



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL Y COMUNICACIONES DE UN AEROGENERADOR EOLICO MARINO

Autor: Gonzalo Alonso Lidón

Director: Juan Antonio Talavera Martín

Madrid

Agosto 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL Y COMUNICACIONES DE UN
AEROGENERADOR EÓLICO MARINO**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/24 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.: Gonzalo Alonso Lidón

Fecha: ..26../ ..08../ ..2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Juan Antonio Talavera Martín

Fecha: 23../ ..08../ ..2024



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL Y COMUNICACIONES DE UN AEROGENERADOR EOLICO MARINO

Autor: Gonzalo Alonso Lidón

Director: Juan Antonio Talavera Martín

Madrid

Agosto 2024

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL Y COMUNICACIONES DE UN AEROGENERADOR EOLICO MARINO

Autor: Alonso Lidón, Gonzalo.

Director: Talavera Martín, Juan Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

En el contexto actual de urgencia por la transición hacia fuentes de energía sostenibles, impulsada por la necesidad de abordar el cambio climático, la energía eólica marina ha surgido como una solución altamente prometedora para la generación de electricidad limpia y eficiente. Los aerogeneradores marinos se benefician de vientos más fuertes y constantes en altamar, lo que los convierte en una opción atractiva para satisfacer la creciente demanda energética global.

Sin embargo, la implementación de estos sistemas presenta desafíos únicos debido a las condiciones adversas del entorno marino y la distancia de los parques eólicos a la costa. En este escenario, la ingeniería de telecomunicaciones juega un papel crucial en el desarrollo de sistemas de control y comunicación capaces de garantizar no solo la transmisión ininterrumpida de datos, sino también el funcionamiento confiable de los aerogeneradores en condiciones tan exigentes.

Este desafío tecnológico también representa una oportunidad significativa para la innovación, con el potencial de avanzar en las soluciones energéticas renovables y contribuir a la independencia energética y el desarrollo socioeconómico global.

2. Definición del proyecto

Este proyecto se centra en el diseño y desarrollo de un sistema de control y comunicaciones específico para un aerogenerador eólico marino, abordando las complejidades técnicas que plantea el entorno marino. El objetivo principal es optimizar la operación del aerogenerador a través de una arquitectura de control que garantice una comunicación efectiva y segura entre los diversos subsistemas, así como entre el parque eólico y las estaciones de control en tierra.

El sistema propuesto permitirá la transmisión precisa y en tiempo real de datos críticos, asegurando la gestión eficiente de los estados operativos del aerogenerador, lo que incluye la activación y regulación de motores y otros subsistemas clave. Se prestará especial atención al uso adecuado de convertidores de frecuencia para asegurar que las señales se interpreten y actúen correctamente, evitando la pérdida de información.

Además, se abordarán los retos de comunicación que implica la distancia del parque eólico a la costa, implementando tecnologías avanzadas que faciliten el control remoto

de las instalaciones. Finalmente, todas las soluciones cumplirán con la normativa vigente, incluyendo las normas GL, para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema.

3. Descripción del diseño

El diseño propuesto para el sistema de control y comunicaciones de un aerogenerador eólico marino se basa en una topología en estrella, con redundancia integrada para garantizar un flujo constante de datos incluso en caso de fallos. Esta configuración cumple con los estándares de la norma IEC 61400-25 y facilita tanto la administración del sistema como su mantenimiento.

El diseño de la red lógica incluye tres VLANs para segmentar las funciones de los dispositivos, sensores y la transmisión de datos, utilizando TCP/IP y Ethernet para unificar las comunicaciones y mejorar la escalabilidad y seguridad. La implementación de un rúter con tecnología "Router On a Stick" permite gestionar el tráfico entre estas VLANs y establecer una conexión segura con la base en tierra mediante VPN y cifrado AES-256, protegiendo así las comunicaciones del sistema.

La estructura de control también incluye servidores OPC UA para asegurar una comunicación eficiente entre el PLC y el sistema SCADA, permitiendo la monitorización y control en tiempo real de las variables críticas del sistema, tanto en el aerogenerador como en la estación en tierra. Además, el sistema de control de paso de pala está diseñado para ajustar dinámicamente el ángulo de las palas según las condiciones del viento, utilizando un regulador PID integrado y gestionado desde el PLC, asegurando así la optimización de la captura de energía y la seguridad operativa.

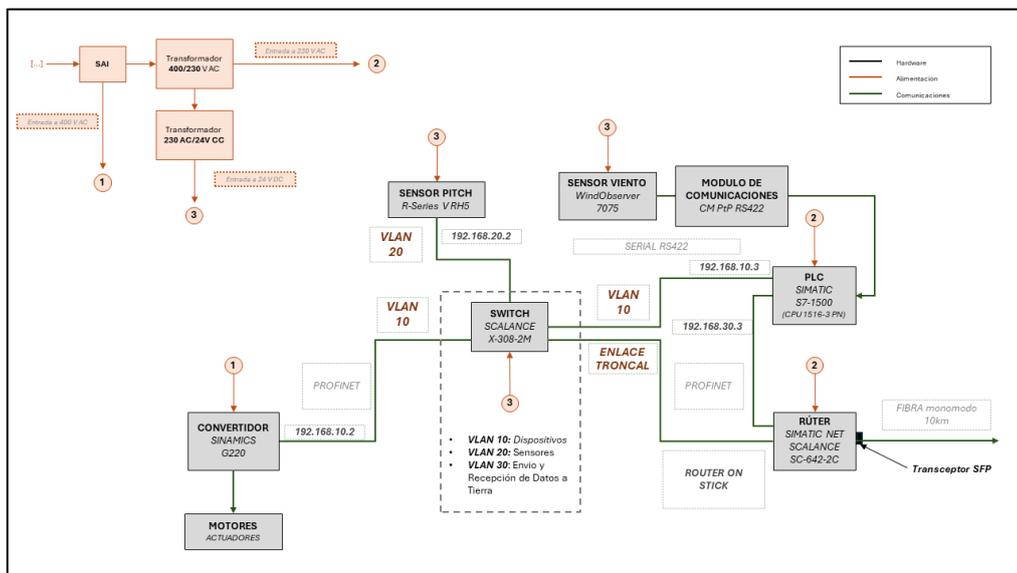


Ilustración 1: Diseño del Sistema en su conjunto

4. Resultados

El análisis del sistema utilizando el software Bladed Educational revela que el aerogenerador mantiene una producción de potencia constante alrededor de 5 MW durante todo su rango operativo, lo cual es crucial para asegurar un rendimiento óptimo. Esta estabilidad es respaldada por la implementación efectiva del regulador PID, que mantiene la velocidad del rotor en su valor nominal de 13 rpm.

En particular, la simulación de modos de operación críticos, como la parada normal y la parada de emergencia, demuestra que el regulador es adecuado para las necesidades del sistema. En el caso de una parada normal, el ajuste del ángulo de pitch permite detener progresivamente el rotor, asegurando una transición suave a la posición de bandera y cesando la generación de energía de manera segura. Por otro lado, la parada de emergencia muestra una reducción significativa en el tiempo de parada, lograda mediante una mayor tasa de cambio del ángulo de pitch, lo que es vital en situaciones donde se necesita detener rápidamente el aerogenerador.

Los resultados confirman que el sistema de control y comunicaciones, junto con el regulador diseñado, es capaz de operar de manera segura y eficiente bajo diversas condiciones operativas, manteniendo la estabilidad y la integridad del aerogenerador. Estos hallazgos validan el enfoque adoptado y subrayan la efectividad del diseño en la gestión de las variables críticas del sistema.

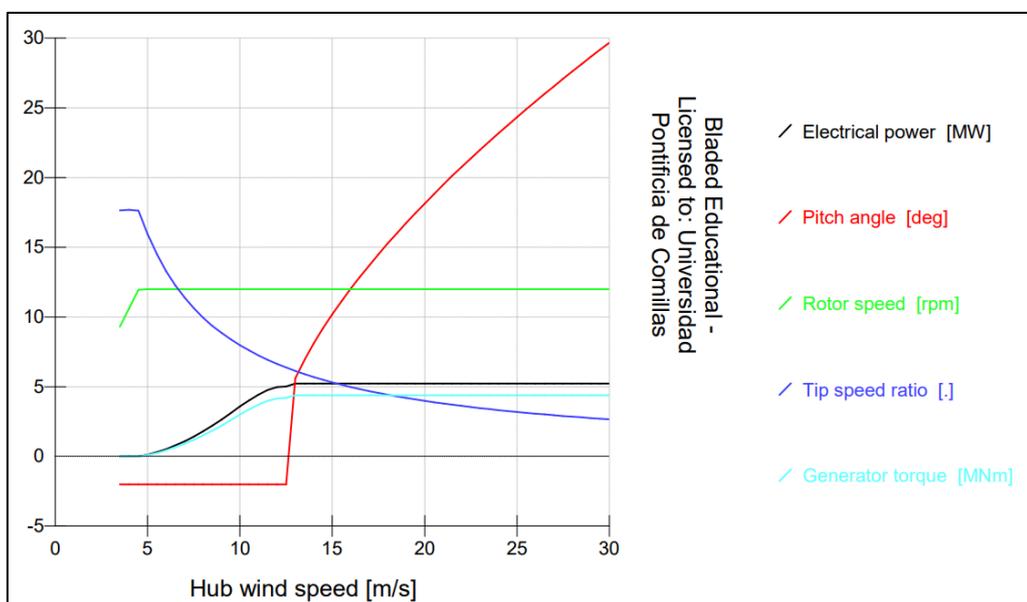


Ilustración 2: Salida del Sistema

5. Conclusiones

El proyecto ha logrado diseñar un sistema integral de hardware y software que garantiza la transmisión, control y monitorización en tiempo real de los dispositivos críticos en un aerogenerador eólico marino. Este sistema no solo optimiza la operatividad del aerogenerador, sino que también asegura que los datos esenciales se transmitan y procesen de manera confiable, lo cual es crucial para mantener la estabilidad de la generación de energía en un entorno marino.

La segmentación del sistema de control y comunicaciones mediante VLANs ha permitido una gestión efectiva del tráfico de red, mejorando la seguridad y reduciendo la congestión. La elección de hardware especializado, como switches industriales y rúters diseñados para entornos exigentes, ha sido esencial para garantizar la robustez y fiabilidad del sistema. Además, la implementación de protocolos estándar como PROFINET y RS422 asegura la interoperabilidad y facilita la futura expansión del sistema.

El uso de fibra óptica para la transmisión de datos a larga distancia ha sido un factor clave, permitiendo que el sistema soporte las condiciones adversas del entorno marino al minimizar la latencia y garantizar la integridad de los datos. En conjunto, estos elementos han sido fundamentales para diseñar un sistema que no solo sea eficiente, sino también resistente y escalable, asegurando el correcto funcionamiento del aerogenerador en su entorno operativo.

6. Referencias

- [1] Siemens. "SIMATIC S7-1500 Communication Function Manual". Siemens Industry, 2019. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/925/59192925/att_901175/v2/s71500_communication_function_manual_en-US_en-US.pdf.
- [2] Siemens. "SIMATIC S7-1500 CPU 1516-3 PN/DP Manual". Siemens Industry, 2018. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/914/59191914/att_915307/v1/s71500_cpu1516_3_pn_dp_manual_en-US_en-US.pdf.
- [3] Siemens. "SINAMICS G220 Operating Instructions". Siemens Industry, 2023. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/984/109820984/att_1157766/v1/G220_op_instr_0823_en-US.pdf.
- [4] Siemens. "SIMATIC S7-1500 CM PTP RS422/485HF Manual". Siemens Industry, 2017. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/372/59061372/att_88133/v1/s71500_cm_ptp_rs422-485hf_manual_es-ES_es-ES.pdf.

- [5] Siemens. "SCALANCE SC-600 Operating Instructions". Siemens Industry, 2021. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/812/109754812/att_1122572/v1/BA_SCALANCE-SC-600_78.pdf.
- [6] Temposonics. "R-Series V Operation Manual (Profinet)". MTS Sensors, 2022. https://www.temposonics.com/portals/mts_sensors/documents/R-seriesV/Operation_Manual_R-SeriesV_Profinet_551973_EN.pdf.
- [7] "Global Wind Atlas". 2024. <https://globalwindatlas.info/es>.
- [8] Rackonline. "¿Qué es un SAI y tipos de SAI?". 2020. <https://www.rackonline.es/content/que-es-un-sai-y-tipos-de-sai>.
- [9] Konetia Automatización. "¿Qué es un sistema SCADA?". 2021. <https://www.konetia-automatizacion.com/que-es-un-sistema-scada/>.
- [10] "PID Control System". ResearchGate, 2023. https://www.researchgate.net/figure/PID-control-system-6_fig1_382036279.

DESIGN OF THE CONTROL AND COMMUNICATION SYSTEM FOR AN OFFSHORE WIND TURBINE

Author: Alonso Lidón, Gonzalo

Supervisor: Talavera Martín, Juan Antonio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

1. Introduction

In today's urgent push towards sustainable energy sources driven by the need to address climate change, offshore wind energy has emerged as a highly promising solution for generating clean and efficient electricity. Offshore wind turbines benefit from stronger and more consistent winds at sea, making them a compelling option to meet the growing global energy demand.

However, deploying these systems presents unique challenges due to the harsh marine environment and the distance of wind farms from the coast. This scenario necessitates the development of robust control and communication systems capable of ensuring not only uninterrupted data transmission but also the reliable operation of wind turbines in such demanding conditions.

This technological challenge also presents a significant opportunity for innovation, with the potential to advance renewable energy solutions and contribute to global energy independence and socioeconomic development.

2. Project Definition

This project is focused on the specific design and development of a control and communication system for an offshore wind turbine, addressing the technical complexities posed by the marine environment. The primary goal is to enhance the turbine's operation through a control architecture that ensures effective, secure communication between subsystems and between the wind farm and onshore control stations.

The proposed system will enable precise, real-time transmission of critical data, ensuring the efficient management of the turbine's operational states. This includes the activation and regulation of motors and other essential subsystems, with special emphasis on the accurate use of frequency converters to maintain signal integrity and prevent data loss.

Moreover, the project will tackle the communication challenges associated with the distance between the wind farm and the shore, incorporating advanced technologies to facilitate remote control of the installations. All solutions will be designed to comply with current regulations, including GL standards, to ensure both safety and efficiency.

3. Design Description

The design for the wind turbine's control and communication system is based on a star topology, with redundancy incorporated to ensure a constant data flow even in the event of failures. This configuration meets IEC 61400-25 standards, facilitating system management and maintenance.

The logical network is segmented into three VLANs to separate device functions, sensors, and data transmission, using TCP/IP and Ethernet to unify communications and enhance scalability and security. A "Router on a Stick" configuration is implemented to manage traffic between these VLANs and establish a secure connection with the onshore base via VPN and AES-256 encryption, safeguarding system communications.

The control architecture also includes OPC UA servers to facilitate efficient communication between the PLC and the SCADA system, enabling real-time monitoring and control of critical system variables, both within the wind turbine and at the onshore station. Additionally, the blade pitch control system is designed to dynamically adjust blade angles in response to wind conditions, utilizing an integrated PID controller managed by the PLC to optimize energy capture and operational safety.

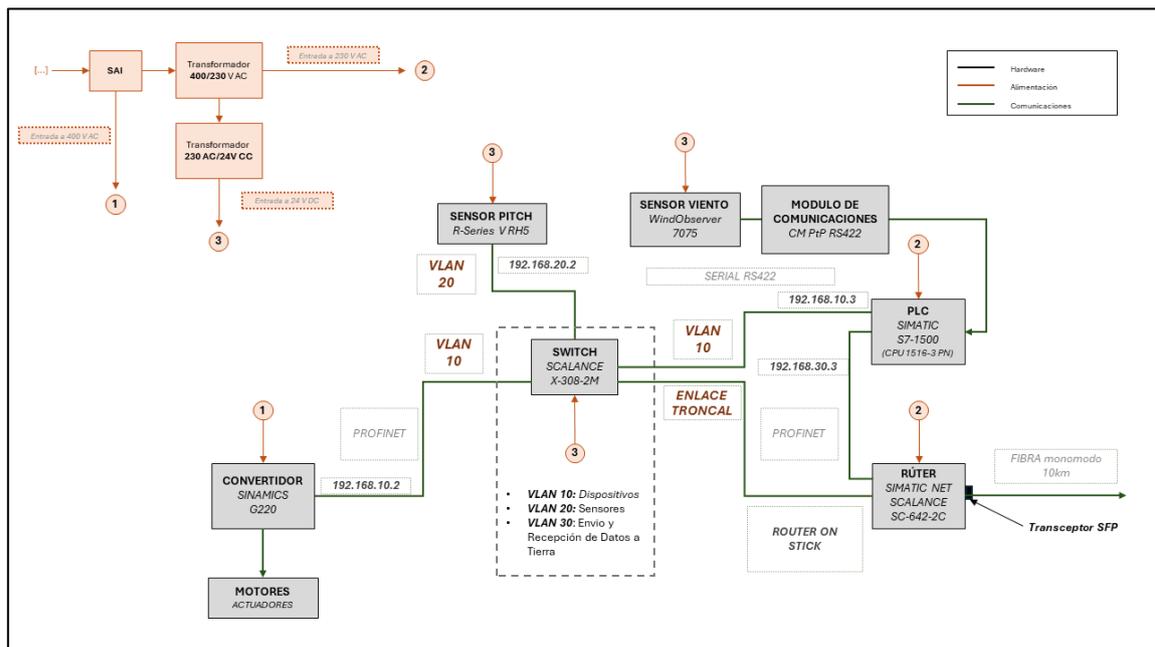


Ilustración 3: System Design Overview

4. Results

System analysis using Bladed Educational software shows that the wind turbine consistently maintains a power output of around 5 MW across its operational range,

which is crucial for optimal performance. This stability is supported by the effective implementation of the PID regulator, which keeps the rotor speed at its nominal value of 13 rpm.

Simulations of critical operating modes, such as normal shutdown and emergency stop, demonstrate that the regulator is well-suited to the system's needs. During normal shutdown, the pitch angle is adjusted to gradually stop the rotor, ensuring a smooth transition to the feathering position and safely halting energy generation. In contrast, the emergency stop shows a significant reduction in stopping time, achieved through a higher pitch rate, which is vital for scenarios requiring a rapid halt of the wind turbine.

The results confirm that the control and communication system, along with the designed regulator, can safely and efficiently manage various operational conditions, maintaining the turbine's stability and integrity. These findings validate the design approach and underscore its effectiveness in handling critical system variables.

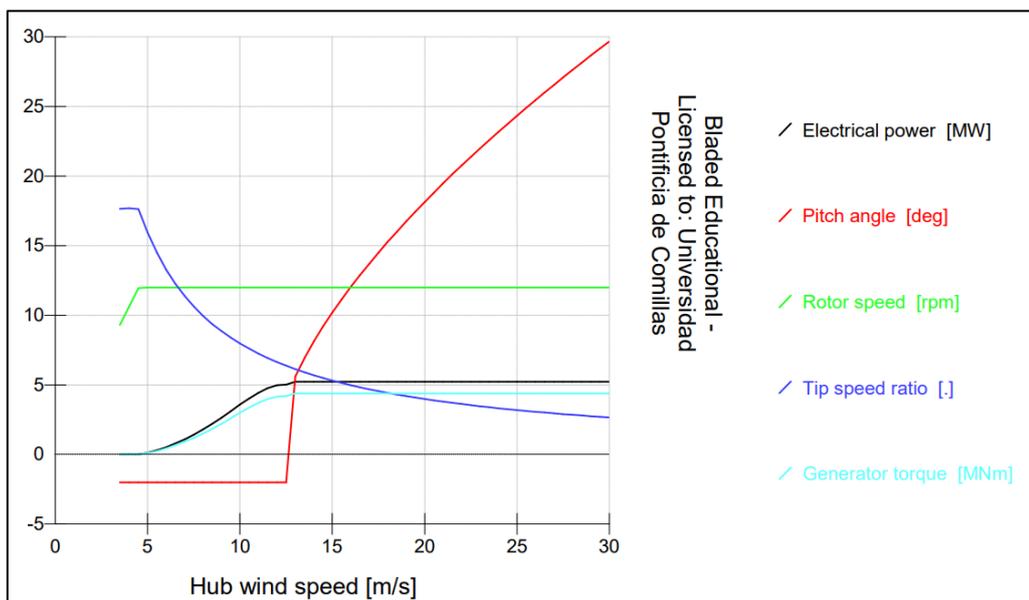


Ilustración 4: System Output

5. Conclusiones

The project successfully developed an integrated hardware and software system that ensures real-time transmission, control, and monitoring of critical components in an offshore wind turbine. This system not only enhances the turbine's operational efficiency but also ensures reliable data transmission and processing, which are vital for maintaining stable energy generation in the marine environment.

By segmenting the control and communication system through VLANs, effective network traffic management has been achieved, improving security and reducing

congestion. The selection of specialized hardware, such as industrial-grade switches and routers, has been crucial for ensuring the system's robustness and reliability. Furthermore, the use of standard protocols like PROFINET and RS422 guarantees interoperability and supports future system expansion.

Optic fiber technology has been employed for long-distance data transmission, a key factor in enabling the system to withstand harsh marine conditions by minimizing latency and ensuring data integrity. These design choices have been instrumental in creating a system that is not only efficient but also resilient and scalable, ensuring the wind turbine's reliable operation in its intended environment.

