



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN PARQUE EÓLICO CON AEROGENERADORES

Autor: MARTA HERVÁS FERNÁNDEZ

Director: JAIME NAVARRO OCÓN

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
"Proyecto de Optimización del funcionamiento de un parque eólico con
aerogeneradores "

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/2022 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Marta Hervás Fernández

Fecha: 01/07/ 2022



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Jaime Navarro Ocón

Fecha: 04/ 07/ 2022





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN PARQUE EÓLICO CON AEROGENERADORES

Autor: MARTA HERVÁS FERNÁNDEZ

Director: JAIME NAVARRO OCÓN

Madrid

Agradecimientos

Mi agradecimiento al profesor Mark Flynn de la Universidad de Texas en Austin por enseñarme a usar el programa 'COMSOL Multiphysics' así como por organizar los laboratorios de 'Power Electronics' que me han dado la oportunidad de soldar circuitos y poder aplicar toda la teoría aprendida.

También agradecer a Inés Gómez Fortis que ha sido una gran compañera de ese mismo laboratorio durante el curso para sacar las prácticas adelante.

Además, mi reconocimiento a mi padre Agustín Hervás, por leerse pacientemente todos los capítulos para realizar correcciones ortográficas.

Finalmente, dar las gracias a mi director de proyecto Jaime Navarro Ocón por su ayuda y por adaptarse a pesar de la distancia y de la diferencia horaria.

PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN PARQUE EÓLICO CON AEROGENERADORES

Autor: Hervás Fernández, Marta

Director: Navarro Ocón, Jaime

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas

UT- University of Texas at Austin

RESUMEN DEL PROYECTO

En este trabajo se ha realizado un estudio de los posibles puntos de mejora de un aerogenerador para poder optimizar más la energía eólica. Se han llevado a cabo simulaciones para obtener la mejor estructura del generador y se ha trabajado en el laboratorio de la universidad de Texas en Austin para crear un circuito con convertidores que inyecte la energía eólica en la red. Además, se ha realizado una comparativa con EE.UU. para encontrar puntos de los cuales tomar ejemplo.

Palabras clave: aerogenerador, potencia, rendimiento, generador, alterna, continua, convertidor, mejora, repotenciación, red eléctrica, energía renovable

1. Introducción

España es el quinto país en el mundo que más energía eólica genera y consume. Se trata de una fuente de energía que debemos explotar aún más para cuidar nuestro medioambiente. Sin embargo, debemos realizar algunos cambios en nuestros aerogeneradores para lograr cumplir con los objetivos de la “Agenda 2030 para el desarrollo sostenible” de fomentar las energías renovables y así llegar a un estado de cero emisiones. Algunos de los parques eólicos de España se instalaron hace más de 20 años y necesitan una serie de renovaciones que permitan alargar su vida útil.

Hasta el momento la solución para obtener más potencia de un aerogenerador consistía en aumentar su tamaño. Esta medida es insostenible a largo plazo, ya que sólo conlleva problemas de montaje, de fabricación y medioambientales. Si queremos garantizarnos unas fuentes de energía limpias, baratas e inagotables debemos explotar otros recursos y fomentar un estudio más profundo en el ámbito de la energía eólica.

2. Definición del proyecto

En el proyecto se realizará un análisis de los posibles puntos de mejora en el aprovechamiento de la energía eólica a la hora de generar electricidad. Queremos fomentar el desarrollo de energías renovables que limiten la emisión de CO₂.

Para mejorar el rendimiento de nuestros parques eólicos debemos entender el funcionamiento de un aerogenerador y analizar a fondo los aspectos a optimizar. Nos centraremos en hacer simulaciones de la parte más técnica, es decir, la estructura del generador y los circuitos empleados para convertir nuestra onda de alterna a continua y viceversa sin perder eficacia y potencia en el proceso.

También se verán algunas pequeñas compañías que trabajan en el mundo de la eólica y han propuesto buenas soluciones para algunos de estos puntos de mejora. Son empresas

poco conocidas cuyas tecnologías debemos expandir por España y potenciar por el mundo.

Además, se realizará una comparativa con el uso de la energía eólica en EE.UU. y especialmente en Texas. Este país tiene un alto porcentaje de aprovechamiento de la energía generada en los parques eólicos y, por ello, debemos investigar si hay algunos aspectos tanto de producción como de distribución de los que podamos tomar ejemplo para aplicarlos en nuestros parques.

3. Descripción del sistema de análisis empleado

En este proyecto se realizarán dos análisis principales. El primero tratará el tema del generador. En concreto, simularemos, con un programa llamado ‘COMSOL Multiphysics’, la geometría de un generador con sus devanados y sus campos magnéticos. Sacaremos así conclusiones sobre cuál es la mejor manera de construir un generador.

La segunda parte del análisis se ha realizado en el laboratorio de la Universidad de Texas en Austin. Se soldarán placas y se conectarán circuitos con convertidores para inyectar energía en la red y poder aplicarlo a la eólica.



Ilustración 1: Esquema seguido en el desarrollo del trabajo

4. Resultados

Entre las mejoras a realizar en los aerogeneradores se encuentran la repotenciación, la instalación de sensores, realizar ajustes en los generadores y el almacenamiento de la energía eléctrica que se genera de más. Debemos distribuir los devanados en el generador. Para reducir la velocidad de sincronismo y así poder aprovechar menores velocidades de viento debemos construir generadores con más polos. Un buen material para el generador es el aluminio.

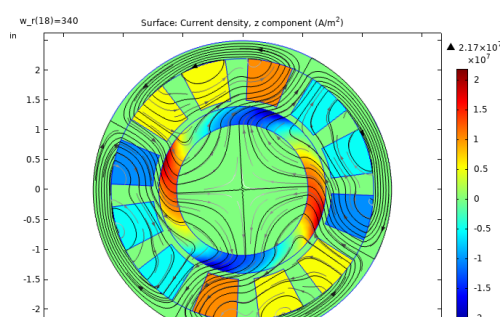


Ilustración 2: Resultado del análisis en COMSOL

El puente de diodos es una buena solución para convertir la onda de alterna a continua. Por otro lado, el puente H tiene un alto rendimiento a la hora de transformar la señal de vuelta alterna. El circuito final nos permite modular la onda que inyectaremos en la red y asegurarnos de que coincida en fase, frecuencia y amplitud con la de la red.

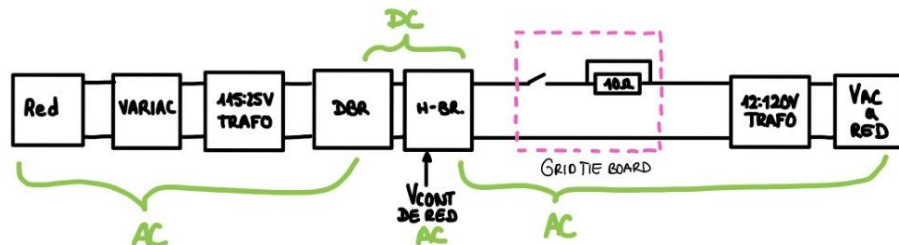


Ilustración 3: Resultado final del circuito a montar según los experimentos realizados en el laboratorio

Finalmente, Texas permite elegir a sus usuarios el tipo de tarifa de electricidad que quiere y emplea un algoritmo que en cada momento decide la mejor fuente de energía fomentando la eólica. Deberíamos analizar si de estos métodos de distribución se podrían obtener beneficios para la red española.

5. Conclusiones

La energía eólica es una fuente de electricidad inagotable que se debe potenciar. No sólo nos ayudará a conseguir nuestros objetivos de vivir en un planeta limpio evitando la expulsión de gases de invernadero, sino que también puede impulsar nuestra economía y generar un número elevado de puestos de trabajo en España.

Los cambios propuestos a lo largo del trabajo son factibles tanto económica como técnicamente. Son modificaciones sencillas de entender a nivel eléctrico y de implementar a la hora de la fabricación de estos componentes. Además, en los ensayos han demostrado un alto rendimiento.

Aún hay mucho trabajo por delante y una elevada cantidad de puntos de mejora con relación al material, a la estructura, a la distribución... Debemos explotar las energías renovables y sobre todo la eólica.

6. Referencias

- [ONU15] Organización de las Naciones Unidas (ONU) “La Agenda para El Desarrollo Sostenible 2030” (ODS) <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>, 2015
- [FLY3] Flynn, Mark “Project 6 –Concentrated and Distributed Windings” , “Project 7 – MMF Distribution of a rotating Machine”, “Project 8 – Torque of a Rotating Machine”, “Project 9 – Torque-Speed Curve of an Induction Machine” The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 341: Electric Machines and Drives, Spring Semester 2022, [Online] Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1331682>
- [FLY21] Flynn, Mark, “_Lecture_24_EE462L_H_Bridge_To_Power_Grid”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slides 6,8,9,10,15[Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [PRE21] Pressler, Mary, ‘A snapshot of the wind power Industry in Texas’, <https://quickelectricity.com/texas-wind-power/> November 2021

PROJECT TO OPTIMIZE THE FUNCTIONING OF A WIND FARM WITH WIND TURBINES

Author: Hervás Fernández, Marta

Supervisor: Navarro Ocón, Jaime

Collaborating Entity: ICAI- Universidad Pontificia de Comillas

UT – University of Texas at Austin

ABSTRACT

During this project we will analyse the multiple possible improvements that can be made on wind turbines and its components in order to be able to get more power from a wind farm. We will be doing simulations of different generator structures and laboratory experiments to inject energy into the grid. Moreover, we will make a comparison with the American way of using wind energy to investigate if we can learn anything from them.

Keywords: Wind turbine, Generation, Power, efficiency, converter, AC, DC

1. Introduction

Spain is the fifth country in the world in generation and consumption of power coming from wind farms. This inexhaustible energy source is extremely important if we want to be able to achieve a status of generating clean energy with zero emissions. Renewable Energies are key when it comes to fulfilling the goals of our “Agenda 2030”.

We must point out that most of the wind farms built in Spain are over 20 years old and therefore they need some renovations on their machinery to enlarge their power capacity and improve their efficiency.

Up to date the most known solution for increasing the power a wind turbine can generate is building bigger towers and wind turbines. However, this is unsustainable in the long run since it will only cause fabrication, mounting and environmental problems. Therefore, if we want to assure a long-lasting, clean, and cheap source of energy such as the Eolic we need to find other solutions and invest in some deeper investigations.

2. Project Definition

During this Project we will firstly analyse the possible improvements that can be made on wind turbines to obtain as much electricity from the wind as possible. We want to empower the development of renewable energy sources with the goal of polluting as little as possible and avoid producing any CO₂ emissions.

We need to understand the functioning of a wind turbine to later know the upgrades that can be made. Our focus will lay on the most technical and electrical part. We will simulate some rotating machines to find the optimal one. Moreover, we will work in a laboratory soldering and connecting some circuits that allow us to convert AC into DC and vice versa with high efficiency.

Furthermore, we will do some research on small companies that have been working on finding reliable and successful solutions to improve the power that we can obtain from a wind turbine.

Finally, a comparison with the American and more precisely the Texan wind turbine case will be made to detect potential points of improvement for Spain.

3. Description of the tools employed

This Project will mainly consist of two big fields of analysis.

First of all, the program 'COMSOL Multiphysics' will allow us to simulate the functioning of a rotating machine with its windings and magnetic fields. Consequently, we will be able to see the best distribution and material to obtain maximum efficiency.

The second part of the analysis will be made in a laboratory of the University of Texas at Austin. We will solder and mount some circuits with converters and inverters to inject some power into the grid and apply this to the Eolic power.

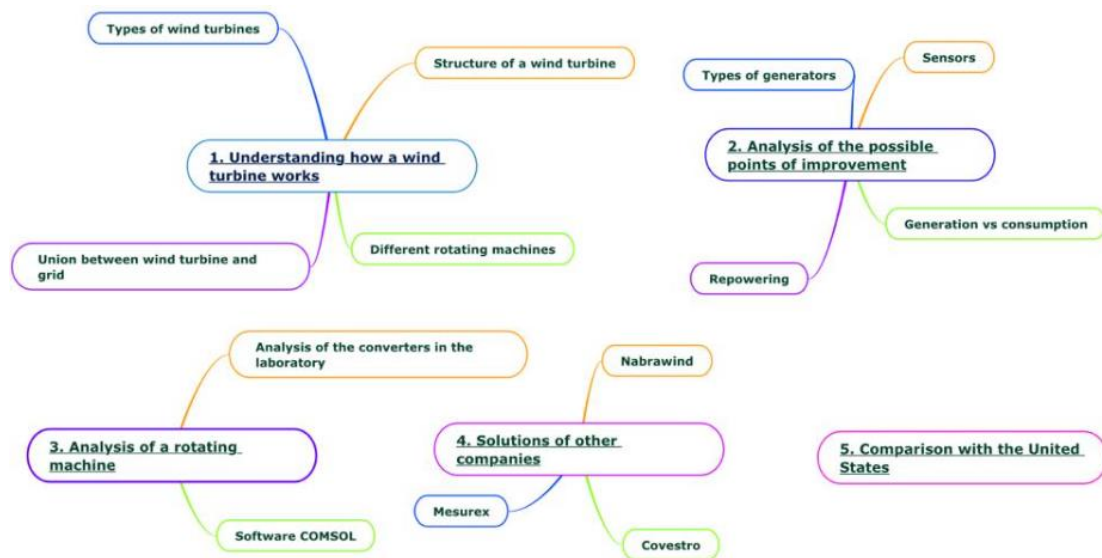


Ilustración 4: Scheme followed along the project

4. Results

Among the improvements that can be made in the wind turbines we have repowering, the installation of sensors, making adjustments on the generators and storing the extra electric energy that is generated. We must distribute the windings as much as possible. Moreover, we should build in more poles to reduce the speed of synchronism so that we can take advantage of lower wind speeds. In addition, a good material for the generator would be aluminium.

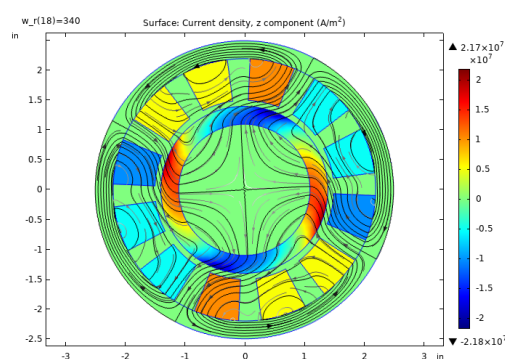


Ilustración 5: Results from the analysis with COMSOL

The Diode Bridge Rectifier is a very successful method to convert AC into DC. On the other side the H-Bridge is very useful to gain back the AC signal. This combination of circuits allows us to inject power into the grid with the right phase, the correct amplitude and frequency.

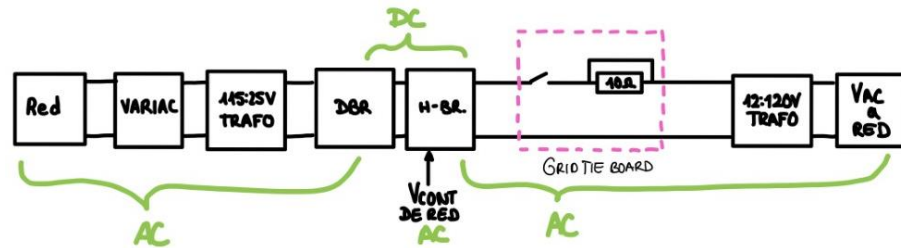


Ilustración 6: Results from the experiments in the laboratory

Finally, Texas has a distribution system that uses an algorithm to calculate which source of energy is the most beneficial for each moment. Moreover, each consumer can choose their energy plan. These two key points enhance the use of renewable energies and more precisely the Eolic.

5. Conclusions

Wind energy is an endless source of electricity that we must boost. It will not only help us to achieve our goal of living in a clean planet with zero emissions but also create thousands of employments and improve Spain's economic situation.

The changes that are presented and proposed during this project are easy to include economically and technically. The modifications that should be done can be simply understood on an electric level and implemented when fabricating the wind turbines machinery. Furthermore, the experiments have proven good efficiency results.

In conclusion, there is still a lot of work that needs to be done concerning this topic, but one thing is sure, we must keep working on improving our wind farms.

6. References

- [ONU15] Organización de las Naciones Unidas (ONU) “La Agenda para El Desarrollo Sostenible 2030” (ODS) <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>, 2015
- [FLY3] Flynn, Mark “Project 6 –Concentrated and Distributed Windings” , “Project 7 – MMF Distribution of a rotating Machine”, “Project 8 – Torque of a Rotating Machine”, “Project 9 – Torque-Speed Curve of an Induction Machine” The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 341: Electric Machines and Drives, Spring Semester 2022, [Online] Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1331682>
- [FLY21] Flynn, Mark, “_Lecture_24_EE462L_H_Bridge_To_Power_Grid”, The University of Texas at Austin,Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slides 6,8,9,10,15[Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [PRE21] Pressler, Mary, ‘A snapshot of the wind power Industry in Texas’, <https://quickelectricity.com/texas-wind-power/> November 2021

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	10
1.1 Motivación del proyecto.....	10
1.2 Objetivos del proyecto.....	12
1.3 Estructura del proyecto.....	14
Capítulo 2. Funcionamiento de un aerogenerador	16
2.1 Tipos de aerogeneradores:.....	16
2.2 Estructura de un aerogenerador:.....	18
2.3 Unión de aerogenerador con la red.....	24
2.4 Funcionamiento y tipos de generador:	25
2.4.1 Generador de jaula de ardilla:.....	26
2.4.2 Generador con doble bobinado (DFIG):	27
2.4.3 Rotor devanado con resistencias variables:.....	28
2.4.4 Generador síncrono multipolo:	28
Capítulo 3. Análisis de los posibles puntos de mejora en aerogeneradores	32
3.1 Repotenciación	34
3.2 Sensores.....	37
3.3 Tipo de generador.....	40
3.4 Ubicación de los parques.....	41
3.5 Generación vs. Demanda.....	43
Capítulo 4. Análisis de una máquina rotativa	48
4.1 Clasificación de los aerogeneradores:	49
4.1.1 Tipo 1: Velocidad fija.....	49
4.1.2 Tipo 2: Velocidad variable limitada.....	50
4.1.3 Tipo 3: Velocidad variable con conversión parcial	51
4.1.4 Tipo 4: Velocidad variable con conversión total	52
4.2 Primera parte del análisis mediante el uso del programa COMSOL.....	53
4.2.1 Distribución de los devanados	53
4.2.2 Trifásica.....	62
4.2.3 Polos.....	68

4.2.4 Cambio de material	75
4.2.5 Variación del ancho de la zona del rotor conductor	80
4.3 Análisis parte 2, simulaciones en el laboratorio	83
4.3.1 Rectificador de puente de diodo	83
4.3.2 Puente H.....	96
4.3.3 Unión con la red.....	110
4.3.4 Conclusiones.....	114
Capítulo 5. Soluciones desarrolladas por algunas empresas.....	116
5.1 Mesurex	116
5.2 Nabrawind	122
5.3 Covestro	127
5.4 Conclusiones:	127
Capítulo 6. Comparativa con EE.UU.	129
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	147
Capítulo 8. Bibliografía.....	149

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Fuerza en el entrehierro de un generador	74
Ecuación 2: Deslizamiento en una máquina rotativa.....	77
Ecuación 3: Torque máximo en una máquina rotativa	81
Ecuación 4: Rizo de la tensión de salida	85
Ecuación 5: Potencia inyectada en la red	111

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Esquema seguido en el desarrollo del trabajo	9
Ilustración 2: Resultado del análisis en COMSOL.....	9
Ilustración 3: Resultado final del circuito a montar según los experimentos realizados en el laboratorio.....	10
Ilustración 4: Scheme followed along the project	13
Ilustración 5: Results from the analysis with COMSOL	13
Ilustración 6: Results from the experiments in the laboratory	14
Ilustración 7: Objetivos de desarrollo sostenible.....	14
Ilustración 8:Tipos de estructura de un aerogenerador.....	16
Ilustración 9: Curva del coeficiente de potencia según el tipo de aerogenerador	18
Ilustración 10: Partes de la estructura externa de un aerogenerador	19
Ilustración 11: Partes de la construcción interna de un aerogenerador	21
Ilustración 12: Caja multiplicadora	23
Ilustración 13: Resumen del funcionamiento de un aerogenerador	23
Ilustración 14: Resumen de la conexión con la red	25
Ilustración 15:Tipos de generadores y su conexión a la red.....	26
Ilustración 16:Generador de jaula de ardilla.....	27
Ilustración 17:Generador con doble bobinado.....	28
Ilustración 18: Generador síncrono multipolo.....	29
Ilustración 19: Posibles fallos en un aerogenerador	34
Ilustración 20: Logo de Simulwind	35
Ilustración 21: Logo de windEXT	35
Ilustración 22: Sensores propuestos para aerogeneradores	39
Ilustración 23: Comparativa de Iberdrola de sus parques eólicos con el paso de los años .	43
Ilustración 24: Demanda de energía eléctrica del 5 de junio de 2022 por REE	44
Ilustración 25: Distribución de la generación en España (REE)	45
Ilustración 26: Demanda de energía eléctrica el 5 de enero de 2022 por REE	46
Ilustración 27: Estructura de un aerogenerador tipo 1.....	49

Ilustración 28:Estructura de un aerogenerador tipo 2.....	50
Ilustración 29:Estructura de un aerogenerador tipo 3.....	51
Ilustración 30:Estructura de un aerogenerador tipo 4.....	52
Ilustración 31:Estructura del generador con devanados concentrados	54
Ilustración 32: Flujo magnético con devanados concentrados	55
Ilustración 33: Campo magnético en el entrehierro para devanados concentrados.....	56
Ilustración 34: Geometría de un generador con devanados distribuidos I	57
Ilustración 35: Flujo magnético para los devanados distribuidos I	57
Ilustración 36: Campo magnético para los devanados distribuidos I	58
Ilustración 37: Geometría de un generador con devanados distribuidos II	58
Ilustración 38: Flujo magnético para los devanados distribuidos II.....	59
Ilustración 39: Campo magnético en el entrehierro para los devanados distribuidos II.....	59
Ilustración 40: Fuerza en el entrehierro y sus armónicos	61
Ilustración 41: Estructura de los devanados en trifásica.....	63
Ilustración 42: Flujo magnético en $t=0s$ para trifásica	64
Ilustración 43: Flujo magnético en $t=0.25s$ en trifásica	64
Ilustración 44: Fuerza en el entrehierro en trifásica en $t=0s$	65
Ilustración 45: Fuerza en el entrehierro en trifásica en $t=0.25s$	66
Ilustración 46: Geometría con devanados distribuidos I en trifásica.....	66
Ilustración 47: Fuerza en el entrehierro en trifásica con devanados distribuidos I	67
Ilustración 48: Geometría con devanados distribuidos II en trifásica	67
Ilustración 49:Fuerza en el entrehierro en trifásica con devanados distribuidos II	68
Ilustración 50: Geometría de un generador con dos polos	70
Ilustración 51: Corriente en un generador con dos polos	71
Ilustración 52: Torque para un generador con dos polos	72
Ilustración 53: Geometría de un generador de cuatro polos.....	72
Ilustración 54: Torque para un generador de cuatro polos	73
Ilustración 55: Torque para dos polos y cobre	75
Ilustración 56: Corriente para cuatro polos y cobre	76
Ilustración 57: Torque para cuatro polos y cobre	77

Ilustración 58: Desarrollo del precio de aluminio y el cobre en el período 2000-2022	79
Ilustración 59: Corriente con una zona conductora más amplia.....	80
Ilustración 60: Torque para zona conductora más amplia.....	81
Ilustración 61: Estructura del rectificador de puente de diodos	84
Ilustración 62: Tensión de salida con condensador	85
Ilustración 63: Circuito con DBR para el montaje en el laboratorio	86
Ilustración 64: DBR del laboratorio	86
Ilustración 65: Tensión de entrada sin carga	87
Ilustración 66: Tensión de salida sin carga.....	88
Ilustración 67: Ampliación de la tensión de salida sin carga	89
Ilustración 68: Voltaje en un diodo del rectificador	91
Ilustración 69: Ampliación de la tensión en un diodo	92
Ilustración 70: Voltaje en la resistencia del DBR.....	93
Ilustración 71: Descarga de un condensador con carga de 5 ohmios	94
Ilustración 72: Descarga de un condensador con carga de 10 ohmios	95
Ilustración 73: Estructura del puente H	96
Ilustración 74: Esquema del controlador PWM	97
Ilustración 75: Señal de salida del puente H.....	98
Ilustración 76: Placa del puente H soldada en el laboratorio	98
Ilustración 77: V_{tri} vista en el osciloscopio	99
Ilustración 78: V_{cont} y $-V_{cont}$	100
Ilustración 79: Comparativa V_{tri} con V_{cont}	100
Ilustración 80: Señal de salida, V_{ab} , sin filtrar.....	101
Ilustración 81: Señal de salida, V_{ab} , filtrada.....	102
Ilustración 82: Señal de salida sobremodulada y filtrada	103
Ilustración 83: V_{gs} en un MOSFET del puente H	105
Ilustración 84: Comparativa tensión alta y baja en una pierna.....	105
Ilustración 85: Señal en una pierna del puente H	106
Ilustración 86: Tensión de salida del puente H sin carga, sin filtrar	107
Ilustración 87: Tensión de salida del puente H sin carga, filtrada.....	107

Ilustración 88: Señal de control del puente H para $m_a=1$	108
Ilustración 89: Esquema de un MOSFET	109
Ilustración 90: Esquema completo de la unión con la red	110
Ilustración 91: V_{inv} y V_{grid} previa a la inyección	112
Ilustración 92: V_{inv} y V_{grid} posterior a la unión.....	113
Ilustración 93: Zona en la que se instala el Sensor Eddy NCDT 3005	118
Ilustración 94: Ejemplo de ubicación del Sensor Eddy NCDT 3005.....	119
Ilustración 95: Ejemplo de instalación del Sensor Eddy NCDT 3005.....	119
Ilustración 96: Zona de instalación del Sensor capaNCDT CS4FL	120
Ilustración 97: Ejemplo de Sensor capaNCDT CS4FL	120
Ilustración 98: Zona de instalación del Sensor Eddy NCDR 3001	121
Ilustración 99: Ejemplo de Sensor Eddy NCDR 3001	121
Ilustración 100: Transporte de pala dividida en tres partes	123
Ilustración 101: Características destacables de Nabrajoint	123
Ilustración 102: Estructura de Nabralift	124
Ilustración 103: Características a destacar de Nabralift	125
Ilustración 104: Estructura de Nabrabase	126
Ilustración 105: Características a destacar de Nabrabase	126
Ilustración 106: Mapa de sistema eléctrico de EE.UU.....	129
Ilustración 107: Superestación 'Las Tres Amigas'.....	130
Ilustración 108: Distribución de aerogeneradores en EE.UU.....	131
Ilustración 109: Esquema de distribución de EE.UU.....	132
Ilustración 110: Capacidad instalada en EE.UU.	133
Ilustración 111: Capacidad instalada en España.....	133
Ilustración 112: Generación eléctrica en EE.UU.....	134
Ilustración 113: Generación eléctrica en España.....	134
Ilustración 114: Datos del consumo de energía en Austin en 2016.....	135
Ilustración 115: Generación eólica en Texas.....	136
Ilustración 116: Comparativa de la generación eólica y solar en Texas de marzo a mayo de 2022	137

Ilustración 117: Generación de las diferentes fuentes de energía en Texas (marzo-abril 2022)	
.....	138
Ilustración 118: Información energética de Texas en 2022.....	138
Ilustración 119: Comparativa de instalación de aerogeneradores en algunos estados de EE.UU.	139
Ilustración 120: Datos de la energía eólica en diferentes estados en 2018.....	141
Ilustración 121:Potencia terrestre acumulada por países.....	142
Ilustración 122: Demanda frente a generación eólica en el ERCOT.....	144

Índice de tablas

Tabla 1: Ventajas de cada tipo de aerogenerador	17
Tabla 2: Comparativa entre la máquina síncrona y la asíncrona	30
Tabla 3: Comparativa entre el cobre y el aluminio	78
Tabla 4: Medidas con cargas de 5 y 10 ohmios	90
Tabla 5: Características de los MOSFETs empleados	109
Tabla 6: Valores de voltajes por el mundo	133

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Energías renovables. Ese gran término que se escucha constantemente y que, por norma general, se sabe que hay que tratar de explotar más, pero sobre el que poca gente tiene realmente información.

Las energías renovables son cada vez más y más importantes con origen en la creciente necesidad de tener electricidad disponible las 24 horas del día de fuentes sostenibles. Nuestras principales tareas cotidianas requieren de electricidad. Poner lavadoras, ver la tele, cargar el móvil etc. Sin conexión a la red eléctrica ninguna de estas acciones sería posible, y los precios de la luz no han dejado de aumentar a lo largo de los últimos años.

La energía eólica ofrece una fuente de energía inagotable, fácil de conseguir y que respeta el medioambiente. Podría ser la solución al gran problema de la producción de energía. Poco a poco esta energía verde está logrando convertirse en una de las principales fuentes de suministro de electricidad de España.

La AEE ([La eólica y sus ventajas - Asociación Empresarial Eólica \(aeeolica.org\)](http://www.aeeolica.org)) califica la energía eólica como “una tecnología clave en nuestro mix energético”.

Por ello, se trata de aprovechar al máximo la potencia que se puede llegar a obtener de los aerogeneradores procurando no malgastar ni un solo vatio.

Mundialmente hablando, España ocupa el quinto lugar como país con más proporción de potencia eólica instalada, puesto que en 2021 el 23% de la energía consumida en España era proveniente de los aerogeneradores.

Las razones para tratar de aumentar el uso de la energía eólica no son sólo puramente económicas. También debemos empezar a concienciarnos a fondo de la necesidad de reducir

los gases contaminantes. Según datos de Iberdrola, en España, la energía eólica ha permitido evitar la emisión de 29 millones de toneladas de CO₂ al año. El cambio climático y el calentamiento global son problemas en contra de los cuales deberíamos tratar de actuar. Producir energía mediante métodos que expulsan gases de efecto invernadero no contribuye a cuidar del planeta. Hay que cooperar al máximo a la hora de cumplir con la ‘Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible’ cuyos principales objetivos son:

- Mínimo un 55% de reducción de gases efecto invernadero con respecto a 1990
- Conseguir que un 32% de la energía producida sea de origen renovable
- Una mejora del 32,5% en la eficiencia energética

La reciente aprobación en febrero de 2022 de la denominada “Taxonomía Verde” por la Comisión Europea demuestra la importancia del tema.

España lleva involucrada en el uso de energías verdes como la eólica desde diciembre de 1994. Ese año se inauguró el primer parque eólico del país que estaba formado por turbinas de 500kW. Desde entonces, se ha seguido trabajando en explotar este recurso al máximo y en 20 años se ha logrado multiplicar la potencia de los aerogeneradores por 6 y la producción por 8. Todo ello, se debe principalmente al aumento del tamaño de los molinos de viento y al gran esfuerzo realizado por obtener mayores potencias con menores velocidades de viento.

Sin embargo, aumentar el tamaño de los aerogeneradores no es nada beneficioso, ya que conlleva la pérdida de estabilidad, dificultades en el montaje e incluso molestias en el entorno natural debido al ruido y el peligro para las aves. Por otro lado, gran parte de los parques españoles tienen unas instalaciones obsoletas con una antigüedad superior a los 20 años, por lo que requieren de cambios de piezas y de una actualización en sus equipos que permita aprovechar al máximo la potencia que ofrecen.

Aparte de temas de construcción, mejora y renovación de piezas también hay que destacar la necesidad de incluir nuevos métodos de almacenamiento para la energía de origen eólico. En numerosas ocasiones el viento sopla cuando el consumo no es tan elevado como para necesitar toda la electricidad producida. Otras veces, cuando la demanda es muy alta, no hay producción suficiente. Por ello, se deben encontrar nuevos métodos de almacenamiento que

permitan evitar el uso de las energías más comunes en estas situaciones, como la fósil y la nuclear.

Más adelante, se verá que hay varios parques en la península que ya están trabajando en ello.

Además, la energía eólica crea 5 veces más puestos de trabajo que las energías convencionales según datos de la AEE.

En conclusión, es de vital importancia para la sociedad de hoy en día que se inviertan recursos de investigación en el sector de las energías renovables, concretamente, en la eólica.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

A lo largo de este trabajo, se realizará un profundo análisis de lo previamente mencionado. Se quiere fomentar la producción de energía con cero emisiones y llegar a un punto en el que podamos renunciar a las energías nucleares y fósiles sin consecuencias para los usuarios.

Mediante el uso de programas y simulaciones, así como experimentos y montajes de laboratorio, trataremos de encontrar nuevos métodos y pequeñas mejoras para maximizar la potencia que se puede obtener de un molino de viento.

Se estudiarán por tanto las consecuencias de realizar pequeños cambios en la estructura y la maquinaria de un aerogenerador. Además, se construirán nuevos circuitos de potencia electrónica para estudiar su viabilidad de instalación en un aerogenerador.

También se hará una investigación en las mejoras que pequeñas empresas no tan conocidas a nivel nacional han estado realizando y que deberíamos tener en cuenta puesto que proponen soluciones interesantes que aumentarían el rendimiento de nuestros aerogeneradores.

El último objetivo de esta memoria consistirá en realizar una comparativa con el sistema de energía eólica estadounidense. Queremos conocer el impacto de esta fuente renovable allí y si nuestro país puede aprender algo de ellos.

En resumen, se trata de potenciar el aprovechamiento de la energía eólica, maximizar la potencia que un aerogenerador puede ofrecer y buscar maneras de, mediante pequeños cambios, alargar y mejorar la vida útil de los molinos de viento.

Debemos destacar que con nuestros objetivos trataremos de cumplir varios de los puntos establecidos para el desarrollo sostenible. Se cumplirán:

El objetivo número 7: “Energía asequible y no contaminante: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna”. Se considera el objetivo fundamental del trabajo. Queremos sustituir por energías verdes y renovables las contaminantes y así evitar la generación de residuos que dañan el medioambiente.

El objetivo número 11: “Ciudades y Comunidades Sostenibles: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.” Un aumento en el uso de energías inagotables podría ayudar a disminuir el precio de la luz. Hoy en día, el aumento de costes como la luz, la gasolina y otras necesidades cotidianas están agravando considerablemente la situación económica de muchas familias. Fomentando la energía verde podríamos reducir el precio de la electricidad y crear un ambiente más saludable en la comunidad. Un estudio de la AEE revela que un consumidor puede ahorrar hasta 7.886€ al año con el uso de energías renovables.

El objetivo número 13: “Acción por el clima: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.” Como previamente hemos explicado queremos lograr llegar a un punto en la generación de energía en el que podamos prescindir por completo de las energías contaminantes y no renovables. En general, hay que encontrar maneras de almacenar la energía sobrante de los aerogeneradores cuando no se consume o generar hidrógeno verde con ellas. Queremos combatir el cambio climático antes de que sus consecuencias se vuelvan irreversibles.

El objetivo número 15: “Vida de ecosistemas terrestres; gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad.” Si logramos que los cambios realizados en los

aerogeneradores sean en el ámbito maquinaria y material en lugar de seguir aumentando el tamaño de la torre y las palas podremos evitar la muerte de muchas aves, así como

aprovechar al máximo el uso de las zonas verdes.



[ONU15]

Ilustración 7: Objetivos de desarrollo sostenible

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Consecuentemente, una vez entendida la importancia de explotar al máximo esta forma de obtener una energía limpia, inagotable y más asequible para mantener una economía sostenible, se verán posibles maneras de conseguirlo.

La estructura que se seguirá en este trabajo es la siguiente. El trabajo estará dividido en 6 capítulos.

El capítulo 1, en el que nos encontramos, presentará la motivación del proyecto, los objetivos y su estructura.

El capítulo 2 tiene como propósito introducir al lector en el mundo de los aerogeneradores. Se describirá el funcionamiento básico de un molino de viento, su estructura, sus componentes y los diferentes tipos que existen con el fin de facilitar la comprensión de los siguientes capítulos.

En el capítulo 3 se realizará un análisis de los posibles puntos de mejora para maximizar el rendimiento de los parques eólicos y poder expandir la generación de energía eólica, así como mejorar la maquinaria que se emplea en los aerogeneradores.

El siguiente capítulo, el 4, contendrá las simulaciones realizadas en los laboratorios, así como simulaciones de los generadores. Se trata de analizar a fondo y buscar soluciones para mejorar el rendimiento de la parte más eléctrica de los molinos de viento.

El capítulo 5 mostrará otras soluciones ya estudiadas por pequeñas empresas a las que hay que publicitar puesto que han realizado modificaciones muy beneficiosas a algunos aerogeneradores que se deberían expandir por todo el país. De esta forma se habrán mostrado soluciones generales para gran parte de los puntos a mejorar previamente mencionados en el capítulo 4.

Finalmente, el capítulo 6 será una comparativa con el sistema eólico estadounidense para comprobar cómo de importante es allí esta fuente de energía y si tenemos algo que aprender de este país. El foco principal estará en Texas, que es la mayor fuente de eólica en Estados Unidos y, además, tiene su propia red eléctrica.

Capítulo 2. FUNCIONAMIENTO DE UN AEROGENERADOR

2.1 TIPOS DE AEROGENERADORES:

Hay múltiples maneras de clasificar los aerogeneradores. Las dos maneras más relevantes son, o bien por su principio de funcionamiento (es decir si tiene un par de arranque menor que sería de tipo ‘lift’ o si es mayor que pertenece a la categoría ‘drag’), o bien por su eje de giro. Dentro de esta última clasificación, se puede distinguir principalmente entre dos tipos de aerogeneradores: los horizontales y los verticales.

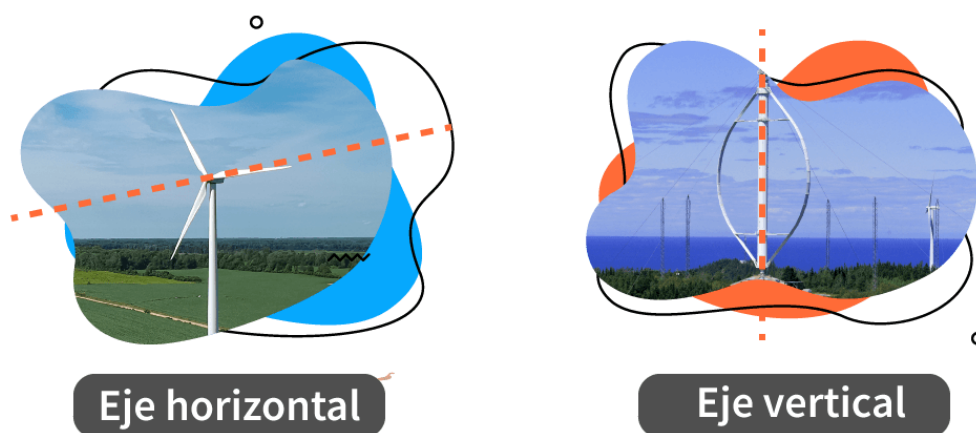


Ilustración 8: Tipos de estructura de un aerogenerador

[MED19]

El aerogenerador de eje vertical tiene el eje perpendicular al suelo o dirección del viento como se puede apreciar en la imagen anterior. No necesita ningún sistema de orientación ya que gira libremente con el viento. Algunas de sus principales ventajas es que se pueden colocar muchos a menor distancia que los de eje horizontal ya que no requieren de tanto espacio. Además, son menos ruidosos y más sencillos de instalar. Sin embargo, a la hora de

elegir qué tipo de aerogenerador construir habría que hacer un balance, puesto que los de eje vertical tienen mucha menor eficiencia. No son capaces de generar tanta potencia debido a la resistencia que oponen y a su poca estabilidad y pueden llegar a ser más caros que los horizontales.

Por otro lado, los aerogeneradores de eje horizontal tienen el eje paralelo al suelo o dirección del viento, y una eficiencia mucho más alta. Pese a sus desventajas debido a su gran tamaño y cableado, el aerogenerador de eje horizontal resulta menos caro de instalar. Es la opción mundialmente más expandida porque además ofrecen la ventaja de que, al estar compuestos por diferentes partes, el fabricante pueda decidir en cada momento las características de cada componente y así conseguir un aerogenerador a su gusto y según sus necesidades.

En resumen, las ventajas de cada tipo serían las siguientes:

Tabla 1: Ventajas de cada tipo de aerogenerador

HORIZONTAL	VERTICAL
Mayor coeficiente de potencia	No tiene necesidad de tener un sistema de orientación
Mayor aprovechamiento de la velocidad del viento	Mantenimiento, instalación y transporte más sencillos
Cubre un área mayor lo que equivale a más potencia	No genera ruido
Mayor eficiencia	Se puede instalar en zonas urbanas

La siguiente imagen muestra distintos tipos de aerogeneradores y cómo el coeficiente de potencia varía según tengamos un diferente número de palas o distintas clases de rotores.

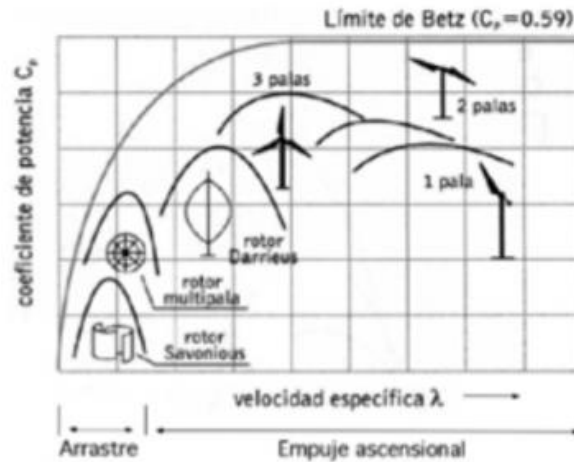


Ilustración 9: Curva del coeficiente de potencia según el tipo de aerogenerador

[VILL12]

2.2 ESTRUCTURA DE UN AEROGENERADOR:

Con el objetivo de poder comprender bien todos los diferentes aspectos que se van a tratar en este trabajo, es imprescindible tener un conocimiento básico del funcionamiento de los aerogeneradores. A continuación, se procederá a explicar la composición de un aerogenerador, así como el funcionamiento de las diferentes partes.

Primeramente, se verá la **parte exterior**. Desde fuera se puede observar la torre con las aspas conectadas al buje, la góndola y la pequeña veleta.

