



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO DISEÑO DE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE UN AEROGENERADOR MARINO

Autor: Sofía Yaqin Herrero Gómez-Tejedor

Director: Juan Antonio Talavera Martín

Madrid

Julio 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**DISEÑO DE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE UN  
AEROGENERADOR OFFSHORE**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2024/2025 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.: Sofía Yaqin Herrero Gómez-Tejedor

Fecha: 15 / 07 / 2025



Autorizada la entrega del proyecto

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO**



Fdo.: Juan Antonio Talavera Martín

Fecha: 20 / 07 / 2025



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO DISEÑO DE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE UN AEROGENERADOR MARINO

Autor: Sofía Yaqin Herrero Gómez-Tejedor

Director: Juan Antonio Talavera Martín

Madrid

Julio 2025

# DISEÑO DE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE UN AEROGENERADOR MARINO

**Autor:** Herrero Gómez-Tejedor, Sofía Yaqin.

**Director:** Talavera Martín, Juan Antonio.

**Entidad Colaboradora:** ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

La presente memoria aborda el diseño integral de los circuitos eléctricos de un aerogenerador marino de 5MW. El objetivo principal del trabajo es garantizar la evacuación eficiente de la potencia, la continuidad operativa y la seguridad de la turbina mediante la definición, selección y dimensionamiento de los equipos que componen los tres subsistemas: circuito de potencia, circuito de servicios auxiliares y sistema de control, además del cableado interno a 400V, 690V y el cableado de media tensión a 20kV hasta la subestación colectora.

**Palabras clave:** aerogenerador marino, turbina eólica, circuito de potencia, servicios auxiliares, sistema de control

### 1. Introducción

La energía eólica marina se perfila como un pilar clave para garantizar un suministro eléctrico sostenible y descarbonizado. La ubicación de los aerogeneradores lejos de la costa permite aprovechar vientos más constantes e intensos, pero también impone mayores exigencias técnicas y logísticas por la acción combinada del viento, el oleaje y la atmósfera salina. En específico, se selecciona la zona de Granadilla-Arico en Tenerife, Islas Canarias para ubicar el aerogenerador marino de este proyecto.

Entre los subsistemas críticos de una turbina offshore se encuentran los circuitos eléctricos encargados de evacuar la potencia a la red, alimentar los servicios auxiliares y coordinar el control de la máquina; su fiabilidad condiciona de forma directa los costes de operación y mantenimiento.

### 2. Definición del proyecto

La metodología se estructura en dos fases. En primer lugar, una fase colaborativa en la que, junto con otros compañeros, se desarrolla un prototipo de simulación en Bladed para fijar los parámetros globales de la turbina.

En segundo lugar, una fase individual donde se estudian los circuitos eléctricos del aerogenerador. Esta fase se puede dividir en tres grandes bloques: sistema de potencia, encargado de llevar la energía desde el generador hasta la red; servicios auxiliares, que suministran electricidad a los equipos internos de la turbina; y sistema de control, responsable de coordinar el funcionamiento seguro y eficiente de la máquina.

La selección de los equipos se realizó comparando catálogos de distintos fabricantes de referencia y aplicando las normas internacionales tales como IEC y de la guía GL

para instalaciones eólicas. De este modo se consiguió un diseño que combina fiabilidad técnica con un coste razonable.

### **3. Descripción del sistema**

El sistema eléctrico de potencia arranca en el generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) de baja velocidad, que entrega una salida trifásica a 690V. Esta energía se canaliza a un convertidor back-to-back del fabricante ABB que devuelve la señal con la frecuencia y tensión adecuadas para la red. Acto seguido, un transformador seco encapsulado de 0,69kV/20kV de Siemens con conexión Dyn11, eleva la tensión para el transporte en media tensión hasta la sala de celdas. Este tren de potencia se protege mediante una celda modular del fabricante ABB con interruptor en vacío, relés de sobrecorriente y descargadores contra sobretensiones, garantizando aislamientos seguros y respuesta ante fallos.

Paralelamente, el sistema de servicios auxiliares toma una derivación de la línea de 20kV y la reduce a 400V mediante un transformador auxiliar de Siemens. A la salida de este transformador se conecta un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) de Eaton que asegura el suministro a los equipos críticos incluso ante cortes momentáneos de la red principal. De esta forma, se mantiene el funcionamiento estable de todos los elementos auxiliares necesarios para la operación segura de la turbina.

El control global de la máquina recae en el Wind Turbine Controller (WTC), que supervisa permanentemente los distintos modos de operación y coordina la actuación de los subsistemas. Dentro de este, el sistema de paso variable emplea tres motores eléctricos WEG de 37kW con sus variadores de frecuencia de ABB para modificar el ángulo de las palas y regular la potencia extraída del viento. Por otra parte, el sistema de guiñada o yaw system dispone de seis motores de 5,5kW, también con variadores; ambos proporcionados por el fabricante WEG, encargados de alinear la góndola con la dirección del viento, maximizando así la producción.

Finalmente, todo el tendido de cables —incluyendo baja tensión (690V), tensión auxiliar (400V) y media tensión (20kV)— se ha dimensionado según la normativa UNE-IEC (REBT y RLAT). Se han calculado cuidadosamente las secciones y aislamientos de cada línea en función de las corrientes nominales y las temperaturas de funcionamiento, garantizando la fiabilidad y la vida útil de la instalación bajo las exigentes condiciones offshore. En particular, se eligen los fabricantes Prysmian Group y Top Cable para el cableado.

### **4. Resultados**

A continuación, se expone en la Figura 1 el esquema de diseño elaborado a lo largo del proyecto para los tres sistemas que componen el aerogenerador.

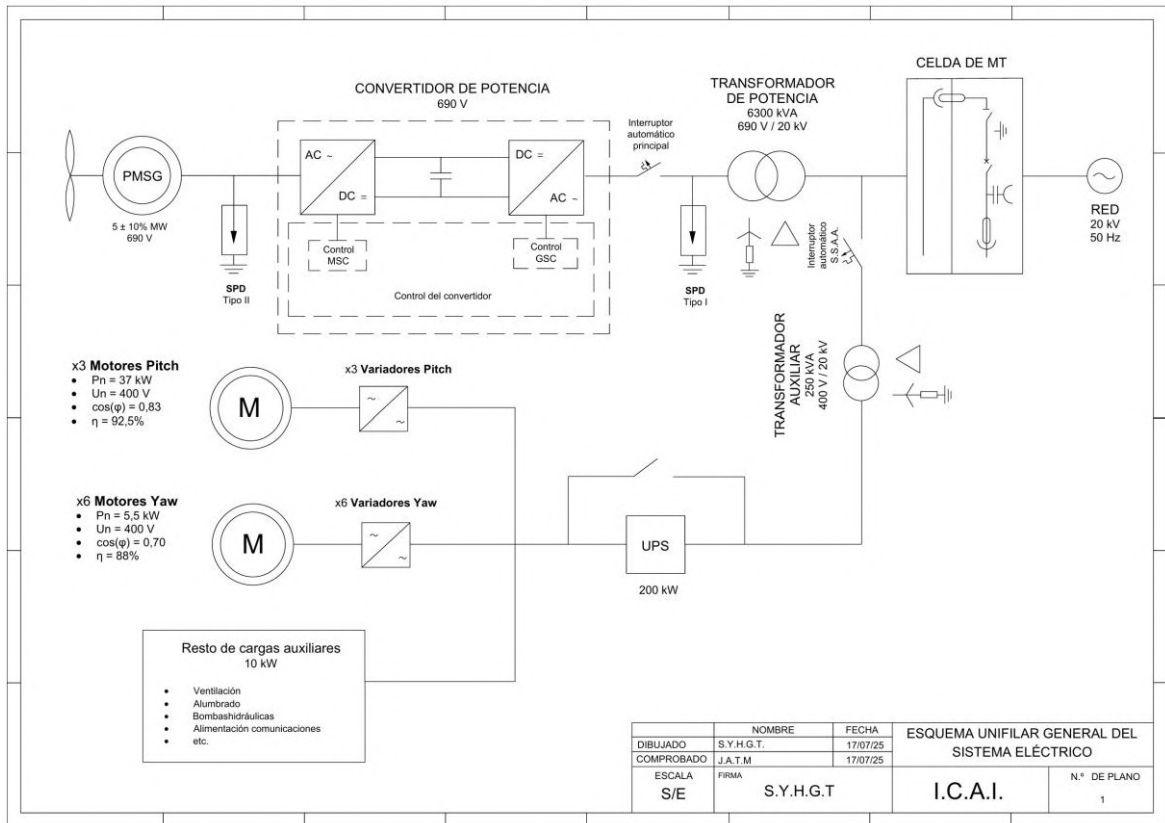


Figura 1 – Circuitos eléctricos del aerogenerador marino

## 5. Conclusiones

Este proyecto ha permitido comprender en profundidad el diseño y la integración de los circuitos eléctricos de un aerogenerador offshore de 5MW, desde la evacuación de potencia hasta el control de la máquina. La definición de los tres subsistemas – potencia, auxiliares y control– y el dimensionamiento detallado de cada componente garantizan una evacuación fiable, la continuidad de los servicios internos y una gestión segura de los modos de operación.

La aplicación de las normas IEC y las guías GL, junto con la comparación de ofertas de fabricantes de referencia, ha resultado decisiva para alcanzar un diseño equilibrado en términos de coste, tamaño y fiabilidad.

En conjunto, la solución propuesta cumple los requisitos técnicos y normativos del entorno offshore, minimiza pérdidas y tiempos de parada, y sienta las bases para una instalación robusta y económicamente viable, contribuyendo al desarrollo sostenible de la energía eólica marina.

# DESIGN OF THE ELECTRICAL CIRCUITS FOR AN OFFSHORE WIND TURBINE

**Author: Herrero Gómez-Tejedor, Sofía Yaqin.**

Supervisor: Talavera Martín, Juan Antonio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas)

## ABSTRACT

This thesis presents the comprehensive design of the electrical circuits for a 5MW offshore wind turbine. The main objective is to ensure efficient power export, continuous operation, and turbine safety through the definition, selection, and sizing of the equipment comprising the three subsystems: power circuit, auxiliary services circuit, and control system, as well as the internal wiring at 400V, 690V and the medium voltage wiring at 20kV up to the collector substation.

**Keywords:** offshore wind turbine, wind turbine, power circuit, auxiliary services, control system

## 1. Introduction

Offshore wind energy is emerging as a key pillar for securing a sustainable, decarbonized electricity supply. Placing turbines far from the coast allows for harnessing more consistent and stronger winds, but also imposes greater technical and logistical demands due to the combined action of wind, waves, and the marine environment. Specifically, the Granadilla–Arico area in Tenerife, Canary Islands, was chosen as the reference location for the offshore turbine in this project.

Among the critical subsystems of an offshore turbine are the electrical circuits responsible for exporting power to the grid, supplying auxiliary services, and coordinating the machine's control; their reliability directly affects operation and maintenance costs.

## 2. Project definition

The methodology is organized in two phases. First, a collaborative phase in which, together with other team members, a simulation prototype is developed in Bladed to establish the turbine's global parameters.

In the second phase, an individual study of the turbine's electrical circuits is carried out. This phase can be divided into three main blocks: the power system, responsible for transferring energy from the generator to the grid; the auxiliary services system, which supplies electricity to the turbine's internal equipment; and the control system, which coordinates the safe and efficient operation of the machine.

Equipment selection was performed by comparing catalogs from leading manufacturers and applying international standards such as IEC and the GL

guidelines for wind installations. This approach achieved a design that balances technical reliability with reasonable cost.

### **3. System description**

The power circuit begins at the low-speed permanent-magnet synchronous generator (PMSG), which delivers a three-phase output at 690V. This energy is routed through an ABB back-to-back converter that adjusts the voltage and frequency to grid requirements. Next, a Siemens dry-type encapsulated transformer, 0.69kV/20kV with Dyn11 connection, steps up the voltage for medium-voltage transmission to the switchgear room. This power train is protected by an ABB modular medium-voltage cell with a vacuum circuit breaker, overcurrent relays, and surge arresters, ensuring safe insulation and fault response.

In parallel, the auxiliary services system taps off from the 20kV line and steps it down to 400V using a Siemens auxiliary transformer. An Eaton Uninterruptible Power Supply (UPS) is connected to the transformer output to guarantee critical equipment power even during brief grid outages. In this way, stable operation of all internal auxiliary elements necessary for safe turbine operation is maintained.

Overall machine control is managed by the Wind Turbine Controller (WTC), which continuously monitors operating modes and coordinates subsystem actions. Within this controller, the variable-pitch system uses three WEG 37kW electric motors with ABB frequency drives to adjust blade angles and regulate the power captured from the wind. The yaw system, in turn, employs six 5.5kW motors—also with WEG-supplied drives—to align the nacelle with the wind direction, thus maximizing production.

Finally, all cabling—including low voltage (690V), auxiliary voltage (400V), and medium voltage (20kV)—has been sized according to UNE-IEC standards (REBT and RLAT). Conductor cross-sections and insulation were carefully calculated based on nominal currents and operating temperatures, ensuring the reliability and service life of the installation under demanding offshore conditions. In particular, Prysmian Group and Top Cable have been selected for the cabling.

## 4. Results

The design scheme developed throughout the project for the three systems that make up the wind turbine is shown in Figure 1.

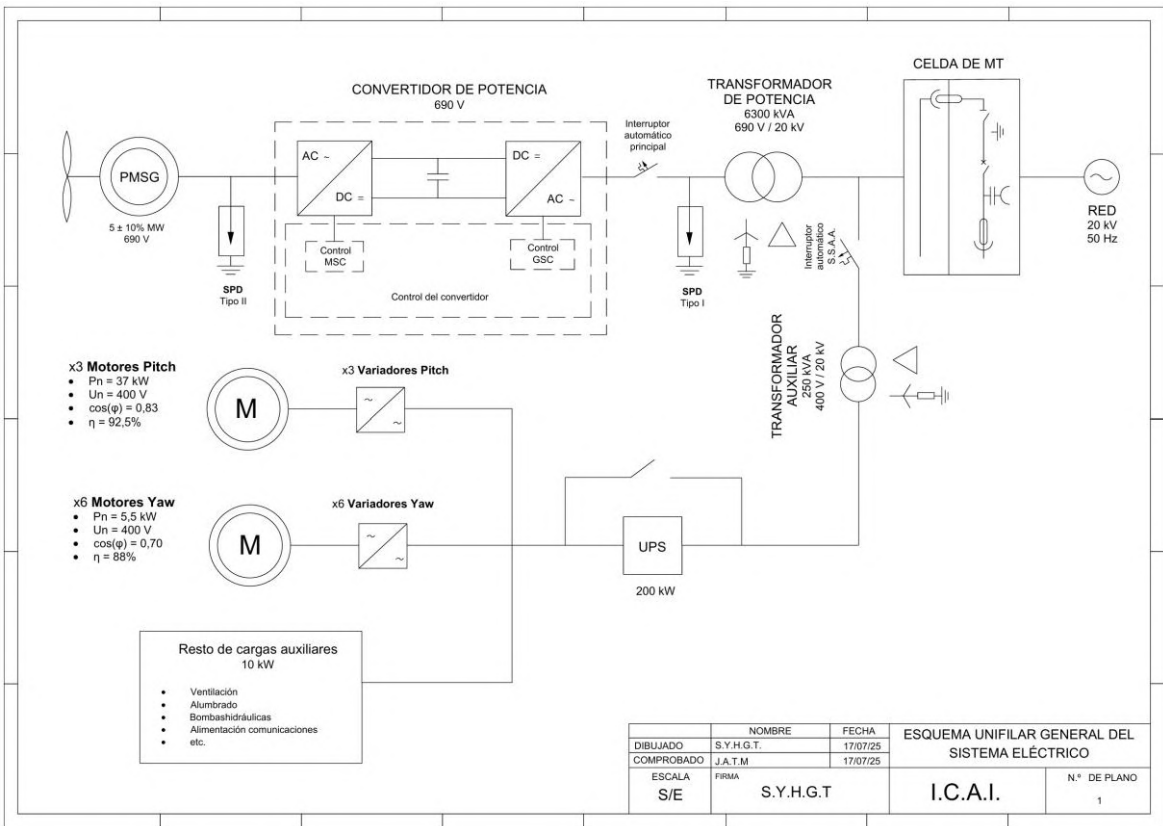


Figure 1 – Electrical circuits of the offshore wind turbine

## 5. Conclusions

This project has provided a deep understanding of the design and integration of the electrical circuits for a 5MW offshore wind turbine, from power export to machine control. Defining the three subsystems—power, auxiliary services, and control—and detailing the sizing of each component ensures reliable power delivery, uninterrupted auxiliary services, and safe operation modes.

Applying IEC standards and GL guidelines, together with comparing offerings from leading manufacturers, was crucial to achieve a balanced design in terms of cost, size, and reliability.

Overall, the proposed solution meets the technical and regulatory requirements of the offshore environment, minimizes losses and downtime, and lays the foundation for a robust, economically viable installation, contributing to the sustainable development of offshore wind energy.

# Agradecimientos

A mis padres, por su apoyo constante y por facilitarme siempre los medios para seguir adelante. A mis amigos, por su compañía en las largas jornadas de trabajo y por hacer más llevadero este proceso. Gracias a todos por ayudarme a completar este proyecto.

# Índice general

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                                     | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación . . . . .                                                  | 1         |
| 1.2. Justificación . . . . .                                               | 3         |
| 1.3. Objetivos . . . . .                                                   | 5         |
| 1.4. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) . . . . . | 5         |
| 1.5. Desarrollo y metodología del trabajo . . . . .                        | 6         |
| 1.6. Selección del emplazamiento . . . . .                                 | 6         |
| <b>2. Descripción de las tecnologías</b>                                   | <b>8</b>  |
| 2.1. Clasificación de las turbinas . . . . .                               | 8         |
| 2.1.1. Eje del rotor . . . . .                                             | 8         |
| 2.1.2. Velocidad de rotor . . . . .                                        | 10        |
| 2.2. Principios aerodinámicos del aerogenerador . . . . .                  | 11        |
| 2.2.1. Aproximación del coeficiente de potencia . . . . .                  | 12        |
| 2.3. Estado del arte . . . . .                                             | 13        |
| <b>3. Desarrollo del prototipo de simulación</b>                           | <b>14</b> |
| 3.1. Palas y perfil aerodinámico . . . . .                                 | 14        |
| 3.2. Rotor y buje . . . . .                                                | 15        |
| 3.3. Góndola y torre . . . . .                                             | 18        |
| 3.4. Tren de potencia . . . . .                                            | 18        |
| <b>4. Circuito de Potencia</b>                                             | <b>21</b> |
| 4.1. Generador . . . . .                                                   | 21        |
| 4.2. Convertidor . . . . .                                                 | 23        |
| 4.2.1. Convertidor del lado de máquina - MSC . . . . .                     | 26        |
| 4.2.2. Convertidor del lado de la red - GSC . . . . .                      | 27        |
| 4.2.3. Bus de continua . . . . .                                           | 28        |

|           |                                                        |           |
|-----------|--------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.4.    | Filtro de red . . . . .                                | 28        |
| 4.2.5.    | Convertidor seleccionado . . . . .                     | 29        |
| 4.3.      | Transformador de potencia . . . . .                    | 31        |
| 4.3.1.    | Tipos de transformadores . . . . .                     | 31        |
| 4.3.2.    | Conexión . . . . .                                     | 33        |
| 4.3.3.    | Ubicación . . . . .                                    | 34        |
| 4.3.4.    | Transformador seleccionado . . . . .                   | 34        |
| 4.4.      | Celda de media tensión . . . . .                       | 36        |
| 4.4.1.    | Equipos de maniobra y seccionamiento . . . . .         | 36        |
| 4.4.2.    | Disposición y configuración . . . . .                  | 39        |
| 4.4.3.    | Protecciones eléctricas - Relés . . . . .              | 42        |
| 4.4.4.    | Celda seleccionada . . . . .                           | 49        |
| 4.5.      | Protección contra sobretensiones . . . . .             | 51        |
| 4.5.1.    | Sistema LPS exterior . . . . .                         | 52        |
| 4.5.2.    | Sistema LPS interior . . . . .                         | 53        |
| 4.5.3.    | SPDs seleccionados . . . . .                           | 55        |
| <b>5.</b> | <b>Circuito de Auxiliares y Sistema de control</b>     | <b>58</b> |
| 5.1.      | Sistema de control . . . . .                           | 58        |
| 5.1.1.    | Modos de operación . . . . .                           | 59        |
| 5.1.2.    | Control de lazo cerrado . . . . .                      | 60        |
| 5.1.3.    | Control de orientación . . . . .                       | 61        |
| 5.1.4.    | Control de paso . . . . .                              | 63        |
| 5.2.      | Sistema de auxiliares . . . . .                        | 65        |
| 5.2.1.    | Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) . . . . . | 65        |
| 5.2.2.    | Transformador de servicios auxiliares . . . . .        | 66        |
| 5.2.3.    | Protecciones de los auxiliares . . . . .               | 68        |
| <b>6.</b> | <b>Cableado</b>                                        | <b>70</b> |
| 6.1.      | Normativa . . . . .                                    | 71        |
| 6.1.1.    | Baja tensión . . . . .                                 | 71        |
| 6.1.2.    | Alta tensión . . . . .                                 | 73        |
| 6.2.      | Cableado del circuito de potencia, 690 V . . . . .     | 73        |
| 6.3.      | Cableado de media tensión 20 kV . . . . .              | 76        |
| 6.4.      | Cableado de auxiliares 400 V . . . . .                 | 77        |
| <b>7.</b> | <b>Conclusión</b>                                      | <b>79</b> |

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| <b>Appendix</b>                                       | <b>81</b>  |
| <b>A. Plano de los circuitos eléctricos</b>           | <b>81</b>  |
| <b>B. Especificaciones preliminares</b>               | <b>84</b>  |
| <b>C. Catálogos</b>                                   | <b>88</b>  |
| C.1. Convertidor de potencia . . . . .                | 89         |
| C.2. Transformador de potencia . . . . .              | 91         |
| C.3. Celda de Media Tensión . . . . .                 | 93         |
| C.4. SPDs . . . . .                                   | 94         |
| C.4.1. Tipo 1 . . . . .                               | 94         |
| C.4.2. Tipo 2 . . . . .                               | 95         |
| C.5. Sistema de guiñada . . . . .                     | 96         |
| C.5.1. Motores de guiñada . . . . .                   | 96         |
| C.5.2. Variadores de guiñada . . . . .                | 97         |
| C.6. Sistema de paso . . . . .                        | 98         |
| C.6.1. Motores de paso . . . . .                      | 98         |
| C.6.2. Variadores de paso . . . . .                   | 99         |
| C.7. Sistema de Alimentación Ininterrumpida . . . . . | 100        |
| C.8. Transformador de auxiliares . . . . .            | 100        |
| C.9. Cableado . . . . .                               | 101        |
| C.9.1. Cableado de potencia, 690V . . . . .           | 101        |
| C.9.2. Cableado de media tensión, 20kV . . . . .      | 102        |
| C.9.3. Cableado de auxiliares, 400V . . . . .         | 103        |
| <b>D. Tablas de REBT</b>                              | <b>104</b> |
| <b>Bibliografía</b>                                   | <b>106</b> |

# Índice de figuras

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Evolución de las turbinas eólicas [2] . . . . .                                                             | 1  |
| 1.2. Evolución de la capacidad $GW$ eólica instalada [4] . . . . .                                               | 2  |
| 1.3. Crecimiento de potencia offshore [4] . . . . .                                                              | 3  |
| 1.4. Potencia total offshore instalada en 2023 [4] . . . . .                                                     | 3  |
| 1.5. Evolución y proyección del LCOE para turbinas onshore y offshore [6] . .                                    | 4  |
| 2.1. VAWT (izquierda) vs. HAWT (derecha), [7] . . . . .                                                          | 8  |
| 2.2. $C_P$ de HAWT y VAWT [8] . . . . .                                                                          | 9  |
| 2.3. Extracción de energía de una turbina eólica [7] . . . . .                                                   | 11 |
| 2.4. Distribución de velocidades a lo largo de la pala [9] p.87 . . . . .                                        | 13 |
| 3.1. Distribución de perfiles aerodinámicos a lo largo de la pala . . . . .                                      | 15 |
| 3.2. Distribución de la cuerda a lo largo de la pala . . . . .                                                   | 15 |
| 3.3. Ventana del rotor en Bladed . . . . .                                                                       | 16 |
| 3.4. Ventana del buje en Bladed . . . . .                                                                        | 17 |
| 3.5. Ventana del tren de potencia, transmisión en Bladed . . . . .                                               | 19 |
| 3.6. Ventana del tren de potencia, pérdidas en Bladed . . . . .                                                  | 20 |
| 4.1. Esquema de un convertidor BTB para PMSG, [10] . . . . .                                                     | 23 |
| 4.2. Convertidores BTB según su topología, <i>elaboración propia</i> . . . . .                                   | 24 |
| 4.3. Topología de dos niveles con seis interruptores [14] . . . . .                                              | 26 |
| 4.4. Zonas de control del aerogenerador [16] . . . . .                                                           | 27 |
| 4.5. Filtro LCL . . . . .                                                                                        | 29 |
| 4.6. Conexión transformador de potencia con neutro accesible . . . . .                                           | 33 |
| 4.7. Vista del transformador encapsulado. . . . .                                                                | 35 |
| 4.8. Disparo térmico-magnético de un breaker trifásico, <i>diapositivas ULiège</i><br><i>ENERG0002</i> . . . . . | 37 |
| 4.9. Topologías de conexión en sistemas de generación distribuida [22] . . . . .                                 | 41 |

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.10. Esquema básico de protección diferencial [23]. . . . .                                                                                                                                        | 43  |
| 4.11. Pendiente característica del relé diferencial porcentual [24]. . . . .                                                                                                                        | 44  |
| 4.12. Características del relé de tiempo inverso [23]. . . . .                                                                                                                                      | 46  |
| 4.13. Curva de coordinación para los relés de sobrecorriente [23]. . . . .                                                                                                                          | 47  |
| 4.14. Secuencia positiva. Rotación de fase en sentido antihorario [23] . . . . .                                                                                                                    | 48  |
| 4.15. Secuencia negativa. Rotación de fase en sentido antihorario [23] . . . . .                                                                                                                    | 48  |
| 4.16. Módulo V de SafePlus 24 kV [26]. . . . .                                                                                                                                                      | 50  |
| 4.17. LPS típico en una turbina eólica [27]. . . . .                                                                                                                                                | 51  |
| 4.18. LPZ típico en la góndola [30]. . . . .                                                                                                                                                        | 53  |
| 4.19. LPZ recomendados por el fabricante <i>DEHN</i> [31]. . . . .                                                                                                                                  | 55  |
| 4.20. DBM 1 440 FM . . . . .                                                                                                                                                                        | 57  |
| 4.21. DG M WE 600 FM . . . . .                                                                                                                                                                      | 57  |
| 5.1. Esquema simplificado del sistema de control y seguridad de una turbina,<br><i>adaptado de [32]</i> . . . . .                                                                                   | 59  |
| 5.2. Zonas de operación [] . . . . .                                                                                                                                                                | 60  |
| 5.3. W22 132 M/L 6 IE3 . . . . .                                                                                                                                                                    | 62  |
| 5.4. W22 IE4 Trifásico . . . . .                                                                                                                                                                    | 64  |
| 5.5. Características generales del Eaton 9PHD Marine . . . . .                                                                                                                                      | 66  |
| 5.6. Eaton 9PHD Marine 200 kW . . . . .                                                                                                                                                             | 66  |
| 6.1. Cableado de un parque eólico [2] . . . . .                                                                                                                                                     | 71  |
| D.1. Cables aislados con aislamiento seco; temperatura máxima, en °C, asigna-<br>da al conductor. . . . .                                                                                           | 104 |
| D.2. Intensidad máxima admisible, en amperios, en servicio permanente para<br>cables con conductores de cobre en instalación al aire en galerías ventiladas<br>(temperatura ambiente 40°C). . . . . | 104 |
| D.3. Coeficiente de corrección F para temperatura ambiente distinta de 40 °C. . . . .                                                                                                               | 105 |
| D.4. Factor de correccion para agrupaciones de cables unipolares al aire. . . . .                                                                                                                   | 105 |

# Índice de cuadros

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Parámetros del rotor calculados por el autor . . . . .                      | 16 |
| 3.2. Parámetros del buje y generador calculados por el autor . . . . .           | 17 |
| 4.1. Datos principales del generador PMSG . . . . .                              | 22 |
| 4.2. Características del convertidor ABB ACS880-87LC-6604A/6144A-7 . . . .       | 30 |
| 4.3. Datos técnicos del transformador GEAFOL de tipo seco encapsulado. . . .     | 35 |
| 4.4. Características de la celda SafePlus 24 kV – V-module . . . . .             | 50 |
| 4.5. Clase de SPD según la frontera LPZ . . . . .                                | 55 |
| 4.6. Características generales del SPD Tipo 1 . . . . .                          | 57 |
| 4.7. Características generales del SPD Tipo 2 . . . . .                          | 57 |
| 5.1. Características del motor seleccionado para el sistema de guiñada . . . . . | 62 |
| 5.2. Características generales del variador CFW500 G2 . . . . .                  | 63 |
| 5.3. Características del motor WEG W22 IE4 37 kW B34T . . . . .                  | 64 |
| 5.4. Características generales del variador ACS580-01-073A-4 . . . . .           | 65 |
| 5.5. Datos técnicos del transformador GEAFOL NEO 4GB5464-3F. . . . .             | 68 |
| 6.1. Datos técnicos del Flextrex Max H07RN-F/DN-F. . . . .                       | 75 |
| 6.2. Datos técnicos del X-VOLT RHZ1 Cu/OL/20L. . . . .                           | 77 |
| 6.3. Datos técnicos del Afumex Class ATEX RZ1MZ1-K. . . . .                      | 78 |



# Acrónimos

|             |                                        |
|-------------|----------------------------------------|
| <i>LCOE</i> | Levelized Cost of Energy               |
| <i>AEP</i>  | Annual Energy Production               |
| <i>ODS</i>  | Objetivos de Desarrollo Sostenible     |
| <i>VAWT</i> | Vertical Axis Wind Turbine             |
| <i>HAWT</i> | Horizontal Axis Wind Turbine           |
| <i>PMSG</i> | Permanent Magnet Synchronous Generator |
| <i>DFIG</i> | Doubly-Fed Induction Generator         |
| <i>SCIG</i> | Squirrel Cage Induction Generator      |
| <i>TSR</i>  | Tip Speed Ratio                        |
| <i>MPPT</i> | Maximum Power Point Tracking           |
| <i>BTB</i>  | Back to Back                           |
| <i>WECS</i> | Wind Energy Control System             |
| <i>VSC</i>  | Voltage Source Converter               |
| <i>CSC</i>  | Current Source Converter               |
| <i>FOC</i>  | Field Oriented Control                 |
| <i>DTC</i>  | Direct Torque Control                  |
| <i>THC</i>  | Total Harmony Distortion               |
| <i>PWM</i>  | Pulse Width Modulation                 |
| <i>IGBT</i> | Insulated Gate Bipolar Transistor      |
| <i>MSC</i>  | Machine Side Converter                 |
| <i>GSC</i>  | Grid Side Converter                    |
| <i>CC</i>   | Corriente Continua                     |
| <i>CA</i>   | Corriente Alterna                      |
| <i>BT</i>   | Baja Tensión                           |
| <i>MT</i>   | Media Tensión                          |
| <i>AT</i>   | Alta Tensión                           |
| <i>ANSI</i> | American National Standards Institute  |
| <i>LPS</i>  | Lightning Protection System            |

|              |                                             |
|--------------|---------------------------------------------|
| <i>LPZ</i>   | Lightning Protection Zone                   |
| <i>LPL</i>   | Lightning Protection Level                  |
| <i>SDP</i>   | Surge Protection Devices                    |
| <i>WTC</i>   | Wind Turbine Controller                     |
| <i>LiDAR</i> | Light Detection And Ranging                 |
| <i>SAI</i>   | Sistema de Alimentación Ininterrumpida      |
| <i>REBT</i>  | Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión |

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

La transición hacia un modelo energético más sostenible está impulsando el desarrollo y adopción de energías renovables. Entre ellas, la energía eólica se ha posicionado como un pilar fundamental, con la instalación de  $117\text{ GW}$  en 2024 [1]. Este sector ha sufrido una fuerte evolución tecnológica desde sus orígenes. El siglo XIX vio la entrada de turbinas eólicas de hasta  $12\text{ kW}$ , llegando a capacidades de  $1\text{ MW}$  a mediados de la década de los 90. Es en recientes años que se ha conseguido sobrepasar capacidades de  $10\text{ MW}$ , donde en 2025 se están instalando turbinas de hasta  $15\text{ MW}$ . Como se puede observar en la Figura 1.2, el crecimiento en capacidad está ligado a las dimensiones de las turbinas. El mayor diámetro del rotor y mayor diámetro de las palas ha permitido una mayor captura del viento así como un mayor rendimiento, resultando por tanto en una mayor generación.

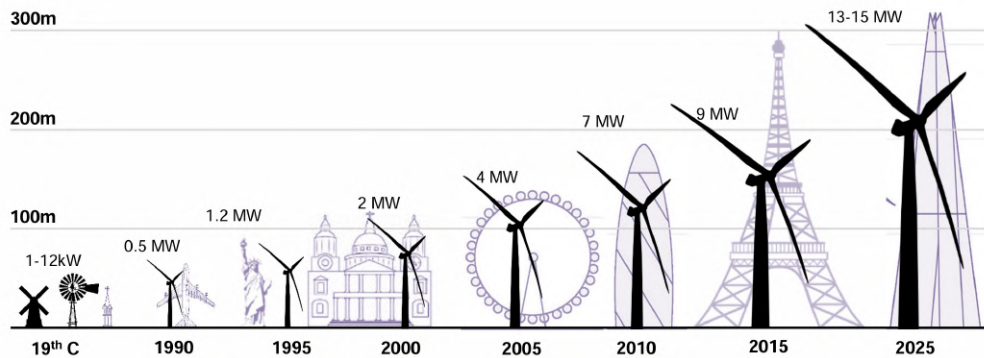


Figura 1.1: Evolución de las turbinas eólicas [2]

En un contexto donde la velocidad del viento es una variable crítica en la potencia generada, los vientos más fuertes y constantes de los que se benefician los parques eólicos marinos, hacen que estos destaquen frente a sus equivalentes terrestres. En específico, la Comisión de la Unión Europea ha fijado el objetivo de 300 GW de capacidad eólica marina para 2050 [3]. A pesar de aprovecharse de fuertes ráfagas de viento, los entornos marítimos presentan considerables desafíos tales como condiciones climáticas adversas, exposición a la corrosión y compleja manutención que ponen en riesgo la operatividad de los estos parques. Este entorno, por tanto, exige una operación segura, eficiente y continua, donde los sistemas eléctricos son esenciales para garantizar un correcto funcionamiento.

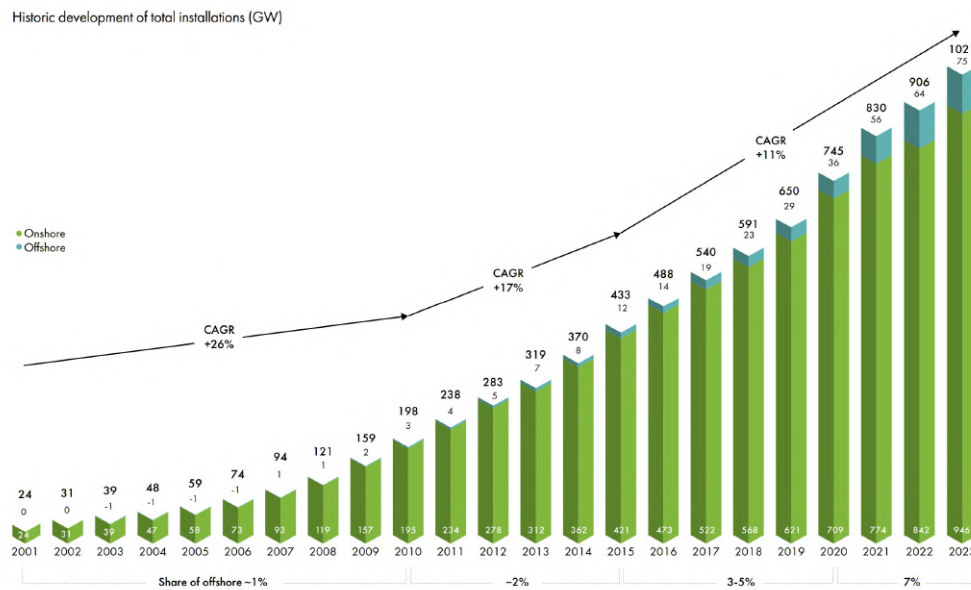


Figura 1.2: Evolución de la capacidad GW eólica instalada [4]

En aerogeneradores marinos, los circuitos eléctricos desempeñan un papel clave en la continuidad operativa y segura de todos los subsistemas. Estos incluyen tanto los circuitos de potencia como los auxiliares, responsables de mantener la funcionalidad de los sistemas críticos antes condiciones adversas.

Este proyecto, además de analizar las tecnologías actuales y los desafíos asociados a la operación en entornos marinos, se centra en la optimización, diseño y funcionamiento de los sistemas eléctricos de un aerogenerador marino. Se enfoca principalmente en los sistemas eléctricos de potencia, auxiliares y de control.

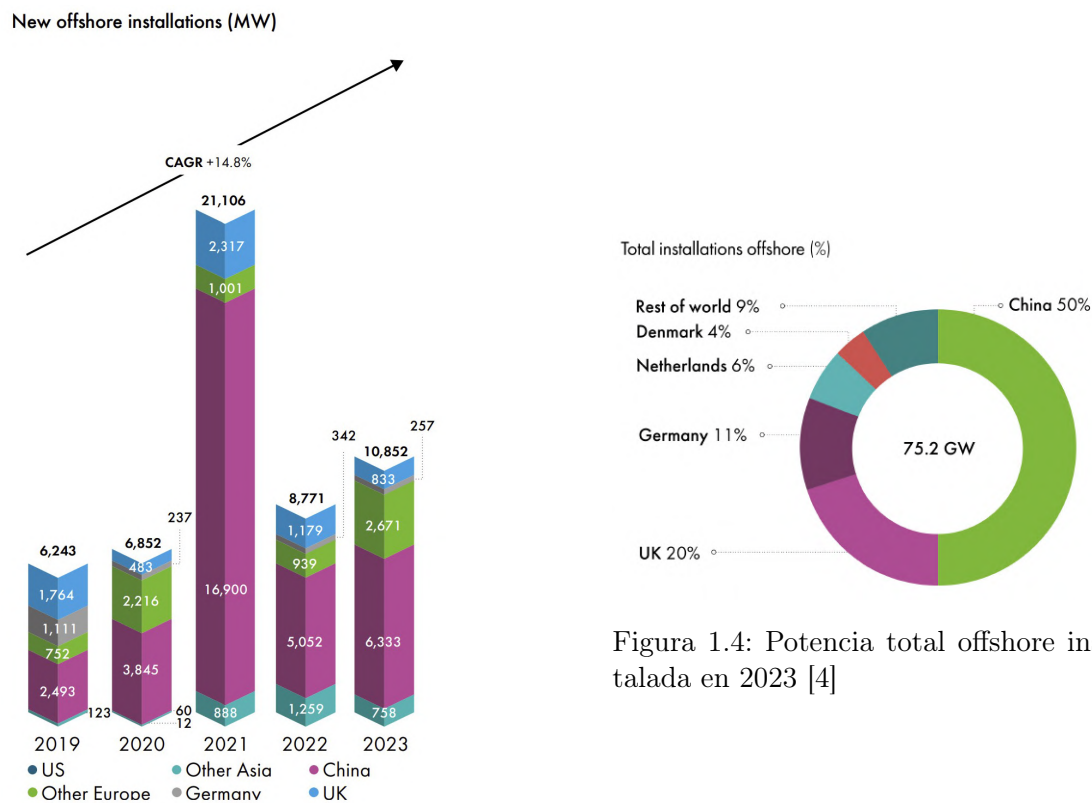


Figura 1.3: Crecimiento de potencia offshore [4]

## 1.2. Justificación

Tanto los aerogeneradores en entornos terrestres como en entornos marinos asumen altos costes asociados a los costes de capital inicial invertido (CapEx) como costes asociados a la operación y al mantenimiento (OpEx). No obstante, los parques offshore incurren mayores costes relacionados con las complicaciones adicionales que sufren debido a sus emplazamientos. Esto hace que los aerogeneradores offshore incurran un mayor costo nivelado de la energía (LCOE), dado por la ecuación 1.1, donde el AEP (Annual Energy Production) representa la producción anual de energía. El incremento del LCOE en entornos marinos respecto a entornos terrestres se ve reflejado en la Figura 1.5, donde además de observarse una brecha entre ambos costes, se puede ver que se estima que el LCOE baje en un futuro, con la entrada de nuevas tecnologías que optimicen el rendimiento de las turbinas eólicas.