6. Referencias

- [1] Siemens. "SIMATIC S7-1500 Communication Function Manual". Siemens Industry, 2019. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/925/59192925/att_901175/v2/s71500_communication_function_manual_en-US_en-US.pdf.
- [2] Siemens. "SIMATIC S7-1500 CPU 1516-3 PN/DP Manual". Siemens Industry, 2018. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/914/59191914/att_915307/v1/s71500_cpu1516_3_pn_dp_manual_en-US_en-US.pdf.
- [3] Siemens. "SINAMICS G220 Operating Instructions". Siemens Industry, 2023. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/984/109820984/att_1157766/v1/G220_op_instr_0823_en-US.pdf.
- [4] Siemens. "SIMATIC S7-1500 CM PTP RS422/485HF Manual". Siemens Industry, 2017. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/372/59061372/att_88133/v1/s71500_cm_ptp_rs422-485hf_manual_es-ES_es-ES.pdf.
- [5] Siemens. "SCALANCE SC-600 Operating Instructions". Siemens Industry, 2021. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/812/109754812/att_1122572/v1/BA_SCALANCE-SC-600_78.pdf.
- [6] Temposonics. "R-Series V Operation Manual (Profinet)". MTS Sensors, 2022. https://www.temposonics.com/portals/mts_sensors/documents/R-seriesV/Operation_Manual_R-SeriesV_Profinet_551973_EN.pdf.
- [7] "Global Wind Atlas". 2024. <https://globalwindatlas.info/es>.
- [8] Rackonline. "¿Qué es un SAI y tipos de SAI?". 2020. <https://www.rackonline.es/content/que-es-un-sai-y-tipos-de-sai>.
- [9] Konetia Automatización. "¿Qué es un sistema SCADA?". 2021. <https://www.konetia-automatizacion.com/que-es-un-sistema-scada/>.

- [10] "PID Control System". ResearchGate, 2023. https://www.researchgate.net/figure/PID-control-system-6_fig1_382036279.

Índice de la memoria

| | |
|--|-----------|
| Índice de la memoria | I |
| Índice de figuras | IV |
| Índice de tablas | VI |
| 1. Introducción | 7 |
| 1.1 Motivación del proyecto | 7 |
| 1.2 Estado de la Cuestión | 8 |
| 2. Aerogeneradores off-shore | 10 |
| 2.1 Componentes | 10 |
| 2.1.1 Rotor | 10 |
| 2.1.2 Góndola | 11 |
| 2.1.3 Torre | 14 |
| 2.2 Estados de Operación | 14 |
| 2.3 Sistema de control | 15 |
| 2.3.1 Control de Paso de Pala (Pitch Control System) | 15 |
| 2.3.2 Control de Orientación (Yaw Control System)..... | 16 |
| 2.4 Sistema de Comunicaciones | 17 |
| 2.4.1 Controlador | 18 |
| 2.4.2 Opciones de Comunicación..... | 18 |
| 2.4.3 Sistema SCADA | 20 |
| 2.4.4 VPN y Comunicación Remota | 20 |
| 2.4.5 Uso de Fibra Óptica..... | 21 |
| 2.5 Estándar IEC 61400-25 | 22 |
| 3. Diseño del Entorno | 24 |
| 3.1 Alimentación, Entorno físico Y SAI | 24 |
| 3.1.1 SAI | 24 |
| 3.1.2 Transformadores | 26 |
| 3.2 PLC (Controlador)..... | 29 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.2.1 | <i>Criterios Y Selección</i> | 29 |
| 3.2.2 | <i>Entorno Software</i> | 31 |
| 3.3 | Convertidor (Dispositivo)..... | 33 |
| 3.4 | Sensores..... | 36 |
| 3.4.1 | <i>Sensor de Velocidad de Viento (Anemómetro)</i> | 36 |
| 3.4.2 | <i>Sensor de Ángulo de Pala</i> | 36 |
| 3.5 | Rúter | 37 |
| 3.6 | Switches | 38 |
| 3.7 | Fibra Óptica..... | 39 |
| 3.7.1 | <i>Emplazamiento</i> | 39 |
| 3.7.2 | <i>Componentes adicionales</i> | 40 |
| 4. | <i>Diseño de los sistemas</i> | 42 |
| 4.1 | Sistema de Comunicaciones | 42 |
| 4.1.1 | <i>Direccionamiento IP</i> | 43 |
| 4.1.2 | <i>VPN</i> | 44 |
| 4.1.3 | <i>“Router On Stick”</i> | 44 |
| 4.1.4 | <i>Servidores OPC UA y Sistema SCADA</i> | 45 |
| 4.2 | Control de Paso de Pala..... | 47 |
| 4.2.1 | <i>Envío de Datos de los Sensores</i> | 49 |
| 4.2.2 | <i>Creación y Lógica de Estados</i> | 56 |
| 4.2.3 | <i>Regulador PID</i> | 62 |
| 4.2.4 | <i>Señal de Accionamiento</i> | 71 |
| 5. | <i>Modelo y Resultados</i> | 75 |
| 6. | <i>Conclusiones y Trabajos Futuros</i> | 78 |
| 6.1 | Trabajos Futuros..... | 79 |
| 7. | <i>Bibliografía</i> | 82 |
| ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS | | 83 |
| ANEXO II | | 85 |
| | Especificaciones del Sensores y Hardware de Comunicación | 85 |
| | Modelo Preliminar (BLADED EDUCATIONAL)..... | 88 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| <i>Rotor</i> | 88 |
| <i>Torre</i> | 89 |
| <i>Tren de Potencia</i> | 90 |
| <i>Góndola</i> | 91 |
| <i>Sistemas de Control</i> | 91 |
| <i>Condiciones del Entorno</i> | 92 |

OB1 94

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Ilustración 1: Diseño del Sistema en su conjunto..... | 6 |
| Ilustración 2: Salida del Sistema | 7 |
| Ilustración 3: System Design Overview | 11 |
| Ilustración 4: System Output | 12 |
| Ilustración 5: Rotor de un aerogenerador | 10 |
| Ilustración 6: Góndola de un aerogenerador con sus elementos a la vista | 11 |
| Ilustración 7: Sistema de un Aerogenerador Síncrono de Imanes Permanentes | 12 |
| Ilustración 8: Torre del aerogenerador, en el caso del nuestro de 80 metros | 14 |
| Ilustración 9: Diagrama de bloques de controlador PID | 16 |
| Ilustración 10: Funcionamiento básico de un sistema SCADA | 20 |
| Ilustración 11: Funcionamiento básico de un sistema SAI on-line | 25 |
| Ilustración 12: Transformador Schneider Electric 400 VAC-230VAC | 27 |
| Ilustración 13: Transformador Mean Well (grupo de alimentacion) de 230VAC-24VCC. 27 | |
| Ilustración 14: PLC Siemens S7-1500..... | 29 |
| Ilustración 15: Gama Sinamics G220..... | 34 |
| Ilustración 16: Ubicación del emplazamiento (v. media del viento: 11.8 m/s)..... | 39 |
| Ilustración 17: Diagrama del entorno de fibra óptica..... | 40 |
| Ilustración 18: Transceptor SFP Transceptor SFP SFP991-1LD | 41 |
| Ilustración 19: Diseño del sistema en su conjunto | 42 |
| Ilustración 20: Detalle del sistema SCADA..... | 46 |
| Ilustración 21: Flujo de datos entre el envío y la recepción en OPC UA..... | 47 |
| Ilustración 22: Detalle del Sistema de Control..... | 48 |
| Ilustración 23: Diagrama de flujos de los datos | 49 |
| Ilustración 24: Conector RS422 | 50 |
| Ilustración 25: Bloque de Función (FB) a utilizar con sus respectivos parámetros | 51 |
| Ilustración 26: Diagrama de Estados del Bloque en Cuestión | 51 |
| Ilustración 27: Diagrama de estados operativos en el sistema de control | 57 |
| Ilustración 28: Diagrama del flujo lógico dentro del control de estados..... | 58 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 29: Ángulo de pitch con una constante proporcional de 0,000293 ($K_i = 0$) | 64 |
| Ilustración 30: Ángulo de pitch con una constante proporcional de 0,0002915 ($K_i = 0$) ... | 64 |
| Ilustración 31: Ángulo de pitch con una constante integral de 0,0001 ($K_p =$ valor hallado anteriormente)..... | 65 |
| Ilustración 32: Ángulo de pitch con una constante integral de 0,0003 ($K_p =$ valor hallado anteriormente)..... | 66 |
| Ilustración 33: Diagrama del "PID Technology Controller" del G220 | 68 |
| Ilustración 34: Curva de Produccion de Energía | 75 |
| Ilustración 35: Respuesta del Sistema ante la Parada Normal..... | 76 |
| Ilustración 36: Respuesta del Sistema ante la Parada de Emergencia..... | 77 |
| Ilustración 37: Diseño del Sistema en su totalidad..... | 78 |
| Ilustración 38: Parámetros del Rotor en Bladed..... | 88 |
| Ilustración 39: Parámetros del Rotor en Bladed..... | 89 |
| Ilustración 40: Parámetros de la torre en Bladed..... | 89 |
| Ilustración 41: Parámetros del Tren de Potencia en Bladed..... | 90 |
| Ilustración 42: Parámetros de la red de estaciones en Bladed..... | 90 |
| Ilustración 43: Parámetros de la góndola en Bladed | 91 |
| Ilustración 44: Parámetros de los sistemas de control y estados operativos en Bladed | 91 |
| Ilustración 45: Condiciones del viento a modelar en Bladed | 92 |
| Ilustración 46: Condiciones del mar en Bladed..... | 93 |
| Ilustración 47: Diagrama de la distribución programática | 94 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Especificaciones básicas del Sistema de Alimentación Ininterrumpida | 26 |
| Tabla 2: Especificaciones básicas de los transformadores a utilizar | 28 |
| Tabla 3: Especificaciones básicas del PLC | 31 |
| Tabla 4: Especificaciones básicas del convertidor G220 | 35 |
| Tabla 5: Especificaciones básicas del convertidor G120 | 35 |
| Tabla 6: Parámetros de la Comunicación Serial entre equipos | 50 |
| Tabla 7: Parámetros de conexión entre el convertidor y el sensor | 55 |
| Tabla 8: Estados operativos del sistema de control y sus parámetros | 56 |
| Tabla 9: Funciones básicas para la regulación del PID | 67 |
| Tabla 10: Especificaciones de los parámetros del PID..... | 69 |
| Tabla 11: Tasa de Pitch para cada estado operativo..... | 71 |
| Tabla 12: Flujo de las etapas reductoras..... | 72 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En el panorama actual, marcado por una creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de transitar hacia fuentes de energía sostenibles, las energías renovables han tomado un papel protagonista. Entre estas, la energía eólica marina representa una fuente prometedora debido a su potencial de generar electricidad de manera limpia y eficiente. A diferencia de la energía eólica terrestre, los aerogeneradores marinos aprovechan los vientos más constantes y fuertes en altamar, lo que los convierte en una opción atractiva para satisfacer la creciente demanda energética global.

Sin embargo, la implementación de estos sistemas no está exenta de desafíos. Las condiciones del entorno marino, como pueden ser la salinidad, la humedad y las fuertes corrientes, presentan obstáculos significativos para el desarrollo de infraestructuras duraderas y eficientes. Además, la distancia de los parques eólicos marinos a la costa plantea retos adicionales en términos de instalación, mantenimiento y, especialmente, en la transmisión de datos y comunicaciones.

En este contexto, la ingeniería de telecomunicaciones desempeña un papel crucial. La necesidad de sistemas de comunicación robustos y fiables es primordial para garantizar el correcto funcionamiento de dichos aerogeneradores marinos y su presencia en el largo plazo. Estos sistemas no solo deben asegurar la transmisión ininterrumpida de datos entre los aerogeneradores y las estaciones de control en tierra, sino que también deben ser capaces de resistir y adaptarse a las condiciones del medio marino.

Más allá de la propia comunicación entre los sistemas de tierra y el propio complejo marítimo, el control de los diferentes componentes dentro de este para su correcto funcionamiento es crucial a la hora de hacer accionar los diferentes motores y subsistemas que trabajan en tándem para producir energía.

Este desafío tecnológico ofrece una oportunidad única para la innovación en el campo de las telecomunicaciones. El desarrollo de soluciones avanzadas en comunicación para aerogeneradores eólicos marinos no solo tiene el potencial de mejorar la eficiencia y rentabilidad de estos proyectos, sino que también puede contribuir significativamente al avance de la energía renovable como pilar de un futuro energético sostenible. Además, la implementación exitosa de estas tecnologías puede tener un impacto positivo a nivel socioeconómico, promoviendo la creación de empleo y fomentando el desarrollo tecnológico y la independencia energética.

1.2 ESTADO DE LA CUESTIÓN

En el diseño del sistema de comunicaciones y control de un aerogenerador *off-shore*, es crucial garantizar una comunicación efectiva entre los diversos subsistemas del complejo, minimizando la pérdida de información. Asimismo, es fundamental que la transmisión de datos y energía entre la base terrestre y la instalación marina sea robusta, asegurando que el sistema en su conjunto resista el paso del tiempo. El uso de convertidores de frecuencia es clave, ya que una interpretación precisa de sus señales es esencial para la transferencia de datos a la central y su correcta interpretación, lo que permite el accionamiento adecuado de los motores correspondientes. Evitar la pérdida o mala interpretación de estas señales es una prioridad en el desarrollo del proyecto para asegurar el funcionamiento óptimo del aerogenerador.

El sistema de control y comunicaciones se fundamenta en distintos estados operativos. En estos estados, el uso de señales lógicas para la activación de motores y otros componentes debe ser lo más eficiente posible. Estos estados se detallarán a lo largo del proyecto.

Además, las comunicaciones del sistema con las centrales en tierra deben superar desafíos como la distancia del parque eólico, que impide el uso de conexiones cableadas, y adaptarse a las condiciones preexistentes de la red eléctrica. Con el avance de las tecnologías de comunicación, el control remoto de estas instalaciones marinas es cada vez más factible, lo

que motiva un análisis profundo sobre el futuro potencial de estas tecnologías en el ámbito de los aerogeneradores marinos.

Todos los aspectos mencionados deben cumplir con la normativa vigente, especialmente las normas GL, las cuales establecen los estándares y requisitos esenciales para el diseño y operación de aerogeneradores *off-shore*.

2. AEROGENERADORES OFF-SHORE

Para el correcto diseño de un aerogenerador eólico marino y, por ende, sus subsistemas, es necesaria una comprensión íntegra de su funcionamiento. Tanto el sistema de control como el de comunicaciones forman parte de un esfuerzo colectivo para poder transformar la energía cinética del aire a un recurso de salida como pueden ser los 5 MW del aerogenerador.

2.1 COMPONENTES

2.1.1 ROTOR

El rotor de un aerogenerador eólico marino es crucial para la captación de energía del viento. Se compone principalmente de las palas y el buje.



Ilustración 5: Rotor de un aerogenerador

2.1.1.1 Palas

Las palas del aerogenerador son fundamentales para la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional. Inicialmente diseñadas como palas rígidas, su evolución ha seguido los avances en aerodinámica derivados de la industria aeronáutica, adoptando formas más aerodinámicas que mejoran la sustentación y eficiencia.

Aunque la potencia capturada no depende directamente del número de palas sino de la superficie que estas barren, el diseño más común incluye tres palas por razones de estabilidad y coste. Los materiales empleados en su fabricación varían desde aleaciones metálicas en modelos más pequeños hasta compuestos avanzados como la fibra de vidrio reforzada con resina epoxi y, en algunos casos, refuerzos de fibra de carbono, buscando la máxima eficiencia con el menor peso y resistencia estructural.

2.1.1.2 Buje

El buje actúa como el punto de unión entre las palas y la góndola, transmitiendo la fuerza y el movimiento del rotor al resto del aerogenerador. Los bujes pueden ser rígidos o basculantes, dependiendo del diseño del aerogenerador. En aerogeneradores de tres palas, como el que consideramos aquí, se utilizan bujes rígidos, fabricados comúnmente de fundición gris nodular para soportar las cargas y vibraciones transmitidas por las palas.

2.1.2 GÓNDOLA

Es la parte principal del aerogenerador donde se alojan la mayoría de los componentes que hacen que su funcionamiento resulte en electricidad aprovechable.



Ilustración 6: Góndola de un aerogenerador con sus elementos a la vista

Las dimensiones de esta varían dependiendo del emplazamiento del parque eólico, y la potencia de salida que este tenga. En el caso de nuestro aerogenerador, y como se verá más

adelante, el emplazamiento permite el uso de unas medidas relativamente estándar, compatibles con el software de simulación usado en nuestro caso (*Bladed Educational*) y haciendo uso de una estructura cuadrada.

2.1.2.1 Generador

El generador es el corazón del aerogenerador, encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Existen generadores síncronos y asíncronos, cada uno con sus propias ventajas.,

En este proyecto haremos uso del primero: un aerogenerador síncrono de imanes permanentes.

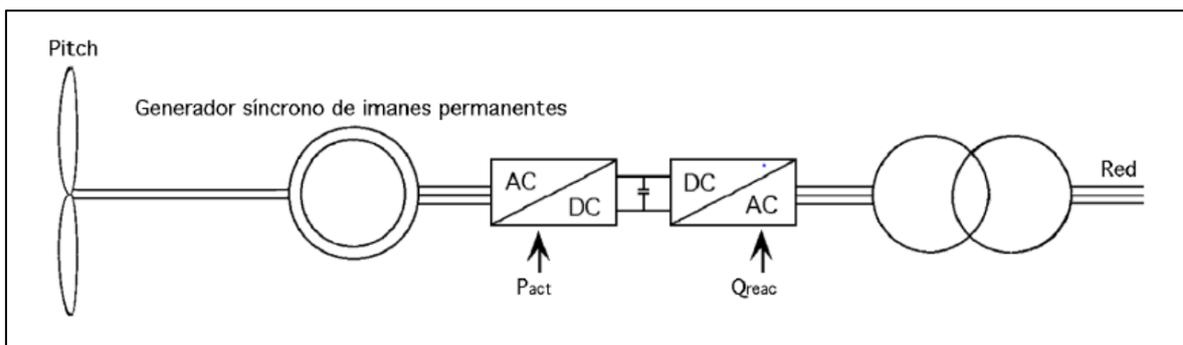


Ilustración 7: Sistema de un Aerogenerador Síncrono de Imanes Permanentes

Las ventajas que nos aportan usar estos y no de otro tipo son la sencillez del diseño respecto al mantenimiento de un campo electromagnético constante, que reduce la complejidad de su funcionamiento y una alta eficiencia en la entrega de la potencia por su mayor factor de potencia.

2.1.2.2 Transmisión

En los aerogeneradores actuales, existen dos enfoques principales para la transmisión de energía: transmisión directa y transmisión mediante caja de engranajes.

- (i) Transmisión Directa

El generador está acoplado directamente al rotor mediante un eje (conocido como eje de baja velocidad). Este diseño elimina la necesidad de una caja de engranajes, lo que simplifica el sistema y reduce el mantenimiento requerido. Sin embargo, para generar la misma cantidad de electricidad, se requiere un generador más grande y con más pares de polos, lo que incrementa su tamaño y peso.

(ii) Transmisión con Caja de Engranajes

En los sistemas de transmisión con caja de engranajes, el rotor está conectado a un eje de baja velocidad que transfiere la rotación a una caja de engranajes. Esta caja aumenta la velocidad de rotación antes de transmitirla al generador a través de un eje de alta velocidad. Este método permite el uso de un generador más compacto, aunque la presencia de la caja de engranajes añade complejidad y requiere un mantenimiento regular debido al desgaste de los componentes.

En este proyecto, se hará uso de un sistema de transmisión directa por su menor mantenimiento y mayor eficiencia.

2.1.2.3 Sistemas de refrigeración y frenado

Para el correcto funcionamiento de una hélice y su control íntegro es necesario que exista un control sobre la velocidad de giro en casos de que las condiciones de viento no permitan su correcto funcionamiento. Se puede lidiar con dos tipos de freno, siendo estos el freno aerodinámico o *feathering* el cual ajusta las palas a una posición en las que no capturen viento, o un freno convencional o mecánico.

Por consiguiente, y para evitar el sobrecalentamiento del generador, es crucial la presencia de un sistema de refrigeración, ya sea por aire o líquido. Estos sistemas mantienen los componentes a temperaturas seguras y operativas, asegurando la longevidad y eficiencia del aerogenerador.

2.1.3 TORRE

La torre soporta la góndola y el rotor, elevándolos a una altura donde los vientos son más fuertes y constantes. Suele construirse de acero o concreto y puede medir entre 80 y 150 metros de altura. La estructura debe ser extremadamente robusta para resistir las cargas estáticas y dinámicas, incluidas las fuerzas del viento y el peso de la góndola y el rotor.



Ilustración 8: Torre del aerogenerador, en el caso del nuestro de 80 metros

2.2 ESTADOS DE OPERACIÓN

En el funcionamiento de un aerogenerador, se distinguen varios estados de operación, esenciales para una gestión efectiva y segura del sistema. Estos estados permiten adaptar la operación del aerogenerador a las condiciones cambiantes del entorno, optimizando la generación de energía y asegurando la integridad mecánica del equipo. A continuación, se describen los principales estados de operación:

- (i) Estacionado (*Parked*): el aerogenerador se encuentra completamente inactivo con las palas bloqueadas y orientadas de tal manera que minimizan la carga aerodinámica debido al viento.