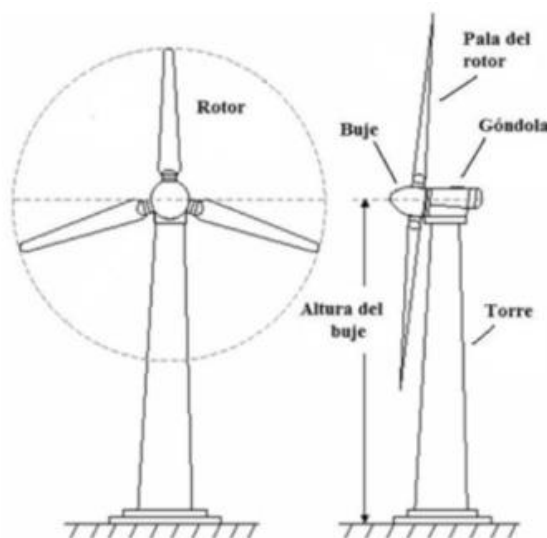


Ilustración 10: Partes de la estructura externa de un aerogenerador

[VILL12]

La torre es el apoyo de la góndola y con ello del buje y las palas. Por dentro de esta se transmite la electricidad producida hasta la base de la torre. Seguidamente, en la base, se eleva la tensión a través de transformadores para guiarla a lo largo de los parques hasta las subestaciones, lugar en el que se vuelve a elevar para finalmente incorporarla en la red y que se pueda distribuir para su uso en la vida cotidiana. Más adelante, se verá como cuánto más alta sea la torre, más potencia se puede captar del aire. No obstante, también serán mayores las vibraciones que tendrá que soportar por lo que se debe encontrar el equilibrio justo.

Como previamente mencionado, la torre sostiene la góndola. Se trata de una gran cabina dentro de la cual se pueden encontrar los elementos más importantes del aerogenerador que veremos más adelante en profundidad como la multiplicadora, el generador y los sistemas de control y regulación generales. Esta estructura está altamente expuesta a las condiciones meteorológicas por lo que debe estar bien protegida mediante una cubierta. Es muy relevante destacar que en la parte superior trasera se ubican el anemómetro y la veleta. La principal función de estos componentes es medir la dirección del viento, así como la velocidad, mediante cálculos de la masa del aire (aunque la veleta también sirve como pararrayos). Se trata de un mecanismo de orientación que transmite los datos al propio aerogenerador para

orientar las palas. Este método permite que el aerogenerador, más precisamente el rotor, se active cuando detecta que la velocidad del viento es superior a la necesaria de arranque o, por lo contrario, que se detenga al recibir un viento superior al aceptable.

El viento alcanza al aerogenerador en forma de corrientes de aire por lo que contiene un alto nivel de energía cinética. Esta energía es la que permite que las palas giren.

Las palas están diseñadas estratégicamente para captar la mayor energía posible y poder transmitir la potencia al buje. Cuanto mayor tamaño tengan, mayor será su capacidad de absorber esta energía del viento. Un tamaño estándar para una pala serían unos 60 metros de longitud.

Unos valores estándar de velocidades que se pueden llegar a aprovechar sería un rango desde 11km/h para los vientos más ligeros hasta velocidades en torno a los 90km/h. Por encima de esta velocidad cualquier movimiento podría resultar en un desastre para el aerogenerador ya que son torres muy altas que empezarían a sufrir vibraciones y a perder la estabilidad o, incluso, se desensamblarían algunas piezas. Consecuentemente, las palas se ponen en bandera y se detienen. A lo largo de este trabajo veremos algunos requisitos que deben cumplir las palas y buscaremos maneras de mejorar su rendimiento. En general, se trata de construir unas palas ligeras y resistentes que se puedan mover sin mucha dificultad y permitan aprovechar una gran variedad de velocidades de viento diferentes al máximo. Todo ello debe conseguirse sin poner en riesgo la seguridad y estabilidad del molino de viento, así como respetando el medioambiente y evitando causar demasiado ruido o molestar el vuelo de las aves.

Además, hay varios tipos de aerogeneradores. Los bipala son más ligeros y simples de montar, pero tienen menor eficiencia. Los tripala están mucho mejor equilibrados y soportan mayores masas de viento. Como veremos más adelante son los más expandidos mundialmente, así como los más conocidos.

Las palas se unen en el buje, que, a su vez está conectado con el eje lento del interior de la góndola. La punta del buje se denomina nariz y es importante destacar su forma

aerodinámica que permite evitar turbulencias y desvía el aire hacia las palas. Además, la estructura del buje cambia según el modelo de aerogenerador. En un bipala tiene una forma tambaleante que se adapta a la posición de las dos palas. Por lo contrario, en el tripala el buje es una caja hueca, sólida y resistente.

Una vez clara la estructura externa del aerogenerador el siguiente paso será comprender la **construcción interna**:

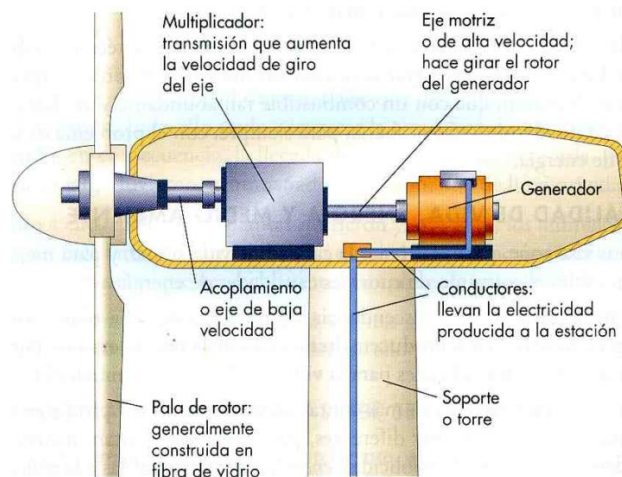


Ilustración 11: Partes de la construcción interna de un aerogenerador

[MEN]

En primer lugar, la conexión con el exterior se lleva a cabo mediante el eje lento. Este une el buje con la multiplicadora. Este eje, como previamente mencionado, gira a la vez que las palas por lo que tiene una energía de rotación que se aprovechará más adelante en el generador. Sin embargo, esta velocidad de rotación (7 a 12 vueltas por minuto) es demasiado baja como para poder aprovechar la potencia. Por ello, la multiplicadora se encarga de aumentar la velocidad de giro hasta en un factor de 50. La principal propiedad de la multiplicadora es su ratio de conversión de velocidad. Al igual que en un transformador que eleva la tensión y tiene un lado primario y secundario se puede definir el lado primario de la

multiplicadora que sería el rotor y el secundario que correspondería al generador con un ratio 1:m de velocidad entre ellos.

En este punto cabe destacar que el eje de salida de la multiplicadora contiene un disco de frenado para, en caso de emergencia o de que un técnico tenga que acceder a la cabina sin comprometer su seguridad, la turbina se detenga por completo independientemente de la velocidad de viento que haya en ese momento.

Al otro lado de la multiplicadora se encuentra el eje rápido. Una velocidad habitual para este es en torno a las 1500rpm. Es el encargado de accionar el generador.

La función principal del generador es transformar la energía que le llega en forma de rotación, es decir, energía mecánica, en energía eléctrica. Esta conversión de energía se realiza a bajas tensiones (<1000V) para más adelante elevarlas en las subestaciones y poder distribuirla. Usualmente, se emplean generadores de inducción con potencias de entre 500 y 1500kW. Más adelante, se estudiarán los diferentes tipos de generadores y cómo funcionan.

Mediante conductores que unen el generador a través de la torre con la base se conduce la electricidad hasta su destino.

Hay que destacar otras partes del aerogenerador como el controlador electrónico que controla el estado del aerogenerador. También la unidad de refrigeración que es un ventilador con fluido refrigerante que evita que las piezas del interior de la góndola se calienten y sobre todo mantiene el aceite de la multiplicadora a una temperatura adecuada de manera que este mecanismo no pierda eficacia.

La próxima imagen muestra mejor la unión de los ejes con la multiplicadora:

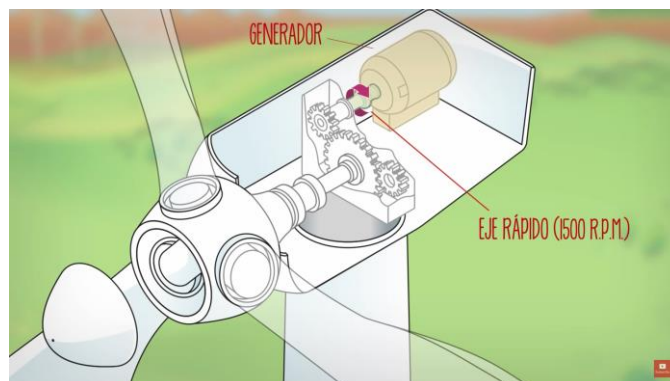


Ilustración 12: Caja multiplicadora

[MEN]

El siguiente esquema permite destacar las funciones principales de cada elemento del aerogenerador:

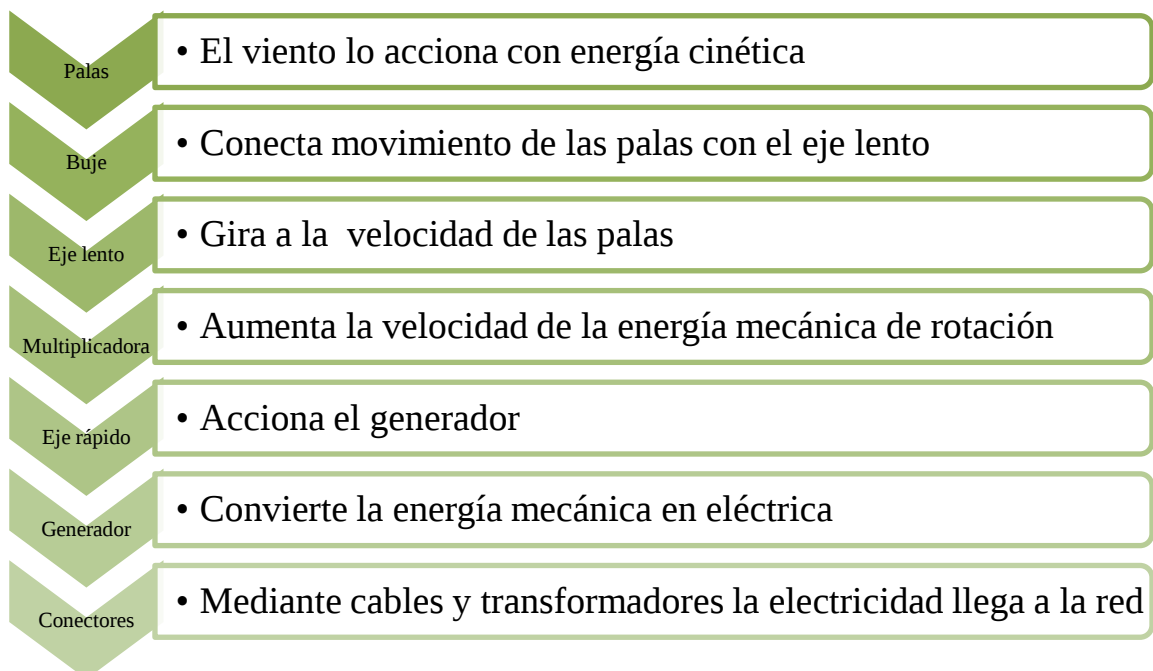


Ilustración 13: Resumen del funcionamiento de un aerogenerador

La primera parte del proceso hasta que se activa el generador se considera la parte mecánica. La segunda parte es la parte eléctrica. Nuestro estudio tendrá un mayor foco en la parte eléctrica como veremos en el capítulo 4.

2.3 UNIÓN DE AEROGENERADOR CON LA RED

Una vez que el generador está en pleno funcionamiento, la electricidad que produce tiene que llegar a los hogares u otros destinos para que sea consumida. Mediante cables conductores que van por el interior de la torre la electricidad llega hasta la base. Del aerogenerador se obtiene energía a baja o media tensión y continua.

Cuando llega a la base, un transformador eleva la tensión para poder transportarla por el interior del parque. Normalmente este transporte se realiza de manera subterránea con cables de corriente alterna para minimizar pérdidas. Una vez que llega a la subestación se vuelve a elevar la tensión a un valor que se pueda incorporar a la red a través de la línea de evacuación y ya se distribuye a los destinos finales.

Los cables de alta y baja tensión tienen diferentes grosores, puesto que unos tienen que soportar más corrientes que otros.

Cabe destacar que hay dos maneras de conectarse a la red:

- ➔ Conexión directa mediante generadores síncronos y asíncronos que se describirán a continuación
- ➔ Conexión mediante un equipo de electrónica de potencia que más tarde conecta con la red (full converter)

Por ahora el siguiente resumen da una idea general del método de transporte:

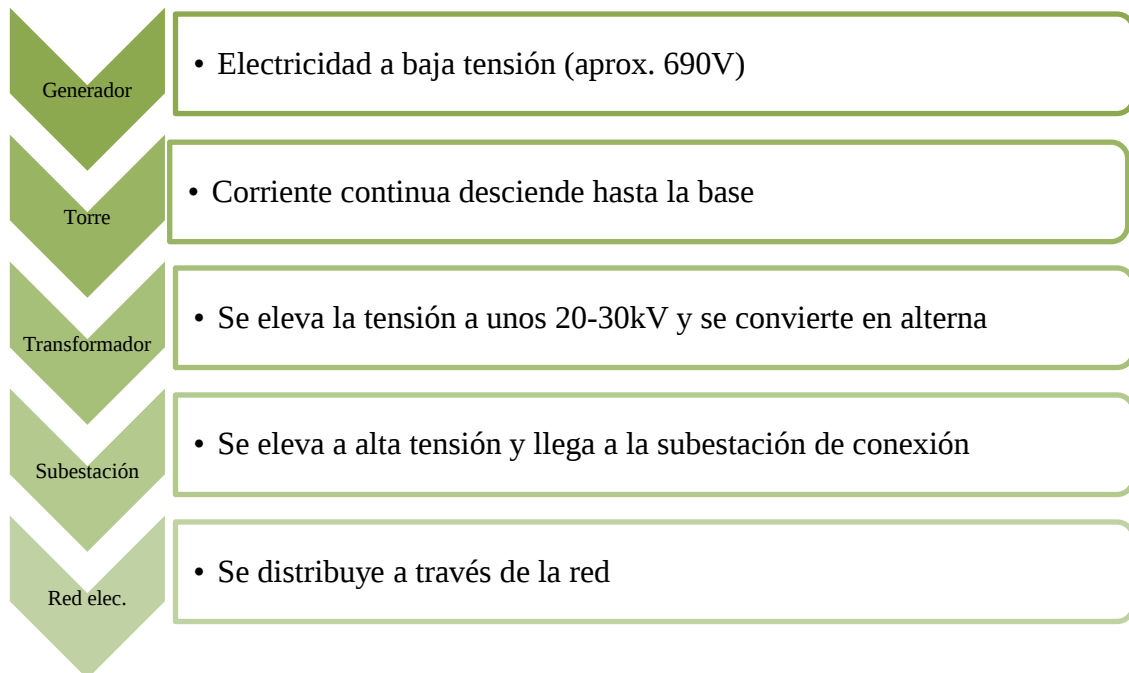


Ilustración 14: Resumen de la conexión con la red

2.4 FUNCIONAMIENTO Y TIPOS DE GENERADOR:

Para poder comprender de manera exhaustiva el funcionamiento de los aerogeneradores y tratar de buscar puntos de mejora hay que comprender cómo opera un generador.

En términos generales, un generador es un motor asíncrono o síncrono, en el que, al inducir una pequeña corriente en el rotor se crea un campo magnético que, a su vez, induce una corriente en el estator. Hay varios tipos y diferentes maneras de funcionamiento que quedarán más comprensibles a lo largo de los siguientes párrafos.

En este punto cabe destacar que la corriente inducida puede circular en los dos sentidos, tanto positivo como negativo. Si el aerogenerador se encuentra apagado lo alimentaremos. Sin embargo, cuando esté en estado de producción, la corriente bajará por la torre para inyectar la electricidad previamente producida a la red. Este segundo caso es lo deseado para obtener energía eólica.

La generación tiene lugar a bajas tensiones y en modo alterna. Se pueden diferenciar dos tipos de generadores:

- ➔ Generador asíncrono: puede ser con rotor en jaula de ardilla (estos son propios de los tripala con velocidad constante y los demás tipos más para variable) o con rotor bobinado doblemente alimentado o con resistencias variables
- ➔ Generador síncrono multipolo (suelen ser o bien de electroimanes o bien de imanes permanentes)

La siguiente imagen muestra algunas de las configuraciones de los generadores (hay que destacar que son de las configuraciones de los aerogeneradores más antiguos tipo I y tipo II) para obtener la energía deseada:

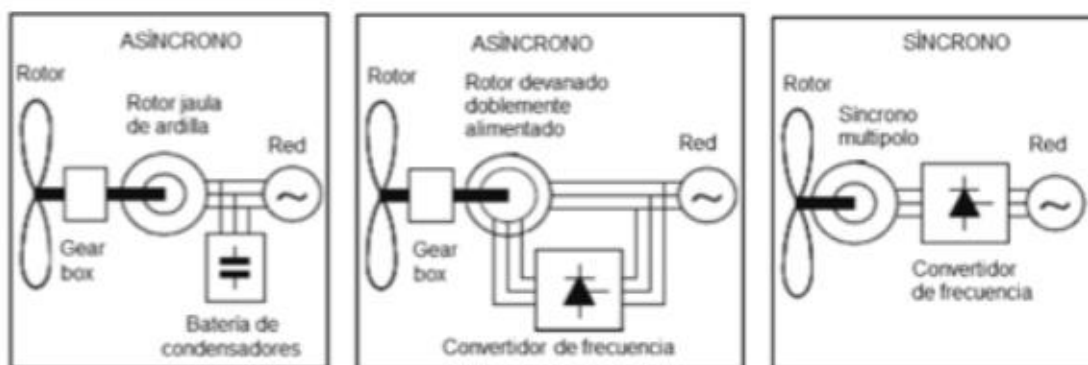


Ilustración 15: Tipos de generadores y su conexión a la red

[VILL12]

A continuación, veremos un breve resumen de los generadores más típicos y expandidos mundialmente entre los aerogeneradores. Más tarde, en los capítulos 3 y 4 nos adentraremos un poco más en los generadores más utilizados hoy en día y más beneficiosos.

2.4.1 GENERADOR DE JAULA DE ARDILLA:

El estator se encuentra conectado a la red y, de esta manera transmite la energía eléctrica. Para el correcto funcionamiento el rotor debe girar a una velocidad constante con variaciones de no más del 1%. Esta es una de las mayores ventajas del rotor en jaula de ardilla. Su

arranque es automático y su velocidad prácticamente constante y su curva par-velocidad es simple de modificar con la variación de las barras. Una gran desventaja de este generador es que consume potencia reactiva de la red por lo que se implantan condensadores en paralelo a la unión con la red que almacenen y proporcionen esta potencia aparente necesaria para que el sistema no dependa al 100% de la red. En términos generales tenemos una corriente que fluye por los devanados del estator e induce un campo magnético giratorio que irá a la velocidad de sincronismo en el estator. Consecuentemente, el rotor, que está compuesto por un cilindro laminado de metal de alta conducción como puede ser el aluminio o el cobre, comienza a tener un flujo de las corrientes de cortocircuito/de Foucault inducidas por el campo magnético del estator. A raíz de esto se crea otro campo magnético en el rotor que creará un par con el que los campos se mantendrán giratorios.

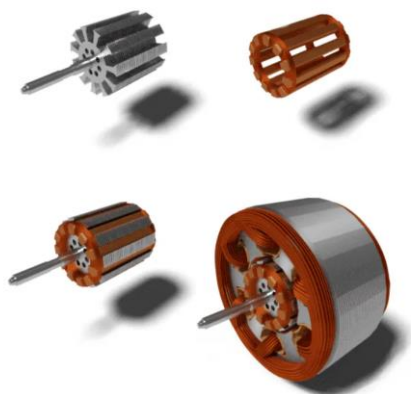


Ilustración 16: Generador de jaula de ardilla

[CAB21]

2.4.2 GENERADOR CON DOBLE BOBINADO (DFIG):

Se emplea para las velocidades variables. Los devanados del rotor están alimentados con corriente de frecuencia variable por lo que las frecuencias eléctrica y mecánica pueden ser distintas y por ello seguir funcionando con variaciones en la velocidad. Esto es muy beneficioso en los aerogeneradores debido a los drásticos cambios de velocidad en el viento. El estator se conecta a la red.

La energía se puede obtener de ambos devanados, es decir, tanto estator como rotor debido a los ‘inverters’ que controlan el flujo de potencia y funcionan hacia ambos lados.

Este tipo de generador es muy relevante para la producción de energía eólica y más adelante veremos los aerogeneradores de tipo 3 y 4 que incluyen los circuitos de potencia necesarios para aprovechar este tipo de generador que se muestran en la siguiente imagen:

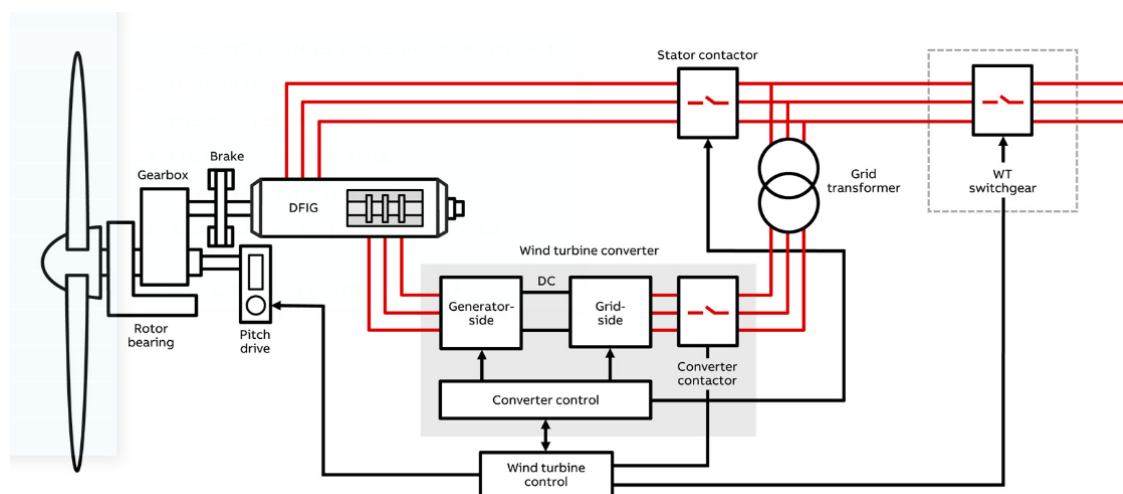


Ilustración 17: Generador con doble bobinado

[EDI20]

2.4.3 ROTOR DEVANADO CON RESISTENCIAS VARIABLES:

Su principio de funcionamiento es igual que los otros dos rotores asíncronos previamente descritos. La mayor ventaja de este rotor es que se puede reducir fácilmente la corriente de arranque necesaria, y por tanto incrementar el par que se puede obtener del generador. Para ello tan sólo hay que incluir en serie con las bobinas del rotor una resistencia variable.

2.4.4 GENERADOR SÍNCRONO MULTIPOLO:

También se emplea para velocidades variables. Tiene un gran número de polos magnéticos que hacen que la multiplicadora de velocidad no sea necesaria. Se genera la electricidad mediante la transmisión directa. El generador síncrono se activa con los imanes (ya sean

electroimanes o imanes permanentes) y gira a la misma velocidad del rotor, de manera variable. Consecuentemente, la energía eléctrica producida tendrá diferentes valores de frecuencia y, por tanto, es necesario implementar un convertidor de frecuencia previo a la inyección a la red. La siguiente imagen muestra un esquema de cómo llega la energía desde las palas hasta la red:

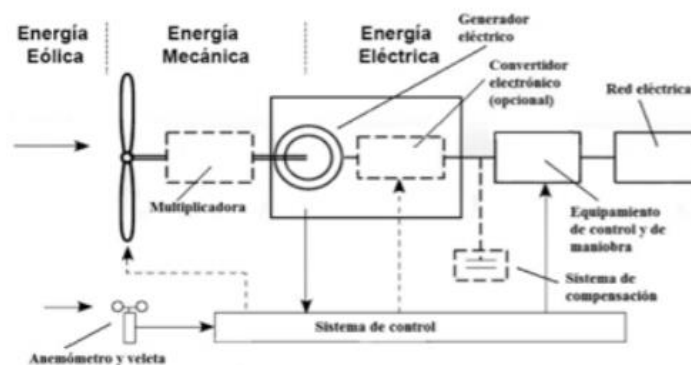


Ilustración 18: Generador síncrono multipolo

[VILL12]

En general, las máquinas rotativas funcionan gracias a que cuando dos campos magnéticos inducidos por corrientes de bobinas están desfasados, estos tienden a rotar para alinearse. Según cómo se evite que el par consiga alinear los campos magnéticos se obtiene un tipo de máquina eléctrica u otra. Mediante las bobinas y el hecho de ir turnando las bobinas que se encuentran alimentadas, se mantiene la rotación de la máquina. Todo esto funciona gracias a los principios de Faraday y Lenz que, en resumidas cuentas, definen que un cambio de flujo conlleva una generación de voltaje y, por tanto, se inducirá una corriente que se opondrá a cualquier cambio (Lenz) creando así un campo magnético.

En resumen, se deben conocer las siguientes características de las máquinas síncronas y asíncronas. La siguiente tabla compara los principales requisitos que debemos tener en cuenta:

Tabla 2: Comparativa entre la máquina síncrona y la asíncrona

MÁQUINA SÍNCRONA	MÁQUINA ASÍNCRONA
Inductor=rotor Inducido=estator	Inductor=estator Inducido=rotor
Excitación independiente	Rotor en cortocircuito Jaula de ardilla
En el rotor se produce un campo magnético alimentado por corriente continua que induce una tensión en el estator	Se crea un campo magnético en el estator debido a una corriente alterna
El estator está alimentado por corriente alterna y produce un campo magnético rotativo $B_{est}=W_{sinc}$	Se induce una fem alterna en el rotor y con ello una corriente que genera un campo magnético en el mismo $B_{est}=W_{sinc}=B_{rot}$
El rotor y el campo magnético del estator giran a la misma velocidad	El rotor debe girar a diferente velocidad que el $B_{estator}$ Hay deslizamiento
B_{rotor} sigue a $B_{estator} \rightarrow$ Motor B_{rotor} delante de $B_{estator} \rightarrow$ Generador	$W_{rotor} < W_{sinc} \rightarrow$ Motor $W_{rotor} > W_{sinc} \rightarrow$ Generador

Más adelante analizaremos los puntos correspondientes de cada máquina que sean relevantes para cada estudio.

En conclusión, en este capítulo hemos comprendido la estructura de un aerogenerador y los diferentes modelos de generadores que se pueden instalar. Concluimos con la certeza de que hay muchas mejoras posibles dado que la maquinaria que se instala se puede actualizar de diferentes maneras. Además, hemos visto que los primeros parques son de gran antigüedad

y desde entonces la tecnología ha seguido avanzando mucho. En los siguientes capítulos nos adentraremos en las maneras de mejorar el rendimiento de nuestros molinos de viento.

Capítulo 3. ANÁLISIS DE LOS POSIBLES PUNTOS DE MEJORA EN AEROGENERADORES

Previamente, en el capítulo 2, hemos podido comprobar la importancia de la energía eólica a nivel mundial. Podemos afirmar que, efectivamente, las energías renovables se están abriendo camino en la actualidad y cada vez tienen una mayor relevancia para la energía generada y consumida.

En efecto, muchas noticias confirman la idea de que la energía eólica es cada vez más relevante para dejar de consumir energía de otras fuentes contaminantes. REVE, la Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico (<https://www.evwind.com>), nos permite ver este avance cronológicamente mediante los siguientes eventos destacables:

- ENERO 2021: la energía eólica aumenta un 8,4% en China a lo largo del año 2020
- FEBRERO 2021: Argentina inaugura el parque eólico “Chubut Norte III de Genneia y PAE” tras una inversión de 81 millones de dólares.
- MARZO 2021: Iberdrola eleva la capacidad renovable instalada en Grecia y Chipre a 437MW mediante la instalación de los aerogeneradores terrestres más potentes.
- ABRIL 2021: Renault se alía con Iberdrola para alcanzar una huella de carbono cero en sus fábricas
- MAYO 2021: Aumenta la demanda de aerogeneradores a la compañía Nordex. Países como Francia se vuelven cada vez más ambiciosos
- JUNIO 2021: IRENA (“International Renewable Energy Agency”) actualiza sus objetivos energéticos, para 2050 quieren crear 122 millones de empleos en el sector energético y así acelerar el proceso hacia cero emisiones
- JULIO 2021: El auge de la eólica se demuestra en los pedidos que recibe Siemens Gamesa a lo largo del año anterior con un valor total de hasta 11486 millones
- AGOSTO 2021: EEUU instala un récord de 16836MW de capacidad eólica en 2021, superando a la solar y al gas natural
- SEPTIEMBRE 2021: La eólica sigue creciendo, Vestas instala 297MW en Canadá y Serbia lidera la eólica en los Balcanes Occidentales
- OCTUBRE 2021: China comienza a desarrollar nuevos proyectos de eólica y fotovoltaica en sus desiertos. Además, Arabia Saudí instala su primer gran parque eólico y Vietnam pone en funcionamiento de 42 nuevas plantas eólicas.

- NOVIEMBRE 2021: Nordex instala 370MW en Brasil
- DICIEMBRE 2021: Vestas continúa expandiéndose en Argentina con la instalación de 81MW
- ENERO 2022: Endesa y PreZero pactan la construcción de la primera planta de reciclaje de palas eólicas de la Península Ibérica
- FEBRERO 2022: Debido a la guerra de Rusia, España decide acelerar todos los procesos de optimización de energía eólica
- MARZO 2022: Vestas instalará 97MW en Italia y Nordex instalará 11 aerogeneradores en Extremadura
- ABRIL 2022: regulaciones de la Unión Europea del mercado eléctrico y de las inversiones en eólica
- MAYO 2022: Por primera vez se instalan 1500 sensores en aerogeneradores para hacer un seguimiento exhaustivo de las vibraciones y todos los movimientos.

Tras analizar esta línea temporal, podemos confirmar que la energía eólica se está expandiendo mundialmente de manera rápida. España, al ser uno de los países pioneros de esta tecnología, tiene que enfrentarse a uno de los mayores retos en el ámbito de los aerogeneradores. Por ello, hay que pensar en mecanismos para poder prolongar la vida útil de sus parques eólicos, puesto que la mayoría ya superan los 15 años de edad y necesitan actualizarse.

Un aerogenerador puede sufrir una **gran variedad de fallos** y tener defectos en diferentes áreas. En el siguiente esquema se recopilan alguno de los diferentes ámbitos en los que pueden ocurrir anomalías:

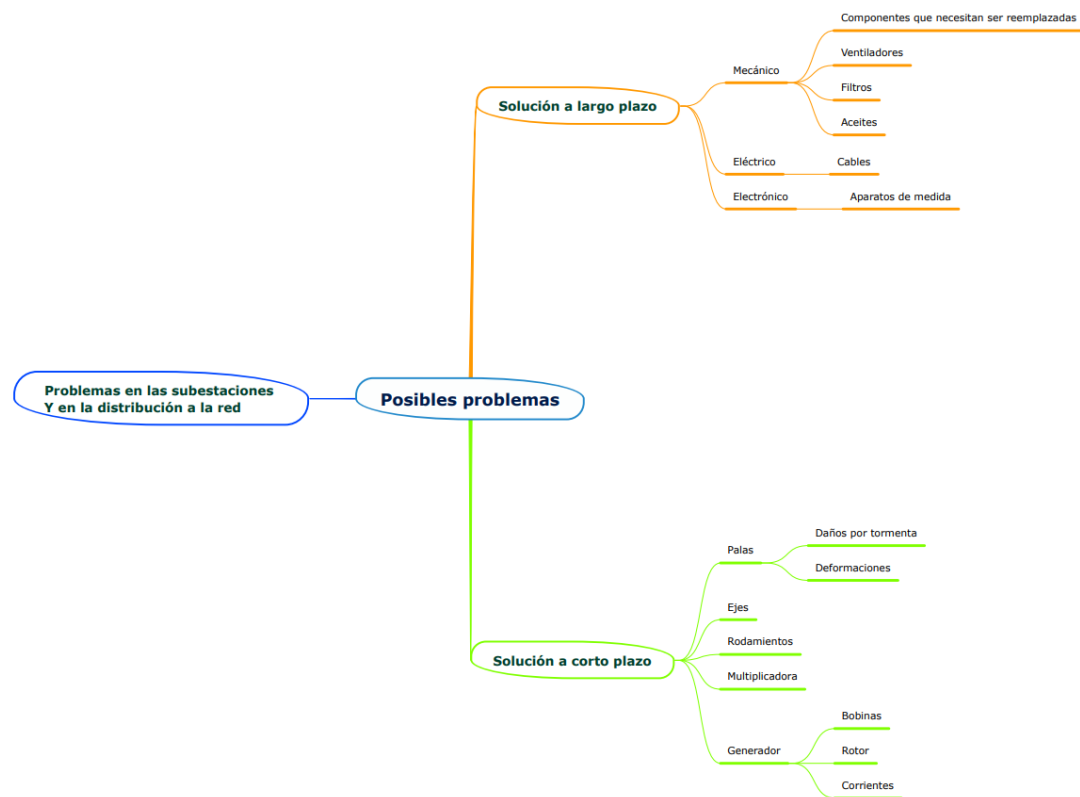


Ilustración 19: Posibles fallos en un aerogenerador

3.1 REPOTENCIACIÓN

Primeramente, se necesitan nuevas tecnologías de monitorización que permitan conocer el estado real de los aerogeneradores. Ya sea por análisis de Big Data, Machine Learning o el desarrollo de nuevas plataformas. Hay que realizar mejoras no sólo a nivel de Software sino también en los modelos de mantenimiento y los procesos que se llevan a cabo en los aerogeneradores para mejorar su calidad, duración y rentabilidad. Se trata de poder explotar al máximo los recursos y con ello generar la mayor potencia posible.

Entre las alternativas que se han tratado hasta ahora está la **repotenciación**, es decir sustituir partes mecánicas y eléctricas de los aerogeneradores actuales por otras más robustas y avanzadas en términos de potencia, tamaño y eficiencia para así alargar su vida útil. Además, cambiando algunas componentes o implementando nuevas tecnologías se puede garantizar

una mayor seguridad. Cada empresa es libre de elegir por sí misma qué opción tomar una vez que se acaba la vida útil de sus aerogeneradores.

Alberto Santos y David Torres, expertos en Asesoría Técnica en energía eólica de TÜV SÜD España afirman: “En clave de futuro, la necesidad de evolucionar hacia un modelo de mantenimiento inteligente será clave para reducir el envejecimiento de los aerogeneradores”. [ENE19]

De acorde con las necesidades previamente mencionadas, la AEE ha estado llevando a cabo diferentes proyectos a lo largo de los últimos años. Los más recientes son los siguientes:

2017-2019: Simulwind:



Ilustración 20: Logo de Simulwind

A medida que la digitalización se hacía más y más importante en nuestro día a día, los parques eólicos también comenzaron a digitalizarse. Consecuentemente, este proyecto consistió en desarrollar un simulador informático que podía modelar los posibles fallos del generador y así facilitar la tarea de mantenimiento del mismo.

2020-2022: windEXT:



Ilustración 21: Logo de windEXT

Este proyecto trata de sistematizar la formación en el mantenimiento de los molinos de viento. Además, se quiere impulsar y promover el uso de aplicaciones de realidad virtual que faciliten la tarea de formación para el mantenimiento de los aerogeneradores. Con el fin

de mejorar el mantenimiento se quieren integrar nuevas tecnologías como el ‘condition monitoring’ y nuevos métodos de seguimiento que permitan extender la vida útil de los aerogeneradores. Es una cooperación internacional que tiene como objetivo mantener el liderazgo europeo en cuanto a energía eólica.

Pero ¿qué es **condition monitoring?**

Se trata de uno de los grandes puntos de mejora de los aerogeneradores y de los más actuales. Consiste en la habilidad de detectar de manera remota posibles problemas antes de que ocurran. Para ello, se recogen datos como la temperatura, las vibraciones y otros parámetros para analizar cambios repentinos en ellos y realizar cálculos de posibles fallos.

Los beneficios de esta técnica entre otros son: la reducción de los costes de reparación y mantenimiento en hasta un 35%, la disminución del tiempo necesario de reparación en hasta un 60% y ayudará a reducir la probabilidad de fallo de los aerogeneradores en hasta un 55%.

Los puntos más relevantes que hay que analizar son las vibraciones a las que se somete la torre y el correcto funcionamiento de las máquinas rotativas, así como el lugar exacto en el que ocurre el fallo.

Con estos nuevos métodos se pueden detectar fallos antes de que ocurran e intervenir de manera rápida y precisa. Esto permitirá evitar largos tiempos de parada del aerogenerador por avería lo cual resultaría en pérdida de energía y con ello también de dinero.

Como previamente se ha mencionado las técnicas más empleadas son: el análisis de vibraciones, análisis de lubricante, análisis de la temperatura, análisis de emisión de sonidos y muchos otros.

Windrock es una de las grandes empresas que se dedica a instalar este tipo de tecnologías mediante un sistema llamado: “Spotlight Monitoring System”. Este algoritmo analiza de forma rápida y eficaz las medidas tomadas y almacena los datos en tiempo real en la nube para su posterior análisis. [WIN18]

En conclusión, podemos asegurar que estas nuevas formas de análisis son una de las mejoras muy necesarias en el ámbito de la energía eólica.

De estas nuevas metodologías podemos concluir que el uso de sensores en los aerogeneradores cada vez es más importante. Necesitamos instalar sensores que nos permitan analizar por ejemplo la temperatura y las vibraciones de manera que podamos hacer un seguimiento exhaustivo de nuestros aerogeneradores.

3.2 **SENSORES**

Estos **sensores** captan posibles errores de antemano al ser de gran precisión y, por ello, son capaces de evitar grandes fallos.

Algunos de los sensores que se están desarrollando y que serían muy útiles de implementar en los aerogeneradores son los siguientes:

Sensores de corrientes Eddy o Foucault: Como bien sabemos las corrientes Eddy son las que se forman en los generadores a raíz de los campos magnéticos inducidos y sólo representan pérdidas. Además, es posible que se cree una fuerza que genere pequeños desplazamientos que, como analizaremos más tarde, pueden causar pérdidas de eficiencia. Por ello, tener sensores que detecten este tipo de corrientes y con ello las vibraciones, los desplazamientos y las oscilaciones podría ser muy beneficioso. Un uso más concreto que tienen estos sensores es la comprobación de la lubricación del generador. Este siempre debe tener una fina capa de aceite entre rotor y estator y este espacio no puede superar un cierto tamaño.

Otra funcionalidad de estos sensores es detectar si el eje está girando de manera centrada con el estator (radialmente) y si el eje está rotando con algún eje (axial). De esta manera se puede detectar si va a haber algún fallo por parada, desplazamiento, desgaste de alguna pieza u otras razones antes de que ocurra.

En general, son sensores muy precisos, con una respuesta rápida y que están diseñados para actuar en equipos industriales bajo presión, suciedad y grandes cambios de temperatura sin problema alguno.

Sensores de desplazamiento: las turbinas están continuamente sometidas a vientos, vibraciones, condiciones meteorológicas extremas y, además, soportan un gran peso. Es de esperar que, a lo largo de los años, la base de la torre se vaya desplazando ligeramente. No obstante, para evitar grandes catástrofes de derrumbamientos o de pérdida de eficiencia o utilidad de la turbina, se pueden emplear sensores de desplazamiento láser.

Sensores de temperatura: como se explica en la primera parte de este trabajo, la cabina del aerogenerador consta de un generador y varios ejes que, junto con la caja multiplicadora tienen riesgo de sufrir sobrecalentamiento. Estos cambios de temperatura hay que detectarlos lo antes posible para evitar consecuencias como fuegos u otras situaciones.

Sensores de viento: últimamente, se están empezando a emplear sensores de viento de tipo ultrasónico que no necesitan recalibración. Por ello, son muy útiles para las zonas de difícil acceso de la torre. El funcionamiento de estos sensores es simple, miden la distancia a los objetivos con ondas de sonido al igual que lo hacen muchos animales.

Acelerómetros: a lo largo del día, las palas del aerogenerador son sometidas a velocidades de viento muy cambiantes. Estos cambios conllevan vibraciones dentro de la góndola de la turbina, es decir en los ejes y rodamientos. Tener la habilidad de detectar estos cambios de antemano y así ajustar los componentes de giro podría evitar numerosos problemas.

El blog “Instrumentación y Control” (<https://instrumentacionycontrol.es/mejoras-operativas-en-aerogeneradores-con-el-uso-de-sensores/>), que ofrece soluciones para la medida y el seguimiento de diversos sectores industriales, propone el uso de los siguientes tipos de sensores para optimizar el funcionamiento de los aerogeneradores:



Ilustración 22: Sensores propuestos para aerogeneradores

[INS]

Como vemos, podemos concluir que uno de los importantes puntos de mejora para optimizar el funcionamiento de nuestros aerogeneradores es lograr una monitorización potente mediante sensores y la toma continua de datos.

Sin embargo, no todos los puntos de mejora necesarios están relacionados con sensores y software. También hay que avanzar en otros puntos relacionados con la construcción y la ubicación para los aerogeneradores que se están construyendo desde cero.

Las primeras turbinas que se construyeron eran de 500kW. Desde entonces el incremento tanto en potencia como en tamaño de las turbinas ha sido muy destacable. Las torres, las palas e incluso la maquinaria han aumentado notoriamente sus dimensiones. También los materiales empleados han ido mejorando con el paso de los años adecuándose más a las necesidades de los aerogeneradores.

Veinte años más tarde de la instalación del primer parque eólico, en 2014 la potencia de los aerogeneradores se había multiplicado por 6, la altura de las torres se había triplicado al igual que el diámetro del rotor. La producción de energía eólica se multiplicó por 8. [MED19]

El primer aspecto de construcción cuyo aumento es claramente visible son las palas.

Se trata de desarrollar y producir palas más grandes y resistentes limitando el aumento de peso. A mayor tamaño, mayor rendimiento energético. Actualmente, hay muchas empresas volcadas en el estudio de las palas de los molinos de viento. Por un lado, se trata de mejorar y optimizar su forma. Además, se quieren encontrar maneras de instalar palas de mayor tamaño evitando las dificultades que esto conlleva como el transporte o la elevación de la propia pala hasta la góndola de la turbina. Finalmente, también hay que investigar el material ideal para estas palas puesto que están expuestas a grandes cambios de temperaturas, a condiciones meteorológicas extremas y a grandes vibraciones y velocidades de viento. [ENE20]

Más adelante veremos algunas de las soluciones presentadas recientemente por diferentes compañías.