Al ser una inversión de capital, el CapEx se incurre una sola vez en la vida útil del parque eólico, amortizándose a medida que estos entran en operación. Por otro lado, los OpEx son costes que se asumen a lo largo de la vida útil del parque, por lo que paulatinamente dominan el LCOE. Por esta razón, se suele buscar la optimización del LCOE a través de la reducción de estos. De entre ellos, destacan los asociados a la operatividad y mantenimiento (O&M) de las turbinas, que constituyen alrededor de un 60 % de los OpEx, suponiendo aproximadamente el 30 % del LCOE [5].

$$\text{LCOE} = \frac{\text{CAPEX} + \text{OPEX}_{\text{vida til}}}{\text{AEP}_{\text{vida til}}} \quad (1.1)$$

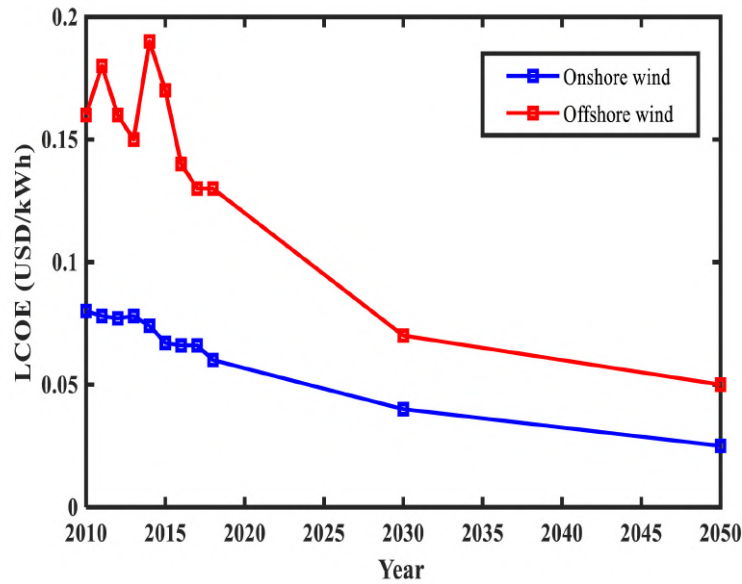


Figura 1.5: Evolución y proyección del LCOE para turbinas onshore y offshore [6]

Como ya se ha mencionado, el contexto marino supone costes adicionales en el mantenimiento, cuya logística es compleja y en ocasiones puede verse retrasada por las adversas condiciones ambientales. Esto no solo aumenta los perjuicios a los componentes de la turbina, sino que reduce la productividad de esta, ya que su tiempo de inactividad se ve prolongado. En específico, los fallos eléctricos y de control se destacan como una causa relevante de paradas no planificadas, por lo que el diseño robusto de los circuitos eléctricos y de protección son fundamentales para proteger los equipos, minimizar inactividad y maximizar las horas útiles de generación.

Es por ello que en este trabajo se abordará el diseño de los distintos componentes

eléctricos de la turbina, quedando fuera del alcance el propio generador, del cual se encargará otro compañero. Se hace una distinción entre el circuito de potencia, el circuito de auxiliares y de control, y el cableado. Además, el alcance del cableado se limita al tramo interno desde la góndola, incluyendo circuito de auxiliares, hasta la subestación colectora del parque, excluyéndose por tanto el dimensionamiento del cable de exportación y sus etapas subsiguientes.

### 1.3. Objetivos

Se definen los siguientes objetivos para este proyecto:

- **Estudio de los circuitos eléctricos de los aerogeneradores.**
- **Desarrollo del modo prototipo de simulación** para la estimación de los parámetros generales de los principios de la turbina, trabajando en conjunto con otros compañeros.
- **Diseño de los circuitos eléctricos** del aerogenerador para operación, emergencia, y protección.

### 1.4. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

En línea con la Agenda 2030 propuesta por las Naciones Unidas, este proyecto contribuye especialmente al

- **ODS 7 - Energía asequible y no contaminante:** Los aerogeneradores marinos contribuyen significativamente a la generación de energía renovable al no depender de combustible fósiles, promoviendo una fuente sostenible y limpia.
- **ODS 9 - Industria, innovación e infraestructura:** Este proyecto fomenta la innovación tecnológica y mejora la infraestructura necesaria para la energía limpia, impulsando el desarrollo industrial sostenible.
- **ODS 12 - Producción y consumo responsable:** Al reducir el impacto ambiental y fomentar una producción sostenible, el trabajo promueve prácticas más responsables en la generación y el consumo de energía.

- **ODS 13 - Acción por el clima:** Al mitigar el cambio climático asociado a las industrias, el proyecto apoya la transición hacia fuentes renovables, contribuyendo a la descarbonización.

## 1.5. Desarrollo y metodología del trabajo

Para abordar este proyecto se establecieron dos fases principales: una colaborativa y otra individual, que a su vez se subdivide en tres etapas claras y secuenciales.

Inicialmente, en la fase colaborativa, trabajé junto con el resto de mis compañeros para construir el prototipo preliminar de simulación en Bladed Educational (DNV GL). En esta fase se seleccionaron los parámetros básicos del aerogenerador según las especificaciones proporcionadas. Seguidamente, se fueron determinando los parámetros de los distintos componentes del aerogenerador para finalmente obtener una potencia nominal de 5 MW.

Tras validar el modelo base, el proyecto pasó a una fase individual dividida en tres etapas. En primer lugar, se realizó un análisis y catalogación de los distintos circuitos eléctricos. En esta etapa, se identificaron tres subsistemas eléctricos principales: el circuito de potencia, el circuito de auxiliares, y el circuito de control, cada uno con su propio sistema de cableado acorde con la potencia requerida. Una vez distinguidos los distintos sistemas, se inició una segunda fase más específica donde para cada uno se identificaban los distintos componentes que lo conforman. A su vez, se esbozaron los parámetros requeridos de los instrumentos de acuerdo con la potencia, tensión y corriente requeridos. Finalmente, se inició la tercera fase donde con los parámetros esbozados, se buscaron y seleccionaron los instrumentos específicos que serían empleados.

Aparte de hacer uso del software Bladed Educational, se tendrá en cuenta también el manual de normas GL (Germanischer Lloyd), que establece los requisitos de calidad y seguridad.

## 1.6. Selección del emplazamiento

Para situar el proyecto en un contexto realista sin perder la generalidad del estudio, se ha optado por una simplificación deliberada: en lugar de elegir un punto exacto tras un exhaustivo análisis de viento, oleaje, corrientes y restricciones ambientales, se ha definido un área genérica en la costa suroeste de Tenerife. Esta aproximación permite mantener

la coherencia de las simulaciones y los cálculos estructurales sin condicionar el diseño eléctrico a un emplazamiento único, garantizando que los resultados sean extrapolables a otros escenarios con condiciones similares.

Dentro de esta zona de referencia, se ha seleccionado una profundidad media de 45 m sobre un fondo mixto, compuesto por sedimentos suaves y formaciones rocosas dispersas. Este valor se asemeja al rango habitual de plataformas flotantes comerciales y facilita la evaluación preliminar de la estabilidad y el anclaje, sin introducir la complejidad de estudios geotécnicos detallados. La profundidad elegida también influye en la disposición del cableado submarino y en los esfuerzos mecánicos sobre la estructura, por lo que resulta clave para dimensionar de forma coherente los componentes eléctricos y de protección.

Por último, el área escogida concentra un recurso eólico representativo (velocidades medias de unos 9,4 m/s a 100 m) y dispone de una infraestructura portuaria cercana en Puerto de Granadilla, lo que simplifica la logística de montaje y tendido de cables. Aunque se trata de una simplificación, este marco de referencia ofrece suficientes garantías en términos de viento, batimetría y accesibilidad para desarrollar un diseño eléctrico sólido y adaptable, sin comprometer la validez técnica del TFG.

## Capítulo 2

# Descripción de las tecnologías

### 2.1. Clasificación de las turbinas

Las turbinas eólicas se clasifican según su eje de rotación y el tipo de generador empleado.

#### 2.1.1. Eje del rotor

Se identifican dos tipos de turbinas en función de su eje: las de eje vertical (VAWT), y las de eje horizontal (HAWT).

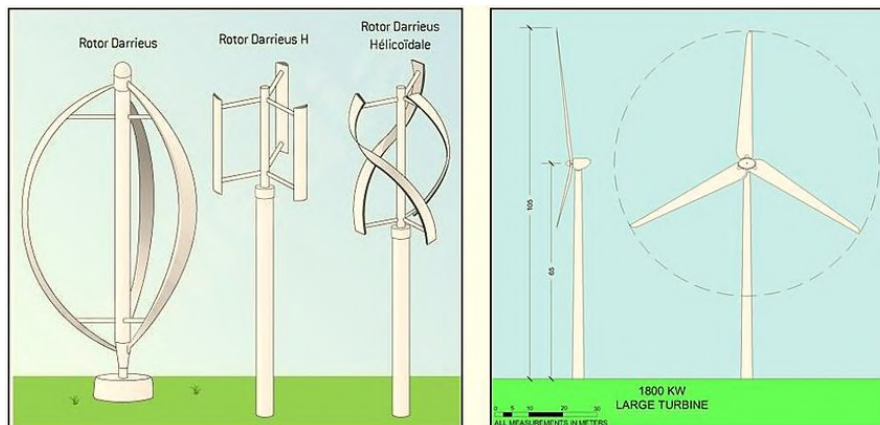


Figura 2.1: VAWT (izquierda) vs. HAWT (derecha), [7]

## Turbinas de eje vertical

Las turbinas VAWT tienen su eje de giro perpendicular al terreno donde se instalan. Estas fueron las primeras turbinas eólicas en existir, siendo un ejemplo temprano la turbina Persa, que apareció en el siglo VII d.C. Estas no necesitan un sistema de guiñada ya que son capaces de adaptarse a cualquier dirección del viento sin girar la góndola. Mientras que dotan de una mayor sencillez mecánica que las HAWT, tienen un rendimiento global menor, con coeficientes de potencia de alrededor  $\approx 0,25 - 0,35$ .

## Turbinas de eje horizontal

Las turbinas HAWT tienen su eje de giro paralelo al terreno y suelen constar de tres palas que giran en un plano vertical. Al contrario que las VAWT, las turbinas de eje horizontal necesitan un sistema de guiñada que oriente la góndola en la dirección del viento. Además, al tener una estructura más alta, su mantenimiento es complicado. Por otra parte, estas turbinas suelen aprovechar mejor la energía cinética del viento, alcanzando coeficientes de potencia de hasta  $\approx 0,45 - 0,50$ . Por este motivo, son las turbinas más utilizadas actualmente en parques eólicos.

Se observan los mayores coeficientes de potencia experimentados por las turbinas de eje horizontal respecto a las de eje vertical en la Figura 2.2

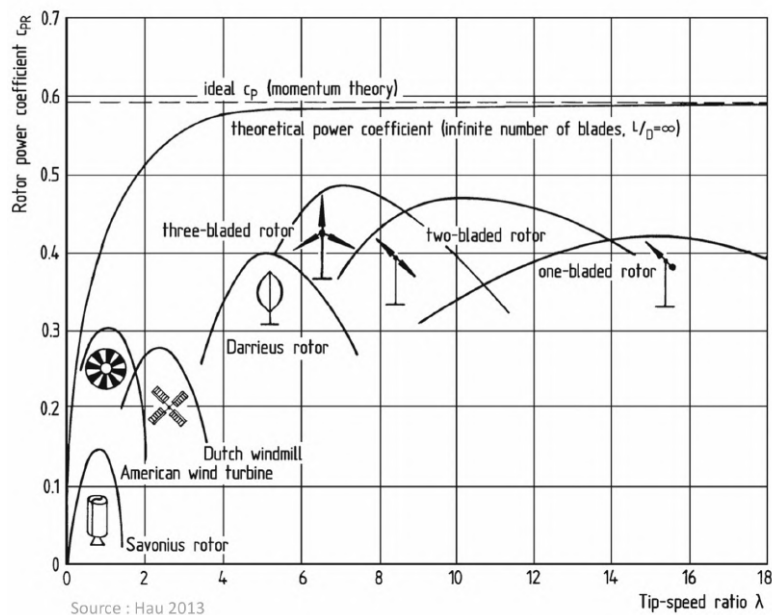


Figura 2.2:  $C_p$  de HAWT y VAWT [8]

### 2.1.2. Velocidad de rotor

Las turbinas se clasifican también en función de si su rotor es de velocidad fija o de velocidad variable.

#### Rotor de velocidad fija

Las turbinas de velocidad fija tienen su velocidad de rotación impuesta por la frecuencia de la red a la que están conectadas, por lo que generalmente tienen su generador directamente acoplado a red. Al no poder ajustar su velocidad de rotación y por ende capacidad de generación en función del viento, estas turbinas suelen operar de manera subóptima, excepto a la velocidad del viento para las que fueron diseñadas. Por esta razón, su eficiencia varía considerablemente en función del viento. En cuanto a sus estrategias de control, estas suelen estar enfocadas hacia la limitación de potencia, entre los cuales destacan la regulación por pérdida aerodinámica y la regulación por paso. La regulación por pérdida aerodinámica implica realizar un diseño de las palas para que estas entren en pérdida cerca de la velocidad del viento nominal, limitando la potencia generada. En cambio, la regulación por paso implica realizar un control activo que ajusta el ángulo de paso de las palas en función del viento, promoviendo o limitando la generación. Entre los generadores con velocidad del rotor fija, destacan el generador asíncrono de jaula de ardilla (SCIG) [9].

#### Rotor de velocidad variable

En cambio, las turbinas de velocidad variable se caracterizan por tener un generador que permite el ajuste de la velocidad del rotor en función del viento incidente. Esto se consigue empleando un convertidor de potencia que desacopla parcial o totalmente a los generadores de la red. Estas turbinas, aunque requieren estrategias de control más complejas, son capaces de explotar el recurso eólico más eficientemente. A diferencia de las turbinas de velocidad fija, las de velocidad variable son capaces de maximizar eficiencia de potencia para velocidades de viento por debajo de la nominal. Entre los generadores de velocidad variables, destacan los generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG), y los generadores asíncronos doblemente alimentados (DFIG).

## 2.2. Principios aerodinámicos del aerogenerador

Para una comprensión de las distintas tecnologías, se debe entender primero el principio aerodinámico del aerogenerador. La Figura 2.3 muestra el volumen de control teórico de una turbina eólica. El viento incide contra la sección transversal de las palas, que en la figura se observa como el disco de barrido sombreado. En este disco de área  $A$  se extrae la energía cinética del viento, reduciendo entonces la velocidad inicial de este. Esta perturbación en el viento incidente es la causa por la cual el viento abandona el volumen de control con una sección mayor que la de entrada.

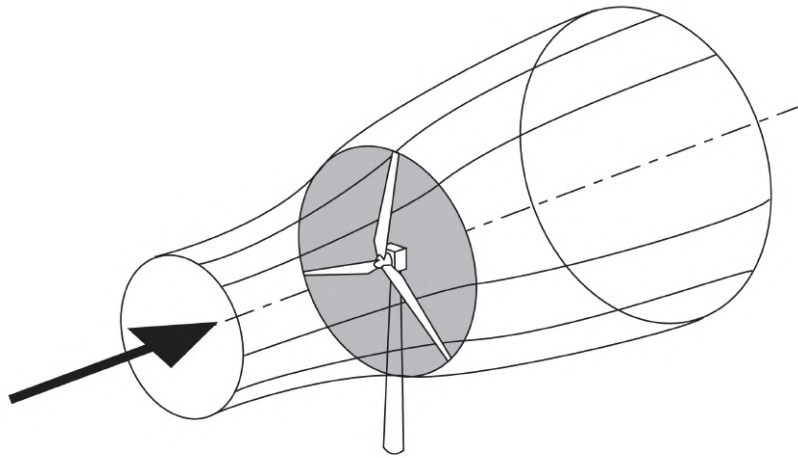


Figura 2.3: Extracción de energía de una turbina eólica [7]

En turbinas eólicas, el viento representa la variable principal, caracterizándose por su alta variabilidad tanto espacial como temporal. Dado que la conversión de energía eólica en electricidad depende directamente de la eficiencia con la que se extrae esta energía, es fundamental optimizar su captación. La variación de la potencia generada en función de la velocidad del viento es el principal factor que define el rendimiento de las turbinas eólicas.

La potencia del viento viene denotada por la ecuación (2.1):

$$P_{\infty} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_{\infty}^3 \quad (2.1)$$

$\rho$ : Densidad del aire [ $kg/m^3$ ]

R: Radio del rotor [ $m$ ]

$v_\infty$ : Velocidad del viento [m/s]

La potencia extraída por la turbina viene dada por la ecuación (2.2):

$$P_t = C_p P_\infty \quad (2.2)$$

Donde  $C_p$  denota el coeficiente de potencia, el cual es un coeficiente adimensional y cuyo máximo teórico es conocido como el límite de Betz.

$$C_{p \text{ Betz}} = \frac{16}{27} \approx 0,5927 \quad (2.3)$$

### 2.2.1. Aproximación del coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia se obtiene a partir de las ecuaciones (2.1) y (2.2), cuyas constantes dependen de la turbina. Se puede observar que el coeficiente de potencia es función del ángulo de paso y del tip speed ratio (TSR).

El ángulo de paso es el ángulo entre la línea de cero sustentación y la velocidad tangencial neta relativa del viento que incide sobre las palas, como se puede observar en la Figura 2.4.

Por otro lado, el TSR es un parámetro adimensional que define el ratio entre la velocidad tangencial de la punta de las palas y la velocidad del viento que incide sobre ellas, como se puede ver en la ecuación (2.4).

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_\infty} \quad (2.4)$$

$\omega$ : Velocidad angular del rotor

$R$ : Radio de la pala

Se tiene entonces que los dos parámetros que definen el rendimiento de la turbina son el ángulo de paso y la velocidad angular del rotor. El correcto seguimiento y control de estos es clave en la extracción óptima de potencia. Mientras que el control de paso se define en el sistema de control del aerogenerador, el control de la velocidad del rotor se realiza por el convertidor para generadores de velocidad variable. Este control permite seguir en cada instante el punto de operación que maximiza la potencia extraída del viento, lo que se conoce como estrategia MPPT (Maximum Power Point Tracking). Esta

es una de las razones por las cuales la elección del convertidor de potencia es un aspecto fundamental en el diseño del sistema.

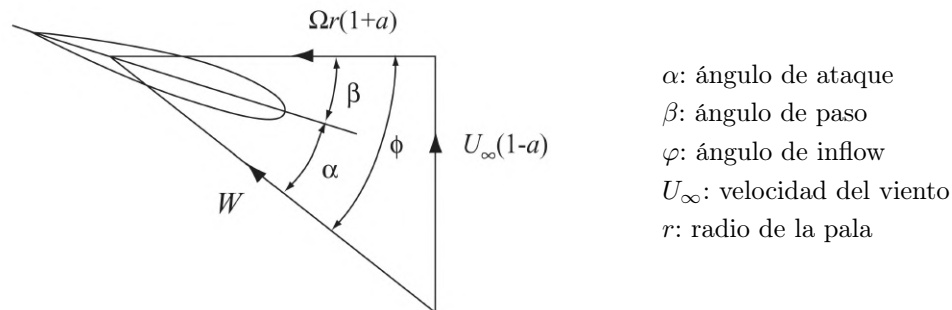


Figura 2.4: Distribución de velocidades a lo largo de la pala [9] p.87

### 2.3. Estado del arte

Actualmente, las tecnologías orientadas a la optimización de potencia generada se centran en el convertidor de potencia empleado. Se suelen emplear convertidores back to back (BTB) de doble etapa. Con respecto a las técnicas enfocadas hacia la protección se enfocan en mantener la continuidad operativa frente a fallos menores y en detener la producción en incidentes graves para evitar daños a los equipos. Esto se logra mediante sistemas avanzados como celdas de media tensión, relés de sobre corriente y sistemas de desconexión rápida. Estos consiguen aislar los fallos y minimizar su impacto, un aspecto crucial en el entorno marítimo, donde las reparaciones son complejas y costosas. Además, la alimentación ininterrumpida de los sistemas críticos, como el control de las palas y la orientación de la góndola, se asegura con transformadores auxiliares y cables altamente resistentes a la corrosión y las fluctuaciones térmicas del mar.

## Capítulo 3

# Desarrollo del prototipo de simulación

Como ya se mencionó, la primera parte del proyecto consiste en producir el prototipo de simulación en el software Bladed de DNV en su versión académica. Este entorno de simulación permite el ajuste de parámetros de turbinas eólicas según los componentes del aerogenerador, donde se distinguen: las palas, el rotor y buje, la torre, la góndola y el tren de potencia. Además, posibilita la simulación de estas bajo distintas condiciones de carga y así optimizar su diseño. En este capítulo se abordará la parametrización de estos parámetros y su ajuste en el entorno de simulación.

Cabe destacar que el sistema de coordenadas empleado es el *Yaw System Coordinates* según GL, donde el cruce del plano horizontal se sitúa a  $200\text{ mm}$  sobre la torre con el eje de la torre, especificado en el Apéndice B. Este eje de coordenadas se tendrá en cuenta en la definición de los distintos parámetros en Bladed, por lo que puede haber disparidad entre los datos de las tablas de esta sección, y los parámetros introducidos en el software. Además, los parámetros ajustables son aquellos en negro, mientras que los calculados por defecto por el sistema son aquellos que aparecen en gris.

### 3.1. Palas y perfil aerodinámico

Las palas no son objeto de estudio en este proyecto y se utilizarán distintos perfiles aerodinámicos desarrollados por la empresa WINDnovation Engineering Solutions GmbH en el proyecto L.62-5.0. En específico, los perfiles proporcionados fueron: L62-5.0-18,

L62-5.0-21, L62-5.0-25, L62-5.0-30, L62-5.0-35, L62-5.0-40 y L62-5.0-100. Los perfiles aerodinámicos están parametrizados según su ángulo de ataque, coeficiente de sustentación, coeficiente de arrastre y coeficiente de momento.

Los parámetros que se ajustaron en esta etapa fueron las distintas secciones de la pala, llamadas "stations".<sup>en</sup> el programa. En su versión educacional se permite introducir diez secciones, que se acotaron a: 0m, 5m, 12,5m, 20m, 25m, 30m, 40m, 50m, 59m y 62m de la raíz de la pala. De esta forma, se distribuyeron los siete perfiles a lo largo de las diez secciones de la pala mostradas en la Figura 3.1. Se puede observar el programa realiza por defecto una interpolación lineal entre los distintos perfiles seleccionados. Consecuentemente, se obtuvo la distribución de la cuerda mostrada en la Figura 3.2.

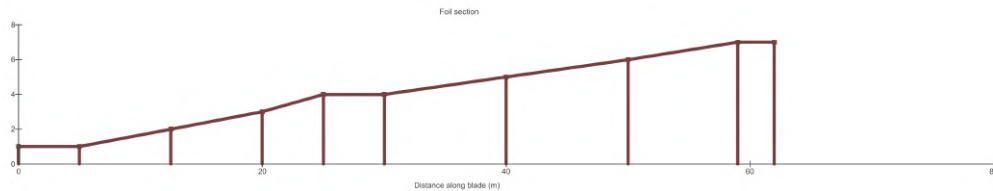


Figura 3.1: Distribución de perfiles aerodinámicos a lo largo de la pala

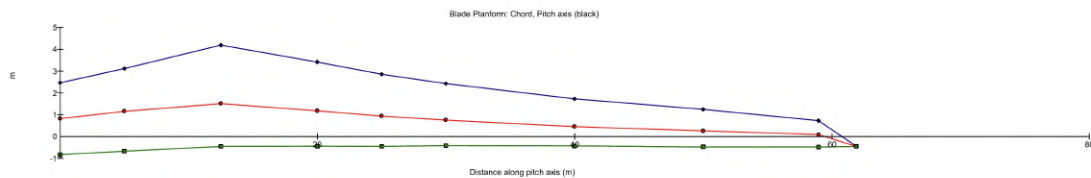


Figura 3.2: Distribución de la cuerda a lo largo de la pala

## 3.2. Rotor y buje

El software después permite la edición de los parámetros relativos al rotor y al buje del aerogenerador.

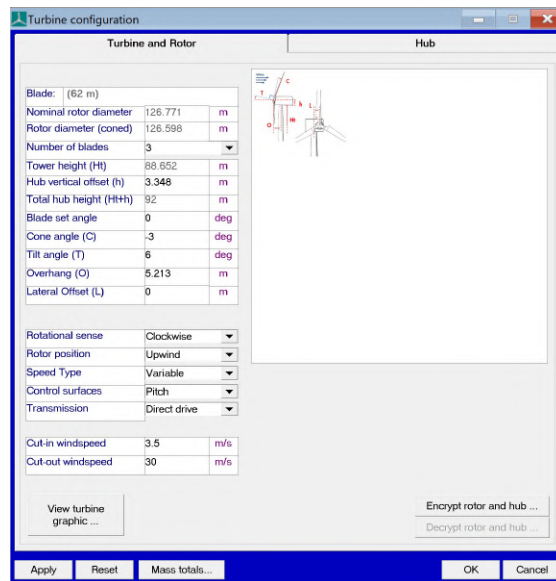


Figura 3.3: Ventana del rotor en Bladed

Los parámetros introducidos se proporcionan en el Apéndice B. Asimismo, aparecen parámetros en la ventana del rotor que deducen o seleccionan a partir de los parámetros iniciales. Estos vienen presentados en la Tabla 3.1.

Cuadro 3.1: Parámetros del rotor calculados por el autor

| Parámetro                                      | Valor | Unidad |
|------------------------------------------------|-------|--------|
| Ángulo de pala (blade set angle)               | 0     | °      |
| Compensación lateral (lateral offset)          | 0     | m      |
| Altura vertical del buje (hub vertical offset) | 3.348 | m      |

- *Ángulo de pala*: se elige un valor de
- *Compensación horizontal*: se fija a un valor de  $0\text{ m}$  de modo que el eje del rotor coincida con el de la torre.
- *Altura vertical de buje*: tiene que ser ajustada según el eje de coordenadas, por lo que se le suman  $200\text{ mm}$  a la especificación preliminar

En cuanto al buje, se obtiene la ventana del software presentada en la Figura 3.4, para el cual se calculan e introducen los valores presentados en la Tabla 3.2.

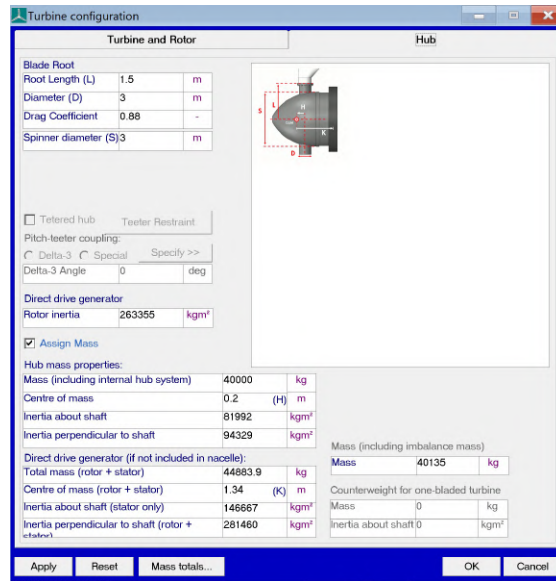


Figura 3.4: Ventana del buje en Bladed

Cuadro 3.2: Parámetros del buje y generador calculados por el autor

| Geometría del buje                  |               | Valor    | Unidad          |
|-------------------------------------|---------------|----------|-----------------|
| Coeficiente de arrastre             | $C_d$         | 0.88     | —               |
| Diámetro del carenado (spinner)     | $S$           | 3        | m               |
| Propiedades de masa — buje          |               | Valor    | Unidad          |
| Inercia del rotor (PMSG)            | $I_{g,rot}$   | 263 355  | $\text{kg m}^2$ |
| Centro de masas del buje            | $H$           | 0.20     | m               |
| Inercia respecto al eje             | $I_{  }$      | 81 992   | $\text{kg m}^2$ |
| Inercia perpendicular al eje        | $I_{\perp}$   | 94 329   | $\text{kg m}^2$ |
| Generador direct-drive              |               | Valor    | Unidad          |
| Masa rotor + estator                | $M_g$         | 44 883.9 | kg              |
| Centro de masas rotor + estator     | $K$           | 1.34     | m               |
| Inercia del estator respecto al eje | $I_{g,stat}$  | 146 667  | $\text{kg m}^2$ |
| Inercia rotor + estator perp. eje   | $I_{g,\perp}$ | 281 460  | $\text{kg m}^2$ |

- *Coeficiente de arrastre:* Se selecciona tomando como referencia estudios previos que muestran valores en el rango de 0,7 – 1,0 para flujos de viento moderados.

- *Inercia del rotor*: se modela como un cilindro hueco.
- *Inercia del buje*: se modela como un cilindro macizo.
- *Inercia del estator*: se modela como un cilindro hueco.

### 3.3. Góndola y torre

La góndola es un elemento fundamental de las turbinas eólicas, ya que contiene los principales instrumentos del tren de potencia como el generador, convertidor, transformador, etc.

Asimismo, la torre debe ser adecuadamente dimensionada para que pueda soportar todas las cargas a las que se verá sometida. Estas cargas de fatiga incluyen las producidas por el propio entorno como el viento y el oleaje, así como las producidas por la rotación de las palas.

### 3.4. Tren de potencia

En cuanto al tren de potencia, Bladed permite la introducción de los parámetros mecánicos de transmisión, eléctricos, de pérdidas, y de conexión a la red.

Puesto que la turbina objeto de estudio es una PMSG y éstas están directamente acopladas al rotor, se decide definir una caja reductora de escala 1 : 1, ya que su modelización es más simple, como se puede observar en la Figura 3.5. Además, la inercia del generador coincide con aquella calculada para el rotor previamente.

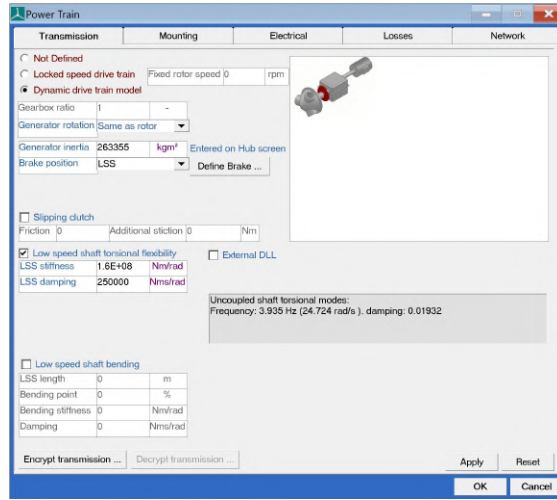


Figura 3.5: Ventana del tren de potencia, transmisión en Bladed

Se tiene que la potencia nominal del generador es de 5 MW para una velocidad nominal de 12 rpm, de modo que siguiendo la ecuación (3.2), se obtiene un par nominal de  $4,377 \text{ MN} \cdot \text{m}$ . Las pérdidas mecánicas de transmisión representan un 4 % incluyendo el rotor generador, por lo que se obtiene que para situación nominal, se tienen pérdidas de  $200 \text{ kW}$ . Estos valores se introducen en la ventana de pérdidas, mostradas en la Figura 3.6.

$$T_n = \frac{P_n}{w_n} = \frac{5 \cdot 10^6}{12 \cdot \frac{12\pi}{60}} = 4,377 [MN m] \quad (3.1)$$

$$P_{loss} = 0,04 \cdot 5 \text{ MW} = 200 \text{ kW} \quad (3.2)$$

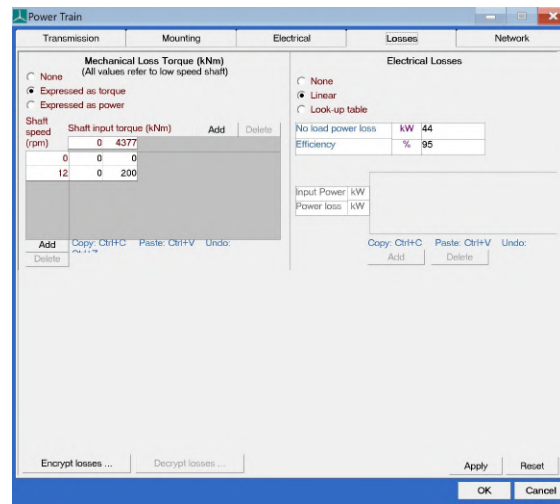


Figura 3.6: Ventana del tren de potencia, pérdidas en Bladed

## Capítulo 4

# Circuito de Potencia

El circuito de potencia es el encargado de convertir la energía mecánica del rotor en energía eléctrica y evacuarla hasta la red.

Este sistema consta del generador eléctrico, el convertidor de frecuencia, el transformador de potencia y la celda de media tensión, los cuales serán abordados en las próximas secciones.

### 4.1. Generador

Como ya se comentó en el Capítulo 2, los generadores de velocidad variable presentan un mayor rendimiento que los de velocidad fija, por lo que en este proyecto no se consideran estos últimos. Actualmente, los generadores de velocidad variable que predominan en el mercado son los generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG) y los generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG). Esta operación variable es esencial en aplicaciones eólicas debido a que el viento es un factor dinámico que influye directamente a la generación.

Los generadores DFIG presentan la ventaja de que tienen el estator conectado a la red, precisando de un convertidor parcial a su salida, por lo que presentan una mejor distorsión armónica total (THD). Por otro lado, su bajo paso polar hace que éstos roten a velocidad muy elevadas, forzándolos a utilizar una caja multiplicadora. Este componente se convierte en un punto crítico de fallo en emplazamientos marinos, donde el mantenimiento suele ser más complejo y costoso que en emplazamiento terrestres.

En cambio, los generadores PMSG – el elegido en este proyecto - evitan este problema.

Al ser multipolares, la velocidad del rotor es muy baja, permitiendo la omisión de una caja multiplicadora. La capacidad de proporcionar un accionamiento directo no solo reduce los costes de mantenimiento, sino que también reduce el peso de la propia turbina, lo cual suele compensar el propio peso de los PMSG, cuyos rotores suelen ser de mayor diámetro y peso. Además, a nivel topológico los PMSG suelen ser más robustos que los DFIG al eliminar los anillos rozantes y escobillas, los cuales se ven perjudicados por la humedad y salinidad de los entornos marinos.

Finalmente, aunque ambos generadores son capaces de soportar velocidades variables, el rango de velocidad es mayor en los PMSG que en los DFIG. Estos últimos, al tener el estator acoplado a la red, operan en un rango limitado al solo poder controlar la velocidad mediante el rotor. En cambio, los PMSG están completamente desacoplados de la red por lo que cuentan con un rango mucho más amplio, aunque con el inconveniente de necesitar un convertidor de potencia total, que resulta más costoso.

En este proyecto el generador seleccionado es el PMSG, donde sus datos se detallan en la Tabla 4.1. No se hará más énfasis en los aspectos del generador al no entrar en el alcance de este proyecto. En cambio, será abordado por otro compañero.

| <b>Generador Síncrono a Imanes Permanente (PMSG)</b> |                         |
|------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>Potencia nominal</b>                              | 5 + 10 % MW             |
| <b>Tensión nominal</b>                               | 690 V                   |
| <b>Factor de potencia</b>                            | 0,9                     |
| <b>Rendimiento</b>                                   | 95 %                    |
| <b>Velocidad angular (mín / nom / máx)</b>           | 6 rpm / 12 rpm / 20 rpm |
| <b>Número de polos</b>                               | 360                     |
| <b>Diámetro</b>                                      | 7000 mm                 |
| <b>Longitud</b>                                      | 1300 mm                 |
| <b>Impedancia síncrona</b>                           | 0,035 $\Omega$          |

Cuadro 4.1: Datos principales del generador PMSG

## 4.2. Convertidor

En generadores síncronos a imanes permanentes (PMSG), el uso de un convertidor de frecuencia que acople correctamente la potencia generada por el aerogenerador a la red resulta imprescindible. Como se ha mencionado, estos no solo permiten el correcto acople a la red, sino que también habilitan el control de par y velocidad del rotor, esenciales para una extracción eficiente de energía. Dado que el generador es variable en tensión y frecuencia, se necesita utilizar un convertidor de escala completa (full scale) donde toda la potencia generada es vertida a la red pasando por el convertidor. Asimismo, esto permite que el generador quede completamente aislado de la red. Esta configuración es conocida como Type 4 para sistemas de control de energía eólica (WECS) según la norma IEC 61400-27-1:2015. Al verter toda la potencia del generador, la potencia nominal del convertidor debe ser como mínimo la misma que este.

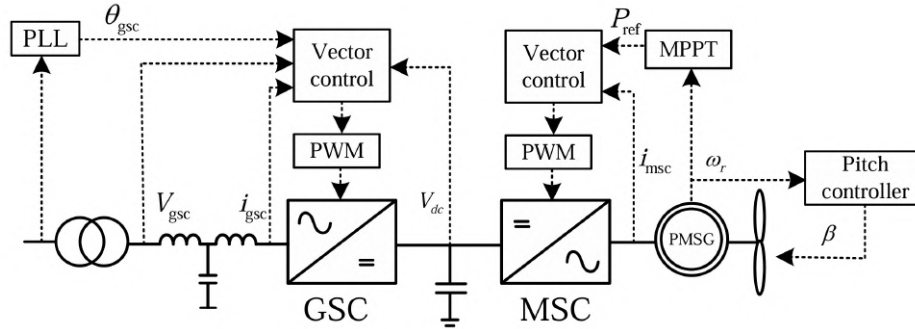


Figura 4.1: Esquema de un convertidor BTB para PMSG, [10]

### Selección de topología del convertidor

El convertidor debe estar diseñado bajo el marco de la norma IEC 60038, la cual especifica unos valores de tensiones normalizadas tanto para corriente continua (CC) como alterna (CA). Estos estándares detallan que todas las tensiones inferiores a  $1\text{ kV}$  se consideran de baja tensión (BT), los que se encuentran entre  $1 - 35\text{ kV}$  de media tensión (MT) y los superiores alta tensión (AT).