- (ii) Arranque (*Start*): el aerogenerador inicia sus operaciones y comienza a ajustar las palas para captar de manera eficiente la energía del viento.
- (iii) Operación Normal: estado regular de operación donde el aerogenerador produce energía de manera eficiente ajustándose a la velocidad y dirección del viento.
- (iv) Parada Normal (*Normal Stop*): se inicia una desaceleración controlada y segura del aerogenerador hasta que se detiene completamente.
- (v) Parada de Emergencia (*Emergency Stop*): parada inmediata de todas las operaciones del aerogenerador en respuesta a una condición de emergencia.
- (vi) Estado de Ralentí (*Idling*): el aerogenerador opera a mínima capacidad.

Estos estados son fundamentales para una operación flexible y adaptativa del aerogenerador, permitiendo ajustes dinámicos según las condiciones externas y las necesidades operativas.

2.3 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control en un aerogenerador eólico marino está diseñado para gestionar y supervisar todas las operaciones del aerogenerador, asegurando un rendimiento óptimo en todo momento. Este sistema incluye diversos subsistemas y tecnologías que trabajan en conjunto para maximizar la producción de energía y proteger el aerogenerador contra condiciones adversas.

Existen dos sistemas de control principales dentro del aerogenerador.

2.3.1 CONTROL DE PASO DE PALA (*PITCH CONTROL SYSTEM*)

El sistema de control de paso es esencial para la regulación eficiente de la captura de energía eólica. Este sistema ajusta el ángulo de las palas en respuesta a las variaciones en la velocidad del viento, permitiendo maximizar la eficiencia en condiciones óptimas y proteger el aerogenerador en situaciones de vientos extremos.

Para ello los aerogeneradores están equipados con reguladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Son sistemas sistema ampliamente utilizados en la automatización y regulación de procesos industriales. Su funcionamiento se basa el ajuste dinámico de variables de

control para minimizar la diferencia entre un valor deseado (*setpoint*) y el valor de giro a la salida del motor.

El componente proporcional del PID responde a la magnitud del error, el componente integral acumula el error pasado para eliminar el *offset* a largo plazo, y el componente derivativo anticipa futuras tendencias del error, proporcionando una respuesta más rápida y precisa.

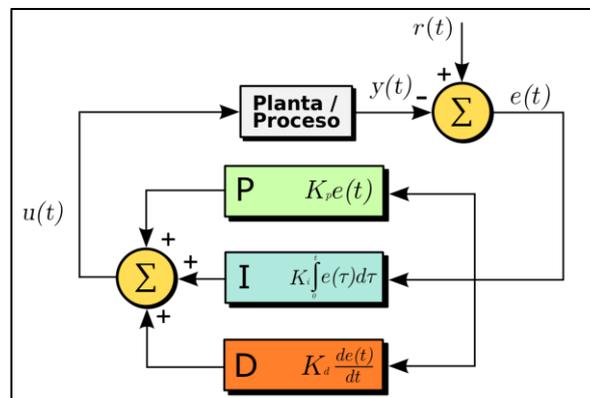


Ilustración 9: Diagrama de bloques de controlador PID

En respuesta a este error, el sistema de control de paso actúa motores eléctricos o hidráulicos para cambiar el ángulo de las palas. Este sistema está diseñado con redundancia para asegurar que siempre haya un mecanismo de control operativo en caso de fallo, garantizando así la fiabilidad y seguridad del aerogenerador incluso en condiciones adversas.

Con respecto al diseño del proyecto, y en vista de las limitaciones por el software de modelización a emplear (*Bladed Educational*), se hará uso de un controlador PI, para el cual se determinarán sus constantes y modelizará la salida en casos de condiciones desfavorables.

2.3.2 CONTROL DE ORIENTACIÓN (*YAW CONTROL SYSTEM*)

Por último, el sistema de control de orientación permite que la góndola gire para enfrentar el rotor hacia la dirección del viento predominante, maximizando la eficiencia en la

captación de energía. Utiliza motores eléctricos y un sistema de engranajes para rotar la góndola y trabaja con sensores de dirección del viento que proporcionan datos en tiempo real para asegurar una alineación óptima con el viento.

A lo largo de este trabajo se hará enfoque en los componentes que lo controlan, pero se profundizará en su sistema homólogo.

2.4 SISTEMA DE COMUNICACIONES

El sistema de comunicaciones del aerogenerador está diseñado para garantizar una operación eficiente y segura, permitiendo la interacción fluida entre los subsistemas de este y facilitando la comunicación con las estaciones de control en tierra. Este sistema se fundamenta en el modelo de referencia OSI (*Open Systems Interconnection*), que estructura las funciones de la red en siete capas¹.

En la práctica, la mayoría de los sistemas de comunicaciones actuales se basan en el conjunto de protocolos TCP/IP, que es compatible con el estándar Ethernet a nivel de enlace de datos y red. Esto asegura que los sistemas puedan comunicarse de manera efectiva dentro de una arquitectura de red ampliamente aceptada y estandarizada, facilitando la integración entre diferentes equipos y plataformas.

A nivel de aplicación, se utilizan diversos protocolos estándar del mercado que permiten la implementación de funciones específicas necesarias para la operación y el mantenimiento del aerogenerador. Estos estándares están llevando hacia soluciones más simplificadas, permitiendo crear topologías de red más sencillas y eficientes, facilitando la configuración y gestión de las redes, y mejorando la robustez del sistema de comunicaciones global.

¹ Física, enlace de datos, red, transporte, sesión, presentación y aplicación.

2.4.1 CONTROLADOR

En cualquier sistema integrado de comunicaciones y control, se utiliza un ordenador central, comúnmente conocido como PLC (Controlador Lógico Programable), para gestionar y coordinar todas las operaciones del sistema.

Este dispositivo esencial cuenta con diversas entradas de alimentación y se equipa con módulos especializados que facilitan su capacidad de control y supervisión. El PLC es responsable de orquestrar la actividad de los distintos componentes del sistema, asegurando que todas las funciones se ejecuten de manera eficiente y coordinada. Gracias a su configuración modular, permite una adaptabilidad y escalabilidad ventajosas, lo que lo hace indispensable en la automatización industrial moderna.

En el desarrollo del proyecto se especificará tanto fabricante como modelo del PLC a utilizar.

2.4.2 OPCIONES DE COMUNICACIÓN

En el sistema de comunicaciones de un aerogenerador eólico marino, es crucial seleccionar tecnologías que aseguren una comunicación eficaz tanto a nivel local entre los dispositivos del aerogenerador como para la transmisión de datos hacia instalaciones en tierra. Dada la complejidad y los requerimientos de un entorno marino se han elegido dos tecnologías principales: PROFINET para la interconexión interna y OPC UA para la comunicación de larga distancia.

2.4.2.1 PROFINET para la Interconexión Local

PROFINET es un estándar industrial basado en Ethernet diseñado para redes de automatización, ubicado tanto a el nivel de enlace como de aplicación en el modelo OSI². Dentro del aerogenerador, PROFINET facilita una comunicación rápida y confiable entre

² Modelo OSI de TCP/IP: físico, enlace, red, presentación y sesión, y aplicación

componentes como sensores, convertidores y controlador. Entre sus ventajas se destacan las siguientes:

- (i) **Tiempo Real:** PROFINET está optimizado para aplicaciones que requieren una respuesta rápida y precisa, crucial para el control automático y ajuste de los aerogeneradores. Cuenta con una variante esclavo/controlador (PROFINET IO) que resulta muy útil para el control de paso de pala.
- (ii) **Flexibilidad de Red:** Soporta múltiples topologías de red, lo que permite su adaptación a las configuraciones específicas del aerogenerador.
- (iii) **Diagnóstico Avanzado:** Ofrece herramientas de diagnóstico que ayudan a detectar y resolver problemas rápidamente, minimizando los tiempos de inactividad.

2.4.2.2 OPC UA para la Conexión a Tierra

OPC UA se utiliza para transmitir información desde el aerogenerador hasta el servidor en tierra. Este protocolo proporciona varias ventajas para la comunicación de datos a larga distancia:

- (i) **Seguridad:** Incorpora características de seguridad avanzadas como cifrado y autenticación, asegurando que los datos transmitidos están protegidos contra accesos no autorizados.
- (ii) **Interoperabilidad:** Permite la integración sin fisuras con diferentes sistemas y plataformas, lo cual es esencial para el manejo centralizado de datos provenientes de múltiples aerogeneradores.
- (iii) **Independencia de Plataforma:** Compatible con varios sistemas operativos y plataformas hardware, lo que permite implementarse en varias infraestructuras tecnológicas.

La compatibilidad de esta interfaz a nivel de aplicación OSI con ethernet-TCP/IP permite el uso de cables ethernet para la transmisión de datos. La aplicación de este protocolo en el diseño se profundizará más adelante.

2.4.3 SISTEMA SCADA

El sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) es una plataforma integral de monitoreo y control utilizada ampliamente en industrias, incluyendo la generación de energía eólica. Estos sistemas están en constante comunicación con los PLCs del diseño para la recopilación de información de sensores y actuadores, interpretación de ellos y la toma de decisiones en función de estos.

La presencia de estos sistemas permite a los operadores monitorear el estado del aerogenerador en todo momento y en tiempo real, aumentando así la versatilidad y eficiencia en la operación del sistema.

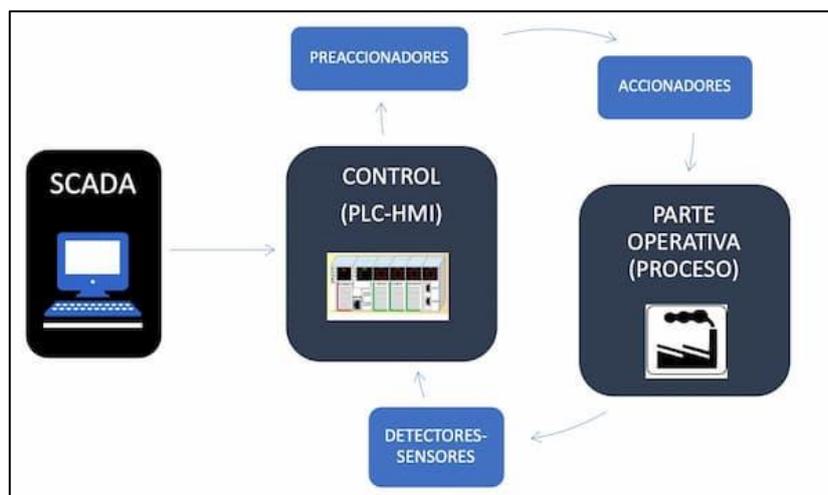


Ilustración 10: Funcionamiento básico de un sistema SCADA

En el caso de nuestro diseño, el sistema SCADA va ligado con el uso de servidores OPC UA y sus conexiones entre tierra y la planta.

2.4.4 VPN Y COMUNICACIÓN REMOTA

La capacidad de comunicación remota es vital para garantizar un monitoreo y control efectivos de los aerogeneradores eólicos marinos desde estaciones ubicadas a gran distancia. Un componente crucial de esta infraestructura de comunicación es la Red Privada Virtual

(VPN), que proporciona un canal seguro para la transmisión de datos entre el aerogenerador y las estaciones de control remoto.

Una VPN crea un túnel cifrado entre el aerogenerador y la estación de control remoto, protegiendo los datos transmitidos contra accesos no autorizados y asegurando la integridad de la comunicación. La configuración de una VPN implica definir parámetros críticos como el tipo de cifrado, la autenticación y las claves de seguridad, que aseguran una comunicación segura. El cifrado de datos de alto nivel, como AES-256³, junto con mecanismos robustos de autenticación, garantiza que solo usuarios autorizados puedan acceder a la red, proporcionando una capa adicional de seguridad.

La integración de esta tecnología por medio del uso de un rúter industrial, junto con el sistema SCADA proporciona un canal de comunicación robusto, accesible y seguro para el monitoreo y operación del aerogenerador desde las estaciones de control a distancia.

2.4.5 USO DE FIBRA ÓPTICA

Hoy en día, para la correcta transmisión de manera segura y eficiente de datos desde las estructuras *offshore* a las plantas de control en tierra, el uso de fibra óptica se ha convertido en una apuesta segura. Esta tecnología, que cumple con todas las premisas mencionadas, proporciona una comunicación de alta velocidad y baja latencia, esencial para la gestión en tiempo real de los aerogeneradores eólicos marinos. Los hilos de fibra óptica, compuestos por materiales como vidrio o plásticos especiales, transmiten información mediante pulsos de luz, lo que permite enviar grandes volúmenes de datos a largas distancias y a través de ambientes adversos, sin sufrir interferencias de señales electromagnéticas.

Esta capacidad resulta particularmente valiosa en entornos marinos, donde las condiciones pueden degradar otras formas de comunicación. Integrar la fibra óptica en el diseño de aerogeneradores eólicos marinos facilita no solo una comunicación fiable y continua entre

³ Estándar de cifrado adoptado por el gobierno de los Estados Unidos y ampliamente utilizado a nivel mundial para proteger datos sensibles

la turbina y la estación de control en tierra, sino que también es crucial para el monitoreo constante del sistema.

Existen dos tipos de fibras ópticas comúnmente utilizadas.

- (i) **Monomodo:** ideal para distancias mayores a 2 kilómetros, ya que ofrece mayor ancho de banda, menor atenuación y mayor capacidad de transmisión. Consta con un único núcleo de fibra, por lo que solo se puede transportar un pulso de luz. Es la opción preferida para garantizar un funcionamiento óptimo y confiable del sistema de comunicaciones, con unas pérdidas mínimas hasta distancias de centenas de kilómetros.
- (ii) **Multimodo:** adecuada para distancias menores a 2 kilómetros, donde la atenuación y el ancho de banda no son tan críticos. Cuenta con dos canales de luz, siendo una opción más económica pero no adecuada para distancias más largas debido su mayor tasa de pérdidas.

A lo largo de este proyecto, se considerará el uso de dos cables de fibra monomodo (uno para envío y otro para recepción de datos) por la distancia a la que se encuentra la planta de la costa. Esta problemática se estudiará más adelante.

2.5 ESTÁNDAR IEC 61400-25

El IEC 61400-25 forma parte de una serie de normas internacionales desarrolladas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) para la integración de sistemas de control y monitoreo de parques eólicos. Este estándar se centra en la comunicación para la supervisión y control de equipos dentro de una planta eólica, proporcionando un marco común para la interoperabilidad entre dispositivos y sistemas de diferentes fabricantes.

Las principales características de este incluyen:

- (i) Integración: Asegura que los componentes de diferentes fabricantes puedan comunicarse y trabajar juntos sin problemas, facilitando la expansión de sistemas.
- (ii) Eficiencia en la Transmisión de Datos: Define métodos y protocolos para la transmisión eficiente de datos de monitoreo y control, asegurando un rendimiento fiable y continuo.
- (iii) Flexibilidad: Ofrece una arquitectura flexible que puede adaptarse a diferentes configuraciones y necesidades operativas, permitiendo personalizar la implementación según los requisitos específicos de cada planta eólica.
- (iv) Seguridad: Incorpora medidas de seguridad para proteger la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos, garantizando operaciones seguras y confiables.
- (v) Cumplimiento Normativo: Facilita el cumplimiento de otras normativas y estándares relacionados con la operación y mantenimiento de instalaciones eólicas, promoviendo prácticas coherentes y estandarizadas en la industria.

3. DISEÑO DEL ENTORNO

3.1 ALIMENTACIÓN, ENTORNO FÍSICO Y SAI

Para la alimentación de los diferentes componentes dentro del diseño es necesario hacer una evaluación íntegra del entorno y de las entradas de electricidad a la planta eólica por parte de la red, y adaptar estas a las necesidades del hardware a utilizar.

3.1.1 SAI

Un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI), también conocido por sus siglas en inglés como UPS (Uninterruptible Power Supply), es un componente crítico en la infraestructura de energía de un aerogenerador. Este dispositivo garantiza la continuidad operativa de los componentes críticos, como el PLC y sus módulos asociados, motores y otros elementos del sistema, ante fallos o interrupciones en el suministro eléctrico convencional.

El diseño del SAI incorpora un convertidor que facilita la acumulación de energía en baterías de corriente continua. En condiciones de funcionamiento normales, la energía de la red eléctrica no solo alimenta las cargas conectadas, sino que también mantiene las baterías completamente cargadas. Si ocurren anomalías en la red que comprometan la provisión eléctrica, el SAI automáticamente cambia a modo de batería, continuando así el suministro de energía sin interrupciones a todas las cargas esenciales.

Para ilustrar la funcionalidad básica y asegurar una comprensión clara del papel que desempeña el SAI dentro del entorno de un aerogenerador, se adjunta una descripción simplificada del mecanismo de acción del sistema. Esta explicación visual ayuda a destacar

cómo el SAI provee una capa adicional de seguridad y fiabilidad al sistema de control y operación del aerogenerador.

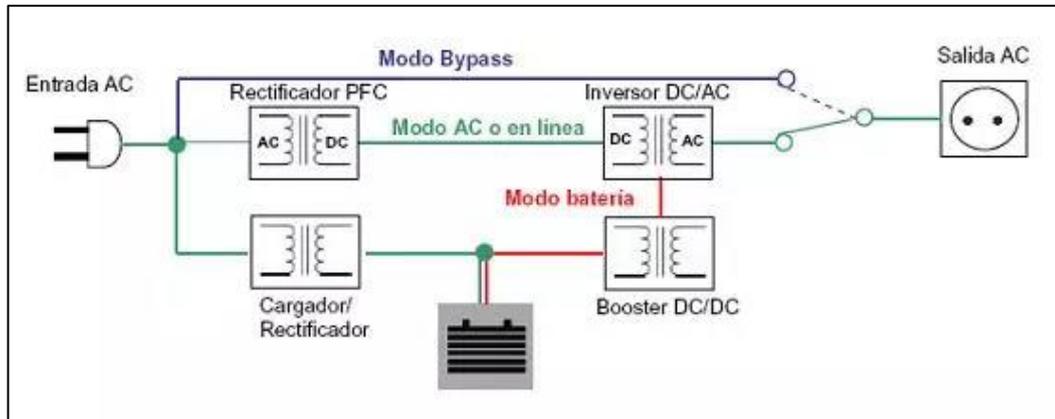


Ilustración 11: Funcionamiento básico de un sistema SAI on-line

En el diseño planteado se hará uso de un sistema de alimentación ininterrumpida utilizado comúnmente en entornos industriales. Se trata del Symmetra PX de 200kW del fabricante Schneider Electric.

Este está diseñado para ofrecer alta confiabilidad en condiciones adversas. El sistema modular puede escalarse de 200kW a 250kW, lo que lo hace ideal para adaptarse a las necesidades energéticas variadas de los aerogeneradores y su eficiencia líder en la industria asegura un mínimo desperdicio de energía, vital para optimizar los costos operativos en entornos marinos.

Además, el SAI cuenta con un diseño que facilita el mantenimiento gracias a su *bypass* incorporado, permitiendo intervenciones sin cortar la energía, crucial en ubicaciones remotas y de difícil acceso. La protección avanzada contra sobrecargas y un sistema de manejo de baterías VRLA contribuyen a su durabilidad y seguridad.

Finalmente, este SAI cumple con estrictas regulaciones ambientales bajo la etiqueta Green Premium de Schneider Electric, lo que garantiza un impacto ambiental reducido y sustenta el compromiso con la sostenibilidad en proyectos de energía renovable en el mar.

| SAI (400 – 400 V) | |
|----------------------------------|--|
| Especificaciones Básicas | |
| Fabricante | Schneider Electric |
| Modelo | Symmetra PX de 200kW (SY200K250DR-PD) |
| Potencia Nominal (W/VA) | 200.000 W/VA |
| Potencia Máxima Configurable (W) | 500.000 W |
| Tipo de Batería | VRLA |
| Número de Módulos de Baterías | 13 incluidos |
| Tiempo Típico de Recarga | 3,5 horas |
| Entrada de Voltaje (V) | 480 V/ 400 V/ 415 V (3 fases) |
| Salida de Voltaje (V) | 480 V/ 400 V/ 415 V (3 fases) |
| Tipo de <i>Bypass</i> | <i>Bypass</i> de mantenimiento incorporado |
| Duración de Vida de la Batería | 5–8 años |
| Tolerancia de Tensión de Salida | +/-1% estático y +/- 5% al 100% de carga |
| Distorsión Armónica de Salida | < 2% para carga lineal; < 6% no lineal |
| Grado de Protección | IP20 |

Tabla 1: Especificaciones básicas del Sistema de Alimentación Ininterrumpida

3.1.2 TRANSFORMADORES

Como se ha mencionado en la sección anterior, el Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) desempeña un papel crucial proporcionando una fuente de energía constante y segura para los componentes esenciales del sistema. Sin embargo, la tensión de salida del SAI en corriente alterna es de 400V, demasiado elevada para ser utilizada directamente por los componentes del sistema de control y comunicaciones.

Para adecuar esta energía a las necesidades específicas del sistema, se propone implementar una transformación de la tensión entrante. Para ello se propone el uso de un transformador AC/AC que reduzca la tensión de 400V a 230V. Adicionalmente, se incluirá un convertidor que reduzca aún más la tensión a 24V DC, proporcionando así un punto de conexión auxiliar

idóneo para la alimentación de baja tensión requerida por el resto de los componentes del sistema de comunicaciones, como se detallará más adelante.

Esta configuración garantiza que todos los componentes del sistema reciban la tensión adecuada para su operación óptima y segura, minimizando el riesgo de daños por sobretensión y maximizando la eficiencia del sistema global.



