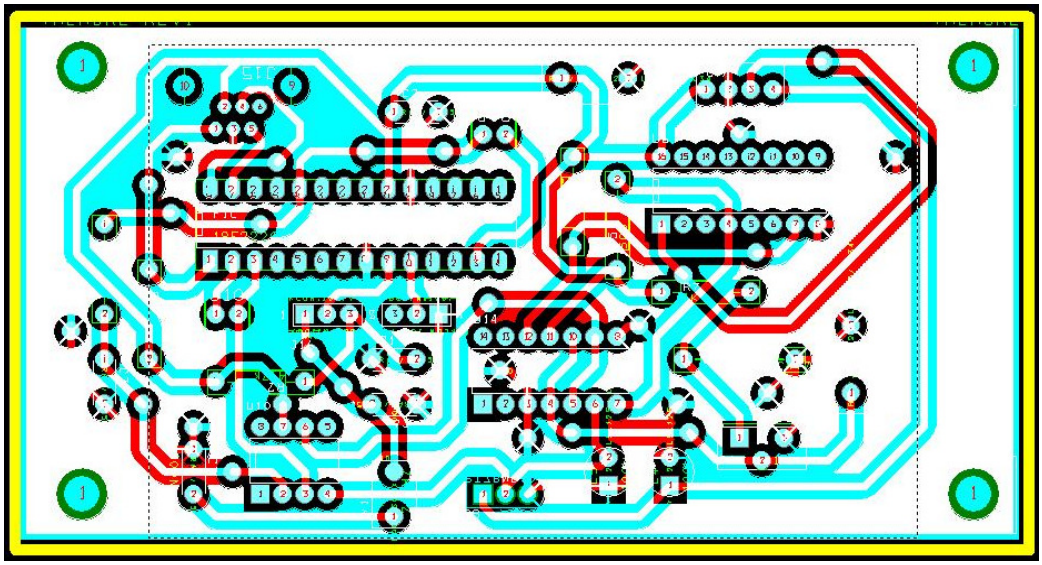


Figura 1.6.4: Layout de la placa del controlador.

Seguidamente y una vez realizadas las soldaduras de vías de comunicación entra ambas caras se procederá al montaje y soldadura de los componentes electrónicos. La figura 1.6.5 y 1.6.6 muestra el resultado de las dos placas terminadas.

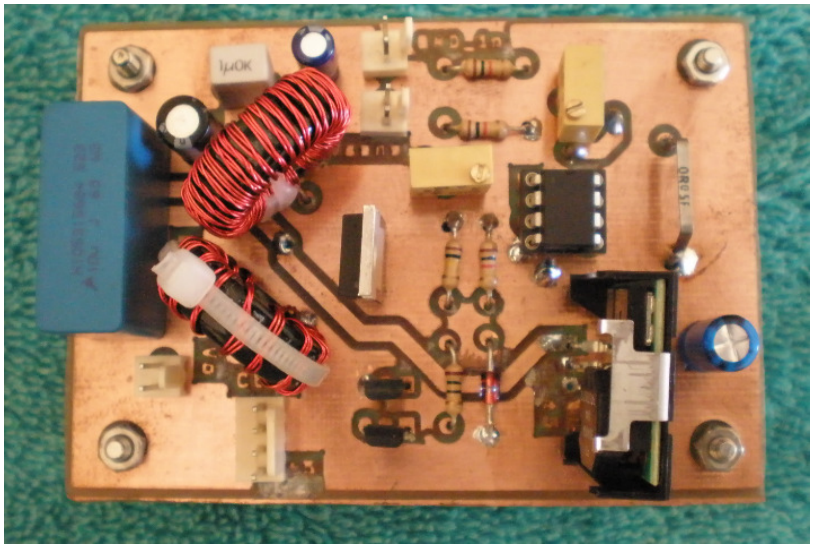


Figura 1.6.5: Placa del convertidor SEPIC

Por último las dos placas se atornillaran a la estructura de la hélice para poder transportar todo el prototipo al lugar donde se realizaran las pruebas y medidas correspondientes. Así evitaremos dañar cualquiera de las partes que conforman el conjunto del prototipo.

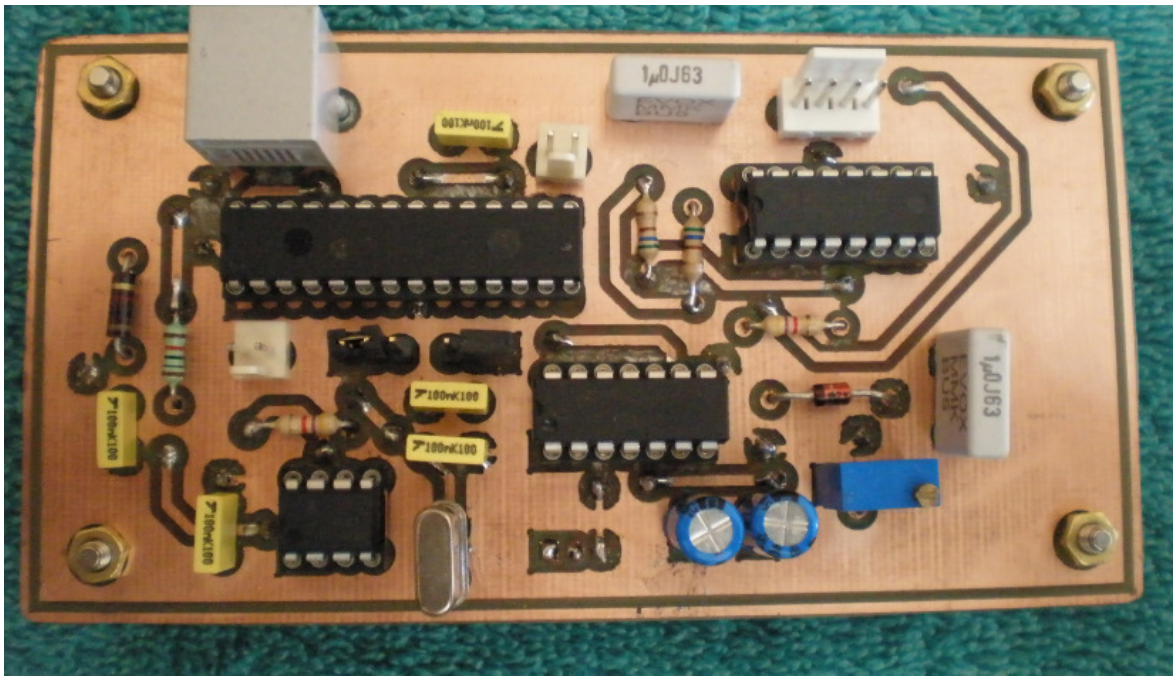


Figura 1.6.6: Placa del controlador MPPT.

1.6.6 Montaje de la batería.

Igual que las dos placas de circuito impreso, y con el mismo fin, la batería también se va a sujetar a la tapa superior de la estructura de soporte. El mecanizado se realizará doblando una chapa de cobre a modo de abrazadera y dos tornillos en ambos extremos de la batería que la sujetarán firmemente como se muestra en la figura siguiente.

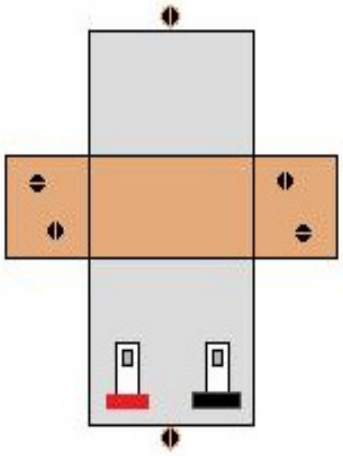


Figura 1.6.7: Detalle de la sujeción de la batería.

Una vez conectados y fijados todos elementos constituyentes del prototipo de aerogenerador Savonius Helicoidal el resultado es el que se observa en la imagen de la figura el siguiente.

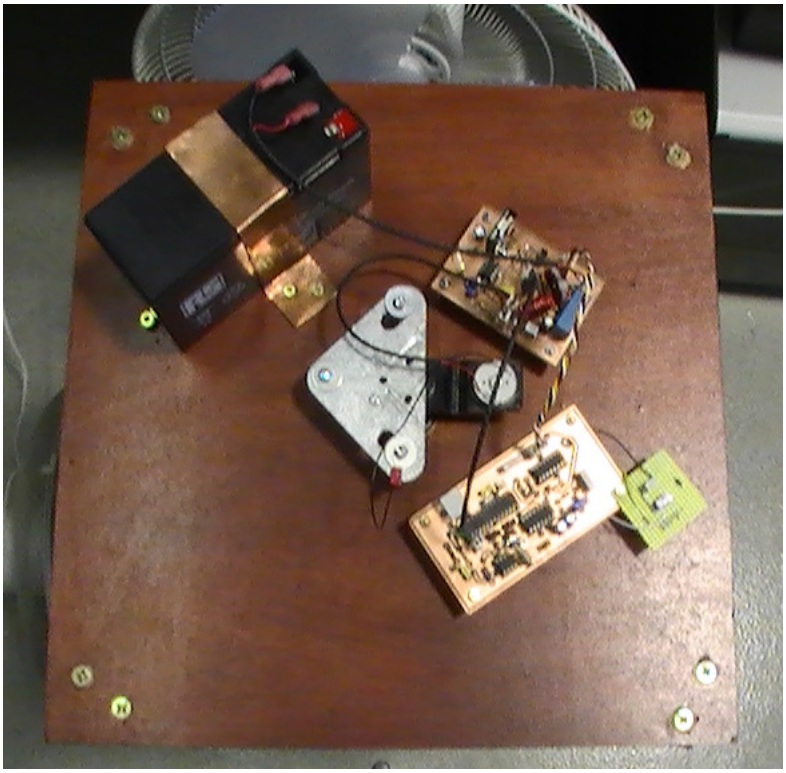


Figura 1.6.8: Resultado final de la conexión e instalación de los equipos.

1.7 Puesta en marcha y funcionamiento.

Una vez realizado el completo montaje de la instalación propuesta se procederá a la puesta en marcha verificando un correcto funcionamiento. Para ello se indican los siguientes pasos:

1. Conectar los bornes del motor en el conector de entrada del convertidor, sin olvidar que además el polo negativo del mismo conector del convertidor deberá conectarse al chasis que soporta el motor.

2. Conectar las señales procedentes de los sensores situados en la PCB de potencia con el correspondiente conector de la placa de control, para poder hacer llegar dichas señales al microcontrolador.

3. Conectar ambas placas mediante el cable de alimentación lleva las señales de alimentación +12, +5, y GND desde la placa de potencia hasta la de control y devuelve la señal de control de la placa de control hasta la de potencia.

4. Por último solo quedará conectar los bornes de la batería al conector de salida Vout de la PCB del convertidor SEPIC.

1.8 Planificación y programación.

El plan de ejecución del proyecto será el adecuado para que el ritmo de ejecución de los trabajos garantice en todo momento el cumplimiento con la normativa que corresponde (incluida en el apartado de normativa de este documento) y con los condicionantes técnicos del presente proyecto.

Para el total montaje y verificación de la instalaciones se planean las siguientes fases y tareas:

Fase 1: Diseño y especificaciones del sistema.

Fase 2: Acopio de materiales.

Fase 3: Montaje e instalación.

Fase 4: Verificación y puesta en marcha de la instalación.

1.9 Orden de prioridad entre documentos.

El orden de prioridad de los documentos básicos de este proyecto son:

1 Planos

2 Pliego de Condiciones

3 Presupuesto

4 Memoria

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

2 MEMORIA DE CÁLCULO

Cargador de baterías para aerogenerador Savonius helicoidal

AUTOR: Vicente Pichardo Calbet
DIRECTOR: Hugo Valderrama Blavi

Junio de 2010

2.1 Potencia teórica producida por el prototipo.

Como se vio en el apartado 1.3.2, para calcular la potencia teórica que se puede extraer de una masa de aire en movimiento tenemos que conocer en primer lugar cual es el área de barrido correspondiente a nuestra hélice, en función de su forma.

Después, deberemos aplicar la formula que se vio en el apartado de conceptos teóricos generales que relaciona el área de barrido de la hélice en metros cuadrados, con la velocidad disponible del aire en metros por segundo y con la densidad del aire en condiciones normales.

Por ejemplo en nuestro caso se trata de un aerogenerador de eje vertical, cuya superficie de contacto con el aire tiene forma de rectángulo, por lo tanto para conocer el área de barrido deberemos multiplicar la longitud de la base por la altura del rotor de la siguiente forma, y expresaremos el resultado en metros cuadrados. Las dimensiones de la hélice del prototipo pueden consultarse en plano nº3 del presente proyecto en el apartado 3 planos y esquemas.

Área de barrido(A):

Altura de la hélice 0.98 m.
Longitud de la base de la hélice 0.36 m.
A = Base*Altura = 0.36*0.98 = 0.3528 m^2 .

A continuación aplicaremos la formula de la potencia producida por una masa de aire en movimiento.

$$P_m = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v^3 \qquad (1.3.3)$$

Suponiendo que el viento sopla con una velocidad de 10 m/s equivalente a unos 36 km/h y sustituyendo en la ecuación obtenemos:

$$P = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 0.3528 \times 1000 = 220.5_W$$

Esta sería la potencia teórica, pero este valor no es del todo cierto. Para obtener un valor más real deberemos aplicar el límite de Betz que establece que rendimiento máximo de cualquier aerogenerador no puede superar nunca el 60%.

Para el modelo de hélice Savonius el rendimiento se encuentra en torno al 30%. Así que, aplicando el límite de Betz al valor de potencia calculado anteriormente obtenemos:

$$P = 220.5 \times \frac{30}{100} = 66.15_W$$

Lo cual significa que la potencia máxima producida por nuestro prototipo estaría entorno a los 66.15 W. Pero veamos que ocurre cuando varía el valor de la velocidad con que sopla el viento.

Velocidad del viento (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potencia teórica (W)	0.22	1.76	5.93	14.1	27.5	47.6	75.6	112.8	160.7	220.5

Tabla 2.1.1: Potencias teóricas obtenidas con el prototipo de aerogenerador Savonius Helicoidal.