Puesto que el generador tiene una tensión nominal de  $690\text{ V}$ , nos encontramos en el caso de BT. De la misma manera, el diseño del convertidor debe cumplir con la norma IEC 62477-1:2022. Esta detalla que los convertidores de frecuencia se emplean normalmente en tándem; uno vinculado a la máquina y otro a la red, ambos conectados entre sí a

través de un enlace de corriente continua respaldado por condensadores de potencia. Estos módulos de conversión pueden diseñarse como unidades paralelas independientes o integrarse en un único bloque funcional [11].

Este tipo de convertidor es comúnmente conocido como Back to Back (BTB), constituido por un primer convertidor del lado de máquina (MSC) llamado rectificador (CA/CC), un bus de continua (CC) y otro convertidor del lado de la red llamado inversor (CC/CA). La Figura 4.1 muestra un esquema de un convertidor a escala completa para un generador PMSG, donde se detalla de forma genérica los lazos de control de cada componente.

De esta forma consiguen extraer potencia a la frecuencia fija de red (50/60 Hz) a partir de un generador de velocidad variable. Estos convertidores de escala completa son los más utilizados en la aplicación a turbinas eólicas. Entre los BTB, se pueden observar distintas categorías en función de su topología como se puede observar en la Figura 4.2, así como en función de su tipo de control.

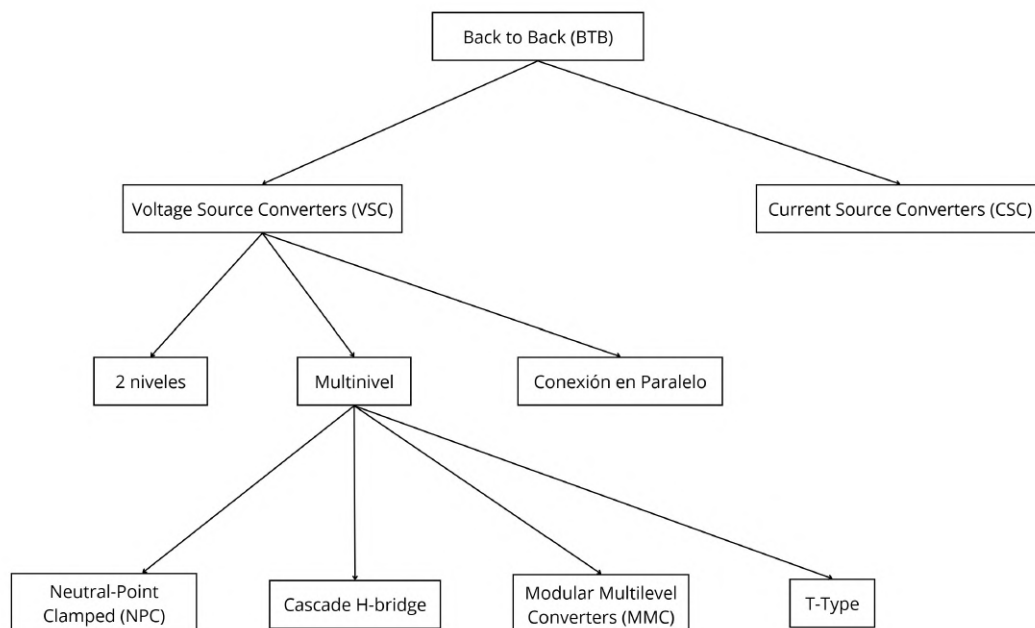


Figura 4.2: Convertidores BTB según su topología, *elaboración propia*

En primer lugar, se elegirá un convertidor de fuente de tensión (VSC) sobre uno de fuente de corriente (CSC). Estos segundos requieren grandes inductancias en el bus de

continua, lo cual resulta inviable a BT, donde hay mayor corriente. Por el contrario, los VSC están adaptados para aplicaciones en BT, permitiendo el uso de condensadores compactos y ofreciendo un control más compatible con la estrategia MPPT. Es por esto que en aplicaciones de tipo 4, el estándar industrial son los convertidores de fuente de tensión.

Dentro de los VSC, se están explorando nuevas topologías tales como el rectificador de Viena, el convertidor de matriz, o los multiniveles. No obstante, ninguno de estos es apropiado para la aplicación, por lo que son descartados. El convertidor de Viena no permite flujo bidireccional, lo cual no permite el control completo del comportamiento del generador. Los convertidores de matriz, aunque presentan la ventaja de eliminar el bus de continua, tienen los inconvenientes de que requieren técnicas de control avanzadas y entregan una tensión de salida inferior a la unidad, trabajando inherentemente como un convertidor Buck [12]. Finalmente, aunque los convertidores multinivel presenten una distorsión armónica total (THD) menor, el aumento de su complejidad, coste y necesidad de componentes adicionales en sistemas de baja tensión resulta injustificado [13].

En cambio, se optará por una topología de fuente de tensión de dos niveles con seis interruptores, cuya estructura se muestra en la Figura 4.3. Esta topología es la predominante en sistemas de tipo 4 en BT. Consiste en dos convertidores VSC – un rectificador del lado del generador y un inversor del lado de la red – conectados por un bus de continua, tal y como especifica la norma IEC 62477-1:2022. Su simplicidad estructural y su elevada madurez tecnológica facilitan su implementación, reducen costes y permiten aplicar estrategias avanzadas de control orientado al campo (FOC) así como control de par directo (DTC). No obstante, esta configuración presenta el inconveniente de que produce una mayor distorsión armónica a la salida, por lo que habitualmente requiere la incorporación de filtros de red a la salida para cumplir con los requisitos normativos de calidad de energía especificados en la normativa IEC 61400-21-1.

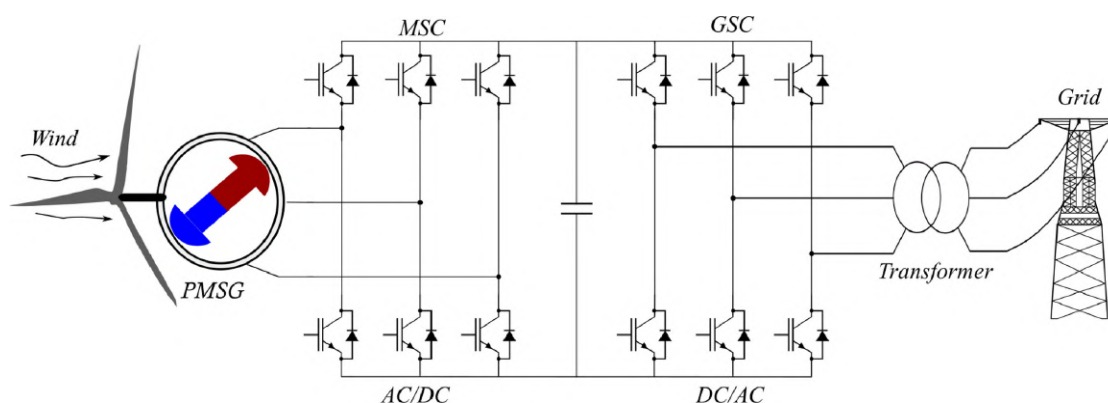


Figura 4.3: Topología de dos niveles con seis interruptores [14]

#### 4.2.1. Convertidor del lado de máquina - MSC

El módulo rectificador se encarga de rectificar la tensión alterna a la salida del generador, en tensión continua. Además, es el encargado de realizar el MPPT para la turbina opere a eficiencia óptima. Para realizar este control, existen dos estrategias predominantes, el control orientado al campo (FOC), y el control de par directo (DTC). FOC utiliza controladores lineales y modulación por ancho de pulso (PWM) para controlar los componentes fundamentales de la tensión de salida. En cambio, DTC es una estrategia no lineal que se basa en tablas de conmutación que permite controlar directamente el torque y el flujo magnético. Comparativamente, el DTC presenta una mejor respuesta dinámica al par, mientras que FOC presenta un mejor comportamiento en régimen estacionario [15]. Aunque el mejor comportamiento dinámico resulte más atractivo debido a que resulta en un mejor rendimiento de la turbina, los DTC generan un mayor rizado, lo cual puede generar mayores vibraciones mecánicas, que resulta peligroso en entornos marinos donde el acceso al mantenimiento es complejo y costoso.

Es por esto que lo deseable es elegir un MSC con FOC frente a uno con DTC. Sin embargo, los convertidores ofrecidos por la mayoría de fabricantes suelen implementar el control DTC en vez del FOC, por lo que se tendrá que optar por este. Una futura dirección no obstante sería el desarrollo de convertidores con aplicaciones industriales con FOC integrado.

En específico, el control DTC obtiene las señales de corriente y tensión a la salida del generador, a partir de las cuales estima el par electromagnético y el flujo estatorico mediante modelos matemáticos del generador. Estos valores se comparan con sus respectivas referencias, que incluyen la consigna de par proveniente del algoritmo MPPT. En función

del error de par y flujo, el DTC selecciona directamente los vectores de conmutación del inversor a través de una tabla de conmutación. Esta lógica permite un control directo de los flujos de potencia con tiempos de respuesta muy rápidos.

En específico, el MPPT se aplica para condiciones de viento inferiores a la nominal, buscando la velocidad del rotor que maximice la potencia generada. Esto se corresponde a la zona sombreada de rojo en la Figura 4.4.

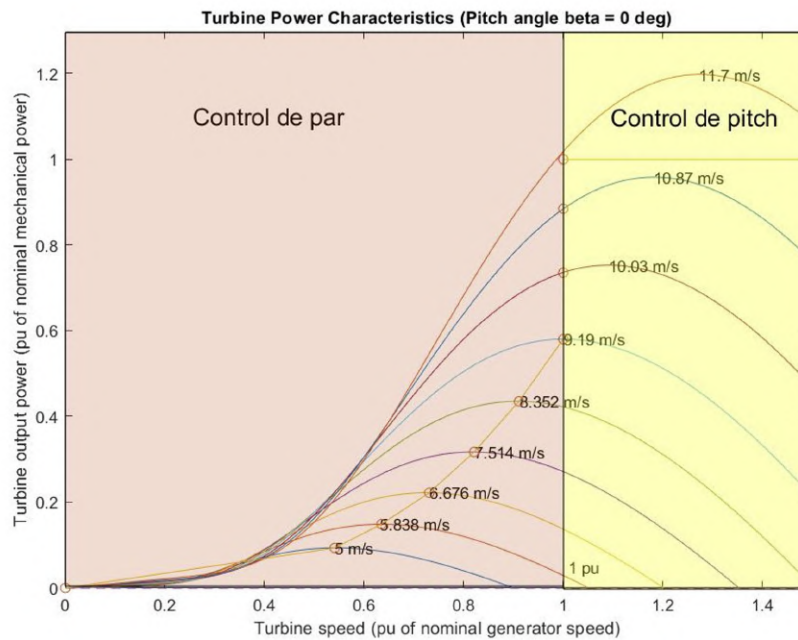


Figura 4.4: Zonas de control del aerogenerador [16]

Como elementos de conmutación, se suelen emplear interruptores de potencia como tiristores, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) o MOSFETs. Entre estos, destaca la configuración de IGBTs conectados con diodos en antiparalelo, como se puede observar en la Figura 4.3. Los IGBTs funcionan como elementos de conmutación controlada que modulan el PWM, mientras que los diodos en antiparalelo permiten el flujo de corriente inversa.

#### 4.2.2. Convertidor del lado de la red - GSC

El módulo inversor se encarga de invertir la tensión continua a la salida del bus de continua, en tensión alterna apta para ser recibida por la red. De esta forma, controla

la tensión del bus de continua y monitoriza la potencia activa y reactiva entregada a la red, aislando al generador de la red y ajustándose a los cambios en la velocidad del viento. Este módulo garantiza un acople correcto de la potencia generada a la tensión y frecuencia de la red.

El funcionamiento es similar al del módulo rectificador. Se utiliza también DTC para regular la inyección a la red, aunque a diferencia del MSC, el control está orientado al vector de voltaje de red en vez de al del flujo del rotor.

#### 4.2.3. Bus de continua

En convertidores VSC, el bus de continua cuenta con un condensador capaz de almacenar energía con el objetivo principal de estabilizar y regular la tensión de corriente continua antes de ser convertida nuevamente a alterna. Su incorporación introduce un desacople entre el generador y la red, lo que impide que transitorios o inestabilidades originadas en el lado del generador se transmitan al sistema eléctrico aguas abajo [14].

No obstante, si hay un fallo en el inversor, el flujo de energía puede quedar atrapado en el condensador, lo cual crearía una sobretensión. Para evitarlo, se suele utilizar un chopper de frenado encargado de mantener la tensión en el bus de continua en un rango de estabilidad.

Además, para asegurar una operación óptima del GSC, es esencial que la tensión del bus DC se mantenga por encima del valor de pico de la tensión línea a línea de la red [15]. Puesto que el convertidor está situado en la parte de BT a 690V, se considerará que la tensión de la red es de 690V. Consecuentemente, el valor mínimo del bus DC se obtiene a través de la ecuación 4.1.

$$V_{DC} = \sqrt{2} \times 690V = 975V \quad (4.1)$$

#### 4.2.4. Filtro de red

Como se ha mencionado antes, el control DTC suele introducir un contenido armónico significativo en la señal, debido a su conmutación directa entre estados del inversor. Esta conmutación no es una transición suave, sino que ocurre de forma discreta y abrupta, generando formas de onda escalonadas que se alejan de la señal sinusoidal ideal. El rápido cambio de vectores de tensión aplicado por el DTC produce un elevado rizado en la corriente, lo cual distorsiona la calidad de la onda [14]. Esta distorsión armónica está

regulada por la norma IEC 61000-3-2, que establece los límites aceptables en tensión. Por esta razón, se emplea un filtro de red tipo LCL, como el mostrado en la Figura 4.5, que permite atenuar eficazmente los armónicos y rizados de alta frecuencia provocados por la conmutación del convertidor.

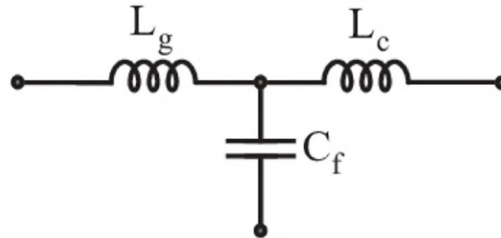


Figura 4.5: Filtro LCL

#### 4.2.5. Convertidor seleccionado

Se opta por el convertidor de la gama *ACS880* del fabricante *ABB*.

Se tiene entonces que el convertidor deseado tiene que tener las siguientes características, detalladas en la Tabla 4.2.

| Convertidor de potencia                           |                           |
|---------------------------------------------------|---------------------------|
| Fabricante                                        | ABB                       |
| Modelo                                            | ACS880-87LC-6604A/6144A-7 |
| Tipo de control                                   | Back-to-back (DTC)        |
| Tensión nominal $U_N$                             | 690 V                     |
| Potencia aparente generador $S_{\text{gen}}$      | 7893 kVA                  |
| Potencia aparente red $S_{\text{red}}$            | 7843 kVA                  |
| Corriente nominal lado generador $I_{\text{gen}}$ | 6604 A                    |
| Corriente nominal lado red $I_{\text{red}}$       | 6144 A                    |
| Tensión lado generador $U_{\text{gen}}$           | 0–750 V                   |
| Tensión lado red $U_{\text{red}}$                 | 525–690 V                 |
| Frecuencia nominal                                | 50 / 60 Hz                |
| Distorsión armónica total (THD)                   | < 3 %                     |
| Eficiencia                                        | 97 %                      |
| Grado de protección                               | IP54                      |
| Dimensiones (An × Fondo × Alto)                   | (4600 × 2400 × 4000) mm   |
| Peso                                              | 5600 kg                   |

Cuadro 4.2: Características del convertidor ABB ACS880-87LC-6604A/6144A-7

### 4.3. Transformador de potencia

El transformador de potencia se encarga de elevar la tensión de salida del convertidor de  $690\text{ V}$ , a una de  $20\text{ kV}$  para transportar la energía producida a la subestación más cercana donde posteriormente se transmitirá la energía producida por cables de AT hasta la subestación terrestre más próxima. Es preciso elevar la tensión a una más alta para así disminuir la corriente por los cables, que además de reducir las pérdidas, reduce el diámetro de estos. Esto es de interés debido a que un cableado de menor diámetro supone un menor coste, así como menos esfuerzos torsionales a la hora de ajustar el ángulo de guiñada de la turbina.

En el diseño del transformador, varias normas se deben de seguir. En primer lugar, la norma IEC 60076-16:2018 especifica que en una turbina offshore, el transformador debe ser instalado en el interior de la torre o de la góndola de esta, no pudiendo estar en ningún caso en las proximidades de la misma. Además, la norma IEC 60529 detalla los niveles de protección que el transformador de potencia debe proveer, estandarizados por el código IP. La mínima protección asegurada debe ser la de IP 55: contra líquidos y sólidos.

#### 4.3.1. Tipos de transformadores

En aerogeneradores de tipo 4, se pueden diferenciar dos tipos de transformadores en función de su sistema de aislamiento y refrigeración: los transformadores sumergidos, y los transformadores secos.

Los transformadores sumergidos se caracterizan porque tienen gran parte de sus elementos internos totalmente sumergidos en dieléctrico líquido, que actúa como el principal material aislante para transferir la energía en el proceso de inducción electromagnética. Por tanto, este líquido cumple tres funciones principales de aislante: aislamiento eléctrico, aislamiento térmico, y aislamiento ambiental. En primer lugar, las propiedades dieléctricas actúan como un separador entre los devanados y el núcleo del transformador, ayudando a evitar cortocircuitos. Además, el líquido es un refrigerante que disipa eficientemente el calor generado durante el funcionamiento del transformador, disminuyendo los riesgos por sobrecalentamiento. Asimismo, protege a las bobinas contra elementos ambientales, lo cual aumenta su vida útil [17].

Por otra parte, es este mismo líquido refrigerante el que causa su mayor desventaja, su seguridad. La baja temperatura de inflamación del refrigerante empleado; el cual suele

ser aceite mineral o vegetal, supone un gran riesgo de incendios. Como consecuencia, al utilizar este tipo de transformadores, el propio debe disponer de muchos otros elementos como un depósito colector que reduzcan este riesgo, lo que aumenta su volumen y peso. Las mayores dimensiones que esta desventaja supone hacen que los transformadores sumergidos no sean un buen candidato en emplazamientos marinos, al tener que estar estos ubicados en el interior del aerogenerador según la norma IEC 60076. Asimismo, el hecho de que tenga que ser sometido a frecuentes controles de mantenimiento significativamente eleva su coste, sobre todo al tratarse de entornos marinos donde la logística del mantenimiento es de base muy compleja y costosa. La incompatibilidad de este tipo de transformadores les hace por tanto inadecuados para turbinas de tipo 4.

A diferencia de los sumergidos, los transformadores de tipo seco se caracterizan por utilizar un medio de aislamiento gaseoso o seco. Entre sus principales ventajas se encuentran el no contener elementos inflamables, minimizando tanto el riesgo ante incendios como los costes de mantenimiento. Además, al prescindir de elementos contenedores de líquido, su volumen es menor, aliviando la carga del aerogenerador. Existen tres tipos comunes de transformadores de tipo seco: ventilados, encapsulados, no ventilados.

Los ventilados, aunque presentan un buen rendimiento térmico y son más ligeros, quedan más expuestos si no se les aplica métodos de protección adicionales. De no ser así, suelen quedar vulnerables al entorno salino y húmedo del mar, por lo que no se suelen considerar para aplicaciones marinas. Los no ventilados presentan la máxima protección de entre los tres, sin embargo; no suelen ser empleados para aplicaciones de alta potencia, por lo que quedan descartados también [18]. Por tanto, se elige un transformador de tipo seco encapsulado. Los devanados de estos están completamente encapsulados por resina epoxi, la cual actúa como una protección ante la humedad, salinidad y polvo, reduciendo entonces los costes de mantenimiento de la turbina. Por otro lado, presentan la principal desventaja de ofrecer una menor resistencia a las sobretensiones, por lo que se debe prestar especial cuidado a su protección, la cual será abordada en la celda de media tensión.

Los transformadores de tipo seco encapsulado se pueden dividir en dos categorías dependiendo del tipo de refrigeración que necesiten: aire natural (AN), o aire forzado (AF). Las primeras refrigeran por la convección natural del aire, mientras que las segundas incorporan ventiladores que fuerzan la circulación del aire, por ende, ofreciendo una mejor disipación térmica si bien se aumenta la necesidad de mantenimiento. Estos últimos son los más comunes en aerogeneradores de tipo 4, sobre todo al ser instalados en la góndola, donde su capacidad de manejar eficientemente el calor en espacios confinados

les posiciona como la mejor alternativa.

#### 4.3.2. Conexión

Para transformadores elevadores en WECS de tipo 4, el grupo de conexión establecido es Dyn11, que son recomendados también por la norma IEC 60076-1. Este grupo tiene la principal ventaja de que puede soportar corrientes de neutro elevadas sin saturarse, por lo que tiene una buena capacidad de manejar cargas desequilibradas. Esto es especialmente importante en sistemas renovables donde debido al carácter intermitente del viento, se pueden dar condiciones de desequilibrio en el suministro. Además, la conexión en triángulo del lado de alta evita que un fallo en el lado de baja se propague hasta la red de MT, proporcionando entonces aislamiento galvánico. Asimismo, esta conexión proporciona un buen comportamiento frente a armónicos generados en la parte de BT, ya que estos circulan dentro del triángulo y no se inyectan a la red de MT.

La conexión en estrella, con neutro accesible, permite su puesta a tierra mediante resistencia, lo que facilita la detección y el despeje de fallas monofásicas de forma efectiva. Esta resistencia evita que la intensidad de fuga por el neutro sea excesivamente grande. Consecuentemente, contribuye a la estabilidad de los voltajes en las fases sanas a nivel de baja tensión, eliminando casi por completo el desplazamiento y la interrupción notable que ocurriría sin ella [19]. Por tanto, la capacidad de manejar suministros desequilibrados, proporcionar aislamiento galvánico y reducir tanto la inductancia de fuga como el contenido armónico, hace que la configuración Dyn11 sea el estándar para sistemas de tipo 4. Se seleccionará entonces un transformador con el mismo grupo de conexión y relación de potencia como el mostrado en la Figura 4.6.

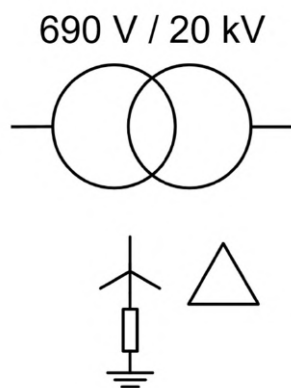


Figura 4.6: Conexión transformador de potencia con neutro accesible

### 4.3.3. Ubicación

El transformador de potencia puede ubicarse tanto en la góndola como en la torre. No obstante, su ubicación influirá directamente en el diseño de cableado y la eficiencia.

En el caso de instalarlo en la torre, se utilizarían cables de baja tensión – los cuales implican un mayor diámetro debido a la alta intensidad de corriente experimentada a 690V - desde el convertidor hasta el transformador. Esto no solo supondría mayores costes en el propio cableado, sino que también aumentaría las pérdidas por efecto Joule. Además, al estar los cables de BT en una parte móvil de la turbina, se verían sometidos a efectos torsionales significativos cuando la turbina ajustase su ángulo de orientación de la góndola, comprometiendo la flexibilidad del sistema aumentando el desgaste de los conductores.

En cambio, en el caso de instalarlo en la góndola, el tramo de cableado de BT sería mínimo, y el cableado que recorrería el tramo descendente de la torre sería de media tensión, los cuales tendrían una sección notablemente reducida, disminuyendo por tanto las pérdidas eléctricas, el peso y los esfuerzos mecánicos. Por tanto, se opta por emplazar el transformador de potencia en la parte trasera de la góndola, que suele ser la ubicación generalmente adoptada en aerogeneradores de tipo 4.

Aunque sea la candidata óptima, ubicar el transformador en la parte trasera de la góndola conlleva varios inconvenientes a los que hay que prestar especial atención. En primer lugar, al ser un elemento muy pesado, su ubicación en el extremo posterior aumenta el momento de inercia de la góndola, lo que puede provocar un desequilibrio estructural y problemas en la dinámica de orientación. Igualmente, esta ubicación lo expone de forma más directa a las vibraciones mecánicas del rotor, lo cual puede afectar negativamente a la vida útil del transformador y de sus conexiones. Por estas razones, se debe escoger un transformador que ofrezca un buen equilibrio entre su masa y los esfuerzos mecánicos vibracionales que pueda soportar.

### 4.3.4. Transformador seleccionado

El transformador elevador debe dimensionarse con la potencia aparente que exige el aerogenerador, siguiendo la ecuación 4.2.

$$S = \frac{P}{\cos(\phi)} = 6,1 \text{ MVA} \quad (4.2)$$

En la selección del transformador se busca en los catálogos de varios fabricantes, in-

cluyendo ABB, Eaton, Schneider y Siemens. Sin embargo, ninguno dispone de un transformador estándar que satisfaga simultáneamente todos los requisitos. Por ello se recurre a las gamas customizables de cada fabricante. La opción más cercana la proporciona Siemens Energy con su línea GEAFOL, descrita en el Apéndice C. En dicha referencia existe un modelo de 6 300 kVA cuyo núcleo y sistema aislante satisfacen la demanda de potencia, únicamente es necesario bobinar el devanado de BT a 690 V en lugar de los valores tipificados de 3,3 kV y 6,3 kV.

Por tanto, se debe emitir una solicitud de oferta (RFQ) a Siemens, empleando los datos de la fila 6 300 kVA como referencia y solicitando la adaptación a 0,69 kV  $\Delta$ /20 kV Y, IP 55 y ventilación AF. La Tabla 4.3 muestra los parámetros preliminares que deberán ser garantizados por el fabricante en su hoja de datos definitiva.

| Transformador de potencia              |           |
|----------------------------------------|-----------|
| Potencia                               | 6300 kVA  |
| Tensión de alta                        | 20 kV     |
| Tensión de baja                        | 690 V     |
| Grupo de conexión                      | Dyn11     |
| Tensión de cortocircuito               | 8 %       |
| Clase de protección                    | IP 55     |
| Pérdidas en vacío $P_0$                | 10 800 W  |
| Pérdidas en carga a 120 °C $P_{k,120}$ | 26 000 W  |
| Refrigeración                          | AF        |
| Ancho de cabina                        | 1 905 mm  |
| Profundidad de cabina                  | 2 780 mm  |
| Altura de cabina                       | 2 440 mm  |
| Peso total                             | 11 850 kg |



Figura 4.7: Vista del transformador encapsulado.

Cuadro 4.3: Datos técnicos del transformador GEAFOL de tipo seco encapsulado.

## 4.4. Celda de media tensión

Pasado el transformador de potencia, se encuentra la celda de media tensión. Esta es una cabina de conmutación y protección en el tramo de media tensión que sirve como punto de enlace entre el transformador de potencia y la red de colectores del parque. La celda es el principal encargado de la protección del aerogenerador, por lo que permite maniobras de conexión y desconexión, así como el aislamiento de la turbina en caso de fallas. De esta forma, garantiza la continuidad de operación en situaciones de baja gravedad, e incluso para el aerogenerador en caso de incidencias severas.

### 4.4.1. Equipos de maniobra y seccionamiento

La cabina de media tensión está constituida por varios equipos de protección que en conjunto permiten realizar maniobras normales de conexión y desconexión, interrumpir tanto la corriente de servicio como las corrientes de falla y conmutar sin problema las corrientes de naturaleza capacitiva e inductiva. A continuación, se presentan los equipos principales montados en la cabina.

#### Interruptor de potencia

El interruptor de potencia es el equipo principal de protección, ya que es capaz de establecer y cortar corrientes tanto de servicio como de cortocircuito. Su misión principal consiste en interrumpir la corriente eléctrica de manera controlada, extinguendo el arco generado al separar los contactos y recuperando la rigidez dieléctrica del medio antes del siguiente cruce por cero de la tensión. El arco eléctrico se refiere a la descarga de plasma que se forma entre dos conductores cuando estos se separan bajo tensión y el medio se ioniza, generando un puente momentáneo de electricidad. Estos dispositivos se fabrican conforme a la norma IEC 62271-100.

Su principio de funcionamiento combina un sistema de detección de sobrecargas con un mecanismo de disparo que se acciona al detectar sobrecargas. El sistema de detección de sobrecargas integra a su vez el disparo magnético para cortocircuitos y un inversor térmico para sobrecargas, como se muestra en la Figura 4.8. Una vez activado, el mecanismo separa los contactos, generando un arco eléctrico que debe atenuarse y apagarse antes de 2–3 ciclos de la red para garantizar la selectividad y evitar daños en la instalación.

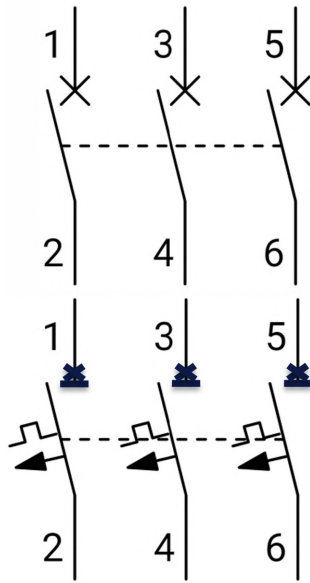


Figura 4.8: Disparo térmico-magnético de un breaker trifásico, *diapositivas ULiège ENERG0002*

Se distinguen entonces tres modos de operación:

- Maniobra voluntaria con corriente de servicio: El operador acciona la varilla, los tres polos se abren con arco despreciable.
- Sobrecarga: El bimetálico de uno de los polos se calienta y se dobla, golpeando el mecanismo de disparo para las tres fases.
- Cortocircuito: El solenoide genera un disparo instantáneo, extingue el arco y desconecta las tres fases.

El aislamiento eléctrico y el control de extinción del arco dependen del medio interno de cada polo, entre los que se encuentran: aceites, vacío, medios gaseosos (SF<sub>6</sub> o CO<sub>2</sub>) y modelos híbridos.

Los interruptores en aceite mineral se consideran actualmente obsoletos para nuevas instalaciones de MT, ya que corren un mayor riesgo de incendios, requieren un mantenimiento más intensivo y son más voluminosas al necesitar más aceite para conseguir la rigidez dieléctrica necesaria. La tecnología de vacío es una de las principales medidas para la extinción de arco en interruptores de MT, ya que el vacío impide la ionización de gases. Tras la extinción del arco, el vacío permite una rápida recuperación de la rigidez

dieléctrica entre los contactos, minimizando el riesgo de reencendido. En los interruptores de medios gaseosos, destaca el que utiliza  $SF_6$ , como aislante. Este gas destaca por su alta rigidez dieléctrica, lo cual permite extinguir arcos de forma eficiente además de diseños compactos. Aunque este gas aislante sea ampliamente utilizado en celdas de media tensión, tiene un elevado potencial de calentamiento global y una larga vida atmosférica, por lo que en la actualidad se están buscando otras alternativas.

Para evitar gases contaminantes como el  $SF_6$ , se investigan alternativas tales como el aire natural como medio dieléctrico y de enfriamiento. Esta tecnología utiliza mecanismos de enfriamiento, división y soplado del arco para lograr una extinción rápida y segura. El diseño optimizado de cámaras y el uso de aire comprimido permiten una operación eficiente y ecológica, aunque factores como la altitud y la presión ambiental deben considerarse para mantener un desempeño confiable.

Las tecnologías híbridas de extinción de arco que combinan gas y vacío están surgiendo como alternativas ecológicas y eficientes para interruptores de potencia en media y alta tensión. Estas combinan un interruptor en vacío para la extinción de arco, con un medio gaseoso para el aislamiento dieléctrico, aprovechando la rápida extinción del arco en vacío y la buena capacidad de aislamiento de los gases. Aunque el modelo híbrido todavía no tenga muchas aplicaciones industriales en MT, se prevé que se consolide como una alternativa estándar en la industria en los próximos años debido a sus ventajas ambientales y operativas [20].

El estándar industrial son las celdas de MT en vacío encapsuladas. Estas consisten en interruptores de vacío integrados en un único módulo sellado y generalmente envuelto por un material aislante como la resina epoxi o  $SF_6$ . En estos interruptores, el medio dieléctrico y de extinción del arco es el vacío, mientras que el encapsulado proporciona el aislamiento externo. A pesar de sus características contaminantes, el medio aislante que más se suele emplear sigue siendo el  $SF_6$  para aplicaciones offshore, con fabricantes como ABB, Ormazabal y Siemens empleándolo en sus celdas de MT dirigidas a aplicaciones eólicas.

### **Seccionadores: de puesta a tierra y en carga**

Los seccionadores son dispositivos encargados de realizar maniobras de aislamiento, garantizando una separación visible y galvánica entre conductores. Dentro de esta familia se encuentran los seccionadores de puesta a tierra y los seccionadores en carga.

El seccionador de puesta a tierra es el dispositivo de aislamiento secundario, propor-

ccionando aislamiento galvánico una vez el interruptor de potencia se abre y el circuito está libre de corriente. Este no está diseñado para interrumpir carga ni cortocircuitos, sino para garantizar una separación visible y segura que permita el acceso seguro al interior de la celda, imprescindible en las operaciones de mantenimiento. En las turbinas de tipo 4, el seccionador suele ser motorizado y de accionamiento remoto para permitir aislamientos visibles sin acceso humano a la góndola. Además, se suelen elegir con IP 65 y anticorrosión para entornos marinos, diseñados bajo la normativa IEC 62271-102.

El seccionador en carga tiene el papel de conectar y desconectar la línea cuando circula la corriente de servicio normal. Esto le confiere la versatilidad necesaria para maniobras ocasionales bajo cargas ligeras, ofreciendo una forma rápida y segura de conmutar circuitos sin recurrir al interruptor de potencia. Emplea cuchillas giratorias o deslizantes que al separarse generan y sofocan internamente el arco gracias a pequeñas cámaras de extinción o soplantes de gas. De este modo se evita emplear el interruptor de potencia en maniobras rutinarias, reduciendo su desgaste y prolongando la vida útil del conjunto. Se diseñan bajo la normativa IEC 62271-103 o también IEC 62271-105 si incorpora fusibles.

### **Fusibles**

Los fusibles proporcionan la protección primaria frente a sobrecorrientes. Estos son conformados por un elemento fusible, el cual es calibrado de fábrica para que se funda una vez la corriente supere su valor prefijado, interrumpiendo la línea en microsegundos. Gracias a su curva tiempo-corriente coordinada con la del interruptor de potencia, limitan eficazmente la energía de la falta y facilitan la selectividad entre niveles de protección. Se diseñan bajo la normativa IEC 60282-1

#### **4.4.2. Disposición y configuración**

##### **Ubicación en la turbina**

Este equipo se suele ubicar típicamente en la góndola o en la base de la torre. En el caso de este proyecto, al haber emplazado ya el transformador en la parte trasera de la góndola y al precisar espacio de sobra para maniobras de mantenimiento, la cabina de media tensión se ubicará en la base de la torre. En específico, en la entrada del acoplamiento de cables.

## Configuración de línea

La configuración del parque es importante a la hora de considerar los distintos requisitos de maniobra, protección y seccionamiento. La topología radial (Figura 4.9 (a)) es la habitual en parques eólicos offshore, donde cada fila de turbinas se conecta en cadena hacia una subestación marina donde se eleva la tensión para la exportación. Existe por tanto una sola línea de alimentación y varios ramales hacia las turbinas, distinguiéndose tres posiciones de las turbinas dentro del parque: inicio de línea, final de línea, y de confluencia. Aunque sus menores costes iniciales y simplicidad de componentes la sitúen como el estándar en la industria, presenta una baja fiabilidad, ya que el fallo de una turbina supone el fallo de todo el ramal donde está conectada esa turbina. Por otro lado, las configuraciones en bucle radial (Figura 4.9 (b) y (c)) y en estrella (Figura 4.9 (d)) mejoran la fiabilidad con el inconveniente de aumentar la complejidad, razón por la cual no son habitualmente seleccionadas [21]. La configuración radial de doble extremo (Figura 4.9 (b)) consta de un bucle cerrado que permite dos posibles rutas hasta cada turbina. En el caso de la estrella, todas las turbinas están conectadas a un mismo punto central.

En este proyecto se estudia una única turbina, por lo que la topología del parque será la radial simple. Al ser la única turbina, esta opera simultáneamente como el inicio de línea y como el final de línea puesto que hay una única línea de MT que parte del generador hasta la subestación más cercana. Debido a que cada turbina se conecta en cadena, se emplea una barra simple como conductor al que se conectan todos los componentes de la celda. Este diseño se centra en soportar la corriente nominal y los esfuerzos térmicos y electrodinámicos de una sola línea, sin previsión de reserva interna.

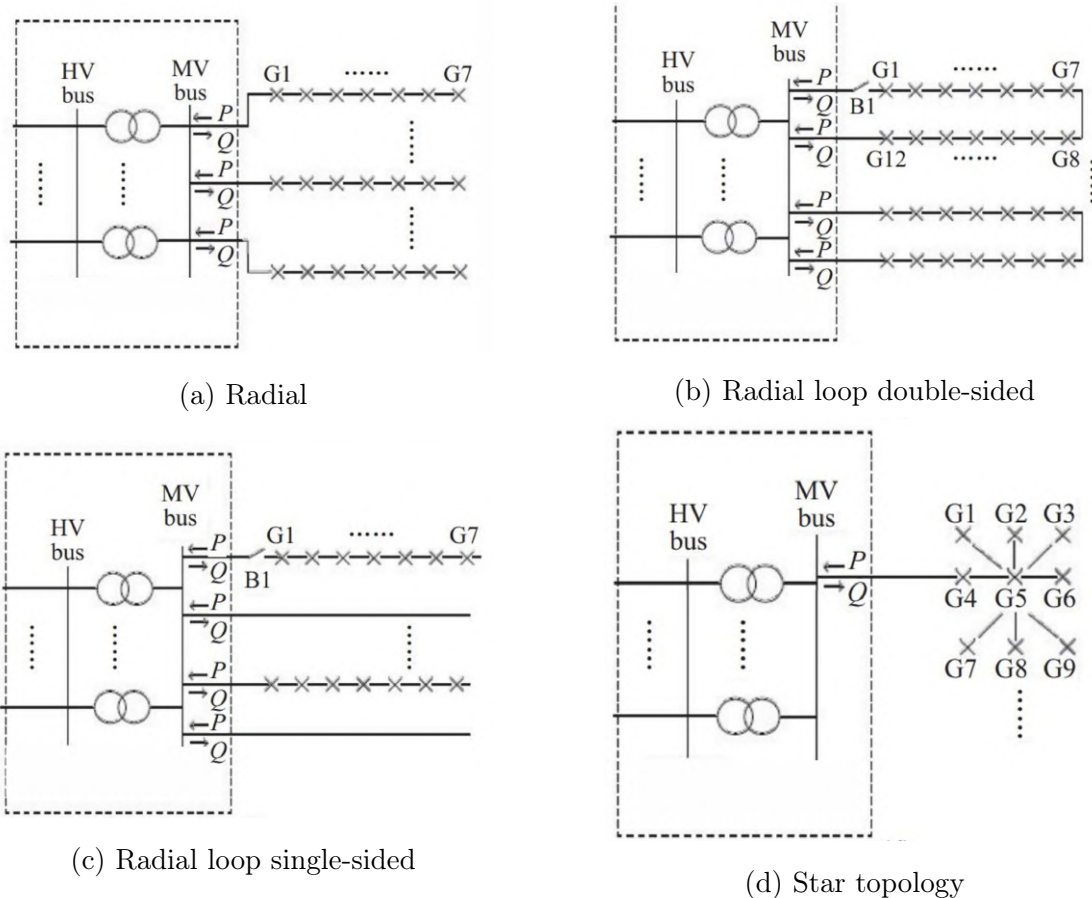


Figura 4.9: Topologías de conexión en sistemas de generación distribuida [22]

### Tipo constructivo de celda

Se distinguen dos familias de celdas en función de su construcción: las compactas y las modulares.