Ilustración 12: Transformador Schneider Electric 400 VAC-230VAC



Ilustración 13: Transformador Mean Well (grupo de alimentacion) de 230VAC-24VCC

| <i>Transformador 400 V AC-230 V AC</i> | |
|---|---|
| Especificaciones Básicas | |
| Fabricante | Schneider Electric |
| Modelo | ABL6TS40U |
| Potencia Nominal | 400 VA |
| Tensión de Entrada | 400 V AC |
| Tensión de Salida | 230 V AC |
| Rango Operativo | -20°C / 50°C |
| Rango de Frecuencias de entrada | 47 - 63 Hz |
| Pérdidas | 12,4 W |
| <i>Transformador 230 V AC – 24V CC</i> | |
| Especificaciones Básicas | |
| Fabricante | Mean Well |
| Modelo | LRS-450-24 |
| Tensión de Entrada | 180-264 V AC |
| Tensión de Salida | 24 V DC |
| Potencia de Salida | 451 W |
| Rango Operativo | -20 °C / 70°C |
| Rango de Frecuencias de entrada | 47 - 63 Hz |
| Protecciones | Vibraciones (5Gs), relés, apagado automático en sobrecarga, temperatura y tensión |
| Control | Dispone de un interruptor para definir la tensión de entrada para proteger el dispositivo frente a posibles errores en la entrada |
| Eficiencia | 91% |

Tabla 2: Especificaciones básicas de los transformadores a utilizar

El criterio aplicado para la elección de estos se basa en el rango operativo de temperatura, así como el rango de frecuencia de entrada ya que esta puede variar al pasar por los diferentes componentes de entrada. A su vez, el transformador a corriente continua dispone de 8 pines y una potencia de salida alta para poder alimentar todos los dispositivos del entorno y escalar así el diseño si fuera necesario.

3.2 PLC (CONTROLADOR)

3.2.1 CRITERIOS Y SELECCIÓN

Para el control de paso de pala y las comunicaciones se requiere un sistema unificado capaz de recibir todos los datos, procesarlos y actuar en base a ellos. Además, dicho sistema debe poder enviar las decisiones, datos y lecturas de los sensores pertinentes en tiempo real.

La elección del PLC adecuado para el aerogenerador debe seguir unas directrices fundamentales. En primer lugar, la capacidad de expansión es esencial, permitiendo la adición de módulos externos para aumentar la versatilidad y adaptabilidad del sistema a futuras necesidades. En segundo lugar, la capacidad de procesamiento debe ser suficiente para manejar datos en tiempo real, procesar información de sensores y ejecutar algoritmos de control complejos. Además, la velocidad de respuesta es crucial para asegurar que el PLC pueda reaccionar rápidamente a los cambios y mantener un control eficiente del aerogenerador.

Es importante destacar que los PLC considerados son de automatización industrial, garantizando su idoneidad y robustez para el proyecto. Estos PLC están diseñados para operar en entornos industriales exigentes, proporcionando la fiabilidad y el rendimiento necesarios para el control efectivo de los aerogeneradores.



Ilustración 14: PLC Siemens S7-1500

Considerando los criterios mencionados, se propone utilizar el PLC del fabricante Siemens, modelo S7-1500. La elección de la CPU como unidad central del PLC es la 1516-3 PN/DP, debido a su valor añadido por medio de una memoria de trabajo robusta y tiempos de procesado reducidos, mejorando significativamente el rendimiento y capacidad de control del sistema.

A su vez, y al tratarse de un elemento modular, se ha de incluir un módulo de alimentación al *backplane* del PLC en cuestión. Para ello se ha escogido el módulo PS 60W 120/230V AC/DC por su capacidad de redundancia y mayor capacidad de salida para posibles expansiones del diseño en un futuro, así como su compatibilidad de entrada por parte de los transformadores del sistema de alimentación.

A continuación, se adjunta una tabla de las especificaciones básicas del PLC y sus módulos básicos.

| SIMATIC S7-1500 | |
|--|--|
| CPU | |
| Especificaciones Básicas | |
| Fabricante | Siemens SIMATIC |
| Modelo | 1516-3 PN/DP (6ES7516-3AN01-0AB0) |
| Software Integrado | STEP 7 TIA Portal V14 o superior |
| Tensión de Alimentación | 24 V DC |
| Rango Admisible, Límite Inferior (DC) | 19,2 V |
| Rango Admisible, Límite Superior (DC) | 28,8 V |
| Consumo de Corriente (valor nominal) | 0.85 A |
| Potencia Consumida del Bus de Fondo | 6,7 W |
| Diseño Modular | Sí (hasta 32 módulos) |
| Número de Interfaces PROFINET Integradas | 2 |
| Número de Interfaces PROFIBUS Integradas | 1 |
| Número Máximo de Controladores IO | 2 (integrados), 8 (vía CM/CP) |
| Reloj de Hardware | Sí, con duración de respaldo de 6 semanas a 40°C |
| Temperatura de Operación | 0°C a 60°C (montaje horizontal), 0°C a 40°C (montaje vertical) |
| Memoria de trabajo | |
| Integrada (para programa) | 1 MB |

| | |
|--|--|
| Integrada (para datos) | 5 MB |
| Integrada (para programa) | 1 MB |
| Integrada (para datos) | 5 MB |
| Comunicación IE abierta | |
| TCP/IP | Máx. 64 KB |
| ISO on TCP (RFC1006) | Máx. 64 KB |
| UDP | Máx. 1472 bytes |
| PROFINET | Sí |
| Ethernet Industrial | Sí |
| MÓDULO DE ALIMENTACION | |
| Fabricante | SIEMENS SIMATIC |
| Modelo | PS 60W 120/230V AC/DC (6ES7507-0RA00-0AB0) |
| Tensión de alimentación | 230/120 V AC/DC |
| Rango admisible, límite inferior (DC) | 88 / 85 V (DC/AC) |
| Rango admisible, límite superior (DC) | 300 / 264 (DC/AC) |
| Potencia suministrada del bus de fondo | 60 W |
| Capacidad de Redundancia | Sí |

Tabla 3: Especificaciones básicas del PLC

3.2.2 ENTORNO SOFTWARE

3.2.2.1 *Comprensión y Uso del Software*

Una vez introducido el hardware, es esencial comprender en profundidad el funcionamiento del software que facilitará la programación y gestión de este. En este contexto, el entorno Siemens ofrece una plataforma robusta y eficiente a través del software STEP 7, que se utiliza para programar y configurar los sistemas de automatización SIMATIC, ideales para aplicaciones de alta demanda como lo es el control de aerogeneradores eólicos marinos.

En el ecosistema Siemens, la programación se realiza con un lenguaje basado en bloques de instrucción, lo que permite una estructuración clara y modular del código, facilitando la implementación y el mantenimiento futuro del sistema. Este enfoque modular se articula a través de diversos tipos de bloques, cada uno con funciones específicas:

- (i) Bloques de Organización (OBs): Son los encargados de manejar eventos como el arranque del sistema, fallos y paradas de emergencia. Por ejemplo, el OB1 se ejecuta cíclicamente y es donde se sitúa la lógica principal de control del aerogenerador.
- (ii) Funciones (FCs) y Bloques de Función (FBs): Permiten encapsular algoritmos específicos, como pueden ser cálculos o el seguimiento de la velocidad del viento. Los FBs son particularmente útiles ya que permiten almacenar datos entre ciclos de ejecución, esencial para mantener el estado entre las verificaciones de sensores y actuadores.
- (iii) Bloques de Datos (DBs): Utilizados para almacenar información configurada por el usuario y datos operativos críticos, como pueden ser los parámetros de configuración del aerogenerador, estados operativos y registros de eventos. Todo FB tiene un bloque de datos homologo para almacenar sus variables.
- (iv) Funciones de Sistema (SFCs) y Bloques de Función de Sistema (SFBs): Ofrecen herramientas preprogramadas para realizar tareas comunes de programación, tales como comunicación entre dispositivos, temporización y conteo.

En el entorno Siemens, aunque el diseño lógico de la programación es visual, se pueden usar diversos lenguajes de programación. Entre estos se encuentran SCL (Structured Control Language) y KOP (Kontaktplan, también conocido como ladder). SCL es un lenguaje de programación textual basado en el estándar IEC 61131-3, que iguala los lenguajes de programación y la arquitectura básica del software dentro del programa de control de un PLC. Su sintaxis y estructura se asemejan a lenguajes de programación de alto nivel como Pascal o C, lo que lo hace muy potente y flexible. Es por ello por lo que se elige para este proyecto.

3.2.2.2 Ventajas del software

El uso de un lenguaje de programación basado en bloques dentro del software STEP 7 ofrece múltiples ventajas que son fundamentales para el desarrollo y la gestión de sistemas de control en ambientes críticos:

- (i) **Modularidad:** Facilita la organización del código, permitiendo que diferentes partes del sistema sean desarrolladas y probadas de manera independiente, lo que reduce errores y aumenta la eficiencia del desarrollo.
- (ii) **Escalabilidad:** A medida que el sistema de control del aerogenerador requiere nuevas funcionalidades, se pueden añadir nuevos bloques sin necesidad de realizar cambios significativos en los componentes existentes. Esto permite una expansión gradual y controlada del sistema, adaptándose a nuevas tecnologías y requisitos operativos sin comprometer la integridad del sistema existente.

Estas características hacen de STEP 7 una herramienta indispensable para el control eficiente y adaptable de aerogeneradores eólicos marinos, asegurando un rendimiento óptimo y una alta disponibilidad del sistema en un entorno marino desafiante.

3.3 CONVERTIDOR (DISPOSITIVO)

El convertidor, un componente clave en la electrónica de potencia, es responsable del arranque y detención de motores eléctricos. Funcionando como un variador de frecuencia, ajusta las características de la señal eléctrica para cumplir con los requisitos operativos específicos, siendo las alteraciones en el nivel de tensión y la frecuencia las más destacadas.

Para el control de paso de pala, el sistema requiere dispositivos capaces de gestionar y ejecutar acciones basadas en datos procesados, además de comunicar decisiones y lecturas de sensores en tiempo real. En este marco, el variador de frecuencia Sinamics G220 es crucial para la operación eficiente del aerogenerador, aportando un valor agregado mediante un sistema de optimización de PID que regula constantemente el estado de las palas utilizando información de sensores específicos.

Por otro lado, el Sinamics G120 es un convertidor ampliamente utilizado para el control de motores y actuadores, ofreciendo una solución adaptable y eficiente para el manejo de cargas mecánicas apto para el sistema de orientación.

Ambos convertidores son componentes fundamentales del sistema de automatización, no solo por su capacidad para controlar los motores de manera precisa y adaptable, sino también por su capacidad de integrarse perfectamente con el PLC Siemens S7-1500, facilitando una comunicación fluida y una integración completa con el sistema de control central. La selección de estos dispositivos se rige por criterios que priorizan la expansión, robustez y adaptabilidad, necesarios para satisfacer las demandas presentes y futuras del aerogenerador.



Ilustración 15: Gama Sinamics G220

A continuación, se adjunta una tabla con las especificaciones básicas de los convertidores y su integración en el sistema de control general.

| SINAMICS G220 | |
|---------------------------------|--|
| Especificaciones Básicas | |
| Fabricante | SIEMENS SINAMICS |
| Modelo | 6SL4113-026-2F0 |
| Tensión de alimentación | 400 V |
| Transformación | AC/AC |
| Potencia nominal | 45 kW, baja sobrecarga |
| Intensidad nominal de salida | 90 A, baja sobrecarga |
| Intensidad nominal de entrada | 86,7 A, baja sobrecarga |
| Recuperación de energía | No |
| Modos de control | V/f, FCC, ECO, control vectorial con o sin encoder, control de par con o sin encoder |
| Protección | IP 55/UL Type 12 |
| Temperatura ambiente | -20 °C a 60 °C, > 45 °C con reducción |

| | |
|------------------------|---|
| Filtro de línea | Con filtro de línea integrado para ambientes conforme a la Categoría C2 de la EN 61800-3, reactancia DC integrada, Categoría C3 (690 V) |
| Chopper de frenado | Sí, unidad de frenado integrada como estándar Estándar: STO, SS1, SMT (requiere opción módulo SMT) Extensivas: SS1, SLS, SDI, SSM |
| Funciones de seguridad | Certificado conforme a la IEC 61800-5- hasta SIL 3 e ISO 13849-1 Cat. 4 y PL e |
| Comunicaciones | PROFINET (RT/IRT, MRP y Redundancia S2), Modbus TCP/IP, EtherNet/IP |
| Controladores | SIMATIC S7-1200/S7-1500, SIMATIC ET200 S7-1500/1200/400, Desigo PX |

Tabla 4: Especificaciones básicas del convertidor G220

| SINAMICS G120 | |
|---------------------------------|---|
| Especificaciones Básicas | |
| Fabricante | SIEMENS SINAMICS |
| Modelo | 6SL3225-0BE25-5AA1 |
| Tensión de alimentación | 400 V |
| Transformación | AC/AC |
| Potencia nominal | 7,5 kW |
| Intensidad nominal de salida | 18 A |
| Recuperación de energía | Sí |
| Modos de control | V/f (lineal, exponencial, FCC, ECO), vectorial con y sin encoder (VC, SLVC) |
| Protección | IP20/UL open type |
| Temperatura ambiente | -10 °C a 40 °C sin derating/hasta 60 °C con derating |
| Filtro de línea | Con filtro de línea integrado para ambientes Categoría C3/C2 según la IEC 61800-3, Sin filtro de línea integrado para ambientes Categoría C4 según la IEC 61800-3 |
| Chopper de frenado | No |
| Funciones de seguridad | STO, SS1, SBC, SLS, SDI, SSM |
| Comunicaciones | PROFINET, PROFIBUS DP, EtherNet/IP, USS/Modbus RTU, CANopen, PROFIsafe |
| Controladores | SIMATIC ET200, SIMATIC S7-1200/SIMATIC S7-1500, SIMATIC PCS 7 |

Tabla 5: Especificaciones básicas del convertidor G120

3.4 *SENSORES*

Como se detalla previamente, la eficiencia de cualquier sistema de control depende de entradas específicas. En el contexto de un aerogenerador, estas entradas provienen de sensores avanzados que registran variables críticas como el ángulo de las palas y las condiciones del viento. Estos datos son esenciales para realizar ajustes precisos que optimicen la generación de energía en diversos ambientes.

3.4.1 **SENSOR DE VELOCIDAD DE VIENTO (ANEMÓMETRO)**

El anemómetro, un componente esencial en la operativa de aerogeneradores, juega un papel crucial al medir la velocidad del viento. Utilizando un anemómetro ultrasónico como el WindObserver 70/75 de Gill Instruments, que proporciona una resolución de 0.01 m/s, es posible detectar variaciones mínimas en la velocidad del viento. Esta capacidad de medición precisa es vital para la toma de decisiones sobre el ajuste del ángulo de las palas, permitiendo adaptar el aerogenerador a cambios sutiles y rápidos en las condiciones del viento.

La integración de este sensor se realiza mediante una conexión directa a la unidad de control del aerogenerador a través de un cable serial RS422. Para ello se requiere un módulo específico que facilite la conexión y comunicación entre el anemómetro y el PLC. Además, se tiene que desarrollar un programa dentro del controlador para interpretar y procesar los datos del sensor en tiempo real, aspecto detallado más adelante en el diseño de los sistemas.

3.4.2 **SENSOR DE ÁNGULO DE PALA**

El sensor de ángulo de pala, otro componente fundamental, mide la orientación de las palas del aerogenerador. Este sensor, específicamente el R-Series V RH5 PROFINET de Temposonics, se integra perfectamente en la arquitectura de red de ethernet industrial del sistema de control. La instalación de este sensor es crítica y se ubica en el buje de las palas, una posición estratégica que permite medir directamente el ángulo de las palas respecto al viento. Esta ubicación central no solo facilita la medición precisa, sino que también protege

al sensor de las extremas condiciones ambientales típicas en la altura donde operan los aerogeneradores.

Para su conexión, este sensor emplea el bus PROFINET integrado, necesitando solo un cable adaptador de red ethernet-M12. Esta simplificación en la infraestructura facilita una instalación menos compleja y promueve una comunicación eficiente y confiable.

Para obtener más detalles sobre las especificaciones técnicas de los sensores, se recomienda consultar el anexo.

3.5 RÚTER

La integridad de los datos y la eficacia en su transmisión mediante el uso de fibra óptica son esenciales, por lo que es imprescindible contar con un dispositivo que garantice el cumplimiento de estas funciones críticas.

En este contexto, el rúter industrial SCALANCE SC-642-2C de Siemens se destaca como una elección estratégica. Este dispositivo no solo facilita la integración de funcionalidades avanzadas como VPNs y enrutamiento dinámico dentro de la topología de red, sino que también cumple con los requisitos establecidos por el estándar IEC 61400-25, específico para comunicaciones en aerogeneradores eólicos marinos.

El SCALANCE SC642-2C, equipado con dos entradas eléctricas y dos ópticas, permite una expansión y escalabilidad de la red, integrando otros dispositivos como interruptores de red para conformar un sistema más eficiente y robusto. Esta capacidad de expansión es vital para adaptarse a las necesidades cambiantes de los aerogeneradores marinos, asegurando una comunicación ininterrumpida y segura bajo diversas condiciones operativas y ambientales.

Además, la configuración de este por medio de un interfaz independiente (cable de consola) permite que el set-up del entorno sea más dinámico y eficiente a la hora de encriptar la información y asignar direcciones a sus respectivas interfaces.

Para consultar las especificaciones relativas a este consultar el anexo.

3.6 SWITCHES

Para asegurar una gestión efectiva del tráfico y adherirse a los principios del estándar IEC 61400-25, es esencial también emplear interruptores de red que faciliten la creación de áreas de red local virtual (VLANs). Estas VLANs permiten segmentar el tráfico de datos de acuerdo con su propósito específico, mejorando así la eficiencia y la seguridad de la red.

En la arquitectura propuesta, se hará uso del switch Siemens SCALANCE X308-2M, un dispositivo robusto y capaz, para implementar la segmentación del tráfico según la siguiente topología:

- VLAN 10: Dedicada exclusivamente al manejo de datos de sensores. En este escenario específico, se utilizará para el sensor de velocidad y dirección del viento. Cabe destacar que el sensor de paso de pala está conectado directamente al dispositivo G220, por lo tanto, no participa en esta VLAN.
- VLAN 20: Configurada como una red local para el intercambio de información en tiempo real entre dispositivos y controladores. Esta segmentación del tráfico proporciona un nivel de seguridad adicional, ya que los datos críticos operativos están aislados del tráfico general de la red.
- VLAN 30: Se emplea para el envío y recepción de datos a través de conexiones de fibra óptica hacia instalaciones en tierra. Aunque la red ya cuenta con una VPN para asegurar el acceso exclusivo a personal autorizado, esta VLAN fortalece aún más la seguridad, optimizando la transmisión de datos sensibles y críticos.

Utilizando el SCALANCE X308-2M, podemos aprovechar funciones avanzadas como el manejo de VLAN, redundancia de anillo, y soporte PROFINET, lo cual es fundamental para una operación segura y eficiente en entornos industriales exigentes. Este enfoque no solo garantiza la conformidad con estándares internacionales, sino que también fortalece la infraestructura de red contra posibles vulnerabilidades y ataques, asegurando un sistema resiliente y robusto. Para más información con relación a las especificaciones básicas del dispositivo consultar el anexo.

3.7 FIBRA ÓPTICA

Para la conexión de la infraestructura de fibra óptica, es esencial tener en cuenta una serie de premisas. El uso de subestaciones y conexiones submarinas a tierra requiere un análisis exhaustivo del emplazamiento, así como la adaptación de los elementos del sistema de control para su utilización eficiente y segura.

3.7.1 EMPLAZAMIENTO

Todo el diseño de la planta en su conjunto depende íntegramente de donde este situada. Por ello, y como parte de un análisis más extenso realizado por un proyecto complementario a este (*“Diseño y Análisis de la Viabilidad Económica de un Parque Eólico Offshore en México”*, Santiago Gabilondo Larrea, 2024), se ha establecido la ubicación de la planta a 10 kilómetros de la costa de Salina Cruz, en la provincia de Oaxaca, México.

La profundidad a la que se propone la cimentación del parque eólico se encuentra entre los 31 y 40 metros de profundidad, siguiendo una estructura monopilote.

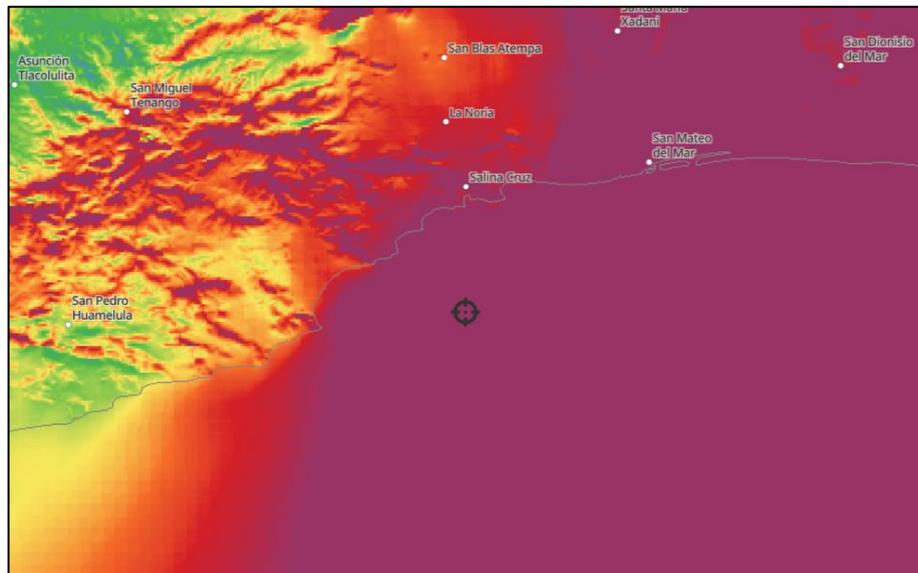


Ilustración 16: Ubicación del emplazamiento (v. media del viento: 11.8 m/s)

Además, como se introduce en secciones preliminares del proyecto, se ha optado por implementar fibra óptica monomodo para la transmisión de datos. Esta elección se debe a que este tipo de fibra es especialmente adecuada para cubrir las distancias largas entre el parque eólico y la estación de control en tierra, garantizando una comunicación rápida y sin interferencias, crucial para la operación eficiente y segura del parque.