2.2 Cálculos para el sensor de tensión.

El sensor de tensión utilizado para medir la tensión de entrada entregada por el motor, esta formado por una resistencia de 1 kΩ y por un potenciómetro de 5 kΩ, que se ajustará para conseguir el valor de tensión deseado.

La parte del circuito que se muestra en la imagen de la figura siguiente corresponde a la etapa de entrada del conversor donde esta situado el sensor.

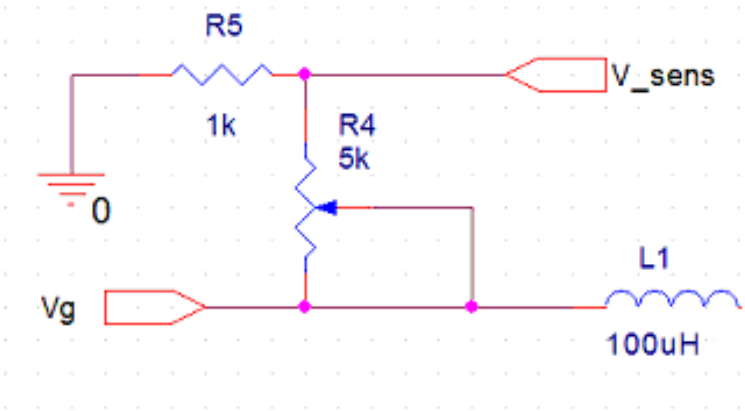


Figura 2.2.1: Esquema del sensor de tensión.

El valor de tensión máximo que puede entregar el motor en circuito abierto es de 15 V, tal y como se dijo en el apartado 1.5.2 de la memoria de este proyecto.

La tensión V_sens máxima, no deberá superar en ningún caso los 5 V puesto que esta señal será la que se introduzca en el canal 1 del conversor A/D del microcontrolador.

Para no hacer trabajar al conversor al limite, sobredimensionaremos el valor de tensión entregada por el generador a 16 V y realizaremos los cálculos para que la tensión de sensado V_sens sea siempre inferior a 4.9 V.

Como puede observarse en la figura 2.2.1, el esquema del sensor de tensión tiene la estructura típica de un divisor de tensión. La incógnita del sistema será la resistencia del potenciómetro de 5 kΩ.

$$V_sens = Vg\frac{R5}{R4+R5}; \qquad (2.2.1)$$

Substituyendo en la ecuación anterior los valores conocidos y despejando R4 correspondiente a la resistencia aplicada por el potenciómetro obtenemos:

$$4.9 = 16\frac{1}{R4+1};$$
$$R4+1 = \frac{16}{4.9};$$
$$R4 = 2.265_k\Omega$$

Lo cual indica que si la resistencia del potenciómetro al 100% es de 5 kΩ deberemos ajustar el potenciómetro al 45% de su valor máximo. Este cálculo es puramente teórico, en la practica el sensor de tensión fue ajustado conectando una tensión de prueba a la entrada del convertidor.

2.3 Cálculos para el sensor de corriente.

El circuito utilizado para el sensado de corriente esta compuesto por un resistor de sensado de corriente o Shunt y por un amplificador operacional de ganancia ajustable en configuración inversora.

De igual modo que el los cálculos para el sensor de tensión sobredimensionaremos en este caso el valor de la corriente de cortocircuito de 900 mA a 1 A.

El circuito de la imagen de la figura 2.3.1 muestra el esquema del sensor de corriente que proporciona un valor de sensado proporcional en voltios a la salida del operacional, llegando hasta un máximo de 5 V que es la tensión máxima que podemos introducirle al PIC.

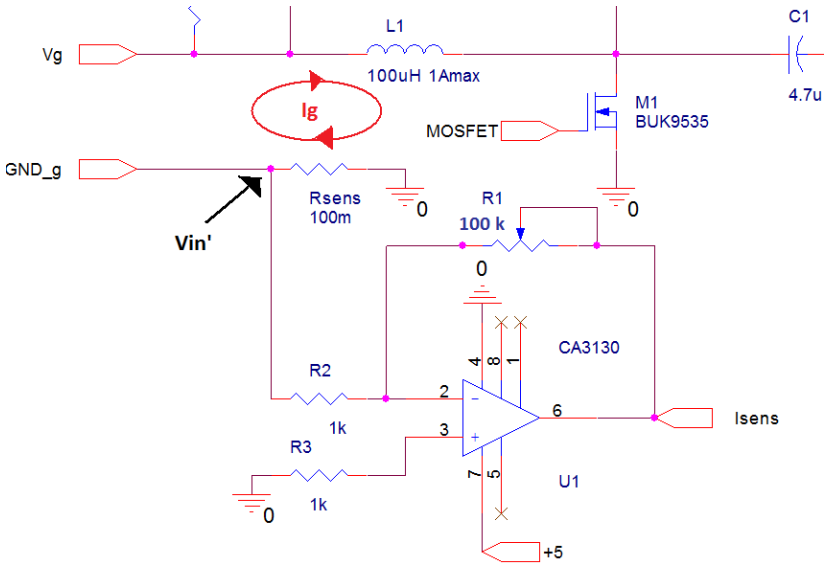


Figura 2.3.1: Esquema del sensor de corriente.

En primer lugar vamos a calcular cual es la tensión de entrada en la etapa inversora del circuito. Para ello utilizaremos la ley de ohm para determinar la tensión en el punto Vin' sabiendo que la tensión máxima que circulará por el resistor de sensado es de 1 A que este tiene una resistencia de 0.1 Ω. El sentido de la corriente es el que indica la flecha de color rojo.

$$Vin' = 0.1 \cdot (-1) = -0.1_V \qquad (2.3.1)$$

Ahora ya sabemos cual es la tensión de entrada del inversor, bastará con sustituir la Vout por 4.9 V y despejar de la formula 2.3.2 para conocer el valor de la resistencia del potenciómetro R1, que utilizaremos para ajustar la ganancia del bloque inversor.

$$Vout = -Vin\frac{R1}{R2}; \qquad (2.3.2)$$

$$4.9 = -(-0.1)\frac{R1}{1};$$

$$R1 = \frac{4.9}{0.1} = 49_k\Omega$$

Por lo tanto si el potenciómetro R1 es capaz de alcanzar los 100 kΩ al 100% los cálculos indican que deberemos fijar el potenciómetro R1 al 49% del total de su resistencia.

2.4 Perfil de carga de la batería.

En la grafica de la figura 2.4.1 se muestra el perfil de carga IUi de una batería de 12 V y 7 Ah. Este perfil de carga consta de tres fases:

- Fase con corriente constante "I" hasta lograr alcanzar la tensión U, o de un tiempo t_1 límite.
- Fase con tensión constante "U" hasta el logro de un valor de corriente absorbida constante de al menos una hora, o el logro de un tiempo t_2 límite.
- Fase con corriente constante "i" durante un tiempo predeterminado.

Para entender la gráfica necesitaremos conocer los parámetros que se describen a continuación.

I) La corriente inicial In debe estar comprendida entre el 50% y el 100% de la corriente nominal y esta a su vez debe ser igual a un quinto de la capacidad en Ah.

0.5<In<1 y In = Capacidad/5

Por ejemplo, para una batería de 7 Ah el valor de la corriente nominal de carga estará comprendida entre 0.7 y 1.4 A.

II) La tensión de referencia U es igual a 2.35 V/elemento para el perfil IUi. Se sabe que por definición un elemento es la unidad mas pequeña electroquímica posible y posee una tensión de 2 V.

Por ejemplo, para una batería de 12 V que esta compuesta por 6 elementos, la tensión de referencia es igual a 14.1 V para el perfil de carga IUi.

III) La intensidad final de carga "i" es igual a un veinteavo de la capacidad en Ah. En la gráfica corresponde al valor de la corriente I_1.

$$I_1 = \text{Capacidad}/20$$

Por ejemplo, para una batería de 7 Ah la corriente final de carga valdrá 0.35 A.

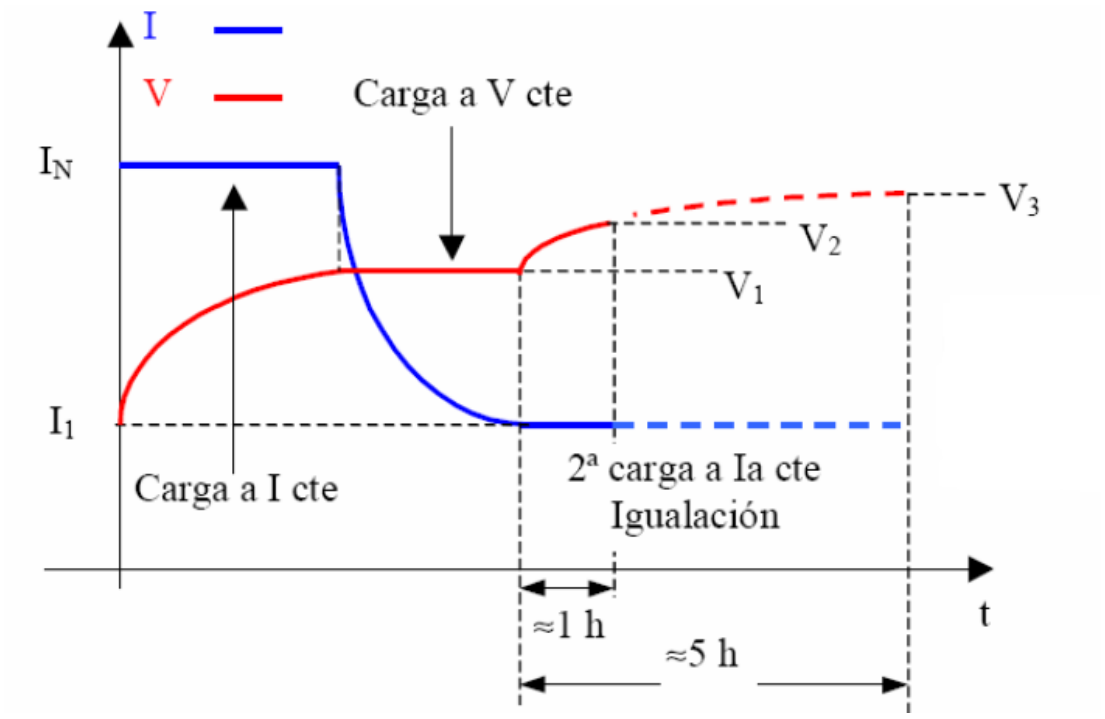


Figura 2.4.1: Perfil de carga IUi de una batería de 12 V, 7 Ah.

2.5 Medidas experimentales obtenidas con el convertidor SEPIC.

Para comprobar el funcionamiento de la placa del convertidor SEPIC se han efectuado medidas conectando la entrada de la etapa de potencia a una tensión de 10 V y 1 A, y 16 V y 1 A y en la salida una carga de 10 Ω.

La primera medida se efectuara con una tensión de entrada de 10 V. Aplicaremos la fórmula 1.5.7 para conocer el valor de la tensión de salida en función del valor del ciclo de trabajo, en este caso 50%.

$$\frac{Vo}{Vg} = \frac{D}{1-D}; \qquad (1.5.7)$$

$$Vo = Vg\frac{0.5}{1-0.5};$$

$$Vo = Vg$$

$$Vo = 10_V$$

Ciclo de trabajo al 50%, tensión de entrada 10 V:

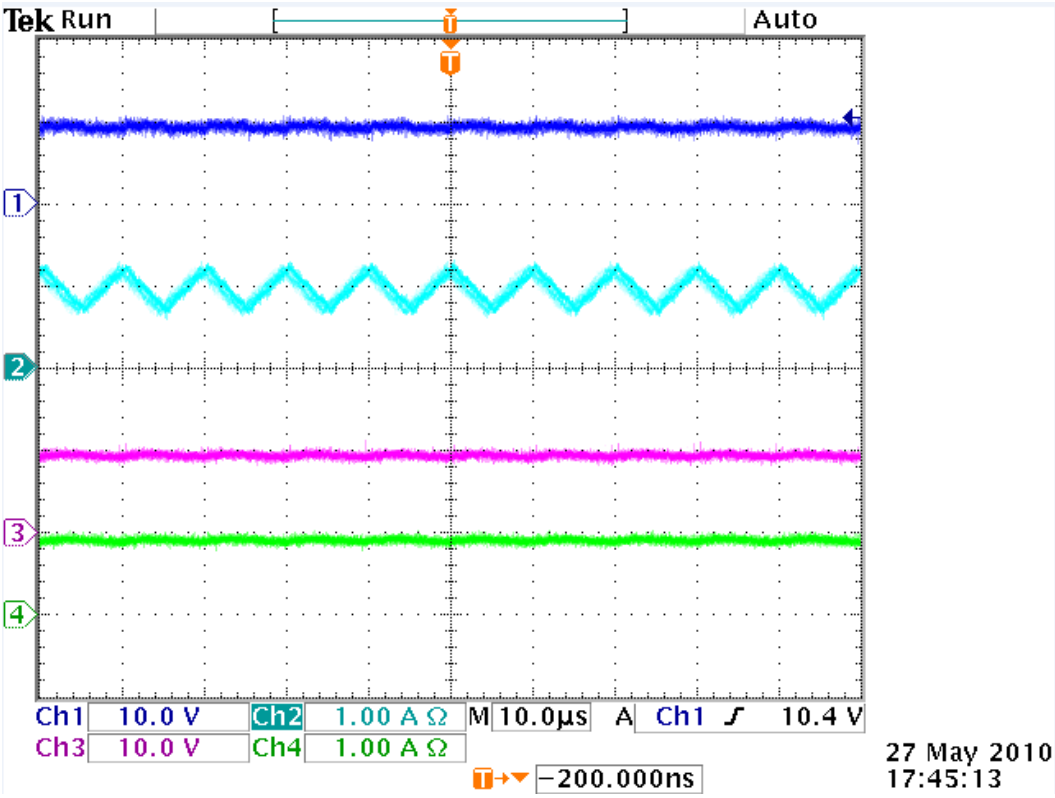


Figura 2.5.1: Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 50% y Vin = 10 V.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el convertidor funcionando en modo elevador, esto quiere decir que el ciclo de trabajo será superior al 50% con el fin de incrementar el valor de la tensión de entrada para conseguir la carga de la batería.