Las compactas consisten en armarios sellados que incorporan de fábrica los módulos y protección necesaria. Al estar sellados, destacan por ofrecer altos grados de protección, lo cual es provechoso en entornos marinos. Además, tienen una configuración reducida que permiten una instalación rápida y un mantenimiento comparativamente simple. Sin embargo, es esta misma falta de espacio lo que puede generar un inconveniente, pues los módulos adicionales muchas veces tienen que ser instalados en armarios separados, suprimiendo la ventaja de tener poco volumen.

Las celdas modulares en cambio, están compuestas por un bastidor con carriles de montaje que permiten encajar módulos individuales. Esto quiere decir que se pueden añadir y retirar módulos de protección de forma sencilla sin alterar la estructura global del resto de componentes de la turbina.

En este proyecto, se opta por una celda modular debido a su flexibilidad, que permite que se adapte a futuros cambios de normativa o ampliaciones de potencia. Además es el estándar industrial en entornos marinos ya que ofrece una rápida instalación y compatibilidad con el sistema SCADA.

#### **4.4.3. Protecciones eléctricas - Relés**

Una vez se describe toda la aparamenta física de la celda, se llega a la lógica del sistema. Si los interruptores y seccionadores son los encargados de abrir y aislar los circuitos de forma segura, los relés de protección son los encargados de dar la orden de aviso a estos componentes para que actúen acordeamente. De esta forma, los relés se encargan de la detección de fallas específicas en el sistema, para luego dar órdenes a los conmutadores. Los relés se seleccionan e instalan para proporcionar protecciones específicas para el circuito de potencia. A continuación, se detallan los principales relés de protección que debe incluir la celda.

##### **Protección diferencial del transformador (87T)**

Este relé actúa sobre un área de protección sobre la cual aplica su principio de operación. Este se basa en comparar las magnitudes y fases de las corrientes que entran y salen de la zona protegida a través de transformadores de corriente. En condiciones de operación normal, o cuando ocurre una falla fuera del área preestablecido, la diferencia entre las corrientes de entrada y de salida es cuasi nula, quedando la corriente diferencial definida únicamente por las pérdidas del área de protección y las fluctuaciones de las intensidades de los transformadores de corriente. Por la configuración de los relés, resulta equivalente a que no hay corriente fluyendo a través del elemento operativo del relé diferencial, como se puede ver en la Figura 4.10a. Al contrario, cuando ocurre una falla dentro del área protegida, el balance de corrientes se rompe. En este caso, la corriente de falla fluirá a través del elemento operativo del relé, el cual consecuentemente disparará los interruptores asociados y aislará al sección fallada, visto en la Figura 4.10b [23].

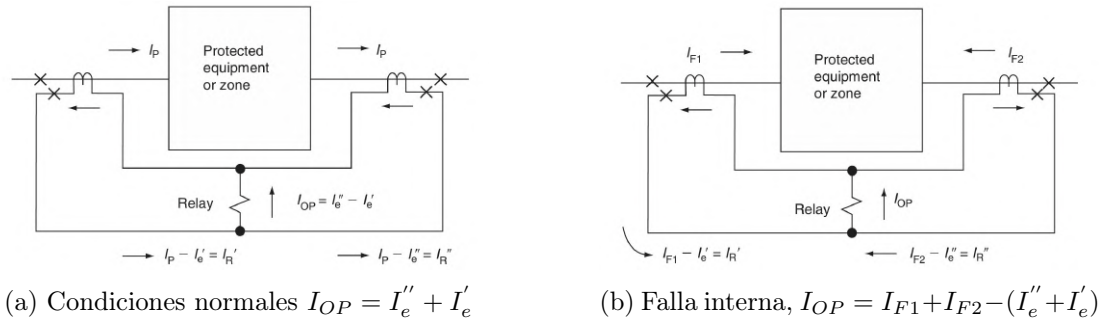


Figura 4.10: Esquema básico de protección diferencial [23].

Esta protección actúa principalmente contra fallas de fase en generadores y transformadores de potencia. En el caso de los transformadores, estos relés son comúnmente conocidos como protección 87T, donde la zona de protección queda definida por la ubicación de los transformadores de corriente.

Además, se pueden dar situaciones de operación de falla falsa causadas por faltas externas, corrientes de magnetización o saturación de los trafos de intensidad. Estas situaciones de falta ficticia son nocivas tanto en el ámbito económico, donde la turbina deja de generar indebidamente, como en el ámbito operacional, ya que el on-off switching afecta a la salud de la turbina. En particular, se debe prestar especial atención a las corrientes de energización. Estas se dan cuando al poner en servicio el transformador en vacío, la combinación del flujo residual en el núcleo y el ángulo de conexión de la tensión provoca que el flujo instantáneo supere el nivel de saturación. Para restablecer el equilibrio magnético, aparece una corriente transitoria de varios ciclos cuyo valor eficaz suele oscilar entre 5 y 8 veces la corriente nominal. Esta corriente de energización contiene un alto contenido armónico, especialmente de segunda armónica. Esta característica se aprovecha en los relés diferenciales para bloquear la operación durante la energización. Para neutralizar su efecto, el relé suele inhibir la operación si la componente del segundo armónico de esta corriente supera el 15 % de la fundamental [23].

Los motivos mencionados anteriormente son la razón por la que la mayor parte de los relés diferenciales se basan en una operación porcentual, definida por la característica de la corriente diferencial y de frenado o restricción. Esta intensidad de frenado es proporcional a la corriente promedio que atraviesa la zona de seguridad, definida por la ecuación 4.4. Por tanto, el relé opera solo cuando la corriente de la bobina operativa excede un cierto porcentaje de la corriente en las bobinas de restricción, como se observa en la Figura 4.11. Este porcentaje puede ser variable o fijo. De esta forma, la operación porcentual garantiza una operación más sensible ante fallas internas y externas.

$$I_{diferencial} = (I_R'' - I_R') \quad (4.3)$$

$$I_{frenado} = K (I_R'' + I_R') \quad (4.4)$$

$K$  es el factor de compensación, el cual usualmente esta ajustado entre un valor de 0,3 y 0,8 [24].

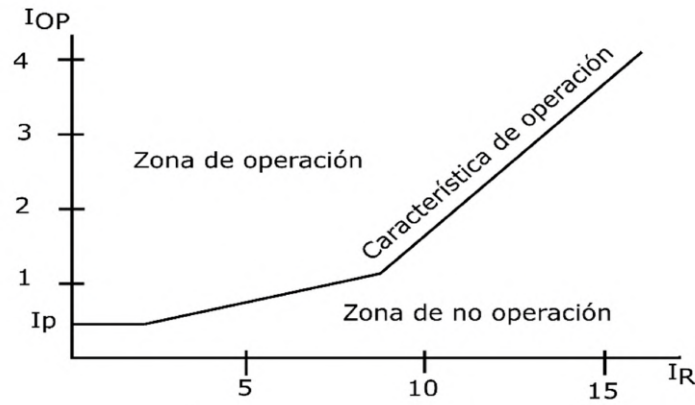


Figura 4.11: Pendiente característica del relé diferencial porcentual [24].

Por tanto, para realizar el ajuste del relé se comenzaría por calcular las corrientes máximas de operación a ambos lados del transformador de potencia

$$I_{MT} = \frac{\frac{6,3 \cdot 10^6}{\sqrt{3}}}{20 \cdot 10^3} = 181,87 \text{ A} \quad (4.5)$$

$$I_{BT} = \frac{\frac{6,3 \cdot 10^6}{\sqrt{3}}}{690} = 5\,271,46 \text{ A} \quad (4.6)$$

De acuerdo con las series normalizadas definidas en la IEC 61869-2 y con los catálogos de transformadores de corriente (TC) compatibles con la celda ABB SafePlus, la relación de transformación se obtiene escogiendo el escalón primario normalizado inmediatamente superior a la corriente de línea calculada en cada devanado del transformador:

- Lado de media tensión: se selecciona un TC  $200/I_N$ .
- Lado de baja tensión (BT, 690 V): se selecciona un TC  $6000/I_N$ .

En ambos casos  $I_N$  es la corriente nominal del secundario. Estas relaciones permiten calcular las corrientes que el relé recibe en sus entradas secundarias, base para el ajuste de la protección diferencial.

$$I_{MT}^2 = I'_R = \frac{181,87}{\frac{200}{I_N}} = 0,909 I_N \quad (4.7)$$

$$I_{MT}^2 = I''_R = \frac{5\,271,46}{\frac{6\,000}{I_N}} = 0,879 I_N \quad (4.8)$$

$$I_{dif} = I''_R - I'_R = (0,909 - 0,879) I_N \quad (4.9)$$

$$= 0,03 I_N \quad (4.10)$$

$$I_{frenado} = 0,5 (0,909 + 0,879) I_N \quad (4.11)$$

$$= 0,894 I_N \quad (4.12)$$

$$\text{con } K = 0,5 \quad (4.13)$$

Por tanto, la intensidad de arranque será  $0,03 I_N A$  o mayor.

### Protección contra sobrecorriente

Se pueden distinguir dos categorías de relés contra sobreintensidades: los de fase, y los de tierra o neutro a los cuales se les añade una 'N' al final en el código ANSI. Los relés de fase se encargan de la protección del sistema ante cortocircuitos trifásicos, mientras que la de neutro detecta corrientes de fallo monofásico a tierra. Es necesario implementar ambas en el sistema eléctrico de la turbina, ya que al estar el trafo conectado en Dyn11 con neutro accesible, hay posibilidad de fallos monofásicos que los relés de fase no serían capaces de detectar. Esto se debe a que los relés de fase suelen estar ajustados entre el 100 % y el 130 % de la corriente nominal del equipo, mientras que las de tierra suelen estar ajustados alrededor del 20 % de la corriente nominal, garantizando una mayor sensibilidad. De esta forma, los relés de tierra evitan que una falta monofásica se propague, resultando en tiempos de respaldo más lentos y por tanto más daños en el sistema [16].

Además, en el ajuste de tiempo se diferencian dos clases de protecciones: las instantáneas, identificadas por el código 50 por ANSI, y las temporizadas, identificadas por el número 51 bajo el código ANSI. Dentro de estas últimas se identifican también dos subgrupos: las de tiempo definido, y las de tiempo inverso. Los relés instantáneos operan sin retardo una vez se detecta que la corriente ha alcanzado la magnitud de un umbral predefinido. Por otro lado, los relés de tiempo definido tienen una temporización fija predeterminada que hará que estos salten. La variante más utilizada dentro de esta

categoría es la que tiene dos o tres zonas con diferentes tiempos de operación, donde el primero es instantáneo. Por otro lado, la protección de tiempo inverso (51) actúa con un retardo de tiempo inversamente proporcional a la magnitud de la corriente de falta, como se muestra en la Figura 4.12. Además, el ajuste de tiempo para los relés de tiempo inverso están establecidos bajo la norma IEC-255-4, como se detalla en la ecuación 4.14.

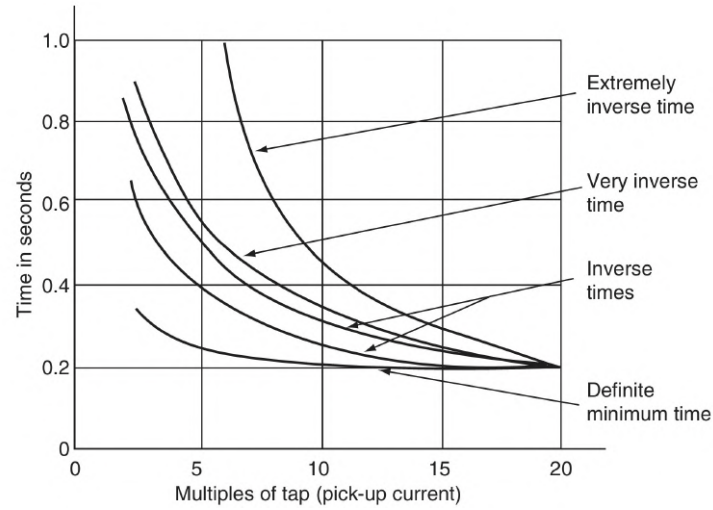


Figura 4.12: Características del relé de tiempo inverso [23].

El ajuste de un relé de sobrecorriente se hace seleccionando:

- El valor de arranque, correspondiente al mínimo valor de corriente a partir del cual la curva empieza a operar
- El ajuste de tiempo o selección de la curva a utilizar.

$$t = \left[ \frac{k}{\left( \left( \frac{I}{I_p} \right)^\alpha - 1 \right)} \right] \cdot t_p \quad \begin{cases} t_p & : \text{Ajuste o dial de tiempo} \\ I_p & : \text{Corriente de puesta en trabajo o Pick up} \end{cases} \quad (4.14)$$

Tanto los relés de fase como los de tierra deben coordinar sus curvas de operación para garantizar la máxima continuidad del servicio. Lo que se quiere conseguir principalmente es aislar la parte de falla del sistema, de forma que solo actúe la protección más cercana a esta y que las protecciones aguas arriba se activen únicamente como respaldo. Se mantiene entonces una buena estabilidad del sistema. Existen tres principales métodos de selectividad para la coordinación, los cuales suelen venir caracterizados por gráficas logarítmicas, como se observa en la Figura 4.13.

- Selectividad cronométrica: garantiza que el único dispositivo que detecte la falla sea el que está aguas abajo de esta, de tal forma que los dispositivos aguas arriba no se disparen.
- Selectividad amperimétrica: el dispositivo aguas abajo es más rápido mientras que el dispositivo aguas arriba está ligeramente temporizado.
- Energética: utilizado en interruptores termomagnéticos, garantiza que la energía disipada en el aparato aguas arriba sea insuficiente para provocar su disparo, al ser limitado por el dispositivo aguas abajo.

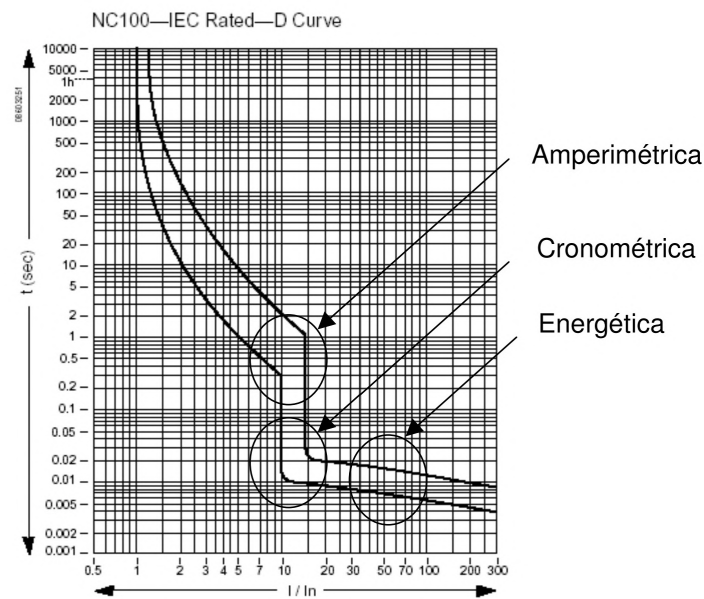


Figura 4.13: Curva de coordinación para los relés de sobrecorriente [23].

Debido a que el ajuste de los relés de sobrecorriente, tierra y fase requiere conocer con exactitud parámetros del transformador (impedancia de cortocircuito, tensión de cortocircuito, pérdidas en vacío, corriente magnetizante, etc.), dichos ajustes se pospondrán hasta la recepción de la ficha técnica definitiva proporcionada por el fabricante, asegurando así la precisión y selectividad de la protección.

### Protección de corriente de equilibrio de fase (46)

También conocidos como relés de corriente de inversión de fase, esta protección es numerada por el código 46 según ANSI. Actúa como respaldo principal ante fallos de

desequilibrios en el sistema que no se compensan adecuadamente, protegiendo principalmente al generador contra las corrientes de secuencia negativa.

En un sistema trifásico desequilibrado, cualquier conjunto de tensiones o corrientes puede descomponerse según el método de componentes simétricas de Fortescue [23]. Estas son: la secuencia positiva, la secuencia negativa, y la secuencia cero. La secuencia positiva está formada por tres fasores de igual magnitud y desfasados  $120^\circ$  entre ellos que giran en el orden  $a, b, c$ ., representando el estado equilibrado del sistema. En cambio, la secuencia negativa y secuencia cero corresponden a sistemas desequilibrados donde o bien las magnitudes o bien los ángulos de fase dejan de respetar este balance perfecto. En particular, la secuencia negativa presenta también fasores de igual magnitud y  $120^\circ$  de separación, pero con una rotación invertida  $a, c, b$  que aparece cuando existen desequilibrios de fase. Este comportamiento se puede observar en las Figuras 4.14 y 4.15, donde las magnitudes de cada corriente vienen dadas por la ecuación 4.17.

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (4.15)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (4.16)$$

$$a = e^{j120^\circ} \quad (4.17)$$

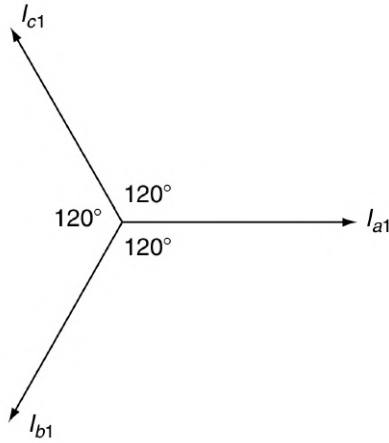


Figura 4.14: Secuencia positiva. Rotación de fase en sentido antihorario [23]

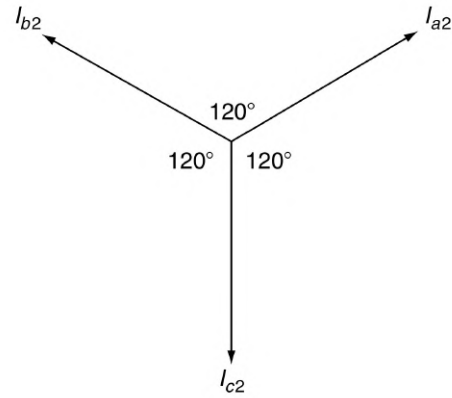


Figura 4.15: Secuencia negativa. Rotación de fase en sentido antihorario [23]

Las corrientes de secuencia negativa son perjudiciales en generadores síncronos con

un impacto especialmente nocivo en el rotor. Al rotar en sentido opuesto al de equilibrio, estas generan un flujo magnético que se opone al sentido del rotor. Este flujo induce corrientes a una frecuencia del doble de la sincronía. Debido al efecto de piel (skin effect), estas corrientes son forzadas a circular por la superficie del rotor, causando sobrecalentamiento severo en estos componentes [25]. Este no solo provoca daños severos en el rotor sino que además afecta mecánicamente a la máquina y su acoplamiento. Entre las causas principales de las corrientes de secuencia negativa, se encuentran: la alimentación a cargas desequilibradas, presencias de fallas a tierra o entre fases, y el incorrecto cierre de uno de los polos de un interruptor.

El relé 46 se encarga de detectar estas fallas a tiempo y proteger al generador, en especial al rotor, de ellas. Su principio de operación se basa en medir la corriente de secuencia negativa ( $I_2$ ) y disparar el interruptor según la ecuación 4.18, donde  $t$  es el tiempo, y  $K$  es una constante que depende del límite del generador. Además, este disparo puede ajustarse para que actúe de forma instantánea o con tiempo inverso.

$$I_2^2 t = K \quad (4.18)$$

#### 4.4.4. Celda seleccionada

Se opta por el *Módulo V (Vacuum circuit-breaker module)* de la celda *SafePlus 24 kV* del fabricante *ABB*. Este módulo integra de fábrica los transformadores de corriente, la bobina de disparo, y relés de protección autoalimentados que cubren las protecciones previamente mencionadas, como se muestra en la Tabla 4.4.

| Celda de media tensión                        |                                                   |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Fabricante                                    | ABB                                               |
| Modelo de celda                               | SafePlus 24 kV: V-module                          |
| Tensión nominal                               | 24 kV                                             |
| Corriente nominal                             | 630 A                                             |
| Intensidad de cortocircuito ( $I_{cc}$ , 3 s) | 25 kA                                             |
| Capacidad de cierre                           | 50 kA (crest) / 25 kA (3 s)                       |
| Transformadores de corriente (CTs)            | Toroidales KOKM 072                               |
| Relé de protección                            | Self-powered relay (REJ603 v3.0 / WIP1) integrado |
| Funciones de protección integradas            | 87T, 50/51, 50N/51N, 46                           |
| Dimensiones (An×Fondo×Alto)                   | 650 × 751 × 1 336 mm                              |

Cuadro 4.4: Características de la celda SafePlus 24 kV – V-module

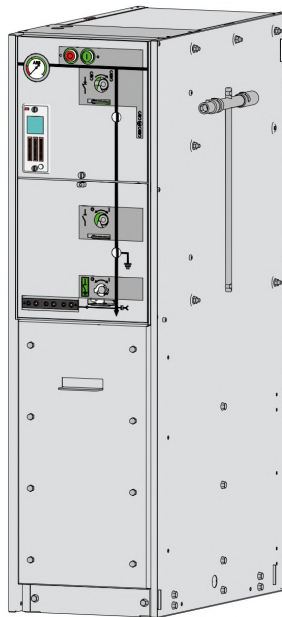


Figura 4.16: Módulo V de SafePlus 24 kV [26].

## 4.5. Protección contra sobretensiones

Entre los adversos desafíos ambientales a los que se enfrentan las parques eólicos, se encuentran las descargas atmosféricas. Esta es una consideración de alta importancia en la protección del parque, ya que al estar situados en espacios abiertos, quedan vulnerables ante este tipo de fenómenos.

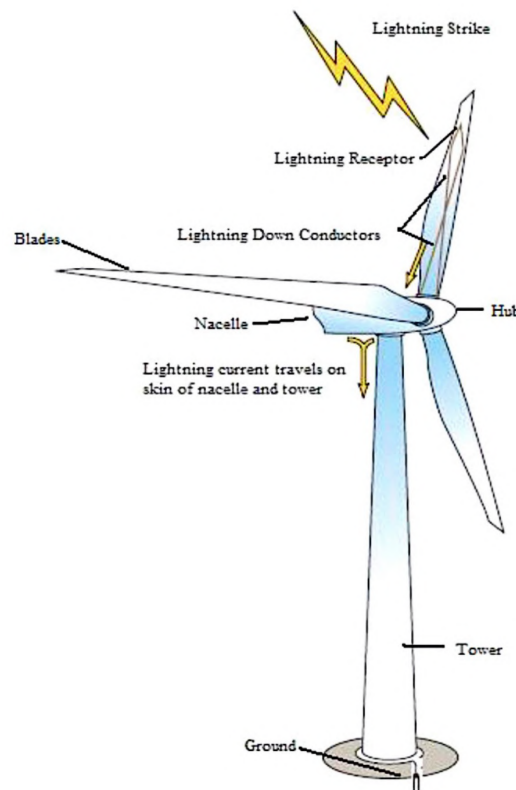


Figura 4.17: LPS típico en una turbina eólica [27].

Los requisitos que debe cubrir el sistema de protección contra rayos (LPS) quedan detallados en la norma IEC 61400-24 [28]. En esta, se especifica que la turbina y sus componentes deben estar protegidos según el nivel de protección (LPL) I. Este es el nivel con la protección más exigente contra rayos más exigente de la norma, dimensionada para corrientes de raso de hasta  $200\text{ kA}$ . La Figura 4.17 muestra el desglose típico de el LPS de una turbina eólica y lo que ocurre ante una descarga atmosférica.

Fundamentalmente, estos sistemas captan la incidencia de un rayo en las puntas

receptoras, dirigiendo su camino por la góndola y torre hasta tierra para evitar diferencias de potencial que dañarían gravemente a la turbina y sus componentes. En aplicaciones marinas, es un sistema multicapa donde se distinguen los sistemas de protección externa y los sistemas de protección interna.

#### 4.5.1. Sistema LPS exterior

El sistema LPS exterior es el primero en captar el impacto del rayo y se encarga de conducir la mayor parte de la corriente de forma segura hacia el sistema de puesta a tierra. Por tanto, el rayo inicialmente intercepta los receptores de la pala, por las que baja hasta el buje, conduciéndose a la góndola para finalmente descender por la torre hasta tierra. Este sistema está compuesto por tres subsistemas: el sistema de puntas captadoras, el sistema de derivación, y el sistema de puesta a tierra.

Las puntas captadoras interceptan la descarga en puntos estratégicos de la turbina para atraer el rayo hacia elementos que están preparados para su reconducción sin causar perjuicios a la estructura. Los elementos del aerogenerador que suelen contenerlos son las palas y la góndola, al ser los más propensos a recibir estas descargas. La instalación de captadores en la pala depende de la longitud de estas de acuerdo con la norma IEC 61400-24. El aerogenerador de este proyecto, al tener una longitud de pala de 61,5 m, necesitará un captador en la punta, tres en el intradós<sup>1</sup>, y otros tres en el extradós<sup>2</sup>. Según las especificaciones del fabricante<sup>3</sup>, se tiene que se instalarán pares de captadores a una longitud de pala de 20m, 38m y 52.5m, así como un captador final en la punta.

El sistema de derivación es el nexo entre el sistema de captadores y el sistema de puesta a tierra, evacuando la corriente del rayo desde el punto de incidencia hasta tierra. Esta evacuación la realiza facilitando un camino de baja impedancia. Además, el sistema de bajada debe evitar arcos o diferencias de potencial peligrosas.

Existen dos configuraciones principales empleadas en las palas: los sistemas internos, y los sistemas superficiales o externos. Los primeros consisten en utilizar un sistema de puntas captadoras que penetran dentro de la superficie de la pala, empleando asimismo un conductor de bajada que se ubica en el interior esta. Esta configuración exige que el sistema esté aislado y suele emplear varillas de cobre o aleaciones de aluminio como elemento conductor. En cambio, los sistemas externos colocan los elementos conductores sobre la superficie de la pala, actuando tanto como captadores y como el sistema de

---

<sup>1</sup>cara de presión: superficie inferior del perfil aerodinámico.

<sup>2</sup>cara de succión: superficie superior del perfil aerodinámico.

<sup>3</sup>WINDnovation, el que nos proporciona las palas como se detalla en el Capítulo 3.

derivación. Aunque son menos utilizados, estos son particularmente efectivos cuando se emplean materiales conductores en el diseño de la propia pala [29]. En este proyecto se hará uso de un conductor de bajada interno trenzado y compuesto por una aleación de aluminio ( $Al / AlMgSi$ ) con una sección de  $70\text{ mm}^2$ , como especifica el fabricante.

En el buje, confluyen los conductores de bajada de cada pala, transfiriendo la descarga a la góndola. Debido a que la unión del buje está compuesto por un material distinto al de la pala, se necesita un mecanismo que garantice el paso de la descarga a la góndola. Comúnmente, se utilizan conectores deslizantes, permitiendo la continuidad eléctrica a pesar del movimiento giratorio del rotor [29]. Es importante que las tres bajadas que vienen por las palas sean equipotenciales, pues de otra forma se podría producir el salto del rayo entre pala y pala o pala y buje, lo cual podría dañar los rodamientos del sistema de paso. En cuanto a la góndola, se suelen utilizar barras colectoras de cobre que proporcionan una baja impedancia y centralizan las conexiones equipotenciales. Por otro lado, la propia estructura de la torre suele considerarse como el conductor de bajada principal, actuando como el trayecto natural de la corriente del rayo.

En entornos marinos, el sistema de puesta a tierra se ve simplificado gracias a la salinidad del mar, que convierte a este en un medio altamente conductor. En consecuencia, se puede omitir la implementación de electrodos a tierra que en circunstancias terrestres habrían sido un requisito establecido por la norma [28].

#### 4.5.2. Sistema LPS interior

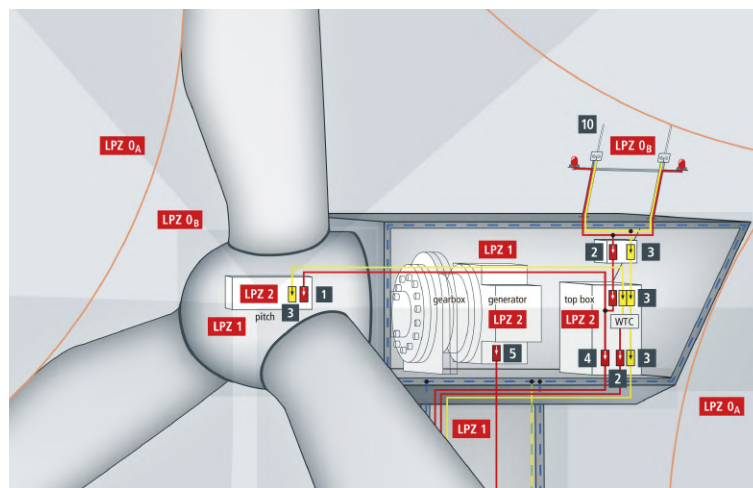


Figura 4.18: LPZ típico en la góndola [30].

Este sistema se encarga de gestionar las sobretensiones transitorias que pueden propagarse por los cables y afectar a los equipo.

Es aquí donde se define el concepto de zonas de protección contra rayos (LPZ) según la norma IEC 62305-4. Estas zonas establecen según el nivel esperado de exposición de los distintos componentes que lo conforman, al rayo. Para las zonas exteriores; que quedan más expuestas y vulnerables a las descargas, se utilizan índices de menor número, mientras que para las zonas interiores; con exposición reducida, se utilizan índices de mayor número, como se puede observar en la Figura 4.18.

Los elementos clave de la protección interna son los descargadores de sobretensión (SPD). Su función principal es la de limitar las sobretensiones transitorias que se propagan por los cables y conductores, evitando que niveles peligrosos alcancen los equipos sensibles ubicados en zonas más protegidas. Estos elementos son indispensables para los cables que entran en zonas de protección, sobretodo en zonas de BT donde se encuentra el generador. La norma IEC 62305-4 detalla el tipo y ubicación de los SPDs dependiendo de las fronteras LPZ entre las que se encuentren.

Se destaca también el sistema de conexión equipotencial, que interconecta las partes metálicas estructurales con las instalaciones y sistemas internos. Al igualar los potenciales, reduce las diferencias de tensión dentro de la estructura que podrían dañar tanto a los equipos como al personal.

En la Figura 4.18 se observa el esquema básico de un sistema de protección de pararrayos en la zona de la góndola, donde todo lo que queda fuera de la línea punteada es zona LPZ 0. Se distinguen cuatro LPZ:

- LPZ 0A: Zona exterior sin blindaje que recibe un impacto directo. Se sitúan aquí los receptores y los conductores de bajada.
- LPZ 0B: Tras la punta captadora, no hay impacto directo, pero sí que puede circular una fracción de la corriente del rayo.
- LPZ 1: Situada tras la malla equipotencial en el interior metálico de la góndola y de la torre. Esta zona está expuesta a descargas parcialmente directas.
- LPZ 2: En el interior de la góndola y de la torre, esta zona está expuesta a descargas indirectas y contiene zonas eléctricas como el sistema de paso y sensores del generador.

### 4.5.3. SPDs seleccionados

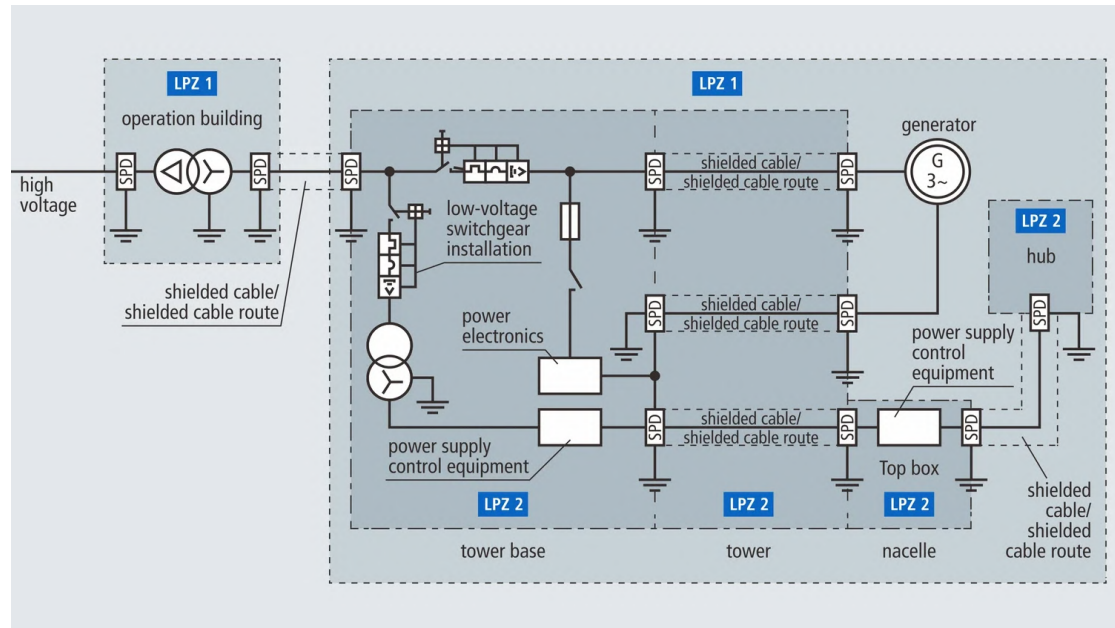


Figura 4.19: LPZ recomendados por el fabricante *DEHN* [31].

Se tomarán como referencia las LPZ mostradas en la Figura 4.19, a recomendación del fabricante *DEHN*. Además, se tiene que el tipo de SPD a instalar varía según las LPZ que debe cruzar, como se observa en la Tabla 4.5.

| Frontera LPZ   | SPD a instalar |
|----------------|----------------|
| LPZ 0A → LPZ 1 | Clase I        |
| LPZ 0B → LPZ 1 | Clase II       |
| LPZ 1 → LPZ 2  | Clase II       |

Cuadro 4.5: Clase de SPD según la frontera LPZ

Por este motivo, se instalará un SPD de tipo I en el lado de BT del transformador de potencia y uno de tipo II entre el generador y el convertidor de potencia. Los descargadores de tipo II están diseñados para proporcionar una coordinación energética con el equipo siempre que este esté a 10 m o menos, por lo que la reducción de las interferencias residuales y limitación de sobretensiones se optimiza cuando el equipo a proteger se encuentra a esta distancia o menos. Sin embargo, debido a que la góndola tiene una longitud de 8 m y que el transformador se instala en la parte posterior de este, no se da el caso de superar los 10 m de distancia. Por ello, no se hará uso de ningún SPD adicional.

Se distinguen tres parámetros en la selección de los SPDs:

- Tensión nominal ( $U_n$ ): tensión a la que opera la red en condiciones normales
- Tensión continua máxima ( $U_c$ ): máxima tensión que para la cual el descargador no salta
- Tensión de protección ( $U_p$ ): tensión residual que dejará pasar el SPD cuando conduzca el impulso.
- Tensión de impulso ( $U_{imp}$ ): tensión máxima soportable por el equipo dentro del LPZ respectiva.

La tensión de protección está estandarizada por escalones normalizados (1,5 kV / 2,5 kV / 4 kV / etc) y se debe elegir de forma que esta sea el escalón inmediatamente inferior a la tensión de impulso ( $U_{imp}$ ) del equipo. Además, los descargadores se conectan en paralelo y entre fase y tierra respecto a los dispositivos a proteger, por lo que también debe atenderse a que  $U_c > U_f$ .

### SPD de Clase I

Los descargadores de tipo 1 están diseñados para descargar altas corrientes parciales de rayos, asegurando que la sobretensión que llega a los equipos sea inferior a su capacidad de soportar estos impulsos.

En específico, el SPD de tipo 1 se conecta en la zona de BT del transformador de potencia, por lo que:

$$U_c > U_f = \frac{U_{ff}}{\sqrt{3}} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 400 \text{ V} \quad (4.19)$$

$$U_p = 2,5 \text{ kV} \quad (4.20)$$

Se decide elegir el DBM 1 440 FM (961 145) de DEHN mostrado en la Figura 4.20, cuyas características generales se presentan en la Tabla 5.1.

| Descargador de sobretensión SPD Tipo 1 |                             |
|----------------------------------------|-----------------------------|
| Fabricante                             | DEHN                        |
| Modelo                                 | DBM 1 440 FM ( $\times 3$ ) |
| Designación genérica                   | Tipo 1                      |
| Tensión asignada ( $U_n$ )             | 400 V F–N                   |
| Tensión continua máxima ( $U_c$ )      | 440 V                       |
| Nivel de protección ( $U_p$ )          | $\leq 2,5$ kV               |
| Potencia de corte ( $I_{cc}$ )         | 50 kA <sub>rms</sub>        |

Cuadro 4.6: Características generales del SPD Tipo 1



Figura 4.20:  
DBM 1 440 FM

## SPD de Clase II

El descargador de tipo 2 se instala asimismo en una zona de BT, por lo que su tensión de protección sigue el mismo requisito impuesto para el descargador de tipo 1.

Se decide elegir el DG M WE 600 FM (952 307) de DEHN mostrado en la Figura 4.21, cuyas características generales se presentan en la Tabla 4.7.

| Descargador de sobretensión SPD Tipo 2 |                     |
|----------------------------------------|---------------------|
| Fabricante                             | DEHN                |
| Modelo                                 | DG M WE 600 FM      |
| Designación genérica                   | Tipo 2              |
| Tensión asignada ( $U_n$ )             | 480 V (fase–tierra) |
| Corriente de descarga ( $I_n$ )        | 15 kA               |
| Nivel de protección ( $U_p$ )          | $\leq 3$ kV         |

Cuadro 4.7: Características generales del SPD Tipo 2



Figura 4.21: DG M WE 600 FM

Se tiene que cada SPD de tipo 1 es unipolar, por lo que solo puede desviar la sobretensión de una fase concreta. Por ello, es precisa la instalación de tres módulos idénticos de DBM 1 440 FM que en conjunto protejan simultáneamente a las tres fases. Por otro lado, el SPD de tipo 2 ya es un equipo modular que ya integra las tres fases, por lo que no es necesaria la adquisición de módulos adicionales.

## Capítulo 5

# Circuito de Auxiliares y Sistema de control

Mientras que el circuito de potencia se encarga de asegurar una eficaz conversión y transmisión de la energía generada, los sistemas de control de potencia y el servicio de auxiliares constituyen los equipos que optimizan la generación y garantizan la operación ininterrumpida en caso de fallo. Tanto el sistema de control como el de auxiliares se encuentran a 400 V por estándar industrial europeo, como se puede observar en el Plano 1.