Se propone la construcción de la infraestructura de fibra óptica en conjunción con el Proyecto del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec⁴ de manera que el coste de esta se abarate y la conexión a la red en tierra se facilite considerablemente.

3.7.2 COMPONENTES ADICIONALES

Además de los ajustes necesarios en los sistemas de control para su óptima utilización, es fundamental adecuar la infraestructura de comunicación a las exigencias de los sistemas diseñados.

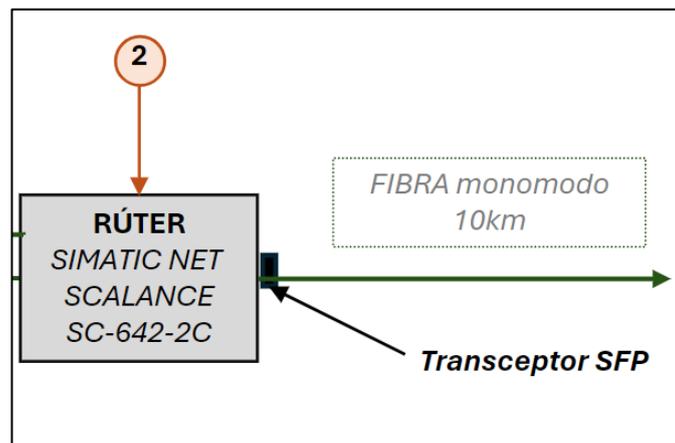


Ilustración 17: Diagrama del entorno de fibra óptica

Para integrar el uso de la fibra óptica en nuestra infraestructura, es imprescindible emplear un transceptor SFP (*Small Form-factor Pluggable*). Este dispositivo es crucial, ya que convierte las señales eléctricas en señales ópticas, permitiendo así que la información transite

⁴ <https://www.gob.mx/ciit>

eficazmente a través del cable de fibra óptica hacia el servidor en tierra. Se seleccionará el transceptor SFP991-1LD, reconocido por su compatibilidad dentro del ecosistema Siemens. Este modelo está especialmente diseñado para cubrir largas distancias, con una capacidad de hasta 25 km, lo que lo hace ideal para su aplicación en entornos de comunicación extendidos.



Ilustración 18: Transceptor SFP Transceptor SFP SFP991-1LD

Esta integración no solo facilita una transmisión de datos eficiente y segura, sino que también aprovecha la infraestructura de fibra para maximizar el rendimiento y la fiabilidad del sistema de control en su conjunto.

4. DISEÑO DE LOS SISTEMAS

Todo el diseño propuesto a nivel de hardware requiere de un análisis más extenso. Este análisis se apoya en la siguiente topología.

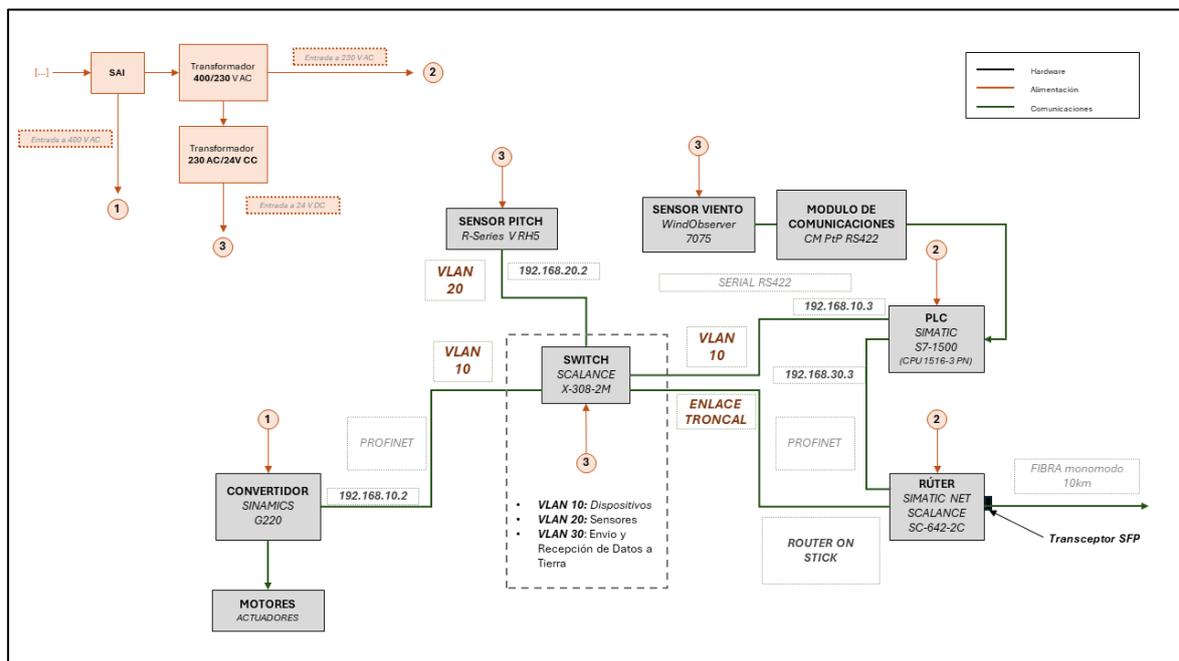


Ilustración 19: Diseño del sistema en su conjunto

4.1 SISTEMA DE COMUNICACIONES

En primer lugar, y considerando que toda comunicación entre los diferentes equipos depende de la capacidad de intercambio de información entre los equipos, es necesario plantear el diseño de la red de comunicaciones.

Para este propósito, se utilizará una topología en estrella con redundancia en la sección derecha del diseño. Esta configuración asegura un flujo constante de datos incluso en caso de fallo de alguno de los enlaces, cumpliendo con los requisitos de la norma IEC 61400-25.

Además, la utilización de una topología centralizada facilita la administración del sistema y simplifica el mantenimiento.

4.1.1 DIRECCIONAMIENTO IP

Cómo se ha introducido anteriormente, todos los protocolos a utilizar dentro del diseño hacen uso de TCP/IP y ethernet en las capas de red/transporte y físicas respectivamente, según el modelo OSI. Esto ayuda a unificar las comunicaciones entre los diferentes sistemas y por ello hace que la nomenclatura IP sea común para las comunicaciones entre los dispositivos.

Con esto en mente, y considerando la presencia de VLANs en el interruptor de red (switch) y el enrutamiento y división del tráfico por medio del rúter se propone la siguiente red lógica IP, escalable en caso de que se añadan dispositivos a la topología.

- (i) Red de Dispositivos: 192.168.10.0/24
 - a. 255 direcciones disponibles (incluyendo el *gateway* y la de broadcast)
 - b. VLAN 10
- (ii) Red de Sensores: 192.168.20.0/24
 - a. 255 direcciones disponibles (incluyendo el *gateway* y la de broadcast)
 - b. VLAN 20
- (iii) Red de Envío y Recepción de Datos: 192.168.30.0/24
 - a. 255 direcciones disponibles (incluyendo el *gateway* y la de broadcast)
 - b. VLAN 30

Para el diseño, se propone el uso de redes privadas accesibles dentro de la LAN. Esta configuración añade una capa adicional de seguridad, ya que requiere la traducción de direcciones locales a direcciones públicas mediante un rúter y su sistema NAT (Network Address Translation). Este proceso de traducción garantiza que las direcciones internas sean protegidas y solo las direcciones públicas puedan atravesar la red de internet, fortaleciendo así la seguridad de la red.

4.1.2 VPN

Para reforzar la seguridad e integridad de los datos transmitidos por la red, el rúter aplica una capa más de encriptado a los datos mediante el uso de una red privada virtual. Esta, haciendo uso del cifrado AES-256, permite el tunelado de los datos a través del canal.

Este cifrado enmascara las direcciones IP lo que previene que intrusos puedan tanto rastrear la señal como acceder a los datos específicos del sistema. La configuración de este se incluye en el rúter.

4.1.3 “ROUTER ON STICK”

El correcto enrutamiento del tráfico entre dispositivos que utilizan VLANs requiere la implementación de reglas específicas en las interfaces del rúter. Esto es esencial tanto para asegurar que toda la información llegue a la estación en tierra, como para permitir el intercambio de tráfico entre diferentes VLANs cuando sea estrictamente necesario. Para lograrlo, se utiliza una tecnología ampliamente conocida en el diseño de redes llamada "Router On a Stick", que implica la configuración de una única interfaz física del rúter para manejar múltiples VLANs.

La configuración de este dispositivo para este propósito se realiza generalmente mediante la CLI (Command Line Interface), accesible mediante el cable de consola. Esta plataforma permite la creación de subinterfaces para cada una de las VLANs, asignando una dirección IP que actuará como la puerta de enlace para cada red, y estableciendo un enlace troncal entre el switch y el rúter para permitir el paso de tráfico de todas las LANs virtuales.

A continuación, se detalla la configuración de este:

```
enable
configure terminal

# Configuración de la interfaz física como trunk
interface g0/0
switchport mode trunk
switchport trunk allowed vlan add 10,20,30
no shutdown
```

```
# Creación de la subinterfaz para VLAN 10
interface g0/0.10
encapsulation dot1Q 10
ip address 192.168.10.1 255.255.255.0

# Creación de la subinterfaz para VLAN 20
interface g0/0.20
encapsulation dot1Q 20
ip address 192.168.20.1 255.255.255.0

# Creación de la subinterfaz para VLAN 30
interface g0/0.30
encapsulation dot1Q 30
ip address 192.168.30.1 255.255.255.0

exit

write memory
```

Como se observa en el código, cada subinterfaz configura el encapsulado de datos utilizando el estándar 802.1Q (dot1Q). Este estándar de IEEE permite etiquetar tramas Ethernet con información de VLAN (Virtual Local Area Network), facilitando la segmentación del tráfico en la red. Al aplicar estas etiquetas, el router puede diferenciar y gestionar el tráfico de diferentes VLANs de manera eficiente, una tarea que sería imposible sin el uso del encapsulado. Sin esta capacidad de etiquetado, el router no podría distinguir entre los diversos flujos de tráfico, comprometiendo la organización y el rendimiento de la red.

4.1.4 SERVIDORES OPC UA Y SISTEMA SCADA

Para la comunicación entre el PLC y el sistema de monitoreo en tiempo real en tierra, se utilizan dos servidores OPC UA. El primero está integrado dentro del PLC, funcionando como el núcleo del diseño, mientras que el segundo opera en tierra.

La configuración del servidor en tierra requiere un ordenador industrial capaz de ejecutar el software del servidor OPC UA. En este caso, utilizaremos el modelo C6925 de Beckhoff, que incluye un módulo SFP para convertir la señal de fibra óptica a digital. Este sistema no solo está equipado con una potente tarjeta gráfica, sino también con un avanzado procesador Intel, diseñado para manejar el procesamiento en tiempo real de las variables críticas del sistema.

A nivel de software, es fundamental distinguir entre dos subsistemas. Por un lado, tenemos el servidor OPC UA, que asegura un acceso seguro y controlado a los datos de los dispositivos y gestiona las solicitudes para mantener la seguridad de la comunicación. Se propone el uso del Simatic NET OPC UA por su notable compatibilidad con Siemens. Por otro lado, el cliente OPC, específicamente el Scout V10, accede a los datos a través de solicitudes de escritura y lectura, facilitando una interacción efectiva y eficiente con la información disponible.

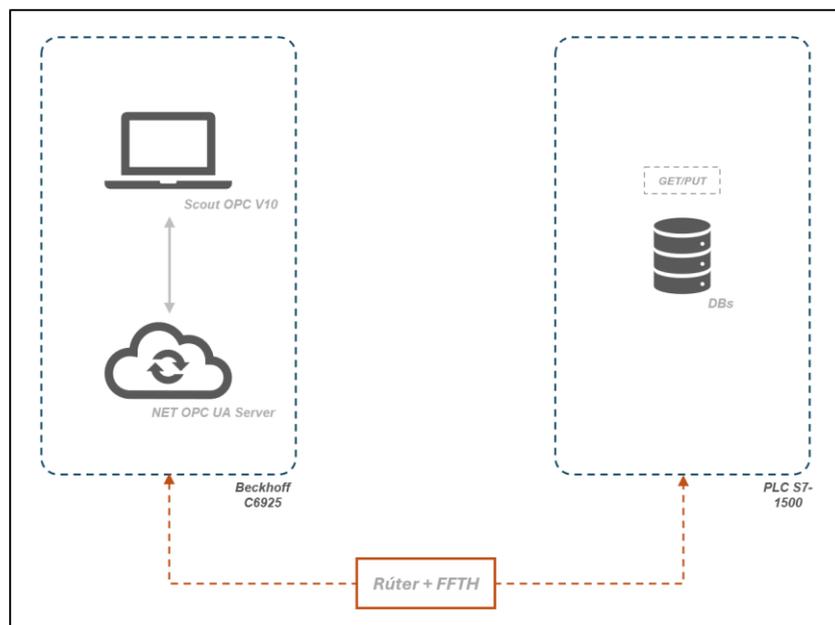


Ilustración 20: Detalle del sistema SCADA

El cliente OPC UA (Scout OPC V10) se limita a leer un bloque de datos alojado dentro del servidor OPC UA, que actúa como un buffer temporal para los datos de entrada y salida al cliente, reteniendo la información por un máximo de 360 horas. Por su parte, el PLC cuenta con bloques de datos suscribibles, a partir de los cuales se recaba la información en tiempo real. Esto presenta una ventaja bastante notable frente a otras tecnologías ya que el sistema notifica y actualiza cambios en cualquiera de las variables a las que el cliente está suscrito, mejorando así la eficiencia de la monitorización del sistema.

Es importante destacar que, aunque la escritura de estos datos sea poco frecuente, la capacidad de modificarlos a distancia es esencial para el sistema SCADA.

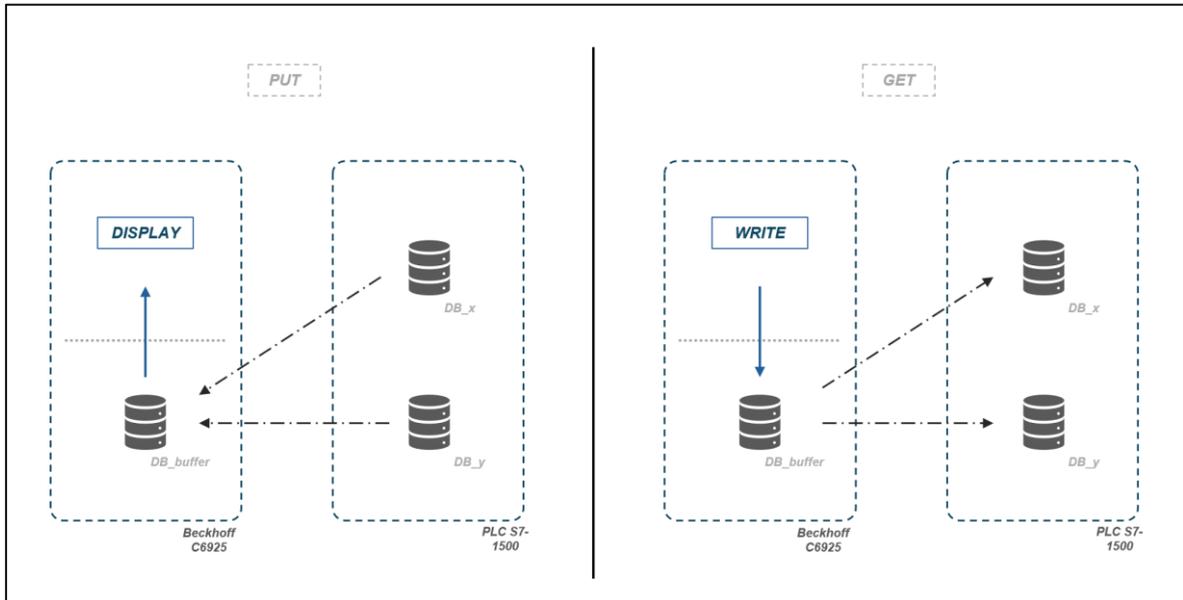


Ilustración 21: Flujo de datos entre el envío y la recepción en OPC UA

Los bloques de datos suscritos incluyen las variables globales y de sensores. Estas contienen información crucial para el funcionamiento integral del sistema de control y comunicaciones del aerogenerador y se encuentran en bloques diseñados en secciones posteriores.

La elección del protocolo OPC UA se fundamenta en su sofisticado marco de seguridad, diseñado específicamente para proteger la integridad y la confidencialidad de los datos en entornos industriales. Este protocolo incorpora defensas robustas tales como encriptación avanzada, autenticación de múltiples factores y un estricto control de acceso, elementos vitales para mitigar el riesgo de accesos no autorizados y ataques cibernéticos.

4.2 CONTROL DE PASO DE PALA

El diseño del control de paso de pala asegura el funcionamiento adecuado del diseño según las condiciones de viento. Para el correcto diseño de este es necesario segmentar el controlador de paso de pala en varios subsistemas, haciendo uso del hardware propuesto.

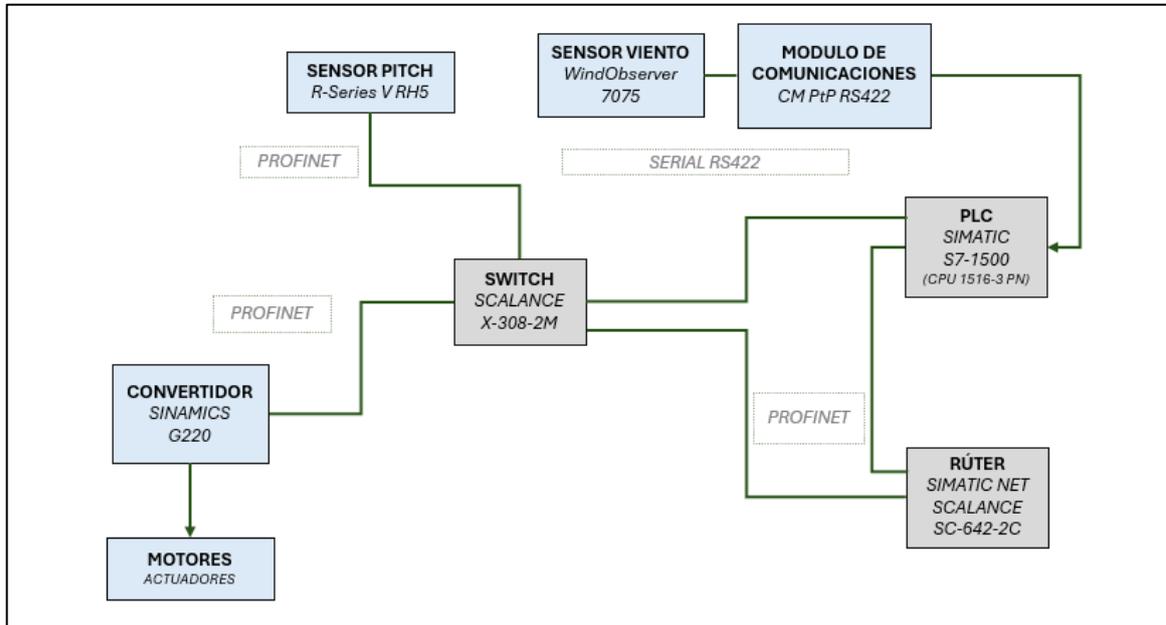


Ilustración 22: Detalle del Sistema de Control

Como se muestra en la ilustración, la comunicación entre los convertidores de frecuencia (actuando como dispositivos esclavos en el entorno Siemens) y el PLC (actuando como

controlador) se efectúa a través del protocolo PROFINET IO. La conexión se facilita utilizando interfaces físicas proporcionadas por Siemens.

En este marco el sistema de control cuenta con un flujo de información desde el recabado de datos de los sensores hasta que los actuadores llevan a cabo su función. Estas etapas se detallan a continuación.