3.3 TIPO DE GENERADOR

Por otro lado, se podrían realizar mejoras en la maquinaria empleada para la generación eléctrica. Estamos trabajando con aerogeneradores de hace más de 15 años y desde entonces los generadores han avanzado mucho en el mundo de la industria. Tener un tipo de generador de un material u otro y sobre todo que esté trabajando en un punto de generación u otra podría tener un gran impacto sobre la de energía eléctrica. Pequeños cambios en esta maquinaria podrían optimizar mucho el proceso de obtención de energía eléctrica desde la eólica. En este trabajo se realizará un estudio que permitirá concluir cuáles son las características del rotor más apropiadas o beneficiosas para un aerogenerador. Como bien sabemos y previamente se ha descrito un aerogenerador puede realizar la generación

eléctrica o bien mediante generadores eléctricos asíncronos o de inducción, es decir alguno de los siguientes modelos:

- rotor en jaula de ardilla
- rotor devanado doblemente alimentado
- rotor devanado con resistencias variables

O bien mediante generadores eléctricos síncronos, es decir:

- con excitación mediante electroimanes
- con excitación mediante imanes permanentes

Una vez, analizadas alguna de estas opciones también, se analizarán los distintos materiales posibles a utilizar y las ventajas y desventajas de unos sobre otros.

3.4 UBICACIÓN DE LOS PARQUES

Otra posible mejora es encontrar una manera de obtener **más electricidad con menor cantidad de viento**. Esto permitirá no sólo mejorar el rendimiento de los aerogeneradores sino también dará oportunidad a construir parques eólicos en zonas que previamente habría sido impensable dadas las circunstancias de viento. Además, posibilitará obtener la misma potencia que antes con un menor número de aerogeneradores, con lo que se logrará reducir el impacto medioambiental. Una de estas zonas podría ser por ejemplo Zaragoza.

Principalmente, se trata de mejorar el potencial eólico. Esto incluye: “La densidad de potencia, es decir la distribución de la energía eólica a distintas velocidades de viento, la curva de potencia (muestra cuánta potencia eléctrica se obtiene con cada velocidad de viento) teniendo en cuenta la distribución Weibull que muestra la probabilidad de que en una zona en un año el viento lleve unas velocidades u otras”. [TWE19]

En general, es necesario aumentar la eficiencia energética para aprovechar mejor la energía, pero también hay que reducir el ruido, la cantidad de aceites lubricantes necesarios y la velocidad necesaria de las palas para proteger a las aves.

El hecho de disminuir las velocidades de viento necesarias para conseguir energía eléctrica permite expandir las zonas de construcción de parques eólicos.

Las zonas de la península más perjudicadas en cuanto a las masas de viento que reciben por su ubicación geográfica son Salamanca y Valladolid. [GAR07]

Por tanto, para optimizar el funcionamiento de un parque eólico hay que realizar un análisis exhaustivo de los territorios en los que se quieren instalar. Algunos de los aspectos necesarios que hay que tener en cuenta son que haya suficiente viento e intensidad de viento, que las ráfagas de viento sean continuas, que haya opción de conexión a la red y transporte de la energía hasta el destino final, así como que la instalación de aerogeneradores no suponga problemas para el medioambiente, las aves y la gente que viva en los alrededores.

En la próxima imagen Iberdrola muestra como han evolucionado los parques eólicos hasta la actualidad y podemos confirmar que hoy en día con menos aerogeneradores se puede conseguir más energía:



Ilustración 23: Comparativa de Iberdrola de sus parques eólicos con el paso de los años

[EUR20]

Los artículos que se incluyen en la bibliografía: [EUR20] y [GAR07] muestran los amplios objetivos de expansión de Iberdrola y otras empresas a lo largo de la Península para aprovechar el mayor número de zonas posible.

3.5 GENERACIÓN VS. DEMANDA

Por último, otro gran problema es la **brecha entre generación y demanda**. No siempre se consume toda la potencia que los aerogeneradores pueden proporcionar en un instante o, por otro lado, no siempre se puede abastecer la energía eléctrica requerida debido al bajo nivel de viento u otras razones.

La siguiente imagen muestra para un día concreto como por un lado las fuentes de energía renovables no generan energía suficiente como para cubrir toda la demanda. Además, según la hora tenemos valores muy diferentes de eólica disponible tal y como muestra la gráfica de abajo a la derecha ya que, como era de esperar el viento sopla con diferentes intensidades según el momento del día.

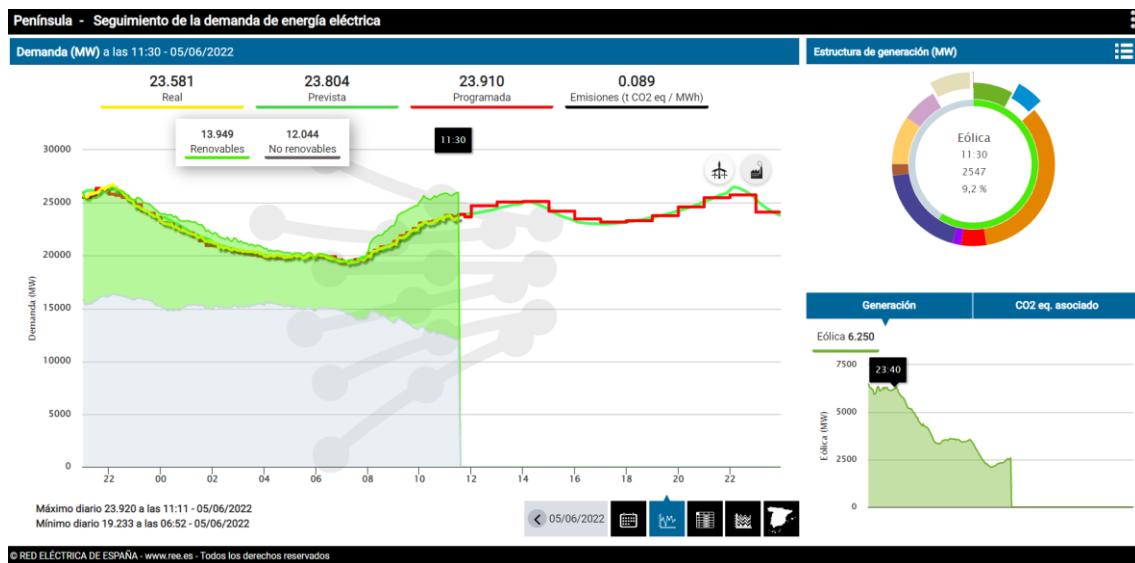


Ilustración 24: Demanda de energía eléctrica del 5 de junio de 2022 por REE

[REE22]

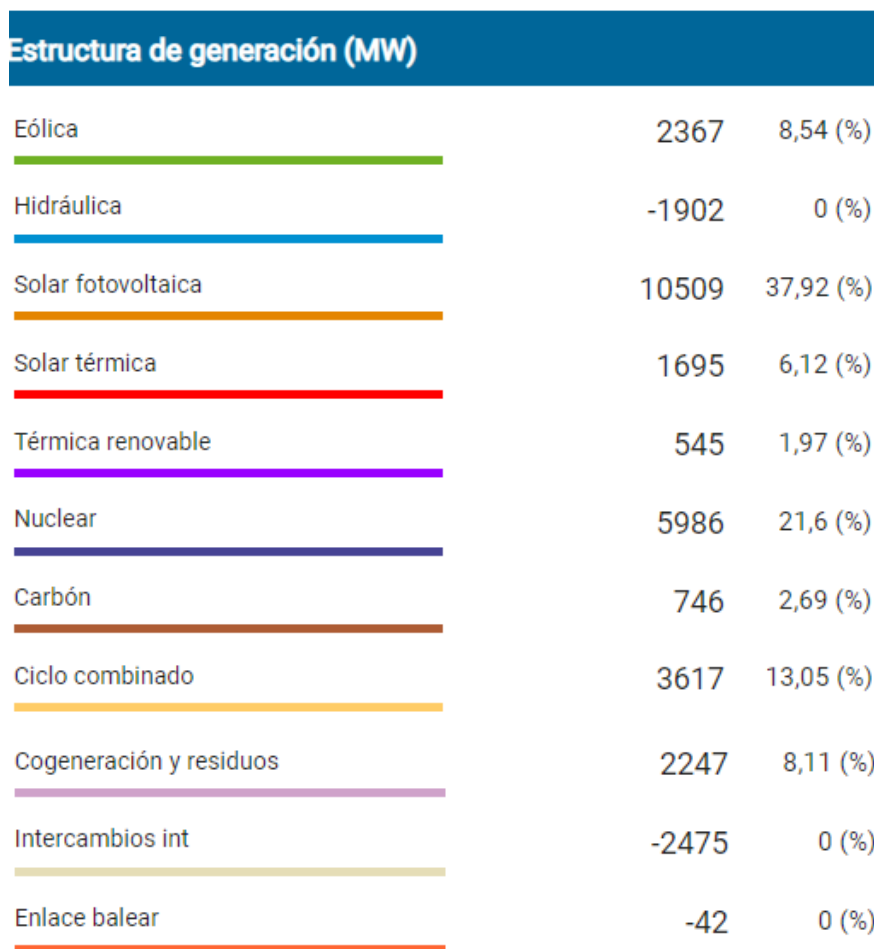


Ilustración 25: Distribución de la generación en España (REE)

[REE22]

En el desglose podemos observar que dentro de las energías renovables en un día como el 5 de junio predomina la solar con casi un 38%, seguida por el ciclo combinado con un 13% y la eólica con un 8,5%.

Sin embargo, un día como el 5 de enero la estadística sería completamente diferente:



Ilustración 26: Demanda de energía eléctrica el 5 de enero de 2022 por REE

[REE22]

Esta vez la eólica representa un 42% y la solar apenas un 1%.

No obstante, debemos tratar de maximizar el uso de la eólica a lo largo de todo el año evitando desperdiciar cualquier MW que se genere de más.

Las mayores pérdidas ocurren cuando hay que desconectar los aerogeneradores de la red para mantenerla en equilibrio puesto que por grandes velocidades y masas de viento estos generan electricidad a niveles muy superiores a la demanda.

Con el objetivo de conseguir que esta brecha tenga un menor impacto sobre la energía eólica se deberían investigar maneras de almacenar la energía cuando hay sobreproducción de forma que ésta se pudiese usar a posteriori. Maximizar el almacenamiento de esta energía sobrante evitaría la necesidad de usar energía de fuentes no renovables cuando la demanda sea alta pero no haga viento. Para solventar esta situación se están estudiando maneras de almacenar esta energía principalmente mediante el uso de baterías de Litio.

La empresa ACCIONA lleva trabajando exitosamente desde 2017 en implantar estos métodos de almacenamiento. Plantas como la de Acciona en Barasoain, la de Elecnor en

Tudela, la de Iberdrola en Caravaca de la Cruz o la de Gorona del Viento en la Isla de El Hierro ya tienen instalados sistemas de almacenamiento de esta energía. [ACC17]

Otro buen uso que podría evitar la necesidad de tener que desconectar los aerogeneradores sería emplear la energía sobrante para producir **hidrógeno verde**. El hidrógeno se está abriendo camino poco a poco en el mercado como podemos ver por ejemplo con los coches. Por ahora, se trata de un elemento que aún es demasiado caro y difícil de conseguir por lo que no se está explotando su potencial al máximo.

El hidrógeno tiene que superar varios obstáculos como pueden ser su producción, almacenamiento y transporte antes de empezar a comercializarse con naturalidad. Ahora bien, si lográsemos generar hidrógeno verde a base de la energía sobrante de la eólica en horas en las que no se consume tanta electricidad, daríamos un gran paso en cuanto al objetivo de cero emisiones.

En este tema hay 2 avances actuales relevantes. Por un lado, un instituto tecnológico de Corea del Sur asegura tener el método para producir hidrógeno verde a un coste 3000 veces más barato que lo establecido hasta ahora gracias a la membrana de electrolisis que emplean. [CAR22]

Por otro lado, una start-up americana, ‘Verdagy’, tiene un prototipo con el que afirman tener la manera de producir y vender hidrógeno verde al mismo coste que un combustible normal y corriente de hoy en día. [CAR22]

En la siguiente parte del trabajo nos centraremos en las mejoras posibles a realizar para la parte más eléctrica, es decir el generador. Se realizarán simulaciones y experimentos en el laboratorio para encontrar sistemas y circuitos más eficaces que se podrían instalar hoy en día en los generadores.

Capítulo 4. ANÁLISIS DE UNA MÁQUINA ROTATIVA

Hasta el momento hemos podido comprender la importancia de invertir tiempo y dinero en mejorar los parques eólicos. Además, hemos clarificado el funcionamiento de los aerogeneradores de forma que entender el siguiente capítulo resultará más asequible. También hemos hecho un análisis de los posibles puntos de mejora en los que actualmente se podría trabajar para así mejorar el rendimiento de nuestros molinos de viento.

En esta parte del trabajo nos centraremos en uno de esos puntos mencionados en el capítulo anterior, el más eléctrico, el generador. La máquina rotativa que, como hemos visto, se encuentra en la góndola, es decisiva a la hora de obtener la energía eléctrica a partir de la mecánica.

Usaremos un simulador llamado ‘COMSOL Multiphysics’ con el que podemos recrear las máquinas rotativas con sus diferentes devanados, sus fases e incluso fabricarlas de los materiales que nos parezcan más apropiados. A raíz de la simulación podemos analizar la fuerza, potencia y eficacia que tendría nuestro aerogenerador en la vida real.

Este simulador es mucho mejor que cualquier análisis que se pueda hacer a mano a base de fórmulas, puesto que tiene en cuenta muchos más factores que los que nosotros podemos resumir en una simple fórmula. Iremos viendo algunos de estos puntos a medida que avance el análisis.

Procederemos a analizar los modelos en 2D de forma que quede mucho más visual y fácil de comprender sin dejar de ser fiable y realista.

4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES:

En la industria hay diversas maneras de clasificar los aerogeneradores. Previamente, ya hemos visto algunas de estas divisiones como, por ejemplo, entre eje horizontal y vertical.

No obstante, para este capítulo usaremos otra manera de categorizar los molinos de viento. Tendremos 4 grupos: los aerogeneradores de tipo 1, de tipo 2, de tipo 3 y de tipo 4.

La primera parte del análisis realizada en el programa previamente mencionado ‘COMSOL’, tendrá su foco principal en los aerogeneradores de tipo 1 y 2.

La segunda parte del análisis se realizará en el laboratorio a partir de placas soldadas por nosotros mismos y realizando experimentos de los cuales tomaremos medidas e imágenes en el osciloscopio para sacar distintas conclusiones.

4.1.1 TIPO 1: VELOCIDAD FIJA

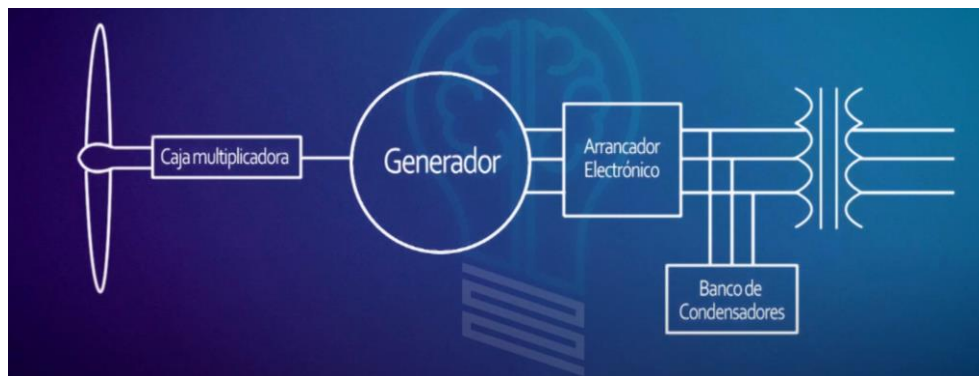


Ilustración 27: Estructura de un aerogenerador tipo 1

[COR20]

En este tipo de aerogeneradores es necesario superar la velocidad de sincronismo para lograr que el arranque del molino se realice en modo generador y no en modo motor (tendríamos un ventilador). La velocidad de esta turbina será fija y estará definida por la red. Así en las simulaciones realizadas en EE. UU. será diferente puesto que la frecuencia de la red es de 60Hz. [COR20]

Gracias al arrancador electrónico que podemos ver en el esquema, la corriente de arranque requerida será menor. Este es el tipo de aerogenerador más sencillo que inyecta la energía directamente a la red tras pasar por el transformador. Cabe destacar la necesidad del banco de condensadores para compensar la potencia reactiva que se consume al iniciar la máquina rotativa y crear campos magnéticos. [COR20]

4.1.2 TIPO 2: VELOCIDAD VARIABLE LIMITADA



Ilustración 28: Estructura de un aerogenerador tipo 2

[COR20]

En este caso, el tipo 2 permite regular el par del generador y con ello la potencia generada podrá mantenerse constante. Todo ello es posible gracias a la resistencia variable que podemos ver conectada a la máquina de inducción, más precisamente al rotor. Esta tiene la capacidad de controlar las corrientes del rotor y con ello la potencia generada. [COR20]

En nuestro caso, esto es muy beneficioso, ya que las ráfagas de viento varían constantemente y debemos intentar que afecten lo mínimo posible a la potencia generada. [COR20]

Los siguientes dos tipos de aerogeneradores permiten tener más control sobre la regulación y las características de la energía que estamos inyectando en la red y, por ello, es fundamental realizar un análisis más profundo en cómo obtener la mejor onda posible y con ello el mayor rendimiento posible de los parques eólicos.

4.1.3 TIPO 3: VELOCIDAD VARIABLE CON CONVERSIÓN PARCIAL

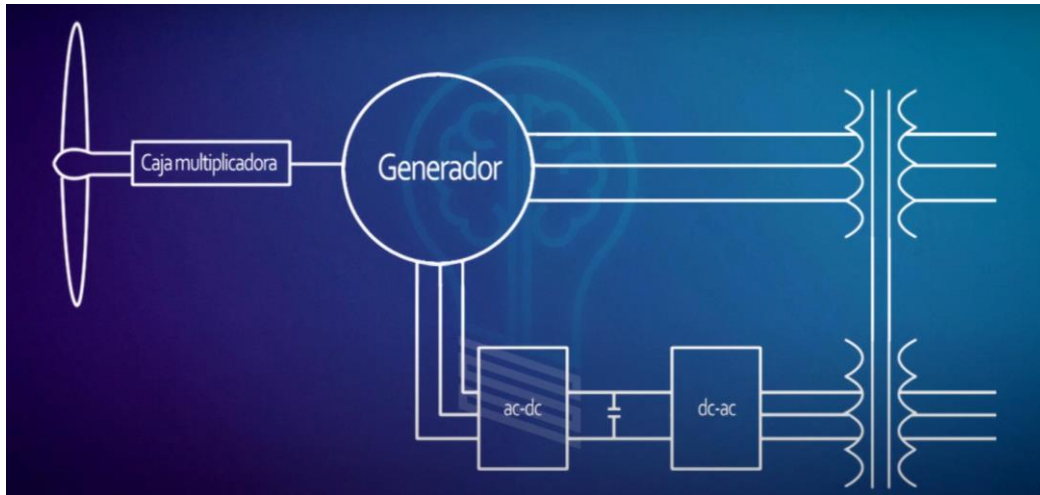


Ilustración 29: Estructura de un aerogenerador tipo 3

[COR20]

El esquema superior muestra un generador de inducción doblemente alimentado. La mayor ventaja de convertir la señal de alterna a continua y luego nuevamente a alterna es que podemos definir a nuestra conveniencia las características de la señal que inyectemos en la red. Esto evita que si la generada inicialmente en el generador tiene muchos armónicos de mayor orden a lo deseado necesitemos filtrarlos o incluso inyectemos la señal muy distorsionada a la red de distribución. Más adelante veremos que, en efecto, el generador no nos proporcionará una senoidal perfecta.

Además, este nuevo tipo de aerogenerador nos permite generar también a velocidades inferiores a las de sincronismo con lo cual con viento más ligeros podremos obtener energía igualmente. [COR20]

4.1.4 TIPO 4: VELOCIDAD VARIABLE CON CONVERSIÓN TOTAL

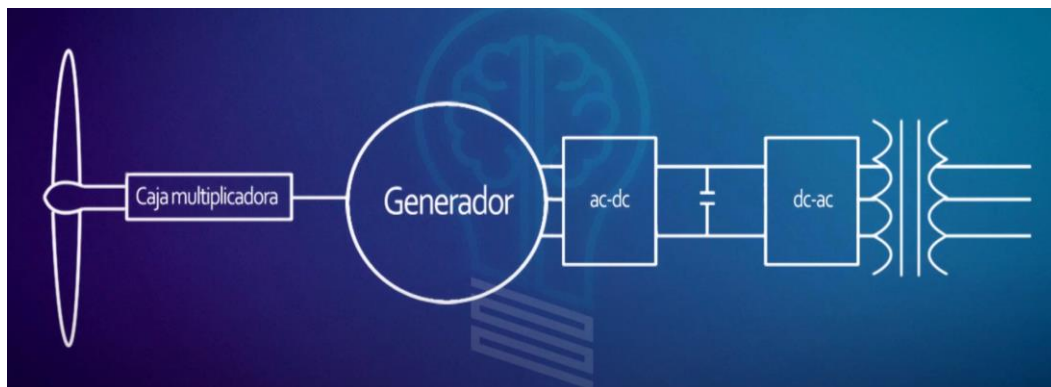


Ilustración 30: Estructura de un aerogenerador tipo 4

[COR20]

Este último tipo de aerogenerador funciona como el tipo 3 y tiene las mismas ventajas con el añadido de que, no sólo la energía saliente del rotor se transforma de AC a DC y viceversa, sino toda la energía proporcionada por el generador sufrirá esta transformación. [COR20]

En los generadores se suelen emplear o bien máquinas asíncronas o síncronas. Por ello nos centraremos en esos dos tipos:

En una máquina de corriente alterna si el campo magnético del rotor persigue al estator tendremos un motor. No obstante, si es al contrario nuestra máquina trabajará como generador que es lo que estamos buscando en este caso.

El campo magnético que se acabe creando en el entrehierro será senoidal en el caso ideal.

Cada fase está alimentada con tensiones que están desfasadas 120° en el tiempo, consecuentemente los campos magnéticos que se crean en cada bobina están eléctricamente desfasados 120 grados. El principio que explica la creación de estos campos eléctricos es el principio de Faraday. Al cambiar el flujo a través de los bobinados se induce una tensión

(principio de Faraday $e=N \cdot d\Phi/dt$). Siguiendo el principio de Lenz se genera una corriente en contra de cualquier cambio que a su vez induce un campo magnético.

Una vez presentados los cuatro tipos de aerogeneradores procedemos al análisis exhaustivo.

4.2 PRIMERA PARTE DEL ANÁLISIS MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA COMSOL

4.2.1 DISTRIBUCIÓN DE LOS DEVANADOS

[FLY2]

Sabemos que una máquina rotativa puede tener el devanado con diferentes tipos de distribución espacial. La distribución de las bobinas puede ser tanto concentrada como distribuida. Lo óptimo sería obtener un campo magnético senoidal a lo largo del entrehierro. Para ello necesitamos que la densidad de corriente que pasa por la bobina también esté sinusoidalmente distribuida y ahora analizaremos como influye la distribución de los devanados.

Si optamos por bobinas concentradas, obtenemos el siguiente modelo:

Para simular esta máquina rotativa primero hay que definir la geometría mediante los círculos que se ven en la próxima imagen. Podemos ver que las espiras estarán en una misma ranura separadas 180 grados.

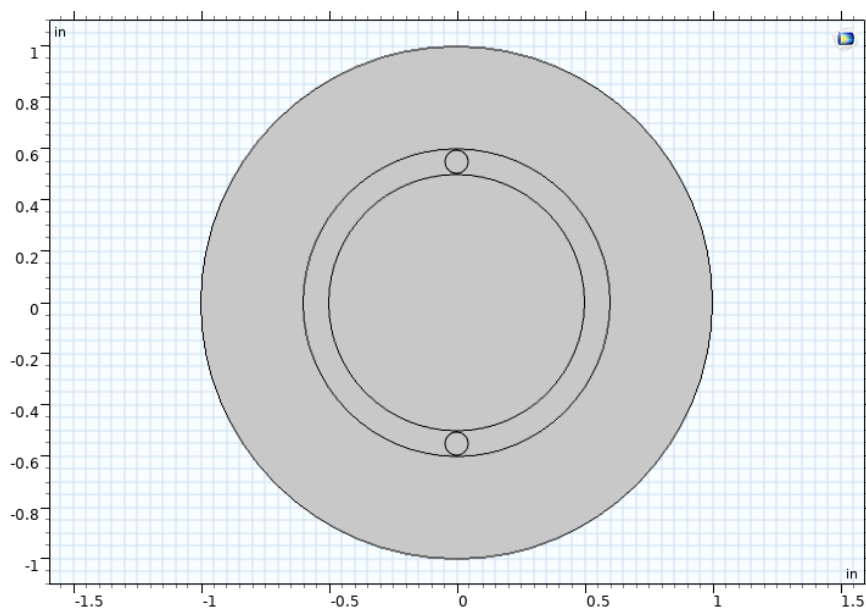


Ilustración 31: Estructura del generador con devanados concentrados

En la gráfica anterior el círculo interno representa el rotor y el exterior el estator. Por ahora los modelaremos como si estuviesen hechos de hierro sin pérdidas puesto que es uno de los materiales más típicos. Entre estas dos partes se encuentra el entrehierro modelado con aire y que contiene los devanados para los que utilizaremos cobre.

Tras definir cada uno de estos materiales en el programa seguiremos con los aspectos de la física. Debemos definir la corriente que fluye por los devanados. Usaremos la opción ‘definir como bobina’ del programa y en la superior fijaremos la corriente con un valor positivo y la inferior con uno negativo. Además, debemos establecer la opción ‘conductor individual’ para ambas bobinas. Impondremos un valor de corriente de 1A, ya que por ahora el valor exacto no es demasiado relevante para las conclusiones que buscamos.

Una vez procesado el caso por la máquina virtual podremos sacar las gráficas deseadas.

Si para este modelo analizamos la densidad del flujo magnético alrededor de los devanados, la imagen obtenida sería la siguiente:

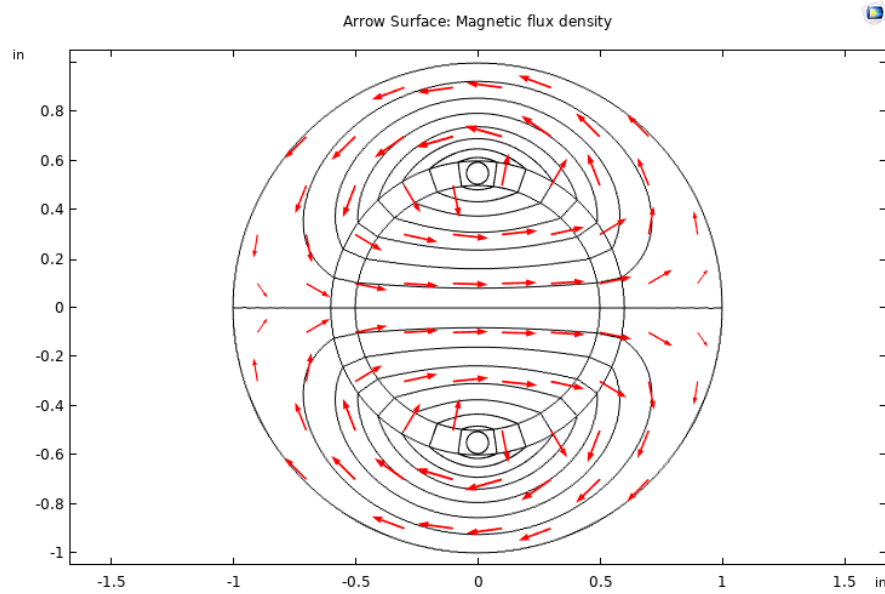


Ilustración 32: Flujo magnético con devanados concentrados

Con la regla de la mano derecha podemos ver la dirección de la corriente con el pulgar. En efecto, el campo magnético se genera en la dirección esperada. Nuestra máquina virtual funciona adecuadamente.

El campo magnético que se crea perpendicular a la superficie del rotor a través del entrehierro en función de la distancia al centro de la máquina tendrá la siguiente forma:

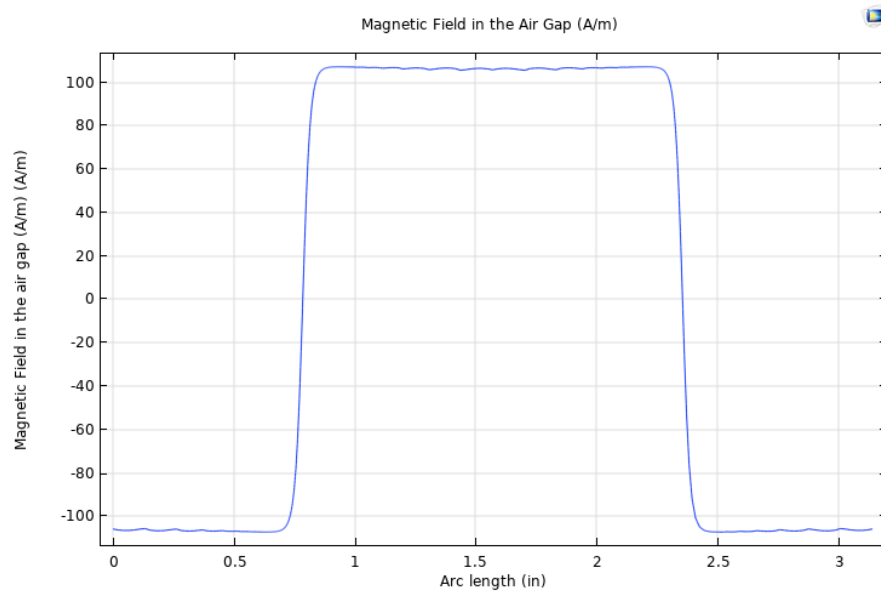


Ilustración 33: Campo magnético en el entrehierro para devanados concentrados

Podemos ver que la señal es prácticamente cuadrada y por lo tanto no servirá para mejorar el rendimiento del aerogenerador.

Ahora simularemos unos devanados distribuidos diametralmente. El proceso a seguir es el mismo que previamente, sólo que con un mayor número de bobinas que definiremos de la misma manera que en el caso previo, es decir con las corrientes en negativo y positivo según sea requerido. Obtenemos la siguiente geometría:

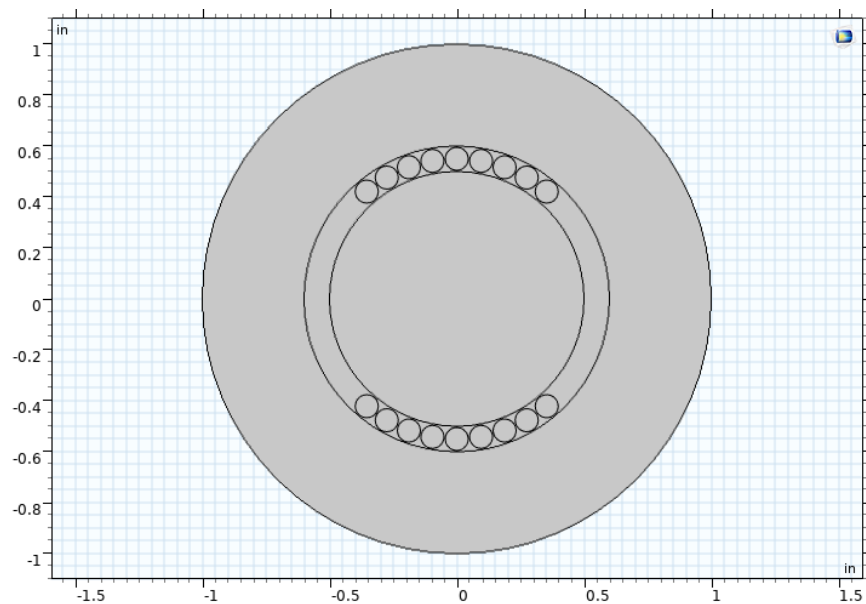


Ilustración 34: Geometría de un generador con devanados distribuidos I

Podemos ver que la distribución de la densidad del campo magnético a lo largo de la máquina rotativa seguirá siendo muy parecida al caso previo tal y como era de esperar:

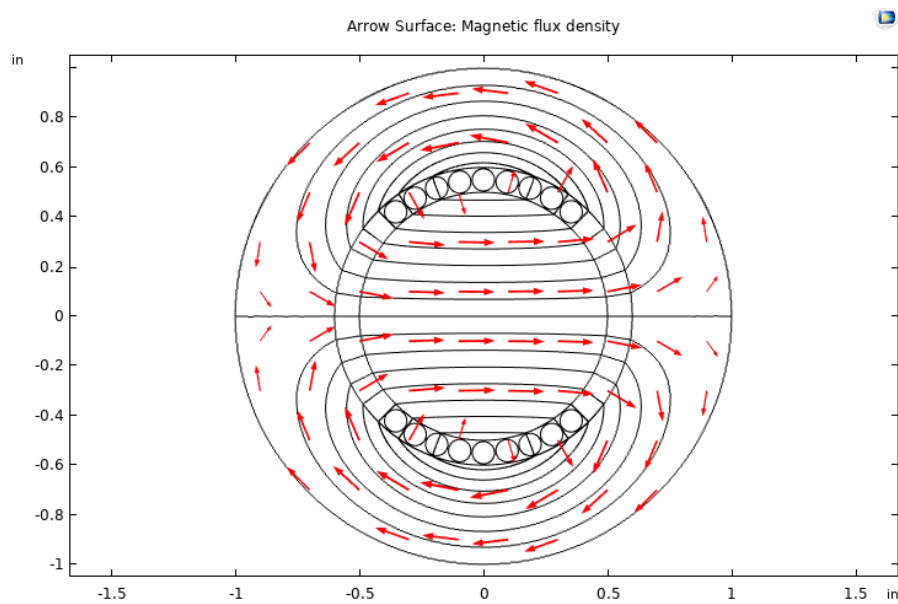


Ilustración 35: Flujo magnético para los devanados distribuidos I

Sin embargo, distinguiremos una clara diferencia en lo que será el campo magnético en el entrehierro:

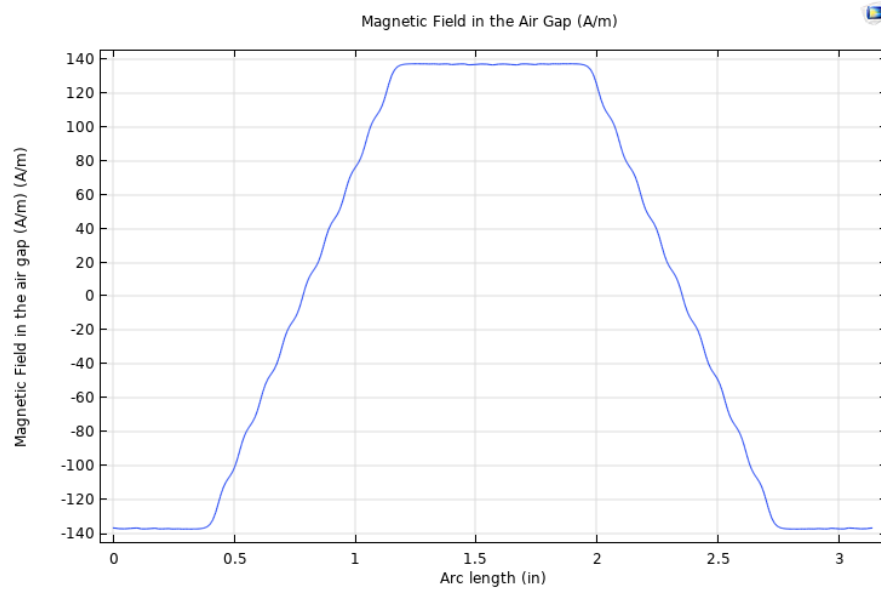


Ilustración 36: Campo magnético para los devanados distribuidos I

Nuestro campo magnético ya no es tan cuadrado como previamente sino algo más triangular. Esto demuestra que la distribución sirve para mejorar la señal obtenida y nos acerca más a la senoidal. Por ello, a continuación, distribuiremos los devanados a lo largo de todo el rotor para así aprovechar bien toda la superficie. Nuestra nueva geometría será la siguiente:

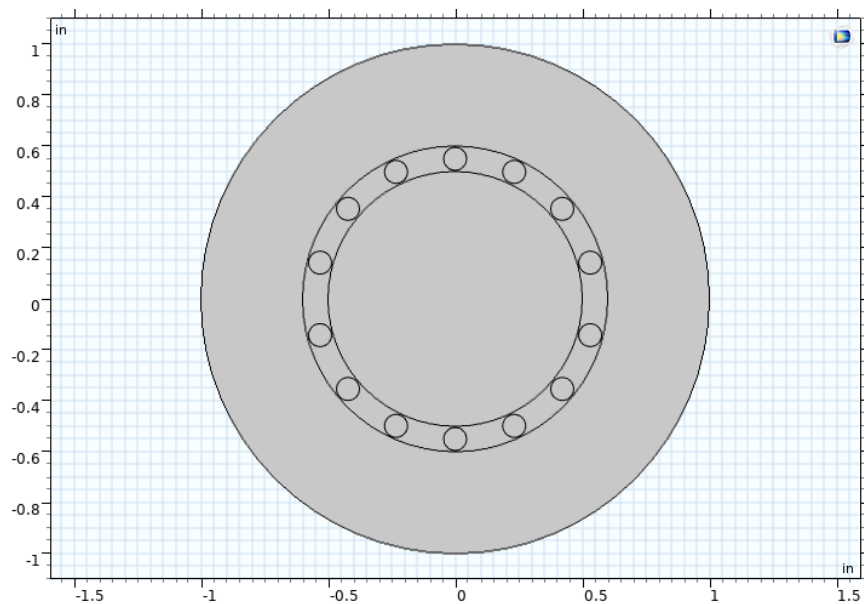


Ilustración 37: Geometría de un generador con devanados distribuidos II

Nuevamente, el flujo magnético seguirá el siguiente camino:

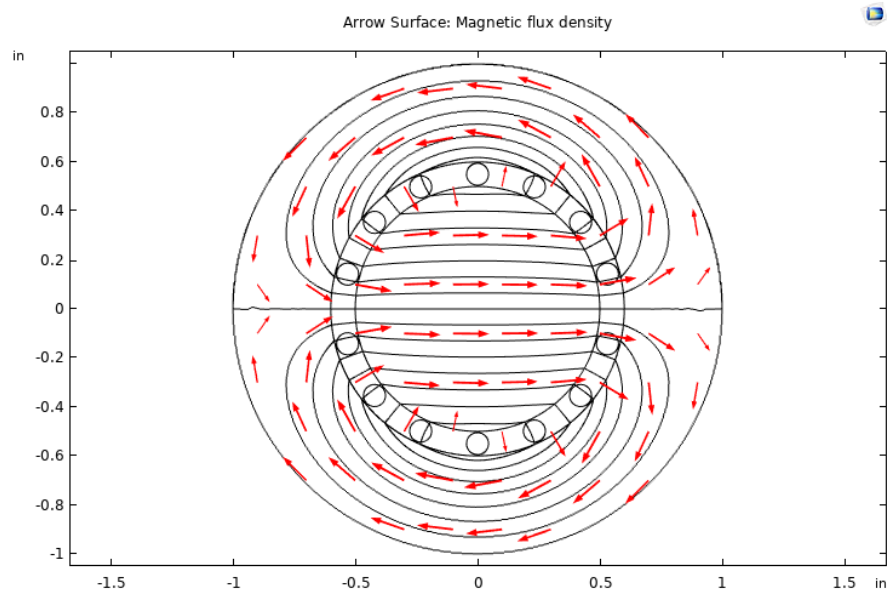


Ilustración 38: Flujo magnético para los devanados distribuidos II

Sin embargo, hay que destacar el gran cambio en la figura del campo magnético en el entrehierro, que tendrá la siguiente forma:

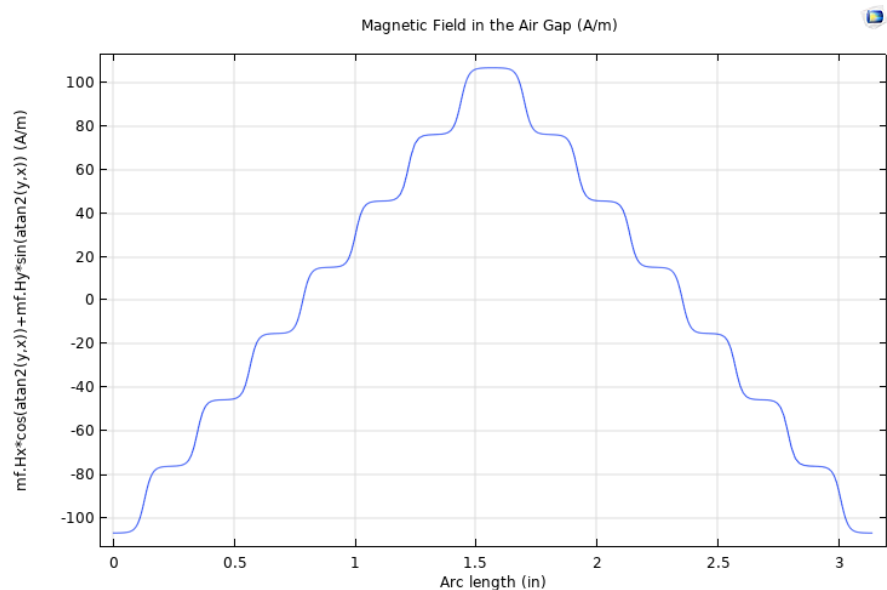


Ilustración 39: Campo magnético en el entrehierro para los devanados distribuidos II

En efecto, podemos comprobar que, aunque siga habiendo muchos escalones debido a que tenemos pocas ranuras, la gráfica se convierte en una distribución mucho más parecida a una senoidal.

En el caso ideal, el campo magnético resultante que se genera en el entrehierro estará senoidalmente distribuido, con una amplitud constante (es decir su valor máximo será constante pero no apuntará siempre en la misma dirección) y girará a una velocidad constante acorde con la frecuencia de la alimentación eléctrica, que en nuestro caso sería 50Hz.

Nuestras simulaciones llevan a la conclusión de que cuanto mayor sea el número de bobinas y mayor distribución entre las bobinas, mejor será el campo magnético que obtendremos y menos armónicos tendrá.

Juntando la simulación con la teoría obtendremos conclusiones aún más claras.

La siguiente gráfica muestra la diferencia entre una fuerza perfectamente senoidal que es la que obtendríamos con muchas ranuras tal y como se ha demostrado con el programa al sacar las gráficas y una cuadrada que contiene armónicos de mayor orden.