En este capítulo se describen tanto los circuitos eléctricos auxiliares encargados de suministrar alimentación, como los sistemas de control que se encargan de gestionar los distintos estados de la turbina.

### 5.1. Sistema de control

El sistema de control de la turbina (WTC) es un elemento central en el diseño de la turbina, ya que tiene como función garantizar una operación eficiente, segura y estable bajo todo tipo de condiciones ambientales y de red. Este sistema se enfrenta a numerosos desafíos asociados con las constantes fluctuaciones del entorno, como la velocidad y dirección del viento, cambios abruptos en la carga eléctrica y no linealidades entre otros. En aerogeneradores de tipo 4, el sistema de controlador es un elemento fundamental.

Está compuesto por una serie de sensores y actuadores, los cuales envían señales de entrada que se mandan al sistema de lógica para generar una serie de señales de salida que se mandan a los actuadores, haciendo que la turbina opere en un estado u otro, como se muestra en la Figura 5.1. De esta forma, los sistemas de control reciben señales de

los parámetros de operación de la turbina que determinan su estado para así ordenar un estado de operación u otro. Este sistema de procesamiento usualmente consiste en un microcontrolador que realiza las funciones de control normales necesarias para operar la turbina, complementada por un sistema de seguridad.

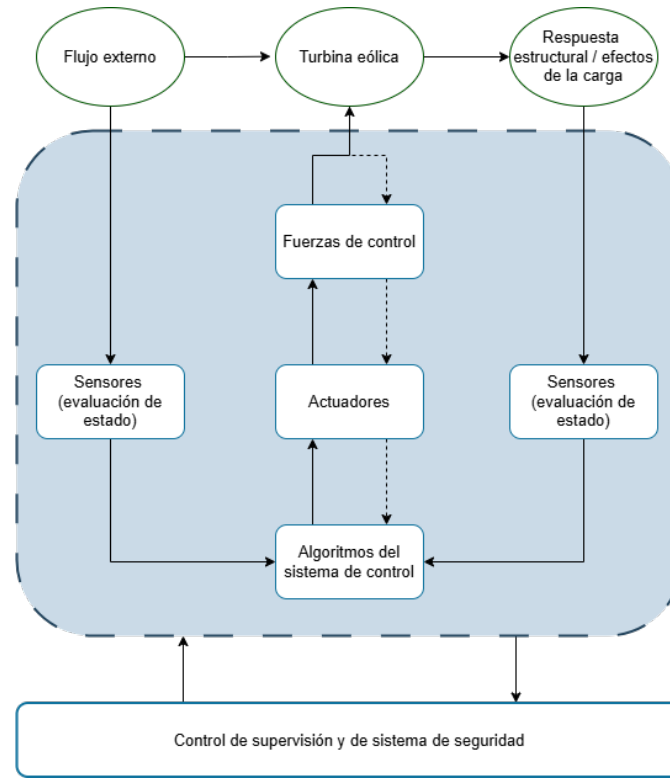


Figura 5.1: Esquema simplificado del sistema de control y seguridad de una turbina, adaptado de [32]

El WTC tiene tres funciones generales: el control de supervisión, el sistema de seguridad, y el control de lazo cerrado. El primero se encarga de gestionar los estados de operación normales de la turbina, el segundo se encarga de detener la turbina en el caso de detectar un fallo crítico, y el último se encarga de maximizar la captura de energía a través del control de orientación, paso y MPPT (como se destacó en la sección 4.2.).

### 5.1.1. Modos de operación

Como se ha distinguido, el sistema de control tiene la función de llevar a cabo el paso y cambio de los distintos estados de la turbina. Dentro de estos, se distinguen los estados llevados a cabo por el control de supervisión, los cuales son asociados con puntos

de operación de servicio o normales, y los estados de emergencia, asociados a las faltas graves a la turbina y tienen que ser ejecutados por el control de seguridad.

Se pueden distinguir los siguientes estados alcanzables por la turbina. Estos estados se pueden dividir en estados temporales y estados permanentes. Los temporales son periodos de transición que ocurren por un tiempo limitado, ya sea como parte de un ciclo normal de operación o debido a condiciones inesperadas. Los permanentes se refieren a estados donde la turbina opera durante periodos de tiempo prolongados bajo condiciones esperadas. El control de supervisión y el control de emergencia son los encargados de llevar de un estado a otro al aerogenerador. En específico, el estado de emergencia domina el funcionamiento de la turbina para casos donde esta entra en estado de emergencia y tiene que realizar paradas de emergencia. Las distintas situaciones bajo las que estos modos deben estar diseñados vienen detallados en el *Guideline Certification for Offshore Wind Turbines* de DNV GL.

### 5.1.2. Control de lazo cerrado

Como se vio en el capítulo anterior en la Sección 4.2., un aerogenerador de velocidad variable tiene dos zonas regímenes principales de control que se subdividen en cuatro regiones de velocidad, mostrados en la Figura 5.2.

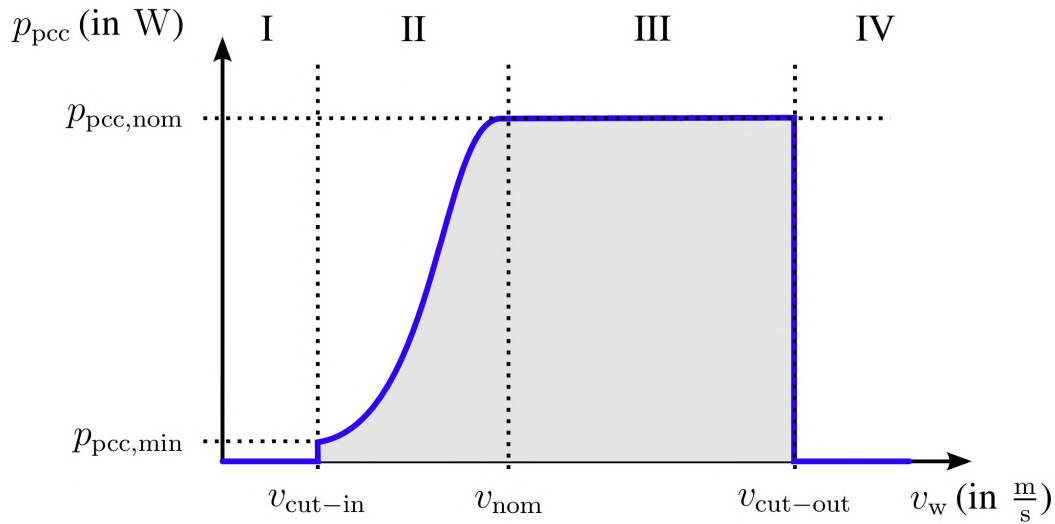


Figura 5.2: Zonas de operación []

- **Velocidad por debajo de cut-in (I):** Por debajo de esta velocidad, donde la

turbina no produce energía. La turbina esta en situación de parada o coasting.

- **Velocidad del rotor entre cut-in y nominal (II):** Esta zona está regida por el controlador (WTC), el cual trata de maximizar la captura de energía y operar en el punto de diseño de tip speed ratio ( $\lambda_D$ ). Este es el punto para el cual los ángulos de ataque y el stagger de la turbina han sido optimizados, por lo acercarse a este punto de operación resulta de interés. El WTC se acerca a este punto variando el torque, el cual varía las revoluciones del rotor de forma que:

$$\Omega \approx \frac{\lambda_D v_\infty}{R} \quad (5.1)$$

- **Velocidad del rotor entre nominal y cut-out (III):** Esta zona está gobernada por el control de paso, el cual se encarga de rotar las palas sobre sus ejes de forma que la potencia generada quede capada a la nominal.
- **Velocidad por encima de cut-out (IV):** Por encima de esta velocidad, no se puede cerciorar un comportamiento seguro de la turbina. La turbina permanece activa hasta que el rotor se frene hasta parada total, donde la potencia generada es nula.

### 5.1.3. Control de orientación

El control de orientación o de guiñada, se encarga de orientar la góndola de la turbina a barlovento, de forma que se maximice la captura de energía eólica y se minimicen las cargas asimétricas en el rotor. Este ángulo se define ente el eje del rotor y la dirección del viento, por lo que suele fijarse a un valor de  $\gamma = 0^\circ$ . A diferencia del control de paso, el control de guiñada se suele mantener de forma que la turbina quede de cara al viento para todas las velocidades de operación.

No obstante, existen algunas situaciones en las que el control de guiñada se ajusta deliberadamente para que haya un desalineamiento. Estas situaciones se dan cuando el objetivo no es maximizar la potencia instantánea. Mientras que el control de paso y de guiñada suelen optimizar la operación de cada turbina de forma individual, estas tienen efectos notorios sobre las turbinas vecinas. Uno de esos efectos es la estela, la cual supone un coste de hasta el 15 % en el AEP [33]. Es por esto que recientemente se busca optimizar el parque, en vez de las turbinas de forma individual. De esta forma, aunque se desalineen una turbina respecto a la dirección del viento, al minimizar las pérdidas por el efecto de estela, se maximiza la generación total del parque. Otra situación común es la de la

limitación contractual. En este caso las turbinas son forzadas a capar su producción por motivos contractuales, ya sea por congestiones en la red, limitar las emisiones acústicas, etc.

Este sistema actúa sobre un rodamiento de bolas que une la torre al chasis, conocido como corona de actuación. La góndola cuenta con unos sensores de viento; comúnmente LiDARs<sup>1</sup> o anemómetros, que informan de la posición de la góndola respecto al viento incidente. De esta forma, los sensores mandan esta información a los actuadores, que orientan la góndola en la dirección óptima aplicando un el par de giro necesario sobre el rodamiento corona.

### Motores seleccionados

Se realiza el estudio en carga, desarrollado por otro compañero de TFG, y se llega a la conclusión de que se dispondrán 6 motores de  $5,5\text{ kW}$  cada uno. Además, deben alcanzar una velocidad de motor de 940 rpm que entreguen una velocidad de orientación de  $0,3^\circ/s$  en la corona.

| Motor sistema de orientación ( $\times 6$ ) |                   |
|---------------------------------------------|-------------------|
| Fabricante                                  | WEG               |
| Modelo                                      | W22 132 M/L 6 IE3 |
| Potencia nominal $P_n$                      | 5,5 kW            |
| Tensión nominal $U_n$                       | 400 V             |
| Velocidad nominal                           | 970 rpm           |
| Par nominal $T_n$                           | 54,1 N·m          |
| Eficiencia a plena carga                    | 88 %              |
| Factor de potencia                          | 0,70              |
| Número de pares de polos                    | 3                 |
| Grado de protección                         | IP 55             |
| Norma de diseño                             | IEC 60034         |
| Peso                                        | 92 kg             |

Cuadro 5.1: Características del motor seleccionado para el sistema de guiñada



Figura 5.3: W22 132 M/L 6 IE3

<sup>1</sup>tecnología de teledección a través de pulsos de luz con el objetivo de medir distancias y movimientos de forma precisa.

## Variadores seleccionados

Se necesitan variadores de frecuencia para cada motor que controlen la velocidad de giro de estos.

| Variador de frecuencia del sistema de orientación ( $\times 6$ ) |                      |
|------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Fabricante                                                       | WEG                  |
| Modelo                                                           | CFW500 G2            |
| Potencia nominal $P_n$                                           | 5,5 kW               |
| Tensión nominal $U_n$                                            | 400 V                |
| Corriente nominal (HD) $I_n$                                     | 14 A                 |
| Frecuencia de red                                                | 48–62 Hz             |
| Factor de potencia                                               | 0,75                 |
| Rendimiento típico                                               | $\geq 97\%$          |
| Tipo de control                                                  | V/f, VVW, Sensorless |
| Grado de protección                                              | IP66                 |
| Peso                                                             | 9,3 kg               |
| Norma de diseño                                                  | IEC 61800-5-1        |

Cuadro 5.2: Características generales del variador CFW500 G2

### 5.1.4. Control de paso

El control de paso, se encarga de rotar cada pala sobre su propio eje en función de la velocidad del viento de forma que controle la potencia extraída y proteja la turbina. De esta forma el ángulo de paso  $\beta$ , definido entre el eje de la cuerda y el plano de rotación, es regulado para optimizar tanto la operación como la longevidad de la turbina.

Cuando el viento está por debajo de la velocidad de arranque (cut-in) las palas quedan en posición de bandera con un ángulo de paso pequeño, de forma que el rotor gire libremente. Una vez se supera el umbral de cut-in, el ángulo de paso se fija en un valor bajo de forma que el ángulo de ataque sea grande, maximizando la captura de energía eólica. Al superar la velocidad nominal, el controlador incrementa progresivamente el ángulo de paso para que la potencia se mantenga en su valor nominal, llegando nuevamente a la posición de bandera. En caso de parada de emergencia por velocidades del viento extrema, las palas se giran rápidamente hasta  $\beta = 90^\circ$ , paralelas al viento para evitar mayores daños.

Esta regulación se realiza mediante controladores PI, que son los que el software Bladed permite utilizar en la versión educativa.

### Motores seleccionados

Al igual que con el control de orientación, la rotación de cada pala se consigue mediante el accionamiento de su respectivo motor y variador electrónico. A partir del estudio en carga del aerogenerador realizado por otro compañero de TFG, se decide emplear un motor y reductor en cada pala, de 33 kW cada uno. Además, se conectará un variador a la salida de las reductoras, que es imprescindible para adaptar la tensión y frecuencia de alimentación al perfil de velocidad y par que requiere el paso de pala, garantizando arranques suaves y frenadas seguras.

Se sobredimensionan los motores elegidos ya que los fabricantes ofrecen niveles de potencia de 30 kW o de 37 kW, por lo que se opta por motores de 37 kW. Se elige un motor con las características presentadas en la Tabla 5.3.

| Motores sistema de paso ( $\times 3$ )     |                   |
|--------------------------------------------|-------------------|
| <b>Fabricante</b>                          | WEG               |
| <b>Modelo</b>                              | W22 IE4 Trifásico |
| <b>Potencia nominal <math>P_n</math></b>   | 37 kW             |
| <b>Tensión nominal <math>U_n</math></b>    | 400 V             |
| <b>Velocidad nominal</b>                   | 1484 rpm          |
| <b>Par nominal <math>T_n</math></b>        | 238,3 N·m         |
| <b>Eficiencia a plena carga</b>            | 95,2 %            |
| <b>Factor de potencia</b>                  | 0,83              |
| <b>Intensidad nominal <math>I_n</math></b> | 67,6 A            |
| <b>Número de pares de polos</b>            | 2                 |
| <b>Grado de protección</b>                 | IP 55             |
| <b>Norma de diseño</b>                     | IEC 60034-1       |
| <b>Peso</b>                                | 394 kg            |

Cuadro 5.3: Características del motor WEG W22 IE4 37 kW B34T



Figura 5.4: W22 IE4 Trifásico

## Variadores seleccionados

Las especificaciones del variador seleccionado del grupo ABB, se muestran en la Tabla 5.4

| Variador de frecuencia del sistema de paso ( $\times 3$ ) |                          |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------|
| Fabricante                                                | ABB                      |
| Modelo                                                    | ACS580-01-073A           |
| Potencia nominal $P_n$                                    | 37 kW                    |
| Tensión nominal $U_n$                                     | 400 V                    |
| Corriente nominal (HD) $I_n$                              | 73 A                     |
| Frecuencia de red                                         | 47,5–63 Hz               |
| Factor de potencia                                        | 0,98                     |
| Rendimiento típico                                        | 97,2 %                   |
| Tipo de control                                           | Escalar, vectorial       |
| Grado de protección                                       | IP55 - <i>solicitado</i> |
| Peso                                                      | 20 kg                    |
| Norma de diseño                                           | IEC 61800-5-1            |

Cuadro 5.4: Características generales del variador ACS580-01-073A-4

## 5.2. Sistema de auxiliares

El sistema de auxiliares tiene la función de alimentar todas las cargas que no forman parte del circuito de potencia. En específico, en esta sección se seleccionará el sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) y el transformador de auxiliares.

### 5.2.1. Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI)

El SAI es un módulo crucial en un aerogenerador cuya función principal es garantizar el funcionamiento continuo cuando la red eléctrica principal no puede proporcionar la alimentación necesaria, ya sea por una falla interna o externa. Por tanto, actúa como una fuente de energía eléctrica independiente y de respaldo. En específico, este sistema está diseñado para soportar una variedad de elementos críticos, incluyendo: el sistema de frenado, el sistema de paso, el sistema de guiñada, los circuitos de control y supervisión, y demás consumos auxiliares como el alumbrado y la climatización.

Internamente, el SAI funciona como un convertidor que almacena energía en baterías

de bus de continua, suministrando esta energía a las cargas cuando la alimentación de la red principal se interrumpe.

### SAI seleccionando

Se estima la carga total que va a tener que alimentar este sistema, como se muestra en la ecuación 5.2. En esta, se estima un valor de  $10\text{ kW}$  para el resto de cargas auxiliares, como se sugiere en las especificaciones preliminares, obteniendo:

$$P_{\text{SSAA}} = P_{\text{pitch}} + P_{\text{yaw}} + P_{\text{elec aux}} = 5,5 \cdot 6 + 37 \cdot 3 + 10 = 154\text{ kW} \quad (5.2)$$

Se opta por el Eaton 9PHD Marine UPS 30 - 200 kW, con las características detalladas en la Tabla 5.5 y Figura 5.6.

| Sistema de alimentación ininterrumpida |                                                   |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Fabricante</b>                      | Eaton                                             |
| <b>Modelo</b>                          | 9PHD Marine                                       |
| <b>Potencia nominal</b>                | 200 kW                                            |
| <b>Tensión nominal</b>                 | $3 \times 400\text{ V} / 230\text{ V} + \text{N}$ |
| <b>Rendimiento nominal</b>             | 97 %                                              |
| <b>Grado de protección</b>             | IP 54                                             |
| <b>Factor de potencia</b>              | 0.8 inductivo a 0.8 capacitivo                    |
| <b>Bypass</b>                          | Estático automático                               |
| <b>Altura</b>                          | 2,011 mm                                          |
| <b>Anchura</b>                         | 1,045 mm                                          |
| <b>Profundidad</b>                     | 1,123 mm                                          |

Figura 5.5: Características generales del Eaton 9PHD Marine



Figura 5.6: Eaton 9PHD Marine 200 kW

### 5.2.2. Transformador de servicios auxiliares

Como se ha visto en las secciones anteriores, los equipos empleados para los sistemas de control y la alimentación ininterrumpida se encuentran a una tensión de  $400\text{ V}$ , por lo que se necesitará un transformador que baje la tensión, ya sea de BT del generador o de MT del parque. La práctica usual es bajar tensión desde el circuito del generador a  $690\text{ V}$ , tras el convertidor de frecuencia. De esta manera, se garantiza continuidad de

suministro incluso cuando la turbina no está inyectando energía a la red principal o cuando la conexión a tierra es interrumpida debido a una avería.

Como se vio en la Sección 4.3, el grupo de conexión estándar es el Dyn11, y por motivos de protección se elegirá un trafo de tipo seco encapsulado nuevamente.

### Selección del transformador de auxiliares

Para el dimensionamiento del transformador, se calcula primero la carga del sistema auxiliar que este debe alimentar. De las especificaciones de los motores y variadores empleados para el sistema de guiñada, se obtiene:

$$P_{\text{elec yaw}} = \frac{P_{\text{mec yaw}}}{\eta_{\text{mot}} \cdot \eta_{\text{var}}} = \frac{5,5 \cdot 6}{0,88 \cdot 0,97} = 38,66 \text{ kW} \quad (5.3)$$

$$S_{\text{yaw}} = \frac{P_{\text{elec yaw}}}{\cos(\phi_{\text{mot}}) \cdot \cos(\phi_{\text{var}})} = \frac{38,66}{0,70 \cdot 0,75} = 73,64 \text{ kVA} \quad (5.4)$$

De las especificaciones de los motores y variadores empleados para el sistema de guiñada, se obtiene:

$$P_{\text{elec pitch}} = \frac{P_{\text{mec pitch}}}{\eta_{\text{mot}} \cdot \eta_{\text{var}}} = \frac{37 \cdot 3}{0,952 \cdot 0,972} = 119,96 \text{ kW} \quad (5.5)$$

$$S_{\text{pitch}} = \frac{P_{\text{elec pitch}}}{\cos(\phi_{\text{mot}}) \cdot \cos(\phi_{\text{var}})} = \frac{119,96}{0,83 \cdot 0,98} = 147,47 \text{ kVA} \quad (5.6)$$

Además, para las cargas auxiliares que supone un factor de potencia de 0,70, obteniendo:

$$S_{\text{aux}} = \frac{P_{\text{elec aux}}}{\cos(\phi_{\text{mot}})} = \frac{10}{0,70} = 14,29 \text{ kW} \quad (5.7)$$

Se tiene entonces que el SAI tiene que alimentar como poco a una potencia de:

$$P_{\text{SSAA}} = P_{\text{elec yaw}} + P_{\text{elec pitch}} + P_{\text{elec aux}} = 38,66 + 119,96 + 10 = 168,62 \text{ kW} \quad (5.8)$$

$$S_{\text{SSAA}} = S_{\text{elec yaw}} + S_{\text{elec pitch}} + S_{\text{elec aux}} = 73,64 + 147,47 + 14,29 = 235,4 \text{ kVA} \quad (5.9)$$

Al igual que el transformador de potencia, el de auxiliares se selecciona también de la gama GEAFOL Neo de Siemens, con las características mostradas en la Tabla 5.5.

| Transformador de auxiliares            |                           |
|----------------------------------------|---------------------------|
| Fabricante                             | Siemens                   |
| Modelo                                 | GEAFOL NEO 4GB5464-3F     |
| Potencia                               | 250 kVA                   |
| Tensión de alta                        | 20 kV                     |
| Tensión de baja                        | 400 V                     |
| Grupo de conexión                      | Dyn11                     |
| Tensión de cortocircuito               | 4 %                       |
| Clase de protección                    | IP 55 - <i>solicitado</i> |
| Pérdidas en vacío $P_0$                | 468 W                     |
| Pérdidas en carga a 120 °C $P_{k,120}$ | 3 400 W                   |
| Refrigeración                          | AF                        |
| Ancho de cabina                        | 765 mm                    |
| Profundidad de cabina                  | 1 510 mm                  |
| Altura de cabina                       | 1 260 mm                  |
| Peso total                             | 1 760 kg                  |

Cuadro 5.5: Datos técnicos del transformador GEAFOL NEO 4GB5464-3F.

### 5.2.3. Protecciones de los auxiliares

La protección del circuito de auxiliares es crítica y debe seguir la misma lógica que las protecciones del circuito de potencia.

En primer lugar, se instala un interruptor automático magnetotérmico en el nivel de MT del transformador auxiliar. Como se mencionó en la Sección 4.4, cumple la función de limitar la aportación de corriente de cortocircuito tanto del generador como de la red, así como las sobrecargas prolongadas. Este será accionado de mismo modo por un relé 87T y tendrá lugar asimismo en la celda instalada en el acoplamiento de cables. Asimismo, el ajuste de este relé seguiría el proceso mostrado en las ecuaciones 5.18.

$$I_{MT} = \frac{\frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{20 \cdot 10^3} = 7,2169 \text{ A} \quad (5.10)$$

$$I_{BT} = \frac{\frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{400} = 360,8439 \text{ A} \quad (5.11)$$

$$I_{MT}^2 = I_R' = \frac{7,2169}{\frac{10}{I_N}} = 0,72169 I_N \quad (5.12)$$

$$I_{MT}^2 = I_R'' = \frac{360,8439}{\frac{400}{I_N}} = 0,9021 I_N \quad (5.13)$$

$$I_{dif} = |I_R'' - I_R'| = |(0,722 - 0,902)| I_N \quad (5.14)$$

$$= 0,18 I_N \quad (5.15)$$

$$I_{frenado} = 0,5 (0,722 + 0,902) I_N \quad (5.16)$$

$$= 0,812 I_N \quad (5.17)$$

$$\text{con } K = 0,5 \quad (5.18)$$

Por tanto, la intensidad de arranque será  $0,18 I_N A$  o mayor.

## Capítulo 6

# Cableado

El cableado es un elemento clave en el diseño del parque eólico, ya que se trata del sistema que transmitirá la energía generada en cada turbina hasta la tierra. En este sistema de transmisión se pueden identificar cinco tipos de cables, como se muestra en la Figura 6.1.

- 1.) Cableado de la turbina: este se refiere al cableado de BT propio de cada aerogenerador que conecta los elementos de este entre ellos.
- 2.) Cableado de interfaz: se refiere al cableado que conecta todas las turbinas eólicas de un mismo parque entre ellas, y lleva su generación a la subestación del parque.
- 3.) Cableado de la subestación marina: se refiere al cableado dentro de la subestación, donde se eleva la tensión de MT a AT con el fin de minimizar las pérdidas en el transporte.
- 4.) Cableado de exportación: se refiere al cableado que exporta toda la energía generada por el parque desde la subestación marina hasta la subestación más cercana de tierra.
- 5.) Cableado de la subestación de tierra: se refiere al cableado de transmisión de energía una vez esta ya llega a tierra y será posteriormente distribuido a los consumos.

En este proyecto se abordarán exclusivamente los cableados de la turbina (1), sin considerar el cableado aguas debajo de la celda de media tensión, la cual será comentada próximamente.



Figura 6.1: Cableado de un parque eólico [2]

Dentro del cableado de la turbina, se pueden diferenciar tres zonas de tensión: la de BT a 690V que sale del generador PMSG y que llega hasta la entrada del transformador de potencia, la de MT que está a la salida de este y que llega hasta la subestación más cercana, y la de auxiliares que también está a BT (400V).

## 6.1. Normativa

En primer lugar, se atenderá a la norma IEC 60228:2023 para conductores aislados, la cual especifica los requisitos para conductores con áreas de sección transversal nominal en el rango de  $0,5 \text{ mm}^2$  hasta  $3500 \text{ mm}^2$ . Dentro de esta norma, se clasifican en función de su construcción y flexibilidad, donde la clase 1 representa los cableados formados por menos hilos y por tanto más rígidos y las clases 5 y 6 representan los formados por un mayor número de hilos finos que permiten una mayor flexibilidad. En el caso del cableado de MT, al tener que atender a los requisitos de orientación de la góndola, se utilizará un cableado de clases mayores al ser más aptos ante esfuerzos torsionales, así como vibraciones del entorno.

### 6.1.1. Baja tensión

A baja tensión, el dimensionamiento y la selección del cableado debe atender a los requisitos establecidos en el reglamento electrotécnico para baja tensión (REBT) [34],

ya que el parque se emplaza en Las Islas Canarias. Este reglamento reúne la normativa que debe seguir el cableado de BT en instalaciones españolas, donde la norma UNE-HD-60364-5-52 es el equivalente de la norma IEC 60364, para instalaciones eléctricas a BT. De forma similar, la norma UNE-EN-50525-2-51 es la equivalente a la norma IEC 60228, detallada para conductores insulados de cables.

A baja tensión, el REBT distingue dos niveles pertinentes a la aplicación: el nivel usual ( $50V - 500V$ ), y el nivel especial ( $500V - 1000V$ ). De esta forma, el circuito de potencia caería en la categoría de nivel especial al estar a  $690V$ , y el de auxiliares en el nivel normal al estar a  $400V$ .

Independientemente del nivel de tensión al que se encuentren, existen tres criterios fundamentales a los que el cableado de BT tiene que atender:

- **Criterio de la corriente admisible o de calentamiento de un conductor:**

Valor máximo de la corriente que circula permanentemente por un conductor, en condiciones específicas, sin que su temperatura de régimen permanente supere un valor especificado.

Las intensidades máximas admisibles en servicio permanente dependen en cada caso de la temperatura máxima que el aislamiento pueda soportar sin alteraciones de sus propiedades eléctricas, mecánicas o químicas.

[34] Esta norma queda recogida en la UNE 20.460-5-523 y se ayuda de tablas específicas para ciertos tipos de cables.

- **Criterio de la caída de tensión:**

Esta norma establece la caída de tensión máxima entre el origen de la instalación y cualquier punto de utilización para distintos tipos de instalaciones (i.e. viviendas, industriales, etc.). Cada tipo de instalación tiene una codificación diferente en el marco ITC-BT.

- **Criterio de la corriente de cortocircuito:**

Esta norma establece que en situaciones de cortocircuito o sobreintensidad breve ( $t < 5\text{ s}$ ), la temperatura del conductor no debe superar el límite térmico de corta duración establecido para el material aislante del cable.

### 6.1.2. Alta tensión

Para tensiones superiores a 1kV, el dimensionamiento del cableado debe atender a los requisitos establecidos en el Reglamento de Alta Tensión (RAT) y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC-LAT) [35]. Al igual que el REBT, el RAT remite a través de las ITC-LAT 05 y 06 a las normas UNE/IEC específicas para cables extruidos de 6 a 30 kV.

El RAT clasifica las instalaciones en cuatro categorías según su tensión nominal: categoría especial ( $\geq 220 \text{ kV}$ ), primera ( $66 < U_n \leq 220 \text{ kV}$ ), segunda ( $30 < U_n \leq 66 \text{ kV}$ ) y tercera ( $1 < U_n \leq 30 \text{ kV}$ ). Por ello, el circuito de MT a  $20 \text{ kV}$  se encuadra en la tercera categoría.

En la práctica, los tres criterios básicos que rigen el cálculo de conductores en BT se mantienen sin cambios en AT:

- **Criterio de la corriente admisible o calentamiento del conductor:** Es el valor máximo de corriente que el cable puede conducir de forma permanente sin que su temperatura supere el límite térmico del aislamiento. El RAT remite a la ITC-RAT 05 y, para cables extruidos hasta 30 kV, a las tablas específicas de la ITC-LAT 06, equivalentes a las de la UNE-60364 empleadas en BT. De igual modo, los factores de corrección por temperatura, agrupamiento o tipo de tendido se aplican de forma idéntica.
- **Criterio de la caída de tensión:** El RAT no fija un valor numérico como hace el REBT, se exige simplemente que la instalación funcione en condiciones técnicas adecuadas.
- **Criterio de la corriente de cortocircuito:** El conductor ha de soportar térmicamente el cortocircuito previsto durante el tiempo de disparo de las protecciones. En el aerogenerador, esta intensidad está limitada por el transformador de potencia y el interruptor de celda que abre en 2-3 ciclos de red, de modo que este criterio no resulta dimensionante, al quedar la sección restringida por el criterio de calentamiento.

## 6.2. Cableado del circuito de potencia, 690 V

La longitud de la línea suele ser determinante en el criterio de la caída de tensión, es decir, cuanto más largo sea el conductor, mayor será la caída por este. Debido a que

el circuito de potencia a BT incluye únicamente el recorrido desde el generador hasta el transformador de potencia dentro de la góndola, se puede despreciar el efecto de esta caída, por lo que no se atenderá al criterio de caída de tensión en el dimensionamiento de este cableado.

Se despreciará también el criterio de cortocircuito, dado que la celda de media tensión incluye protecciones que cumplen la función de limitar tanto la corriente de cortocircuito como la duración de este.

De esta forma, se atenderá exclusivamente al criterio de corriente máxima admisible o de calentamiento, que tiene que verificar la desigualdad mostrada en la ecuación 6.1. Este criterio tiene en cuenta las temperaturas de trabajo esperadas, aplicando un factor de corrección para temperaturas no normalizadas. En concreto, se estima que la temperatura de operación de la góndola está alrededor de los  $50^{\circ}C$ , mientras que la temperatura estándar de trabajo para conductores de cobre en instalación al aire en galerías ventiladas es de  $40^{\circ}C$ .

$$I_z K_t K_a \geq I_b K_g \quad (6.1)$$

$I_z$ : Intensidad máxima admisible, tabulada

$K_t$ : Factor de corrección de temperatura, tabulado.

$K_a$ : Factor de corrección de agrupamiento, tabulado.

$I_b$ : Intensidad de diseño, calculada.

$K_g$ : Factor de sobredimensionamiento para instalaciones generadores a BT, tabulado.

En primer lugar, se calcula la corriente máxima de diseño:

$$I_b = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cos(\varphi)} = \frac{5,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 0,9} = 5\,113,41 \text{ A} \quad (6.2)$$

Tanto el REBT como GL recomiendan el uso de conductores de cobre con un aislamiento o bien de Polietileno reticulado (XLPE) o bien de Etileno Propileno (EPR) para el cableado de potencia, cuya temperatura máxima en servicio permanente es de  $90^{\circ}C$  para ambos. A partir de la Tabla 13 del Apéndice D, se obtiene el factor de corrección de temperatura para este tipo de conductores, con  $K_t = 0,90$  para  $T = 50^{\circ}C$ . Por otro lado, el factor de sobredimensionamiento para instalaciones generadoras a BT es 1,25, por lo que  $K_g = 1,25$ . Finalmente, se supone que el agrupamiento de cables sigue el de una instalación con bandejas escalera y un único circuito trifásico, ( $K_a = 1$ ).

Se obtiene por tanto:

$$I_z \geq \frac{I_b K_g}{K_t K_a} = \frac{1,25 \cdot 5\,113,41}{0,90 \cdot 1} = 7\,101,96 \text{ A} \quad (6.3)$$

$$I_z \geq 7\,101,96 \text{ A} \quad (6.4)$$

Sin embargo, este valor es muy superior a los normalizados en la tabla, por lo que se precisarán varios conductores por fase. El mínimo número de conductores por fase para entrar en una corriente estandarizada en las tablas es entonces 8, por lo que se emplearán 8 ternas.

$$\frac{7\,101,96}{\text{número de ternas}} \leq 915 \quad (6.5)$$

$$\text{número de ternas} = 8 \quad (6.6)$$

$$I_z = \frac{7\,101,96}{8} = 887,75 \text{ A} \quad (6.7)$$

Se seleccionaría entonces un cableado de sección de  $630 \text{ mm}^2$ .

Se opta finalmente por un cableado fabricado por Prysmian Group, cuyos datos técnicos se encuentran en la Tabla 6.1.

| Cableado del circuito de potencia                                   |                              |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Fabricante</b>                                                   | Prysmian Group               |
| <b>Modelo</b>                                                       | Flextrex Max H07RN-F/DN-F    |
| <b>Tensión</b>                                                      | 0,6/1kV                      |
| <b>Sección</b>                                                      | $1 \times 630 \text{ mm}^2$  |
| <b>Intensidad admisible al aire a <math>30^\circ\text{C}</math></b> | 870 A                        |
| <b>Conductor</b>                                                    | Cobre                        |
| <b>Aislamiento</b>                                                  | Elastómero reticulado (XLPE) |
| <b>Flexibilidad según IEC 60228</b>                                 | Clase 5                      |
| <b>Temperatura máxima en servicio</b>                               | $90^\circ\text{C}$           |
| <b>Temperatura máxima en cortocircuito</b>                          | $250^\circ\text{C}$          |
| <b>Peso</b>                                                         | 7 370 kg/km                  |

Cuadro 6.1: Datos técnicos del Flextrex Max H07RN-F/DN-F.

### 6.3. Cableado de media tensión 20 kV

Para el dimensionamiento del cableado del circuito de media tensión se seguirán los criterios enunciados en el RAT. Al tener las protecciones descritas en la celda de MT y que el RAT no lo exige, no se atenderá al criterio de caída de tensión.

Por otra lado, se satisfecerán tanto el criterio de intensidad admisible o calentamiento como el de cortocircuito.

A diferencia del cableado del circuito de potencia, el cableado de MT tiene una longitud considerable, ya que conecta la salida del transformador de potencia a la entrada de la celda de media tensión. Como se ha comentado en la Sección 4.4, ésta se encuentra en el acoplamiento de cables, aproximadamente a 62 m sobre el fondo marino, mientras que según las especificaciones, la torre tiene una altura de 130 m. Se estima por tanto que la longitud del cableado de MT será de aproximadamente 70 m.

Por otro lado, la temperatura estimada en el interior de la torre se prevé que será menor que la de góndola ya que apenas hay fuentes térmicas potentes. Habitualmente, se suele medir una caída de 10 – 15 °C entre el aire de la góndola y el de la parte media-baja de la torre. Por este motivo, se estimará que la temperatura en la torre es de 40 °C.

En primer lugar, se calcula la corriente máxima de diseño de la parte de MT, determinado por el transformador de potencia:

$$I_b = I_{BT} \cdot \frac{U_{BT}}{U_{MT}} = 5\,113,41 \frac{690}{20 \cdot 10^3} = 176,41 \text{ A} \quad (6.8)$$

Puesto que la temperatura de trabajo estimada es de 40 °C, que está tabulado bajo la RAT en la ITC-LAT 06, no es necesario aplicar ningún factor de corrección de temperatura.

La intensidad de operación en régimen permanente no adopta un valor muy alto, por lo que se supondrá que es necesaria una única terna.

Se opta finalmente por un cableado fabricado por Top Cable, cuyos datos técnicos se encuentran en la Tabla 6.2.

| Cableado de media tensión                                           |                               |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Fabricante</b>                                                   | Top Cable                     |
| <b>Modelo</b>                                                       | X-VOLT RHZ1 Cu/OL/20L         |
| <b>Tensión</b>                                                      | 12kV/20kV                     |
| <b>Sección</b>                                                      | $1 \times 70 \text{ mm}^2$    |
| <b>Intensidad admisible al aire a <math>40^\circ\text{C}</math></b> | 275 A                         |
| <b>Conductor</b>                                                    | Cobre                         |
| <b>Aislamiento</b>                                                  | Polietileno reticulado (XLPE) |
| <b>Flexibilidad según IEC 60228</b>                                 | Clase 2                       |
| <b>Temperatura máxima en servicio</b>                               | $90^\circ\text{C}$            |
| <b>Temperatura máxima en cortocircuito</b>                          | $250^\circ\text{C}$           |
| <b>Peso</b>                                                         | 1 340 kg/km                   |

Cuadro 6.2: Datos técnicos del X-VOLT RHZ1 Cu/OL/20L.

#### 6.4. Cableado de auxiliares 400 V

Siguiendo la misma lógica que el cableado del circuito de potencia, se despreciarán los criterios de caída de tensión y de cortocircuito, atendiendo exclusivamente al criterio de intensidad admisible.

De misma forma, se tiene que la temperatura estimada de servicio es de  $50^\circ\text{C}$ , la cual hay que corregir al estándar de  $40^\circ\text{C}$  para instalaciones al aire en galerías ventiladas.

En primer lugar, se calcula la corriente máxima de diseño, donde la corriente de servicio la determina la potencia nominal del trafo de auxiliares:

$$I_b = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 360,84 \text{ A} \quad (6.9)$$

Aunque el cableado de auxiliares no alimente a un generador, sigue siendo necesario aplicar un factor de corrección de 1,25 por estar alimentando a los motores de pitch y yaw, como indica el REBT. Por tanto,  $K_g = 1,25$ .

A efectos de cálculo y con el fin de evitar la sobre-penalización térmica que introduce el factor de agrupamiento, se adoptará la siguiente hipótesis de diseño: aun cuando el circuito de servicios auxiliares alimente varios subsistemas trifásicos independientes (motores de paso, motores de guiñada y cargas auxiliares generales), cada uno de estos

alimentadores discurrirá por una bandeja o canalización exclusiva a lo largo de todo su trazado. De este modo se garantiza que, en cada trayecto, el número de circuitos paralelos sea uno, lo que permite aplicar  $K_a = 1,00$  según la Tabla 14 del REBT.