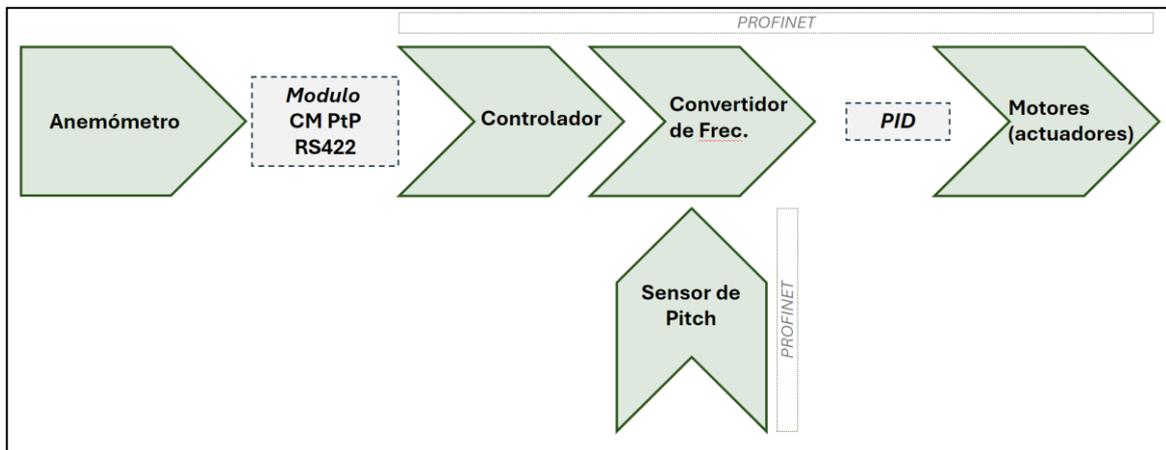


Ilustración 23: Diagrama de flujos de los datos

4.2.1 ENVÍO DE DATOS DE LOS SENSORES

Para el envío de información entre los sensores se ha de diferenciar entre dos mediciones: la del sensor de dirección y velocidad del viento, y la del sensor de pitch. Esto se debe al uso de diferentes protocolos de información para el intercambio de datos: Freeport (ASCII) para el anemómetro y PROFINET para el sensor de pala.

4.2.1.1 Anemómetro

La conexión física entre el anemómetro y el dispositivo controlador se realiza mediante el uso del módulo CM PtP RS422, compatible con el S7-1500. El uso de la salida Serial por medio de la interfaz RS422 del WindObserver y el uso de ASCII Polar como formato estándar en el contexto de aerogeneradores marinos requieren el uso de un módulo intermediario que garantice la correcta comunicación entre los dispositivos.

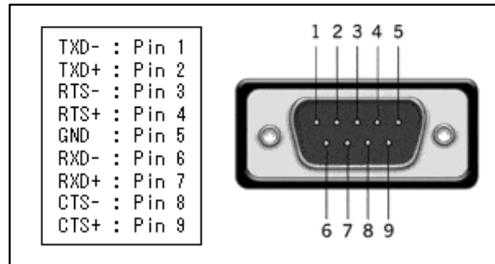


Ilustración 24: Conector RS422

La ventaja de la arquitectura modular del PLC permite el uso de módulos PtP con protocolos independientes dedicados a este tipo de conexión, que luego pueden ser gestionados a nivel de programación desde el portal de programación TIA 7 del fabricante.

La configuración a nivel de transmisión para que la comunicación sea compatible entre ambos dispositivos es la siguiente.

| <i>Parámetro</i> | <i>Valor</i> | <i>Razón</i> |
|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Velocidad de Transmisión (bps) | 9600 | Velocidad suficiente para enviar para tiempo real y evitar errores |
| Número de Bits por Carácter | 8 bits | Estándar para ambos dispositivos |
| Paridad | <i>Even</i> (Par) | Detección de errores básica |
| Tipo de Comunicación | Full-Dúplex (ASCII Continuada) | Permite el envío y recepción de telegramas al sensor continuamente |
| Bits de Parada | 1 | La latencia de la comunicación es clave y no hay interferencias |
| Outputs por Segundo | 1 | La sensibilidad del sistema no requiere más frecuencia |

Tabla 6: Parámetros de la Comunicación Serial entre equipos

Una vez establecido un marco de referencia a nivel físico la interpretación de los datos a nivel lógico queda a cargo del software STEP 7 del TIA Portal, inherente al PLC.

Para ello se hará uso del siguiente bloque.

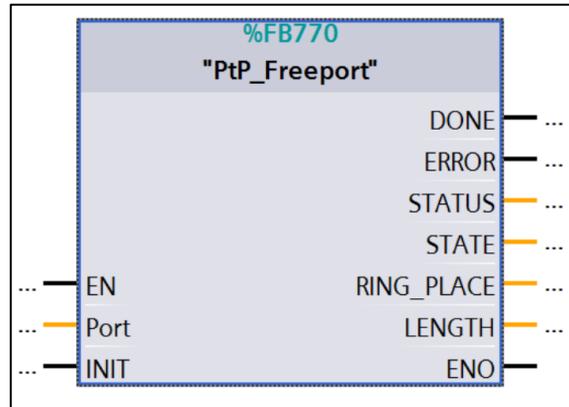


Ilustración 25: Bloque de Función (FB) a utilizar con sus respectivos parámetros

La lógica interna de este bloque programático configura, envía y recibe los datos según los parámetros de entrada especificados anteriormente. Asimismo, este cuenta con diferentes estados operativos para manejar el ciclo de vida de la comunicación.

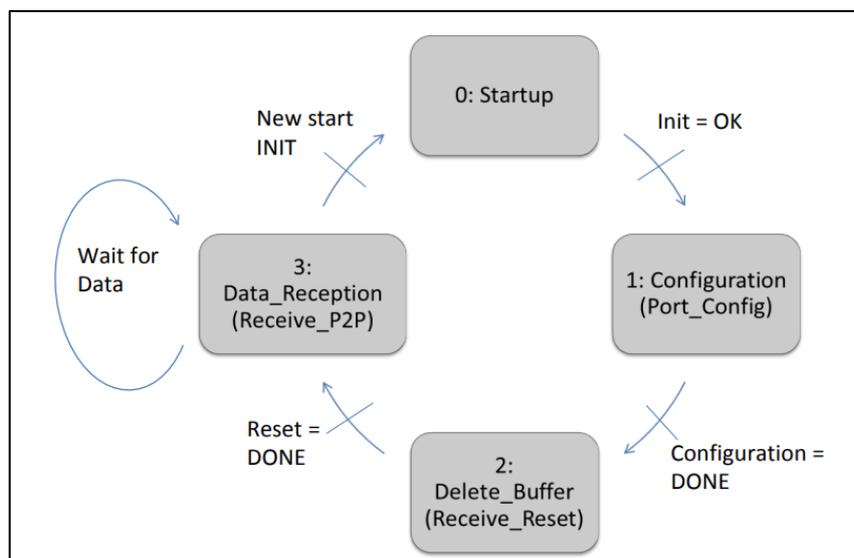


Ilustración 26: Diagrama de Estados del Bloque en Cuestión

Como se puede ver en la ilustración, una vez el sistema llega al estado de recepción de datos (*data_reception*) este se queda a la espera de información. Una vez esta información llega al PLC se trata de acuerdo con el estándar predeterminado, en este caso ASCII.

A su vez, al tratarse de datos críticos del sistema, toda información recibida ha de guardarse dentro de la memoria del PLC para luego poder disponer de ello para el resto del proceso. Para ello se hará uso de diferentes bloques de datos.

Estas estructuras permiten tanto la sobrescritura como la llamada directa de ubicaciones de la memoria del sistema. Para el diseño se proponen dos: uno principal para la información del sensor que actúa como *buffer* y otra para los parámetros de configuración de la comunicación entre las partes.

Estos se detallan a continuación:

```
DATA_BLOCK DB_PtPFreeport  
STRUCT  
    portConfigSettings : STRUCT  
        protocol : INT;  
        baud : INT;  
        parity : INT;  
        dataBits : INT;  
        stopBits : INT;  
        flowCntr : INT;  
    END_STRUCT;  
    rcvPtPData : STRING[256];  
END_STRUCT  
END_DATA_BLOCK
```

```
DATA_BLOCK DB_SensorData  
STRUCT  
    NodeLetter : CHAR;  
    WindDirection : INT;  
    WindSpeed : REAL;  
    Units : CHAR;  
    SpeedOfSound : REAL;  
    Temperature : REAL;  
    StatusCode : INT;  
    PitchAngle : INT;  
    PitchVelocity : INT;  
END_STRUCT  
END_DATA_BLOCK
```

En la gestión de datos recabados de los sensores, cada byte recibido es indexado eficientemente en memoria a través del parámetro *RING_PLACE*, facilitando un acceso

directo y sistemático al array *rcvPtPData* dentro del *DB_PtPFreeport*, optimizando así la recuperación de datos.

Paralelamente, la función *Port_Config* aprovecha los parámetros de *DB_PtPFreeport* para realizar la configuración inicial del puerto, asegurando una integración precisa y coherente, crucial para la estabilidad y fiabilidad de las comunicaciones de datos en entornos el entorno.

Asimismo, el formato recibido de los datos cuenta con una estructura fija.

<STX>Q,121,000.06,M,+344.66,+21.76,00 <ETX>06

En el formato anterior cada uno de los anteriores corresponden con lo siguiente, en orden:

- Comienzo de Trama
- Nodo
- Dirección del viento
- Velocidad del viento
- Unidades de la velocidad
- Temperatura
- Código de estado
- Final de Trama
- Checksum

FC_ParseWindData:

```
FUNCTION FC_Parse_WindData : VOID
VAR_INPUT
    DataString : STRING;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    ParsedData : DB_SensorData;
END_VAR
VAR
    startPos, endPos : INT;
END_VAR
IF DataString[1] = CHR(2) AND DataString[LEN(DataString)] = CHR(3) THEN
    startPos := 2;
```

```
endPos := FIND(DataString, ',', startPos);
ParsedData.NodeLetter := DataString[startPos];

startPos := endPos + 1;
endPos := FIND(DataString, ',', startPos);
ParsedData.WindDirection := STR_TO_INT(DataString[startPos : endPos-1]);

startPos := endPos + 1;
endPos := FIND(DataString, ',', startPos);
ParsedData.WindSpeed := STR_TO_REAL(DataString[startPos : endPos-1]);

startPos := endPos + 1;
endPos := FIND(DataString, ',', startPos);
ParsedData.Units := DataString[startPos : endPos-1];

startPos := endPos + 1;
endPos := FIND(DataString, ',', startPos);
ParsedData.SpeedOfSound := STR_TO_REAL(DataString[startPos : endPos-1]);

startPos := endPos + 1;
endPos := FIND(DataString, ',', startPos);
ParsedData.Temperature := STR_TO_REAL(DataString[startPos : endPos-1]);

startPos := endPos + 1;
endPos := FIND(DataString, '<ETX>', startPos);
ParsedData.StatusCode := STR_TO_INT(DataString[startPos : endPos-1]);

ENDIF;
```

A efectos prácticos solo haremos uso de las variables críticas para el sistema. Estas son tanto la velocidad como dirección del viento, así como las unidades o el código de estado del sensor. Cabe destacar que se incluye la variable *PitchAngle* para su implementación con el sensor de ángulo de pala.

4.2.1.2 Sensor de Ángulo de Pala

En este segundo sensor debemos considerar que la conexión establecida entre este y el PLC es directa, usando PROFINET IO y un cable M12-ethernet, por lo que las comunicaciones a nivel lógico están estandarizadas y por lo tanto son más eficientes.

Para ello se accede directamente a los parámetros de *set-up* del sensor por medio del TIA Portal, importando los archivos GSDML correspondientes. Estos contienen información que describe un dispositivo PROFINET en cuanto a su identificación, estructura, características

de comunicación, datos de procesamiento, así como parámetros y diagnóstico. Una vez importados, estos permiten seleccionar y configurar los dispositivos dentro del entorno Siemens con compatibilidad absoluta.

Sin embargo, a nivel de datos, la selección de un perfil adecuado es crucial. En este contexto, se ha optado por el uso del Encoder Profile V4.2, debido a sus ventajas en la medición específica de un solo punto.

Este perfil de datos, empleado en el sistema de comunicación PROFINET, ayuda a estandarizar y simplificar la integración de nuevos dispositivos en el sistema, garantizando interoperabilidad y eficiencia en la transmisión de datos. El Encoder Profile V4.2 está diseñado específicamente para ofrecer mediciones precisas y detalladas en aplicaciones donde un único punto de dato es crítico, como es el caso de la medición del ángulo de las palas en un aerogenerador, asegurando la precisión y fiabilidad requeridas para la operación eficiente y segura del sistema.

| <i>Parámetro</i> | <i>Configuración Seleccionada</i> | <i>Justificación</i> |
|-----------------------------|---|---|
| Resolución de Medición | 0.5 μ m | Permite ajustes precisos en el control del aerogenerador, crucial para la operación eficiente. |
| Frecuencia de Actualización | 500 μ s | Esencial para operaciones que requieren respuestas en tiempo real para mantener la eficiencia del sistema. |
| Perfil de Datos | Encoder V4.2 | Estandarización de los datos para el posible envío entre sistemas. Apto para el escalado en un futuro |
| Parámetros de Diagnóstico | Habilitar mensajes de diagnóstico y alarmas | Facilita el mantenimiento y la rápida identificación de problemas, aumentando la confiabilidad del sistema. |

Tabla 7: Parámetros de conexión entre el convertidor y el sensor

En este caso la transmisión de datos no requiere un módulo que traduzca los datos en bruto a algo legible por el operador, sino que el uso de archivos GSDML y su integración directa

en la arquitectura del TIA Portal permiten una conexión estandarizada, con un acceso a la memoria directa para el almacenamiento de datos.

Los datos críticos que recibe el sistema son tanto la velocidad del pitch, como la posición de este y se guardan en las variables PitchAngle y PitchVelocity del DB_SensorData.

4.2.2 CREACIÓN Y LÓGICA DE ESTADOS

Como se introduce en secciones preliminares sistema está regulado por unos estados operativos cuya función se limita a recibir datos en forma de entradas de los sensores y actuar en base a ellos. Cada uno de ellos tiene una serie de parámetros característicos que hacen que el sistema maximice la generación de energía dentro de un marco de seguridad meticulosamente diseñado. Estos parámetros son los siguientes.

| <i>Estado Operativo</i> | <i>Angulo (°)</i> | <i>Posición</i> | <i>Tasa de Pitch (°/s)</i> |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|----------------------------|
| <i>Estacionado</i> | 90 | Final | - |
| <i>Arranque</i> | 90 | Final | 5 |
| <i>Operación normal</i> | Variable | - | Variable |
| <i>Parada Normal</i> | 90 | Final | 5 |
| <i>Parada de Emergencia</i> | 90 | Final | 12 |
| <i>Ralentí</i> | 90 | Final | - |

Tabla 8: Estados operativos del sistema de control y sus parámetros

Asimismo, dado que el sistema maneja transiciones basadas en señales de entrada, se incluye un diagrama de estados. Este diagrama describe cómo las diferentes entradas afectan la operativa y los efectos resultantes en el sistema.

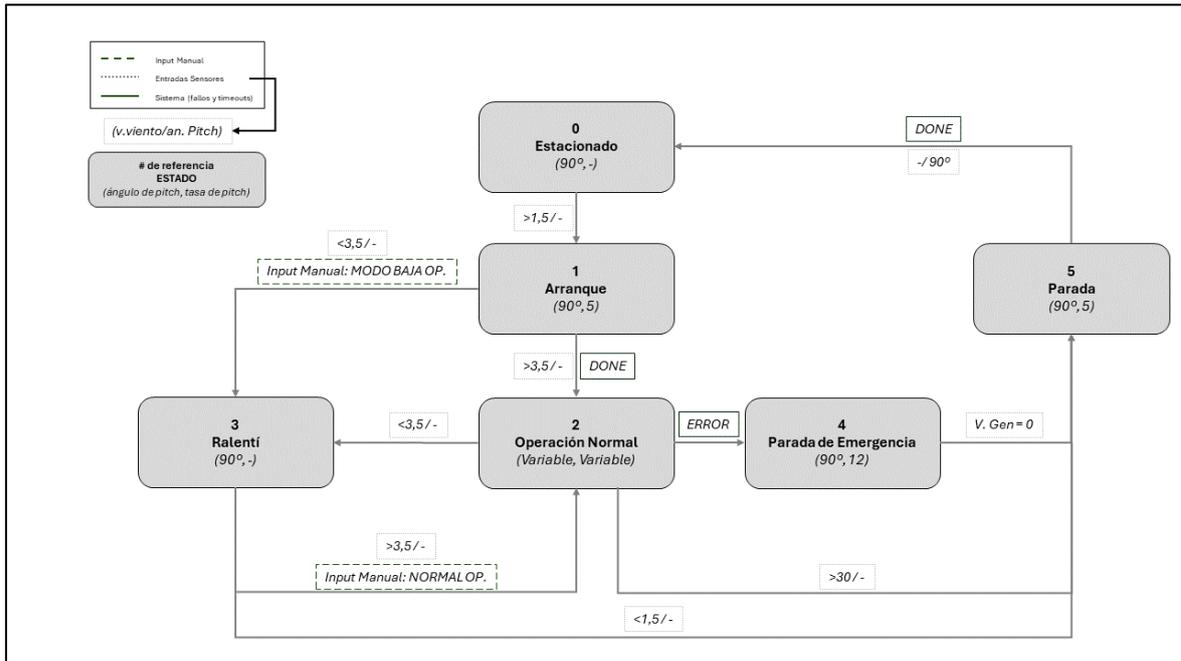


Ilustración 27: Diagrama de estados operativos en el sistema de control

Para poder implementar la lógica presente se ha de disponer de varios programas. Estos tendrán que subdividirse en varias funciones, entre las cuales se encuentra la transición de estados y la lógica que sigue cada uno, así como el almacenamiento de las variables de estado.

Para ello, y haciendo uso de bloques de datos y bloques de función se creará la siguiente lógica, actualizando el programa principal del PLC para la regulación de estos.

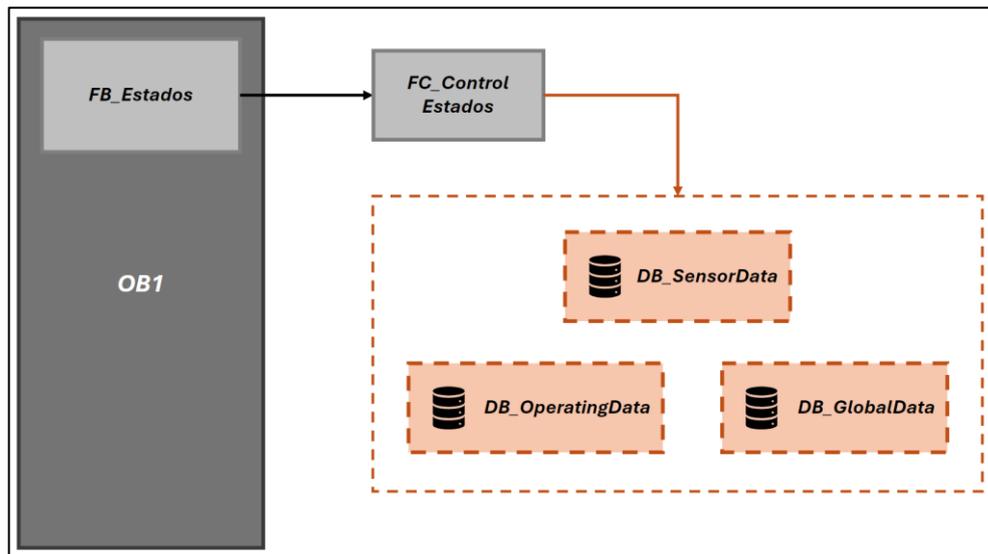


Ilustración 28: Diagrama del flujo lógico dentro del control de estados

Como se puede ver en la imagen, esta nueva sección programática hace llamadas a bloques de datos comunes a los sensores, por lo que hace uso de las variables recabadas en tiempo real para la monitorización del sistema. A su vez, el uso de otros como *DB_OperatingData* y *DB_GlobalData* que contienen información relativa a las variables a operativas del sistema como la tasa de cambio del paso de pala y el estado global respectivamente.

Cabe destacar que datos como el ángulo de paso de pala se encuentran tanto en el *DB_OperatingData* como en el *DB_SensorData*. Sin embargo, uno corresponde con la entrada recibida por el sensor, y otra por el valor de referencia para el sistema a adaptar, por lo que hay que discernir entre ambos a nivel programático a la hora de referenciar estos en el código.

Los programas se describen a continuación.

FB_Estados:

```

FUNCTION_BLOCK FB_Estados
VAR_INPUT
  error: BOOL;
  input_manual: INT;
  velocidad_viento: REAL;
  v_gen: REAL;
  
```

```

END_VAR
VAR_IN_OUT
    estado: INT;
    DB_GlobalData: BLOCK_DB;
    DB_OperatingData: BLOCK_DB;
END_VAR

BEGIN
    // Llamar a la función de control de estados para manejar las transiciones

    FC_Control_Estados(
        estado_actual := estado,
        error := error,
        velocidad_viento := velocidad_viento,
        v_gen := v_gen,
        DB_OperatingData: BLOCK_DB;

    );

    // Lógica específica del estado actual
    CASE estado OF
        0: // Estacionado
            DB_OperatingData.PitchAngle := 9
            DB_OperatingData.PID := FALSE;
        1: // Arranque
            DB_OperatingData.PitchAngle:= 90;
            DB_OperatingData.PitchRate := 5.0;
            DB_OperatingData.PID := FALSE;
        2: // Operación Normal
            DB_OperatingData.PID := TRUE;
        3: // Ralentí
            DB_OperatingData.PitchAngle := 90;
            DB_OperatingData.PID := FALSE;
        4: // Parada de Emergencia
            DB_OperatingData.PitchAngle := 90;
            DB_OperatingData.PID := FALSE;
            DB_OperatingData.PitchRate := 12.0;
        5: // Parada
            DB_OperatingData.PitchAngle := 90;
            DB_OperatingData.PID := FALSE;
            DB_OperatingData.PitchRate := 5.0;
    END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK;

```

En este programa primario, el estado de operación normal incluye una bandera que sirve de referencia para gestionar el PID. Esta señal es global y activa el regulador inherente al convertidor G220 en las condiciones de viento operativas.