Cuando sólo tenemos dos ranuras, el campo magnético que se genera contiene muchos armónicos de mayor orden y consecuentemente pierde la forma senoidal ideal.

Las gráficas que hemos sacado con el programa son las del campo magnético pero la relación con la fuerza generada es directa, ya que $F=H \cdot d$ (donde 'd' es la distancia del entrehierro).

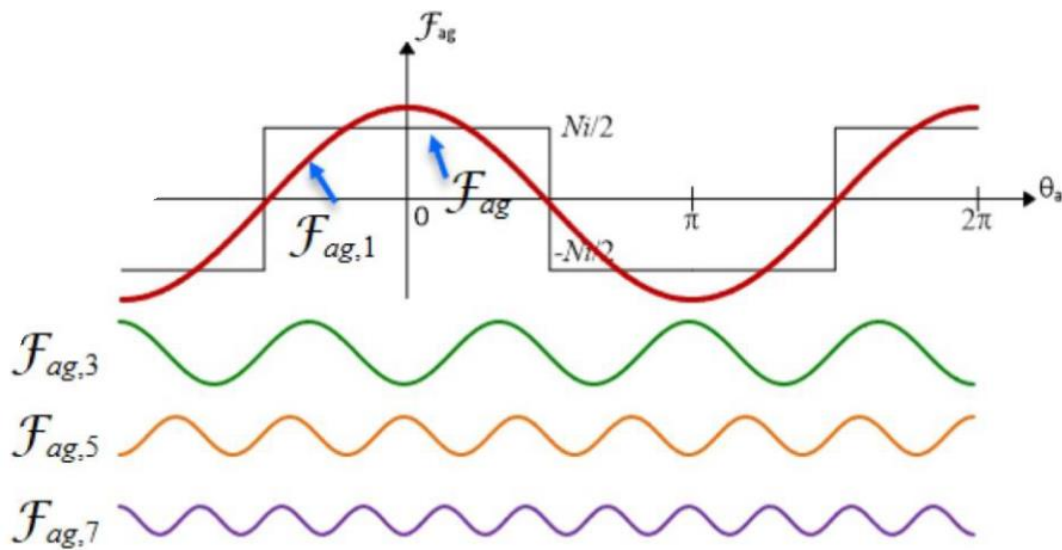


Ilustración 40: Fuerza en el entrehierro y sus armónicos

[FLY1]

Consecuentemente nos preguntamos, ¿Cómo afecta el hecho de tener más armónicos en nuestro generador? ¿Por qué es tan relevante eliminar los armónicos? Bien, es cierto que podemos filtrarlos con un filtro de paso bajo más adelante, aunque si las frecuencias de los armónicos están muy cerca esto se complicará notoriamente.

En primer lugar, la rotación tendrá muchas vibraciones indeseadas. Los armónicos se reflejan en un giro mucho menos sutil y suave. Al estar tratando un generador que se encuentra en un aerogenerador y de por sí tiene muchas vibraciones externas debido a la altura en la que se encuentra y los altos vientos, debemos limitar al máximo todo tipo de vibraciones extra que se puedan generar.

Además, otra gran desventaja de tener una distribución cuadrada es que se pierda mucha potencia y con ello se desaprovecha energía. Los armónicos generan pérdidas indeseadas tanto en el rotor como en el estator y esto es algo que queremos evitar para mejorar el rendimiento del aerogenerador. Además, como nos encontramos en trifásica (a continuación, lo simularemos), las pérdidas adicionales serán aún mayores. Los armónicos en el campo magnético resultarán en armónicos en el par y con ello la tensión generada también se verá

afectada por los armónicos. En conclusión, la señal que inyectaremos a la red estará distorsionada y con ello el rendimiento del aerogenerador será inferior a lo deseado. Tenemos que evitar esto de manera urgente.

4.2.2 TRIFÁSICA

[FLY3]

Por lo general cuando queremos trabajar en la industria con máquinas generadoras queremos obtener energía trifásica, ya que son mucho más potentes. Tres fases pueden generar mucho más que una sola fase. Por ello, lo más recomendable sería usar generadores trifásicos, aunque en los aerogeneradores tendremos que convertirla a posteriori a monofásica como analizaremos más tarde en el laboratorio. [SPA22]

Debido a esta razón, en un aerogenerador nos encontramos en trifásica puesto que queremos inyectar la energía obtenida a la red. Por ello, ampliaremos nuestras simulaciones a un generador trifásico para generar gráficas y conclusiones más adecuadas. Durante muchos años se ha estado trabajando duramente para poder trabajar con trifásica en estos aerogeneradores.

Ahora veremos las tres fases:

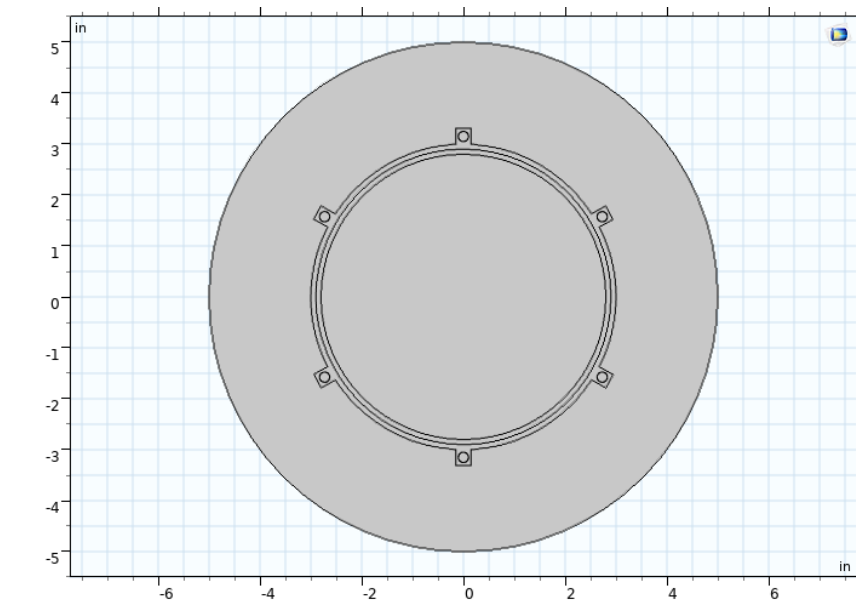


Ilustración 41: Estructura de los devanados en trifásica

Al tener un generador trifásico podremos analizar el movimiento de su campo magnético con el paso del tiempo:

Al inicio, es decir $t=0s$ obtenemos:

$T=0s$:

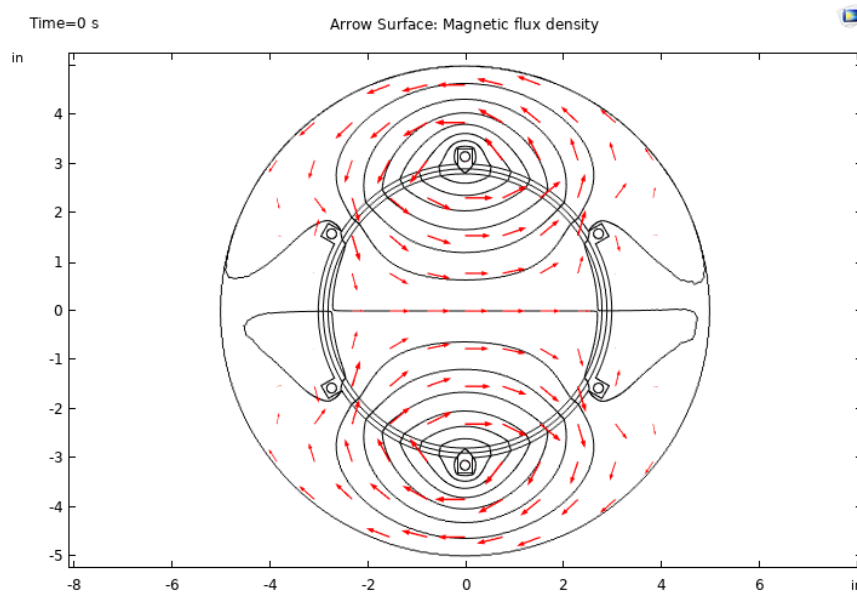


Ilustración 42: Flujo magnético en $t=0s$ para trifásica

Si avanzamos a $t=0.25s$ la gráfica será la siguiente:

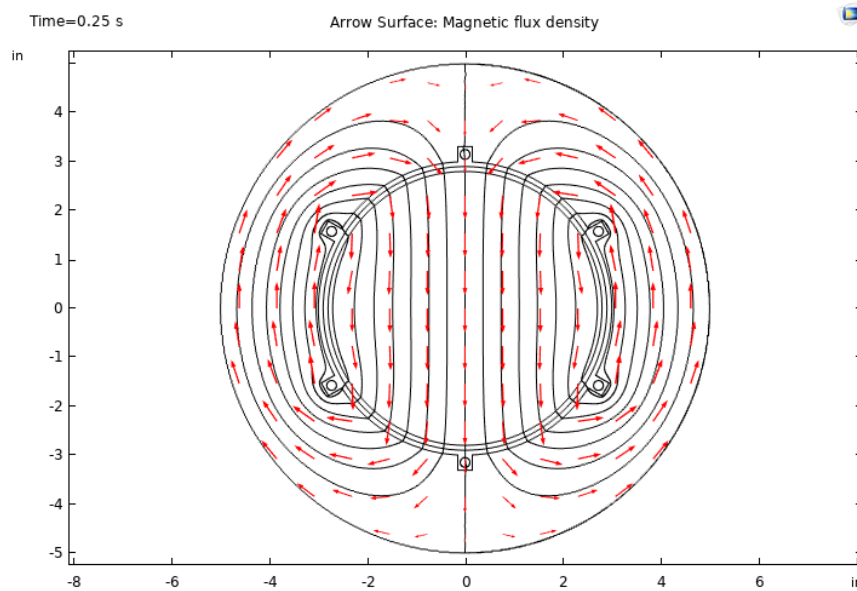


Ilustración 43: Flujo magnético en $t=0.25s$ en trifásica

En efecto, podemos comprobar que el campo magnético es giratorio por lo que nos servirá el generador y la simulación para sacar conclusiones. Las correspondientes fuerzas que actúan en el entrehierro tendrán la siguiente forma en función del ángulo en el que nos encontremos: Para $t=0s$

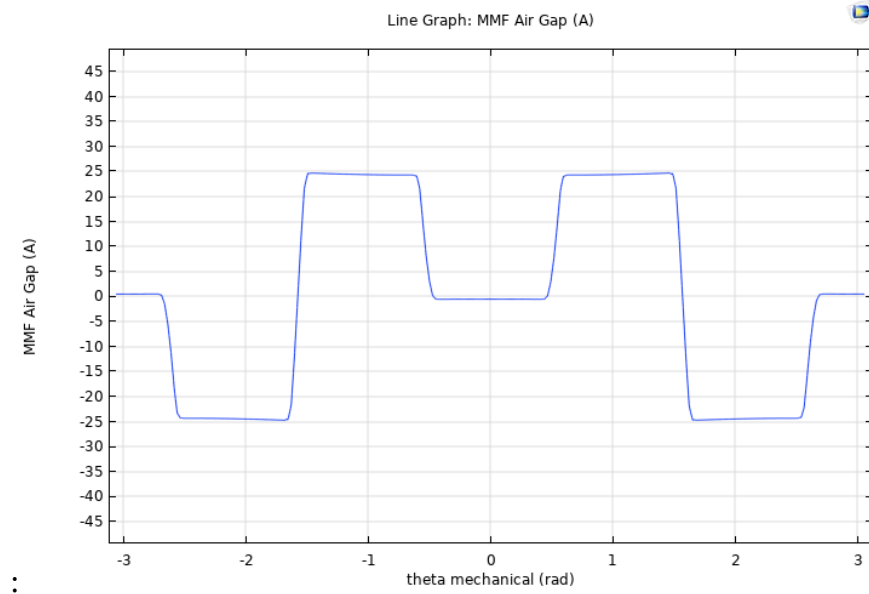


Ilustración 44: Fuerza en el entrehierro en trifásica en $t=0s$

Para $t=0.25s$:

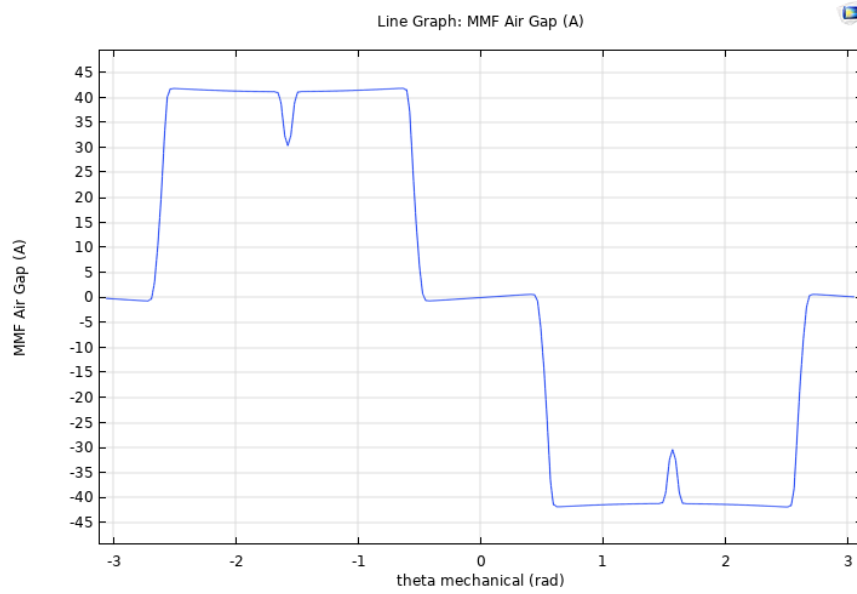


Ilustración 45: Fuerza en el entrehierro en trifásica en $t=0.25s$

Como claramente se puede ver, estas gráficas son mucho menos senoidales de lo que sería recomendable. Por ello, incluiremos la conclusión previamente obtenida en cuanto a la distribución de los devanados.

Simularemos por lo tanto con más ranuras para tener una visión más limpia y clara:

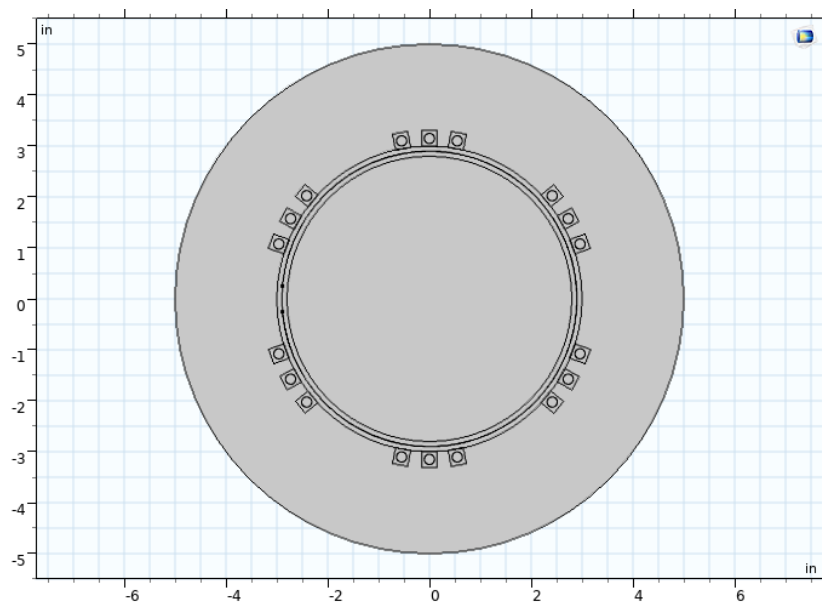


Ilustración 46: Geometría con devanados distribuidos I en trifásica

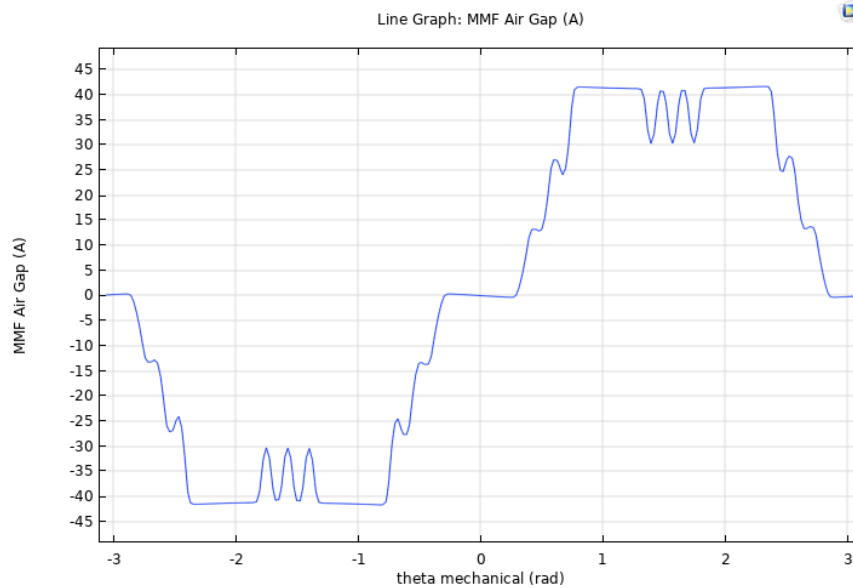


Ilustración 47: Fuerza en el entrehierro en trifásica con devanados distribuidos I

La nueva distribución de fuerza en el entrehierro se parece mucho más a nuestro objetivo de señal para inyectar en la red, sin embargo, iremos un paso más allá añadiendo una mayor distribución al generador trifásico:

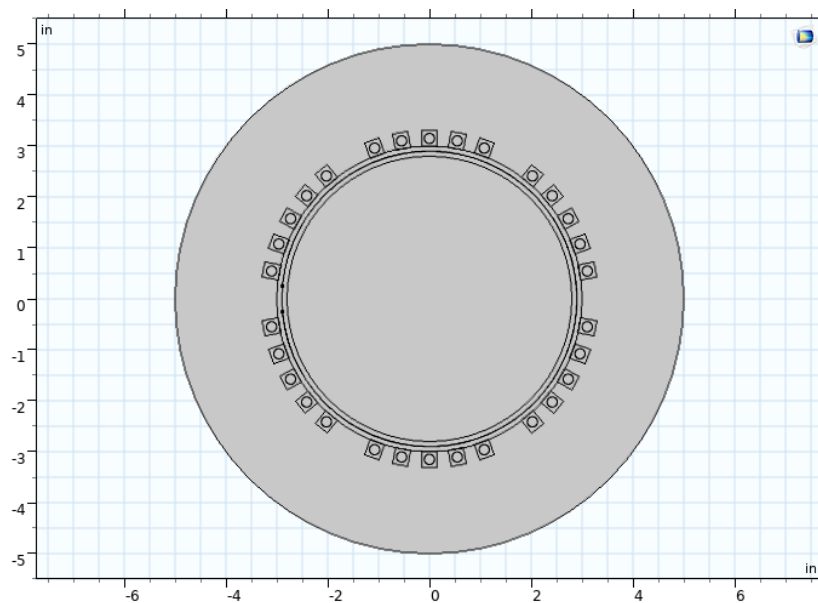


Ilustración 48: Geometría con devanados distribuidos II en trifásica

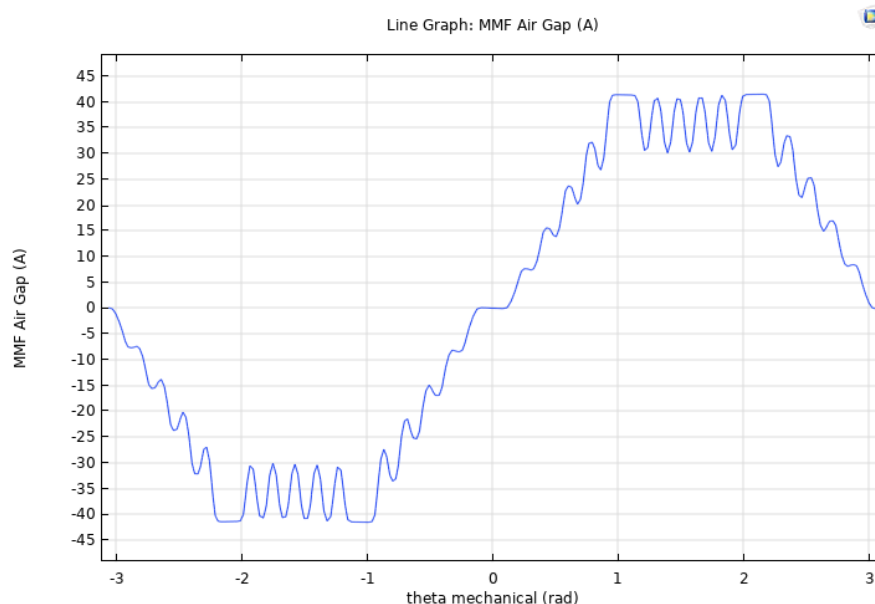


Ilustración 49: Fuerza en el entrehierro en trifásica con devanados distribuidos II

La última figura muestra una señal claramente más similar a una senoidal que la inicialmente obtenida.

Por lo tanto, hasta ahora hemos llegado a la conclusión de que es mejor tener el bobinado distribuido, con muchas ranuras y que se puede hacer directamente en trifásica. Cabe destacar que la variación del valor máximo del campo apenas es notable lo cual era también un peligro que corríamos. Queremos obtener la máxima potencia posible y por tanto necesitamos aprovechar cada valor.

A continuación, y teniendo en cuenta las conclusiones sacadas previamente, analizaremos el torque y la velocidad del rotor de una máquina de inducción. Para ello vamos a simular la máquina asíncrona de dos polos y trifásica.

4.2.3 POLOS

[FLY4]

Como bien hemos podido aprender previamente, una máquina rotativa puede funcionar tanto de generador como de motor. En nuestro caso con los aerogeneradores, lo primero que tenemos que evitar es que nuestra máquina empiece a trabajar como motor puesto que esto consumiría energía y costaría dinero. Necesitamos que nuestro generador esté girando a la velocidad de sincronismo, o ligeramente inferior, para poder conectarla a la red y que genere energía eléctrica. Una vez conectado el generador a la red, las palas girarán a velocidad constante.

En algunos aerogeneradores que no incluyen caja multiplicadora lo que se hace es aumentar el número de polos para obtener una mayor frecuencia de giro con menores velocidades de viento.

En este trabajo se están analizando aerogeneradores con caja multiplicadora. No obstante, vamos a comprobar si sigue siendo beneficioso aumentar el número de polos de nuestra máquina.

La fórmula que tenemos para la velocidad de sincronismo depende de los polos de la máquina y es la siguiente:

$$V_{sync} = 50Hz * \frac{2}{polos} * \frac{60s}{min}$$

Consecuentemente, si tenemos 2 polos nuestra velocidad de sincronismo será de 3000rpm, si tenemos 4 polos será 1500rpm y si tenemos 6 será de 1000rpm.

Por lo tanto, podemos concluir que cuántos más polos mejor para poder aprovechar menores velocidades de viento puesto que la velocidad de sincronismo se obtendrá a velocidades de giro más bajas.

Un viento típico genera entre 7 y 12 vueltas por minuto. Si optamos por una multiplicadora del orden de 50 tendremos entre 350 y 600 rpm. Un eje rápido típico actúa alrededor de unos 1500rpm (velocidad de sincronismo de 4 polos) lo que significa que necesitamos vientos

superiores a la velocidad típica. Por ello, se suelen instalar los parques eólicos en zonas muy estudiadas y construir las torres a alturas extremas.

Por ello, si reducimos la velocidad de sincronismo instalando generadores con un mayor número de polos podríamos llegar a aprovechar vientos ligeramente superiores a los típicos y con ello construir parques en zonas antes impensables.

En la industria se están instalando aerogeneradores sin caja multiplicadora. En estos casos, se trata de instalar generadores con muchos polos de manera que la frecuencia obtenida a bajos vientos sea mucho mayor. Ahora bien, podríamos de la misma manera aumentar el número de polos en los generadores aun teniendo caja multiplicadora de forma que podamos aprovechar menores velocidades de viento para obtener una mayor energía eléctrica.

La geometría que usaremos para analizar los polos será la mostrada en la siguiente figura. Es una máquina de inducción trifásica y no pintaremos cada devanado, sino que lo uniremos en una amplia zona simulando que están distribuidos:

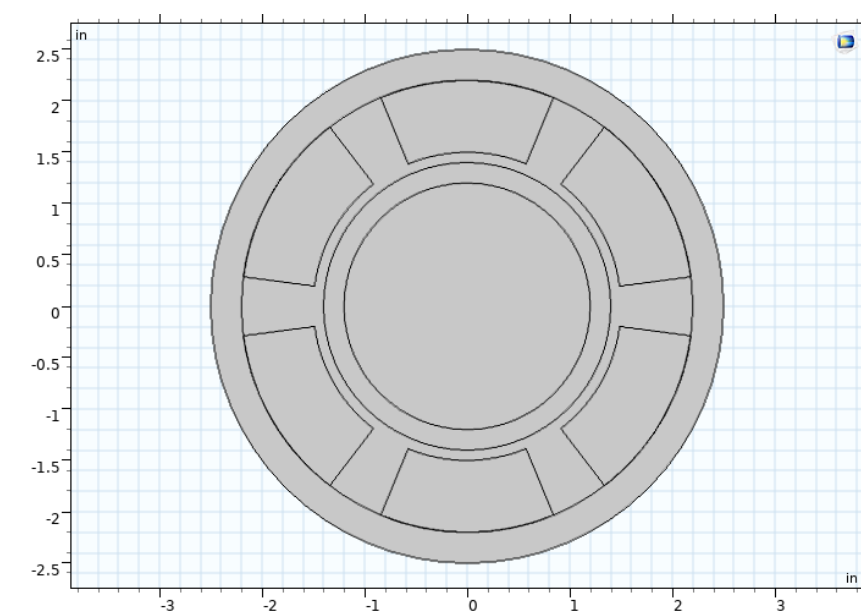


Ilustración 50: Geometría de un generador con dos polos

En este caso usaremos aluminio como material para la parte conductora del rotor. Las corrientes inducidas tendrán la siguiente distribución:

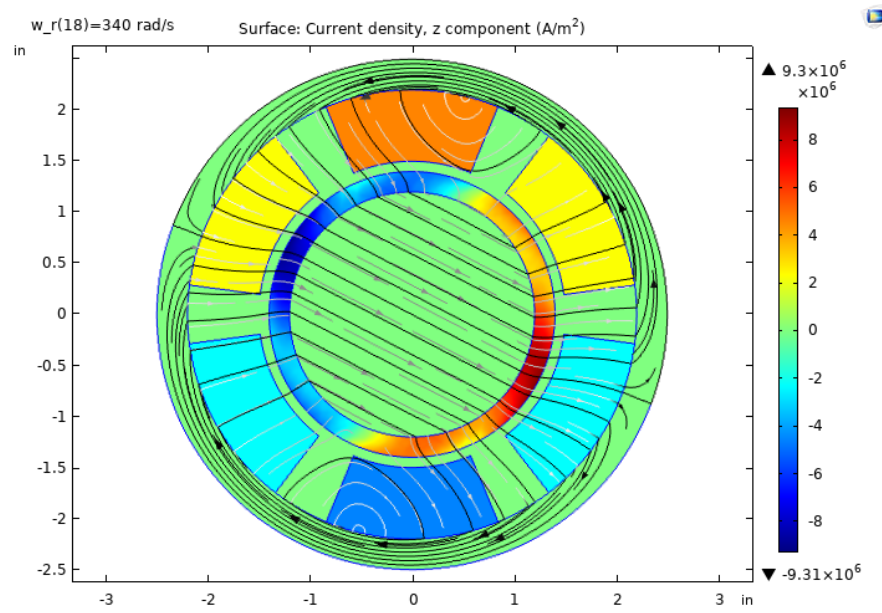


Ilustración 51: Corriente en un generador con dos polos

Claramente, podemos confirmar que estamos en una máquina con 2 polos puesto que las fases tienen densidades de corrientes exactamente opuestas, es decir por ejemplo, la parte superior

$4 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ y la inferior $-4 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ y juntas forman una fase.

A continuación, sacaremos la curva del torque también con el programa COMSOL con respecto a la velocidad:

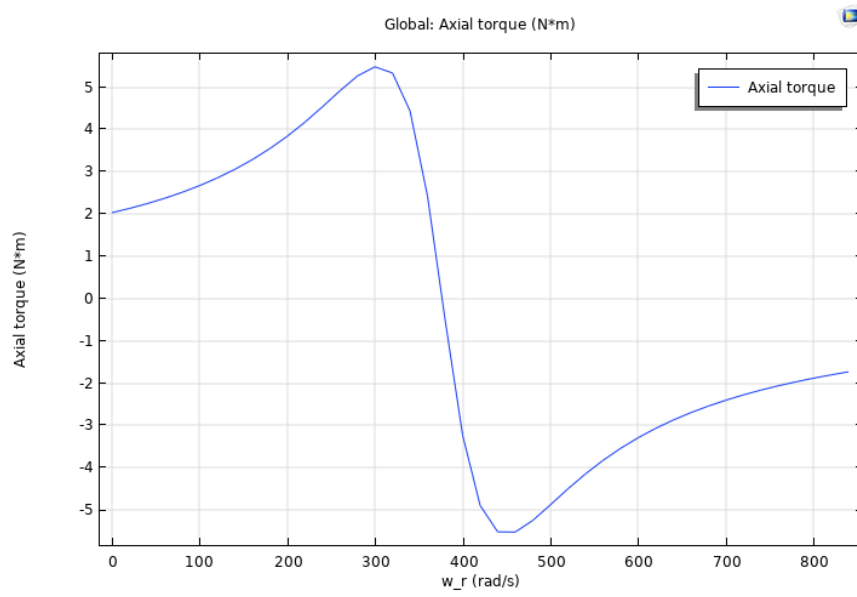


Ilustración 52: Torque para un generador con dos polos

Haremos otra simulación en trifásica pero esta vez con un mayor número de polos, 4 en vez de 2, y también con la parte conductora de aluminio. La geometría es la siguiente:

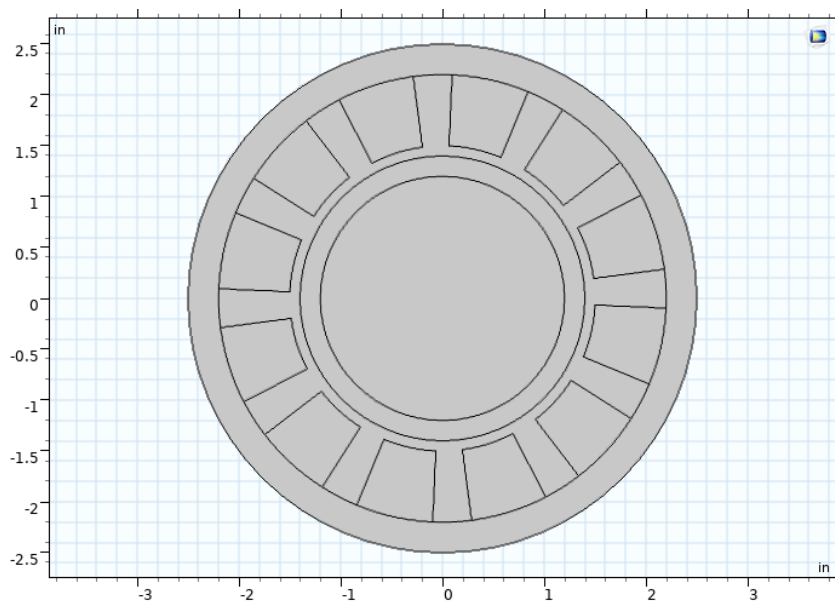


Ilustración 53: Geometría de un generador de cuatro polos

Esta nueva distribución generará la siguiente gráfica de torque:

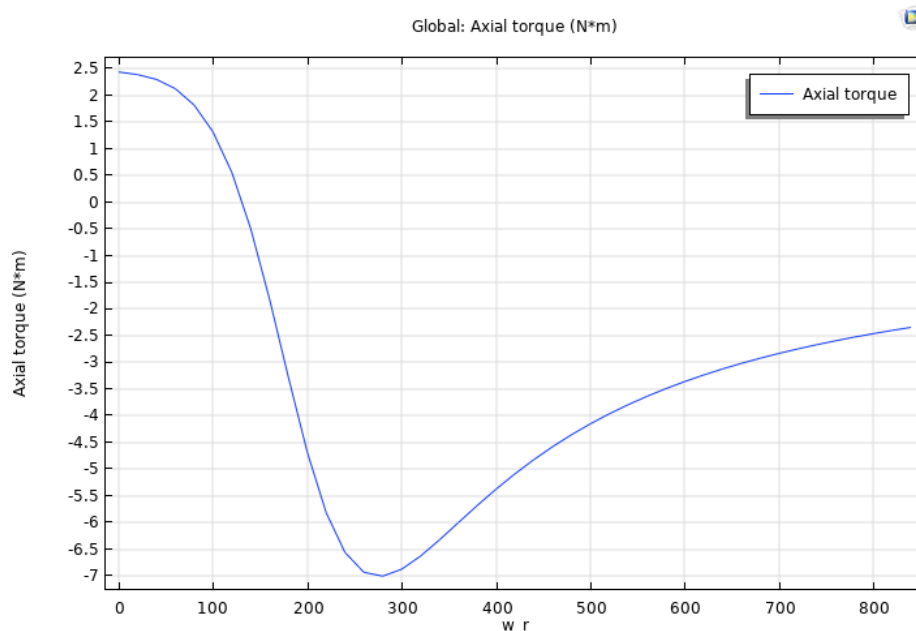


Ilustración 54: Torque para un generador de cuatro polos

Como era de esperar podemos apreciar que la gráfica de torque-velocidad de rotación, aunque mantiene la forma característica que conocemos de esta figura, ha cambiado notoriamente el valor al que se encuentra su máximo.

Tal y como hemos visto en la teoría, nuestro torque máximo ahora se alcanza a menores velocidades lo cual es una gran ventaja. La velocidad de sincronismo se ha reducido de valores de en torno a los 375 rad/s a unos 140 rad/s. Esto quiere decir que el cambio de motor a generador ocurre antes que en el caso anterior, lo cual es muy beneficioso. Cabe destacar que estos valores no son aplicables a los aerogeneradores ya que se está simulando con tamaños y corrientes no realistas. Simplemente se trata de sacar conclusiones que son igual de válidas en el mundo de los parques eólico con cifras reales.

La frecuencia de la tensión generada dependerá del número de polos que haya en la máquina rotativa ($f_e = \text{polos} / 2 * f_{\text{mech}}$). Consecuentemente, si la máquina es de dos polos, un giro mecánico será equivalente a un giro eléctrico, pero si no, por ejemplo, con cuatro polos, una rotación mecánica será equivalente a dos eléctricas.

Otro punto importante a tener en cuenta es que una máquina rotativa con 4 polos dará lugar a una menor MMF que si sólo tuviésemos dos polos. Esta conclusión se puede sacar al analizar la siguiente fórmula, aunque también lo podemos analizar con nuestro programa:

Ecuación 1: Fuerza en el entrehierro de un generador

$$F = \frac{4}{\pi} * \left(\frac{k * N}{\text{polos}} \right) * I * \cos \left(\frac{\text{polos}}{2} * \theta \right)$$

En esta fórmula ‘k’ representa el factor de distribución. Ya hemos demostrado que es mejor tener los devanados distribuidos, sin embargo, es más fácil hacer los cálculos con devanados concentrados. Por ello, se utiliza el factor de distribución ‘k’ a la hora de hacer los cálculos con la fórmula para concentrados.

Ahora bien, hemos visto en la fórmula que tenemos un factor de distribución ‘k’ para adaptar la fórmula de concentrado a distribuido. Este factor será siempre menor que 1 por lo que al simular el campo podemos ver que el valor máximo de la fuerza que se obtiene disminuirá. No queremos esto bajo ningún concepto, ya que estamos tratando de optimizar y maximizar la energía eléctrica que se obtiene del generador. La manera más simple para arreglar esto será aumentar N. Se trata de los giros en el devanado y simplemente conllevará un mínimo coste añadido (probablemente un poco más de cable de cobre) que mejorará la eficiencia.

Esta es otra aproximación que demuestra por qué para llegar a este tipo de conclusiones es mucho mejor usar el programa del tipo COMSOL que no hace estas aproximaciones y da resultados mucho más coherentes y parecidos a la realidad.

No obstante, la fórmula nos permite hacernos una idea de que, evidentemente, cuantos más polos menos fuerza obtendremos en la máquina rotativa.

En cualquier caso, podemos resumir lo ocurrido al aumentar el número de polos en los siguientes puntos:

- ➔ Menor velocidad de sincronismo
- ➔ Menor velocidad de torque máximo
- ➔ Mayor par de arranque (cruce con el eje ‘y’) para el funcionamiento en modo motor

➔ Un aumento en la región de funcionamiento como generador

En conclusión, para nuestro aerogenerador nos viene mucho mejor ponerle más polos.

4.2.4 CAMBIO DE MATERIAL

[FLY5]

Otra opción que podemos simular fácilmente es la de cambiar el material del rotor conductor. Los elementos más usados en la industria son aluminio y cobre debido a su alto aguante a las temperaturas elevadas y a su resistencia además de conductividad.

El análisis previo lo hicimos con aluminio. A continuación, cambiaremos el material del rotor conductor a cobre.

Con dos polos obtendremos la siguiente curva de par-deslizamiento:

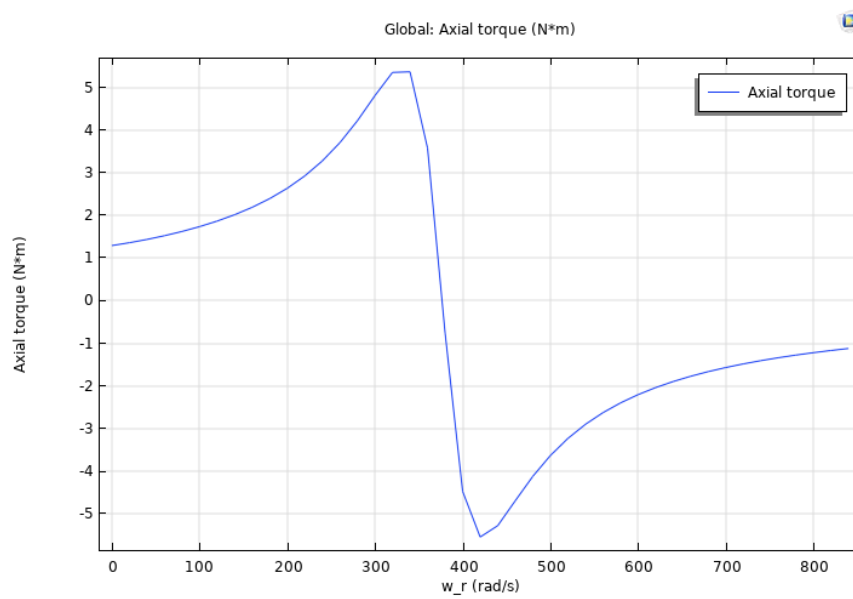


Ilustración 55: Torque para dos polos y cobre

Con cuatro polos, que ya concluimos previamente que era de mayor beneficio, obtenemos los siguientes resultados:

Primeramente, la distribución de corrientes que muestra los cuatro polos

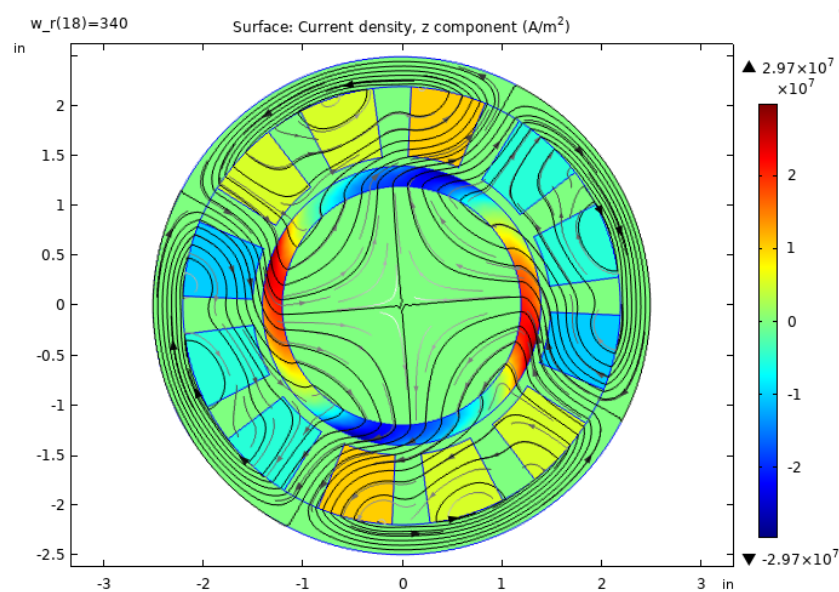


Ilustración 56: Corriente para cuatro polos y cobre

Y, a continuación la curva del par:

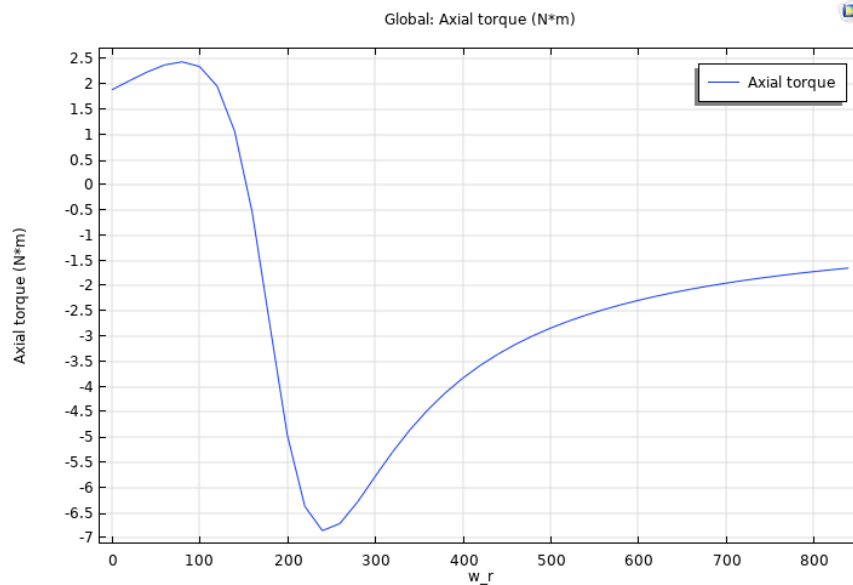


Ilustración 57: Torque para cuatro polos y cobre

La diferencia entre tener dos y cuatro polos sigue siendo la misma que en el caso anterior.

Sin embargo, el cambio de material sí que afecta.