Ciclo de trabajo al 60%, tensión de entrada 10 V:

$$\frac{Vo}{Vg} = \frac{D}{1-D}; \qquad (1.5.7)$$

Despejando Vo y substituyendo obtenemos:

$$Vo = Vin \cdot \frac{0.6}{1-0.6};$$

$$Vo = 10 \cdot \frac{0.6}{0.4} = 15_V$$

Resultados obtenidos:

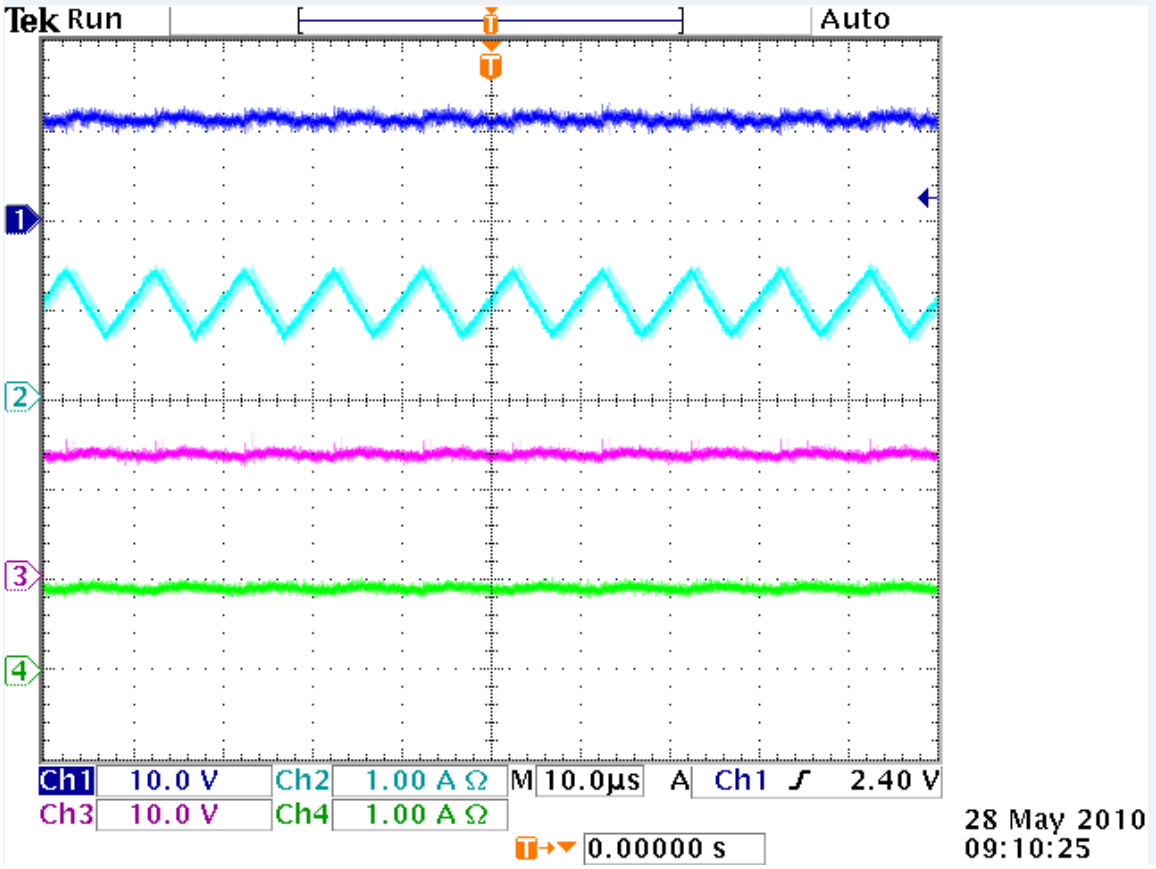


Figura 2.5.2 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 60% y Vin = 10 V.

Ciclo de trabajo 70% tensión de entrada 10V:

$$\frac{Vo}{Vg} = \frac{D}{1-D}; \qquad (1.5.7)$$

Despejando Vo y substituyendo:

$$Vo = Vin \cdot \frac{0.7}{1-0.7};$$

$$Vo = 10 \cdot \frac{0.7}{0.3} = 23.3_V$$

Resultados obtenidos:

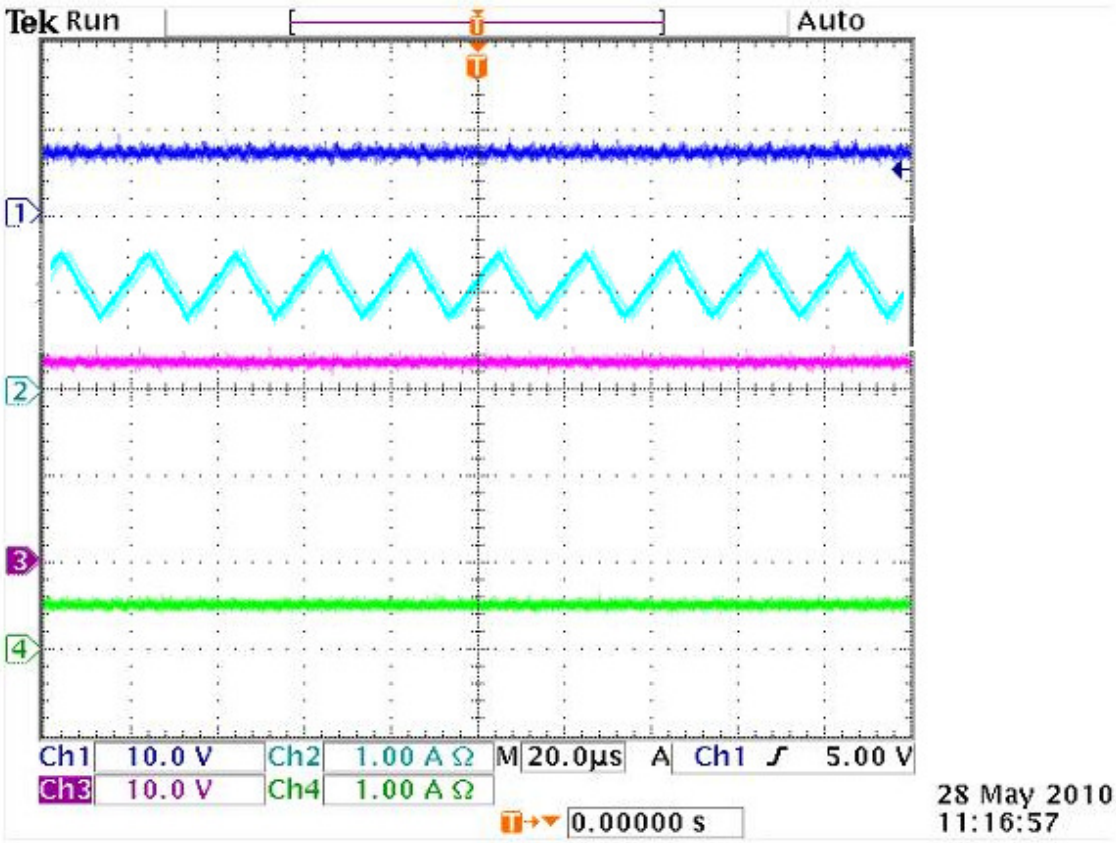


Figura 2.5.3 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 70% y Vin = 10 V.

Ciclo de trabajo 80% tensión de entrada 10V:

$$\frac{Vo}{Vg} = \frac{D}{1-D}; \qquad (1.5.7)$$

Despejando Vo y substituyendo:

$$Vo = Vin \cdot \frac{0.8}{1-0.8};$$

$$Vo = 10 \cdot \frac{0.8}{0.2} = 40_V$$

Ciclo de trabajo al 80%, tensión de entrada 10 V:

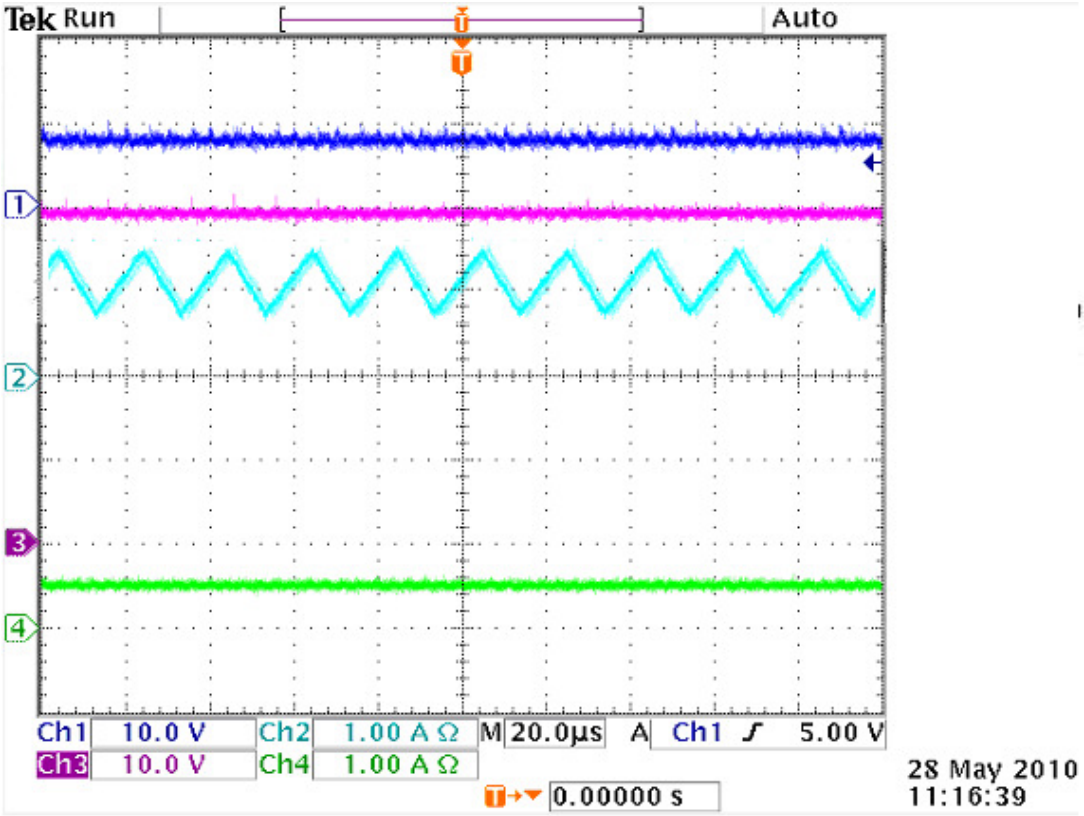


Figura 2.5.4 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida para D = 80% y Vin = 10 V.

Gracias al controlador MPPT, el convertidor SEPIC es capaz de decrementar la tensión de entrada modificando el ciclo de trabajo de disparo del interruptor, con el fin de conseguir que la tensión a la salida no supere la máxima de carga para la batería, que en nuestro caso al tratarse de una batería de 12 V se recarga de manera correcta con una tensión de 14 V. Veamos a continuación que sucede cuando aumentamos la tensión de entrada hasta 16 V.

Ciclo de trabajo 40% y tensión de entrada de 16 V.

$$\frac{Vo}{Vg} = \frac{D}{1-D}; \qquad (1.5.7)$$

Substituyendo y despejando se obtiene:

$$Vo = Vin \cdot \frac{0.4}{1-0.4};$$

$$Vo = 16 \cdot \frac{0.4}{0.6} = 10.6_V$$

Ciclo de trabajo al 40%, tensión de entrada 16 V:

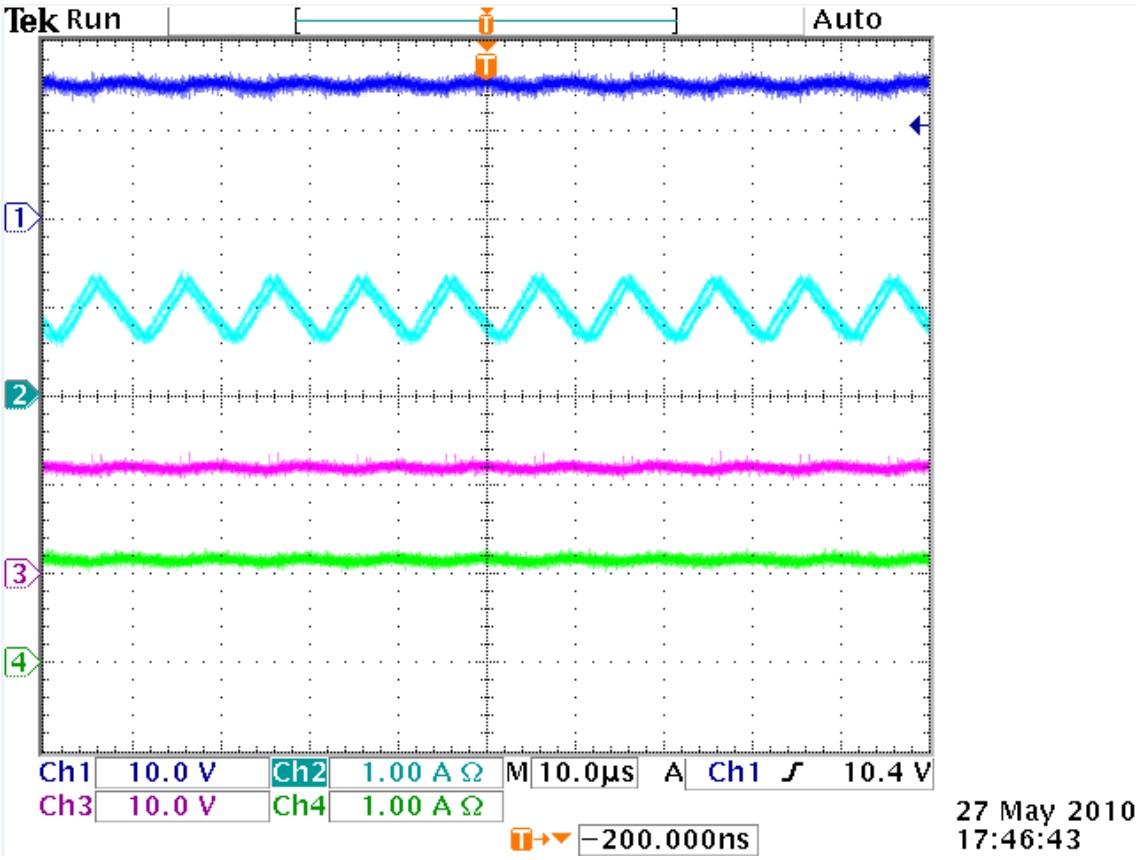


Figura 2.5.5 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida obtenidas para D = 40% y Vin = 16 V.