FC_Control_Estados:

```
FUNCTION FC_Control_Estados : VOID
VAR_IN_OUT
    estado_actual: INT;
    DB_GlobalData: BLOCK_DB;
    DB_OperatingData : BLOCK_DB;
END_VAR
VAR_INPUT
    error: BOOL;
    velocidad_viento: REAL;
    v_gen: REAL;
END_VAR
BEGIN
    // Lógica de transición de estados
    Input_manual = DB_OperatingData.INPUT_MANUAL;
    IF error THEN
        estado_actual := 4; // Parada de Emergencia
    ELSE
        CASE estado_actual OF
            0: // Estacionado
                IF velocidad_viento > 1.5 THEN
                    estado_actual := 1; // Arranque
                END_IF;
            1: // Arranque
                IF velocidad_viento > 3.5 THEN
                    estado_actual := 2; // Operación Normal
                ELSIF velocidad_viento < 3.5 AND input_manual = 1 THEN
                    estado_actual := 3; // Ralentí
                END_IF;
            2: // Operación Normal
                IF velocidad_viento < 3.5 THEN
                    estado_actual := 3; // Ralentí
                ELSIF velocidad_viento < 1.5 THEN
                    estado_actual := 5; // Parada
                ELSIF error THEN
                    estado_actual := 4; // Parada de Emergencia
                END_IF;
            3: // Ralentí
                IF velocidad_viento > 3.5 AND input_manual = 2 THEN
                    estado_actual := 2; // Operación Normal
                ELSIF velocidad_viento < 1.5 THEN
                    estado_actual := 5; // Parada
                END_IF;
            4: // Parada de Emergencia
                IF v_gen = 0 THEN
                    estado_actual := 5; // Parada
                END_IF;
            5: // Parada
                estado_actual := 0; // Estacionado
        END_CASE;
    END_CASE;
```

```
END_IF;  
  
// Guardar el estado actual en el DB  
DB_GlobalData.estado_control_actual := estado_actual;  
END_FUNCTION;
```

Para el programa principal OB1 solo se incluye la llamada a la función principal. Para ver el programa en su totalidad consultar el anexo.

OB1:

```
OB1  
[...]  
    FB_Estados(  
        estado := estado_actual,  
        error := error,  
        velocidad_viento := velocidad_viento,  
        v_gen := v_gen,  
        DB_Estados := DB_Estados,  
        DB_OperatingData := DB_OperatingData  
    );  
[...]
```

La lógica detrás de la gestión de los estados y la utilización de funciones en cascada es simplificar al máximo el programa principal, aumentando la eficiencia de este como resultado. Cabe destacar que todo lo anterior requiere una configuración a nivel físico mediante la asignación de direcciones IP previamente expuesto en el diseño para el correcto direccionamiento de los datos.

Por último, la estructura de los bloques de datos queda de la siguiente manera:

```
DATA_BLOCK DB_OperatingData  
STRUCT  
    PitchAngle: REAL;  
    RotorSpeed : REAL;  
    PitchRate: REAL;  
    SetPoint : REAL;  
    PID: BOOL;  
    Ramp_up_time : REAL;  
    Ramp_down_time : REAL;  
    Smoothing : REAL;  
    K_p : REAL;
```

```
K_i : REAL;
Output : REAL;
END_STRUCT
END_DATA_BLOCK

DATA_BLOCK DB_GlobalData
STRUCT
    estado_control_actual: REAL;
    Error: BOOL;
    PID_Initialized : BOOL;
END_STRUCT
END_DATA_BLOCK
```

4.2.3 REGULADOR PID

Cuando el sistema alcanza su estado de operación normal, se activa el regulador PID. Este componente es fundamental para el control del paso de la pala, y, aunque se encuentra dentro del convertidor de frecuencias, su activación y monitorización se gestionan desde el PLC.

4.2.3.1 Cálculo del Error

En primer lugar, el cálculo del error en el control del aerogenerador es fundamental para garantizar un rendimiento óptimo y eficiente. Este proceso implica una comparación entre la velocidad actual del rotor y una velocidad nominal preestablecida.

Esta comparación se hace siguiendo una diferencia algo más compleja de lo que parece en un inicio, ya que se incluyen una serie de filtros que ayudan a atenuar los posibles efectos de las interferencias en la comunicación. Pese a que esta es bastante directa en el diseño, pueden surgir. Sin embargo, el cálculo fundamental de este

Es importante destacar que el cálculo del error en el funcionamiento del aerogenerador no se basa directamente en la velocidad de las aspas, sino más bien en la velocidad de salida del motor. En este caso, como estamos haciendo uso de un sistema con transmisión directa, la relación de revoluciones por minuto es la misma, de 13 rpm.

Este método de cálculo garantiza una evaluación precisa del rendimiento del aerogenerador, asegurando que los ajustes necesarios se basen en datos fiables y representativos de las condiciones reales de operación.

4.2.3.2 Determinación de las constantes

El proceso para determinar los valores de las constantes proporcional e integral se ha basado en un análisis de prueba y error, utilizando el software y modelo creado en *Bladed Educational* (para más información ver anexo). Este enfoque permite ajustar las constantes dinámicamente y evaluar su impacto en el ángulo del pitch de una de las palas bajo condiciones simuladas.

Es importante resaltar que el ajuste programado de ganancias (*gain scheduling*) se ha establecido de forma general para los parámetros proporcional e integral en un factor de 0.1. Este factor se emplea para permitir que el sistema ajuste de manera automática las constantes del controlador en respuesta a variaciones en el ángulo de inclinación de las palas (*pitch*). Este mecanismo asegura un control más robusto y flexible del sistema, adaptándose eficazmente a las dinámicas cambiantes del entorno operativo.

4.2.3.2.1 Ajuste de la Constante Proporcional (K_p)

Partimos de una situación inicial en la que el sistema tiene las dos constantes a 0 para poder observar su comportamiento sin intervención del sistema.

A partir de aquí, iniciamos el incremento gradual del valor partiendo de una referencia inicial común en la industria y continuamos aumentando su valor hasta observar oscilaciones notables.

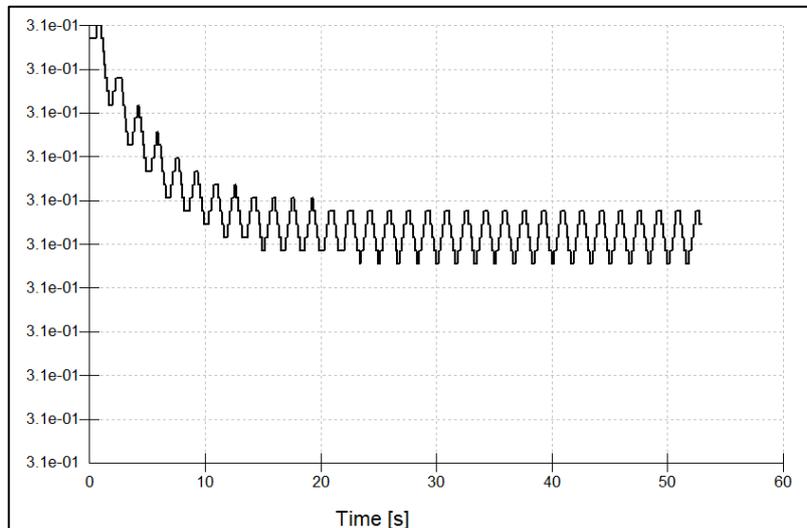


Ilustración 29: Ángulo de pitch con una constante proporcional de 0,000293 ($K_i = 0$)

Como se puede ver en la imagen, la presencia de estas fluctuaciones es muy notable y afecta directamente a la salida del aerogenerador. En esta situación la producción de energía es complicada y el estrés al que está sometido el sistema puede superar los límites físicos de las palas, llevando a su posible rotura si perdura en el tiempo.

Por ello, reducimos el valor gradualmente hasta alcanzar un punto donde las oscilaciones son mínimas y la respuesta del sistema es aceptable, identificando así el punto crítico óptimo.

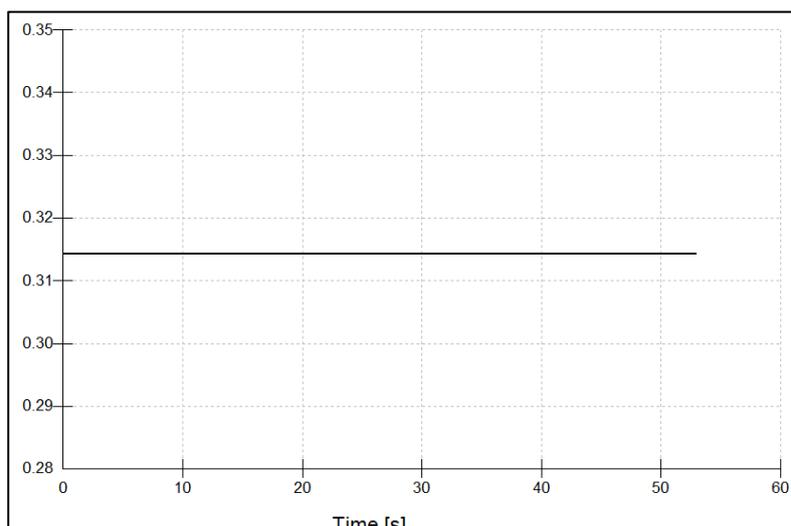


Ilustración 30: Ángulo de pitch con una constante proporcional de 0,0002915 ($K_i = 0$)

Pese a que la imagen presenta una reducción total de las fluctuaciones y un estado de estabilidad máxima, se puede constatar con bastante seguridad que la constante se encuentra entre estos dos valores.

$$K_p = 0,000292$$

4.2.3.2.2 Ajuste de la Constante Integral (K_i)

De nuevo, siguiendo la misma lógica y partiendo de cero, incrementamos el valor de hasta que las oscilaciones en estado estacionario se minimicen, ajustando el valor para alcanzar la mejor compensación del error residual sin introducir inestabilidad.

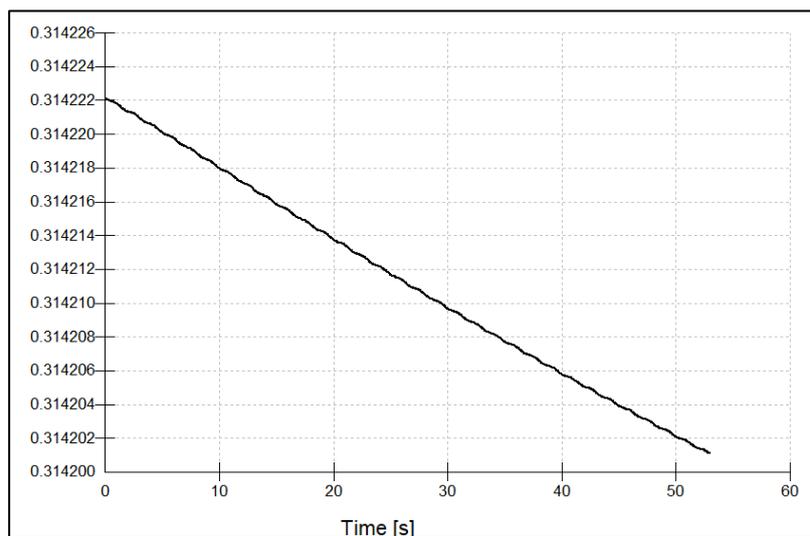


Ilustración 31: Ángulo de pitch con una constante integral de 0,0001 (K_p = valor hallado anteriormente)

Como se puede ver, la diferencia entre las dos ilustraciones deja ver que el valor de la constante proporcional se tiene que encontrar entre ambos valores estudiados. Esto se debe a que las fluctuaciones, se reducen considerablemente entre las dos.

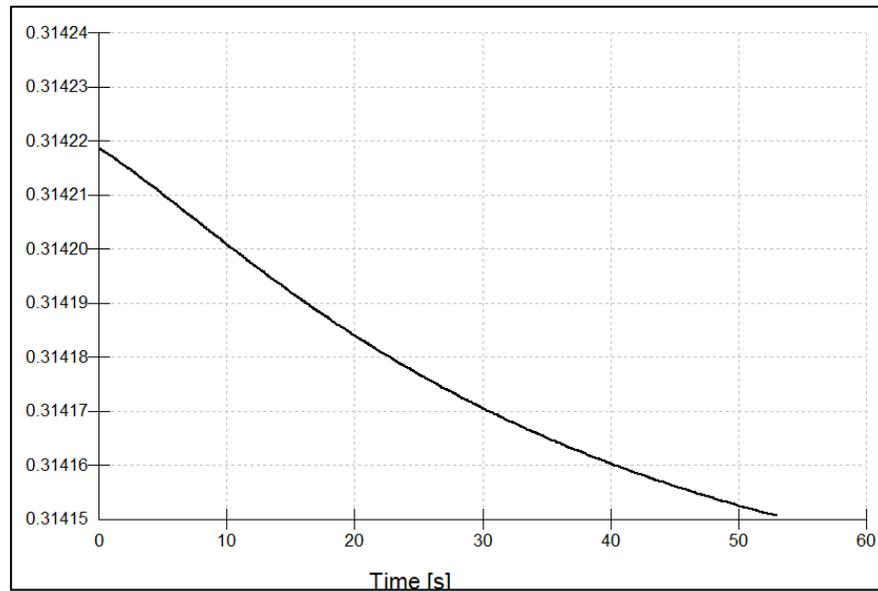


Ilustración 32: Ángulo de pitch con una constante integral de 0,0003 (Kp = valor hallado anteriormente)

Al comparar visualmente el rendimiento del sistema entre las imágenes antes y después de los ajustes, podemos constatar que el valor de esta segunda constante es la siguiente.

= 0,0003

4.2.3.3 Utilizando el Diseño

Similar a lógicas aplicadas en procesos anteriores se hace uso de PROFINET IO, pero en este caso haciendo uso de lecturas de datos directas sobre posiciones de memoria dentro del convertidor de medios. Estas direcciones de memoria contienen los datos que regulan el PID, lo que nos permite crear una estructura que regule la activación de este de manera dinámica.

A continuación, se detallan las funciones prediseñadas a utilizar, especificando sus campos.

| <i>Funciones de IO Extendido</i> | | | |
|---|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| <i>WRREC</i> | | | |
| <i>Parámetro</i> | <i>Declaración</i> | <i>Tipo de dato</i> | <i>Descripción</i> |
| REQ | Input | BOOL | REQ = 1: Transferir registro de datos |

| | | | |
|--------|--------|---------|---|
| ID | Input | HW_IO | Número de identificación del componente de hardware. Se asigna automáticamente. |
| INDEX | Input | DINT | Número de registro de datos |
| DONE | Output | BOOL | El registro de datos fue transferido |
| BUSY | Output | BOOL | El proceso de escritura aún no ha terminado. |
| ERROR | Output | BOOL | Se produjo un error durante el proceso de escritura. |
| STATUS | Output | DWORD | Estado del bloque o información de error. |
| RECORD | I/O | VARIANT | Registro de datos |

RDREC

| <i>Parámetro</i> | <i>Declaración</i> | <i>Tipo de dato</i> | <i>Descripción</i> |
|------------------|--------------------|---------------------|---|
| REQ | Input | BOOL | REQ = 1: Realizar un registro de datos |
| ID | Input | HW_IO | Dirección lógica del componente |
| INDEX | Input | DINT | Número de registro de datos |
| MLEN | Input | UINT | Longitud máxima en bytes de la información de registro a leer |
| VALID | Output | BOOL | Nuevo registro recibido y válido. |
| BUSY | Output | BOOL | BUSY = 1: El proceso de lectura no ha concluido |
| ERROR | Output | BOOL | ERROR = 1: Se ha producido un error. |
| STATUS | Output | DWORD | Identificador de llamada (bytes 2 y 3) |
| LEN | Output | INT | Longitud de la información de registro cargada |
| RECORD | I/O | ANY | Área de destino para el registro leído |

Tabla 9: Funciones básicas para la regulación del PID

Dentro del convertidor de frecuencias el proceso lógico del PID está regulado los siguientes parámetros.

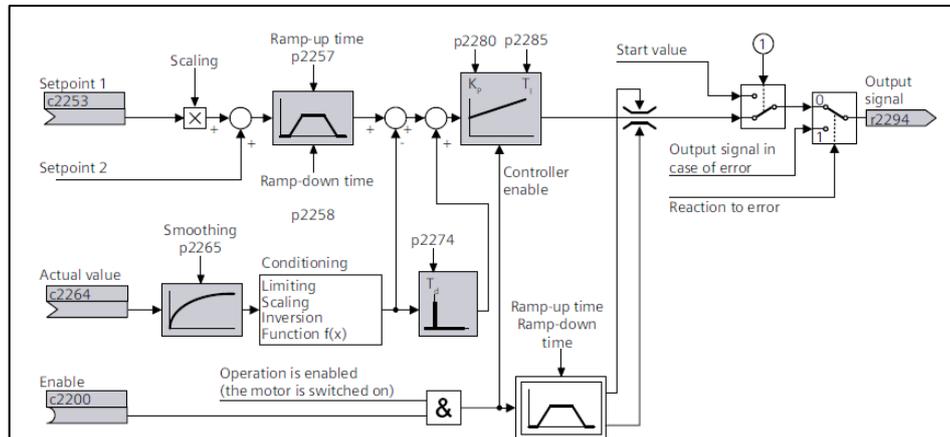


Ilustración 33: Diagrama del "PID Technology Controller" del G220

Como se puede ver en la imagen, el sistema es más complejo que el modelado en secciones anteriores con el uso del software de *Bladed Educational*. Por ello, se proponen unos valores de diseño adaptados a las necesidades del aerogenerador para garantizar el funcionamiento eficiente e íntegro del sistema de control.

| <i>Parámetros</i> | <i>Posición en memoria</i> | <i>Valor</i> | <i>Justificación</i> |
|------------------------|----------------------------|--------------|---|
| <i>Setpoint 1</i> | p2253 | 13 rpm | Valor deseado principal para el proceso |
| <i>Velocidad_palas</i> | p2264 | Variable | Se actualiza en tiempo real |
| <i>Enable</i> | p2200 | 1 | Habilita el controlador PID, cuando este entra en el estado de operación normal |
| <i>Ramp-up Time</i> | p2257 | 10.0 | Tiempo de rampa para alcanzar el valor de consigna |
| <i>Ramp-down Time</i> | p2258 | 10.0 | Tiempo de rampa para disminuir hasta el valor de consigna |

| | | | |
|--------------------------|-------|----------|--|
| <i>Smoothing</i> | p2265 | 0.1 | Factor de suavizado para reducir el ruido en la señal de entrada |
| <i>Proportional Gain</i> | p2280 | 0,000293 | Ganancia proporcional, determina la reacción al error actual |
| <i>Integral Time</i> | p2285 | 0,0003 | Tiempo integral, aborda los errores acumulados en el pasado |
| <i>Derivative Time</i> | p2274 | - | No se va a hacer uso de esta variable |
| <i>Output Signal</i> | r2294 | - | Señal generada por el controlador PID |

Tabla 10: Especificaciones de los parámetros del PID

El uso de constantes como el tiempo de aceleración de subida y parada del regulador ayudan a que la transición del sistema hasta llegar al punto de referencia o *set-point* sea más gradual y suave, garantizando el funcionamiento del sistema a largo plazo.

Con las variables definidas se procede al desarrollo del propio código en SCL para la comunicación entre las partes, estableciendo el ID como el identificador del G220.

FB_Comm_PID:

```

FUNCTION_BLOCK FB_Comm_PID
VAR_INPUT
    DB_OperatingData : BLOCK_DB;
END_VAR

VAR
    PID : BOOL;
    Ramp_up_time : REAL;
    Ramp_down_time : REAL;
    Smoothing : REAL;
    K_p : REAL;
    K_i : REAL;
    Output : REAL;
    SpeedReference : REAL;
    SetPoint : REAL;
    IsInitialized : BOOL := FALSE; // Variable para controlar la inicialización
END_VAR

BEGIN
    // Leer valores del bloque de datos

```

```

PitchAngle := DB_OperatingData.PitchAngle;
PitchRate := DB_OperatingData.PitchRate;
PID := DB_OperatingData.PID;
Ramp_up_time := DB_OperatingData.Ramp_up_time;
Ramp_down_time := DB_OperatingData.Ramp_down_time;
Smoothing := DB_OperatingData.Smoothing;
K_p := DB_OperatingData.K_p;
K_i := DB_OperatingData.K_i;
Output := DB_OperatingData.Output;
SpeedReference := DB_OperatingData.SpeedReference;
IsInitialized := DB_GlobalData.PID_Initialized;

// Escribir los valores del PID en el G220 solo si no ha sido inicializado
IF NOT IsInitialized THEN
    // Configurar parámetros iniciales
    WRREC(REQ := TRUE, ID := 16#7001, INDEX := 16#2253, MLEN := 4, RECORD :=
SetPoint);
    WRREC(REQ := TRUE, ID := 16#7001, INDEX := 16#2257, MLEN := 4, RECORD :=
Ramp_up_time);
    WRREC(REQ := TRUE, ID := 16#7001, INDEX := 16#2258, MLEN := 4, RECORD :=
Ramp_down_time);
    WRREC(REQ := TRUE, ID := 16#7001, INDEX := 16#2265, MLEN := 4, RECORD :=
Smoothing);
    WRREC(REQ := TRUE, ID := 16#7001, INDEX := 16#2280, MLEN := 4, RECORD :=
K_p);
    WRREC(REQ := TRUE, ID := 16#7001, INDEX := 16#2285, MLEN := 4, RECORD :=
K_i);

    // Marcar como inicializado
    DB_GlobalData.PID_Initialized:= TRUE;
END_IF;

IF PID THEN
    // Activar PID
    WRREC(REQ := TRUE, ID := 16#7001, INDEX := 16#2200, MLEN := 1, RECORD :=
B#16#01);
ELSE
    // Desactivar PID
    WRREC(REQ := TRUE, ID := 16#7001, INDEX := 16#2200, MLEN := 1, RECORD :=
B#16#00);
END_IF;

// Leer la velocidad actual del motor
RDREC(REQ := TRUE, ID := 16#7001, INDEX := 16#2294, MLEN := 4, RECORD :=
Output);
END_FUNCTION_BLOCK

```

Como se ve en el código anterior se inicializan todas las variables del regulador de antemano para que estas estén ya listas para su funcionamiento cuando la bandera se active. El proceso del programa también lee la posición de memoria donde se aloja la señal de salida, variable a utilizar en el sistema SCADA descrito anteriormente. Esta función se llama cíclicamente desde el programa principal para que se actualice en cada ciclo de reloj.