El momento del torque máximo depende de la resistencia e inductancia del circuito por lo que se ve afectado con el cambio de material bajo la siguiente fórmula (‘eq’, representa los valores equivalentes del circuito de un generador y X las fugas de las reactancias del rotor):

Ecuación 2: Deslizamiento en una máquina rotativa

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{(R_1, eq^2 + (X_1, eq^2 + X_2))}}$$

En nuestro caso el cambio es muy ligero.

Ahora, si comparamos la conveniencia de un material u otro, podemos concluir que el cobre tiene:

- ➔ Menor par de arranque
- ➔ Un cambio más repentino entre motor y generador
- ➔ Un valor de torque máximo parecido
- ➔ Una velocidad de sincronismo también extremadamente parecida

Ahora bien, observamos que ambos materiales tienen una curva de par muy parecida por lo que podrían servir de manera bastante igualitaria en el generador. Por ello, debemos analizar un poco más en profundidad.

Ambos materiales son buenos conductores aunque el aluminio conduce un 40% menos que el cobre aunque también pesa un 70% menos. [MET20]

Haremos a continuación una pequeña tabla comparando estos elementos:

Tabla 3: Comparativa entre el cobre y el aluminio

	Cobre	Aluminio
Densidad	8960 kg/m ³	2698.4kg/m ³
Punto de ebullición	3200K	2792K
Conductividad eléctrica	58.108*10 ⁶ S/m	37.7*10 ⁶ S/m
Conductividad térmica	400W/(K*m)	237W/(K*m)

[ELE]

Teniendo en cuenta las principales características que son relevantes a la hora de instalar un generador en un molino de viento debemos destacar lo siguiente:

Ambos elementos aguantan bien el calor. Pese a que el aluminio tiene menor conductividad eléctrica es mucho más ligero y también conduce menos el calor. Estos dos puntos son de extrema importancia para nuestro generador ya que hay que evitar que se caliente en todo momento. Además, el hecho de que tenga menor densidad

también es una ventaja dado que por la altura a la que la góndola se construye cuanto menos peso tenga que soportar mejor será.

No obstante, el factor decisivo actualmente será el precio del elemento. La próxima gráfica muestra cómo en el año 2000 los precios de ambos elementos eran parecidos. Sin embargo, desde entonces el valor del cobre se ha disparado. Por todo ello, el elemento que consideraremos el más apropiado para nuestro generador será el aluminio.

Esta gráfica muestra la enorme diferencia entre los precios:

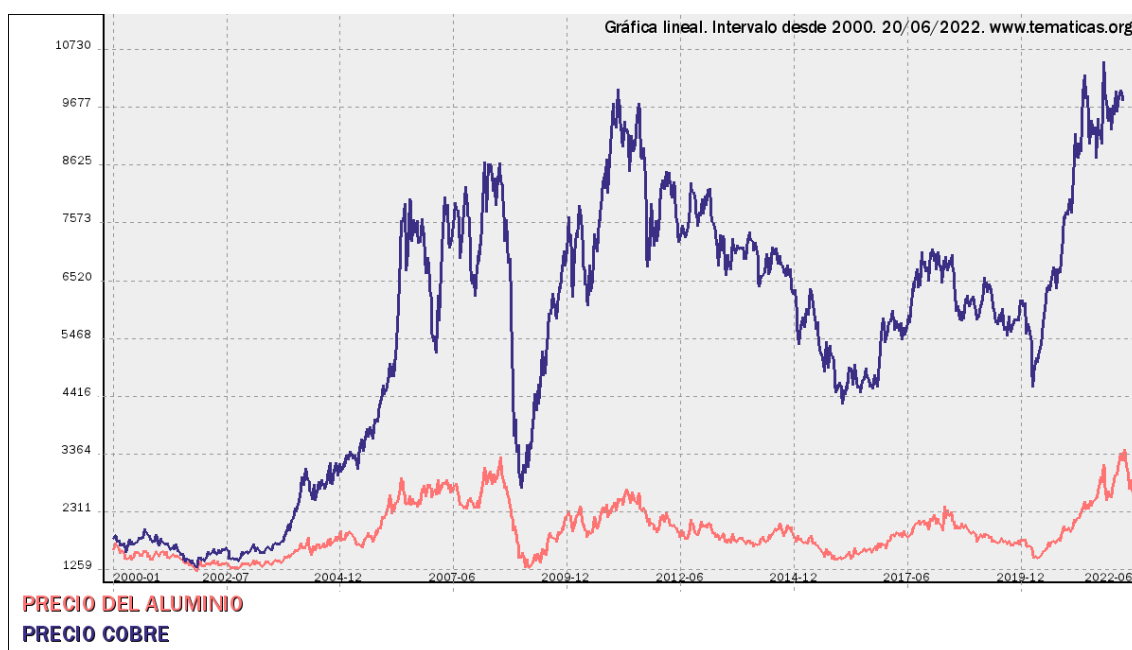


Ilustración 58: Desarrollo del precio de aluminio y el cobre en el período 2000-2022

[COM22]

4.2.5 VARIACIÓN DEL ANCHO DE LA ZONA DEL ROTOR CONDUCTOR

Realizaremos una última comprobación relacionada con la estructura de la máquina de inducción. [FLY5]

¿Es mejor que la zona de conducción del rotor sea más o menos ancha?

Usaremos el generador de 4 polos y de aluminio debido a las conclusiones sacadas previamente.

Para entender dónde se realiza el cambio de anchura podemos mirar la distribución de la corriente en la geometría:

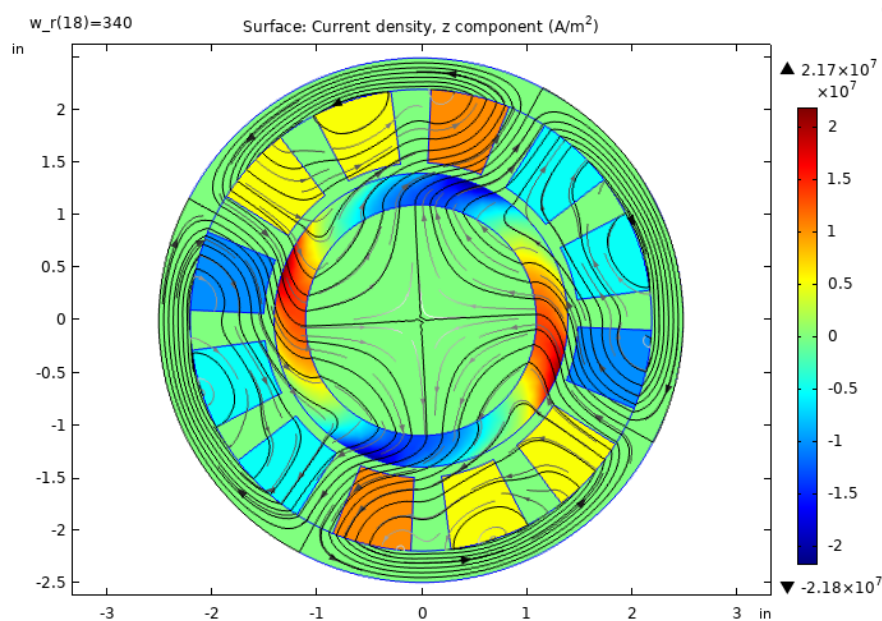


Ilustración 59: Corriente con una zona conductora más amplia

La nueva curva de par tendrá la siguiente forma:

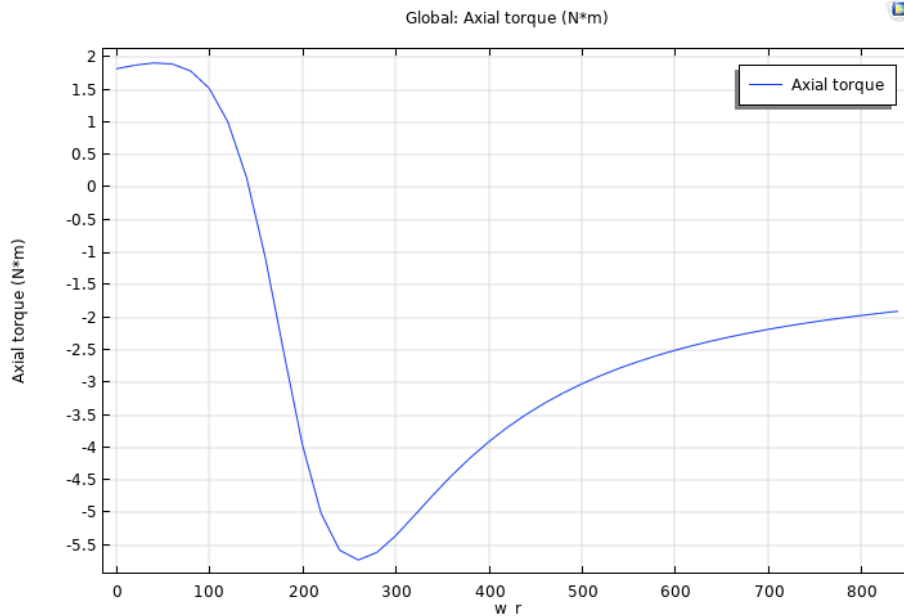


Ilustración 60: Torque para zona conductora más amplia

Con esta gráfica podemos ver que para nuestro generador debemos tratar de minimizar el ancho puesto que el par ha disminuido notablemente respecto al caso anterior. El máximo ocurre en el mismo punto que antes, pero tiene un valor menor. Esto se debe al hecho de que no depende del deslizamiento sino solamente de las inductancias y las tensiones como muestra la siguiente fórmula:

Ecuación 3: Torque máximo en una máquina rotativa

$$T_{max} = \frac{3 * 0.5 * V_{1,eq}^2}{w_s * (R_{1eq} + \sqrt{R_{1eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2})^2}$$

Al haber aumentado el ancho de la zona conductora del rotor tenemos más espacio para pérdidas y esto es exactamente lo que debemos evitar.

Para nuestros propósitos necesitaremos una velocidad del motor superior a la de sincronismo como previamente hemos explicado. Además, para estar en la zona de generación el deslizamiento 's' deberá ser negativo, es decir que la velocidad de la máquina rotativa será mayor que la de sincronismo, pero irá en el mismo sentido. Como 's' es negativa, si

calculásemos las potencias obtendríamos valores negativos lo cual significa que la potencia mecánica está siendo absorbida por el eje y transformada en potencia eléctrica conectada e inyectada a la red como potencia activa para su futuro uso. [ROD08]

Queremos obtener el máximo torque posible del punto de funcionamiento sin perder la estabilidad de la máquina para sacar la potencia máxima y mejorar el rendimiento de nuestro aerogenerador. Debemos tener en cuenta que la propia máquina también absorberá parte de la energía que logremos generar.

Concluimos por tanto que para mejorar el rendimiento de nuestro aerogenerador no es recomendable una zona conductora del rotor demasiado ancha.

4.3 ANÁLISIS PARTE 2, SIMULACIONES EN EL LABORATORIO

A continuación, nos centraremos en los aerogeneradores de tipo 3 y 4. Son los más actuales y una versión mejorada de los tipos anteriores. No obstante, no podíamos dejar de analizar posibles mejoras para los otros tipos, puesto que representan la mayoría de los aerogeneradores instalados por ahora.

La característica principal de estos últimos dos modelos es que convierten la onda alterna en continua y de nuevo a alterna antes de inyectarla en la red. Esta constante modificación de la señal permite controlar las características de la onda que se incorpora, así como asegurarnos de que la unión se realiza en fase y con la amplitud y el ángulo correcto.

Por ello, realizaremos un modelo de convertidores AC-DC-AC para su posible instalación en un aerogenerador de forma que sea lo más beneficioso posible.

Todos los ensayos se han realizado en el laboratorio de electrónica del edificio 'EER' de ingeniería eléctrica (EER) de la Universidad de Texas en Austin.

4.3.1 RECTIFICADOR DE PUENTE DE DIODO

Uno de los conversores de voltaje de alterna a continua más utilizados en el mundo de la industria es el Rectificador de puente de diodo, o, en inglés, ***'Diode Bridge Rectifier'*** (DBR).

El rectificador que emplearemos en nuestros ensayos de laboratorio consiste en cuatro diodos que, según el momento, pueden estar en modo conducción o actuando como un circuito abierto (es decir en OFF). Se podría definir como un interruptor controlado por el propio circuito, ya que los diodos sólo dejan pasar la corriente en una dirección. Cuando tenemos un diodo en modo conducción, en teoría la caída de tensión en él debería ser cero en el caso ideal. No obstante, trataremos de elegir diodos con una pérdida de tensión mínima para maximizar la eficiencia de nuestro aerogenerador.

Antes de proceder con el análisis en el laboratorio, vamos a ver rápidamente el funcionamiento del DBR. Su estructura básica es la siguiente:

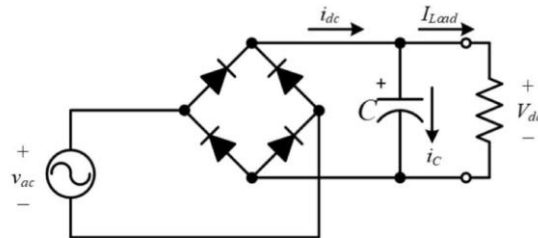


Ilustración 61: Estructura del rectificador de puente de diodos

[FLY6]

Según si la tensión que le llega al circuito es positiva o negativa tendremos unos diodos conduciendo u otros. Al tener dos diodos conduciendo y dos diodos en modo circuito abierto evitaremos que la corriente alterna vuelva a la fuente es decir a nuestro generador. Podemos ver en el esquema que la fuente es de alterna pero la carga del final del circuito muestra un voltaje de continua. Esto se explica por el hecho de que, al regular qué diodos dejan pasar corriente y cuáles no dependiendo del signo del voltaje de entrada la corriente I_{load} que pasará por la carga siempre irá de arriba abajo y por tanto nuestra tensión siempre tendrá el mismo signo y será continua. El valor de continua de la salida a esperar será $\sqrt{2} \cdot V_{ac}$.

Además, en el lado del circuito de continua tendremos un condensador electrolítico que se estará cargando y descargando continuamente a la carga que este conectada a continuación del circuito.

Nosotros probaremos primero por separado los circuitos a emplear para después unificarlos todos en un solo conjunto que una el aerogenerador con la red.

Proseguimos con el DBR.

Por norma general, la corriente continua que obtengamos debería ser una línea recta de un valor en concreto. No obstante, más tarde revisaremos si esto es así, puesto que siempre tendremos un pequeño rizo en la señal.

Cuando el voltaje en el condensador supere el valor máximo de la señal alterna, el condensador comenzará a descargarse. Es esta carga y descarga la que generará el pequeño rizo que veremos más adelante. La siguiente imagen muestra la señal que obtendríamos sin condensador en color de negro y la que se obtiene a la salida gracias al condensador en rosa:

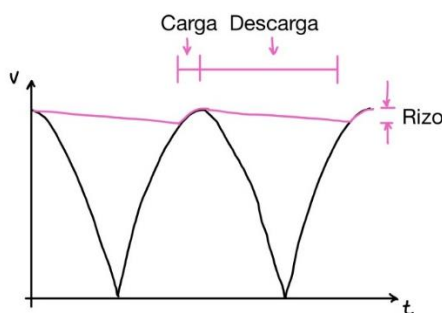


Ilustración 62: Tensión de salida con condensador

Cuanto mayor sea el rizo más rápido se estará proporcionando potencia a la carga, pero a la vez el valor medio de la tensión de continua disminuirá lo cual reduciría nuestro rendimiento.

Si realizamos el experimento en abierto, es decir, sin carga, veremos que no habrá rizo, puesto que el condensador no tendrá dónde descargarse, pero sin embargo como nosotros queremos instalar esto en una turbina siempre habrá una carga enchufada.

Consecuentemente, cuanto mayor la carga detrás del DBR y del condensador mayor será el rizo.

Realizando un balance de energía (es decir, igualando la energía liberada por el condensador al descargarse con la energía consumida por la carga en ese periodo de tiempo) podremos calcular la amplitud del rizo:

Ecuación 4: Rizo de la tensión de salida

$$\frac{1}{2} * C * V_{max}^2 - \frac{1}{2} C V_{min}^2 = P \Delta t \rightarrow (V_{max} - V_{min}) = \frac{P}{2f C V_{max}} \quad [\text{FLY7}]$$

EL EXPERIMENTO DEL DBR

[FLY9], [FLY10]

Para realizar el experimento, puesto que no disponemos de aerogenerador, conectaremos un VARIAC a la red. Seguidamente un transformador de un ratio de 115:25V para no quemar el DBR que vendrá directamente después y, finalmente, la carga. No debemos olvidar, que nuestros ensayos se realizan en EEUU por lo que tanto la frecuencia de la red como su voltaje son diferentes a lo que estamos acostumbrados en Europa.

Tendremos el siguiente circuito en el laboratorio:

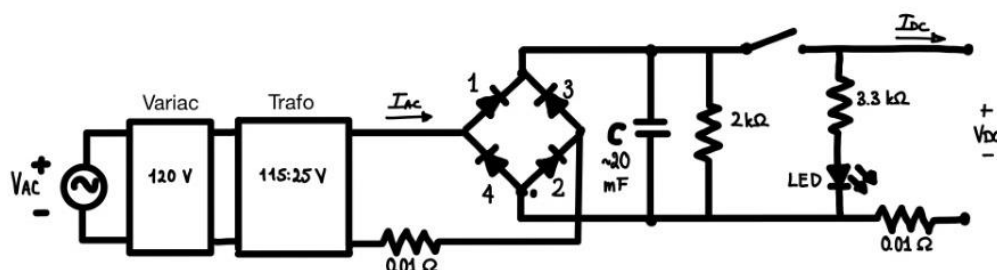


Ilustración 63: Circuito con DBR para el montaje en el laboratorio

[FLY8]

Tras montarlo en el laboratorio quedó de la siguiente manera:



Ilustración 64: DBR del laboratorio

Cabe destacar que la luz LED incorporada tan solo sirve para asegurar el correcto funcionamiento del rectificador.

En primer lugar, analizaremos el circuito sin carga. Pondremos una tensión de entrada de 130V que tras pasar por el transformador nos dará 28.31V de alterna (medidos con el multímetro).

A la salida, con el voltímetro podremos medir 37.5V de continua que aproximadamente era el valor esperado de $28.31 \cdot \sqrt{2} = 40.03V$

En el osciloscopio tendremos las siguientes imágenes:

La tensión de entrada sin carga:

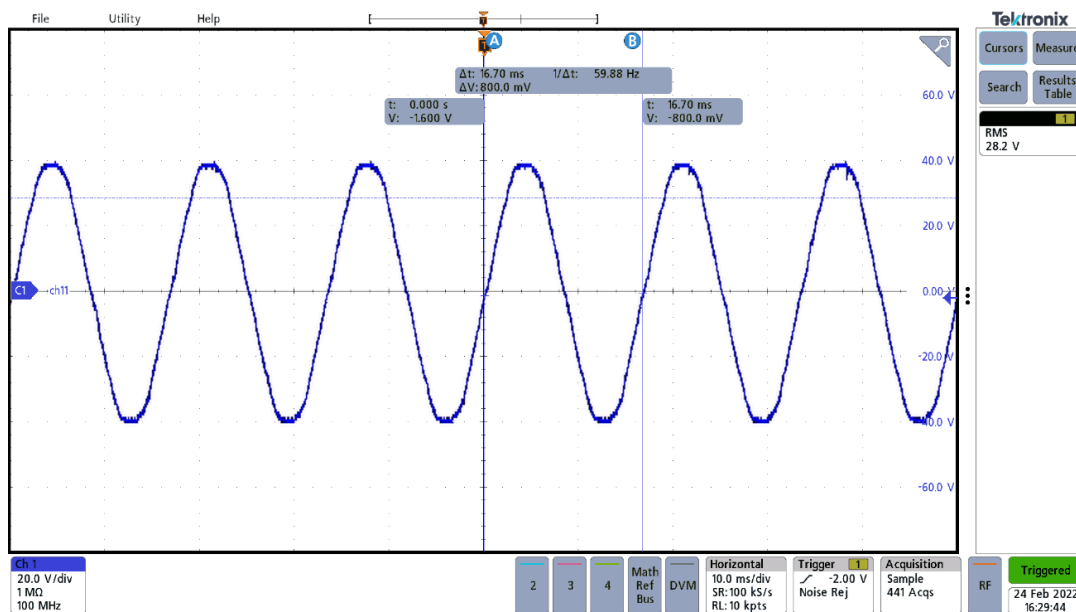


Ilustración 65: Tensión de entrada sin carga

El V_{rms} es 28.2V que corresponde a lo medido previamente con el multímetro. Además, cabe destacar que la señal es prácticamente perfectamente senoidal, no tiene apenas armónicos de orden mayor al primero al venir directamente de la red. Como analizado previamente, en nuestro caso al depender del aerogenerador no tendremos una señal perfectamente senoidal. Sin embargo, con muchos polos y la distribución correcta nos

podremos aproximar bastante. Además, otra opción sería poner un filtro de paso bajo en el punto de conexión entre el generador y el transformador que lleva al DBR.

La tensión de salida sin carga tendrá la siguiente forma:

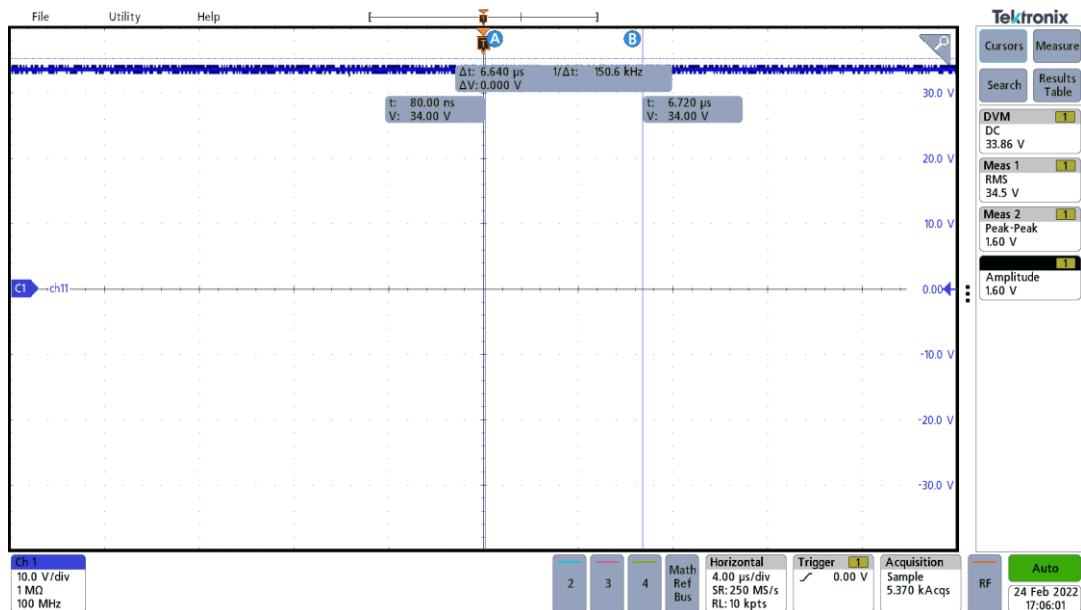


Ilustración 66: Tensión de salida sin carga

Haciendo algo de zoom podemos ver que no obtenemos una línea recta perfecta. Sin embargo, el rizo es mínimo como era de esperar y previamente descrito. En el osciloscopio

podemos ver que la amplitud del rizo es del orden de mV. Por ello, podemos confirmar que hemos logrado convertir una señal de alterna a continua.

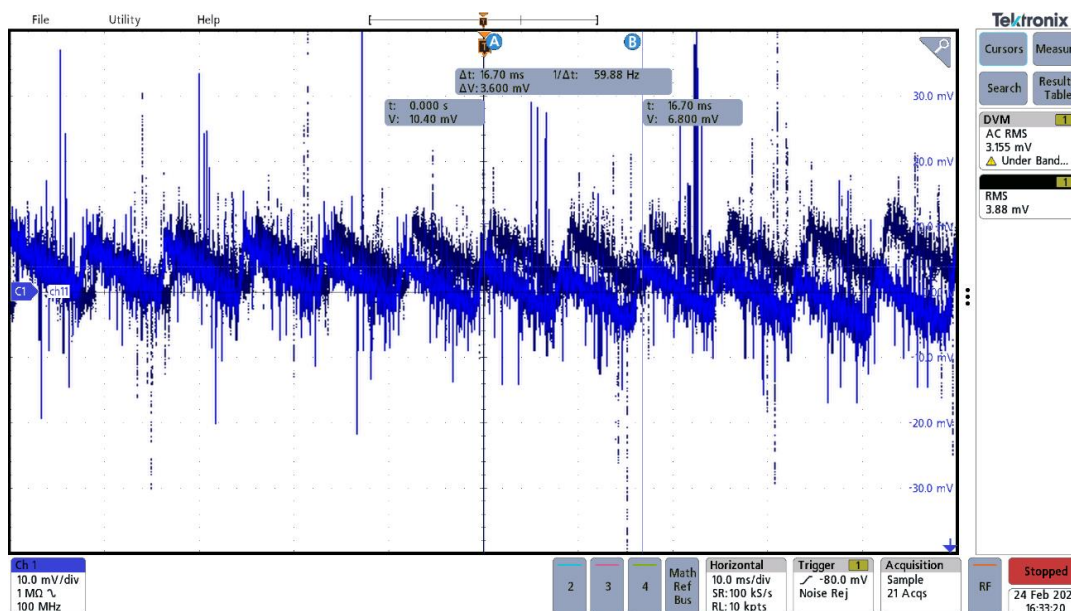


Ilustración 67: Ampliación de la tensión de salida sin carga

Hay que destacar que en nuestros experimentos en el DBR tenemos implementado un disipador térmico. En este caso la temperatura de este no aumenta. El termómetro infrarrojo muestra 24,4 °C, es decir, casi la temperatura ambiente y por ello no se está almacenando ni perdiendo energía. Es de vital importancia tener en cuenta los cambios de temperatura, ya que debemos evitar a toda costa que cualquier elemento de la maquinaria de la góndola sufra sobrecalentamiento.

Por seguridad, también medimos la temperatura con un termistor y mediante interpolación lineal de los 1,061kΩ que marca obtendremos 23.78 °C.

$$\frac{1250 - 1000}{20 - 25} = \frac{1250 - 1061}{20 - x} \rightarrow 23.78^{\circ}\text{C}$$

A continuación, una vez demostrado que el DBR funciona como queríamos y convierte la señal alterna a continua, continuaremos el experimento con una carga conectada que se asemejará más a la situación que hay que esperar en un aerogenerador.

En cuanto realicemos la conexión, habrá una caída de tensión puesto que se comienza a consumir energía. Por ello, tendremos que elevar el pico de la tensión de entrada ligeramente para que el DBR siga recibiendo el mismo voltaje.

Tomaremos los datos para una carga de 10Ω y otra de 5Ω . Las medidas tomadas serán las siguientes:

Tabla 4: Medidas con cargas de 5 y 10 ohmios

	$V_{ac-input}$ shunt	$I_{ac-input}$ shunt	$V_{dc-output}$ shunt	$I_{dc-output}$ shunt	$P_{dc}=V_{dc}*I_{dc}$	V_{max}	Amplitud del rizo
5Ω	96mV	9.6A	64.1mV	6.41A	205.7W	32.69V	1.6V
10Ω	51mV	5.1A	34.9mV	3.49A	118.17W	34.66V	1.2V

Para medir la corriente continua lo haremos a través de un ‘shunt resistor’ de valor 0.01Ω . Midiendo la caída de tensión en esta resistencia obtendremos la corriente con la ley de Ohm.

Viendo estos resultados podemos concluir que cuanto menor el valor de la resistencia que le pongamos al circuito mayor será el rizo que tendremos.

Continuaremos el análisis midiendo la caída de tensión en los diodos para ver las pérdidas. No podemos perder de vista nuestro objetivo de maximizar el rendimiento del aerogenerador.

Mediremos, por ejemplo, el diodo número 1. Su caída de tensión cuando conduce será la siguiente:

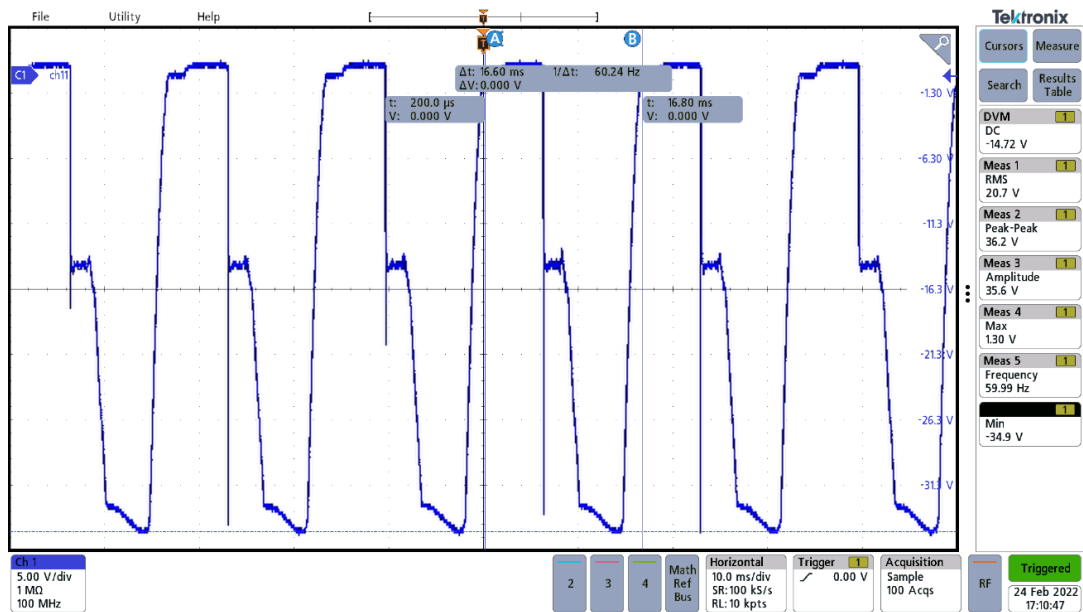


Ilustración 68: Voltaje en un diodo del rectificador

Podemos ver que para valores de aproximadamente 1.3V, la tensión se mantiene constante debido a los elementos inductivos del circuito. Como consecuencia nuestra señal se verá ligeramente distorsionada.

Si ampliamos la figura previamente obtenida en el osciloscopio para ver mejor la zona de conducción tendremos la siguiente imagen:

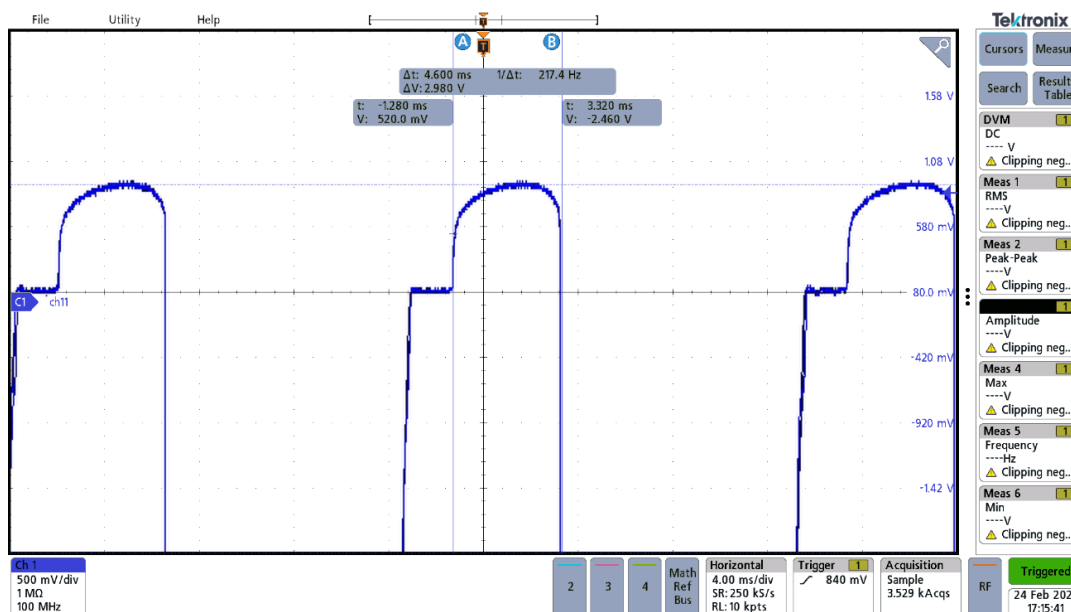


Ilustración 69: Ampliación de la tensión en un diodo

Con los cursosres hemos marcado el tiempo de conducción que será de unos 4.6ms. (1.280ms+3.320ms).

Podemos concluir que la caída de tensión media en el diodo durante su periodo de conducción será de aproximadamente 840mV. Teniendo en cuenta que queremos usar este DBR para tensiones del rango de cientos de voltios podemos considerar que esta caída no será muy relevante y no afectará especialmente a la eficiencia.

Ahora visualizaremos la corriente de entrada (que será alterna) mediante la resistencia ‘shunt’ (de 0.01Ω) de la entrada al circuito. El voltaje en la resistencia será el siguiente:

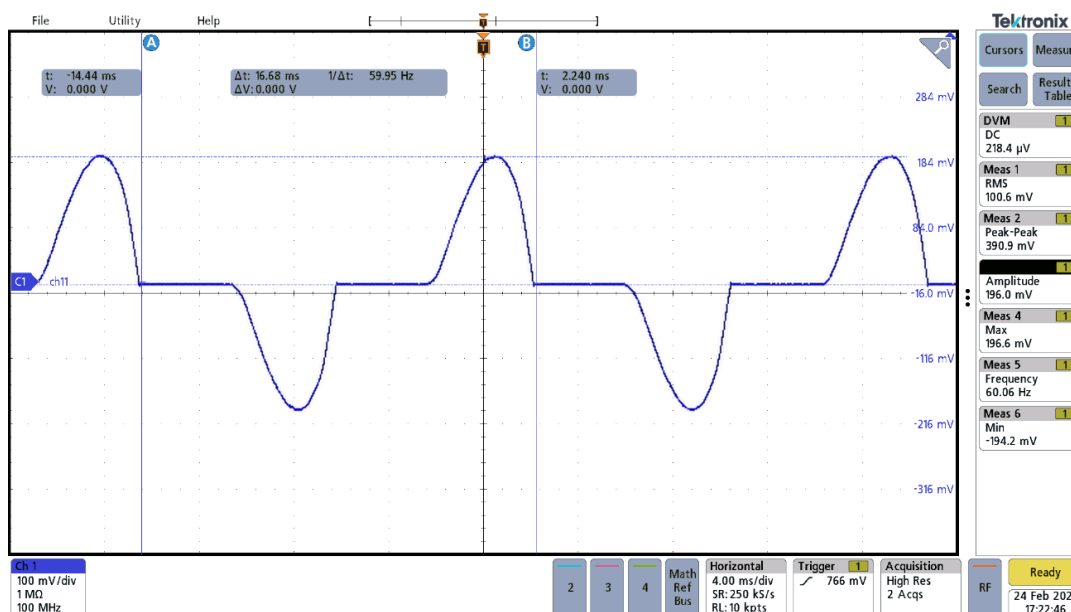


Ilustración 70: Voltaje en la resistencia del DBR

Esta imagen del osciloscopio nos permite comprobar entre otras cosas la frecuencia de nuestra señal.

Como este laboratorio fue realizado en EEUU se esperará una frecuencia de aproximadamente 60Hz. Si miramos un periodo con los cursores: 16.68ms (14.44ms+2.24ms) y sabiendo que $f=1/t$ que es $1/16.68$ obtendremos aproximadamente los 60Hz esperados. Esta frecuencia la obtenemos debido a que estamos trabajando directamente con una señal proveniente de la red. En el caso de nuestro aerogenerador dependeremos de las velocidades del viento y de la máquina rotativa empleada. Por ello, más adelante completaremos el circuito con elementos que nos aseguren que la señal que inyectemos a la red tendrá la frecuencia correcta.

Tomando el valor máximo de la tensión y mediante la ley de Ohm, obtenemos $i=V/R \rightarrow I=18.4\text{A}$. El valor medio lo obtendremos asimilando la señal a una triangular ya que la imagen muestra bastante similitud y por tanto la intensidad alterna media será de 9.2A.

Todos estos cálculos previos los hemos realizado para calcular la potencia disipada en los cuatro diodos y así poder ver si supondría demasiada pérdida de eficiencia.

$$P_{media} = \frac{4 \cdot V_{media} \cdot I_{media} \cdot T_{cond}}{T_{60Hz}} = 240 \cdot V_{media} \cdot I_{media} \cdot T_{cond} = 240 \cdot 0.84V \cdot 9.2A \cdot 4.6ms = 8.53$$

W

Teniendo en cuenta que estamos tratando con turbinas de las que queremos obtener miles de vatios podemos concluir que una pérdida de 8 vatios no será significativa.

A continuación, calcularemos el coeficiente de resistencia térmico. Midiendo de nuevo la temperatura en el disipador térmico podemos ver que esta se ha elevado 19.7 grados. Teniendo en cuenta que se han disipado 8.53W obtenemos: *thermal resistance coef* = $19.7^{\circ}C / 8.53W = 2.31^{\circ}C / W$.

Es importante que nuestro circuito no se sobrecaliente y sobre todo que no disipe mucho calor que pueda afectar al resto de la maquinaria, ya que el aerogenerador podría fallar y pararse por completo, lo que resultaría en una gran pérdida de energía. Con el coeficiente calculado estaríamos fuera de la zona de peligro.

Además, mirando en el osciloscopio el tiempo de descarga del condensador (el condensador empleado era de 20mF) podemos ver que cuanto mayor la resistencia de la carga más tiempo necesita el condensador para descargarse.

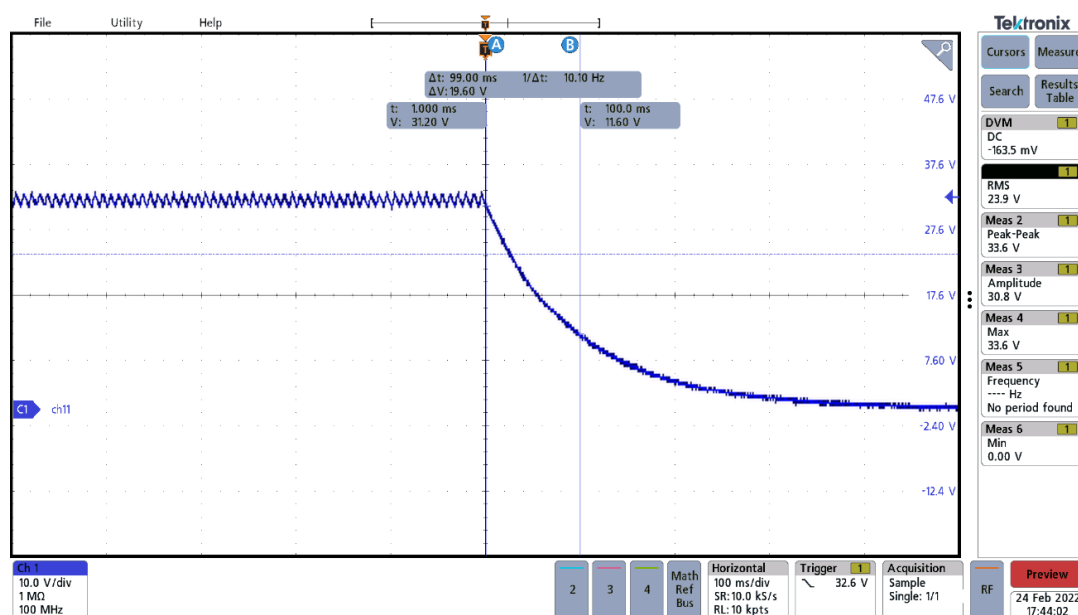


Ilustración 71: Descarga de un condensador con carga de 5 ohmios

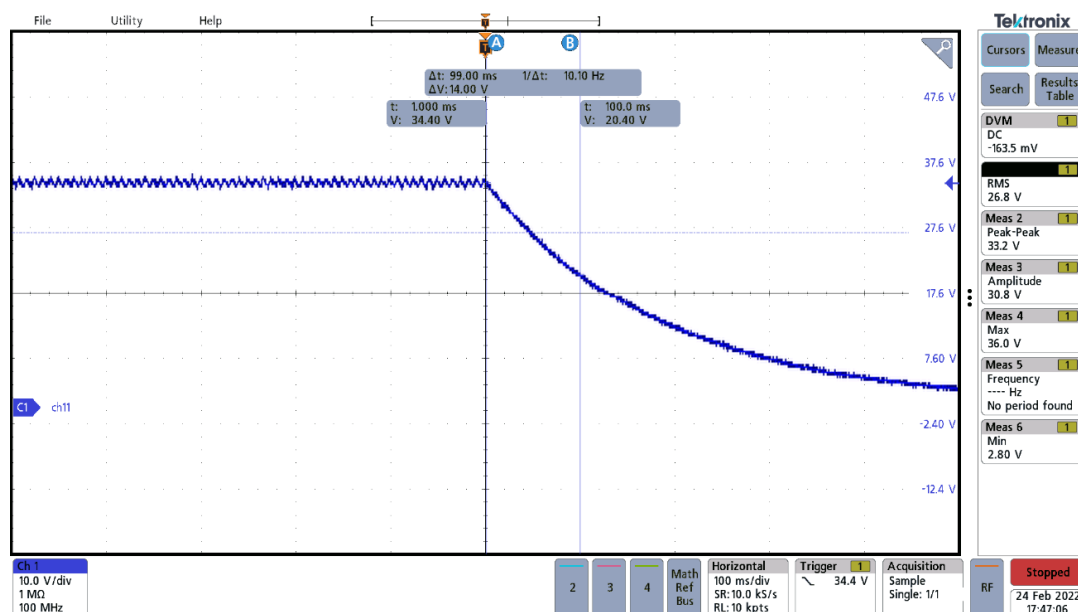


Ilustración 72: Descarga de un condensador con carga de 10 ohmios

Una mayor potencia de carga conlleva una descarga del condensador más rápida y con ello un mayor rizo, es decir un menor valor de voltaje de continua. Esta es la mayor desventaja del DBR aunque no por ello nuestro rendimiento va a disminuir de manera considerable. Cambiando los valores del condensador y ajustando la carga en cada generador se puede conseguir una manera muy eficaz de obtener una señal continua de una alterna sin sufrir grandes pérdidas de por medio.