Ciclo de trabajo del 30% y tensión de entrada 16 V.

$$\frac{Vo}{Vg} = \frac{D}{1-D}; \qquad (1.5.7)$$

Despejando y substituyendo obtenemos:

$$Vo = Vin \cdot \frac{0.3}{1-0.3};$$

$$Vo = 16 \cdot \frac{0.3}{0.7} = 6.8_V$$

Ciclo de trabajo al 30%, tensión de entrada 16 V:

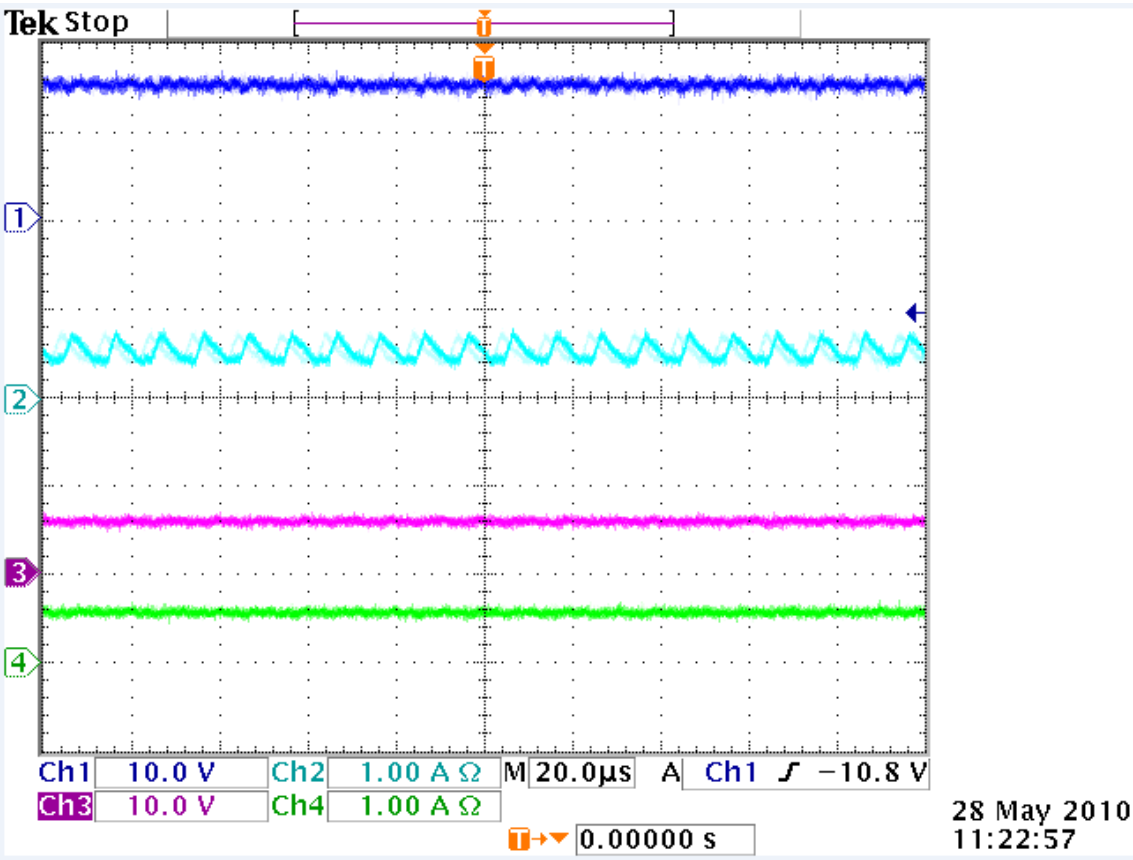


Figura 2.5.6 Medidas de las tensiones y corrientes de entrada y salida obtenidas para D = 30% y Vin = 16 V.

Ciclo de trabajo del 20% y tensión de entrada 16 V.

$$\frac{Vo}{Vg} = \frac{D}{1-D}; \qquad (1.5.7)$$

Despejando y substituyendo obtenemos:

$$Vo = Vin \cdot \frac{0.2}{1-0.2};$$

$$Vo = 16 \cdot \frac{0.2}{0.8} = 4_V$$

Ciclo de trabajo al 20%, tensión de entrada 16 V:

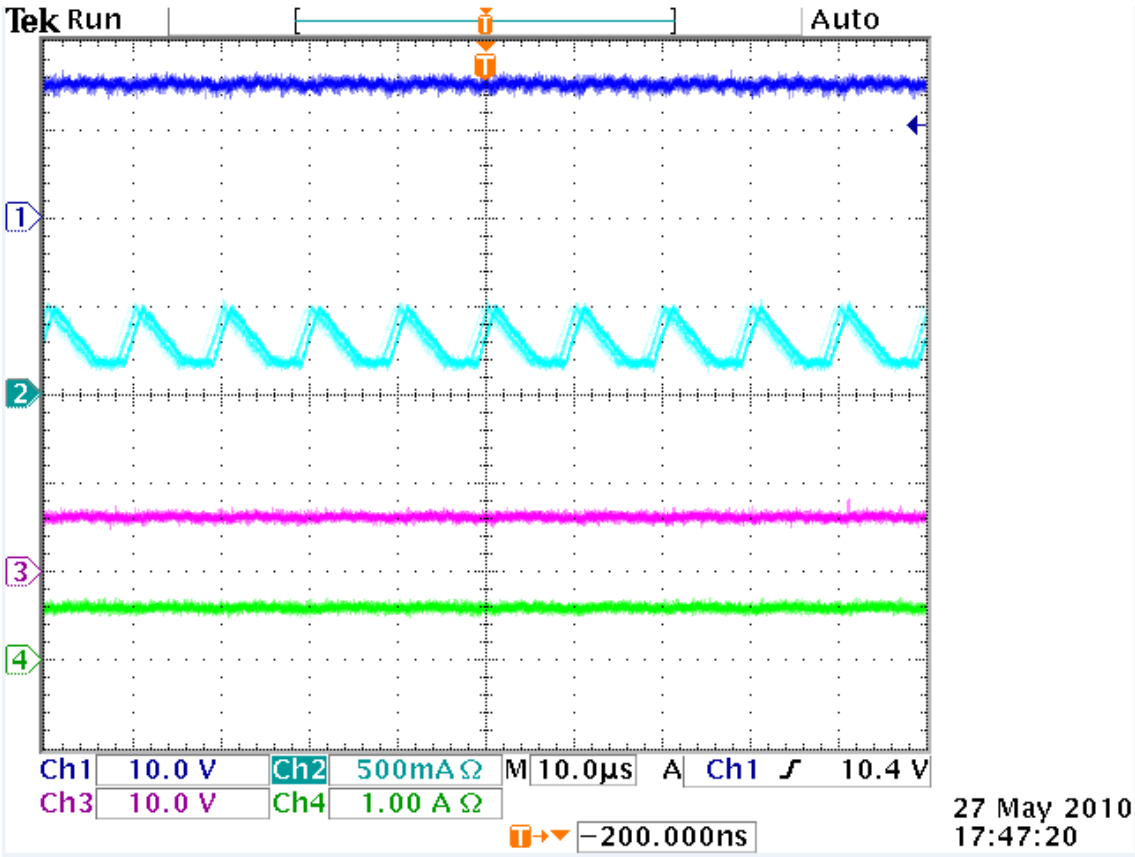


Figura 2.5.7 Medidas Vin, Iin, Vout e Iout obtenidas para D = 20% y Vin = 16 V.

2.6 Medidas experimentales tomadas con el controlador MPPT.

Para comprobar el buen funcionamiento de la etapa controladora del cargador de baterías se han efectuado medidas en la tensión de referencia generada por el microcontrolador teniendo en cuenta que este nivel de tensión proviene de una señas PWM a la cual se le ha hecho pasar por un filtro pasa bajos, con el objetivo de obtener un valor medio.

Como ya se comentó en el capitulo anterior las señales procedentes de los sensores de tensión y corrientes situados en la etapa de potencia se encargan de obtener valores de tensión proporcionales entre 0 y 5 V.

Antes de mostrar las medidas obtenidas con el controlador para diferentes valores de las señales Vsens e Isens, veremos una tabla con los diferentes valores de tensión y corriente de entrada y su valor de tensión correspondiente de sensado.

Vin(V)	Iin(A)	Vsens(V)	Isens(V)
15	1	5	5
11.25	0.75	3.75	3.75
7.5	0.5	2.5	2.5
3.75	0.25	1.25	1.25
0.3	0.02	0.1	0.1

Tabla 2.6.1: Tabla de valores de tensiones y corrientes de entrada.

A continuación se pueden observar las imágenes capturadas con el osciloscopio para diferentes valores de tensión y corriente de entrada de la tabla 2.6.1 observamos como la señal de referencia Iref en color verde corresponde con el valor medio de la señal PWM que genera el algoritmo.

En primer lugar la imagen de la figura 2.6.1 se obtuvo con el valor máximo de tensión y corriente de entrada, en amarillo la Vin= 15 V y en azul la Iin= 1 A.

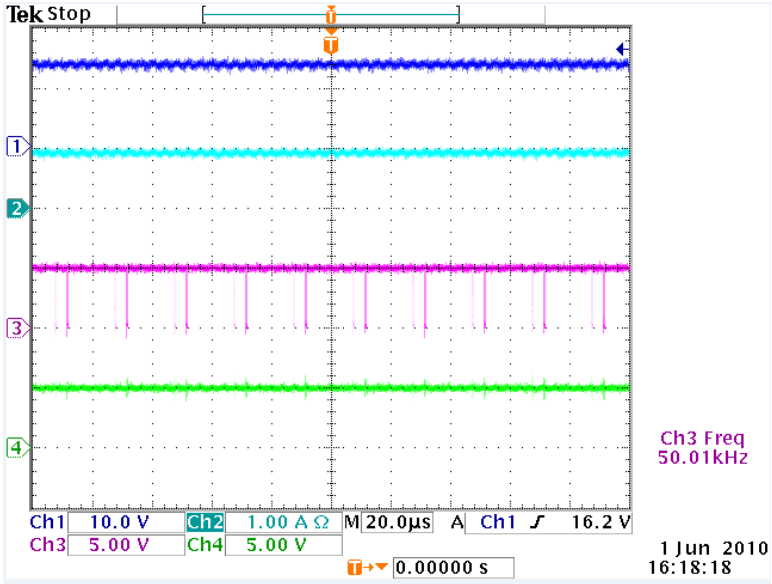


Figura 2.6.1: Medidas experimentales obtenidas con Vin= 15 V y Iin= 1 A.

Ahora las medidas para Vin=11.2 V y 0.75 A.

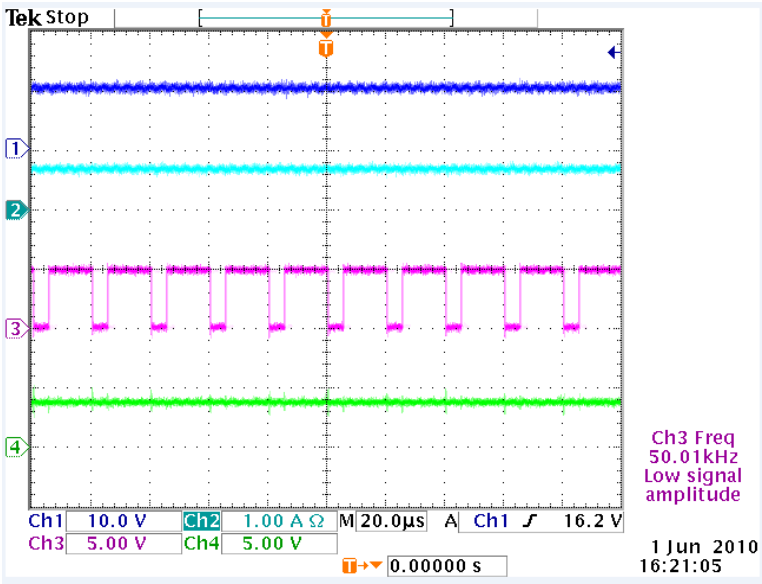


Figura 2.6.2: Medidas experimentales obtenidas con Vin= 11.2 V y Iin= 0.75 A.

Se puede observar como el algoritmo decrementa el ciclo de trabajo de la señal de control para conseguir una tensión de referencia adecuada.

A continuación las medidas para Vin=7.5 V y Iin=0.5 A.

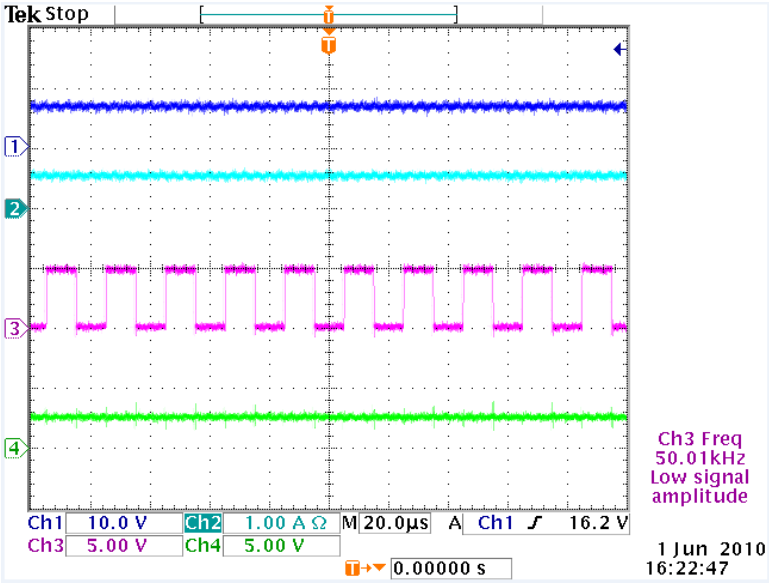


Figura 2.6.3: Medidas experimentales obtenidas con Vin= 7.5 V y Iin= 0.5 A.