Se obtiene por tanto:

$$I_z \geq \frac{I_b K_g}{K_t K_a} = \frac{360,84 \cdot 1,25}{0,90 \cdot 1} = 501,17 A \quad (6.10)$$

$$I_z \geq 501,17 A \quad (6.11)$$

El mínimo número de conductores por fase para entrar en una corriente estandarizada en las tablas es entonces dos, por lo que se emplearán dos ternas.

$$\frac{501,17}{\text{número de cables}} \leq 915 \quad (6.12)$$

$$\text{número de cables} = 2 \quad (6.13)$$

$$I_z = \frac{501,17}{2} = 250,59 A \quad (6.14)$$

Se seleccionaría entonces un cableado de sección de  $95 \text{ mm}^2$ . Se opta finalmente por un cableado fabricado por Prysmian Group, cuyos datos técnicos se encuentran en la Tabla 6.3.

| Cableado del circuito de auxiliares                           |                                 |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Fabricante</b>                                             | Prysmian Group                  |
| <b>Modelo</b>                                                 | Afumex Class ATEX RZ1MZ1-K (AS) |
| <b>Tensión</b>                                                | 0,6/1kV                         |
| <b>Sección</b>                                                | $1 \times 95 \text{ mm}^2$      |
| <b>Intensidad admisible al aire a <math>30^\circ C</math></b> | 328 A                           |
| <b>Conductor</b>                                              | Cobre recocido                  |
| <b>Aislamiento</b>                                            | Elastómero reticulado (XLPE)    |
| <b>Flexibilidad según IEC 60228</b>                           | Clase 5                         |
| <b>Temperatura máxima en servicio</b>                         | $90^\circ C$                    |
| <b>Temperatura máxima en cortocircuito</b>                    | $250^\circ C$                   |
| <b>Peso</b>                                                   | 7 337 kg/km                     |

Cuadro 6.3: Datos técnicos del Afumex Class ATEX RZ1MZ1-K.

## Capítulo 7

# Conclusión

En este Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo el diseño completo de los circuitos eléctricos de un aerogenerador offshore de 5 MW, abordando de forma integrada la evacuación de potencia, el suministro de servicios auxiliares y el sistema de control. Tras validar los parámetros generales en Bladed, se definieron y dimensionaron los equipos clave —convertidor back-to-back, transformadores, celdas de media tensión, SAI y variadores— y se calculó el tendido de cables en baja (690 V), auxiliar (400 V) y media tensión (20 kV). Este enfoque ha garantizado la eficiencia de la transmisión de energía y la continuidad operativa incluso ante fallos puntuales de red.

La fase colaborativa inicial facilitó identificar las demandas de tensión, corriente y frecuencia en puntos críticos —convertidor MSC/GSC, bus CC y transformador seco 0,69 kV/20 kV— así como las protecciones elementales de la celda de media tensión. A continuación, el estudio individual profundizó en el dimensionamiento de los conductores XLPE y sus secciones, asegurando que fueran capaces de soportar las corrientes nominales y las temperaturas de servicio bajo condiciones reales de mar abierto.

El circuito de servicios auxiliares, con un SAI marino de Eaton y un transformador dedicado, garantiza la alimentación de sistemas críticos (iluminación, climatización, freno y comunicaciones) incluso durante breves interrupciones de red. Por su parte, el Wind Turbine Controller orquesta el pitch system (tres motores de 37 kW con variadores) y el yaw system (seis motores de 5,5 kW con variadores), optimizando la captura de potencia y manteniendo la orientación adecuada frente a las variaciones del viento.

Finalmente, la solución propuesta demuestra que es posible alcanzar un diseño eléctrico robusto, conforme a la normativa y equilibrado en términos de coste y fiabilidad. Aun partiendo de una sobresimplificación intencionada del emplazamiento (profundidad

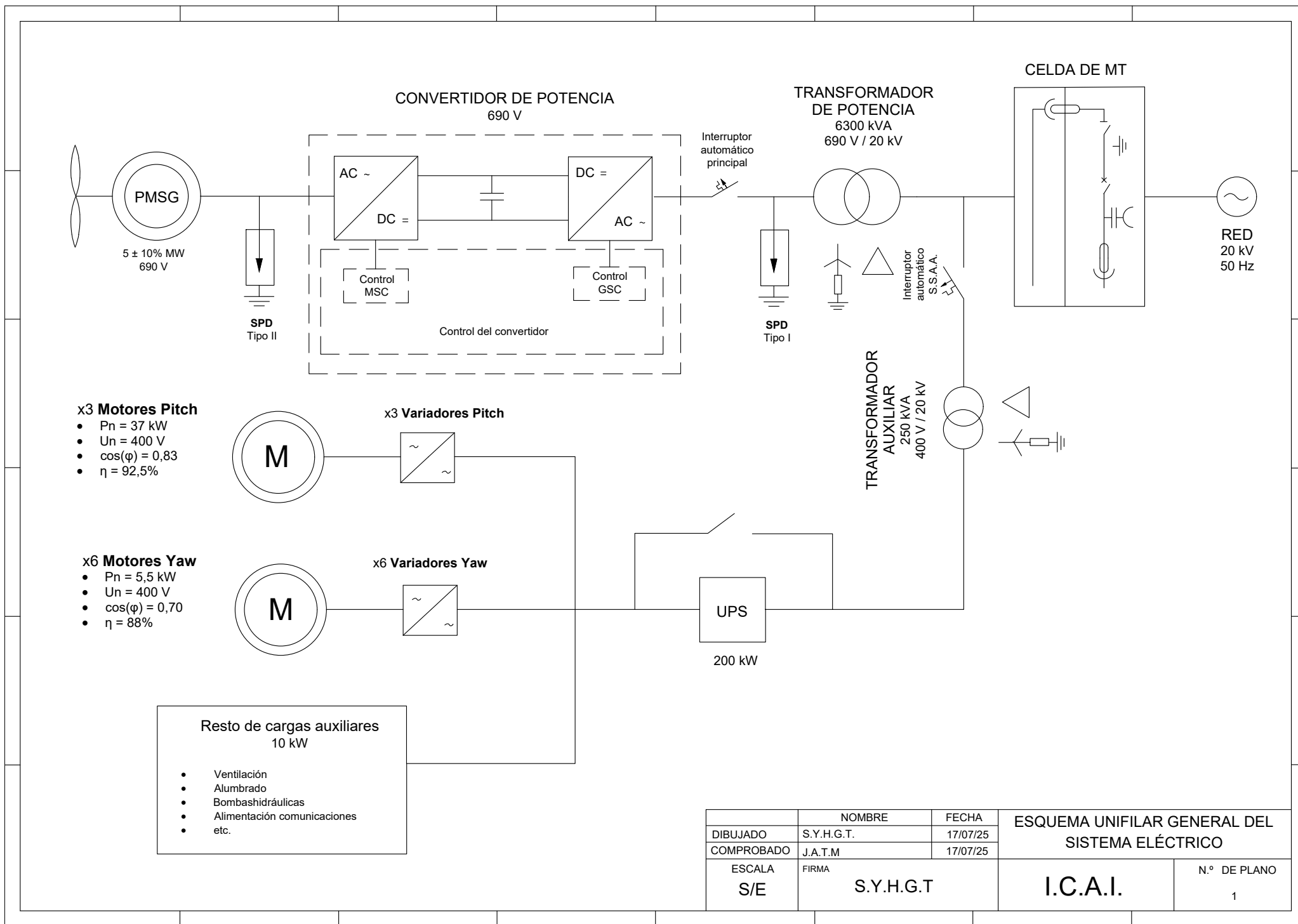
de referencia de 45 m en Granadilla–Arico, recurso eólico representativo y puerto cercano), los resultados conservan su validez técnica y ofrecen una base adaptable a futuras implantaciones offshore.

Cabe señalar, sin embargo, que para no alargar excesivamente esta memoria se han dejado fuera varios aspectos que en un proyecto real resultarían indispensables: las protecciones avanzadas contra fallos a tierra, la coordinación fina entre relés y fusibles y las comunicaciones internas basadas en protocolos como IEC 61850 entre otros. Estos elementos, aunque fundamentales, requerirían desarrollos específicos que exceden el alcance de este TFG.

## Apéndice A

### Plano de los circuitos eléctricos





| NOMBRE     |                 | FECHA    | ESQUEMA UNIFILAR GENERAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO |   |
|------------|-----------------|----------|------------------------------------------------|---|
| DIBUJADO   | S.Y.H.G.T.      | 17/07/25 |                                                |   |
| COMPROBADO | J.A.T.M         | 17/07/25 | I.C.A.I.                                       |   |
| ESCALA S/E | FIRMA S.Y.H.G.T |          |                                                |   |
|            |                 |          | N.º DE PLANO                                   | 1 |

## Apéndice B

### Especificaciones preliminares

## ESPECIFICACIONES PRELIMINARES DEL AEROGENERADOR MARINO

- Clase IEC: I
- Turbulencia: B (según GL)
- Condiciones de viento (emplazamiento A): 10,6 m/s de velocidad media, K Weibull 1,979
- Profundidad emplazamiento A: 41 m
- Condiciones de viento (emplazamiento B): 10,8 m/s de velocidad media, K Weibull 1,985
- Profundidad emplazamiento B: 50 m
  
- Potencia eléctrica generada: 5 MW+10%
- Diámetro rotor aerodinámico: 126 m
- Rango de viento operativo: 3,5m/s-30m/s
- Tipo generador: síncrono a imanes permanentes
- Tipo de transmisión: directa.
- Revoluciones mínimas/nominales/máximas: 6 rpm/12 rpm/ 20rpm
- Ángulo de inclinación eje principal: +6 grados.
- Angulo de conicidad de las palas: -3 grados.
- Longitud de las palas: 61,5m
- Diámetro del buje: 3m
- Altura buje sobre el nivel medio del mar: 92m
  
- Clase sistema de control: control de paso
- Velocidad máxima giro palas: 8 grados/segundo
- Tiempo de aceleración giro: 0,2 segundos.
- Coordenadas del centro geométrico del buje: X=-5213; Z=3148mm
- Masa del buje (sin incluir las palas): 4E4 kg (en el centro geométrico)
- Sistema de coordenadas: coordenadas de orientación (Yaw System Coordinates según GL)
- Origen de coordenadas: cruce del plano horizontal 200 mm sobre la torre con el eje de la torre.
- Amortiguamiento de los modos de resonancia de la pala (todos los modos): 0,477%
  
- Posición del cojinete anterior: XA= -3197; ZA= 2936mm
- Posición del cojinete posterior: XB= 950; ZB=2500mm
- Diámetro interno del rotor en el generador: 6800 mm
- Masas rotóricas de la transmisión más generador: 5 E4 kg
- Masas no rotóricas de transmisión+generador: 5,5E4 kg
- Centro de masas de la transmisión más generador: X=-1340, Z=2710mm
- Pérdidas mecánicas de la transmisión (incluido rotor generador): 4%
  
- Dimensiones de la góndola: cilindro con diámetro 8,5 m, longitud 8m
- Masa global de la góndola (no incluido rotor aerodinámico): 2E5 kg
- Centro de masas de la góndola: X=- 1000; Z=+3000mm
- Diámetro interior torre: 5700 mm
- Altura sumergida flotante: 45 m
- Altura entrada acoplamiento cables: 62 m
- Altura total torre A: 130 m
- Masa total torre en espera del diseño: 1,9E6 kg
  
- Diámetro entrehierro del generador: 7000 mm
- Entrehierro del generador: 6 mm
- Número de polos: 360
- Longitud axial de los polos y yugos: 1300 mm
- Altura/anchura de los polos (imanes): 18mm/42,5 mm
- Clase de los imanes: N3616

Altura de yugos rotórico/estatórico : 15mm/13mm  
 Altura y anchura de las ranuras estatoricas: 83mm/9,26 mm  
 Número de ranuras por paso polar: 3  
 Resistencia del estator: calcular  $7,7E-2/30$  ohmios  
 Impedancia síncrona: calcular  $3,5E-2$  ohmios  
 Pérdidas en el hierro: calcular  $4,4E4$  W  
 -Rendimiento del generador: calcular 95%  
 -Tensión nominal: 690V  
 -Factor de potencia: 0,9  
 Máxima corriente del convertidor: 6E3A  
 Máxima tensión del convertidor: 800V  
 Rendimiento del convertidor: 97%  
 Potencia de cargas auxiliares:  $1E4$  W

Diámetro primitivo de sistema de orientación: 5925 mm  
 Módulo sistema de orientación: 24 mm  
 Velocidad de orientación: 0,3grados/segundo  
 Tiempo de aceleración giro: 6 segundos  
 Par nominal de cada accionamiento: 49,0 kNm  
 Par de pico de cada accionamiento: 98,1 kNm  
 Relación engranajes: 1253,6  
 Z piñón: 14  
 Potencia nominal motor: 5,5 kW  
 Velocidad motor: 940 rpm  
 Rendimiento (motor+reductora): 70,00%

#### Condiciones marítimas

Máxima altura significativa de ola (50 años): 5,08 m  
 Periodo pico de ola: 11,01 segundos  
 Densidad del agua:  $1027 \text{ kg/m}^3$   
 Máxima variación del nivel del mar (50 años): 3,6 m  
 Máxima velocidad de corriente marina (50 años): 1,3 m/s

## CARGAS AERODINÁMICAS EN EL CENTRO DEL BUJE (estimación preliminar)

| HUB SHAFT EXTREM LOADS<br>(according to GL) |     | Caso<br>de | PSF  | Fx            | Fy            | Fz             | Fyz           | Mx            | My              | Mz              | Myz            | Description                             | Azimu<br>th | BldPi<br>tch1 |
|---------------------------------------------|-----|------------|------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------------------------------|-------------|---------------|
| (FAST simulations)                          |     | carga      |      | [KN]          | [KN]          | [KN]           | [KN]          | [KNM]         | [KNM]           | [KNM]           | [KNM]          |                                         | (deg)       | (deg)         |
| Min                                         | Fx  | 1,5        | 1,2  | <b>-331,7</b> | -16,7         | -1431,6        | 1469,5        | -0,1          | 486,6           | 925,4           | 925,4          | Producción. Ráfaga. Caída<br>tensión.   | 316,1       | 17,0          |
| Max                                         | Fx  | 1,3        | 1,35 | <b>1375,7</b> | 114,4         | -1751,0        | 1754,7        | 6453,0        | 430,7           | 10053,5         | 10062,7        | Producción. Ráfaga. Cambio<br>direc.    | 315,6       | 1,9           |
| Min                                         | Fy  | 1,2        | 1,35 | 212,5         | <b>-286,3</b> | -1590,3        | 1615,9        | 5248,8        | 3437,1          | -10058,9        | 10629,9        | Producción. Turbulencia<br>extrema      | 94,0        | 32,7          |
| Max                                         | Fy  | 6,4        | 1,2  | 69,7          | <b>233,8</b>  | -1508,4        | 1526,4        | 0,0           | -328,3          | -618,4          | 700,1          | Parada. Turbulencia<br>normal           | 85,9        | 90,0          |
| Min                                         | Fz  | 1,3        | 1,35 | 1082,3        | 16,9          | <b>-1933,2</b> | 1933,3        | 6293,7        | -10077,8        | -12044,7        | 15704,6        | Producción. Ráfaga. Cambio<br>direc.    | 151,4       | -1,0          |
| Max                                         | Fz  | 7,2        | 1,1  | 74,6          | 21,2          | <b>-1188,0</b> | 1188,2        | 0,0           | 656,0           | 90,0            | 662,2          | Parada. Condición fallo.                | 135,0       | 90,0          |
|                                             |     |            |      |               |               |                |               |               |                 |                 |                |                                         |             |               |
| Max                                         | Fyz | 1,3        | 1,35 | 1096,5        | 24,2          | -1933,2        | <b>1933,4</b> | 6343,7        | -10094,0        | -11912,4        | 15613,9        | Producción. Ráfaga. Cambio<br>direc.    | 152,8       | -0,9          |
| Min                                         | Mx  | 1,4        | 1,2  | 447,2         | -14,8         | -1410,0        | 1479,2        | <b>-0,4</b>   | 1538,4          | -3450,0         | 3450,0         | Producción. Viento<br>normal. Caída red | 67,5        | 28,5          |
| Max                                         | Mx  | 1,6        | 1,35 | 531,6         | -65,3         | -1591,7        | 1678,1        | <b>6453,0</b> | 2936,3          | 3122,6          | 7168,8         | Producción. Ráfaga<br>extrema.          | 315,0       | 28,4          |
| Min                                         | My  | 1,2        | 1,35 | 429,6         | -210,5        | -1514,7        | 1529,3        | 6420,6        | <b>-11712,6</b> | 1952,1          | 11874,2        | Producción. Turbulencia<br>extrema      | 188,8       | 30,9          |
| Max                                         | My  | 1,3        | 1,35 | 1006,7        | -54,2         | -1904,9        | 1905,6        | 6143,9        | <b>15862,5</b>  | -2393,6         | 16042,1        | Producción. Ráfaga. Cambio<br>direc.    | 23,3        | -1,0          |
| Min                                         | Mz  | 1,3        | 1,35 | 981,5         | -80,1         | -1567,4        | 1569,4        | 6453,0        | -7408,8         | <b>-12842,6</b> | 14826,4        | Producción. Ráfaga. Cambio<br>direc.    | 126,6       | -0,9          |
| Max                                         | Mz  | 1,3        | 1,35 | 989,7         | -42,2         | -1898,1        | 1898,6        | 6057,5        | -5904,9         | <b>14904,0</b>  | 16031,1        | Producción. Ráfaga. Cambio<br>direc.    | 261,8       | -1,0          |
|                                             |     |            |      |               |               |                |               |               |                 |                 |                |                                         |             |               |
| Max                                         | Myz | 1,3        | 1,35 | 1006,7        | -54,2         | -1904,9        | 1905,6        | 6143,9        | 15862,5         | -2393,6         | <b>16042,1</b> | Producción. Ráfaga. Cambio<br>direc.    | 23,3        | -1,0          |

## Apéndice C

# Catálogos

### Índice general

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| C.1. Convertidor de potencia . . . . .                | 89  |
| C.2. Transformador de potencia . . . . .              | 91  |
| C.3. Celda de Media Tensión . . . . .                 | 93  |
| C.4. SPDs . . . . .                                   | 94  |
| C.4.1. Tipo 1 . . . . .                               | 94  |
| C.4.2. Tipo 2 . . . . .                               | 95  |
| C.5. Sistema de guiñada . . . . .                     | 96  |
| C.5.1. Motores de guiñada . . . . .                   | 96  |
| C.5.2. Variadores de guiñada . . . . .                | 97  |
| C.6. Sistema de paso . . . . .                        | 98  |
| C.6.1. Motores de paso . . . . .                      | 98  |
| C.6.2. Variadores de paso . . . . .                   | 99  |
| C.7. Sistema de Alimentación Ininterrumpida . . . . . | 100 |
| C.8. Transformador de auxiliares . . . . .            | 100 |
| C.9. Cableado . . . . .                               | 101 |
| C.9.1. Cableado de potencia, 690V . . . . .           | 101 |
| C.9.2. Cableado de media tensión, 20kV . . . . .      | 102 |
| C.9.3. Cableado de auxiliares, 400V . . . . .         | 103 |

## C.1. Convertidor de potencia

**ABB**

**LOW VOLTAGE WIND CONVERTERS**  
**ABB wind turbine converters**  
 ACS880, 800 kW to 8 MW

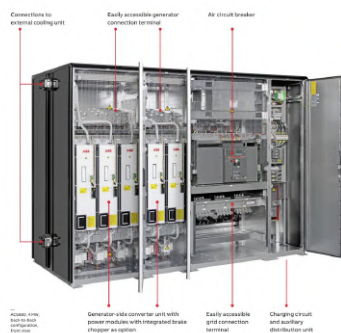


ABB

ABB WIND CONVERTERS, ACS880 WIND TURBINE CONVERTERS

### ACS880 4 MW revealed

The ACS880 wind turbine converter is designed for easy maintenance.



**ABB WIND CONVERTERS, ACS880 WIND TURBINE CONVERTERS**

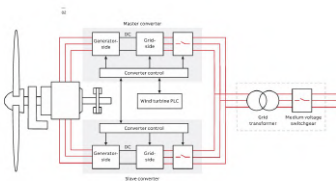
### Efficiency

#### Redundant configuration for high yield

**Twin converters**  
 Instead of having a single ACS880 cabinet, ABB offers the design option of two separate cabinets with parallel connected converters. Each of these sub-converters can be activated and deactivated, depending on the wind conditions and grid limitations. Operation at partial load with a single converter reduces losses.

**Redundancy for maximum availability**  
 The twin converter setup significantly increases the number's availability in the unlikely event that one sub-converter or power module fails, the faulty unit is disconnected and the converter continues operation according to the technical capabilities of one sub-converter. Repair can be planned and scheduled without a total loss of production.

**Online reconfiguration**  
 In traditional industrial converter setups, the change in available power affects the control and protection and requires a restart. The ACS880 converter can be reconfigured online without stopping the wind turbine.

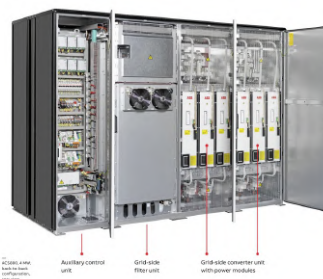


ABB

ACS880 4 MW REVEALED

### Fast servicing

- Modular construction for easy troubleshooting and fast replacements
- Easy access to components to speed up maintenance and repair work
- All converter service activities require front access only
- Remote software updates
- Easy to send the latest converter data to the customer's technical experts or an ABB specialist for analysis
- Easy access to generator and grid connection terminals



## Technical data

### ACS880 full power wind turbine converter

| Converter model                                      | ACS880-77LC in-line configuration                                                                 | ACS880-87LC back-to-back configuration |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Converter type                                       | Full power converter for permanent magnet and asynchronous generators                             |                                        |
| Generator power range                                | 0.8 to 4.6 MW                                                                                     | 1.5 to 8 MW                            |
| Cooling                                              | Liquid cooling with totally enclosed cabinet                                                      |                                        |
| Control principle                                    | Direct torque control (DTC)                                                                       |                                        |
| <b>Electrical data</b>                               |                                                                                                   |                                        |
| Rated grid voltage                                   | 525 to 890 V AC, 3-phase, 50Hz                                                                    |                                        |
| Rated generator voltage                              | 0 to 750 V AC                                                                                     |                                        |
| Nominal grid frequency                               | 50/60 Hz                                                                                          |                                        |
| Efficiency at converter's rated point, typical value | 97%                                                                                               |                                        |
| Generator-side converter dU/dt, measured value       | 1.25 kV/µs                                                                                        |                                        |
| Grid harmonics                                       | 2.5%                                                                                              |                                        |
| Total harmonic current distortion, measured value    | 2.5%                                                                                              |                                        |
| <b>Environmental limits</b>                          |                                                                                                   |                                        |
| Ambient temperature                                  | Transport: -40 to +70 °C<br>Storage: -40 to +70 °C<br>Operation: -30 to +45 °C                    |                                        |
| Coolant inlet temperature                            | +5 to +30 °C                                                                                      | +5 to +45 °C                           |
| Altitude                                             | 0 to 1000 m                                                                                       |                                        |
| Degree of protection                                 | Totally enclosed cabinet<br>IP54 / NEMA type 12                                                   |                                        |
| Cabling connections                                  | Bottom                                                                                            |                                        |
| Cooling connections                                  | Left or right side                                                                                |                                        |
| Cabinet configuration                                | In-line, back-to-back or several separate                                                         |                                        |
| <b>Control</b>                                       |                                                                                                   |                                        |
| Fieldbus interface                                   | EtherCAT, PROFINET I/O, PROFIBUS-DP, CANopen, Modbus, ControlNet, InterBus S, Devicenet           |                                        |
| Interface for PC browser                             | Standard Ethernet                                                                                 |                                        |
| <b>Grid code compliance</b>                          |                                                                                                   |                                        |
| Grid codes                                           | Supports wind turbines to comply with the most stringent grid code requirements.                  |                                        |
| <b>Product compliance</b>                            |                                                                                                   |                                        |
| Product markings                                     | CE, UL2010, North American                                                                        |                                        |
| EMC                                                  | EN 61800-3/4/11 (2000), EN 61800-3 (2004) 2nd environment, unrestricted distribution, Category C3 |                                        |
| Quality assurance system                             | ISO 9001                                                                                          |                                        |
| Environmental system                                 | ISO 14001                                                                                         |                                        |
| <b>Options</b>                                       |                                                                                                   |                                        |
| Sub-converter configuration                          | Available from 0.8 MW                                                                             | Available from 1.5 MW                  |
| Cooling method                                       | Liquid or combined cooling                                                                        |                                        |
| Reconfiguration                                      | Online                                                                                            |                                        |
| Energy storage                                       | Integrated                                                                                        |                                        |
| Generator side protection                            | Output connectors                                                                                 |                                        |
| High coolant inlet temperature                       | Up to +55 °C                                                                                      |                                        |
| High altitude                                        | Up to 4500 m                                                                                      |                                        |
| Product approvals                                    | UL61800-5-1, CSA C22.2 No 274, DNVGL-SE-0441                                                      |                                        |

## Ratings, types and voltages

### ACS880-77LC and ACS880-87LC

| In-line configuration, ACS880-77LC, 690 V |                          |                                |                           |                                                                |               |               |                |                   |
|-------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------|---------------|----------------|-------------------|
| Converter type <sup>1)</sup>              | Typical generator rating | Rated generator apparent power | Rated grid apparent power | Module setup: no. of inverter units + no. of IGBT supply units | Cabinet width | Cabinet depth | Cabinet weight | Cooling flow rate |
|                                           | (kW)                     | (kVA)                          | (kVA)                     | INU + ISU                                                      | (mm)          | (mm)          | (kg)           | (l/min)           |
| ACS880-77LC-860A/800A-7                   | 800                      | 1028                           | 956                       | 1 + 1                                                          | 1400          | 600           | 1200           | 90                |
| ACS880-77LC-1686A/1568A-7                 | 1500                     | 2014                           | 1874                      | 2 + 2                                                          | 2300          | 600           | 2000           | 135               |
| ACS880-77LC-2303A/2128A-7                 | 2300                     | 2991                           | 2782                      | 3 + 3                                                          | 2900          | 600           | 2600           | 175               |
| <b>Twin cabinet versions</b>              |                          |                                |                           |                                                                |               |               |                |                   |
| ACS880-77LC-1720A/1600A-7                 | 1600                     | 2056                           | 1912                      | 2 x (1 + 1)                                                    | 2 x 1400      | 2 x 600       | 2 x 1200       | 2 x 90            |
| ACS880-77LC-3302A/3072A-7                 | 3000                     | 4020                           | 3748                      | 2 x (2 + 2)                                                    | 2 x 2300      | 2 x 600       | 2 x 2000       | 2 x 135           |
| ACS880-77LC-5006A/4656A-7                 | 4600                     | 5982                           | 5564                      | 2 x (3 + 3)                                                    | 2 x 2900      | 2 x 600       | 2 x 2600       | 2 x 175           |

| Back-to-back configuration, ACS880-87LC, 690 V |                          |                                |                           |                                                                |               |               |                |                   |
|------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------|---------------|----------------|-------------------|
| Converter type <sup>1)</sup>                   | Typical generator rating | Rated generator apparent power | Rated grid apparent power | Module setup: no. of inverter units + no. of IGBT supply units | Cabinet width | Cabinet depth | Cabinet weight | Cooling flow rate |
|                                                | (kW)                     | (kVA)                          | (kVA)                     | INU + ISU                                                      | (mm)          | (mm)          | (kg)           | (l/min)           |
| ACS880-87LC-1686A/1568A-7                      | 1500                     | 2014                           | 1874                      | 2 + 2                                                          | 1150          | 1200          | 1800           | 135               |
| ACS880-87LC-2303A/2128A-7                      | 2300                     | 2991                           | 2782                      | 3 + 3                                                          | 1450          | 1200          | 2300           | 175               |
| ACS880-87LC-3302A/3072A-7                      | 3000                     | 3947                           | 3671                      | 4 + 4                                                          | 2300          | 1200          | 2800           | 235               |
| ACS880-87LC-4000A/3800A-7                      | 3800                     | 4760                           | 4541                      | 5 + 5                                                          | 2500          | 1200          | 3500           | 280               |
| ACS880-87LC-4000A/4128A-7                      | 4000                     | 4780                           | 4541                      | 5 + 6                                                          | 2700          | 1200          | 4500           | 300               |
| <b>Twin cabinet versions</b>                   |                          |                                |                           |                                                                |               |               |                |                   |
| ACS880-87LC-5006A/4656A-7                      | 4600                     | 5982                           | 5564                      | 2 x (3 + 3)                                                    | 2 x 1450      | 2 x 1200      | 2 x 2300       | 2 x 175           |
| ACS880-87LC-860A/800A-7                        | 800                      | 1028                           | 956                       | 2 x (1 + 1)                                                    | 2 x 1150      | 2 x 1200      | 2 x 1800       | 2 x 135           |
| ACS880-87LC-1686A/1568A-7                      | 1500                     | 2014                           | 1874                      | 2 x (2 + 2)                                                    | 2 x 1450      | 2 x 1200      | 2 x 2300       | 2 x 175           |
| ACS880-87LC-2303A/2128A-7                      | 2300                     | 2991                           | 2782                      | 2 x (3 + 3)                                                    | 2 x 1450      | 2 x 1200      | 2 x 2300       | 2 x 175           |
| ACS880-87LC-3302A/3072A-7                      | 3000                     | 3947                           | 3671                      | 2 x (4 + 4)                                                    | 2 x 2300      | 2 x 1200      | 2 x 2800       | 2 x 235           |
| ACS880-87LC-4000A/3800A-7                      | 3800                     | 4760                           | 4541                      | 2 x (5 + 5)                                                    | 2 x 2500      | 2 x 1200      | 2 x 3500       | 2 x 280           |
| ACS880-87LC-4000A/4128A-7                      | 4000                     | 4780                           | 4541                      | 2 x (5 + 6)                                                    | 2 x 2700      | 2 x 1200      | 2 x 4500       | 2 x 300           |

Standard cabinet height is 2000 mm. Please see dimensions drawings for exact measurements.  
Ratings shown here are subject to change depending on the selected options.

<sup>1)</sup> Converter type code shows generator and grid side nominal current ratings. For example for ACS880-77LC-860A/800A-7 the generator side current is 860 A and the grid side current is 800 A.

## C.2. Transformador de potencia

### PRODUCT STRUCTURE

- Three limb core**  
Made of grain-oriented and low-loss silicon steel sheets. Two-component sandwich for aggressive environment.
- UV winding**  
Self-type. Turns firmly glued together by means of insulating sheet wrapper material.
- UV winding**  
Consisting of vacuum-potted single turn-type coils.
- Insulation cylinder**  
Radial-form insulation, improve the heat dissipation of transformer.
- HV terminals**  
Optimal layout scheme to adapt for various substations. HV tapping link can adjust itself to system voltage when power off.
- LV terminals**  
Standard arrangement: top Customization: bottom
- Coil support system**  
To isolate core and winding from mechanical vibrations, reduce noise emission.
- Clamping frame and truck**  
Made of steel plate and processed by laser cutting machine with high accuracy. Buffers can lock both horizontally and vertically.
- Load tap changer**  
The on-load tap changer can read the winding temperature, winding current in real time, provide overload alarm, GPS location, safe and secured information cloud platform.



Remarks:  
• Buffer and transformer are not standard configuration.  
• Siemens Energy is a trademark licensed by Siemens AG.

### Power Transformer Technical Datasheet CARECO®

HV Voltage: 33kV/54.5kV/59kV  
LV Voltage: 30kV/16kV, 30kV/5, 30kV/11kV  
Frequency: 50/60/62Hz

HV tapping:  $\pm 2 \times 2.5\%$  and/or  $\pm 5\%$   
Vector group: Dyn11/ Dyn5/Dyn11/ Ynd0/Dd0 or others  
Material of winding: Copper

| Rated Power (kVA) | No-load Loss (W) | On-load Loss (W) 120°C | Short Circuit Impedance (%) | No-load Current (%) | Rated Current (A) | Rated Voltage (kV) | Weight (kg)    | Core Size (mm) | End Flange Dimension (mm) | End Flange Dimension (mm) |
|-------------------|------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|---------------------------|---------------------------|
| 4000              | 7.02             | 29.40                  | 6                           | 64                  | 0.7               | 13800              | 3270x1620x2400 | 4000x2400x2900 |                           |                           |
| 5000              | 8.37             | 34.90                  | 6                           | 66                  | 0.6               | 15200              | 3300x1700x2555 | 4000x2400x3100 |                           |                           |
| 6300              | 9.9              | 40.80                  | 6                           | 68                  | 0.6               | 18000              | 3500x1950x2850 | 4200x2600x3400 |                           |                           |
| 8000              | 11.3             | 46.80                  | 6                           | 68                  | 0.5               | 21200              | 3750x2100x3050 | 4300x2800x3500 |                           |                           |
| 10000             | 12.9             | 55.50                  | 6                           | 68                  | 0.5               | 27700              | 3900x2350x3305 | 4500x2900x3800 |                           |                           |
| 12500             | 15.7             | 64.60                  | 6                           | 70                  | 0.4               | 32740              | 4050x2510x3600 | 4800x2900x4000 |                           |                           |
| 16000             | 19.3             | 76.90                  | 7                           | 70                  | 0.4               | 39500              | 4150x2700x3780 | 4800x3100x4300 |                           |                           |
| 20000             | 22.9             | 85.50                  | 10                          | 74                  | 0.35              | 41800              | 4295x2800x3965 | 5000x3300x4500 |                           |                           |

### GEAFOL®

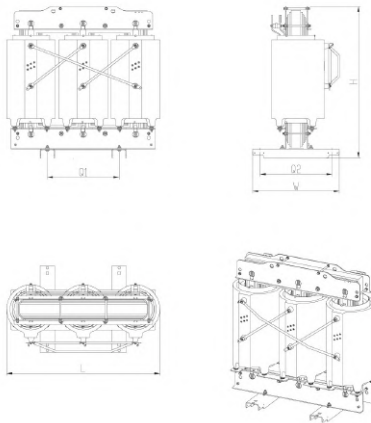
HV Voltage: 33kV/54.5kV/59kV  
LV Voltage: 30kV/16kV, 30kV/5, 30kV/11kV  
Frequency: 50/60/62Hz

HV tapping:  $\pm 2 \times 2.5\%$  and/or  $\pm 5\%$   
Vector group: Dyn11/ Dyn5/Dyn11/ Ynd0/Dd0 or others  
Material of winding: Aluminum

| Rated Power (kVA) | No-load Loss (W) | On-load Loss (W) 120°C | Short Circuit Impedance (%) | No-load Current (%) | Rated Current (A) | Rated Voltage (kV) | Weight (kg)    | Core Size (mm) | End Flange Dimension (mm) | End Flange Dimension (mm) |
|-------------------|------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|---------------------------|---------------------------|
| 4000              | 7.02             | 29.40                  | 6                           | 64                  | 0.7               | 12100              | 3300x1710x2350 | 4000x2400x2900 |                           |                           |
| 5000              | 8.37             | 34.90                  | 6                           | 66                  | 0.6               | 13100              | 3300x1800x2450 | 4100x2500x3000 |                           |                           |
| 6300              | 9.9              | 40.80                  | 6                           | 66                  | 0.6               | 15500              | 3450x1950x2650 | 4200x2600x3100 |                           |                           |
| 8000              | 11.3             | 46.80                  | 6                           | 68                  | 0.5               | 19740              | 3600x2050x2850 | 4300x2800x3300 |                           |                           |
| 10000             | 12.9             | 55.50                  | 6                           | 68                  | 0.5               | 23630              | 3750x2210x3195 | 4500x2900x3500 |                           |                           |
| 12500             | 15.7             | 64.60                  | 6                           | 70                  | 0.4               | 25400              | 3950x2310x3460 | 4700x2900x3700 |                           |                           |
| 16000             | 19.3             | 76.90                  | 7                           | 70                  | 0.4               | 28500              | 4150x2400x3680 | 4900x3100x4000 |                           |                           |
| 20000             | 22.9             | 85.50                  | 10                          | 74                  | 0.35              | 33900              | 4300x2500x4065 | 5100x3300x4400 |                           |                           |

Remark: We reserve the right to make technical changes or modify the contents of this catalogue without prior notice. For rating above 20000kVA pls. contact us for technical data.

### Outline of standard CRT

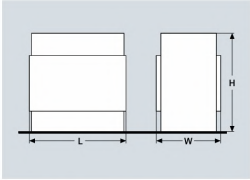


## Selection and Ordering Data

| S    | Rated Power (kVA) | Rated Voltage (kV) | Rated Current (A) | Rated Frequency (Hz) | Rated Temperature (°C) | Rated Short Circuit Impedance (%) | Rated No-load Current (%) | Rated No-load Loss (W) | Rated On-load Loss (W) | Rated Weight (kg) | Rated Core Size (mm) | Rated End Flange Dimension (mm) | Rated End Flange Dimension (mm) |
|------|-------------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 4000 | 10                | 10                 | 10                | 10                   | 10                     | 10                                | 10                        | 10                     | 10                     | 10                | 10                   | 10                              | 10                              |
| 5000 | 10                | 10                 | 10                | 10                   | 10                     | 10                                | 10                        | 10                     | 10                     | 10                | 10                   | 10                              | 10                              |
| 6300 | 10                | 10                 | 10                | 10                   | 10                     | 10                                | 10                        | 10                     | 10                     | 10                | 10                   | 10                              | 10                              |
| 8000 | 10                | 10                 | 10                | 10                   | 10                     | 10                                | 10                        | 10                     | 10                     | 10                | 10                   | 10                              | 10                              |

GEAFOL and CARECO transformers comply with IEC 60076-11 solid power > 3150 kVA are not standardised, or DIN EN 60076-11 and IEC 6032-75-11 without housing. Other versions and special equipment on request. (housing IP, see p. 12), vector group Dyn5, 50 Hz.