En conclusión, el DBR es un método para conseguir la primera transformación de AC a DC en nuestros aerogeneradores de tipo 3 y 4. Sus piezas son fáciles de conseguir, el montaje es simple de comprender y realizar. En caso de tener algún problema la placa se puede sustituir con facilidad o incluso se pueden reemplazar simplemente algunas piezas sin que suponga un gran coste. El circuito presenta pocas pérdidas en sus componentes, como hemos podido comprobar, y funciona adecuadamente. Además, otra ventaja es que no disipa una gran cantidad de calor con lo que no tendremos que preocuparnos de posibles sobrecalentamientos en la maquinaria de la góndola.

A continuación, seguiremos con el segundo paso de conversión de nuestro voltaje. Una vez tenemos nuestra señal de continua necesitamos volver a transformarla a alterna para inyectarla en la red.

4.3.2 PUENTE H

[FLY13], [FLY14], [FLY15], [FLY16], [FLY17], [FLY18], [FLY19]

Para obtener la señal alterna requerida utilizaremos un inversor conocido como ‘H-Bridge’. Se trata de un circuito que convierte la tensión continua en alterna. La estructura es la siguiente:

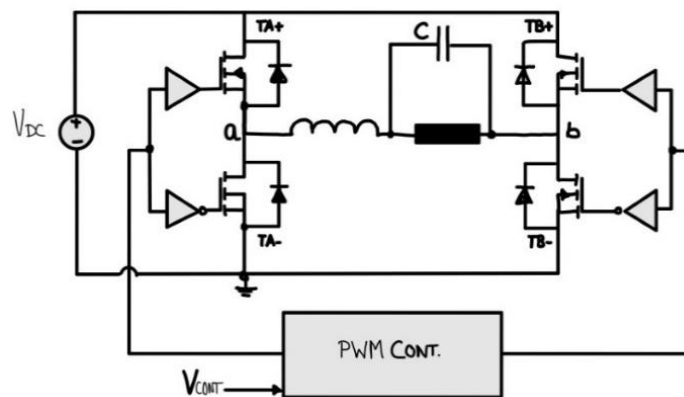


Ilustración 73: Estructura del puente H

El funcionamiento de este circuito se resume en que según qué puertas estén abiertas o cerradas la corriente fluirá por un lado o por otro.

Lo que llamamos puertas es lo que podemos ver designado como TA+, TA-, TB+ y TB- en la gráfica previamente mostrada. Se trata de cuatro MOSFETs que más tarde elegiremos con cuidado para que sean adecuados a nuestro circuito. La tensión de salida que mediremos será Vab. Tanto Va como Vb serán tensiones de continua, sin embargo, Vab (Va-Vb) será alterna.

Primeramente, será importante entender el funcionamiento de este convertidor.

Una pieza clave es el controlador PWM (Pulse Width Modulation). Sirve para regular la ganancia y la señal. Para nuestro H-Bridge tendremos un SUPWM (Sinusoidal Pulse Width

Modulation) que podrá filtrar mejor los armónicos de ordenes mayores de forma que nuestra señal de salida será mucho más senoidal que la que obtuvimos en un inicio del aerogenerador y, por tanto, estará mucho más preparada para ser inyectada en la red.

Esto se consigue realizando la comparativa entre dos voltajes de entrada: una triangular y la de control. Según qué señal sea mayor en cada momento, la salida del comparador será alta o nula. Cabe destacar que la señal de control provendrá de la red por lo que será senoidal. El siguiente esquema servirá para comprender esto mejor:

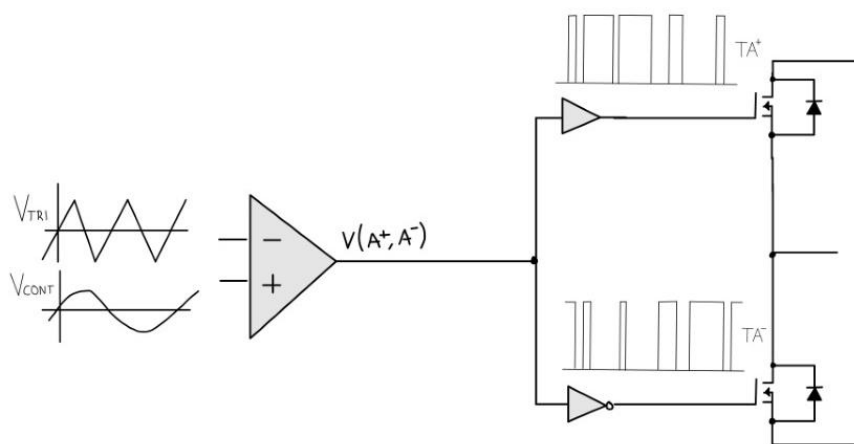


Ilustración 74: Esquema del controlador PWM

El hecho de comparar la señal con una senoidal de la red es un punto clave por el que nuestro puente H puede ser una muy buena opción para un aerogenerador. Al tener la señal de control proveniente de la red lo que hace es generar una salida equivalente pero aumentada en base a esa señal de control mediante nuestra señal de entrada de voltaje continuo. Con esto nos garantizaremos que estamos inyectando una señal a la red con la misma frecuencia, ángulo y con forma senoidal, lo cual es muy beneficioso y nos simplificará mucho la tarea de unión.

La pata B del circuito será completamente opuesta a la A de manera que al restarse sus señales obtendremos una 'senoidal'.

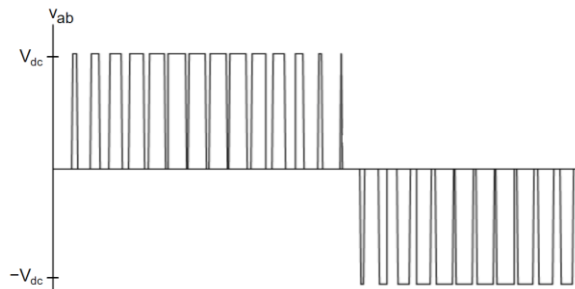


Ilustración 75: Señal de salida del puente H

Una vez tengamos todo el circuito, es decir la placa soldada y montada, comenzamos a testear que todo funcione correctamente.

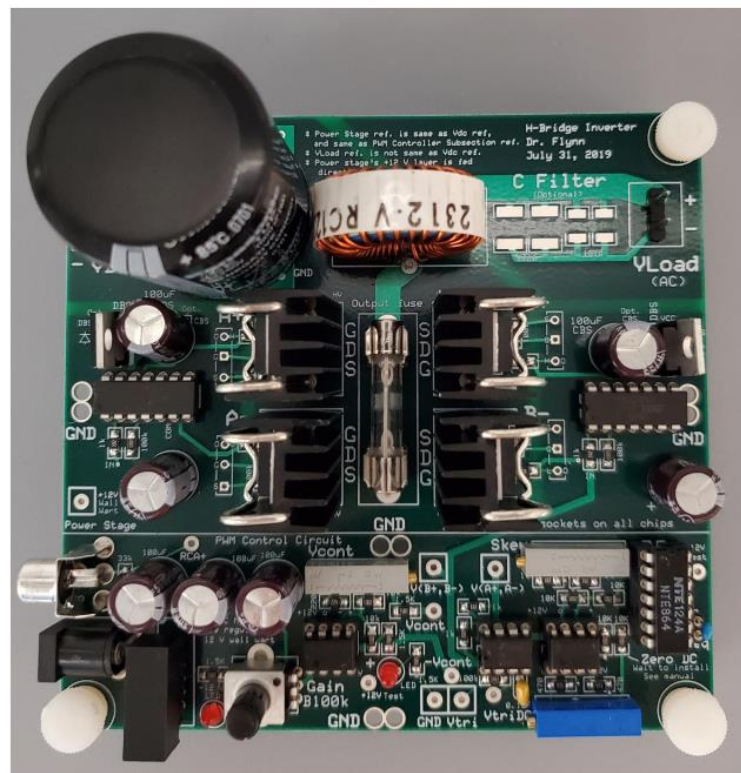


Ilustración 76: Placa del puente H soldada en el laboratorio

[FLY11]

Nuestra placa tiene que estar alimentada por corriente continua. Primero, es importante calibrar la señal triangular que más tarde se usará en el comparador para montar la señal

alterna. Se ajustará el denominado ‘Skew’ para que la señal triangular tenga el mismo tiempo de subida que de bajada y no tenga ningún offset. Sólo así nos garantizaremos que el voltaje de alterna de salida sea una senoidal que podamos inyectar en la red.

La imagen que veremos en el osciloscopio con la señal calibrada será la siguiente:

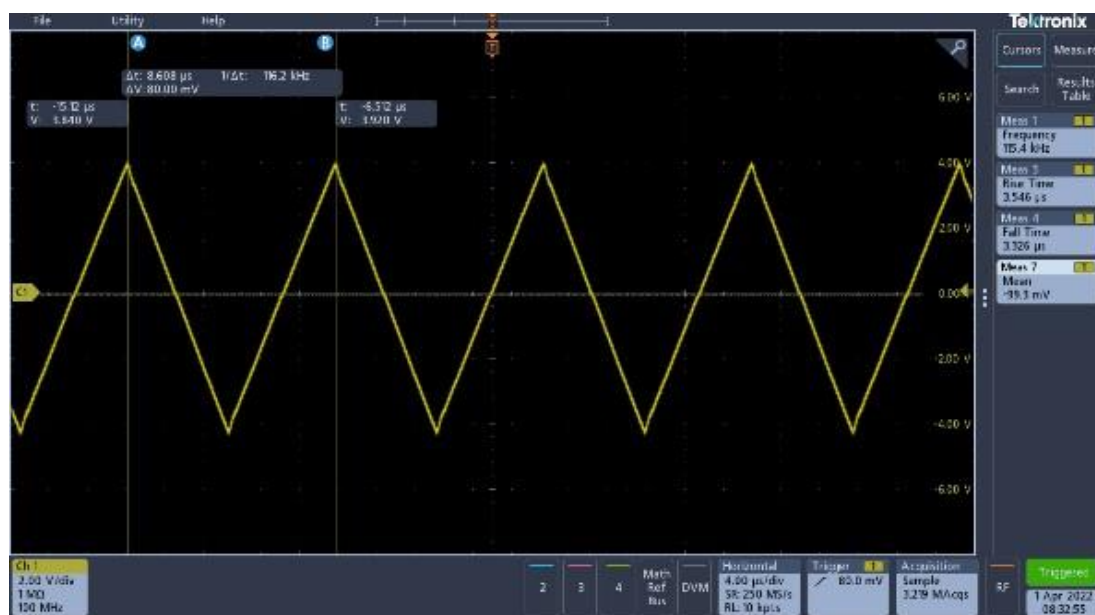


Ilustración 77: Vtri vista en el osciloscopio

Cuanto más perfecta sea nuestra señal triangular mejor salida de alterna obtendremos, puesto que las pequeñas imperfecciones de esta onda podrán convertirse en distorsiones y añadir armónicos indeseados a nuestra salida. Por eso la calibración será crucial.

A continuación, comprobaremos que las señales V_{cont} y $-V_{cont}$ sean como esperadas. Se trata de una señal alterna que se obtiene directamente de la red, como previamente explicado, para más tarde realizar una réplica de ella.

Como era de esperar, al conectar el osciloscopio a la placa tendremos dos señales senoidales completamente opuestas la una de la otra con un valor RMS de 2V:

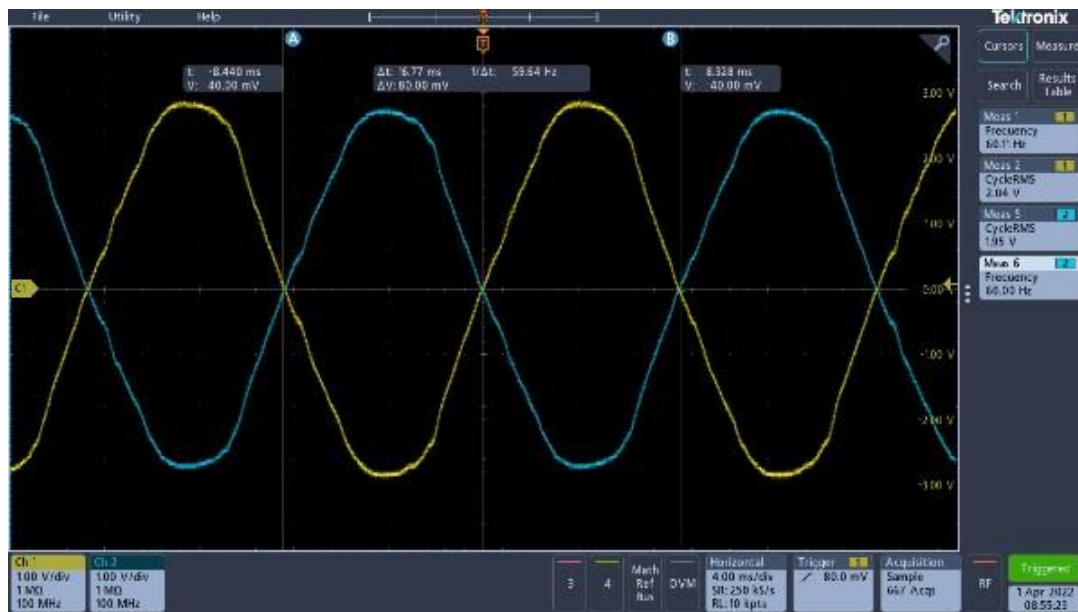


Ilustración 78: V_{cont} y $-V_{cont}$

Otro aspecto que tenemos que comprobar es si nuestro circuito podría estar en zona de saturación o no, para evitar cualquier tipo de peligro.

Para realizar esta comparativa tenemos que comparar V_{tri} y V_{cont} :

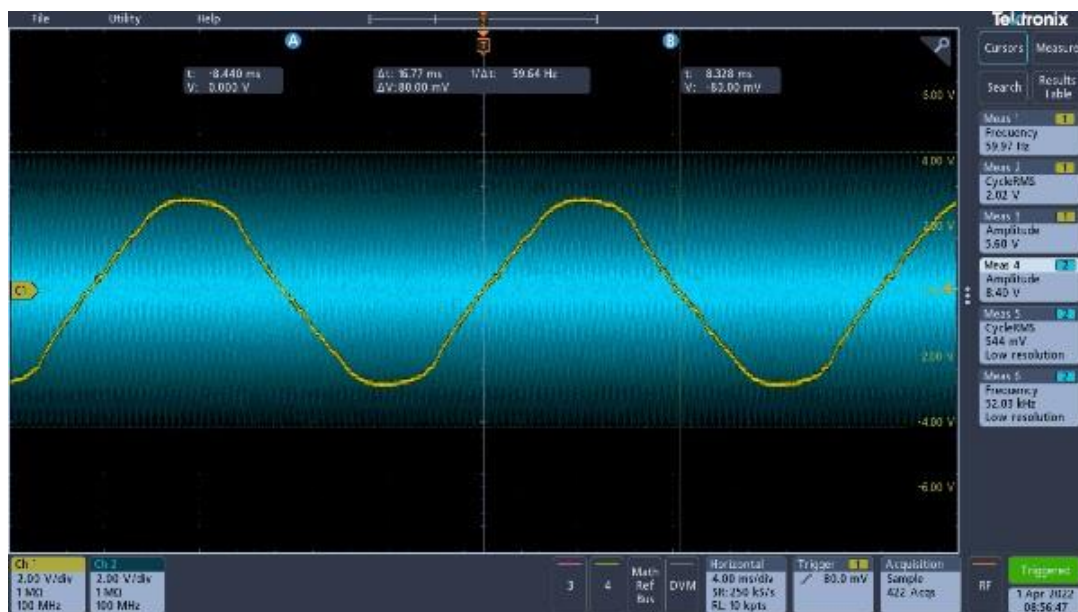


Ilustración 79: Comparativa V_{tri} con V_{cont}

Mediante los valores que obtendremos de las gráficas podemos calcular el ‘Amplitude Modulation Index’ (m_a).

$$M_a = \frac{V_{cont,max}}{V_{tri,max}} = \frac{2.8}{4.2} = 0.667$$

Como m_a es menor que 1 podemos constatar que nos encontramos en una región lineal y no habrá problema de saturación.

La gráfica del osciloscopio ya mostraba esto puesto que la amplitud de V_{cont} (amarilla) es menor que la de V_{tri} (azul).

Una vez que ya tenemos todas nuestras comprobaciones previas realizadas y el circuito calibrado, podemos ver la señal de salida V_{ab} :



Ilustración 80: Señal de salida, V_{ab} , sin filtrar

Para verla mejor le aplicaremos el modo ‘High Res’, es decir un filtro en el osciloscopio y esto nos permite ver nuestra señal senoidal de salida que más tarde inyectaremos en la red.

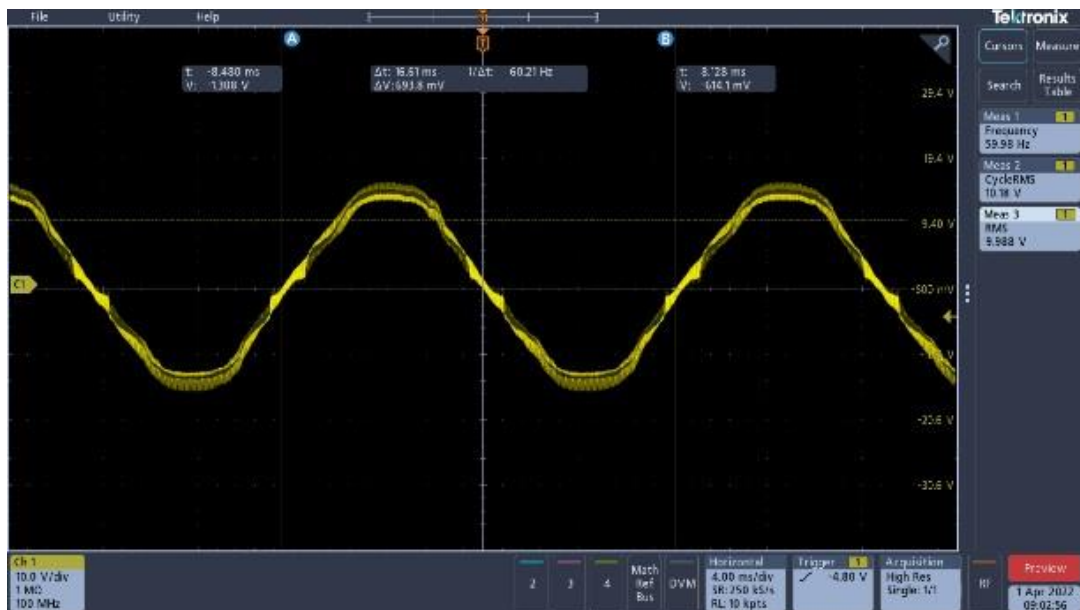


Ilustración 81: Señal de salida, V_{ab} , filtrada

Antes de seguir vamos a comprobar qué hubiese pasado si la señal no hubiese estado calibrada en zona lineal sino sobremodulada.

Para ello aumentamos V_{cont} en nuestra placa y, filtrando la salida, podemos ver que al estar sobremodulada ya no tendremos la senoidal deseada:

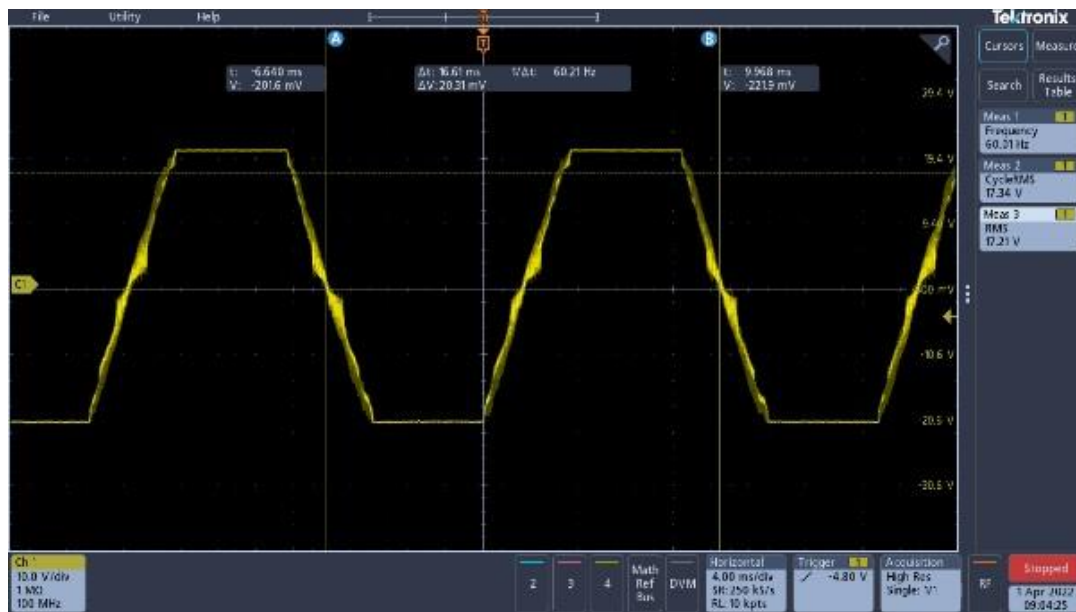


Ilustración 82: Señal de salida sobremodulada y filtrada

En este caso el índice tenía el siguiente valor superior a 1:

$$M_a = \frac{V_{cont,max}}{V_{tri,max}} = \frac{20.8}{4.2} = 4.95 \gg 1$$

Este método es muy fiable y eficaz para conseguir una señal senoidal a la salida de nuestro aerogenerador. Simplemente hay que tener cuidado con que los circuitos estén bien calibrados y que no se generen armónicos de más que luego nos cueste filtrar de la señal. Por tanto, uno de los puntos más importantes a comprobar aparte de la pre-calibración de las señales del comparador es que este índice sea siempre menor que 1 para poder tener la deseada señal senoidal sin un grado de distorsión exagerado.

Una vez hemos comprobado que el convertidor de continua a alterna funciona, vamos a entrar un poco más en detalle del funcionamiento del puente H antes de juntar todos los circuitos para inyectar la energía en la red.

Ya sabemos cómo se compara la señal y cómo asegurar que nuestra señal no sature. Además, hemos comprobado que, efectivamente, la continua a la salida se vuelve alterna debido a los diodos de los MOSFETs que controlan qué puerta abrir cuándo.

A continuación, miraremos un poco más en detalle el funcionamiento de estos MOSFETs. Es la elección de esta pequeña pieza la que va a tener una gran influencia en la eficacia de nuestro circuito.

En el laboratorio tuvimos la oportunidad de medir la eficiencia de cada uno de nuestros circuitos habiendo elegido diferentes MOSFETs y pudimos llegar a eficiencias superiores al 90%. Claramente, esto es de un gran beneficio a la hora de instalar circuitos de potencia en nuestro aerogenerador con el fin de mejorar su rendimiento.

Como muestra el esquema del principio (Ilustración 73: Estructura del puente H) podemos dividir nuestro puente H en dos piernas, la pierna A (a la izquierda con parte positiva, la superior, y negativa, la inferior) y la pierna B (a la derecha también dividida en superior en inferior).

Cada pierna será activada por un ‘driver’. Este tendrá cuatro funciones principales tras recibir la señal del PWM:

- Separar la señal entre las puertas positivas y negativas
- Aplicar el blanking. Es un estado en el que antes de realizar cualquier cambio en una misma pata se abren tanto la pata positiva como la negativa para que no haya peligro de ocasionar un cortocircuito en la propia pata
- Amplificar la corriente que pasa por las patas
- Mantener el lado positivo de cada pata aislado para prevenir cortocircuitos

Otro aspecto muy relevante para nosotros es el hecho de insertar un filtro de paso bajo en la salida de nuestra señal de continua. Queremos obtener una alterna lo más senoidal perfecta para inyectarla en la red sin ningún tipo de problema y con las menores pérdidas posibles, por lo que habrá que filtrar los armónicos de mayor orden.

Comenzaremos a testear el correcto funcionamiento de nuestros MOSFETs (Adjuntar en el anexo, el funcionamiento el MOSFET de manera resumido).

Medimos Vgs, este procedimiento habrá que hacerlo con cada MOSFET para comprobar que están todos bien soldados y que no hay peligro de generar ningún cortocircuito que podría ser desastroso para nuestra turbina. Vcont estará a 0V.

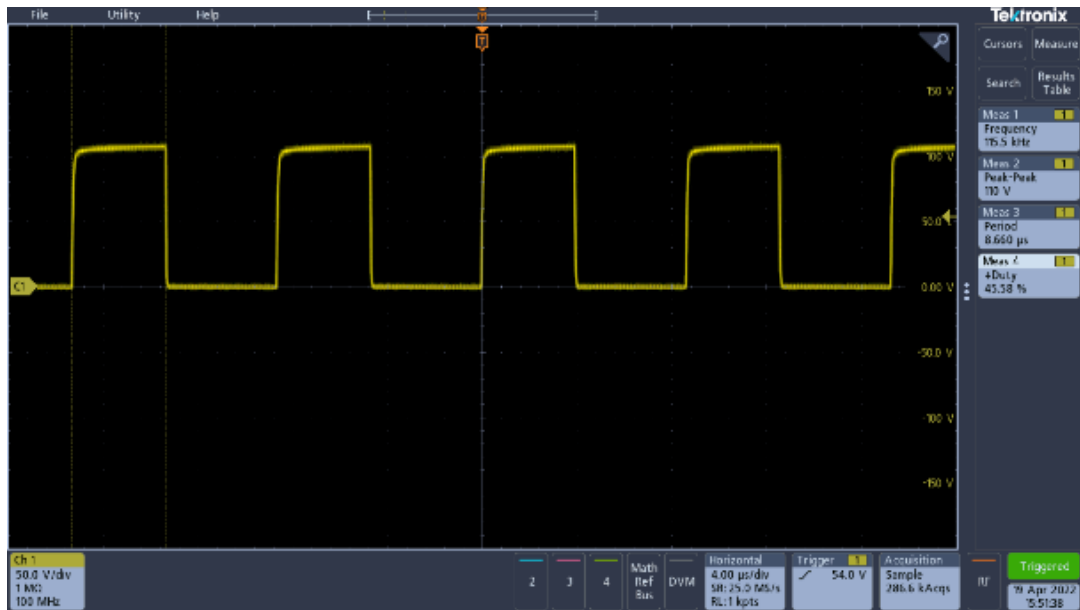


Ilustración 83: Vgs en un MOSFET del puente H

Podemos comprobar que la señal es estable y tiene un ‘duty cycle’ de casi el 50% (45.58%). A continuación, tendremos que comprobar que en una misma pata la parte alta y baja justo se complementen:

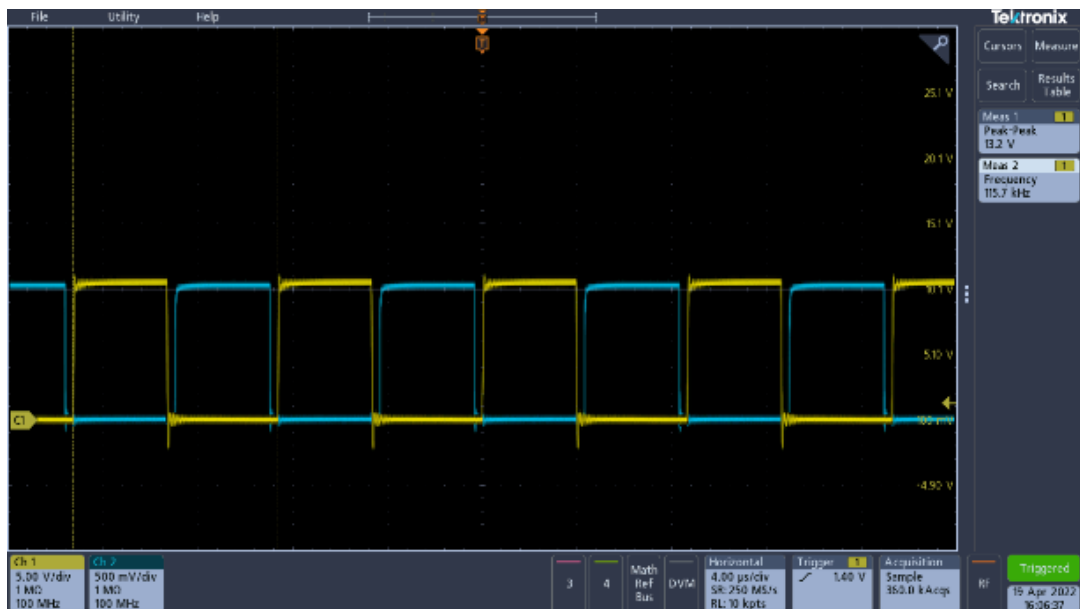


Ilustración 84: Comparativa tensión alta y baja en una pierna

En efecto, así es, el ‘duty cycle’ es el mismo y las señales son exactamente iguales desfasadas a la perfección. Esto es muy importante, como se demostrará en las siguientes comprobaciones. Mediremos a continuación la señal de una única pierna de nuestro puente H al completo:

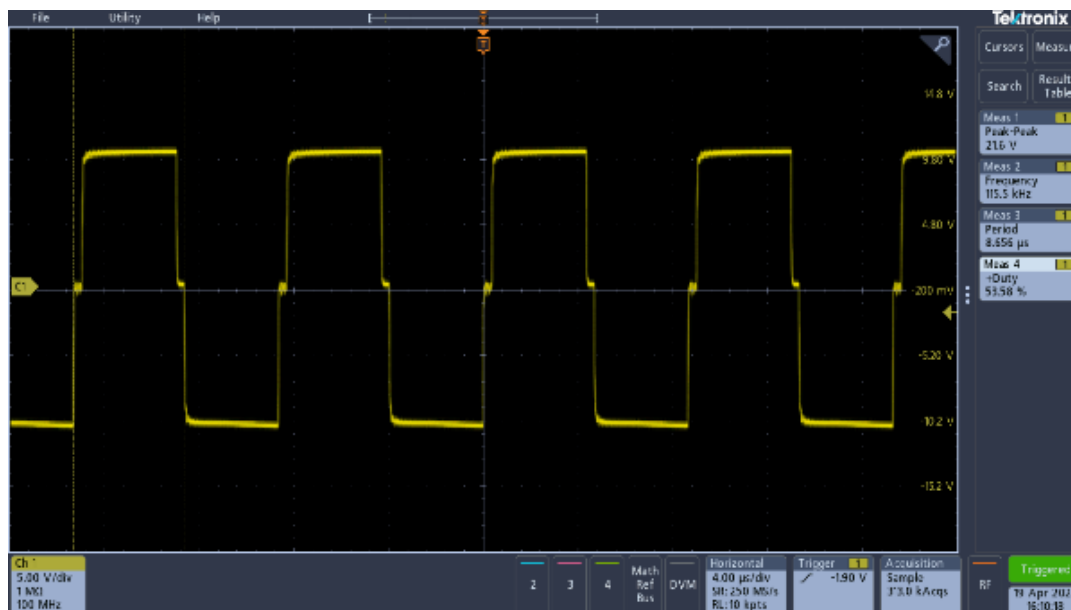


Ilustración 85: Señal en una pierna del puente H

Podemos comprobar que nuestra señal tiene blanking, como debería ser para evitar cortocircuitos. Se trata de los tramos horizontales en el eje cero.

Las mismas comprobaciones se harán para la pierna B.

Una vez realizadas todas estas verificaciones, analizaremos V_{load} , es decir la señal alterna que tenemos como objetivo desde un inicio.

Pondremos una tensión de 35Vdc a la salida de nuestro DBR y $m_a=1$. Sin filtrar V_{load} será:

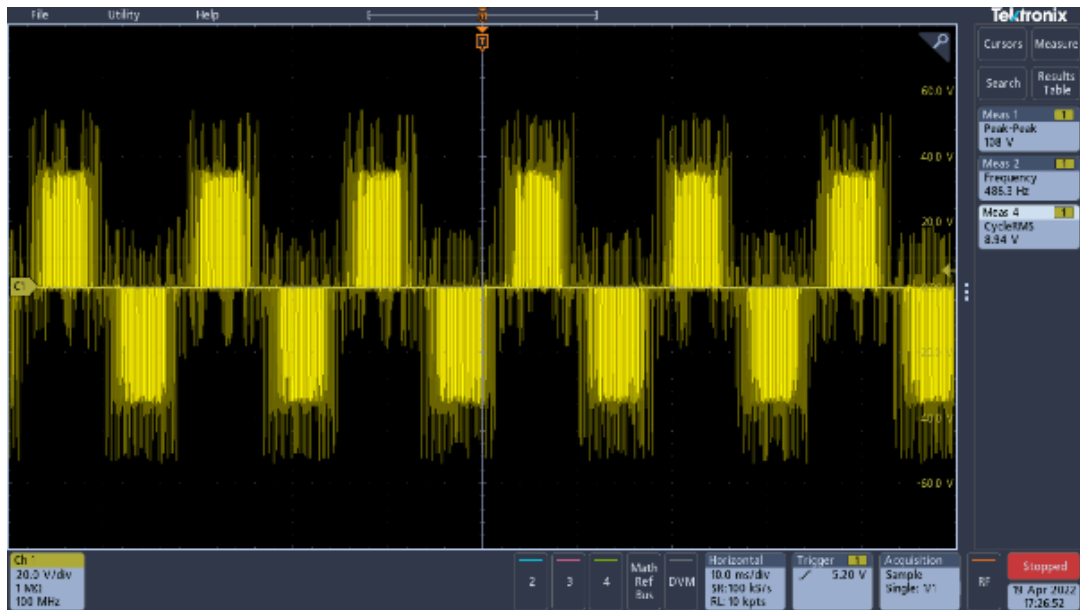


Ilustración 86: Tensión de salida del puente H sin carga, sin filtrar

Filtrada tendrá la siguiente forma:

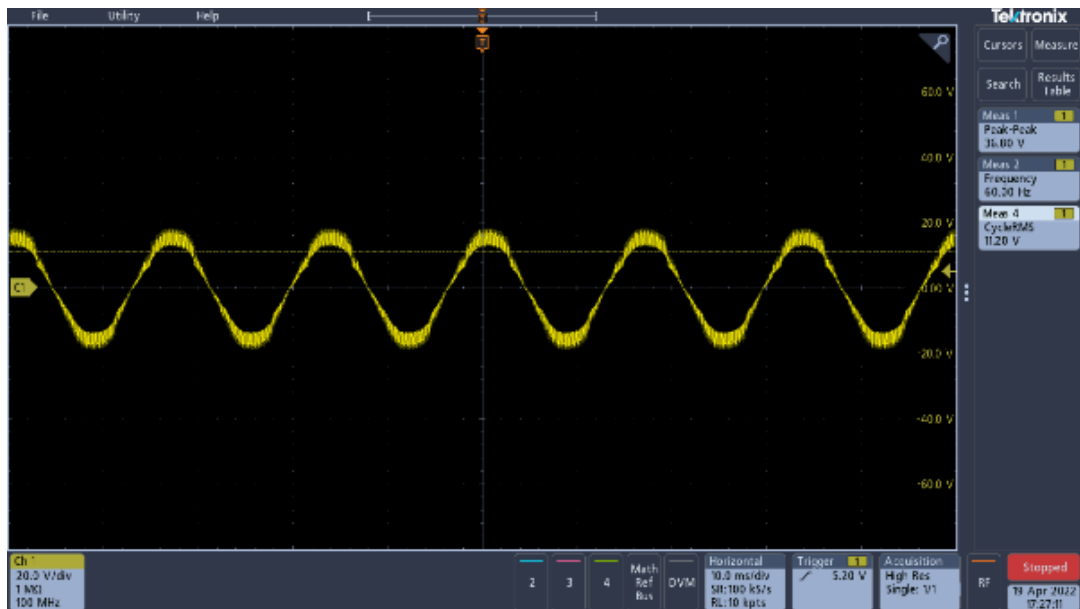


Ilustración 87: Tensión de salida del puente H sin carga, filtrada

Tenemos un CycleRMS de 11.2V.

Vamos a ver la señal $V_{ab,cont}$ en el osciloscopio, que es la que estamos aumentando.

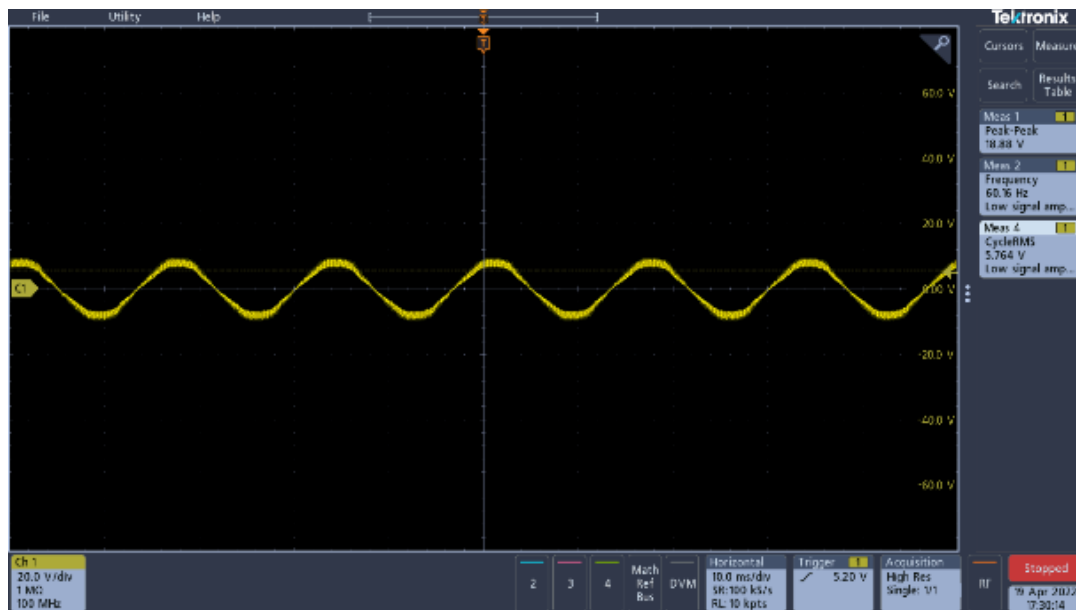


Ilustración 88: Señal de control del puente H para $m_a=1$

Podemos comprobar que, en efecto, hemos ampliado esta señal que tiene un RMS de 5.7V.

Realizaremos un último cambio a nuestro circuito para mejorar la señal. Al cambiar el condensador C_{freq} a un valor de 472 μ F, obtenemos una señal más senoidal, ya que se filtran mejor los armónicos y con una mayor resolución.

Por tanto, podemos concluir este segundo ensayo con la certeza de que el 'H-Bridge convierte la señal continua de entrada en una alterna.

Un último dato curioso es que nuestro puente H se podría usar también como DBR. En caso de que todos los MOSFETs estén en modo OFF el H-Bridge actuará como un DBR convirtiendo alterna en continua. Esto se debe a que en ese caso los MOSFETs actuarán como los diodos que vimos previamente en el ensayo del DBR.

Detalles del MOSFET escogido en el laboratorio:

Tabla 5: Características de los MOSFETs empleados

Mosfet Part Number	Manuf.	Distrib.	Cost/ Unit (\$)
RFP12N10L	Onsemi	Digi-Key	\$1.31
NTP5D0N15MC	Onsemi	Digi-Key	\$5.20

Esquema del MOSFET en general:

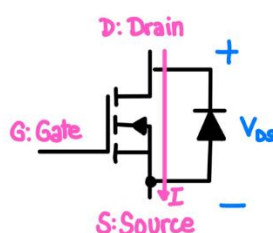


Ilustración 89: Esquema de un MOSFET

El MOSFET es como un interruptor que deja pasar la corriente sólo en la dirección marcada en la imagen. Cuando la tensión V_{gs} supera cierto valor, la corriente podrá fluir libremente puesto que entre los puntos 'D' y 'S' tendremos un corto. Si esta corriente no supera ese valor entre esos puntos tendremos un abierto y la corriente no podrá fluir debido al diodo. Nos podemos imaginar el MOSFET como un interruptor regulado por la tensión.

El primer MOSFET RFP12N10L no funcionó dado que su V_{gs} máximo era demasiado pequeño como para soportar la tensión que le llegaba en el circuito. Por ello, tuvimos que comprar el segundo modelo.

Para elegir este modelo también nos aseguramos de que su valor de resistencia R_{ds} para cuando el MOSFET está en modo conducción fuese muy pequeño, ya que en el laboratorio pudimos comprobar que de esta manera el rendimiento de la placa mejoraba considerablemente.

Las hojas de detalle de ambas piezas se pueden encontrar bajo los siguientes links:

<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/rfp12n10l-d.pdf>

<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ntp5d0n15mc-d.pdf>

4.3.3 UNIÓN CON LA RED

[FLY20], [FLY21]

Finalmente, conectaremos todos los circuitos previamente analizados de forma que tengamos las conversiones requeridas en los aerogeneradores de tipo 3 y 4 para inyectar la energía eléctrica en la red.

El proceso convertirá la tensión alterna que recibimos de nuestro aerogenerador en tensión continua mediante el DBR para después pasar por el H-Bridge y obtener una tensión alterna suficientemente similar a la red que nos permita inyectarla sin ningún problema.

El circuito que nosotros montamos en el laboratorio fue el siguiente:

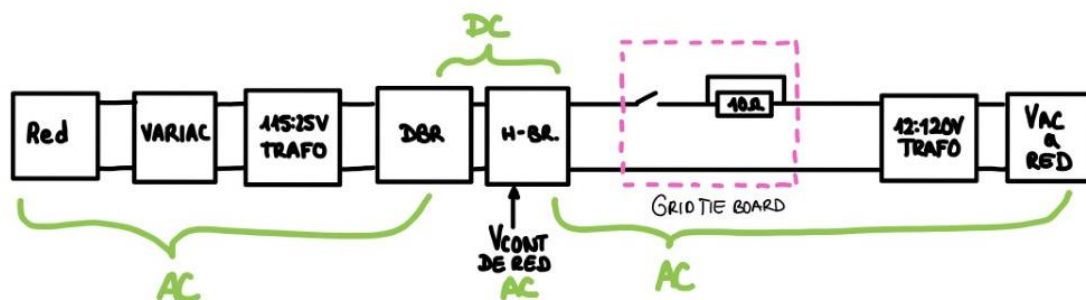


Ilustración 90: Esquema completo de la unión con la red

Debemos tener en cuenta que nosotros al estar trabajando en un molino de viento estaremos conectados al generador, que es el que nos dará la onda senoidal inicial. No obstante, en el laboratorio seguiremos trabajando con la red.

Necesitaremos transformadores para no saturar ni sobrecargar nuestro circuito y, además, nos permitirán ajustar la amplitud de la señal que queramos insertar en la red. Estos también serán necesarios en el aerogenerador.

Entre el Puente H y la red debemos asegurar que estemos en fase y amplitud idénticas a la de la red. El ‘grid tie’ nos permite hacer esta conexión cuando esto ocurra.