El mismo efecto puede observarse para los diferentes puntos de trabajo.

Medidas para Vin=3.75 V y Iin=0.25 A.

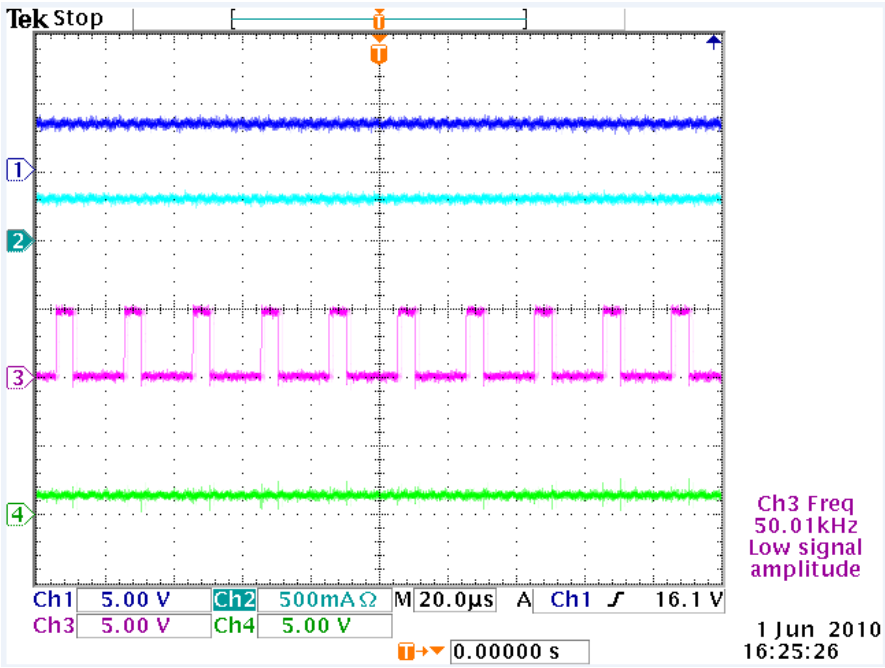


Figura 2.6.4: Medidas experimentales obtenidas con Vin= 3.75 V y Iin= 0.25 A.

Medidas obtenidas con Vin=0.3 V y Iin=0.02 A.

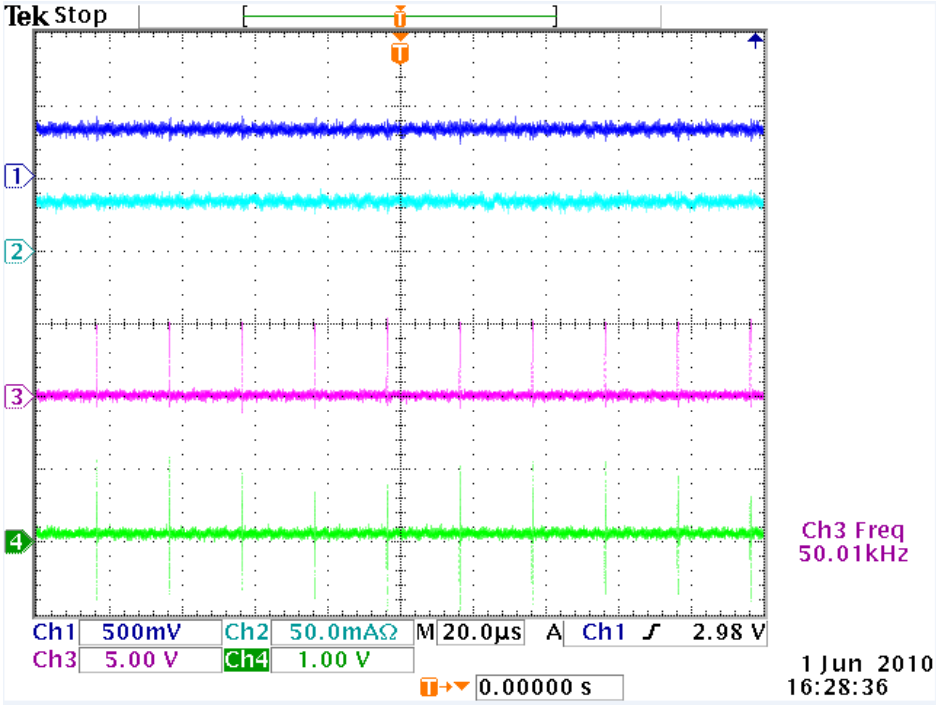


Figura 2.6.5: Medidas experimentales obtenidas con Vin= 0.3 V y Iin= 0.02 A.

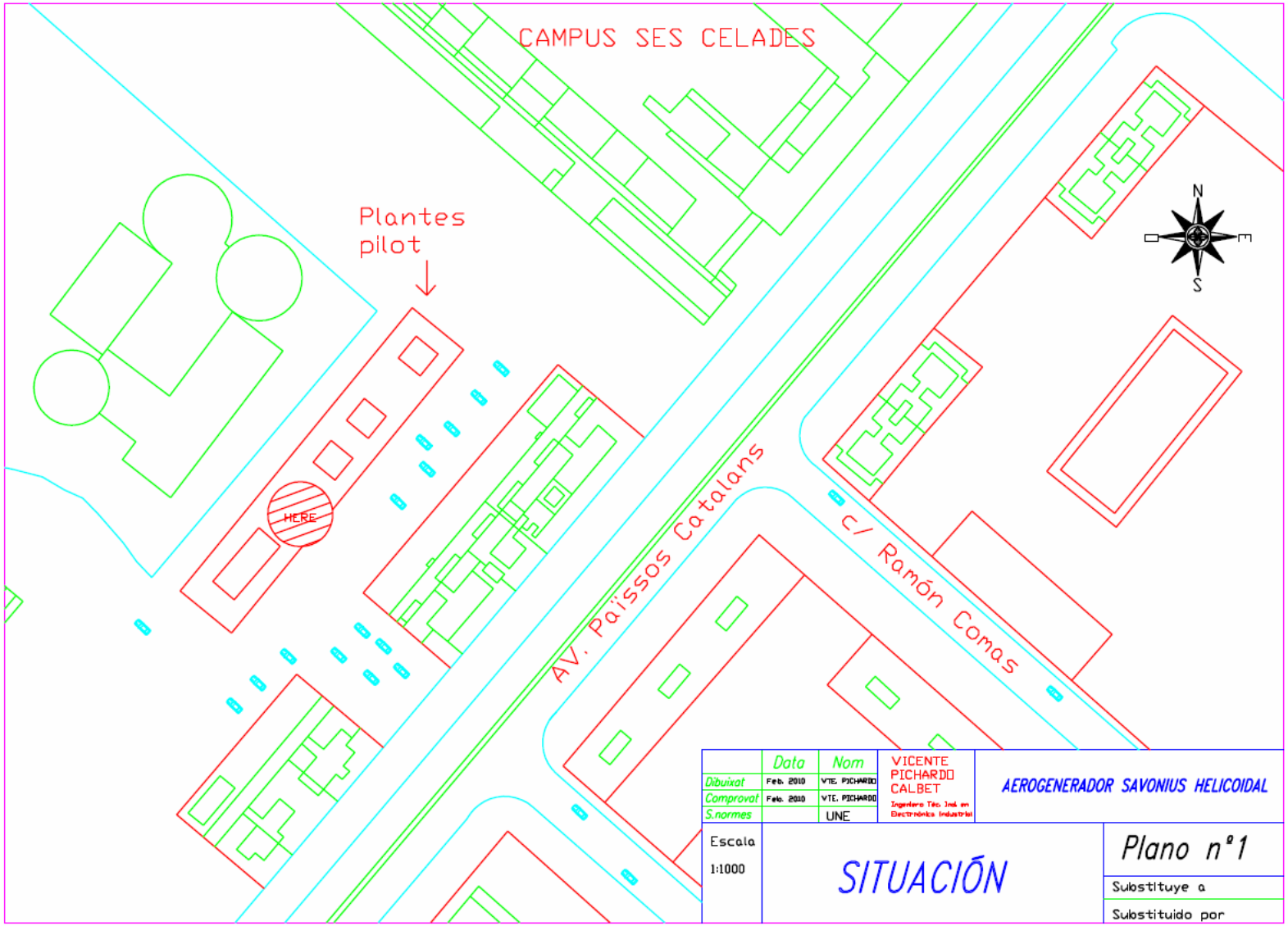
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

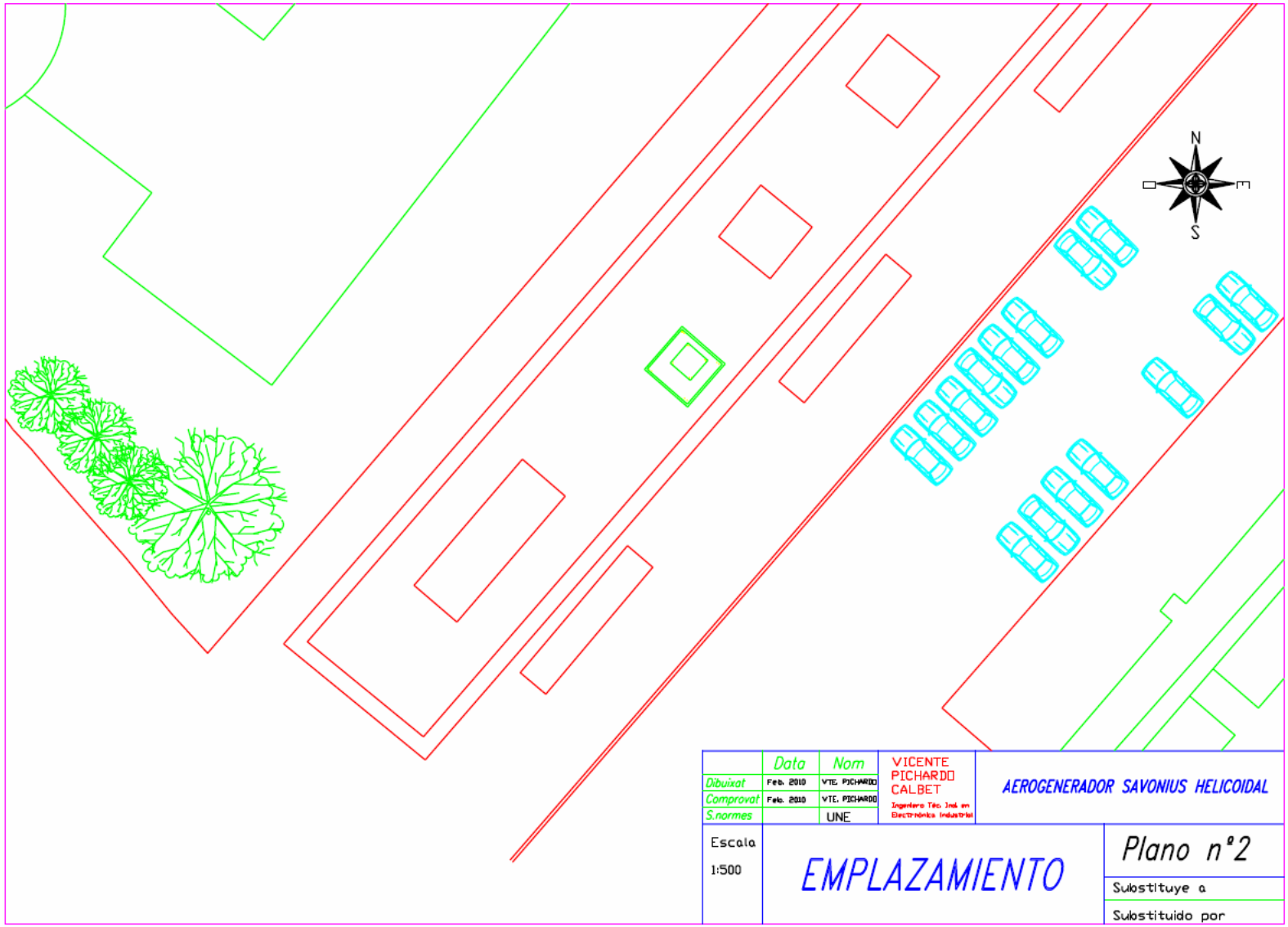
3 PLANOS Y ESQUEMAS

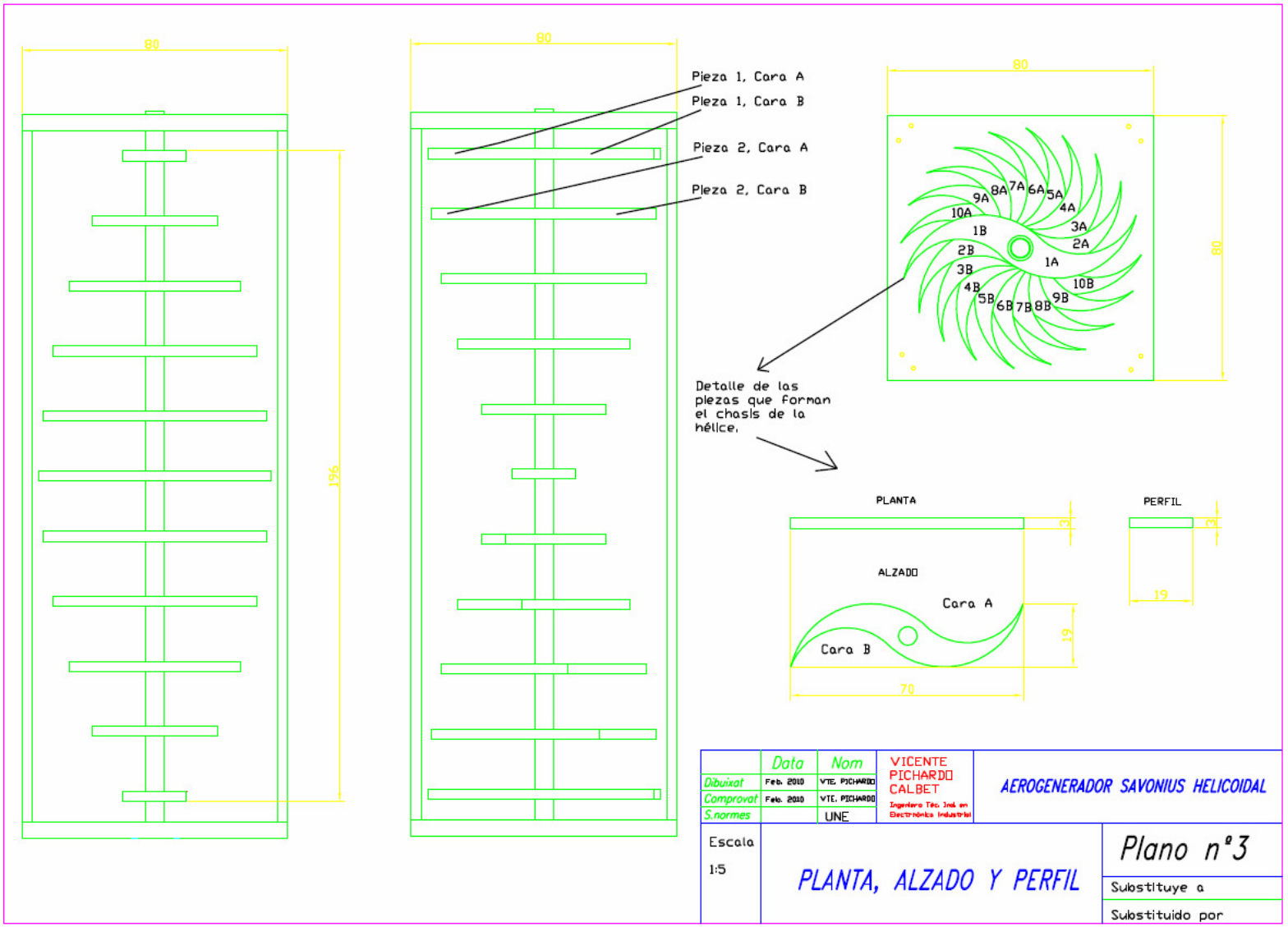
Cargador de baterías para aerogenerador Savonius Helicoidal