# Selection of Housings



Indoor (degree of protection IP20)

| Housing size | Maximum housing dimensions [mm] |      |      | Housing weight [kg] |
|--------------|---------------------------------|------|------|---------------------|
|              | L                               | W    | H    |                     |
| 1            | 1390                            | 1010 | 1335 | 121                 |
| 2            | 1860                            | 1280 | 1535 | 177                 |
| 3            | 1860                            | 1280 | 1885 | 211                 |
| 4            | 2120                            | 1500 | 2120 | 252                 |
| 5            | 2360                            | 1500 | 2340 | 290                 |

Indoor (degree of protection IP23 and IP23D)

| Housing size | Maximum housing dimensions [mm] |      |      | Housing weight [kg] |
|--------------|---------------------------------|------|------|---------------------|
|              | L                               | W    | H    |                     |
| 1            | 1390                            | 1010 | 1395 | 134                 |
| 2            | 1860                            | 1280 | 1595 | 207                 |
| 3            | 1860                            | 1280 | 1945 | 247                 |
| 4            | 2120                            | 1500 | 2225 | 302                 |
| 5            | 2360                            | 1500 | 2495 | 370                 |

Outdoor (degree of protection IP23DW)

| Housing size | Maximum housing dimensions [mm] |      |      | Housing weight [kg] |
|--------------|---------------------------------|------|------|---------------------|
|              | L                               | W    | H    |                     |
| 1            | 1440                            | 1070 | 1540 | 153                 |
| 2            | 1880                            | 1320 | 1845 | 233                 |
| 3            | 1880                            | 1420 | 2245 | 267                 |
| 4            | 2240                            | 1540 | 2480 | 325                 |
| 5            | 2380                            | 1540 | 2950 | 392                 |

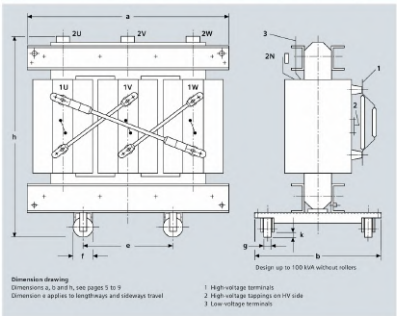
Selection and ordering data\*

| Rated power S <sub>N</sub> [kVA] | Rated voltage HV U <sub>N</sub> [kV] | Order No.                    | Housing size    |
|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-----------------|
| 100                              | 10                                   | 4G850 44-3CY05-OCIA2         | 1               |
|                                  | 20                                   | 4G850 64-3CY05-OCIA2         | 2               |
| 160                              | 10                                   | 4G852 44-3CY05-OCIA2         | 1               |
|                                  | 20                                   | 4G852 64-3CY05-OCIA2         | 2               |
| 250                              | 10                                   | 4G854 44-3CY05-OCIA2         | 2               |
|                                  | 20                                   | 4G854 64-3CY05-OCIA2         | 2               |
| (315) <sup>1)</sup>              | 10                                   | 4G855 44-3CY05-OCIA2         | 2               |
|                                  | 20                                   | 4G855 64-3CY05-OCIA2         | 2               |
| 400                              | 10                                   | 4G856 44-3CY05-OCIA2         | 2               |
|                                  | 20                                   | 4G856 64-3CY05-OCIA2         | 2               |
| (500) <sup>1)</sup>              | 10                                   | 4G857 44-3CY05-OCIA0         | 2               |
|                                  | 20                                   | 4G857 64-3CY05-OCIA0         | 2               |
| 630                              | 10                                   | 4G858 44-3CY05-OCIA0         | 2               |
|                                  | 20                                   | 4G858 64-3CY05-OCIA0         | 2               |
|                                  | 10                                   | 4G858 44-3DY05-OCIA0         | 2               |
|                                  | 20                                   | 4G858 64-3DY05-OCIA0         | 2               |
|                                  | 10                                   | 4G858 44-3GY05-OCIA0         | 3               |
|                                  | 20                                   | 4G858 64-3GY05-OCIA0         | 2               |
|                                  | 10                                   | 4G858 64-3HY05-OCIA0         | 2               |
|                                  | 20                                   | 4G858 64-3HY05-OCIA0         | 2               |
| (800) <sup>1)</sup>              | 10                                   | 4G859 44-3CY05-OCIA0         | 3               |
|                                  | 20                                   | 4G859 64-3CY05-OCIA0         | 3               |
| 1000                             | 10                                   | 4G860 44-3CY05-OCIA0         | 3               |
|                                  | 20                                   | 4G860 64-3CY05-OCIA0         | 3               |
|                                  | 10                                   | 4G860 44-3DY05-OCIA0         | 3               |
|                                  | 20                                   | 4G860 64-3DY05-OCIA0         | 3               |
|                                  | 10                                   | 4G860 44-3GY05-OCIA0         | 3               |
|                                  | 20                                   | 4G860 64-3GY05-OCIA0         | 4               |
|                                  | 10                                   | 4G860 64-3HY05-OCIA0         | 3               |
|                                  | 20                                   | 4G860 64-3HY05-OCIA0         | 4               |
| (1250) <sup>1)</sup>             | 10                                   | 4G861 44-3CY05-OCIA0         | 4               |
|                                  | 20                                   | 4G861 64-3CY05-OCIA0         | 4               |
| 1600                             | 10                                   | 4G862 44-3CY05-OCIA0         | 4               |
|                                  | 20                                   | 4G862 64-3CY05-OCIA0         | 4               |
| (2000) <sup>1)</sup>             | 10                                   | 4G863 44-3CY05-OCIA0         | 5               |
|                                  | 20                                   | 4G863 64-3CY05-OCIA0         | 5               |
| 2500                             | 10                                   | 4G864 44-3DY05-OCIA0         | 5               |
|                                  | 20                                   | 4G864 64-3DY05-OCIA0         | 5               |
|                                  | 10                                   | 4G864 44-3HY05-OCIA0         | 5 <sup>2)</sup> |
|                                  | 20                                   | 4G864 64-3HY05-OCIA0         | 5 <sup>3)</sup> |
| > 2500                           |                                      | Standard housings on request |                 |

\* Other versions and special equipment available on request.  
1) Ratings in brackets are not standardized.  
2) IP20: Height + 100 mm.  
3) IP20/IP23/IP23D/IP23DW: Width and height + 100 mm

Track dimensions

| Rated power S <sub>N</sub> in kVA | Dimensions |     |     |    |
|-----------------------------------|------------|-----|-----|----|
|                                   | a          | f   | g   | k  |
| 315 to 250                        | 630        | 135 | 40  | 45 |
| 315 to 800                        | 670        | 125 | 40  | 45 |
| 1000 to 1600                      | 800        | 160 | 50  | 55 |
| 2000 to 5000                      | 1070       | 210 | 70  | 60 |
| > 5000                            | 1065       | 210 | 130 | 50 |



Dimension drawing  
Dimensions a, f and f<sub>1</sub> see page 5 to 9  
Dimension g applies to lengthways and sideways travel

1 High-voltage terminals  
2 High-voltage taps on HV side  
3 Low-voltage terminals

Notes

The technical data, dimensions and weights are subject to change unless otherwise stated on the individual pages of this catalog. The illustrations are for reference only. All product designations used are trademarks or product names of Siemens AG or of other suppliers. All dimensions in this catalog are given in mm.

The information in this document contains general descriptions of the technical options available, which do not always have to be present in individual cases. The required features should therefore be specified in each individual case at the time of closing the contract.

## C.3. Celda de Media Tensión



### CATALOG

#### SafeRing/SafePlus 12-24kV Gas-insulated ring main unit SafeRing and Compact switchgear SafePlus

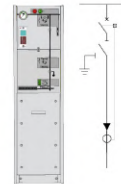


- No live parts exposed
- High visibility and safety
- Safe and easy for operators in both maintenance and operating conditions

DISTRIBUTION SOLUTIONS

13

#### V - Vacuum circuit-breaker module - Technical data



Depth: 751 mm  
Width: 325 mm  
Height: 1336 mm / optional 1100 mm

| Technical data                                               |                          |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------|
| <b>Vacuum circuit-breaker</b>                                |                          |
| Rated voltage                                                | 12 / 17.5 / 24           |
| Power frequency withstand voltage                            | 18 / 28 / 36 kV          |
| Impulse withstand voltage                                    | 50 / 75 / 125 kV         |
| Rated normal current                                         | 630 / 1200 / 1600 A      |
| <b>Breaking operation</b>                                    |                          |
| Rated breaking current                                       | 25 / 31.5 / 40 kA        |
| Making capacity                                              | 100 / 150 / 200 MVA      |
| Short time current 3 sec.                                    | 25 / 31.5 / 40 kA        |
| Number of mechanical operations                              | 2000 close / open manual |
| Electrical and mechanical data                               |                          |
| ES, CS, SS, M: for operating sequence D: open, CD: close, CD |                          |
| <b>Disconnector/disconnector and earthing switch</b>         |                          |
| Rated voltage                                                | 12 / 17.5 / 24           |
| Power frequency withstand voltage                            | 18 / 28 / 36 kV          |
| Rated breaking current                                       | 25 / 31.5 / 40 kA        |
| Impulse withstand voltage                                    | 50 / 75 / 125 kV         |
| Rated normal current                                         | 630 / 1200 / 1600 A      |
| Making capacity                                              | 100 / 150 / 200 MVA      |
| Short time current 3 sec.                                    | 25 / 31.5 / 40 kA        |
| Number of mechanical operations                              | 1000 close / open manual |
| Electrical and mechanical data                               |                          |
| ES, CS, SS, M: for operating sequence D: open, CD: close, CD |                          |

**Common features**  
All modules share many common features. These are described in the chapter "SafeRing/SafePlus configuration".

#### Standard features

- 200 A vacuum circuit-breaker for transformer protection on 630 A vacuum circuit-breaker for feeder protection
- Two position double spring mechanism for vacuum circuit-breaker
- Three position disconnector/earthing switch de-energize from circuit-breaker
- Three position single spring mechanism for disconnector/earthing switch
- Interlocking between vacuum circuit-breaker and disconnector/earthing switch
- Switch position indication for vacuum circuit-breaker and disconnector/earthing switch
- Self-powered electronic protection relay with ring core CT's on cables (only standard on 200 A)
- Trip coil (for relay tripping)
- Cable bushings for special 16 frame with integrated capacitor for voltage indication
- Interface A (200 plug-in) for 200 A vacuum circuit-breaker
- Interface C (600 bolted) for 630 A vacuum circuit-breaker

#### Optional features

- Cable bushings
  - Interface B (400 series plug-in)
  - Interface C (400 series bolted) combinations with integrated voltage divider for voltage indication and integrated sensor for current and voltage monitoring
  - Arc suppressor with signal (GND) wired to terminals
  - Arc point detection (see chapter "Safety")
  - Signal (DMS) from internal pressure indicator wired to terminals (only one each SF<sub>6</sub> gas tank)
- Optional features also available as retrofits**
- Motor operation for vacuum circuit-breaker
  - Auxiliary switches vacuum circuit-breaker position
  - ZNO-HNC disconnector position ZNO-HNC, earthing switch position ZNO-HNC and vacuum circuit-breaker trip signal JND
  - Blocking coil for earthing switch
  - Undervoltage release with/without time delay

14

SAFERING / SAFERPLUS 12-24KV

#### V - Vacuum circuit-breaker module - Interlocking

|                                                 |                                                         |  |                                                                                |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------|
|                                                 |                                                         |  |                                                                                |
| <b>Abbreviations</b>                            |                                                         |  |                                                                                |
| ES                                              | Line-break switch                                       |  |                                                                                |
| DT                                              | Earthing switch                                         |  |                                                                                |
| DB                                              | Circuit-breaker                                         |  |                                                                                |
| SD                                              | Switch-disconnector                                     |  |                                                                                |
| SP                                              | Switch-fuse                                             |  |                                                                                |
| <b>Interlock type</b>                           |                                                         |  |                                                                                |
| <b>Mechanical interlock V-module</b>            |                                                         |  |                                                                                |
| Opening CS                                      | None                                                    |  |                                                                                |
| Opening DB                                      | None                                                    |  |                                                                                |
| Opening SD                                      | CS is open, ES is open, safety compartment door is open |  | Cable compartment interlock is active                                          |
| Opening ES                                      | CS is open, ES is open                                  |  | Standard                                                                       |
| Opening DT                                      | SD is open                                              |  | Standard                                                                       |
| Opening ES                                      | SD is open                                              |  | Standard                                                                       |
| Opening cable compartment                       | ES is closed                                            |  | Optional feature                                                               |
| Opening cable compartment                       | ES is closed                                            |  | Optional feature                                                               |
| Opening DT                                      | Interlocking safety is without voltage                  |  | Optional feature: voltage protection system with signaling contact is required |
| <b>Electrical interlock of module</b>           |                                                         |  |                                                                                |
| Lock on ES                                      | None                                                    |  | Standard feature                                                               |
| Lock on DB                                      | None                                                    |  | Standard feature                                                               |
| Lock on SD                                      | None                                                    |  | Standard feature                                                               |
| Lock on push buttons                            | None                                                    |  | Optional feature                                                               |
| Lock cable compartment cover in closed position | None                                                    |  | Optional feature                                                               |
| Lock cable compartment cover in open position   | None                                                    |  | Optional feature                                                               |
| Key lock on ES                                  | See detail in chapter "Interlocking"                    |  | Optional feature                                                               |
| Key lock on DB                                  | See detail in chapter "Interlocking"                    |  | Optional feature                                                               |

## C.4. SPDs

### C.4.1. Tipo 1

#### Product Data Sheet: DEHNbloc® Maxi 440 / 760



##### DBM 1 440 (961 140)

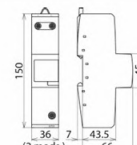
- Extremely high lightning current discharge capacity
- High follow current extinction and limitation due to RADAX Flow technology
- Directly coordinated with DEHNgard surge protective devices without additional cable length



Figure without obligation



Basic circuit diagram DBM 1 440



Dimension drawing DBM 1 440

Coordinated single-pole lightning current arrester with high follow current limitation for  $U_c = 440$  V.

| Type                                                                           | DBM 1 440                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Part No.                                                                       | 961 140                                                                                                                              |
| SPD according to EN 61643-11 / IEC 61643-11                                    | type 1 / class I                                                                                                                     |
| Nominal voltage (a.c.) ( $U_n$ )                                               | 400 V                                                                                                                                |
| Max. continuous operating voltage (a.c.) ( $U_c$ )                             | 440 V                                                                                                                                |
| Lightning impulse current (10/350 $\mu$ s) ( $I_{imp}$ )                       | 35 kA                                                                                                                                |
| Specific energy (W/R)                                                          | 306.25 kJ/ohms                                                                                                                       |
| Nominal discharge current (8/20 $\mu$ s) ( $I_n$ )                             | 35 kA                                                                                                                                |
| Voltage protection level ( $U_p$ )                                             | $\leq 2.5$ kV                                                                                                                        |
| Follow current extinguishing capability (a.c.) ( $I_k$ )                       | 50 kA <sub>res</sub>                                                                                                                 |
| Follow current limitation / Selectivity                                        | no tripping of a 32 A gG fuse up to 50 kA <sub>res</sub> (prosp.)                                                                    |
| Response time ( $t_R$ )                                                        | $\leq 100$ ns                                                                                                                        |
| Max. backup fuse (L) up to $I_k = 50$ kA <sub>res</sub> ( $t_s \leq 0.2$ s)    | 500 A gG                                                                                                                             |
| Max. backup fuse (L) up to $I_k = 50$ kA <sub>res</sub> ( $t_s \leq 5$ s)      | 250 A gG                                                                                                                             |
| Max. backup fuse (L-L')                                                        | 125 A gG                                                                                                                             |
| Temporary overvoltage (TOV) ( $U_T$ ) – Characteristic                         | 760 V / 120 min. – withstand                                                                                                         |
| Operating temperature range (parallel connection) ( $T_{UP}$ )                 | -40 °C ... +80 °C                                                                                                                    |
| Operating temperature range (series connection) ( $T_{US}$ )                   | -40 °C ... +60 °C                                                                                                                    |
| Operating state / fault indication                                             | green / red                                                                                                                          |
| Number of ports                                                                | 1                                                                                                                                    |
| Cross-sectional area (L, L', N/PEN) (min.)                                     | 10 mm <sup>2</sup> solid / flexible                                                                                                  |
| Cross-sectional area (L, N/PEN) (max.)                                         | 50 mm <sup>2</sup> stranded / 35 mm <sup>2</sup> flexible                                                                            |
| Cross-sectional area (L') (max.)                                               | 35 mm <sup>2</sup> stranded / 25 mm <sup>2</sup> flexible                                                                            |
| For mounting on                                                                | 35 mm DIN rails acc. to EN 60715                                                                                                     |
| Enclosure material                                                             | thermoplastic, red, UL 94 V-0                                                                                                        |
| Place of installation                                                          | indoor installation                                                                                                                  |
| Degree of protection                                                           | IP 20                                                                                                                                |
| Capacity                                                                       | 2 module(s), DIN 43880                                                                                                               |
| Approvals                                                                      | UL, CSA                                                                                                                              |
| Extended technical data:                                                       | Use in switchgear installations with prospective short-circuit currents of more than 50 kA <sub>res</sub> (tested by the German VDE) |
| – Max. prospective short-circuit current                                       | 100 kA <sub>res</sub> (220 kA <sub>peak</sub> )                                                                                      |
| – Limitation / Extinction of mains follow currents                             | up to 100 kA <sub>res</sub> (220 kA <sub>peak</sub> )                                                                                |
| – Max. backup fuse (L) up to $I_k = 100$ kA <sub>res</sub> ( $t_s \leq 0.2$ s) | 500 A gG                                                                                                                             |
| – Max. backup fuse (L) up to $I_k = 100$ kA <sub>res</sub> ( $t_s \leq 5$ s)   | 250 A gG                                                                                                                             |
| Weight                                                                         | 516 g                                                                                                                                |
| Customs tariff number                                                          | 85363090                                                                                                                             |
| GTIN                                                                           | 4013364116269                                                                                                                        |
| PU                                                                             | 1 pc(s)                                                                                                                              |

We reserve the right to introduce changes in performance, configuration and technology, dimensions, weights and materials in the course of technical progress. The figures are shown without obligation.

## C.4.2. Tipo 2

### Product Data Sheet: DEHNguard® modular

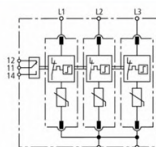


#### DG M WE 600 FM (952 307)

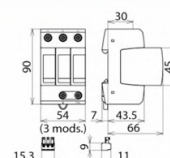
- Prewired complete unit consisting of a base part and plug-in protection modules
- High discharge capacity due to heavy-duty zinc oxide varistors / spark gaps
- High reliability due to "Thermo Dynamic Control" SPD monitoring device



Figure without obligation



Basic circuit diagram DG M WE 600 FM



Dimension drawing DG M WE 600 FM

Modular three-pole surge arrester for use in wind turbines with a rated varistor voltage  $U_{mov} = 750$  V a.c.; FM version with floating remote signalling contact.

| Type                                                                                         | DG M WE 600 FM                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Part No.                                                                                     | 952 307                                                   |
| SPD according to EN 61643-11 / IEC 61643-11                                                  | type 2 / class II                                         |
| Nominal a.c. voltage ( $U_n$ )                                                               | 480 V (50 / 60 Hz)                                        |
| Max. continuous operating a.c. voltage ( $U_c$ )                                             | 600 V (50 / 60 Hz)                                        |
| Rated varistor voltage ( $U_{mov}$ )                                                         | 750 V                                                     |
| Nominal discharge current (8/20 $\mu$ s) ( $I_n$ )                                           | 15 kA                                                     |
| Max. discharge current (8/20 $\mu$ s) ( $I_{max}$ )                                          | 25 kA                                                     |
| Voltage protection level ( $U_p$ )                                                           | $\leq 3$ kV                                               |
| Voltage protection level at 5 kA ( $U_p$ )                                                   | $\leq 2.5$ kV                                             |
| Response time ( $t_a$ )                                                                      | $\leq 25$ ns                                              |
| Max. mains-side overcurrent protection                                                       | 100 A gG                                                  |
| Short-circuit withstand capability for max. mains-side overcurrent protection ( $I_{SCCR}$ ) | 25 kA <sub>ms</sub>                                       |
| Temporary overvoltage (TOV) ( $U_T$ ) – Characteristic                                       | 900 V / 5 sec. – withstand                                |
| Temporary overvoltage (TOV) ( $U_T$ ) – Characteristic                                       | 915 V / 120 min. – safe failure                           |
| Operating temperature range ( $T_a$ )                                                        | -40 °C ... +80 °C                                         |
| Operating state / fault indication                                                           | green / red                                               |
| Number of ports                                                                              | 1                                                         |
| Cross-sectional area (min.)                                                                  | 1.5 mm <sup>2</sup> solid / flexible                      |
| Cross-sectional area (max.)                                                                  | 35 mm <sup>2</sup> stranded / 25 mm <sup>2</sup> flexible |
| For mounting on                                                                              | 35 mm DIN rails acc. to EN 60715                          |
| Enclosure material                                                                           | thermoplastic, red, UL 94 V-0                             |
| Place of installation                                                                        | indoor installation                                       |
| Degree of protection                                                                         | IP 20                                                     |
| Capacity                                                                                     | 3 module(s), DIN 43880                                    |
| Approvals                                                                                    | KEMA, UL, VdS                                             |
| Type of remote signalling contact                                                            | changeover contact                                        |
| a.c. switching capacity                                                                      | 250 V / 0.5 A                                             |
| d.c. switching capacity                                                                      | 250 V / 0.1 A; 125 V / 0.2 A; 75 V / 0.5 A                |
| Cross-sectional area for remote signalling terminals                                         | max. 1.5 mm <sup>2</sup> solid / flexible                 |
| Weight                                                                                       | 388 g                                                     |
| Customs tariff number                                                                        | 85363030                                                  |
| GTIN                                                                                         | 4013364113312                                             |
| PU                                                                                           | 1 pc(s)                                                   |

We reserve the right to introduce changes in performance, configuration and technology, dimensions, weights and materials in the course of technical progress. The figures are shown without obligation.

C.5. Sistema de guiñada

C.5.1. Motores de guiñada

HOJA DE DATOS

Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula



Cliente :

Línea del producto : W22 IE3 Trifásico

Código del producto : 12867347

Carcasa : 132M/L

Potencia : 5.5 kW (7.5 HP)

Polos : 6

Frecuencia : 50 Hz

Tensión nominal : 400/690 V

Corriente nominal : 12.9/7.47 A

Corriente de arranque : 94.1/54.5 A

Ip/In : 7.3

Corriente en vacío : 7.20/4.17 A

Rotación nominal : 970 rpm

Resbalamiento : 3.00 %

Torque nominal : 5.52 kgfm

Torque de arranque : 220 %

Torque máximo : 260 %

Clase de aislamiento : F

Factor de servicio : 1.00

Momento de inercia (J) : 0.0755 kgm²

Categoría : N

Tiempo de rotor bloqueado : 27s (frio) 15s (caliente)

Elevación de temperatura : 80 K

Régimen de servicio : S1

Temperatura ambiente : -20°C hasta +40°C

Altitud : 1000 m

Grado de protección : IP55

Método de refrigeración : IC411 - TEFC

Forma constructiva : B3T

Sentido de giro¹ : Ambos

Nivel de ruido² : 53.0 dB(A)

Método de Arranque : Partida directa

Masa aproximada³ : 86.5 kg

Potencia25%50%75%100%

Rendimiento (%)0.00086.587.988.0

Cos Φ0.000.500.640.70

Fuerzas en la fundación

Tracción máxima : 235 kgf

Compresión máxima : 321 kgf

Pérdidas en puntos de funcionamiento estándar (velocidad; par), en porcentaje de la potencia nominal

P1 (0.9;1.0)13.4

P2 (0.5;1.0)12.1

P3 (0.25;1.0)11.5

P4 (0.9;0.5)6.4

P5 (0.5;0.5)4.9

P6 (0.5;0.25)3.4

P7 (0.25;0.25)2.7

Tipo de cojinete : 6308 ZZ

Sello : V'Ring

Intervalo de lubricación : -

Cantidad de lubricante : -

Tipo de lubricante : Mobil Polyrex EM

Delantero

Trasero

Notas

Esta revisión reemplaza y cancela la anterior, la cual deberá ser eliminada.  
(1) Mirando la punta delantera del eje del motor.  
(2) Medido a 1m y con tolerancia de +3dB(A).  
(3) Masa aproximada sujetos a cambios después del proceso de fabricación.  
(4) Al 100% de la carga completa.

Los valores indicados son valores promedio con base en ensayos y para alimentación en red senoidal, sujetos a las tolerancias de la norma IEC 60034-1.

Rev.

Resumen de los cambios

Ejecutado

Verificado

Fecha

Ejecutor

Verificador

Fecha

Pagina1 / 6

Revisión

Propiedad de WEG S/A. Prohibida la reproducción sin permiso.  
Sujeto a cambios sin previo aviso

### C.5.2. Variadores de guiñada

[illegible][illegible][illegible][illegible]

C.6. Sistema de paso

C.6.1. Motores de paso

| HOJA DE DATOS                                                                                        |                        |                     |                                                                                                                                                        |  |                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula                                                        |                        |                     |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Cliente :                                                                                            |                        |                     |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Línea del producto                                                                                   |                        | : W22 IE4 Trifásico | Código del producto :                                                                                                                                  |                                                                                     | 13005052                    |
| Carcasa                                                                                              |                        | : 225S/M            | Tiempo de rotor bloqueado                                                                                                                              |                                                                                     | : 36s (frio) 20s (caliente) |
| Potencia                                                                                             |                        | : 37 kW (50 HP)     | Elevación de temperatura                                                                                                                               |                                                                                     | : 80 K                      |
| Polos                                                                                                |                        | : 4                 | Régimen de servicio                                                                                                                                    |                                                                                     | : S1                        |
| Frecuencia                                                                                           |                        | : 50 Hz             | Temperatura ambiente                                                                                                                                   |                                                                                     | : -20°C hasta +40°C         |
| Tensión nominal                                                                                      |                        | : 400/690 V         | Altitud                                                                                                                                                |                                                                                     | : 1000 m                    |
| Corriente nominal                                                                                    |                        | : 67.6/39.2 A       | Grado de protección                                                                                                                                    |                                                                                     | : IP55                      |
| Corriente de arranque                                                                                |                        | : 581/337 A         | Método de refrigeración                                                                                                                                |                                                                                     | : IC411 - TEFC              |
| Ip/In                                                                                                |                        | : 8.6               | Forma constructiva                                                                                                                                     |                                                                                     | : B34T                      |
| Corriente en vacío                                                                                   |                        | : 29.7/17.2 A       | Sentido de giro¹                                                                                                                                       |                                                                                     | : Ambos                     |
| Rotación nominal                                                                                     |                        | : 1484 rpm          | Nivel de ruido²                                                                                                                                        |                                                                                     | : 63.0 dB(A)                |
| Resbalamiento                                                                                        |                        | : 1.07 %            | Método de Arranque                                                                                                                                     |                                                                                     | : Partida directa           |
| Torque nominal                                                                                       |                        | : 24.3 kgfm         | Masa aproximada³                                                                                                                                       |                                                                                     | : 394 kg                    |
| Torque de arranque                                                                                   |                        | : 310 %             |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Torque máximo                                                                                        |                        | : 350 %             |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Clase de aislamiento                                                                                 |                        | : F                 |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Factor de servicio                                                                                   |                        | : 1.00              |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Momento de inercia (J)                                                                               |                        | : 0.7346 kgm²       |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Categoría                                                                                            |                        | : NE                |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Potencia                                                                                             | 50%                    | 75%                 | 100%                                                                                                                                                   | Fuerzas en la fundación                                                             |                             |
| Rendimiento (%)                                                                                      | 94.4 93.0              | 95.0 94.5           | 95.2 95.4                                                                                                                                              | Tracción máxima : 709 kgf                                                           |                             |
| Cos Φ                                                                                                | 0.67 0.66              | 0.78 0.77           | 0.83 0.82                                                                                                                                              | Compresión máxima : 1103 kgf                                                        |                             |
| Pérdidas en puntos de funcionamiento estándar (velocidad; par), en porcentaje de la potencia nominal |                        |                     |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Pérdidas (%)                                                                                         | P1 (0.9;1.0)           |                     | 4.8                                                                                                                                                    | 4.6                                                                                 |                             |
|                                                                                                      | P2 (0.5;1.0)           |                     | 3.8                                                                                                                                                    | 3.6                                                                                 |                             |
|                                                                                                      | P3 (0.25;1.0)          |                     | 3.4                                                                                                                                                    | 3.2                                                                                 |                             |
|                                                                                                      | P4 (0.9;0.5)           |                     | 2.7                                                                                                                                                    | 2.6                                                                                 |                             |
|                                                                                                      | P5 (0.5;0.5)           |                     | 1.7                                                                                                                                                    | 1.7                                                                                 |                             |
|                                                                                                      | P6 (0.5;0.25)          |                     | 1.3                                                                                                                                                    | 1.2                                                                                 |                             |
|                                                                                                      | P7 (0.25;0.25)         |                     | 0.8                                                                                                                                                    | 0.8                                                                                 |                             |
| Tipo de cojinete                                                                                     |                        | : Delantero         | Trasero                                                                                                                                                |                                                                                     |                             |
| Sello                                                                                                |                        | : WSeal             | 6314 C3                                                                                                                                                |                                                                                     |                             |
| Intervalo de lubricación                                                                             |                        | : 14000 h           | WSeal                                                                                                                                                  |                                                                                     |                             |
| Cantidad de lubricante                                                                               |                        | : 27 g              | 14000 h                                                                                                                                                |                                                                                     |                             |
| Tipo de lubricante                                                                                   |                        | : Mobil Polyrex EM  | 27 g                                                                                                                                                   |                                                                                     |                             |
| Notas                                                                                                |                        |                     |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Esta revisión reemplaza y cancela la anterior, la cual deberá ser eliminada.                         |                        |                     | Los valores indicados son valores promedio con base en ensayos y para alimentación en red senoidal, sujetos a las tolerancias de la norma IEC 60034-1. |                                                                                     |                             |
| (1) Mirando la punta delantera del eje del motor.                                                    |                        |                     |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| (2) Medido a 1m y con tolerancia de +3dB(A).                                                         |                        |                     |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| (3) Masa aproximada sujetos a cambios después del proceso de fabricación.                            |                        |                     |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Rev.                                                                                                 | Resumen de los cambios |                     |                                                                                                                                                        | Ejecutado                                                                           | Verificado                  |
| Ejecutor                                                                                             |                        |                     |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Verificador                                                                                          |                        |                     |                                                                                                                                                        |                                                                                     |                             |
| Fecha                                                                                                | 01/07/2025             |                     |                                                                                                                                                        | Página 1 / 3                                                                        | Revisión                    |

### C.6.2. Variadores de paso

2/4



Subject to change without notice

ABB GENERAL PURPOSE DRIVES, ACS840, CATALOG

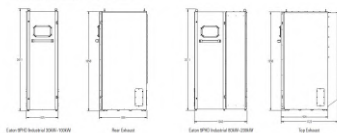
### ACS580 technical data

Subject to change without notice

## C.7. Sistema de Alimentación Ininterrumpida

| Eaton 9PHD Industrial UPS 30 - 200 kW        |                                                                                              |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Technical Specification                      |                                                                                              |
| <b>GENERAL</b>                               |                                                                                              |
| Output power rating (PF 1.0)                 | 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 200 kW                                               |
| External paralleling                         | Up to 8 units with HotSync technology                                                        |
| Efficiency in double-conversion mode         | Up to 97%                                                                                    |
| Efficiency in Energy Saver System (ESS) mode | Up to 99%                                                                                    |
| UPS topology                                 | IGBT with PNM double conversion                                                              |
| Degree of ingress protection                 | IP23, IP33 or IP54                                                                           |
| Ambient temperature                          | 0°C to 40°C up to 1000m altitude, higher ratings as optional                                 |
| Rohs/WEEE compliance                         | Yes                                                                                          |
| <b>INPUT</b>                                 |                                                                                              |
| Nominal voltage rating                       | 380 V, 400 V, 415 V, 440 V or 480 V, configurable                                            |
| Input voltage with internal transformers     | 200 V - 690 V                                                                                |
| Input frequency range                        | 45 - 72 Hz                                                                                   |
| Input wiring                                 | 3pin+N+PE / 3pin+PE                                                                          |
| Input power factor                           | 0.99                                                                                         |
| Input THD 100% linear load                   | < 4.5%                                                                                       |
| Soft start for generators                    | Yes                                                                                          |
| Internal back feed protection                | Yes, for rectifier and bypass lines                                                          |
| <b>OUTPUT</b>                                |                                                                                              |
| Output wiring                                | 3pin+N+PE / 3pin+PE                                                                          |
| Rated output voltage                         | 380 V, 400 V, 415 V, 440 V or 480 V, configurable                                            |
| Output voltage with internal transformers    | 208 V - 690 V                                                                                |
| Output frequency                             | 50 Hz / 60Hz configurable                                                                    |
| Output THD                                   | < 1% (100% linear load), < 5% (reference non-linear load)                                    |
| Default overload capacity on inverter        | 10 min 102 - 110% load<br>60 x 111 - 125% load<br>16 x 126 - 150% load<br>300 ms > 150% load |
| Max overload capacity on inverter            | 60 min 102 - 110% load<br>10 min 111 - 125% load<br>60s 126 - 150% load<br>300ms > 150% load |
| Overload capacity on bypass                  | Continuous < 125% load, 50 ms 2000% load                                                     |
| Rated output power factor                    | 1.0                                                                                          |
| Load power factor range                      | 0.8 lagging to 0.8 leading                                                                   |

| Eaton 9PHD Industrial UPS 30 - 200 kW |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>BATTERY</b>                        |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Battery technology                    | VRLA, Li-Ion, NiCd, Eaton Super Capacitors                                                                                                                                                                                                                               |
| Nominal battery voltage               | 432 V - 480 V                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Maximum charging current              | 29.3 A, 58.6 A, 87.9 A, 117.2 A depending on model                                                                                                                                                                                                                       |
| Charging method                       | Voltage regulated current limited with Eaton ABM technology                                                                                                                                                                                                              |
| Boost charge function                 | Yes                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Temperature compensation              | Yes                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Battery start option                  | Yes                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Communications</b>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Modems                                | 4 communication bays for ModbusRTU, ModbusJbus & Industrial serial                                                                                                                                                                                                       |
| Standard connectivity ports           | Device USB and Host USB, RS-232 service port, relay output, 8 building alarm inputs, 1 relay output and a dedicated EPO                                                                                                                                                  |
| <b>Accessories</b>                    |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Accessories for UPS                   | Internal transformers, Vibration dampers with mounting brackets, Battery M, Internal automatic transfer switch, Single lead kit, Earth lead monitoring, 24V Emergency Power Off (EPO), Custom system and battery cabinets, Custom racks, External air management systems |
| Accessory cabinets                    | Industrial battery cabinets with long life batteries, Matching transformer cabinet for one or two transformers, External maintenance bypass switch                                                                                                                       |
| <b>COMPLIANCE WITH STANDARDS</b>      |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Safety (CB certified)                 | IEC 62483-1                                                                                                                                                                                                                                                              |
| EMC                                   | IEC 62483-2                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Performance                           | IEC 62040-3                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Rohs                                  | EU directive 2011/65/EU                                                                                                                                                                                                                                                  |
| WEEE                                  | EU directive 2012/19/EU                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Siemens testing                       | NEBS GR-63-CORE, Zone 4                                                                                                                                                                                                                                                  |