En este momento hay que tener en cuenta el siguiente punto clave. Podremos definir la dirección del flujo de energía al ajustar las amplitudes de las tensiones. Para nosotros lo único útil es inyectar energía en la red por lo que V_{inv} deberá ser mayor a V_{grid} . Si fuese menor la energía fluiría hacia el Puente H.

Como hemos mencionado previamente, sabemos que, al estar amplificando una señal de la red, es decir, estamos creando una réplica, estaremos en fase lo cual es un gran beneficio.

La potencia que estaremos inyectando se podrá medir con la siguiente fórmula.

Ecuación 5: Potencia inyectada en la red

$$P = \frac{V_{grid}}{R_{tot}} (V_{inv} - V_{grid})$$

La potencia aparente no se tendrá muy en cuenta. Al estar a una frecuencia de 60Hz esta no será útil.

Las comprobaciones previas a montar el circuito serán:

- Chequear el estado de cada MOSFET individualmente
- Calibrar las señales de entrada al H-Bridge
- Comprobar que los interruptores estén abiertos
- Comprobar que V_{inv} es superior a V_{grid}

La nueva comprobación que aún no hemos realizado en los ensayos previos es ver en el osciloscopio V_{inv} y V_{grid} . Sacaremos por tanto la siguiente gráfica:

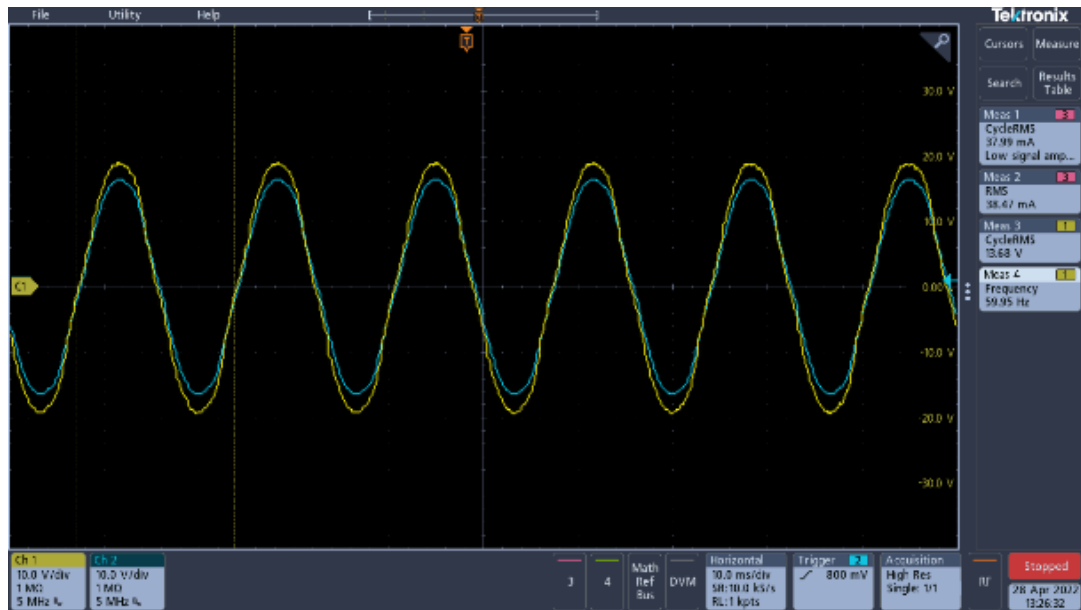


Ilustración 91: V_{inv} y V_{grid} previa a la inyección

Con el osciloscopio podemos comprobar perfectamente que V_{inv} es algo mayor que V_{grid} , además de que la frecuencia y la fase son las correctas, ya que estamos realizando una réplica. Podemos realizar la conexión entre circuito y red.

Con el VARIAC ajustamos las amplitudes y cerramos el interruptor. Obtenemos la siguiente imagen que demuestra que nuestra senoidal generada es una réplica de la de la red, están sincronizadas y por ello estamos inyectando potencia a la red.

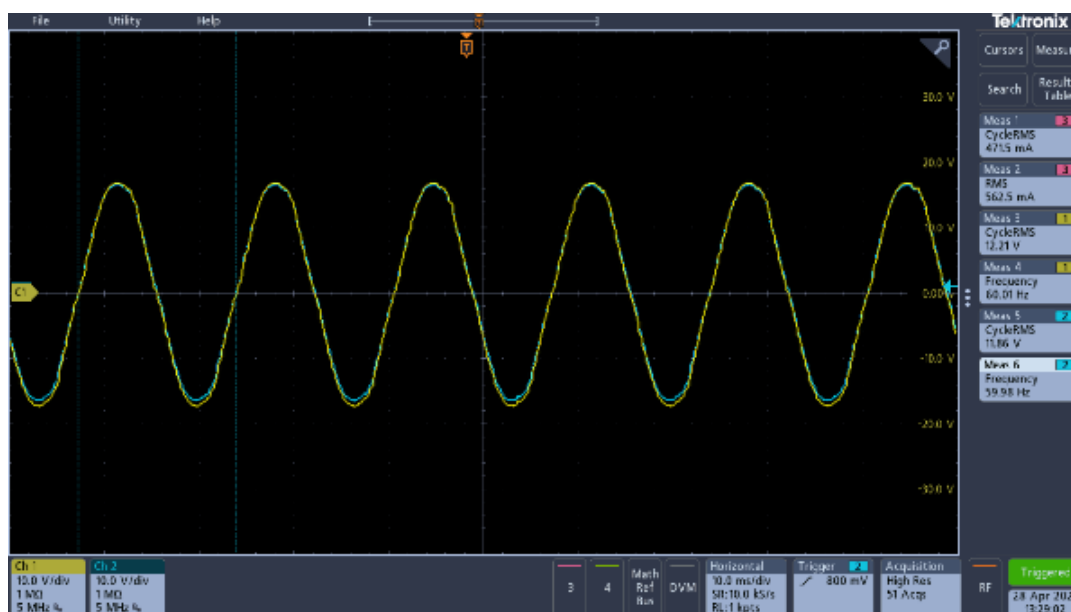


Ilustración 92: Vin y Vgrid posterior a la unión

Aumentaremos un poco el voltaje con el VARIAC para generar un flujo de corriente de 1A y poder medir la eficiencia. Esta será del 88%.

El rendimiento típico de un aerogenerador estará alrededor del 40% y como máximo podrá llegar al 59% según la ley de Betz. [NAT19]

El hecho de instalar nuestro circuito AC-DC-AC, no significa que el rendimiento vaya a aumentar hasta el 88% comprobado en el laboratorio, puesto que aún tendremos pérdidas en el generador y en las palas. Sin embargo, este circuito combinado con las modificaciones señaladas en la primera parte puede mejorar notoriamente nuestro rendimiento. Habría que realizar la instalación para concluir en cuánto, pero podemos asegurar que esta solución podría ser muy beneficiosa para nuestros parques, y que hemos realizado una inyección exitosa con un alto nivel de eficiencia.

4.3.4 CONCLUSIONES

Las conclusiones generales de este capítulo para llegar a esa mejora de rendimiento son:

4.3.4.1 Parte I: COMSOL, Análisis por Software

- Hay que distribuir los devanados del rotor lo máximo posible para evitar pérdidas y distorsiones en la tensión que inyectaremos en la red
- Se trata de una solución simple, factible y muy estudiada en el mercado, que mejora el rendimiento de manera asequible para todos sin un coste añadido excesivo
- Cuantos más polos, aunque salga algo más caro, menor será la velocidad de sincronismo y antes llegaremos a la zona de generación. Lograremos un mayor rendimiento con menores velocidades de viento
- El aluminio podría considerarse un material muy apropiado para el generador por su densidad, conductividad y precio
- Cuanto más fina la parte conductora del rotor mejor
- En general, se trata de cambios fáciles de realizar en la fabricación y asequibles para toda fábrica.

4.3.4.2 Parte 2: Laboratorio

- Método fiable, comprobado en el laboratorio que funciona y que se puede usar con energía solar
- Implementa un controlador PWM que ofrece control de voltaje y de frecuencia y, además, se emplea mucho en la industria cuando se necesita una elevada cantidad de potencia antes que una calidad exquisita. Suele tener un rendimiento superior al 90%
- Debemos mantenernos siempre en la zona lineal para no saturar y para evitar los armónicos de mayor orden
- Fácil de instalar y calibrar previamente
- Fácil de sustituir piezas en caso de que algo falle

- Barato y se puede realizar con una gran variedad de piezas eligiendo la óptima, más barata etc. Según el criterio que queramos usar. Por ejemplo, libre elección del MOSFET
- Nos permite controlar y definir la señal que queremos inyectar en la red. Filtramos la señal de salida a nuestro gusto
- Sistema de fácil comprensión que se puede seguir mejorando y actualizando a lo largo de los años sin tener que hacer cambios en el propio generador que sería lo que nos costaría más trabajo y dinero
- Simple comprensión del funcionamiento y del sistema para facilitar que los técnicos se adapten a ello
- En el laboratorio llegamos a demostrar eficiencias superiores al 90%
- Al tratarse de una ampliación de una señal (V_{cont}) que obtenemos directamente de la red nos aseguramos de estar en fase, en amplitud y en ángulo correcto lo que suma eficiencia
- Aunque se deben hacer muchas preparaciones previas a la inyección en la red, pero una vez conectada funciona todo de manera fluida

Capítulo 5. SOLUCIONES DESARROLLADAS POR ALGUNAS EMPRESAS

En el capítulo 3 vimos las posibles mejoras a realizar en los aerogeneradores y en el 4 presentamos un análisis de las mejoras eléctricas. A continuación, se presentarán algunas empresas más que se han dedicado a buscar soluciones para estos problemas previamente enumerados.

Las empresas que veremos son:

- Mesurex

 [MES21]

- Nabrawind

 [NAB14]

- Covestro

 [COV]

5.1 *MESUREX*

Comenzaremos con la empresa Mesurex:

Mesurex es una compañía cuya sede está en Málaga, aunque también tiene oficinas distribuidas por España en ciudades como Bilbao, Barcelona y Madrid. Es una compañía fundada en 1996 que se dedica a la Instrumentación y el Control. Desarrollan diversos

modelos de sensores y otras medidas de control o medición para después distribuirlos a los diferentes sectores de la industria como pueden ser los aerogeneradores en nuestro caso.

Mesurex fabrica sensores de todo tipo para facilitar el mantenimiento de los aerogeneradores. Como explicamos en el capítulo 2 (Ilustración 22: Sensores propuestos para aerogeneradores), es una gran ventaja tener estos sensores que permitan predecir de antemano cuándo vamos a tener un fallo en el aerogenerador y así repararlo antes de que esto ocurra. En la empresa, se han desarrollado diferentes tipos de instrumentos para detectar distintos fallos tanto de distancia como de desplazamiento y posición.

La empresa Measurex destaca varios puntos relevantes por los que estos sensores son extremadamente funcionales e importantes y, en conclusión, todos los aerogeneradores deberían tenerlos instalados y son:

- Seguridad
- Simplificar el hecho de predecir problemas y solucionarlos antes de tiempo
- Alargar la vida útil
- Proporcionar datos sobre los aerogeneradores a los parques para hacer un seguimiento estrecho y sacar conclusiones para la instalación de futuros parques
- Funcionan por Ethernet por lo que no requieren de cableado y se pueden controlar a distancia en un simple móvil
- Otros: (para el anexo)
- Cambios en la distancia entre dos componentes
- Medición del desplazamiento del disco de embrague
- Medición del espacio de lubricación del eje y su apoyo
- Medición de la separación del rotor
- Control de los niveles de vibración que, si son excesivos, pueden causar daños importantes
- Controlar los cambios en la temperatura en la caja de cambios, la presión y las tensiones mecánicas

Estos sensores están diseñados para su uso tanto en alta mar como en aerogeneradores terrestres.

Algunos de los sensores instalados por Mesurex son:

- Sensor Eddy NCDT 3005 para la medición del espacio del aceite en el eje y del desplazamiento del eje

Se ubica en la zona destacada en amarillo de la siguiente imagen:

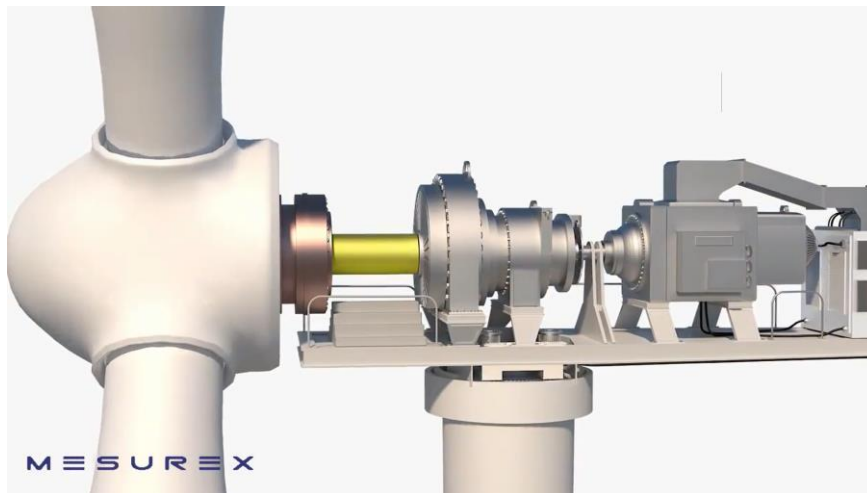


Ilustración 93: Zona en la que se instala el Sensor Eddy NCDT 3005

[MES19]



Ilustración 94: Ejemplo de ubicación del Sensor Eddy NCDT 3005

[MES19]

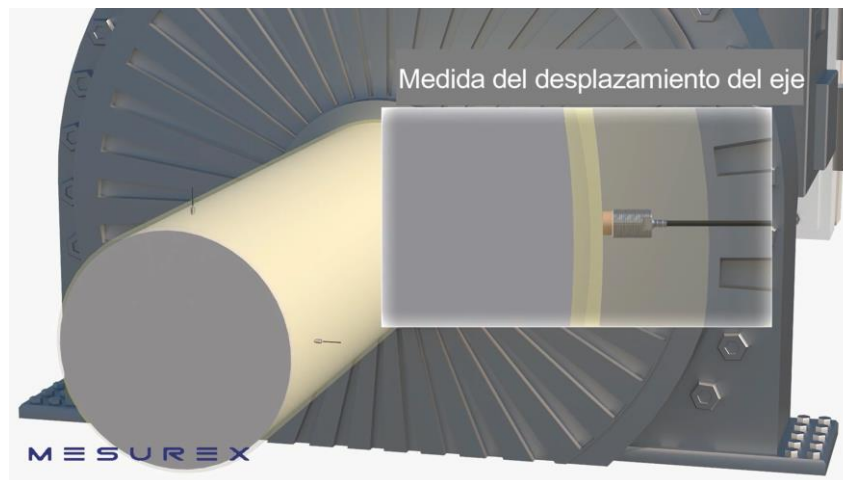


Ilustración 95: Ejemplo de instalación del Sensor Eddy NCDT 3005

[MES19]

- Sensor capaNCDT CS4FL para la medida del entrehierro en el generador, ya que no podemos permitir que éste sea demasiado grande o pequeño

De nuevo, la zona coloreada de amarillo indica su ubicación dentro del aerogenerador:

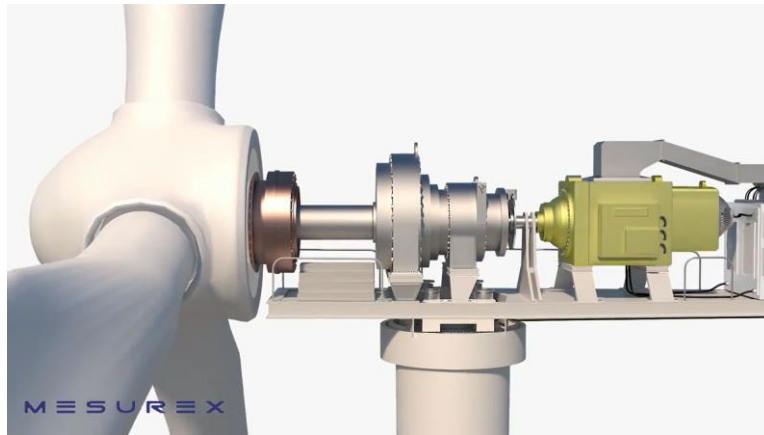


Ilustración 96: Zona de instalación del Sensor capaNCDT CS4FL

[MES19]



Ilustración 97: Ejemplo de Sensor capaNCDT CS4FL

[MES19]

- Sensor Eddy NCDR 3001 para la detección del movimiento de la torre que puede llegar a ser muy peligroso según las condiciones meteorológicas

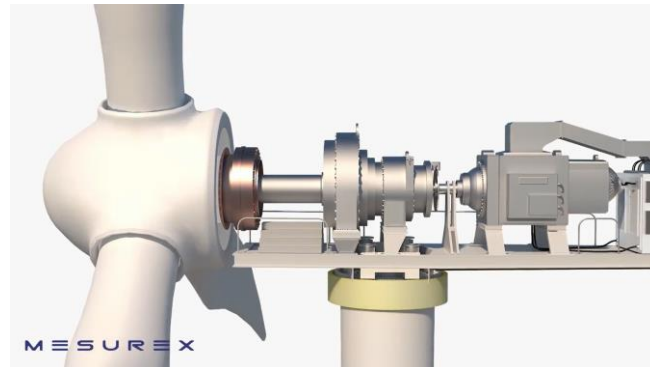


Ilustración 98: Zona de instalación del Sensor Eddy NCDR 3001

[MES19]



Ilustración 99: Ejemplo de Sensor Eddy NCDR 3001

[MES19]

Todas las imágenes han sido sacadas del video colgado por la empresa en su propia web en 2019 en el que muestran lo sencillo que es instalar este tipo de sensores.

Uno de los sensores a destacar de Mesurex son sus acelerómetros. Se trata de un aparato muy exacto que se emplea en ámbitos de la industria que requieren una exactitud fuera de lo común. Mesurex ofrece acelerómetros de flexión fabricado con cuarzo que son altamente precisos y duraderos, así como resistentes a temperaturas elevadas. La empresa asegura que son perfectos para una gran variedad de aplicaciones debido a su fiabilidad y robustez.

[MES21]

[MES19], [INS18], [MES21]

5.2 NABRAWIND

La otra empresa que está muy implicada en el desarrollo y la mejora de eficiencia de los aerogeneradores es Nabrawind.

Se trata de una empresa navarra que busca soluciones para permitir a los parques la instalación de aerogeneradores con tecnologías y diseños innovadores. Por ejemplo, permiten montar aerogeneradores con palas de mayor tamaño de lo habitual. Previamente en el capítulo 3 vimos que uno de los puntos de mejora era ampliar el tamaño de las palas. Sin embargo, llegados al punto actual, si se agrandan más las palas se complica mucho tanto su transporte como su posterior instalación. Debemos tener en cuenta que estas palas se instalan a muchos metros del suelo y aparte del tamaño pesan notoriamente.

Nabrawind ha encontrado la manera de poder instalar palas de hasta 80 metros mediante una técnica llamada ‘Nabrajoint’. Principalmente, la idea consiste en ensamblar la pala in situ. Esto permite transportar la pala dividida en 2 o 3 partes con lo que será una tarea más simple y luego juntarlas de manera tan fina y exacta que parezca que la pieza fue fabricada como un conjunto.

Para realizar esta conexión perfecta se usa un dispositivo conocido como Xpacer. Este pretensa los pernos de la junta de manera que quede una pala firme sin ranuras y por tanto muy eficiente. Esto permitirá llegar a construir aerogeneradores en zonas en las que previamente por dificultades de acceso no había sido posible.

Además, ayuda al ‘repowering’ del que se habló en el capítulo 2, puesto que se trata de una manera de reemplazar una pieza que permita mejorar mucho la eficiencia de la torre.

La siguiente imagen publicada por la empresa muestra cómo se realizaría el transporte de estas palas:



Ilustración 100: Transporte de pala dividida en tres partes

[NAB20I]

Desde el principio de este trabajo hemos estado recalcando la importancia de cuidar el medioambiente y Nabrawind es una compañía que tiene estos aspectos y muchos otros en cuenta, como la sostenibilidad.

En su página web, además de presentar las principales características de Nabrajoint resaltan los siguientes aspectos:

The Features



Cost-Effective

The extremely high strength of the joint minimizes the number of elements.



Light

Metallic parts are minimized to reduce the joint mass.



Fast Assembly

Blade modules simple coordination, with quick tensioning with automatic tool.



Reliable

Our patented bolted joint is extremely simple, robust and maintenance-free.

Ilustración 101: Características destacables de Nabrajoint

[NAB20I]

Podemos confirmar que la empresa navarra es mucho más que sólo una compañía centrada en mejorar el rendimiento de los aerogeneradores. También cuida el medioambiente y trata de tener una fabricación sostenible y sin emisiones.

Además, han desarrollado la tecnología ‘Nabralift’. Se trata de una torre auto-izable que permite construir aerogeneradores más altos de lo hasta ahora posible con la maquinaria existente. El principal objetivo de esto es maximizar la potencia generada por las turbinas de viento, puesto que, como previamente se ha explicado, cuanto más alta la construcción, mejor.

La estructura consiste en tres columnas montadas sobre una torre redonda con un sistema que automáticamente se levanta y permite montar la góndola, la torre y el rotor en alturas antes impensables.



Ilustración 102: Estructura de Nabralift

[NAB20II]

Sin embargo, este proyecto aún presenta muchos problemas como los siguientes:

Costes muy elevados debido a la fabricación, el transporte y la instalación

Difícil acceso a muchas áreas que alarga y complica el proceso en términos de logística

Se necesitan grúas de montaje que toman mucho tiempo y son de tamaño excesivo

Hay que tener especial cuidado con las resonancias de la torre y el rotor en el montaje



[NAB20II]

Como en sus otros proyectos, Nabrawind resalta las mejores y más relevantes características de su proyecto en su web:

Breaking XXL Tower Barriers

Nabralift, together with its Self-Erecting System, breaks all the barriers that are restraining the growth of the wind turbines hub height:

			
Drastic Cost Reduction Tower full-cost (also including foundation, logistics and installation) is reduced by a 15/30%.	Crane-less Installation Self Erecting System avoids using large-size cranes regardless of the final hub-height.	Fast Installation A 150m tower can be installed in 3 days, even in high wind conditions.	Easy Integration Nabralift is a very stiff tower that do not require relevant modifications in the existing WTG design.

Ilustración 103: Características a destacar de Nabralift

[NAB20II]

Otro sistema para construir torres más altas que ha desarrollado Nabrawind es ‘Nabrabase’. La idea principal es extremadamente parecida a la de Nabralift. La estructura y el material de la base varían ligeramente.



Ilustración 104: Estructura de Nabrabase

[NAB20III]

Esta vez se resaltan las siguientes características a tener en cuenta relacionadas con los objetivos definidos al principio del trabajo en cuanto a lograr cero emisiones:

**Footpring
Reduction**

Nabrabase Pile or Anchor rock foundation saves up to 80% CO2 emissions during the installation of the wind turbines.

**Foundation
Simplification**

Concrete requirements for the foundation are reduced by 60%.

Fast Installation

The foundation is reduced to one week and the complete installation of a wind turbine to two weeks.

Ilustración 105: Características a destacar de Nabrabase

[NAB20III]

5.3 COVESTRO

La última compañía que presentaremos que ha proporcionado un importante avance para los aerogeneradores es ‘Covestro’.

Se trata de una empresa alemana que cuenta con cuatro sedes de producción en España.

En este caso el foco estaba en desarrollar un nuevo material que permitiese fabricar palas de mayor tamaño, pero más ligeras con el objetivo de mejorar el rendimiento de estos grandes molinos de viento.

Hasta el momento, el material mayoritariamente empleado por la industria en las palas de los aerogeneradores sigue siendo el epoxi (la resina más tradicional). Sin embargo, esta empresa ha podido demostrar que la resina de poliuretano presenta una propiedades mucho más beneficiosas y adecuadas para la construcción de estas enormes palas.

Los puntos para destacar son:

- La falta de necesidad de post-curado
- Menor velocidad de infusión
- Menor viscosidad

Al necesitar palas de mayor tamaño para obtener mayor eficacia, los materiales empleados deben ser más ligeros, flexibles y resistentes y con esas propiedades este material alternativo se convierte en uno de los grandes competidores de la industria.

[RSE20], [COV]

5.4 CONCLUSIONES:

Instalar los sensores puede ser muy caro, pero a la larga son muy rentables y pueden ayudar a prevenir un gran número de problemas. Además, funcionan sin ningún tipo de cableado

por lo que no influyen en absolutamente nada al funcionamiento del aerogenerador. Son una pieza fácil de reemplazar en caso de fallo, que debería expandirse y usarse más en los aerogeneradores existentes y nuevos para mejorar su rendimiento.

Además, visto que es extremadamente difícil encontrar nuevos diseños de palas que con menor tamaño sigan siendo igual de resistentes, pero más eficaces para la potencia y que este reto aún necesita años de investigación hasta que se complete, debemos encontrar otras soluciones. La idea de modificar los materiales tiene un amplio campo de investigación que incluye a profesionales químicos y de muchos otros ámbitos y puede ser muy beneficioso y eficaz a la hora de mejorar el rendimiento de los molinos de viento. El hecho de ensamblar palas in situ es una gran idea española (puesto que Nabrawind se fundó en Navarra) que debería comercializarse más allá de nuestras fronteras y es una solución española que deberíamos promover y aprovechar para seguir ganando terreno en el ámbito de la energía eólica mundialmente hablando.

Cabe destacar que en todos sus proyectos Nabrawind ha recibido financiación por parte de la Unión Europea.



[\[NAB20\]](#)

Capítulo 6. COMPARATIVA CON EE.UU.

En este último capítulo nos centraremos en la producción de energía eólica en EE. UU. Se trata de realizar una comparativa con España y analizar si hay aspectos de los que podamos tomar ejemplo para mejorar el funcionamiento de nuestros parques eólicos. Daremos una visión general de EE.UU., para luego centrarnos en el caso de Texas, más comparable con España por su tamaño y sus características.

En EE. UU. la red eléctrica está dividida en tres zonas. Los tres subsistemas son los siguientes:

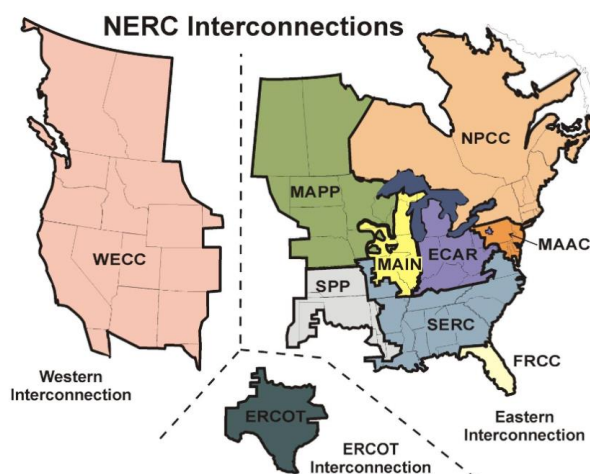


Ilustración 106: Mapa de sistema eléctrico de EE.UU.

[FLY21]

Como se ve, las zonas son la Este, la Oeste y el ERCOT (Texas).

Las zonas Este y Oeste se conectaron de manera exitosa en 1967 mediante tres líneas de 230kV y una de 161kV. Sin embargo, son unas líneas muy poco estables que pueden llegar a sufrir fallos si se someten a cambios de algunos cientos de megavatios. Por ello la fiabilidad de esta red es especialmente baja. Cuando se conectan dos zonas en fase y ángulo es importante poner sincronizaciones para que no explote. El hecho de que en los dos primeros

meses de conexión las dos zonas llegaran a separarse dos veces demuestra la debilidad de la red.

Sin embargo, podemos observar que Texas tiene su propio sistema eléctrico totalmente independiente llamado ERCOT,” The Electric Reliability Council of Texas”. Se trata de evitar la intervención de las autoridades que regulan la transmisión de energía entre estados (FERC= ‘Federal Energy Regulatory Commission’). El ERCOT existe desde 1941. Es una zona que cubre el 90% de Texas y sólo tiene un único punto de control. Dispone de aproximadamente 75.000km en líneas de alto voltaje. El pico de máxima demanda que se ha registrado en la zona del ERCOT fue de 71100MW en agosto de 2016.

El punto de conexión entre las tres zonas es conocido como la superestación de ‘Las Tres Amigas’:

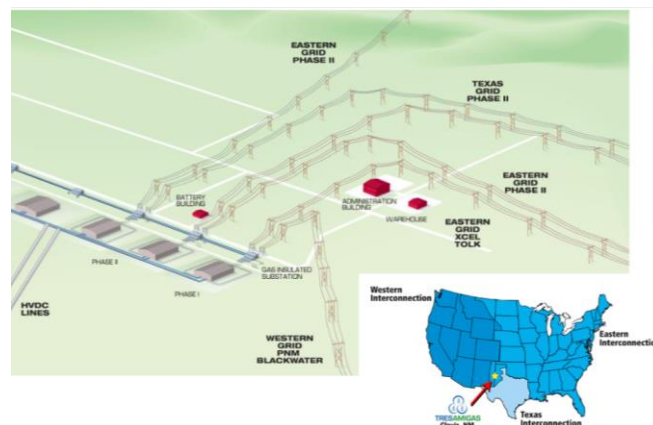


Ilustración 107: Superestación 'Las Tres Amigas'

[FLY21]

El siguiente esquema muestra la distribución actual de aerogeneradores por EE. UU.:

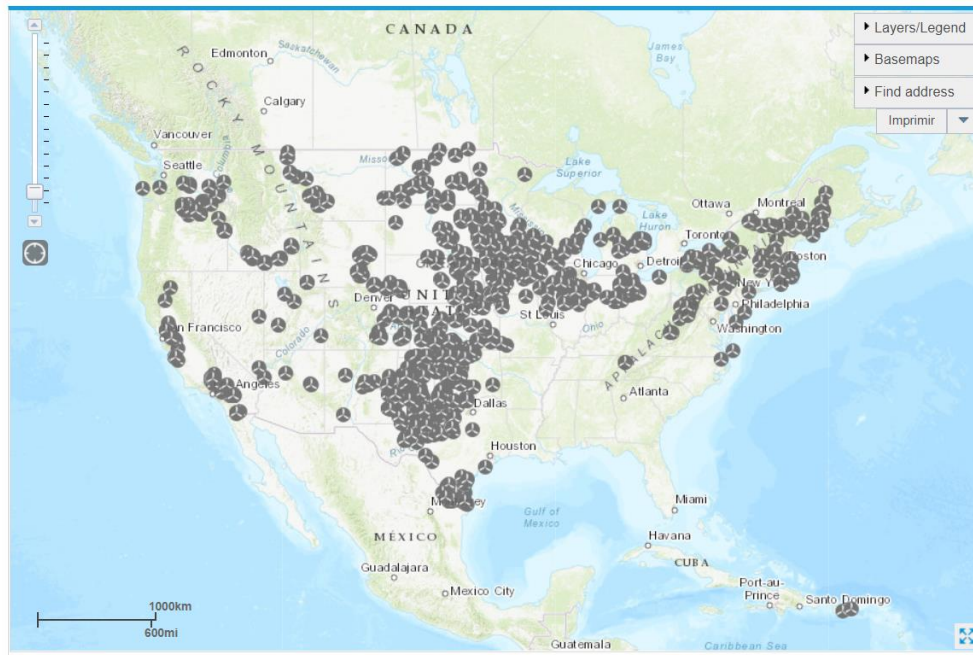


Ilustración 108: Distribución de aerogeneradores en EE.UU.

[MAP]

El esquema general que se emplea para llevar la electricidad hasta las casas es el mismo que podemos encontrar en España, véase aquí un breve resumen:

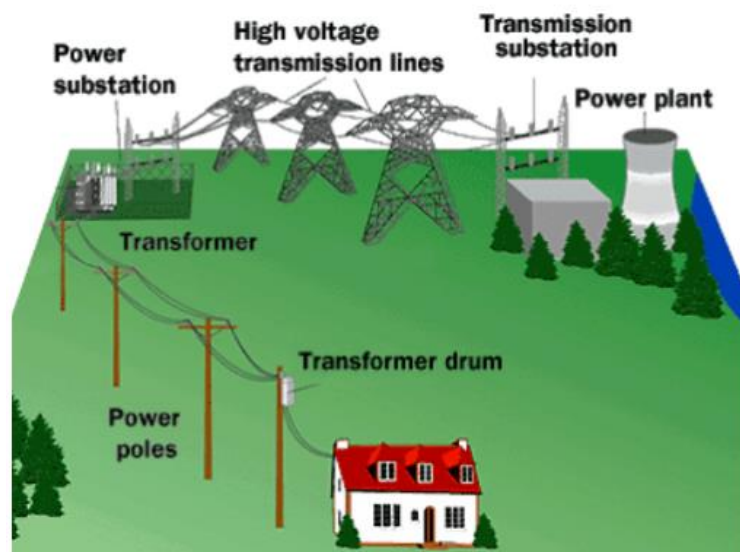


Ilustración 109: Esquema de distribución de EE.UU.

[FLY21]

Sin embargo, los valores de tensión que podemos encontrar típicamente en la red americana varían mucho. La frecuencia es de 60Hz frente a los 50Hz de España.

Para poder apreciar mejor las diferencias hemos decidido mostrar los valores típicos de voltaje tanto en las líneas de transmisión como en el nivel primario de distribución y compararlo con otros países:

Tabla 6: Valores de voltajes por el mundo

	LINEAS DE TRANSMISION	DISTRIBUCION PRIMARIA
EUROPA	220-300, 400kV	3-35 kV
EEUU	115,138,161,230,345,500,765 kV	4.16, 12.47, 13.8, 25, 34.5 kV
UK	132,275,400kV	11 and 33kV
AUSTRALIA	132,275 kV	11, 19, 33kV
JAPON	187,220,275,500kV	6.6kV, 66kV

A continuación, nos centraremos en los siguientes datos de IRENA para comparar EE. UU. con España [IRE]:

Capacidad instalada:

Wind Energy Data

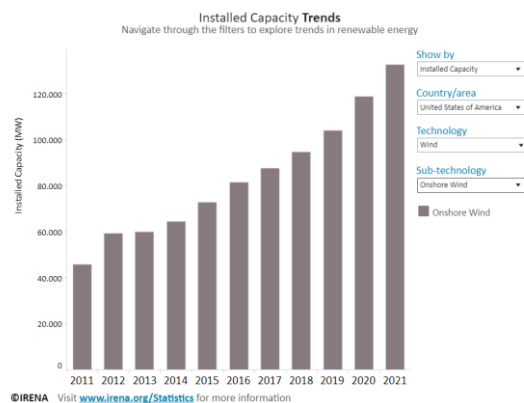


Ilustración 110: Capacidad instalada en EE.UU.

Wind Energy Data

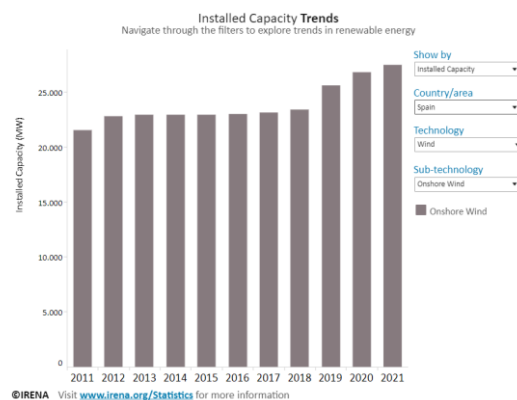


Ilustración 111: Capacidad instalada en España

Generación eléctrica:

Wind Energy Data

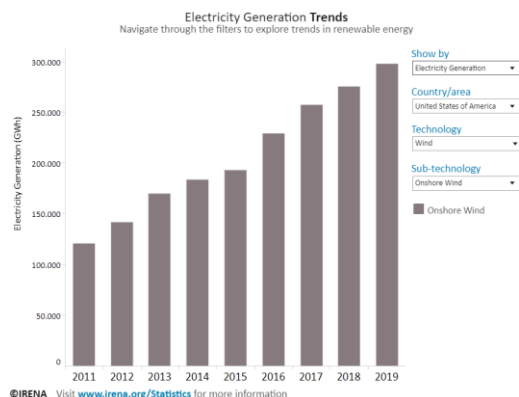


Ilustración 112: Generación eléctrica en EE.UU.

Wind Energy Data

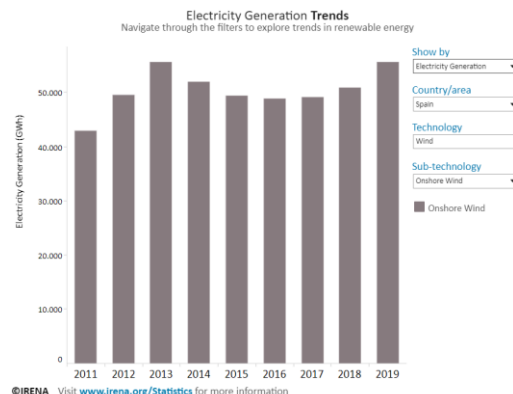


Ilustración 113: Generación eléctrica en España

En general podemos apreciar que los valores de EE. UU. quintuplican los de España probablemente debido a su tamaño. Además, podemos observar que los cambios de año en año en EE. UU. son más escalonados que los de España. El aumento que sufre España de un año para otro es apenas destacable, incluso, más bien, se mantiene a un nivel constante. Por eso tenemos la necesidad de repotenciar y mejorar nuestros parques eólicos y, por eso, realizamos esta comparativa con EE. UU. con el fin de encontrar algunas mejoras de las que tomar ejemplo.

Debido al enorme tamaño de EE. UU. no es una comparación en igualdad de condiciones.

Por ello, a continuación, nos centraremos sólo en la zona del ERCOT, en como ésta ha evolucionado desde 2016 y cuánta energía producida por el viento se demanda y aprovecha en ella. El siguiente esquema muestra que ya en 2016 la potencia eólica constituía una parte significativa del consumo de energía tejano.

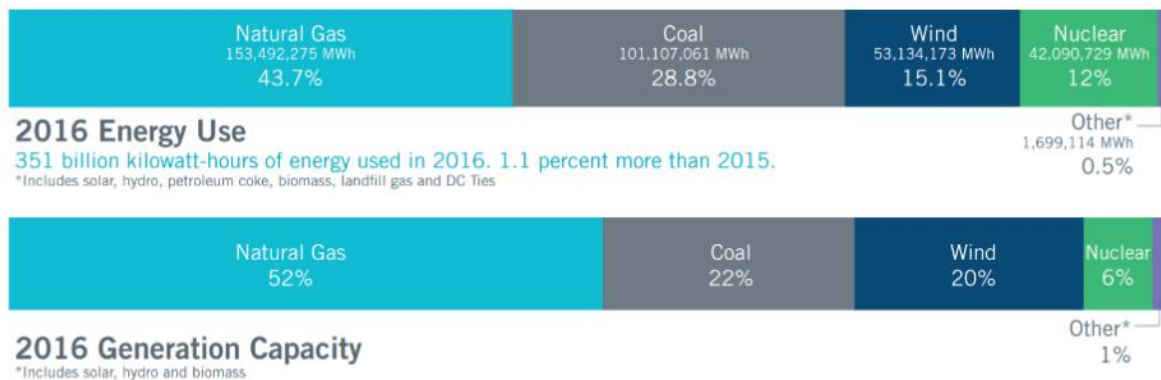


Ilustración 114: Datos del consumo de energía en Austin en 2016

[EIA]

Bajo ‘generation capacity’ se entiende la máxima electricidad que un generador puede producir en condiciones ideales medida en MW.

Bajo ‘Energy Use’ se entiende la cantidad de electricidad producida durante un periodo de tiempo y se mide en kWh.

Por ejemplo, si un aerogenerador tiene la capacidad de generar 2MW pero sólo está en funcionamiento durante media hora, su ‘generation capacity’ sería 2MW pero su ‘energy produced’ tan solo 1MWh.

En cambio, en España en el año 2016 el consumo total de eólica estuvo en torno al 12%, ligeramente por debajo de los valores tejanos con su 15%. [REN17]

Hoy en día el ERCOT cubre 200.000 millas cuadradas de Texas y abastece a 24 millones de consumidores con una capacidad total superior a 86GW.

El tamaño de España (incluyendo todas sus islas) ronda las 195.000 millas cuadradas, con lo cual estamos comparando tamaños de terreno similares. Los datos actuales proporcionados por la AEE de eólica en España son una potencia instalada de 28.138MW, representando así el 23% del consumo de energía con 1.298 parques eólicos. (<https://aeolica.org/>)

Claramente, hay algún aspecto que el estado de Texas está tratando mejor.

En total, en Texas, 25GW provienen de la generación eólica. Además, se trata de un mercado activo en el que la gente compra y vende acciones y electricidad.