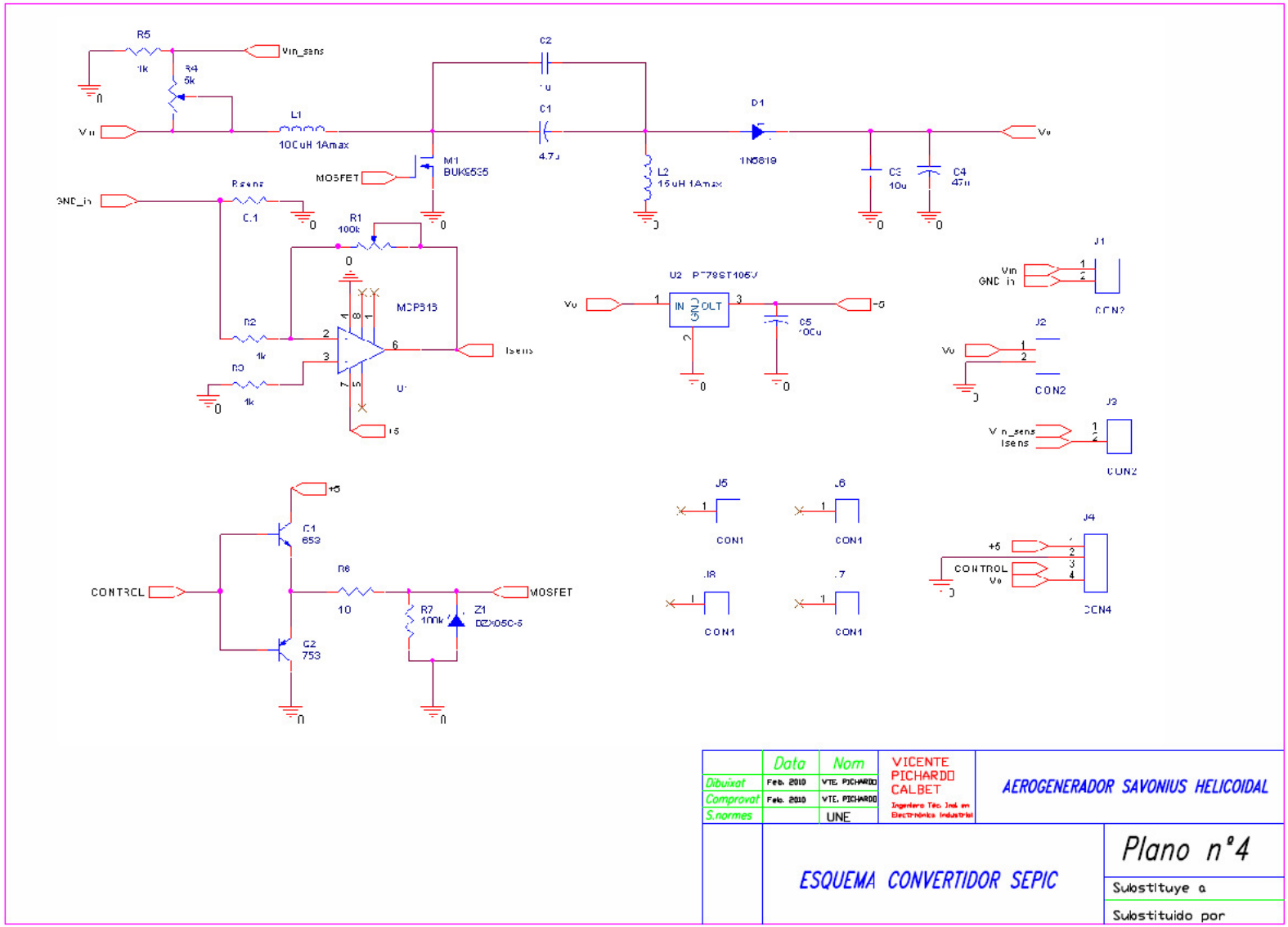
AUTOR: Vicente Pichardo Calbet
DIRECTOR: Hugo Valderrama Blavi

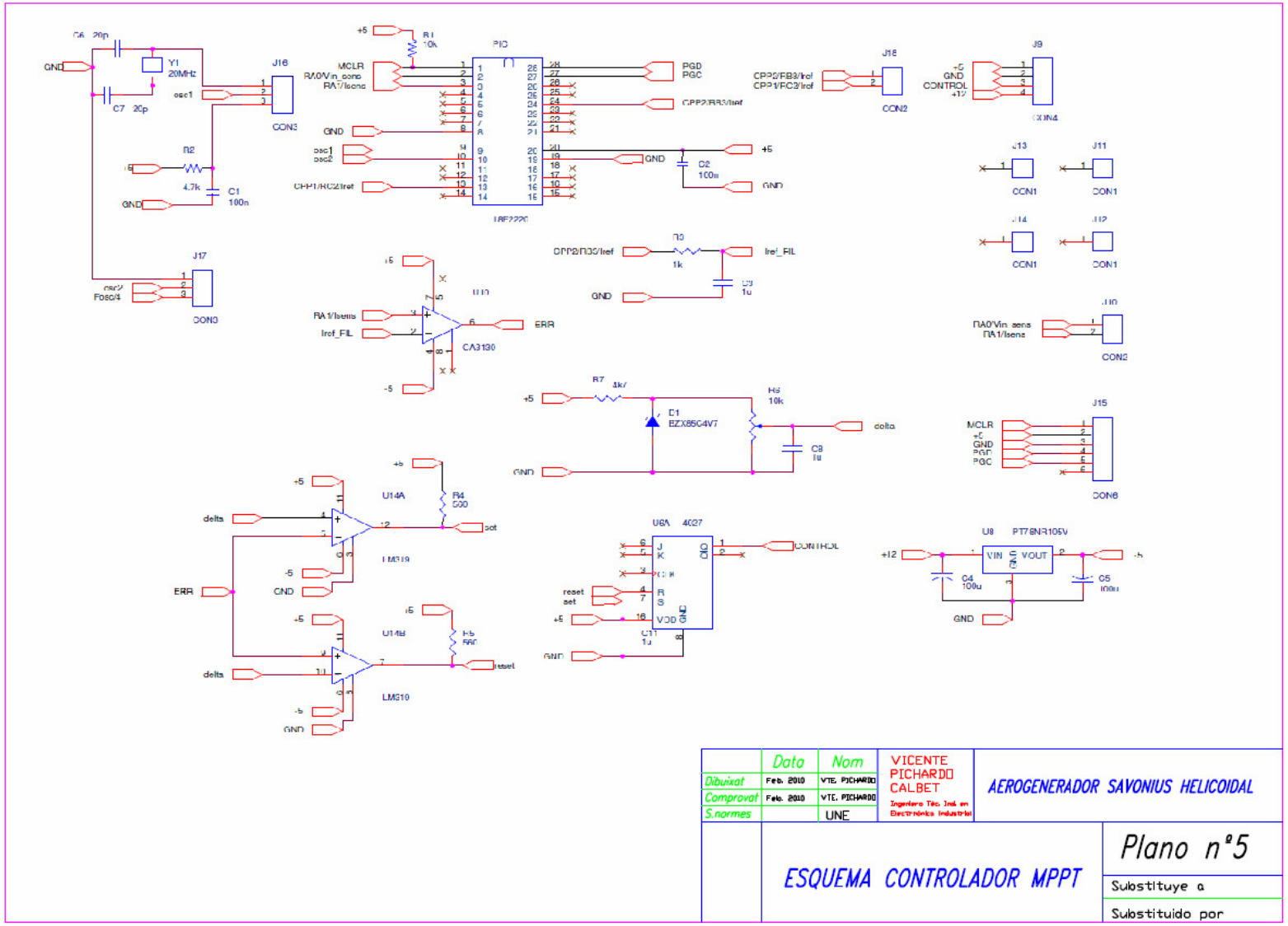
Junio de 2010


CAMPUS SES CELADES
Plantes pilot
HERE
AV. Països Catalans
C/ Ramón Comas
N
S
E
O
Data
Nom
Dibuixat
Feb. 2010
VTE. PICHARDO
Comprovat
Feb. 2010
VTE. PICHARDO
S.normes
UNE
VICENTE PICHARDO CALBET
Ingeniero Téc. Ind. en Electrónica Industrial
AEROGENERADOR SAVONIUS HELICOIDAL
Escala
1:1000
SITUACIÓN
Plano nº1
Substituye a
Substituido por


N
S
E
Data
Nom
Dibuixat
Feb. 2010
VTE. PICHARDO
Comprovat
Feb. 2010
VTE. PICHARDO
S.normes
UNE
VICENTE PICHARDO CALBET
Ingeniero Téc. Ind. en Electrónica Industrial
AEROGENERADOR SAVONIUS HELICOIDAL
Escala
1:500
EMPLAZAMIENTO
Plano nº2
Sustituye a
Sustituido por


80
196
80
Pieza 1, Cara A
Pieza 1, Cara B
Pieza 2, Cara A
Pieza 2, Cara B
80
80
1A
1B
2A
2B
3A
3B
4A
4B
5A
5B
6A
6B
7A
7B
8A
8B
9A
9B
10A
10B
Detalle de las piezas que forman el chasis de la hélice.
PLANTA
3
ALZADO
Cara A
Cara B
19
70
PERFIL
3
19
Data
Nom
Dibuixat
Feb. 2010
VTE. PICHARDO
Comprovat
Feb. 2010
VTE. PICHARDO
S.normes
UNE
VICENTE PICHARDO CALBET
Ingeniero Téc. Ind. en Electrónica Industrial
AEROGENERADOR SAVONIUS HELICOIDAL
Escala
1:5
PLANTA, ALZADO Y PERFIL
Plano nº3
Substituye a
Substituido por


R5
1k
R4
5k
Vin_sens
Vin
L1
100uH 1Amax
C2
C1
4.7u
D1
1N5819
Vo
MOSFET
M1
BUK9535
L2
15uH 1Amax
C3
10u
C4
47u
GND_in
Rsens
0.1
R1
100k
MCP313
R2
1k
R3
1k
Isens
U2 PT78ST105V
IN
GND
OUT
C5
100u
J1
Vin
GND in
CON2
J2
Vo
CON2
J3
Vin_sens
Isens
CON2
+5
Q1
653
Q2
753
CONTROL
R6
10
R7
100k
Z1
DZX05C-5
MOSFET
J5
CON1
J6
CON1
J8
CON1
J7
CON1
J4
+5
CONTROL
Vo
CON4
Data
Nom
Dibuixat
Feb. 2010
VTE. PICHARDO
Comprovat
Feb. 2010
VTE. PICHARDO
S.normes
UNE
VICENTE PICHARDO CALBET
Ingeniero Téc. Ind. en Electrónica Industrial
AEROGENERADOR SAVONIUS HELICOIDAL
ESQUEMA CONVERTIDOR SEPIC
Plano nº4
Sustituye a
Sustituido por


ESQUEMA CONTROLADOR MPPT
AEROGENERADOR SAVONIUS HELICOIDAL
VICENTE PICHARDO CALBET
Ingeniero Téc. Ind. en Electrónica Industrial
Data
Nom
Dibuixat
Comprovat
S.normes
UNE
Plano nº5
Substituye a
Substituido por

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

4 PRESUPUESTO

Cargador de baterías para aerogenerador Savonius Helicoidal

AUTOR: Vicente Pichardo Calbet
DIRECTOR: Hugo Valderrama Blavi

Junio de 2010

Código	uds	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
		CAPITULO 1: AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL			
N.D	kg	GelCoat	1	12.37	12.37
N.D	kg	Resina Poliéster Palatal	2	11.25	22.50
N.D	m	Listón de madera de pino 50x30 mm	4.84	6.80	32.91
N.D	m^2	Tablero marino 15 mm	0.41	28.60	11.72
N.D	m^2	Tablero marino 20 mm	1.69	35.65	71.30
N.D	u	Rodamiento abierto 1 hilera, diámetro int. 30 mm	2	9.96	19.92
N.D	m^2	Fibra de vidrio	5	4.86	24.30
N.D	m	Eje de madera de 29 mm de diámetro	1.40	3.98	5.57

TOTAL CAPITULO 1 AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL.....200,59 €