## C.8. Transformador de auxiliares

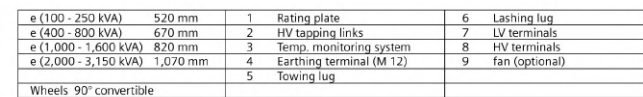
Planning data for GEAFOL neo transformers (IEC TS 60076-20 level 2; EN 50588-1: AA<sub>0</sub> - A<sub>0</sub>)

| Rated power  | Primary rated voltage ± 2.2, 2.5 % | Secondary rated voltage | Rated short-circuit voltage | No-load losses | Short-circuit losses at 120 °C | Power losses at rated transformer power | Air-flow rate required for cooling at rated transformer power (approx. 25 °C air temperature) in m <sup>3</sup> / min | Power losses at maximum transformer power (140%) | Air-flow rate required for cooling at maximum transformer power (approx. 25 °C air temperature) in m <sup>3</sup> / min | Sound power level <sup>1)</sup> | Total weight | Length    | Width     | Height    | Order number |
|--------------|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| $S_N$ in kVA | $U_{1N}$ in kV                     | $U_{2N}$ in V           | $u_k$ %                     | $P_0$ in W     | $P_{K120}$ in W                | $P_{T(rated)}$ in W                     | $P_{T(25 °C)}$ in W                                                                                                   | $P_{T(max)}$ in W                                | $P_{T(140 %)}$ in W                                                                                                     | $L_{w,25 °C}$ in dB(A)          | $G_N$ in kg  | (A) in mm | (X) in mm | (H) in mm | MLFB         |
| 100          | 10                                 | 400                     | 4                           | 252            | 1,800                          | 2,240                                   | 7.0                                                                                                                   | -2                                               | -2                                                                                                                      | 49                              | 800          | 1,250     | 695       | 985       | 4G85044-3F   |
|              |                                    | 420                     | 4                           | 252            | 1,800                          | 2,240                                   | 7.0                                                                                                                   | -2                                               | -2                                                                                                                      | 49                              | 1,040        | 1,310     | 765       | 1,250     | 4G85044-3F   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 290            | 1,980                          | 2,470                                   | 7.5                                                                                                                   | -2                                               | -2                                                                                                                      | 49                              | 1,740        | 1,570     | 850       | 1,530     | 4G85075-3E   |
| 160          | 10                                 | 400                     | 4                           | 360            | 2,600                          | 3,220                                   | 10.0                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 52                              | 1,120        | 1,320     | 710       | 1,125     | 4G85244-3F   |
|              |                                    | 420                     | 4                           | 360            | 2,600                          | 3,220                                   | 10.0                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 52                              | 1,290        | 1,450     | 785       | 1,145     | 4G85244-3F   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 414            | 2,860                          | 3,560                                   | 11.0                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 52                              | 1,610        | 1,530     | 840       | 1,535     | 4G85275-3E   |
| 250          | 10                                 | 400                     | 4                           | 468            | 3,400                          | 4,210                                   | 13.0                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 55                              | 1,700        | 1,450     | 730       | 1,215     | 4G85444-3F   |
|              |                                    | 420                     | 4                           | 468            | 3,400                          | 4,210                                   | 13.0                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 55                              | 1,760        | 1,510     | 760       | 1,260     | 4G85444-3F   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 538            | 3,740                          | 4,660                                   | 14.5                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 55                              | 2,140        | 1,630     | 935       | 1,595     | 4G85475-3E   |
| 315          | 10                                 | 400                     | 4                           | 558            | 3,878                          | 4,830                                   | 15.0                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 57                              | 1,990        | 1,510     | 820       | 1,445     | 4G85544-3F   |
|              |                                    | 420                     | 4                           | 558            | 3,878                          | 4,830                                   | 15.0                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 57                              | 1,930        | 1,560     | 855       | 1,300     | 4G85544-3F   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 642            | 4,266                          | 5,340                                   | 16.5                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 57                              | 2,430        | 1,680     | 940       | 1,600     | 4G85575-3E   |
| 400          | 10                                 | 400                     | 4                           | 675            | 4,500                          | 5,630                                   | 17.5                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 58                              | 2,250        | 1,560     | 825       | 1,410     | 4G85644-3F   |
|              |                                    | 420                     | 4                           | 675            | 4,500                          | 5,630                                   | 17.5                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 58                              | 2,050        | 1,550     | 855       | 1,435     | 4G85644-3F   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 675            | 4,500                          | 5,630                                   | 17.5                                                                                                                  | -2                                               | -2                                                                                                                      | 58                              | 2,370        | 1,650     | 940       | 1,720     | 4G85675-3E   |
| 500          | 10                                 | 400                     | 4                           | 812            | 5,630                          | 7,050                                   | 21.5                                                                                                                  | 13,000                                           | 39.5                                                                                                                    | 59                              | 2,530        | 1,590     | 830       | 1,510     | 4G85744-3F   |
|              |                                    | 420                     | 4                           | 812            | 5,630                          | 7,050                                   | 21.5                                                                                                                  | 13,000                                           | 39.5                                                                                                                    | 59                              | 2,370        | 1,580     | 855       | 1,530     | 4G85744-3F   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 934            | 6,194                          | 7,750                                   | 23.5                                                                                                                  | 14,500                                           | 43.5                                                                                                                    | 59                              | 2,610        | 1,690     | 945       | 1,720     | 4G85775-3E   |
| 630          | 10                                 | 400                     | 4                           | 990            | 7,100                          | 8,800                                   | 27.0                                                                                                                  | 16,300                                           | 49.5                                                                                                                    | 61                              | 1,890        | 1,445     | 845       | 1,465     | 4G85844-3E   |
|              |                                    | 420                     | 4                           | 990            | 7,100                          | 8,800                                   | 27.0                                                                                                                  | 16,300                                           | 49.5                                                                                                                    | 61                              | 2,180        | 1,520     | 885       | 1,560     | 4G85844-3E   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 1,140          | 7,800                          | 9,720                                   | 29.5                                                                                                                  | 18,000                                           | 54.5                                                                                                                    | 61                              | 3,000        | 1,750     | 935       | 1,750     | 4G85875-3E   |
| 800          | 10                                 | 400                     | 6                           | 1,170          | 8,000                          | 9,970                                   | 30.5                                                                                                                  | 19,500                                           | 56.0                                                                                                                    | 63                              | 2,270        | 1,530     | 860       | 1,555     | 4G85944-3E   |
|              |                                    | 420                     | 6                           | 1,170          | 8,000                          | 9,970                                   | 30.5                                                                                                                  | 19,500                                           | 56.0                                                                                                                    | 63                              | 2,540        | 1,585     | 895       | 1,620     | 4G85944-3E   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 1,350          | 8,800                          | 11,030                                  | 33.5                                                                                                                  | 20,500                                           | 62.0                                                                                                                    | 63                              | 3,240        | 1,750     | 935       | 1,890     | 4G85975-3E   |
| 1,000        | 10                                 | 400                     | 6                           | 1,395          | 9,000                          | 11,300                                  | 34.5                                                                                                                  | 20,800                                           | 63.5                                                                                                                    | 64                              | 2,670        | 1,610     | 990       | 1,620     | 4G86044-3E   |
|              |                                    | 420                     | 6                           | 1,395          | 9,000                          | 11,300                                  | 34.5                                                                                                                  | 20,800                                           | 63.5                                                                                                                    | 64                              | 3,090        | 1,695     | 1,000     | 1,740     | 4G86044-3E   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 1,600          | 9,900                          | 12,500                                  | 38.0                                                                                                                  | 23,000                                           | 70.0                                                                                                                    | 64                              | 3,690        | 1,780     | 1,025     | 2,055     | 4G86075-3E   |
| 1,250        | 10                                 | 400                     | 6                           | 1,620          | 11,000                         | 13,720                                  | 42.0                                                                                                                  | 25,500                                           | 77.0                                                                                                                    | 66                              | 3,160        | 1,640     | 990       | 1,730     | 4G86144-3E   |
|              |                                    | 420                     | 6                           | 1,620          | 11,000                         | 13,720                                  | 42.0                                                                                                                  | 25,500                                           | 77.0                                                                                                                    | 66                              | 3,580        | 1,760     | 1,010     | 1,820     | 4G86144-3E   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 1,840          | 12,100                         | 15,170                                  | 46.0                                                                                                                  | 28,000                                           | 85.0                                                                                                                    | 66                              | 4,020        | 1,805     | 1,030     | 2,170     | 4G86175-3E   |
| 1,600        | 10                                 | 400                     | 6                           | 1,840          | 13,000                         | 16,240                                  | 48.5                                                                                                                  | 30,050                                           | 91.0                                                                                                                    | 67                              | 3,750        | 1,735     | 990       | 1,895     | 4G86244-3E   |
|              |                                    | 420                     | 6                           | 1,580          | 13,000                         | 16,240                                  | 48.5                                                                                                                  | 30,050                                           | 91.0                                                                                                                    | 67                              | 4,160        | 1,835     | 1,020     | 1,900     | 4G86244-3E   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 2,280          | 14,300                         | 18,010                                  | 55.0                                                                                                                  | 33,150                                           | 106.5                                                                                                                   | 67                              | 4,900        | 1,915     | 1,045     | 2,310     | 4G86275-3E   |
| 2,000        | 10                                 | 400                     | 6                           | 2,340          | 16,000                         | 19,940                                  | 60.5                                                                                                                  | 36,900                                           | 112.0                                                                                                                   | 69                              | 4,660        | 1,870     | 1,280     | 2,050     | 4G86344-3E   |
|              |                                    | 420                     | 6                           | 2,340          | 16,000                         | 19,940                                  | 60.5                                                                                                                  | 36,900                                           | 112.0                                                                                                                   | 69                              | 5,100        | 1,885     | 1,280     | 2,190     | 4G86344-3E   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 2,690          | 17,600                         | 22,050                                  | 67.0                                                                                                                  | 40,650                                           | 123.5                                                                                                                   | 69                              | 5,780        | 1,990     | 1,280     | 2,500     | 4G86375-3E   |
| 2,500        | 10                                 | 400                     | 6                           | 2,790          | 19,000                         | 23,690                                  | 72.0                                                                                                                  | 43,800                                           | 133.0                                                                                                                   | 70                              | 5,960        | 2,025     | 1,280     | 2,170     | 4G86444-3E   |
|              |                                    | 420                     | 6                           | 2,790          | 19,000                         | 23,690                                  | 72.0                                                                                                                  | 43,800                                           | 133.0                                                                                                                   | 70                              | 6,440        | 2,080     | 1,280     | 2,285     | 4G86444-3E   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 3,210          | 20,900                         | 26,200                                  | 79.5                                                                                                                  | 48,300                                           | 146.5                                                                                                                   | 70                              | 7,160        | 2,155     | 1,280     | 2,545     | 4G86475-3E   |
| 3,150        | 10                                 | 400                     | 6                           | 3,420          | 22,000                         | 27,620                                  | 84.0                                                                                                                  | 50,900                                           | 154.4                                                                                                                   | 73                              | 7,660        | 2,160     | 1,280     | 2,475     | 4G86544-3E   |
|              |                                    | 420                     | 6                           | 3,420          | 22,000                         | 27,620                                  | 84.0                                                                                                                  | 50,900                                           | 154.4                                                                                                                   | 73                              | 8,020        | 2,205     | 1,280     | 2,525     | 4G86544-3E   |
|              |                                    | 440                     | 6                           | 3,930          | 24,200                         | 30,550                                  | 93.0                                                                                                                  | 56,150                                           | 176.5                                                                                                                   | 73                              | 8,570        | 2,385     | 1,280     | 2,635     | 4G86575-3E   |

1) Power increase through extra ventilation (230W has to be added to the order number). 2) Without extra ventilation

Note: All data without engagement, subject to change without prior notice (04/20)

SIEMENS



Measurements are not binding, we reserve the right to change construction details

### C.9.1. Cableado de potencia, 690V

## General Cable

**Prysmian**  
Group

## General Cable

**Prysmian**  
Group

## C.9.2. Cableado de media tensión, 20kV

X-VOLT RH21 Cu/OL/20L

**Top Cable**

### X-VOLT RH21 Cu/OL/20L

Cable de Media Tensión de cobre, con aislamiento de XLPE, libre de halógenos.

Norma de referencia: IEC 60502-2

#### DISEÑO

**Conductor**  
Conductor de cobre, clase 2, según UNE EN 60228 o IEC 60228.

**Pantalla semiconductora interna**  
Material semiconductores termoplástico, aplicado sobre el conductor.

**Aislamiento**  
Material aislante (XLPE) en cobertura de atmósfera seca, mediante proceso de tigre extruido.

**Pantalla semiconductora externa**  
Pinta en semiconductores aplicados sobre el aislamiento. Flexible.

**Pantalla metálica**  
Cableado puntual de cobre y cableado de cobre, con una sección mínima de 16 mm².

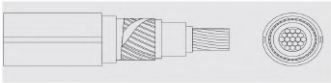
**Obstrucción longitudinal**  
Cableado de cobre mecánicamente tratado, pantalla (cable tipo -OL- y -20L-).

**Cubierta exterior**  
Pantalla de halógenos, de color rojo.

#### APLICACIONES

Cable de cobre para transporte y distribución de energía en redes de media tensión.  
Línea de halógenos.

X-VOLT RH21 Cu/OL/20L



#### CARACTERÍSTICAS

- Características eléctricas**  
Media Tensión (kV): 6,10 kV a 12,0 kV y 17,5 kV.
- Norma de referencia**  
IEC 60502-2.
- Características térmicas**  
Temperatura máxima de conducción: 90 °C.  
Temperatura máxima en condiciones: 200 °C (pendiente 1:1).
- Características frente al fuego**  
Línea de halógenos según IEC 60332-1.
- Características mecánicas**  
Radio de curvatura: 10 x diámetro exterior.  
Resistencia a la tracción.  
Resistencia al desgaste.
- Características químicas**  
Resistencia a los gases atmosféricos: IEC 2955.
- Otros**  
Alargamiento y peso.
- Condiciones de instalación**  
A la vez.  
Enterrado.  
Enterrado.
- Aplicaciones**  
Redes de distribución.



Interpretación de las características eléctricas según IEC 60502-2.  
La A y la B indican el tipo de aislamiento. Las características eléctricas de la norma IEC 60502-2.  
Consulte más datos técnicos en la especificación particular del cable.  
Este cable cumple con los requisitos de la norma IEC 60332-1 y la norma IEC 60332-2.

Para más información: [www.topcable.com](http://www.topcable.com)

**Top Cable**

X-VOLT RH21 Cu/OL/20L

#### DIMENSIONES

| Sección (mm²) | DIMENSIONES  |             |             |              |             | DATOS ELÉCTRICOS |           |         | 6 / 10 kV |         |
|---------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|------------------|-----------|---------|-----------|---------|
|               | Ø Cond. (mm) | Ø Int. (mm) | Ø Ext. (mm) | Peso (kg/km) | Res. (Ω/km) | R (Ω/km)         | C (pF/km) | Al (mm) | Al (mm)   | Al (mm) |
| 30/5          | 12,5         | 12,5        | 12,5        | 12,5         | 0,125       | 0,125            | 0,125     | 12,5    | 12,5      | 12,5    |
| 35/5          | 14,0         | 14,0        | 14,0        | 14,0         | 0,140       | 0,140            | 0,140     | 14,0    | 14,0      | 14,0    |
| 40/5          | 15,5         | 15,5        | 15,5        | 15,5         | 0,155       | 0,155            | 0,155     | 15,5    | 15,5      | 15,5    |
| 50/5          | 17,5         | 17,5        | 17,5        | 17,5         | 0,175       | 0,175            | 0,175     | 17,5    | 17,5      | 17,5    |
| 60/5          | 19,0         | 19,0        | 19,0        | 19,0         | 0,190       | 0,190            | 0,190     | 19,0    | 19,0      | 19,0    |
| 70/5          | 20,5         | 20,5        | 20,5        | 20,5         | 0,205       | 0,205            | 0,205     | 20,5    | 20,5      | 20,5    |
| 80/5          | 22,0         | 22,0        | 22,0        | 22,0         | 0,220       | 0,220            | 0,220     | 22,0    | 22,0      | 22,0    |
| 90/5          | 23,5         | 23,5        | 23,5        | 23,5         | 0,235       | 0,235            | 0,235     | 23,5    | 23,5      | 23,5    |
| 100/5         | 25,0         | 25,0        | 25,0        | 25,0         | 0,250       | 0,250            | 0,250     | 25,0    | 25,0      | 25,0    |
| 120/5         | 27,5         | 27,5        | 27,5        | 27,5         | 0,275       | 0,275            | 0,275     | 27,5    | 27,5      | 27,5    |
| 150/5         | 32,5         | 32,5        | 32,5        | 32,5         | 0,325       | 0,325            | 0,325     | 32,5    | 32,5      | 32,5    |
| 180/5         | 37,5         | 37,5        | 37,5        | 37,5         | 0,375       | 0,375            | 0,375     | 37,5    | 37,5      | 37,5    |

#### 8,7 / 15 kV

| Sección (mm²) | Ø Cond. (mm) | Ø Int. (mm) | Ø Ext. (mm) | Peso (kg/km) | Res. (Ω/km) | R (Ω/km) | C (pF/km) | Al (mm) | Al (mm) | Al (mm) |
|---------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|----------|-----------|---------|---------|---------|
| 30/5          | 12,5         | 12,5        | 12,5        | 12,5         | 0,125       | 0,125    | 0,125     | 12,5    | 12,5    | 12,5    |
| 35/5          | 14,0         | 14,0        | 14,0        | 14,0         | 0,140       | 0,140    | 0,140     | 14,0    | 14,0    | 14,0    |
| 40/5          | 15,5         | 15,5        | 15,5        | 15,5         | 0,155       | 0,155    | 0,155     | 15,5    | 15,5    | 15,5    |
| 50/5          | 17,5         | 17,5        | 17,5        | 17,5         | 0,175       | 0,175    | 0,175     | 17,5    | 17,5    | 17,5    |
| 60/5          | 19,0         | 19,0        | 19,0        | 19,0         | 0,190       | 0,190    | 0,190     | 19,0    | 19,0    | 19,0    |
| 70/5          | 20,5         | 20,5        | 20,5        | 20,5         | 0,205       | 0,205    | 0,205     | 20,5    | 20,5    | 20,5    |
| 80/5          | 22,0         | 22,0        | 22,0        | 22,0         | 0,220       | 0,220    | 0,220     | 22,0    | 22,0    | 22,0    |
| 90/5          | 23,5         | 23,5        | 23,5        | 23,5         | 0,235       | 0,235    | 0,235     | 23,5    | 23,5    | 23,5    |
| 100/5         | 25,0         | 25,0        | 25,0        | 25,0         | 0,250       | 0,250    | 0,250     | 25,0    | 25,0    | 25,0    |
| 120/5         | 27,5         | 27,5        | 27,5        | 27,5         | 0,275       | 0,275    | 0,275     | 27,5    | 27,5    | 27,5    |
| 150/5         | 32,5         | 32,5        | 32,5        | 32,5         | 0,325       | 0,325    | 0,325     | 32,5    | 32,5    | 32,5    |
| 180/5         | 37,5         | 37,5        | 37,5        | 37,5         | 0,375       | 0,375    | 0,375     | 37,5    | 37,5    | 37,5    |

#### 12 / 20 kV

| Sección (mm²) | Ø Cond. (mm) | Ø Int. (mm) | Ø Ext. (mm) | Peso (kg/km) | Res. (Ω/km) | R (Ω/km) | C (pF/km) | Al (mm) | Al (mm) | Al (mm) |
|---------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|----------|-----------|---------|---------|---------|
| 30/5          | 12,5         | 12,5        | 12,5        | 12,5         | 0,125       | 0,125    | 0,125     | 12,5    | 12,5    | 12,5    |
| 35/5          | 14,0         | 14,0        | 14,0        | 14,0         | 0,140       | 0,140    | 0,140     | 14,0    | 14,0    | 14,0    |
| 40/5          | 15,5         | 15,5        | 15,5        | 15,5         | 0,155       | 0,155    | 0,155     | 15,5    | 15,5    | 15,5    |
| 50/5          | 17,5         | 17,5        | 17,5        | 17,5         | 0,175       | 0,175    | 0,175     | 17,5    | 17,5    | 17,5    |
| 60/5          | 19,0         | 19,0        | 19,0        | 19,0         | 0,190       | 0,190    | 0,190     | 19,0    | 19,0    | 19,0    |
| 70/5          | 20,5         | 20,5        | 20,5        | 20,5         | 0,205       | 0,205    | 0,205     | 20,5    | 20,5    | 20,5    |
| 80/5          | 22,0         | 22,0        | 22,0        | 22,0         | 0,220       | 0,220    | 0,220     | 22,0    | 22,0    | 22,0    |
| 90/5          | 23,5         | 23,5        | 23,5        | 23,5         | 0,235       | 0,235    | 0,235     | 23,5    | 23,5    | 23,5    |
| 100/5         | 25,0         | 25,0        | 25,0        | 25,0         | 0,250       | 0,250    | 0,250     | 25,0    | 25,0    | 25,0    |
| 120/5         | 27,5         | 27,5        | 27,5        | 27,5         | 0,275       | 0,275    | 0,275     | 27,5    | 27,5    | 27,5    |
| 150/5         | 32,5         | 32,5        | 32,5        | 32,5         | 0,325       | 0,325    | 0,325     | 32,5    | 32,5    | 32,5    |
| 180/5         | 37,5         | 37,5        | 37,5        | 37,5         | 0,375       | 0,375    | 0,375     | 37,5    | 37,5    | 37,5    |

#### 18 / 30 kV

| Sección (mm²) | Ø Cond. (mm) | Ø Int. (mm) | Ø Ext. (mm) | Peso (kg/km) | Res. (Ω/km) | R (Ω/km) | C (pF/km) | Al (mm) | Al (mm) | Al (mm) |
|---------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|----------|-----------|---------|---------|---------|
| 30/5          | 12,5         | 12,5        | 12,5        | 12,5         | 0,125       | 0,125    | 0,125     | 12,5    | 12,5    | 12,5    |
| 35/5          | 14,0         | 14,0        | 14,0        | 14,0         | 0,140       | 0,140    | 0,140     | 14,0    | 14,0    | 14,0    |
| 40/5          | 15,5         | 15,5        | 15,5        | 15,5         | 0,155       | 0,155    | 0,155     | 15,5    | 15,5    | 15,5    |
| 50/5          | 17,5         | 17,5        | 17,5        | 17,5         | 0,175       | 0,175    | 0,175     | 17,5    | 17,5    | 17,5    |
| 60/5          | 19,0         | 19,0        | 19,0        | 19,0         | 0,190       | 0,190    | 0,190     | 19,0    | 19,0    | 19,0    |
| 70/5          | 20,5         | 20,5        | 20,5        | 20,5         | 0,205       | 0,205    | 0,205     | 20,5    | 20,5    | 20,5    |
| 80/5          | 22,0         | 22,0        | 22,0        | 22,0         | 0,220       | 0,220    | 0,220     | 22,0    | 22,0    | 22,0    |
| 90/5          | 23,5         | 23,5        | 23,5        | 23,5         | 0,235       | 0,235    | 0,235     | 23,5    | 23,5    | 23,5    |
| 100/5         | 25,0         | 25,0        | 25,0        | 25,0         | 0,250       | 0,250    | 0,250     | 25,0    | 25,0    | 25,0    |
| 120/5         | 27,5         | 27,5        | 27,5        | 27,5         | 0,275       | 0,275    | 0,275     | 27,5    | 27,5    | 27,5    |
| 150/5         | 32,5         | 32,5        | 32,5        | 32,5         | 0,325       | 0,325    | 0,325     | 32,5    | 32,5    | 32,5    |
| 180/5         | 37,5         | 37,5        | 37,5        | 37,5         | 0,375       | 0,375    | 0,375     | 37,5    | 37,5    | 37,5    |

[www.topcable.com](http://www.topcable.com)

**Top Cable**

### C.9.3. Cableado de auxiliares, 400V

Afumex

Baja tensión

AFUMEX CLASS ATEX (AS) - RZ1MZ1-K (AS)

Tensión asignada: 0,6/1 kV  
Norma diseño: UNE 2123-4  
Designación genérica: RZ1MZ1-K (AS)

CPR  
C<sub>2</sub> cat. II

CE

• Temperatura de servicio: -25 °C, +90 °C. (Cable termorrestable).  
• Ensayo de tensión alterna durante 5 min.: 500 V

**Reacción al fuego**  
**Prestaciones frente al fuego en la Unión Europea**  
• Clase de reacción al fuego (CPR): C<sub>2</sub> cat. II, s1, d1, a1.  
• Requisitos de fuego: UNE-EN 60332-3:2014 + A1:2016.  
• Clasificación respectiva al fuego: UNE-EN 13501-6.  
• Aplicación de los resultados: CLC175 S02N.  
• Métodos de ensayo:  
UNE-EN 60332-3-2: UNE-EN 50399;  
UNE-EN 60354-2: UNE-EN 61934-2.

**Normativa de fuego completa (incluidas normas aplicables a países no pertenecientes a la Unión Europea):**  
• No propagación de la llama:  
UNE-EN 60332-1-2; IEC 60332-1-2

Afumex

Baja tensión

AFUMEX CLASS ATEX (AS) - RZ1MZ1-K (AS)

Tensión asignada: 0,6/1 kV  
Norma diseño: UNE 2123-4  
Designación genérica: RZ1MZ1-K (AS)

**Construcción**  
1. Conductor  
**Metal:** cobre (recubierto)  
**Flexibilidad:** flexible, clase 5, según UNE-EN 60228.  
**Temperatura máxima en el conductor:** 90 °C en servicio permanente, 250 °C en cortocircuito.  
2. Aislamiento  
**Metal:** mezcla de polietileno reticulado (XLPE), tipo DEX según UNE HD 603-1.  
**Colores:** marrón, negro, gris, azul, amarillo/verde según UNE 20084-1.  
3. Cubierta interior  
**Metal:** polietileno 21 según UNE HD 603-1.  
4. Armadura  
**Metal:** hilos de acero (RZ1MZ1-K (AS)).  
5. Cubierta exterior  
**Metal:** mezcla especial libre de halógenos tipo NFUMEX.  
**Color:** verde

En instalaciones donde sea preciso proteger los cables contra agresiones mecánicas, tales como esfuerzos de tracción, de compresión, contra roedores (cables unipolares y multipolares), o contra el riesgo de inflamación en ambientes de atmósfera explosiva o con riesgo de incendio, etc., (solo cables multipolares por su armadura de hilos de acero).

**Aplicaciones**  
En instalaciones donde sea preciso proteger los cables contra agresiones mecánicas, tales como esfuerzos de tracción, de compresión, contra roedores (cables unipolares y multipolares), o contra el riesgo de inflamación en ambientes de atmósfera explosiva o con riesgo de incendio, etc., (solo cables multipolares por su armadura de hilos de acero).  
• Redes subterráneas de distribución (DTC, BT, DT).  
• Redes subterráneas de alumbrado exterior (DTC, BT, DT).  
• Instalaciones interiores o exteriores (DTC, BT, DT).  
• Locales con riesgo de incendio o explosión (DTC, BT, DT) (solo cables multipolares).

Afumex

Baja tensión

AFUMEX CLASS ATEX (AS) - RZ1MZ1-K (AS)

Tensión asignada: 0,6/1 kV  
Norma diseño: UNE 2123-4  
Designación genérica: RZ1MZ1-K (AS)

**Datos técnicos**

| Número de conductores (S.O.C.S.O.) | Espesor de aislamiento (mm) (I) | Diámetro sobre aislamiento (mm) (I) | Diámetro exterior (mm) (I) | Peso kg/km (I) | Resistencia del conductor a 25 °C (Ω/km) | Intensidad admisible al aire (A) (I) | Intensidad admisible enterrado (A) (I) | Caja de tensión (VVA km) (Dry) (I) | Caja de tensión (VVA km) (Wet) (I) |
|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------|------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                                    |                                 |                                     |                            |                |                                          |                                      |                                        | cos φ = 0,8                        | cos φ = 0,8                        |
| <b>RZ1MZ1-K (AS)</b>               |                                 |                                     |                            |                |                                          |                                      |                                        |                                    |                                    |
| 1x25                               | 0,9                             | 8,5                                 | 12,4                       | 55,4           | 0,780                                    | 122                                  | 96                                     | 1,58                               | 1,37                               |
| 1x50                               | 1,0                             | 11,2                                | 20,2                       | 83,6           | 0,386                                    | 188                                  | 138                                    | 0,85                               | 0,77                               |
| 1x95                               | 1,3                             | 14,9                                | 24,5                       | 118,7          | 0,286                                    | 298                                  | 202                                    | 0,42                               | 0,43                               |
| 1x150                              | 1,4                             | 18,1                                | 28,7                       | 159,9          | 0,129                                    | 407                                  | 260                                    | 0,27                               | 0,31                               |
| 1x240                              | 1,7                             | 24,0                                | 34,4                       | 297            | 0,081                                    | 545                                  | 336                                    | 0,17                               | 0,22                               |
| 1x400                              | 2                               | 30,5                                | 42,3                       | 464            | 0,048                                    | -                                    | -                                      | 0,11                               | 0,17                               |

(1) Valores aproximados (sujetos a tolerancias de fabricación)

(2) Instalación en bandeja al aire (40 °C).  
→ XLPE3 con instalación tipo F → columna T1 (Tx, trifásica).

Según UNE HD 60364-5-52 e IEC 60364-5-52.

(3) Instalación enterrada, directamente o bajo tubo con resistividad térmica del terreno estándar de 2,5 K m/W.  
→ XLPE3 con instalación tipo Método D1/D2 → (Tx, trifásica).

Según UNE HD 60364-5-52 e IEC 60364-5-52.

## Apéndice D

### Tablas de REBT

| Tipo de Aislamiento seco      | Temperatura máxima °C |                           |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|
|                               | Servicio permanente   | Cortocircuito $t \leq 5s$ |
| Policloruro de vinilo (PVC)   |                       |                           |
| $S \leq 300 \text{ mm}^2$     | 70                    | 160                       |
| $S > 300 \text{ mm}^2$        | 70                    | 140                       |
| Polietileno reticulado (XLPE) | 90                    | 250                       |
| Etileno Propileno (EPR)       | 90                    | 250                       |

Figura D.1: Cables aislados con aislamiento seco; temperatura máxima, en °C, asignada al conductor.

| Sección nominal<br>mm <sup>2</sup> | Tres cables unipolares (1)                                                          |     |     | 1 cable trifásico                                                                    |     |     |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|
|                                    |  |     |     |  |     |     |
|                                    | Tipo de aislamiento                                                                 |     |     |                                                                                      |     |     |
|                                    | XLPE                                                                                | EPR | PVC | XLPE                                                                                 | EPR | PVC |
| 6                                  | 46                                                                                  | 45  | 38  | 44                                                                                   | 43  | 36  |
| 10                                 | 64                                                                                  | 62  | 53  | 61                                                                                   | 60  | 50  |
| 16                                 | 86                                                                                  | 83  | 71  | 82                                                                                   | 80  | 65  |
| 25                                 | 120                                                                                 | 115 | 96  | 110                                                                                  | 105 | 87  |
| 35                                 | 145                                                                                 | 140 | 115 | 135                                                                                  | 130 | 105 |
| 50                                 | 180                                                                                 | 175 | 145 | 165                                                                                  | 160 | 130 |
| 70                                 | 230                                                                                 | 225 | 185 | 210                                                                                  | 220 | 165 |
| 95                                 | 285                                                                                 | 280 | 235 | 260                                                                                  | 250 | 205 |
| 120                                | 335                                                                                 | 325 | 275 | 300                                                                                  | 290 | 240 |
| 150                                | 385                                                                                 | 375 | 315 | 350                                                                                  | 335 | 275 |
| 185                                | 450                                                                                 | 440 | 365 | 400                                                                                  | 385 | 315 |
| 240                                | 535                                                                                 | 515 | 435 | 475                                                                                  | 460 | 370 |
| 300                                | 615                                                                                 | 595 | 500 | 545                                                                                  | 520 | 425 |
| 400                                | 720                                                                                 | 700 | 585 | 645                                                                                  | 610 | 495 |
| 500                                | 825                                                                                 | 800 | 665 | —                                                                                    | —   | —   |
| 630                                | 950                                                                                 | 915 | 765 | —                                                                                    | —   | —   |

Figura D.2: Intensidad máxima admisible, en amperios, en servicio permanente para cables con conductores de cobre en instalación al aire en galerías ventiladas (temperatura ambiente 40°C).

| Temperatura de servicio $\Theta_s$ en °C | Temperatura ambiente, $\Theta_a$ , en °C |      |      |      |      |      |    |      |      |      |      |
|------------------------------------------|------------------------------------------|------|------|------|------|------|----|------|------|------|------|
|                                          | 10                                       | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40 | 45   | 50   | 55   | 60   |
| 90                                       | 1.27                                     | 1.22 | 1.18 | 1.14 | 1.10 | 1.05 | 1  | 0.95 | 0.90 | 0.84 | 0.77 |
| 70                                       | 1.41                                     | 1.35 | 1.29 | 1.22 | 1.15 | 1.08 | 1  | 0.91 | 0.81 | 0.71 | 0.58 |

Figura D.3: Coeficiente de corrección F para temperatura ambiente distinta de 40 °C.

| Tipo de instalación                  |                                                                                     | Nº de bandejas | Nº de circuitos trifásicos (2) |      |      | A utilizar para (1):             |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------|------|------|----------------------------------|
|                                      |                                                                                     |                | 1                              | 2    | 3    |                                  |
| Bandejas perforadas (3)              |    | 1              | 0,95                           | 0,90 | 0,85 | Tres cables en capa horizontal   |
|                                      |                                                                                     | 2              | 0,95                           | 0,85 | 0,80 |                                  |
|                                      |                                                                                     | 3              |                                | 0,85 | 0,80 |                                  |
| Bandejas verticales perforadas (4)   |    | 1              | 0,95                           | 0,85 | -    | Tres cables en capa vertical     |
|                                      |                                                                                     | 2              | 0,90                           | 0,85 | -    |                                  |
| Bandejas escalera, soporte, etc. (3) |    | 1              | 1,00                           | 0,95 | 0,95 | Tres cables en capa horizontal   |
|                                      |                                                                                     | 2              | 0,95                           | 0,90 | 0,90 |                                  |
|                                      |                                                                                     | 3              | 0,95                           | 0,90 | 0,85 |                                  |
| Bandejas perforadas (3)              |   | 1              | 1,00                           | 1,00 | 0,95 | Tres cables dispuestos en trébol |
|                                      |                                                                                     | 2              | 0,95                           | 0,95 | 0,90 |                                  |
|                                      |                                                                                     | 3              | 0,95                           | 0,90 | 0,85 |                                  |
| Bandejas verticales perforadas (4)   |  | 1              | 1,00                           | 0,90 | 0,90 |                                  |
|                                      |                                                                                     | 2              | 1,00                           | 0,90 | 0,85 |                                  |
| Bandejas escalera, soporte, etc. (3) |  | 1              | 1,00                           | 1,00 | 1,00 |                                  |
|                                      |                                                                                     | 2              | 0,95                           | 0,95 | 0,95 |                                  |
|                                      |                                                                                     | 3              | 0,95                           | 0,95 | 0,90 |                                  |

NOTAS:

- (1) Incluye además el conductor neutro, si existiese.
- (2) Para circuitos con varios cables en paralelo por fase, a los efectos de la aplicación de esta tabla, cada grupo de tres conductores se considera como un circuito.
- (3) Los valores están indicados para una distancia vertical entre bandejas de 300 mm. Para distancias más pequeñas, se reducirán los factores.
- (4) Los valores están indicados para una distancia horizontal entre bandejas de 225 mm., estando las bandejas montadas dorso con dorso. Para distancias más pequeñas se reducirán los factores.

Figura D.4: Factor de corrección para agrupaciones de cables unipolares al aire.

# Bibliografía

- [1] Global Wind Energy Council, *Global Wind Report*, <https://www.gwec.net/reports/globalwindreport>, Accessed: 2025-06-06, 2024.
- [2] M. Liebreich, *State of the Industry*, <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/2017/09/BNEF-Summit-London-2017-Michael-Liebreich-State-of-the-Industry.pdf>, 2017.
- [3] European Commission, *Offshore Renewable Energy*, [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy_en), Accessed: 2025-03-27, 2024.
- [4] Global Wind Energy Council, *Global Wind Report 2024*, <https://www.gwec.net/reports/globalwindreport/2024>, Accessed: 2025-06-06, 2024.
- [5] H. Fox, A. C. Pillai, D. Friedrich, M. Collu, T. Dawood y L. Johanning, «A review of predictive and prescriptive offshore wind farm operation and maintenance,» *Energies*, vol. 15, n.º 2, pág. 504, 2022. DOI: 10.3390/en15020504. dirección: <https://doi.org/10.3390/en15020504>.
- [6] A. Lata, «Onshore versus offshore wind power trends and recent study practices in modeling of wind turbines' life cycle impact assessments,» *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 17, pág. 100691, 2023, ISSN: 2666-7908. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100691. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790823000964>.
- [7] S. Shahriari, P. Edalat y G. Salehi, «Cost-Benefit Investigation of Offshore Wind Power Generation for Soroush Offshore Complex,» *International Journal of Maritime Technology*, vol. 9, págs. 15-21, ene. de 2018. DOI: 10.29252/ijmt.9.15.
- [8] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 3.ª ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, ISBN: 978-3-662-49577-3. DOI: 10.1007/978-3-642-27151-9.

- [9] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins y E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2001, © 2001 John Wiley & Sons, Ltd., ISBN: 0-471-48997-2.
- [10] X. Lyu, D. Groß e I. Subotić, «Unified Grid-Forming Control of PMSG Wind Turbines for Fast Frequency Response and MPPT,» en *11th Bulk Power Systems Dynamics and Control Symposium (IREP 2022)*, Accepted for presentation, Banff, Canada, jul. de 2022, págs. 25-30.
- [11] *Safety requirements for power converters for use in renewable energy applications – Part 1: General requirements*, International Electrotechnical Commission (IEC), 2022. dirección: <https://webstore.iec.ch/publication/12345>.
- [12] A. K. Sharma, V. Das y K. Mahtani, «A Review on Full-Scale Back-to-Back Converter Topologies for PMSG-Based Wind Energy Conversion Systems,» *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 6, n.º 1, págs. 545-555, 2025. DOI: 10.55248/gengpi.6.0125.0217. dirección: <https://doi.org/10.55248/gengpi.6.0125.0217>.
- [13] A. Mian, W. Yaowei, Y. Zhao, Z. Yue y C. Guozhu, «A review of control strategies for power converters in PMSG-based wind energy systems,» *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, n.º 9, págs. 1279-1289, 2016. DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0444. dirección: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-rpg.2015.0444>.
- [14] A. Mansouri, A. E. Magri, R. Lajouad, I. E. Myasse, E. K. Younes y F. Giri, «Wind energy based conversion topologies and maximum power point tracking: A comprehensive review and analysis,» *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 6, pág. 100351, 2023, ISSN: 2772-6711. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100351>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671123002462>.
- [15] M. A. W. Begh y H.-G. Herzog, «Comparison of Field Oriented Control and Direct Torque Control,» *Technical University of Munich*, n.d. Accessed via personal copy or unpublished source. dirección: <mailto:mirza.begh@tum.de>.
- [16] A. Rodríguez Mora, «Operación del convertidor de potencia del lado de máquina de una turbina eólica con un generador de imanes permanentes,» Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla, España, 2021.

- [17] Ormazabal, *Transformadores en dieléctrico líquido: ¿cómo funcionan?* Accedido el 11 de marzo de 2025, n.d. dirección: <https://www.ormazabal.com/transformadores-en-dielectrico-liquido-como-funcionan/>.
- [18] IEEE-IAS Cement Industry Committee y T. Nunn, «A Comparison of Liquid-Filled and Dry-Type Transformer Technologies,» IEEE Institute of Electrical y Electronics Engineers, Technical Report 0-7803-5823-6/00, 2000, págs. 105-112.
- [19] C. Lee y F. Cloete, «Fault Reduction Strategy using Neutral Earth Resistor (NER) Installation,» en *Electrical Safety & Power System Protection Forum (Intelligent SCADA Systems), Session Twelve*, Lead Engineer: Cheng Lee; Co-author: Frans Cloete, Peracon, 2000.
- [20] J. M. Tacke y J. L. Reeves, «Industry Scan of Non-SF6 Gas-Insulated Technologies,» Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho, USA, inf. téc. INL/RPT-24-78805, 2024, Prepared for the U.S. Department of Energy, Office of Electricity under DOE Idaho Operations Office Contract DE-AC07-05ID14517. dirección: <http://www.inl.gov>.
- [21] O. Giesecke, R. Karlsson, K. Morozovska y P. Hilber, «Reliability study of two offshore wind farm topologies: Radial and ring connection,» en *Proceedings of the 15th Wind Integration Workshop*, U. Betancourt y T. Ackermann, eds., Vienna, Austria: Energynautics GmbH, 2016. dirección: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-207016>.
- [22] P. Lakshmanan, R. Sun y J. Liang, «Electrical Collection Systems for Offshore Wind Farms: A Review,» *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, n.º 5, págs. 1078-1090, 2021. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2020.05050. dirección: <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.05050>.
- [23] J. L. Blackburn y T. J. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications*, 3rd. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006, ISBN: 978-1-57444-716-3.
- [24] J. L. Rodríguez, C. A. Rodríguez y J. L. Ramos, «Identificación de la corriente inrush en un transformador utilizando el método de la transformada discreta de wavelet,» *Revista de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica*, vol. 30, n.º 1, págs. 45-52, 2012. dirección: [http://eprints.uanl.mx/10592/1/identificacion\\_de\\_la\\_corriente.pdf](http://eprints.uanl.mx/10592/1/identificacion_de_la_corriente.pdf).

- [25] E. Robles, O. Reyes, R. Campuzano y E. Priego, «Impacto de las Corrientes de Secuencia Negativa en los Generadores Síncronos Instalados en Sistemas Industriales,» en *Segundo Congreso Bienal del Comité Mexicano de CIGRÉ-México*, Irapuato, Guanajuato, México, jun. de 2001. dirección: <https://www.researchgate.net/publication/267841661>.
- [26] *SafeRing/SafePlus 12–24 kV: Gas-insulated ring main unit SafeRing and Compact switchgear SafePlus*.
- [27] A. S. Ayub, W. H. Siew y M. Stickland, «External lightning protection system for wind turbine blades – Power performance,» *Cigré Science & Engineering*, n.º 10, págs. 88-96, feb. de 2018.
- [28] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Renewables Certification, *Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, Edition 2012*, Typeset by Guppy Design; Published by GL Renewables Certification, GL Renewables Certification, Hamburg, Germany, 2012.
- [29] V. Mucsi, A. S. Ayub, F. Muhammad-Sukki, M. Zulkipli, M. N. Muhtazaruddin, A. S. Mohd Saudi y J. A. Ardila-Rey, «Lightning Protection Methods for Wind Turbine Blades: An Alternative Approach,» *Applied Sciences*, vol. 10, n.º 6, pág. 2130, 2020. DOI: 10.3390/app10062130. dirección: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/6/2130>.
- [30] DEHN + SÖHNE, «Lightning and Surge Protection for Wind Turbines,» DEHN + SÖHNE, Neumarkt, Germany, White Paper WPX023/E/0718, 2018, © Copyright 2018 DEHN + SÖHNE. dirección: [www.dehn-international.com](http://www.dehn-international.com).
- [31] LSP Global, *Lightning and surge protection for wind turbines*, <https://lsp.global/lightning-surge-protection-for-wind-turbines/>, Consultado 15 junio 2025, 2024.
- [32] I. Abdallah, A. Natarajan y J. Sørensen, «Influence of the control system on wind turbine loads in power production in extreme turbulence: Cost and reliability-based optimization of partial safety factors,» jun. de 2015.
- [33] J. C. Y. Lee y M. J. Fields, «An Overview of Wind Energy Production Prediction Bias, Losses, and Uncertainties,» *Wind Energy Science Discussions*, vol. 2020, n.º 85, págs. 1-25, 2020. DOI: 10.5194/wes-2020-85. dirección: <https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2020-85/wes-2020-85-manuscript-version3.pdf>.

- [34] *Reglamento electrotécnico para baja tensión e ITC*, Edición actualizada a 3 de abril de 2025, Depósito Legal M-9908-2019. Licencia CC BY-NC-ND 4.0, Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, Madrid, 2025, ISBN: 978-84-340-2546-2. dirección: [https://www.boe.es/biblioteca\\_juridica/index.php?tipo=C](https://www.boe.es/biblioteca_juridica/index.php?tipo=C).
- [35] Gobierno de España, *Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23*, Boletín Oficial del Estado, Publicado en el BOE núm. 139, de 9 de junio de 2014, 2014. dirección: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-6084](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-6084).