El crecimiento que ha logrado Texas en el mundo de la eólica desde el año 2000 es altamente destacable y se resume en el siguiente diagrama:

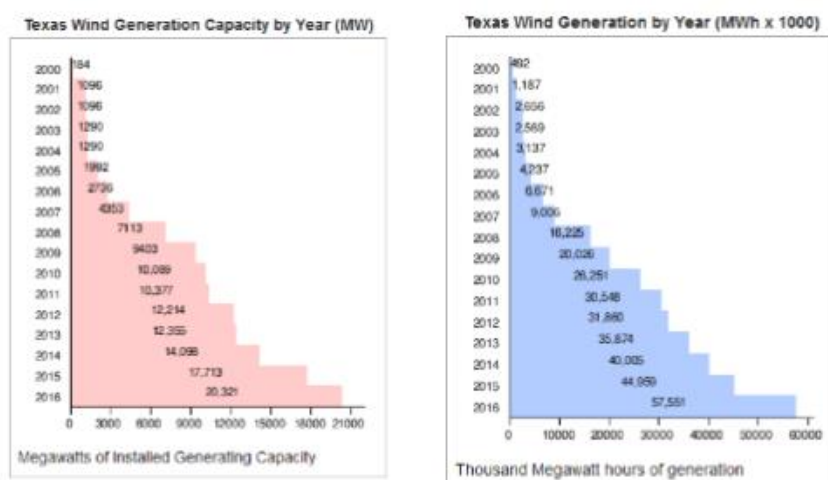


Ilustración 115: Generación eólica en Texas

[EIA]

El estado de Texas tiene el récord en cuanto a capacidad instalada procedente de los aerogeneradores. La siguiente gráfica demuestra como claramente la energía solar se explota mucho menos en Texas que la eólica. Previamente habíamos visto que en España se complementan. Sin embargo, Texas ha centrado sus estudios y mejoras en la eólica con los siguientes resultados:

Wind + Photovoltaic (PV) Power Generation

Data from 03/24/2022 to 05/09/2022

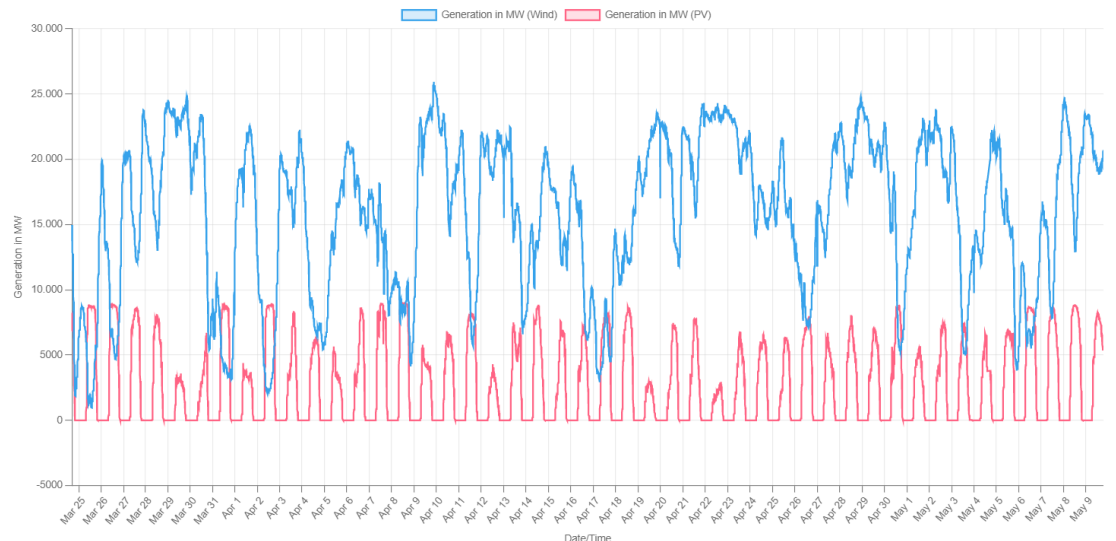


Ilustración 116: Comparativa de la generación eólica y solar en Texas de marzo a mayo de 2022

[ANA]

Como ya hemos mencionado, Texas es el estado que más energía produce y consume de todo Estados Unidos, sobre todo en cuanto a producción de gas natural y energía eólica. En efecto, como podemos ver en la siguiente gráfica, el único rival de la energía eólica en Texas es el gas natural:

Data from 03/24/2022 to 04/01/2022

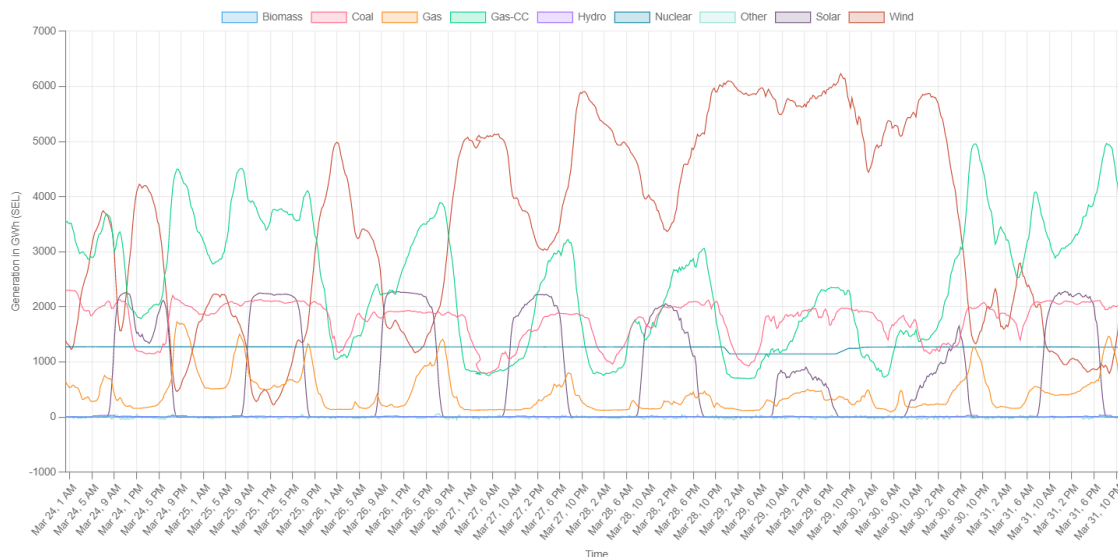


Ilustración 117: Generación de las diferentes fuentes de energía en Texas (marzo-abril 2022)

[ANA]

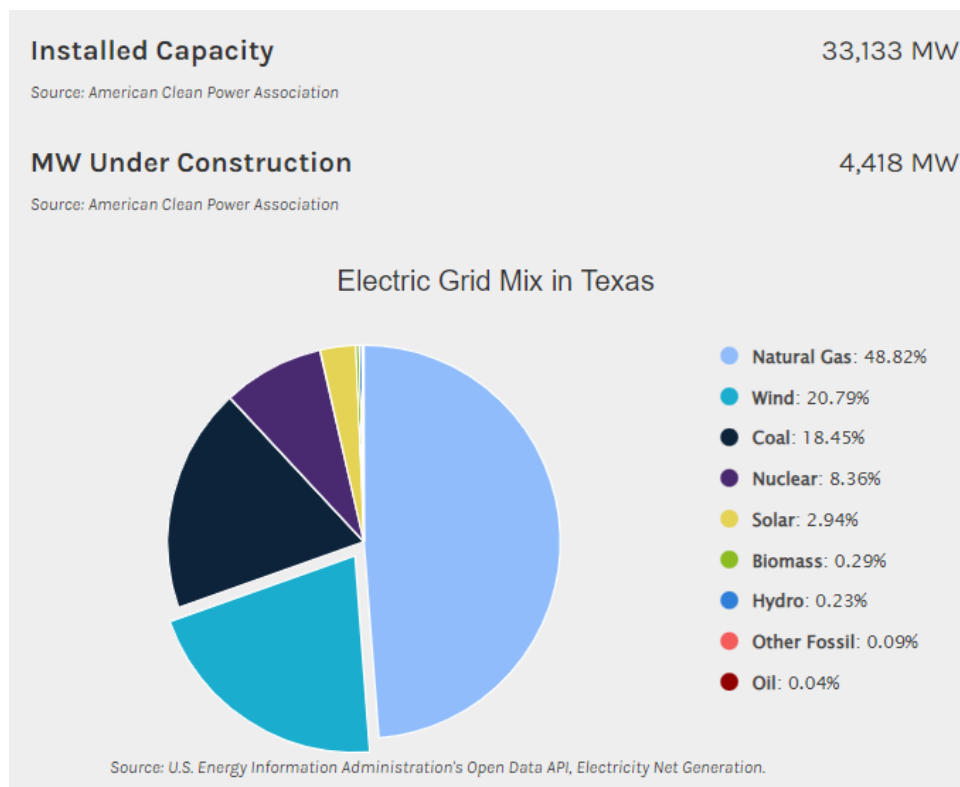


Ilustración 118: Información energética de Texas en 2022

[WET]

En 2014 la producción de energía eólica superó por primera vez a la producción de energía nuclear. En 2020 el 28% de la energía eólica producida en EE. UU. provenía de los aerogeneradores de Texas.

Hay que destacar el parque eólico ‘The Roscoe Wind Farm’. Se trata del sexto más grande del mundo con una capacidad de 781.5MW. Se encuentra en el centro de Texas y funciona desde 2009. El proyecto pertenece a la empresa alemana RWE. [LUB22]

La siguiente gráfica muestra el número de aerogeneradores instalados con el paso de los años en diferentes estados:

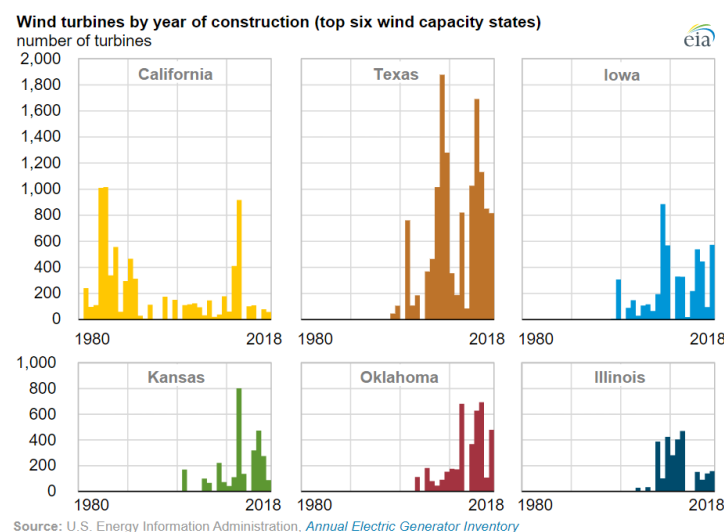


Ilustración 119: Comparativa de instalación de aerogeneradores en algunos estados de EE.UU.

[EIA]

Claramente, podemos observar que Texas lidera considerablemente. Sin embargo, los primeros aerogeneradores aún activos que se instalaron en EE. UU. están situados en California desde julio de 1975. Podemos ver en la gráfica anterior que es el segundo estado que lidera la energía eólica en EE.UU. . Para mejorar la eficiencia de sus turbinas, California repotenció sus aerogeneradores en 2018. Texas también ha empleado este método del que ya pudimos aprender algo en el capítulo 3.

La especialista en extender la vida útil de los aerogeneradores de Acciona, Mercedes Irujo Espinosa de los Monteros ha realizado un estudio respecto a la repotenciación de los aerogeneradores.

Es la técnica que por excelencia se prefiere aplicar en EE.UU.. El mayor reto en este caso es averiguar exactamente cuánto tiempo de funcionamiento eficaz le queda a una turbina y cuáles son las piezas a cambiar para que la vida útil se alargue al máximo con unos costes mínimos.

La técnica de ‘Repowering’ en numerosas ocasiones requiere desmantelar gran parte de la turbina y reemplazar su equipamiento, por ejemplo, el rotor u otros componentes. Los expertos coinciden en que esta metodología puede ser muy rentable puesto que los gastos no son colosales y conllevan a un gran aumento de eficiencia en las turbinas.

Hans Kerkvliet (consultor de Bosch&Van Rijn, manifesto durante European Wind Energy Association technology workshop):

“Repowering a wind farm may be a financially viable option, as some of the decommissioning and installation expenses can be shared, and the wind resource is well known, which lowers the risk of the project. Wind turbine technology has substantially developed over the last decades and repowering a site can considerably increase production.”

Uno de los mayores beneficios del ‘repowering’ es el hecho interesante, de que los primeros parques eólicos ya se construyeron en las zonas con mayores vientos. Las mejores ubicaciones para los aerogeneradores ya están ocupadas, por lo que se trata de explotarlo al máximo.

Para repotenciar una turbina normalmente hay que reemplazar todo su sistema incluida la torre. En ocasiones también hay que reconstruir la conexión con la red, puesto que el número de máquinas a conectar variará o se conseguirá inyectar más potencia. Lo habitual es reemplazar las palas con otras de mayor tamaño que soportan mayores velocidades de viento a la vez que aumentar la altitud de la torre. Consecuentemente, con menos turbinas se logrará

la misma o incluso mayor potencia. Además, la conexión a la red será más segura y sufrirá menos por las variaciones de frecuencia.

Los parques eólicos que pueden realizar estos cambios en sus aerogeneradores tienen datos sobre el viento, sus condiciones y los cambios que éste sufre a lo largo del año almacenados, de manera que pueden adaptar sus turbinas para obtener máxima eficacia.

Los problemas de permisos y documentos suelen ser comunes cuando se lleva a cabo estos cambios y, por ello, numerosos países no pueden aplicar esta técnica. Por ello, Texas vuelve a estar a la cabeza. Al ser un estado no regulado por la FERC puede avanzar mucho más en técnicas como la previamente explicada.

La siguiente gráfica confirma este avance de Texas con respecto al resto de Estados:

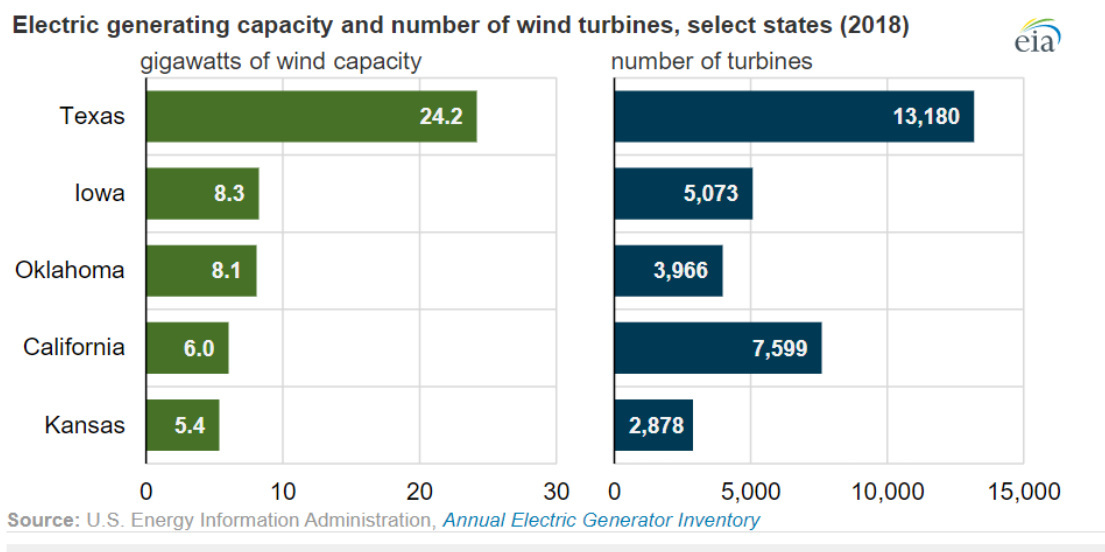


Ilustración 120: Datos de la energía eólica en diferentes estados en 2018

[EIA]

Según datos de la AWEA ('American Wind Energy Association') publicados en julio de 2021, EEUU tiene una capacidad de eólica superior a los 90000MW de los cuales más de 25% corresponden a Texas (>23000MW).

De hecho, si Texas fuese un país, ocuparía el quinto puesto en cuanto a generación eólica. En 2019 y 2020 esta posición número 5 estaba ocupada por España según IRENA y otras fuentes:

RANKING DE PAÍSES POR POTENCIA TERRESTRE ACUMULADA

Fuente: GWEC

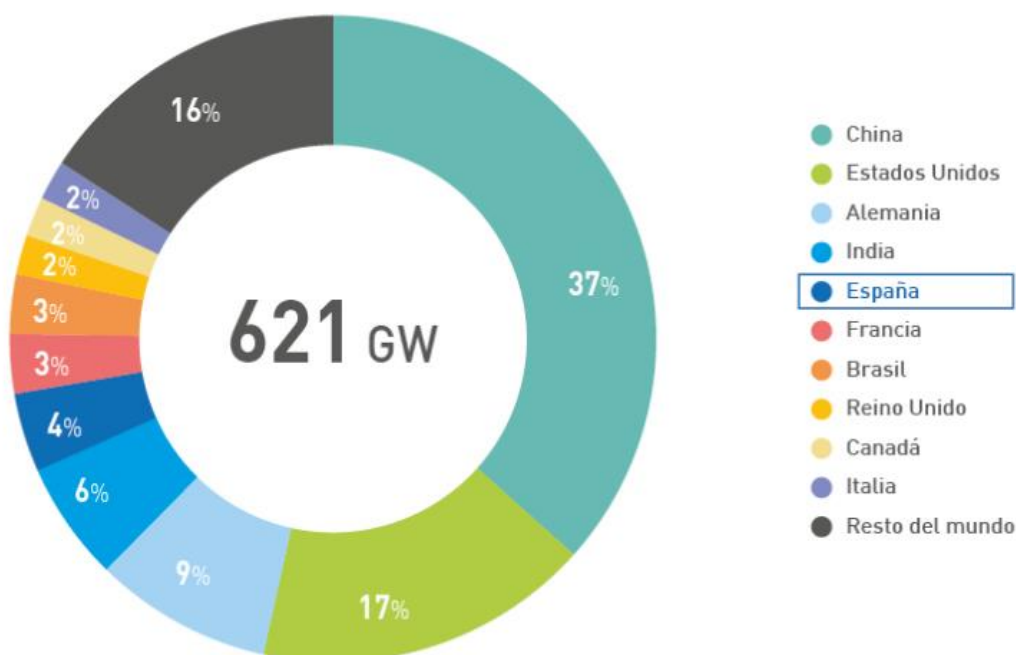


Ilustración 121: Potencia terrestre acumulada por países

[ROC20]

Por lo tanto, podemos asegurar que Texas y España están muy a la par en términos de energía eólica.

Otro gran Proyecto que Texas tiene entre manos es el ‘UL Advanced Wind Turbine Test Facility’ llevado a cabo por la Universidad Texas A&M. Se trata de una instalación de 3.67MW que venderá su energía a la compañía Xcel Energy, pero a su vez servirá para dar a sus alumnos una educación sobre la energía eólica, introducirles en este mundo y darles una experiencia de la vida real a la vez que avanzar en la investigación de la eólica. [PRE21]

La mayor razón de éxito de Texas es el hecho de tener su propia red eléctrica y regularla ellos mismos. Aparte de no tener que pasar por la mayoría de los procesos legales para aprobar proyectos (lo cual ralentiza mucho el avance en el mundo de la energía), los usuarios pueden decidir qué tipo de energía quieren consumir. El estado ofrece diferentes planes de consumo a libre elección de cada uno. Este plan se puede cambiar mes a mes o fijar para varios años. La siguiente web muestra alguno de estos contratos: <https://quickelectricity.com/electricity-plans/>

La gran ventaja de este sistema es que crea mucha competitividad entre las compañías eléctricas. Puesto que la energía eólica genera más kWh a un menor precio suele ser una de las opciones preferidas por los usuarios. [PRE21] De esta manera, las empresas energéticas se ven obligadas a mejorar su oferta constantemente y a invertir más tiempo y dedicación al desarrollo de energías eólicas.

Según datos del departamento de energía estadounidense entre 2010 y 2016 el precio de la energía proveniente de los parques eólicos disminuyó en un tercio, de \$2,361/kW a \$1,587/kW. [PRE21].

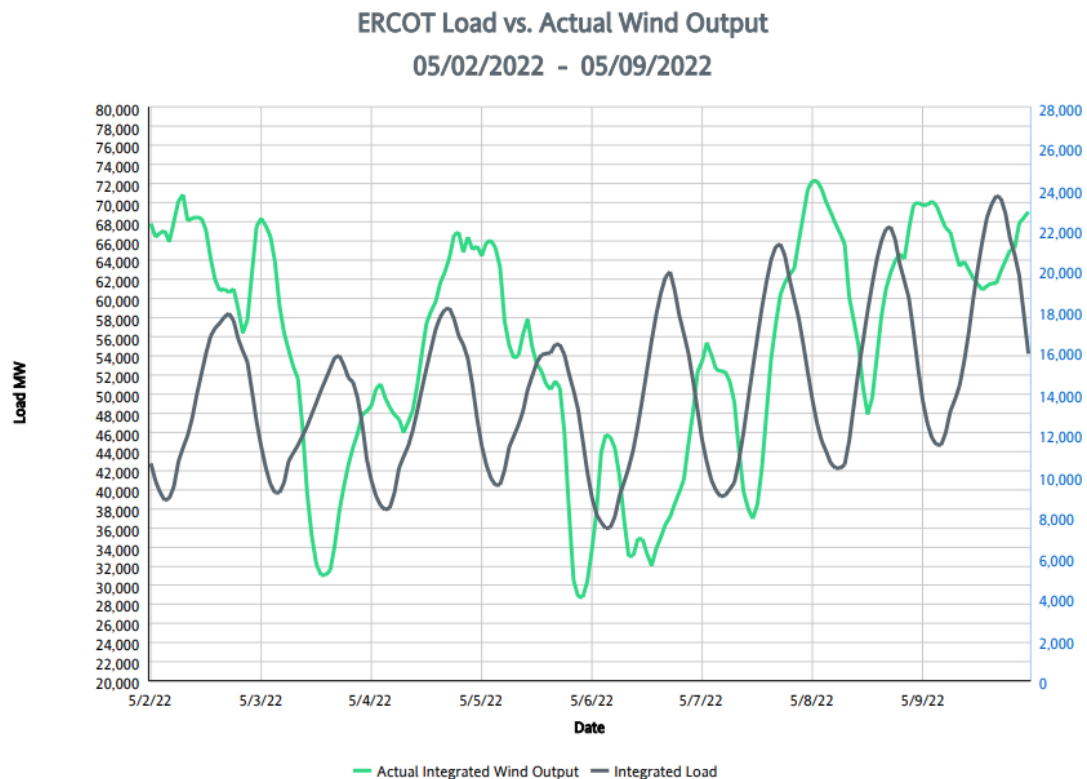


Ilustración 122: Demanda frente a generación eólica en el ERCOT

[ANA]

En Texas hay completa libertad de instalar parques eólicos en cualquier ubicación siempre y cuando la empresa y el propietario del terreno lleguen a un acuerdo. A los agricultores les viene bien tener instalaciones de molinos de viento en sus propiedades puesto que así se aseguran de recibir un alquiler en caso de que la cosecha sea mala.

Según estudios de la AWEA, en 2017 los agricultores recibieron hasta 60 millones de dólares por ceder sus terrenos para la construcción de aerogeneradores. [PRE21]

Además, para decidir qué tipo de energía conviene más en cada momento, ERCOT utiliza un algoritmo llamado SCED (Security Constrained Economic Dispatch). Este calcula la

mejor combinación para cada momento del día para tener las menores pérdidas posibles y el menor coste de distribución cubriendo toda la demanda.

Este algoritmo calcula en cada momento la manera más barata de distribuir la energía eléctrica requerida por los usuarios manteniendo una red eléctrica equilibrada. Para ello emplea diferentes métodos de investigación operativa como la programación lineal, la cuadrática y programación de flujos de red. En los cálculos se incluyen todas las limitaciones de la red, de los recursos y de la distribución. [ZHU15]

Se trata de uno de los métodos más clásicos y desde entonces ha habido muchos avances y nuevas tecnologías se han desarrollado. No obstante, Texas sigue apostando por este algoritmo.

Para finalizar, como último dato curioso, cabe destacar la existencia de la ciudad de Georgetown que desde 2015 se abastece al 100% de energías renovables. Además, la universidad de esta ciudad logró reducir en más de un 70% su huella de carbono en 2014 y en 2020 un 50% sus emisiones de gases de efecto invernadero. Esto se debe al hecho de que inyectan más energía eólica en la red de la que los usuarios necesitan consumir. [GEO]

Por ejemplo, en el año 2018 Georgetown consumió 678 MWh de los 822 generados con lo que la ciudad tejana se puede definir como 100% renovable. Si bien no usan energía renovable cada minuto del día, sí que generan más de la consumida por lo que se sigue considerando una ciudad de energía 100% renovables. Este es la manera que tiene el estado de Texas de medir el porcentaje de energía renovables de cada ciudad. [GEO20]

CONCLUSIONES Y PUNTOS DE LOS QUE DEBEMOS APRENDER:

- ➔ Se debe enseñar más en las universidades sobre la energía eólica e impulsar proyectos relacionados con parques eólicos que conciencien, enseñen a tratar casos reales y además fomenten la investigación

- ➔ La libre elección del usuario en cuanto al tipo de energía que quiere consumir crea un mercado competitivo muy beneficioso para las empresas eólicas que ayudará a impulsar su consumo
- ➔ Es importante tener una buena base de datos en la que guardar absolutamente todos los datos de consumo para su análisis y así mejorar nuestra red de distribución
- ➔ Debemos restringir al máximo los tiempos de espera y papeleos legales que sólo atrasan grandes proyectos del mundo de la eólica. Hemos visto que en Texas las empresas pactan con los terratenientes por su cuenta, fomentando así también la agricultura.
- ➔ La repotenciación es una técnica de gran utilidad que deberíamos aplicar más para incluir nuestras últimas innovaciones como las de las empresas mostradas en el capítulo 4.
- ➔ Tomar ejemplo del algoritmo texano SCED también sería muy útil para el mundo de la eólica en España

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras realizar varios ensayos y simulaciones podemos confirmar que hemos cumplido los objetivos de este trabajo.

Las simulaciones con el software COMSOL nos han permitido comprobar la mejor disposición de un generador tanto de los devanados como en cantidad de polos y el material del que debe estar hecho. Construir un generador con devanados distribuidos y varios polos es un cambio fácil de implementar en la cadena de producción que mejorará mucho nuestra eficiencia en la turbina. Además, usar materiales como el aluminio también será de gran beneficio y no tendrá ningún coste exagerado.

Por otro lado, el circuito que hemos montado que incluye los convertidores de puentes de diodo y el puente H tiene un alto rendimiento y es simple de instalar. Pese a las previas calibraciones que necesita hemos podido comprobar que su principal ventaja es el hecho de asegurarnos de que estamos inyectando una señal válida a la red. Su frecuencia es la adecuada, también su amplitud y, finalmente se encuentra en fase. Además, también hemos podido comprobar el alto rendimiento y que tenemos una gran flexibilidad a la hora de elegir los componentes como los MOSFETs. De esta forma según el objetivo y a qué le demos importancia en cada turbina el fabricante tendrá libre elección y, con ello, también se podrá ajustar el precio libremente. Además, se trata de modificaciones que son fáciles de instalar en turbinas antiguas y, en caso de tener algún fallo, estos serán detectables rápidamente y se podrán arreglar sin tener que parar la turbina durante mucho tiempo y sin hacer grandes obras.

Por otra parte, hemos podido ver que hay muchas pequeñas empresas trabajando en el sector que necesitan expandirse mundialmente. Las soluciones de muchas de ellas pueden ser muy beneficiosas para nuestros objetivos en el mundo de la energía eólica. También podría impulsar mucho la economía española.

La energía eólica está generando miles de puestos de trabajo y, es por ello también, que no debemos dejar de trabajar en ella.

Podemos por tanto confirmar, que estos cambios evitan el hecho de tener que fabricar molinos de viento más grandes que destruyan el medioambiente. Se cumple así, el objetivo número 15 (Ilustración 8:Tipos de estructura de un aerogenerador).

Además, al mejorar la potencia que nos puede ofrecer un aerogenerador estamos cumpliendo los objetivos número 7,11 y 13. No estamos hablando sólo a nivel técnico y eléctrico. Se trata también de implementar los algoritmos de mercado que hemos podido ver que funcionan a la perfección en Texas, así como su método de distribución, es decir, la libre elección a la hora de decidir de qué energía quieres consumir. Debemos potenciar el uso de energías renovables para lograr nuestros objetivos de la ‘Agenda 2030’ y todas estas soluciones son un gran paso para cumplirlo.

Podemos concluir con la certeza de que, aunque aquí sólo se presentan unos cuantos, hay muchos puntos de mejora en los que investigar y trabajar a fondo. Sólo nos encontramos al principio de la expansión de la energía eólica. Queda un largo camino por recorrer que nos traerá grandes ventajas y nos permitirá cuidar nuestro planeta.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO 1:

- [ONU15] Organización de las Naciones Unidas (ONU) “La Agenda para El Desarrollo Sostenible 2030” (ODS) <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>, 2015
- [VIL12] Villarubia López, Miguel “Ingeniería de la energía eólica, Nuevas Energías”, Spanish Edition, Facultad de Física-Universidad de Barcelona, 2012, Capítulos 1,6,7
- [EV20] EcologíaVerde, “¿Cómo funciona la energía eólica? + Tipos de Aerogeneradores”, <https://www.youtube.com/watch?v=rQ-3hSdJI-0>, junio 2020
- [IDAE] Insitituto para la Diversificación y Ahorro de la energía, <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/eolica>
- [MED19] Medina Cruz, Jesús, “Todo lo que debes saber sobre aerogeneradores” <https://aprende.com/blog/oficios/energia-eolica/todo-lo-que-debes-saber-sobre-aerogeneradores/>, Aprende Institute, Bogotá, octubre 2020
- [LLC19] Llenando la Cabeza, “Visita a un molino #eólico, #windturbine, #aerogenerador o como lo queráis llamar”, <https://www.youtube.com/watch?v=kXspw2uyJpo>, mayo 2019
- [CAB21] Cabrera Berríos, Jorge “Motor de Inducción de Jaula de Ardilla: Principio de funcionamiento y aplicaciones”, <https://telcom.jaol.net/motor-de-induccion-de-jaula-de-ardilla/>, Telcom Blog, 2021

- [EDI20] Edibon, “¿Qué significa DFIG?” <https://www.edibon.com/es/blog/como-funciona/que-significa-dfig>, enero 2020
- [MEN] Menna, ‘Cómo funciona un aerogenerador’, <https://como-funciona.co/un-aerogenerador/#:~:text=Como%20funciona%20un%20aerogenerador%3F%201%20El%20viento%20pasa,velocidad%20que%20las%20palas%20ofrecen.%20Mas%20cosas...%20>, ComoFunciona
- [SPI] “Qué es un motor de rotor bobinado”, <https://spiegato.com/es/que-es-un-motor-de-rotor-bobinado#:~:text=Durante%20el%20arranque%2C%20se%20aplica%20una%20resistencia%20variable,con%20alto%20deslizamiento%20y%20cargas%20de%20alta%20inercia>, Spiegato
- [AGR17] Agra Mallo, Fernando, ‘¿Cómo llega la energía eólica hasta nuestras casas?’, <http://www.laenergiadelcambio.com/energia-eolica-casas-electricidad-generacion/>, ABENGOA, marzo 2017
- [NAB18] ‘Energía eólica, ¿Cómo se produce y cómo se transporta?’, <https://nabaliaenergia.com/blog/energia-eolica-produccion-transporte/>, Nabalia, EnergíaViva, 2018
- CAPÍTULO 2:
- [REV22] Revista eólica y del vehículo eléctrico, <https://www.evwind.com>, REVE, 2022
- [ENE19] Energías Renovables, ‘La mayor parte de los aerogeneradores pueden seguir su operación tras expirar su período de vida útil’ <https://www.energias-renovables.com/eolica/la-mayor-parte-de-los-aerogeneradores-pueden-20190619>, junio 2019
- [WIN18] Windrock, <https://windrock.com/condition-monitoring/what-is-condition-monitoring/>, July 2018

- [INS] Instrumentación y Control, ‘Mejoras operativas en aerogeneradores con el uso de sensores donde vale la pena invertir’
<https://instrumentacionycontrol.es/mejoras-operativas-en-aerogeneradores-con-el-uso-de-sensores/>
- Instrumentación y Control,’ Dos sensores de alta precisión para aerogeneradores que ayudan a mejorar la operativa’,
<https://instrumentacionycontrol.es/sensores-de-alta-precision-para-aerogeneradores/#:~:text=2%29%20Los%20aceler%C3%B3metros%20son%20otro%20tipo%20de%20sensor,una%20monitorizaci%C3%B3n%20de%20frecuencia%20de%20los%20cojinetes%20rotativos.>
- [ENE20] Energías.Renovables, ‘Las palas de los nuevos aerogeneradores y los límites de la física’, <https://www.energias-renovables.com/eolica/las-palas-de-los-nuevos-aerogeneradores-y-20201022>, Octubre 2020
- [EUR20] Europapress, ‘Iberdrola instalará en su próximo parque eólico el aerogenerador terrestre más potente de España’,
<https://www.europapress.es/economia/energia-medio-ambiente-00183/noticia-iberdrola-instalara-proximo-parque-eolico-aerogenerador-terrestre-mas-potente-espana-20200210113206.html> ,Febrero 2020
- [GAR07] García Tejerina, Eugenio, ‘Los avances tecnológicos en los aerogeneradores hacen posible la instalación de un mayor número de parques eólicos’
<https://www.dicyt.com/viewNews.php?newsId=8337>, Salamanca, julio 2007
- [TWE19] Twenergy, ‘¿Qué son y cómo funcionan los aerogeneradores?,
<https://twenergy.com/energia/energia-eolica/aerogeneradores-que-son-y-como-funcionan-375/> , Marzo 2019
- [REE22] Red Eléctrica Española,
<https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/demandaqh/total>, junio 2022

[ACC17] Acciona, ‘Acciona pone en marcha la primera planta híbrida de almacenamiento de energía eólica con baterías en España’
https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/acciona-pone-marcha-primera-planta-hibrida-almacenamiento-energia-eolica-baterias-espana/?_adin=01833301559 , Mayo 2017

[CAR22] Carwow ‘ Los espectaculares avances en hidrógeno verde, ¿Dónde nos llevan?’ <https://www.youtube.com/watch?v=ULM1IsHOag8> , Febrero 2022

CAPÍTULO 4:

[MES21] Mesurex, <https://measurex.com/#> , Málaga 2021

[NAB14] <https://www.nabrawind.com/nabrawind-technologies-nbtech-starts-its-activity-for-advanced-wind-technologies-development/>, Pamplona, 2014

[MES19] Mesurex, ‘Sensores en aerogeneradores|Mesurex’,
<https://measurex.com/sensores-para-el-mantenimiento-de-aerogeneradores/> , 2019

[INS18] Instrumentación y Control, ‘Dos sensores de alta precisión para aerogeneradores que ayudan a mejorar su operativa’,
<https://instrumentacionycontrol.es/sensores-de-alta-precision-para-aerogeneradores/#:~:text=2%29%20Los%20aceler%C3%B3metros%20son%20otro%20tipo%20de%20sensor,una%20monitorizaci%C3%B3n%20de%20frecuencia%20de%20los%20cojinetes%20rotativos.>, 2018

[MES21] Mesurex, <https://measurex.com/product-category/productos/acelerometros/>,
[Málaga Techpark, 2021](#)

[NAB20I] Nabrawind, Proyecto Nabrajoint <https://www.nabrawind.com/nabrajoint/Navarra, 2020>

[NAB20II] Nabrawind, Proyecto Nabralift <https://www.nabrawind.com/nabralift/>

- [NAB20III] Nabrawind, Proyecto Nabrabase <https://www.nabrawind.com/nabrabase/>
- [RSE20] Compromiso RSE, ‘Covestro sustituye la resina epoxi por poliuretano en su pala para aerogeneradores’
<https://www.compromisorse.com/rse/2020/09/21/covestro-sustituye-la-resina-epoxi-por-poliuterano-en-su-pala-para-aerogeneradores-/,>
[Septiembre 2020](https://www.compromisorse.com/rse/2020/09/21/covestro-sustituye-la-resina-epoxi-por-poliuterano-en-su-pala-para-aerogeneradores-/,)
- [COV] Covestro, <https://www.covestro.com/en/company/covestro-worldwide/spain>
- CAPÍTULO 3:
- [COR20] Sígueme la corriente, ‘¿Cómo funcionan los aerogeneradores? Tipos, Componentes y Características’
<https://www.youtube.com/watch?v=MWuIVVYwRk8>, abril 2020
- [TEX14] Textos Científicos,
<http://www.textoscientificos.com/energia/eolica/generadores-de-corriente-alterna-sincronos>, julio 2014
- [FLY1] M. Flynn, “Air_Gap_MMf_And_Rotating_MMf_Waves”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 341: Electric Drives and Machines course, Spring Semester 2022, [Online]. Slide 7, Available:
<https://utexas.instructure.com/courses/1331682>
- [MET20] Metrar, ‘El aluminio y el cobre como conductores’,
<https://metrar.com.ar/blog/el-aluminio-y-el-cobre-como-conductores/#:~:text=Lo%20primero%20que%20debemos%20aclarar%20es%20que%2C%20en,cable%20pelado%20de%20cobre%2C%20con%20la%20misma%20resistencia.>, noviembre 2020
- [ELE] Elementos, <https://elementos.org.es/cobre-y-aluminio>

- [COM22] ‘Precio del aluminio vs precio del cobre’, https://tematicas.org/comparador-estadisticas/80392-80398_I2000_F2022/#grafica , Junio 2022
- [ROD08] Rodríguez Pozueta, Miguel Ángel, ‘Máquinas asíncronas’, Páginas 18-20
<https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/asincronas%20caminos.pdf#:~:text=En%20una%20m%C3%A1quina%20as%C3%ADncrona%20trif%C3%A1sica%20de%20jaula%20de,por%20cada%20fase%29%2C%20formando%20dos%20hileras%20de%20tres>. Universidad de Cantabria, 2008
- [SPA22] Spagnablog, ‘Generadores eléctricos- Guía de compra’,
<https://blog.agrieuro.es/generador-electrico-guia-de-compra/#:~:text=En%20general%2C%20se%20suele%20comprar%20un%20generador%20trif%C3%A1sico%2C,entregar%20m%C3%A1s%20de%201%2F3%20de%20la%20potencia%20total>, 2022
- [FLY2] Flynn, Mark “Project 6 –Concentrated and Distributed Windings”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 341: Electric Machines and Drives,
Spring Semester 2022, [Online] Available:
<https://utexas.instructure.com/courses/1331682>
- [FLY3] Flynn, Mark “Project 7 – MMF Distribution of a rotating Machine”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 341: Electric Machines and Drives,
Spring Semester 2022, [Online] Available:
<https://utexas.instructure.com/courses/1331682>
- [FLY4] Flynn, Mark “Project 8 – Torque of a Rotating Machine”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 341: Electric Machines and Drives, Spring Semester 2022, [Online] Available:
<https://utexas.instructure.com/courses/1331682>
- [FLY5] Flynn, Mark “Project 9 – Torque-Speed Curve of an Induction Machine”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 341: Electric Machines and

Drives, Spring Semester 2022, [Online] Available:

<https://utexas.instructure.com/courses/1331682>

Referencias para el DBR:

[FLY6] Flynn, Mark, “_Lecture_7_EE462L_Diode_Bridge_Rectifier”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slide 2 [Online]. Available <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>

[FLY7] Flynn, Mark, “_Lecture_7_EE462L_Diode_Bridge_Rectifier”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slide 16 [Online]. Available <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>

[FLY8] Flynn, Mark, “_Lecture_7_EE462L_Diode_Bridge_Rectifier”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slide 17 [Online]. Available <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>

[FLY9] Flynn, Mark “_Lecture_7_EE462L_Diode_Bridge_Rectifier”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slide 15,18 [Online]. Available <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>

[FLY10] Flynn, Mark “Lab_Week_3_EE462L_Capacitor_Filtered Diode Bridge Rectifier”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, [Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>

[Referencias para el H-Bridge:](#)

- [FLY11] Flynn, Mark, “Lab_Week_9_EE462L_PWM_Inverter_Control_Circuit_2022_3_28”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, [Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [FLY12] Flynn, Mark, “_Lecture_16_EE462L_H-Bridge_Inverter_Basics_Part_1”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slides 4. [Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [FLY13] Flynn, Mark, “_Lecture_16_EE462L_H-Bridge_Inverter_Basics_Part_2”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slides 10,11,12,13. [Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [FLY14] Flynn, Mark, “_Lecture_16_EE462L_Sinusoidal_Unipolar_PWM_Controller”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slides 3,12,27. [Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [FLY15] Flynn, Mark, “_Lecture_15_EE462L_H-Bridge_Basics_Part1”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slides 4,9,14. [Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [FLY16] Flynn, Mark, “_Lecture_16_EE462L_H-Bridge_Basics_Part2”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slides 5,7,13. [Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [FLY17] Flynn, Mark “_Lecture_17_EE462L_H-Bridge_PWM_Control_Circuit”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slides 7,9,17. [Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>

- [FLY18] Flynn, Mark “_Lecture_20_EE462L_H-Bridge_Power_Stage”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slides 11-26. [Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [FLY19] Flynn, Mark “_Lab_Week_11_H-BRidge_Power_stage”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>

Referencias a la unión con la red:

- [FLY20] Flynn, Mark, “Lab_Week_14_EE462L_Power_To_Grid_2021_7_6”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, [Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [FLY21] Flynn, Mark, “_Lecture_24_EE462L_H_Bridge_To_Power_Grid”, The University of Texas at Austin, Austin, TX, EE 462L: Power Electronics Laboratory course, Spring Semester 2022, slides 6,8,9,10,15[Online]. Available: <https://utexas.instructure.com/courses/1332430>
- [NAT19] Natalichio, Roberto, Ecoportal ‘¿Cómo mejorar el rendimiento de un aerogenerador?’, <https://www.ecoportal.net/temas-especiales/mejorar-rendimiento-aerogenerador/> Abril 2019

Hojas de detalle de los MOSFETs:

<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/rfp12n10l-d.pdf>

<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ntp5d0n15mc-d.pdf>

CAPÍTULO 5:

- [IRE] <https://www.irena.org/wind>
- [REN17] Energía Renovable, ‘Energía Eólica en 2016’,
<https://www.energiarenovable.net/la-energia-eolica-en-2016/#:~:text=Durante%202016%20se%20agregaron%2055%20GW%20de%20capacidad,habitante%20eran%20Dinamarca%2C%20Suecia%2C%20Alemania%2C%20Irlanda%20y%20Portugal.> , Octubre 2017
- [LUB22] Lubwa Leonard, ‘Construction Review Online’,
<https://es.constructionreviewonline.com/proyectos-m%C3%A1s-grandes/Los-10-parques-e%C3%B3licos-m%C3%A1s-grandes-del-mundo/> , mayo 2022
- [PRE21] Pressler, Mary, ‘A snapshot of the wind power Industry in Texas’,
<https://quickelectricity.com/texas-wind-power/> November 2021
- [ZHU15] Jizhong Zhu, ‘Security-Constrained Economic Dispatch’
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7046729> ,2015
- [ROC20] Roca Ramón,’ Todos los datos sobre la energía eólica en España: es el país de la UE que más potencia ‘onshore’ ha instalado en 2019’,
<https://elperiodicodelaenergia.com/todos-los-datos-sobre-la-energia-eolica-en-espana-es-el-pais-de-la-ue-que-mas-potencia-onshore-ha-instalado-en-2019/> , julio 2020
- [GEO] Georgetown University, <https://sustainability.georgetown.edu/carbon-footprint/>
- [GEO20] Georgetown, Texas, ‘Why is Georgetown 100 percent renewable’,
<https://georgetown.org/2019/02/22/why-georgetown-is-100-percent-renewable/> , febrero 2020

<https://www.ieee-pes.org/appendix-a-symbols-and-prefixes>

<https://www.ercot.com/gridinfo/generation>

[WET] <https://windexchange.energy.gov/states>

<https://eerscmap.usgs.gov/uswtdb/>

[EIA] <https://www.eia.gov/renewable/>

<https://americas.rwe.com/wind-power/wind-projects>

<https://personal.utdallas.edu/~metin/Merit/Folios/grid.pdf>

[ANA] <https://grid-analytics.ece.utexas.edu/chart/wind-and-pv>

[MAP] <https://eerscmap.usgs.gov/uswtdb/viewer/#4.85/32.67/-98.15>