Código	uds	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
		CAPITULO 2: CONVERTIDOR SEPIC			
537-5488	ud	Batería de plomo ácido recargable 12 V 7 Ah	1	12.57	12.57
N.D	ud	Motor CC 6 V	1	9.42	9.42
464-2892	ud	Transistor MOSFET canal N BUK9535-55 A	2	1.38	2.76
654-7145	ud	Diodo Schotky 1N5819 1 A 40 V	2	0.22	0.44
N.D	ud	Inductor 100 uH 1 A	1	2.21	2.21
N.D	ud	Inductor 15 uH 1 A	1	1.42	1.42
571-808	ud	Condensador electrolítico 4.7 uF 50 V	1	0.29	0.29
572-198	ud	Condensador electrolítico 47 uF 50V	1	0.38	0.38
684-1942	ud	Condensador electrolítico 100 uF 25V	1	0.88	0.88
295-517	ud	Transistor NPN ZTX653	1	0.61	0.61
295-539	ud	Transistor PNP ZTX753	1	0.71	0.71
363-6810	ud	Resistor de sensado de corriente 100 mΩ	2	5.22	10.44
823-998	ud	Condensador poly. 1 uF 63 V	1	0.40	0.40
334-388	ud	Condensador poly. 10 uF 63 V	1	1.90	1.90

4.1 PRESUPUESTO

Código	uds	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
667-4446	ud	Amplificador operacional MCP616	2	0.79	1.58
661-7623	ud	Regulador de tensión conmutado PT78ST105H	1	15.12	15.12
135-702	ud	Resistencia ¼ W 10 Ω	2	0.04	0.08
135-982	ud	Resistencia ¼ W 100 kΩ	2	0.04	0.08
135-847	ud	Resistencia ¼ W 1 kΩ	2	0.04	0.08
453-123	ud	Juego de conector 2 vias gama MolexKK	3	1.70	5.10
467-649	ud	Juego de conector 4 vias gama MolexKK	1	5.20	5.20
812-392	ud	Diodo Zener BZX85CV1	2	0.92	1.84
154-2410	ud	Potenciometro multivuelta Cermet 64Y ¼ W 5 kΩ	1	1.51	1.51
183-5267	ud	Potenciometro multivuelta Cermet 64Y ¼ W 50 kΩ	1	1.32	1.32

TOTAL CAPITULO 2 CONVERTIDOR SEPIC.....76.34 €

Código	uds	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
		CAPITULO 3: CONTROLADOR MPPT			
623-0538	ud	Microcontrolador PIC 18F2220	2	2.11	4.22
519-0209	ud	Flip-Flop MC14027BCP	2	0.59	1.18
331-6421	ud	Conector RJ 6 pins	1	0.52	0.52
661-7584	ud	Regulador de Tensión conmutado PT78NR105H	1	15.52	15.52
154-2432	ud	Potenciómetro multivuelta Cermet 64Y 10 kΩ	1	1.51	1.51
533-5749	ud	Comparador doble integrado LM319AJ	2	1.08	2.16
496-836	ud	Amplificador operacional integrado CA3130	2	0.92	1.84
812-392	ud	Diodo zener BZX85C5V1	1	0.92	0.92
226-1853	ud	Oscilador Cristal 20 MHz HC49	1	0.79	0.79
166-6487	ud	Condensador poly. 100 nF 100V	5	0.97	4.89
823-998	ud	Condensador poly. 1 uF 100V	2	0.40	0.80
684-1942	ud	Condensador electrolítico 100 uF 25V	2	0.88	1.76
135-904	ud	Resistencia ¼ W 4.7 kΩ	2	0.03	0.06
151-505	ud	Resistencia ¼ W 560 Ω	2	0.03	0.06

Código	uds	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
135-910	ud	Resistencia ¼ W 10 kΩ	2	0.04	0.08
385-922	ud	Resistencia ¼ W 1 kΩ	2	0.02	0.04
453-123	ud	Juego conector 2 vias gama MolexKK	2	1.70	3.40
467-649	ud	Juego conector 4 vias gama MolexKK	1	5.20	5.20

TOTAL CAPITULO 3 CONTROLADOR MPPT.....44.95 €

Código	Uts	Descripción	Precios
		CAPITULO 1: AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL	
N.D	kg	Gelcoat de EURORESINS	12.37 DOCE EUROS CON TRENTA Y SITE CÉNTIMOS.
N.D	kg	Resina de poliéster palatal	11.25 ONCE EUROS CON VENTICINCO CÉNTIMOS.
N.D	m	Listón de madera de pino 50x30	6.80 SEIS EUROS CON OCHENTA CÉNTIMOS.
N.D	m^2	Tablero marino 15 mm espesor	28.60 VENTIOCHO EUROS CON SESENTA CÉNTIMOS.
N.D	m^2	Tablero marino 25 mm espesor	35.65 TRENTA Y CINCO EUROS CON SESENTA Y CINCO CÉNTIMOS.
N.D	u	Rodamiento abierto	9.96 NUEVE EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS.
N.D	m^2	Fibra de vidrio tipo R	4.86 CUATRO EUROS CON OCHENTA Y SEIS CÉNTIMOS.
N.D	m	Eje de madera de 29 mm de diámetro	3.98 TRES EUROS CON NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS.

Código	Uts	Descripción	Precios
		CAPITULO 2: CONVERTIDOR SEPIC	
537-5488	ud	Batería de plomo ácido recargable	12.57 DOCE EUROS CON CINCUENTA Y SITE CÉNTIMOS.
N.D	ud	Motor CC 6V	9.42 NUEVE EUROS CON CUARENTA Y DOS CENTIMOS.
464-2892	ud	Transistor MOSFET canal N BUK9535	1.38 UN EURO CON TRENTA Y OCHO CENTIMOS.
654-7145	ud	Diodo Schotky 1N5819 1 A 40 V	0.22 VEITIDOS CÉNTIMOS DE EURO.
N.D	ud	Inductor 100 uH 1 A	2.21 DOS EUROS CON VEINTI UN CÉNTIMOS.
N.D	ud	Inductor 15 uH 1 A	1.42 UN EURO CON CUARENTA Y DOS CÉNTIMOS.
571-808	ud	Condensador electrolítico 4.7 uF 50 V	0.29 VEINTINUEVE CÉNTIMOS DE EURO.
572-198	ud	Condensador electrolítico 47 uF 50V	0.38 TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS DE EURO.
684-1942	ud	Condensador electrolítico 100 uF 25V	0.88 OCHENTA Y OCHO CÉNTIMOS DE EURO.
295-517	ud	Transistor NPN ZTX653	0.61 SESENTA Y UN CÉNTIMO DE EURO.
295-539	ud	Transistor PNP ZTX753	0.71 SETENTA Y UN CÉNTIMO DE EURO.
363-6810	ud	Resistor de sensado 100 mΩ	5.22 CINCO EUROS CON VEINTIDÓS CÉNTIMOS.
823-998	ud	Condensador poly. 1 uF 63 V	0.40 CUARENTA CÉNTIMOS DE EURO.
334-388	ud	Condensador poly. 10 uF 63 V	1.90 UN EURO CON NOVENTA CÉNTIMOS.
667-4446	ud	Amplificador operacional MCP616	0.79 SETENTA Y NUEVE CÉNTIMOS DE EURO.
661-7623	ud	Regulador de tensión PT78ST105H	15.12 QUINZE EUROS CON DOCE CÉNTIMOS.

4.2 PRECIOS UNITARIOS

Código	Uts	Descripción	Precios	
135-702	ud	Resistencia ¼ W 10 Ω	0.04	CUATRO CÉNTIMOS DE EURO.
135-982	ud	Resistencia ¼ W 100 kΩ	0.04	CUATRO CÉNTIMOS DE EURO.
135-847	ud	Resistencia ¼ W 1 kΩ	0.04	CUATRO CÉNTIMOS DE EURO.
453-123	ud	Conector 2 vias gama MolexKK	1.70	UN EURO CON SETENTA CÉNTIMOS.
467-649	ud	Conector 4 vias gama MolexKK	5.20	CINCO EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS.
812-392	ud	Diodo Zener BZX85CV1	0.92	NOVENTA Y DOS CÉNTIMOS DE EURO.
154-2410	ud	Potenciometro multivuelta ¼ W 5 kΩ	1.51	UN EURO CON CINCUENTA Y UN CÉNTIMOS.
183-5267	ud	Potenciometro multivuelta ¼ W 50 kΩ	1.32	UN EURO CON TREINTA Y DOS CÉNTIMOS.

Código	Uts	Descripción	Precios
		CAPITULO 3: CONTROLADOR MPPT	
623-0538	ud	Microcontrolador PIC 18F2220	2.11 DOS EUROS CON ONCE CÉNTIMOS.
519-0209	ud	Flip-Flop MC14027BCP	0.59 CINCUENTA Y NUEVE CÉNTIMOS DE EURO.
331-6421	ud	Conector RJ 6 pins	0.52 CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS.
661-7584	ud	Regulador de Tensión PT78NR105H	15.52 QUINZE EUROS CON CINCUENTA Y DOS.
154-2432	ud	Potenciómetro multivuelta 10 kΩ	1.51 UN EURO CON CINUENTA Y UN CÉNTIMOS.
533-5749	ud	Comparador doble integrado LM319	1.08 UN EURO CON OCHO CÉNTIMOS.
496-836	ud	Amplificador operacional CA3130	0.92 NOVENTA Y DOS CÉNTIMOS DE EURO.
812-392	ud	Diodo zener BZX85C5V1	0.92 NOVENTA Y DOS CÉNTIMOS DE EURO.
226-1853	ud	Oscilador Cristal 20 MHz HC49	0.79 SETENTA Y NUEVE CÉNTIMOS.
166-6487	ud	Condensador poly. 100 nF 100V	0.97 NOVENTA Y SIETE CÉNTIMOS DE EURO.
823-998	ud	Condensador poly. 1 uF 100V	0.40 CUARENTA CÉNTIMOS. DE EURO.
684-1942	ud	Condensador electrolítico 100 uF 25V	0.88 OCHENTA Y OCHO CÉNTIMOS DE EURO.
135-904	ud	Resistencia ¼ W 4.7 kΩ	0.03 TRES CÉNTIMOS DE EURO.
151-505	ud	Resistencia ¼ W 560 Ω	0.03 TRES CÉNTIMOS DE EURO.
135-910	ud	Resistencia ¼ W 10 kΩ	0.04 CUATRO CÉNTIMOS DE EURO.

4.2 PRECIOS UNITARIOS

Código	Uts	Descripción	Precios
385-922	ud	Resistencia ¼ W 1 kΩ	0.02 DOS CÉNTIMOS DE EURO.
453-123	ud	Conector 2 vias gama MolexKK	1.70 UN EURO CON SETENTA CÉNTIMOS.
467-649	ud	Conector 4 vias gama MolexKK	5.20 CINCO EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS.

4.3 RESUMEN DEL PRESUPUESTO

El presupuesto del proyecto de la instalación de captación de energia eólica de 8 W, asciende a la cantidad de dos cientos dre euros con eren céntimos.

Capitulo	Resumen	Importe
1	PROTOTIPO AEROGENERADOR HELICOIDAL.....	**200.59€**
2	CONVERTIDOR SEPIC.....	**76.34€**
3	CONTROLADOR MPPT:.....	**44.95€**
	(Presupuesto de ejecución material) PEM:	**321.88€**
	13 % Gastos generales:	**41.84€**
	6 % Beneficio Industrial:	**19.31€**
	PRESUPUESTO DE CONTRATA :	**383.03€**
	16 % IVA :	**61.28€**
	TOTAL PRESUPUESTO GENERAL :	**444.31€**

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

5 PLIEGO DE CONDICIONES

Cargador de baterías para aerogenerador Savonius helicoidal.

AUTOR: Vicente Pichardo Calbet
DIRECTOR: Hugo Valderrama Blavi

Junio de 2010

5.1 Disposiciones preeliminares.

La legislación que hay que tener como punto de referencia para la realización del proyecto es la siguiente:

-Real Decreto 2818/1999, de 23 de diciembre, sobre producción de energía eléctrica para instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energías renovables, residuos o cogeneración.

-Real Decreto 436/2004, del 12 de marzo, por el cual se establece la metodología para la actuación y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

-Real Decreto 1955/2000, del 1 de diciembre, por el cual se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.

-Ley 54/1997, del 27 de noviembre, del Sector Eléctrico.

-Real Decreto 842/2002, del 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión y sus instrucciones técnicas complementarias.

-Ley 31/1995, del 8 de noviembre, sobre la prevención de riesgos laborales (BOE nº269 del 10 de noviembre).

-Ley 54/2003, del 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales.

5.2 Disposiciones legales y normas aplicadas.

Para la redacción de este proyecto se han tenido en cuenta las siguientes disposiciones legales:

- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, de 2 de Agosto de 2002 e instrucciones técnicas complementarias al mismo.
- CTE-DB-HE (Ahorro de Energía).
- Normas UNE de obligado cumplimento.
- Normas UNE relativas a instalaciones eléctricas.
- RD 444/94, sobre compatibilidad electromagnética.
- RD 7/88 del Ministerio de Industria y Energía sobre exigencias de seguridad del material eléctrico.
- RD 254/95 que modifica el RD 7/88.
- RD 1627/1997 de 24 de Octubre (BOE: 25/10/97), Disposiciones mínimas de Seguridad y Salud a les obres de construcción. Transposición de la Directiva 92/57/UE.
- RD 463/2004 sobre producción de energía eléctrica mediante recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración.
- Ordenanza general de seguridad e higiene en el trabajo. Orden de 9 de Marzo de 1971, del Ministerio de Trabajo (BOE núm. 64 i 65, 17/03/1971) (CE-BOE núm. 82, 06/03/1971).
- Disposiciones mínimas de seguridad y salud en lugares de trabajo.
- Real Decreto 486/1997, de 14 d'abril, del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (BOE núm. 97, 23/04/1997).
- Real Decreto 1627/1997, de 24 d'octubre del Ministerio de la Presidencia (BOE núm. 256, 25/10/1997)
- Ordenanzas municipales del ayuntamiento de Tarragona.

Para la ejecución de la obra, la Dirección Facultativa se basará en las normas de ejecución material incluidas en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión y de las Instrucciones Complementarias actualmente en vigor, así como en les normas concretas que detallan los puntos del Reglamento Electrotécnico publicados por la Dirección General de la Energía del Ministerio de Industria.

5.3 Medidas de prevención y protección.

Como criterio general tendrán preferencia las protecciones colectivas frente a las individuales. Además, se deberán de mantener en buen estado de conservación los medios auxiliares, la maquinaria y las herramientas de trabajo. Por otro lado los medios de protección deberán estar homologados según la normativa vigente.

Medidas de Protección Colectiva.

Organización y planificación de los trabajos para evitar interferencias entre las diferentes tareas y circulaciones dentro de la obra.

Señalización de las zonas de peligro.

Prever el sistema de circulación de vehículos y su señalización, tanto en el interior de la obra como en relación con los viales exteriores.

Inmovilización de camiones mediante falcas y/o topes durante las tareas de carga y descarga.

Respetar las distancias de seguridad con las instalaciones existentes.

Los elementos de las instalaciones deben estar con sus protecciones aislantes.

Revisión periódica y mantenimiento de maquinaria y equipos de obra.

Adecuación de soluciones de ejecución al estado real de los elementos (subsuelo, edificaciones vecinas).

Comprobación de apuntalamientos, condiciones de estribados y pantallas de protección de zanjas.

Utilización de pavimentos antideslizantes.

Colocación de barandas de protección en lugares con peligro de caída. Colocación de redes en agujeros horizontales.

Protección de agujeros y fachadas para evitar la caída de objetos (redes, lonas).

Uso de escaleras de mano, plataformas de trabajo y andamios.

Medidas de Protección Individual

Utilización de caretas y gafas homologadas contra el polvo y la proyección de partículas.

Utilización de calzado de seguridad.

En todas las zonas elevadas donde no haya sistemas fijos de protección será necesario establecer puntos de anclaje seguros para poder sujetar el cinturón de seguridad homologado, la utilización del cual será obligatoria.

Utilización de guantes homologados para evitar el contacto directo con materiales agresivos y minimizar el riesgo de cortes y pinchazos.

Utilización del casco.

Utilizaciones de protectores auditivos homologados en ambientes excesivamente ruidosos.

Utilización de delantales.

Sistemas de sujeción permanente y de vigilancia de trabajos con peligro de intoxicación para más de un operario.

Utilización de equipos de suministro de aire.

Medidas de Protección a Terceros.

Cierre, señalización y alumbrado de la instalación. En caso de que el cierre invada la calzada, ha de preverse un pasillo protegido para el paso de peatones. El cierre debe impedir que personas ajenas a la obra puedan entrar.

Inmovilización de camiones mediante falcas y/o topes durante las tareas de carga y descarga.

Adecuación de soluciones de ejecución al estado real de los elementos (subsuelo, edificaciones vecinas).

Primeros auxilios.

Se dispondrá de una lista con el contenido de material especificado en la normativa vigente. Se informará al inicio de la instalación, de la situación de los diferentes centros médicos a los cuales se deberán de trasladar a los accidentados. Es conveniente disponer en la instalación y en lugar bien visible, de una lista con los teléfonos y direcciones de los centros asignados para urgencias, ambulancias, taxis, etc., para garantizar el rápido traslado de los posibles accidentados.

5.4 Condicionantes de materiales y equipos.

Todos los material serán de buena calidad y de reconocida casa comercial. Tendrán las dimensiones que indiquen los documentos del proyecto y que fije la dirección facultativa.

Los materiales serán reconocidos en obra antes de su utilización por la dirección facultativa, sin la aprobación de la cual no podrán ser empleados en la obra.

El contratista proporcionará a la dirección facultativa muestras de los materiales para su aprobación. Los ensayos y análisis que la dirección facultativa crea necesarios se realizarán en laboratorios autorizados para tal efecto.

Los accesorios, cajas, bornes, pequeño material y equipos serán de buena calidad y estarán igualmente exentos de defectos, tanto en la su fabricación como en la calidad de los materiales.

Mantenimiento de la batería.

Gracias a su tecnología, a su construcción y a los materiales usados las baterías Plomo-Gel con recombinación de gas, requieren un mantenimiento muy reducido, pudiéndose considerar sin mantenimiento, siempre que el ambiente y las condiciones operativas sean correctas.

Las baterías Plomo-Gel con recombinación de gas utilizan como electrolito ácido sulfúrico diluido, si bien no en forma líquida sino gelificado. La cantidad de electrolito contenido, en la batería, es suficiente para toda la duración de su vida prevista.

Durante el funcionamiento no es necesario rellenar con electrolito o con agua desmineralizada. Está prohibido abrir las baterías para controlar el nivel del electrolito y rellenar. Las baterías Plomo-Gel con recombinación de gas pueden operar y ser cargadas en ambientes habitados, por cuanto no producen olores.

Puesto que las baterías Plomo-Gel con recombinación de gas son aparatos de alta calidad, para el almacenamiento de energía, absolutamente ningún problema será asociado a su comportamiento o a su movimiento, hecho salvo que no sean tratadas y utilizadas de modo razonable.

Las reglas más importantes son:

- No tenga miedo de ellas.
- La tecnología, la construcción y los materiales utilizados en las baterías Plomo-Gel con recombinación de gas, las hacen robustas.
- Demasiada manutención es dañina.
- Usar las baterías. Es, totalmente errado, el querer preservar las baterías evitando el usarlas cuando no sea necesario. Cada oportunidad se debe de utilizar y someterla a una pequeña descarga. Este no tiene efectos negativos sobre la vida de la batería.

Los utensilios necesarios para el mantenimiento de la batería son los siguientes:

- Cepillo con cerdas de latón y herramienta especial para la limpieza de los polos terminales.
- Voltímetro.
- Trapos para limpieza.

5.5 Ejecución del montaje del prototipo.

Las tareas de montaje del prototipo, se ejecutaran de acuerdo con lo expuesto en el presente proyecto y con lo que dictamine la dirección facultativa.

El replanteo de las instalaciones se ajustará por el director del proyecto, marcando sobre el terreno claramente todos los puntos necesarios por la ejecución de la misma, y siguiendo las indicaciones fijadas en el presente proyecto.

La instalación se construirá en su totalidad utilizando materiales y procedimientos de ejecución que garanticen las exigencias de servicio, durabilidad y mantenimiento. Se tendrán en cuenta las especificaciones dadas por los fabricantes de cada uno de los componentes.

A efectos de las especificaciones de montaje de la instalación, estas se complementarán con la aplicación de las reglamentaciones vigentes que tengan competencia en el caso.

Es responsabilidad del suministrador comprobar que el edificio reúne las condiciones necesarias para soportar la instalación, indicándolo expresamente en la documentación.

Es responsabilidad del suministrador comprobar la calidad de los materiales, procurando que se ajusten a lo especificado en estas normas y evitar el uso de materiales incompatibles entre sí.

El suministrador será responsable de la vigilancia de sus materiales durante el almacenamiento y el montaje, hasta la recepción provisional.

Especial cuidado se tendrá con los materiales frágiles y delicados como elementos eléctricos, engranajes, mecanismos, equipos de medida, etc..., que tendrán que quedar debidamente protegidos.

Durante el montaje, el suministrador tendrá que retirar de la obra todos los materiales sobrantes de los trabajos efectuados con anterioridad, en particular de trozos de conductores y cables.

Así mismo, al final de la obra tendrá que limpiar perfectamente todos los equipos (captadores, motores, circuitos impresos, instrumentos de medida, etc...) de cualquier tipo de residuo, dejándolos en perfecto estado.

La instalación de los quipos, cables, cajas, bornes y pequeño material permitirá su posterior acceso a las mismas a efectos de su mantenimiento, reparación o desmontaje.

Como principio general se tiene que asegurar como mínimo un grado de aislamiento eléctrico de tipo básico clase I, el cual afecta tanto a equipos como a materiales, exceptuando el cableado de continua que será de doble aislamiento.

La instalación incorporará todos los elementos y características necesarias para garantizar en todo momento la calidad del suministro eléctrico.

El funcionamiento de la instalación eólicas no provocará averías en la red eléctrica, disminución de las condiciones de seguridad ni alteraciones superiores a las admitidas por la normativa que resulte aplicable.

Así mismo, el funcionamiento de la instalación no podrá dar origen a condiciones peligrosas de trabajo para el personal de mantenimiento y de explotación de la red de distribución. Los materiales situados en la intemperie se protegerán contra los agentes ambientales, en particular contra el efecto de la radiación solar y la humedad.

Se incluirán todos los elementos necesarios de seguridad y protecciones propias de las personas y de la instalación eólica, asegurando la protección ante contactos directos e indirectos, cortocircuitos, sobrecargas, así como otros elementos y protecciones que resulten de la aplicación de la legislación vigente.

Por motivos de seguridad y operación de los equipos, los indicadores, etiquetas, etc... de los mismos estarán en alguna de las lenguas españolas oficiales del lugar de la instalación.

Todos los elementos metálicos que no estén debidamente protegidos contra la oxidación por el fabricante, serán recubiertos con dos manos de pintura antioxidante.

5.6 Disposiciones finales.

Elección de componentes

Todos los materiales utilizados en el montaje del prototipo corresponden a los de mejor fiabilidad de los que se encuentran en el mercado, cumpliendo al mismo tiempo, todas y cada una de las condiciones de trabajo a las que están sometidas.

Comprobación del circuito

Una vez terminado el montaje se efectuarán los siguientes controles:

- Pruebas de parada y puesta en marcha en diferentes instantes de funcionamiento.
- Comprobación de los valores de las señales de los sensores y de histéresis y ajuste de los mismos si fuese necesario.
- Comprobación de las conexiones de alimentación de los elementos activos.

Prueba final de entrega

Antes de dar por finalizada la ejecución del proyecto se someterá la instalación a una prueba en iguales condiciones a las que será utilizado normalmente.

Validez del presupuesto

El presupuesto del proyecto será válido para un periodo máximo de 30 días, transcurridos los cuales se aplicara sobre la totalidad de este, el incremento o la disminución en porcentaje igual al que el estado publique en concepto de incremento de precios, no pudiendo sobrepasar en ningún caso el índice de fluctuación oficial.

Términos de ejecución

TRABAJO REALIZADO	DURACIÓN
Fase de ejecución	**45 días**
Diseño electrónico	**15 día**
Acopio de material	**15 días**
Montaje de la hélice	**10 días**
Montaje de las PCB's	**2 días**
Ínter conexionado	**1 día**
Puesta en marcha	**2 día**

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR ENGINYERIA
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

6 ANEXO

Cargador de baterías para aerogenerador Savonius helicoidal

AUTOR: Vicente Pichardo Calbet
DIRECTOR: Hugo Valderrama Blavi

Junio de 2010

6.1 Código en C del algoritmo del MPPT para el PIC18F2220.

```
#include<p18f2220.h>
#include<math.h>
#include<adc.h>
#include<timers.h>
#include<delays.h>
#include<pwm.h>
#define dc_max 0x32
#define dc_min 0x00

//******************************Declarar funciones*****************//

void ini_AD(void);
int leer_AD(void);
void ini_PWM(void);
void inc_DC(void);
void dec_DC(void);


//************************Variables globales**********************//


void main(void)
            {
unsigned int j,k,i_media,v_media,v,i,pot_actual,pot_anterior;
unsigned float g_actual=0.0,g_anterior=0.0;
i_media=v_media=v=i=pot_actual=pot_anterior=0;


      TRISC=0b11111011;

      ini_AD();
      ini_PWM();

            while(1)
                        {
                        ADCON0bits.CHS0=0;
                        v_media=0;
                        for(k=0;k<8;k++)
                                          {
                                          ADCON0bits.GO=1;
                                          v=leer_AD();
                                          v_media=v+v_media;
                                          }
                        v_media=v_media>>3;

                        ADCON0bits.CHS0=1;
                        i_media=0;
                        for(j=0;j<8;j++)
                                          {
                                          ADCON0bits.GO=1;
                                          i=leer_AD();
                                          i_media=i+i_media;
                                          }
                        i_media=i_media>>3;

                        pot_actual=v_media*i_media;

                        g_actual=(float)i_media/v_media;
```

```
        if (pot_anterior>pot_actual)
                        {
                        if(g_anterior>g_actual)
                                    {
                                    inc_DC();
                                    pot_anterior=pot_actual;
                                    g_anterior=g_actual;
                                    }
                        else
                              {
                              dec_DC();
                              pot_anterior=pot_actual;
                              g_anterior=g_actual;
                              }
                        }

        else if (pot_actual>pot_anterior)
                        {
                        if(g_anterior>g_actual)
                                    {
                                    inc_DC();
                                    pot_anterior=pot_actual;
                                    g_anterior=g_actual;
                                    }
                        else
                              {
                              dec_DC();
                              pot_anterior=pot_actual;
                              g_anterior=g_actual;
                              }
                        }
        }
}
```

```
//*************************Definir funciones*******************//

void ini_AD(void)
                        {
                        ADCON1bits.PCFG0=0;
                        ADCON1bits.PCFG1=0;
                        ADCON1bits.PCFG2=0;
                        ADCON1bits.PCFG3=0;
                        ADCON2bits.ADFM=1;
                        ADCON2bits.ADCS0=0;
                        ADCON2bits.ADCS1=1;
                        ADCON2bits.ADCS2=0;
                        ADCON0bits.ADON=1;
                        }

      int leer_AD(void)
                              {

                              int alto=0, bajo=0, total=0;
                              ADRESH=0x00;
                              ADRESL=0x00;
                              while(ADCON0bits.GO==1)
                                                      {
                                                      //do nothing
                                                      }
                              alto=ADRESH;
                              bajo=ADRESL;
                              total=alto<<8|bajo;
                              return(total);
                              }

void ini_PWM(void)
{
PR2=0x31;
CCPR2L=0x18;
CCP2CONbits.CCP2Y=0;
CCP2CONbits.CCP2X=0;
TRISB=0b11110111;
T2CONbits.T2CKPS0=0;
T2CONbits.T2CKPS1=0;
CCP2CONbits.CCP2M2=1;
CCP2CONbits.CCP2M3=1;
T2CONbits.TMR2ON=1;
}

void inc_DC(void)
                        {
                        if(CCPR2L<dc_max)
                                          {
                                          CCPR2L++;
                                          }
                        }

void dec_DC(void)
                        {
                        if(CCPR2L>dc_min)
                                          {
                                          CCPR2L--;
                                          }
                        }
```