4.2.4 SEÑAL DE ACCIONAMIENTO

4.2.4.1 Consideraciones del hardware

Como se ha visto en secciones anteriores el aerogenerador puede operar en estados distintos, cada uno requiriendo ajustes específicos para tanto el ángulo de las palas como para la velocidad del rotor, con el fin de buscar optimizar la captación de energía eólica y garantizar la seguridad del sistema. La modulación de la salida del motor está condicionada por el estado operativo del aerogenerador, lo que afecta la rapidez con la que se modifica el ángulo de las palas.

| <i>Estado Operativo</i> | <i>Tasa de Pitch (%/s)</i> |
|-----------------------------|----------------------------|
| <i>Estacionado</i> | - |
| <i>Arranque</i> | 5 |
| <i>Operación normal</i> | Variable |
| <i>Parada Normal</i> | 5 |
| <i>Parada de Emergencia</i> | 12 |
| <i>Ralentí</i> | - |

Tabla 11: Tasa de Pitch para cada estado operativo

Para poder regular dicha salida, es por tanto necesario tener constancia de no solo el *set-point* de las palas, sino también la relación de transmisión entre el engranaje del motor y la corona de la pala, así como la relación entre el eje y la salida del motor.

La elección de los motores a utilizar en las etapas del control de paso ha formado parte de un estudio complementario a este (*"Subsistema de Apoyo a la Generación de un Aerogenerador Off-shore"*, Santiago Pérez, 2024), concluyendo con el uso de motorreductores Bonfiglioli serie 330M.

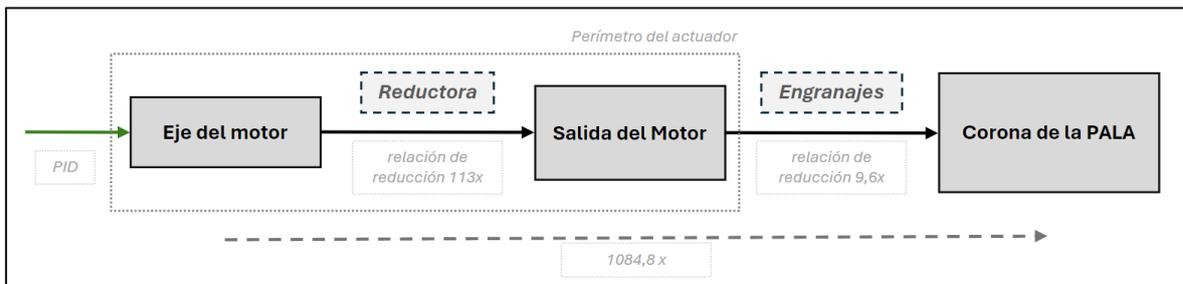


Tabla 12: Flujo de las etapas reductoras

Estos actuadores incorporan una caja reductora de tres etapas con una relación de transmisión de 113, cuya configuración permite adaptar la salida desde el eje principal al engranaje secundario, reduciendo significativamente la velocidad de rotación. El objetivo de esta reducción es minimizar el impacto en el par de salida y preservar la potencia del sistema, dada la considerable masa que debe ser movida.

En la siguiente etapa del análisis, se considera el tamaño de los dientes en la corona y en la salida del motor, de 144 y 15 dientes respectivamente. Esto conduce al cálculo del factor de la segunda reducción, que se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{\text{dientes de la corona de la pala}}{\text{dientes de la salida del motor}}$$

$$f = \frac{144}{15} = 9,6$$

Con ello podemos determinar el factor de reducción absoluto.

$$F = 9,6 \cdot 113 = 1084,8$$

Con este factor en mente, es esencial considerar la tasa de pitch de referencia para cada estado operativo y analizar la relación entre revoluciones por minuto (rpm) y grados por segundo (°/s). La conversión entre estas unidades se establece como sigue:

$$1 \text{ rpm} = \frac{1}{60} \text{ Hz} = \frac{1}{60} \cdot 360 \text{ °/s}$$

Esta conversión es crucial para adecuar la dimensión de la señal de salida del controlador PID. La correlación precisa entre rpm y grados por segundo permite una configuración efectiva del control de pitch, asegurando que el sistema sea coherente con las unidades en las que trabaja para cada una de las etapas y dispositivos.

4.2.4.2 Aplicación Lógica

Consideradas las limitaciones físicas al proceso lógico, se creará una lógica programática capaz de regular la tasa de cambio de la pala según el estado operativo.

Como se puede ver en la Tabla 8: Estados operativos del sistema de control y sus parámetros, todos los estados operativos cuentan con una tasa de cambio estática que se aplica hasta que el sistema llega a su posición de operación final, expresada en grados. Sin embargo, el modo de operación normal, al hacer uso del PID, regula su ángulo de manera dinámica, cambiando la tasa de variación del ángulo de pala según el error estacionario que se detecte en cada momento. A mayor error, mayor la tasa de variación del ángulo para alcanzar el *set-point* en el menor tiempo posible.

Para poder hacer esta regulación a nivel lógico se propone la creación de un sistema de control a pequeña escala.

Para ello se propone la creación de un bloque de datos independiente que regule la tasa de cambio, siempre considerando el factor absoluto de reducción.

```
FUNCTION_BLOCK FBTasa_De_Pitch
VAR_INPUT
    DB_OperatingData : BLOCK_DB;
    DB_GlobalData : BLOCK_DB;
    DB_SensorData : BLOCK_DB;
END_VAR

VAR
    PID : BOOL;
    PitchRate : REAL;
    Estado := REAL;
    Resultado := REAL;
    Angulo_pitch_medido := REAL;
END_VAR

BEGIN
    // Leer valores del bloque de datos
    PitchRate := DB_OperatingData.PitchRate;
    PID := DB_OperatingData.PID;
    Estado := DB_GlobalData.estado_actual;
    Angulo_pitch_medido = DB_SensorData.PitchAngle;

    Resultado = PitchRate*1084,8;

    // Escribir los valores del PID en el G220 solo si no ha sido inicializado
    IF NOT PID THEN
        // Configurar parámetros iniciales
        IF Angulo_pitch_medido != DB_OperatingData.PitchAngle THEN
            WRREC(REQ := TRUE, ID := 16#7001, INDEX := 16#2294, MLEN :=
SIZE(resultado), RECORD := resultado);
        END IF;
    END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK
```

Como se observa en el bloque de función, la activación del control PID influye directamente en la manipulación de la variable de salida. Específicamente, se emplean posiciones de memoria designadas para actualizar dinámicamente el valor de la señal de salida. Esto se logra mediante la sobrescritura del valor de salida con un cálculo ajustado de la tasa de pitch, que depende directamente del factor de ajuste establecido y la posición momentánea de la pala. Este enfoque garantiza que las modificaciones en la salida reflejen precisamente las condiciones actuales del sistema y los parámetros operativos del PID.

5. MODELO Y RESULTADOS

En primer lugar, para evaluar el comportamiento general del sistema, se ha realizado un análisis de la curva de producción de energía en condiciones estables haciendo uso del software de Bladed Educational. Este análisis muestra que el aerogenerador mantiene una salida de potencia constante cercana a los 5 MW a lo largo de todo el rango operativo del sistema. Esta estabilidad en la producción es crucial para asegurar un rendimiento óptimo del aerogenerador.

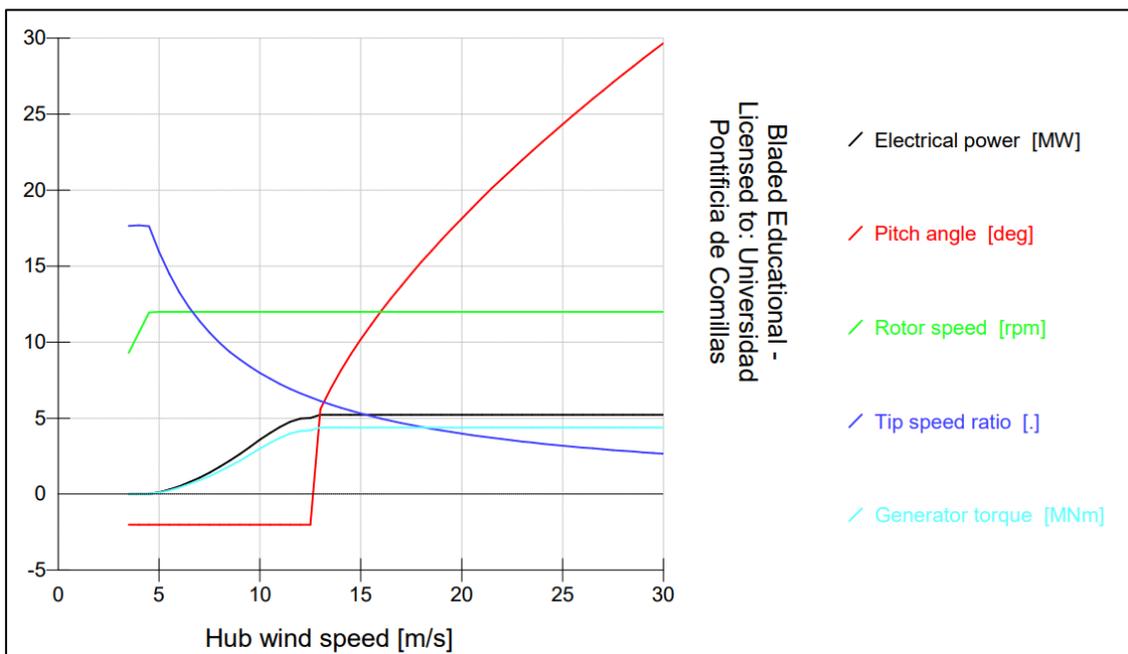


Ilustración 34: Curva de Produccion de Energía

Como se puede apreciar en la imagen la producción de energía es constante para el rango en su totalidad, manteniendo la velocidad de giro del rotor constante también, en su nominal de 13 rpm. Para garantizar la estabilidad de dicho valor, el regulador PID implementado juega un papel fundamental.

En segundo lugar, se ha realizado un análisis más detallado de algunos modos de operación específicos para verificar su compatibilidad con el regulador diseñado.

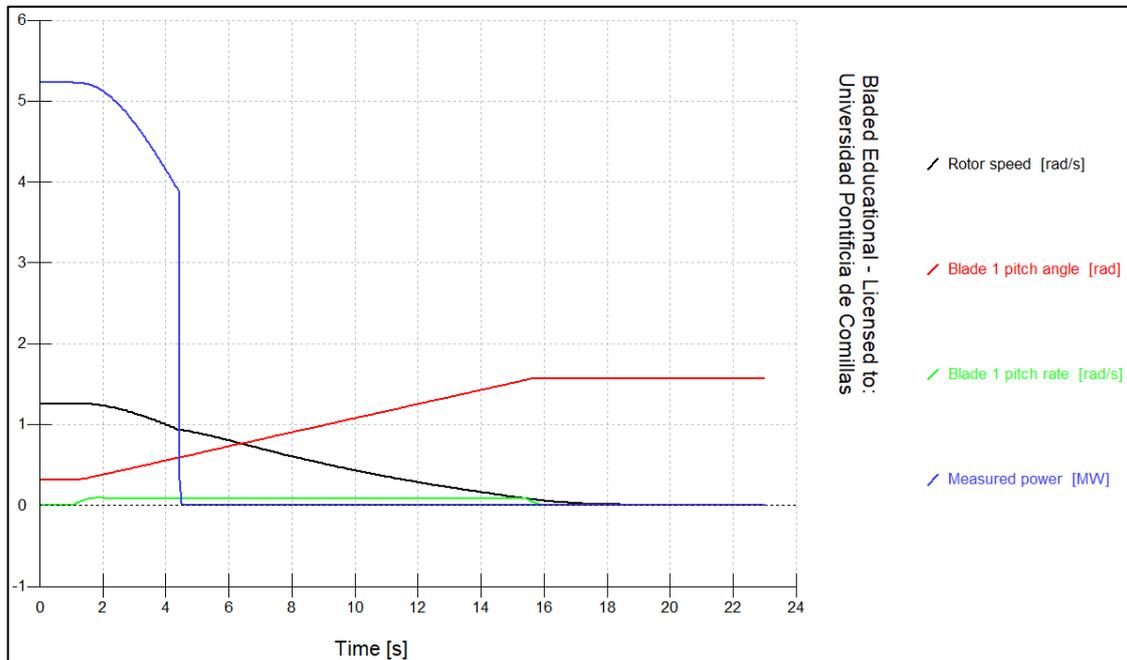


Ilustración 35: Respuesta del Sistema ante la Parada Normal

Uno de los estados críticos analizados es el de parada normal. En este escenario, se observa cómo la tasa de cambio del pitch (*pitch rate*) ajusta uniformemente el ángulo de paso de las palas, lo que permite reducir progresivamente la velocidad del rotor hasta detenerse por completo, llevando las palas a la posición de bandera. Esta simulación demuestra que el procedimiento de parada normal es efectivo para cesar la generación de energía cuando se alcanzan los umbrales de seguridad establecidos, garantizando así la seguridad y estabilidad del sistema.

Asimismo, otro de los estados operativos críticos, el de parada de emergencia, muestra un comportamiento plenamente compatible con el diseño propuesto. En este caso, el sistema es capaz de reducir el tiempo de parada del motor a la mitad, gracias a la implementación de una tasa de cambio del ángulo de paso de pala significativamente mayor, tal como se especifica en el diseño del regulador. Esta respuesta acelerada es crucial para garantizar la seguridad operativa del aerogenerador en situaciones donde es necesario detener

rápidamente la generación de energía, asegurando que el sistema actúe con la rapidez y efectividad necesarias para prevenir daños y mantener la integridad del equipo.

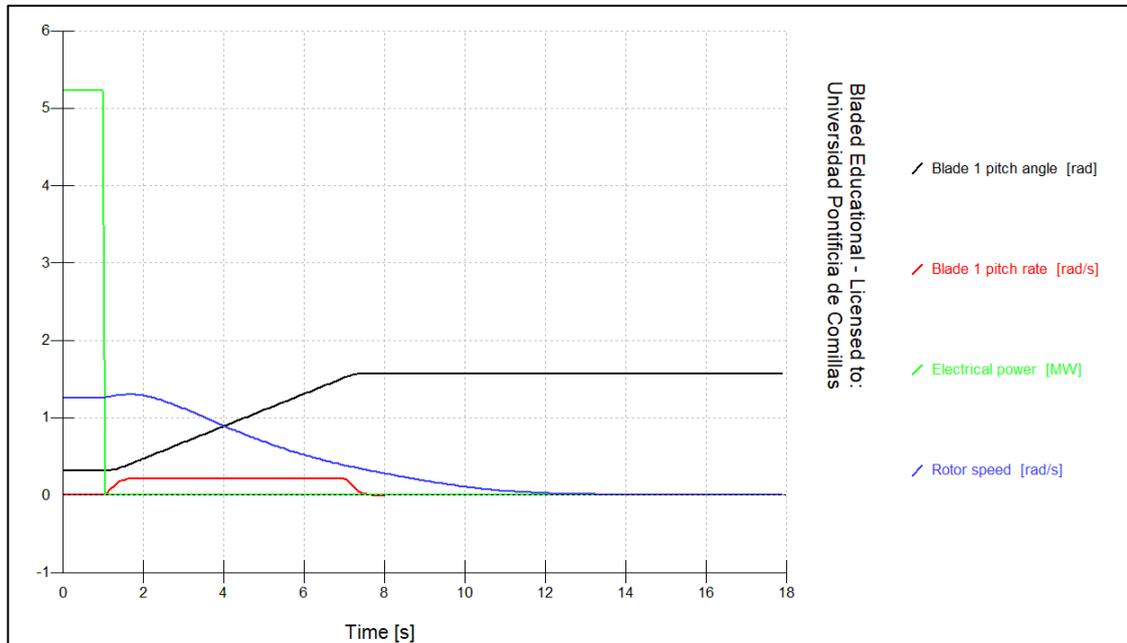


Ilustración 36: Respuesta del Sistema ante la Parada de Emergencia

La simulación del resto de los estados operativos no aporta información relevante en cuanto al efecto del sistema de control y comunicaciones de la planta, ya que el funcionamiento de estos últimos garantiza la integridad del conjunto incluso en las condiciones más desfavorables. El diseño del sistema asegura que, independientemente del estado operativo, la planta mantiene su estabilidad y funcionalidad sin comprometer la seguridad ni la eficiencia.

Los resultados obtenidos subrayan el acierto en el diseño del regulador, así como la efectividad del sistema de control en su conjunto y la adecuada monitorización de las variables críticas. Estas conclusiones validan el enfoque adoptado y confirman que el sistema es capaz de operar de manera segura y eficiente en diversas condiciones operativas, asegurando un rendimiento óptimo y la protección del aerogenerador.

Para ver la configuración del modelo en el software utilizado consultar anexo.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

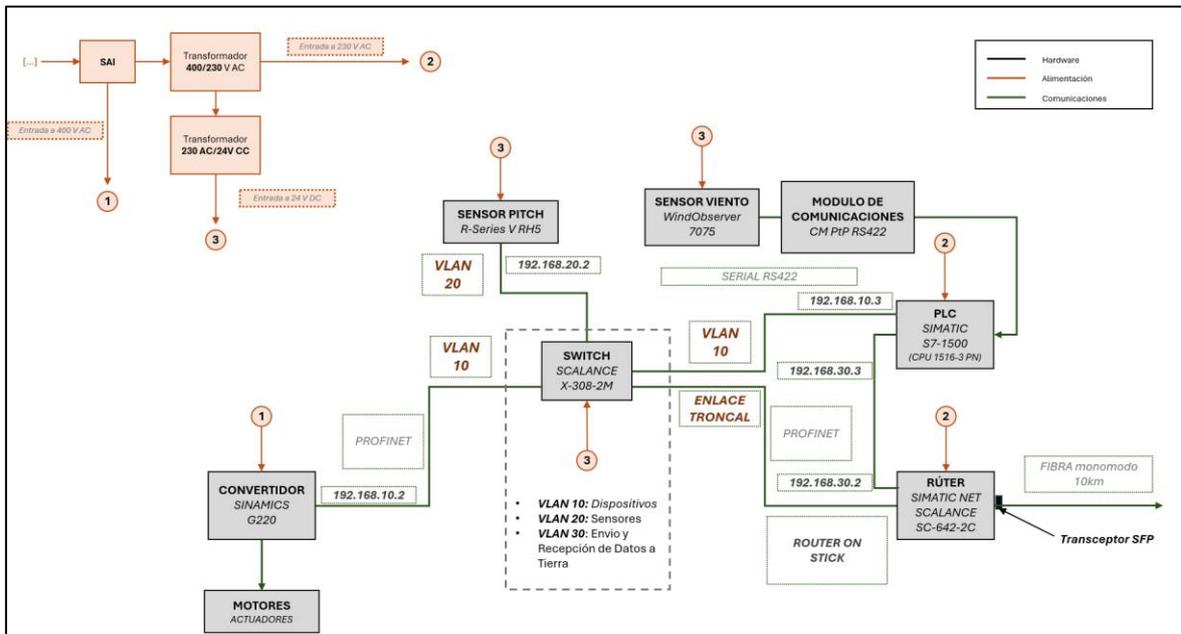


Ilustración 37: Diseño del Sistema en su totalidad

Con todo lo expuesto en el proyecto realizado, se ha propuesto y diseñado un entorno integral a nivel de hardware y software que garantiza la correcta transmisión, control y monitorización en tiempo real de los dispositivos críticos dentro de un aerogenerador eólico marino. Este sistema no solo se enfoca en la operatividad eficiente del aerogenerador, sino también en asegurar que los datos esenciales sean transmitidos y procesados de manera confiable y oportuna, lo cual es fundamental para la estabilidad de la generación de energía en un entorno marino.

A través del diseño y la implementación de un sistema de control y comunicaciones segmentado mediante VLANs, se ha logrado una segregación efectiva del tráfico de red. Esto permite que los diferentes tipos de datos ya sean de sensores, dispositivos de control o comunicaciones con tierra, circulen de manera independiente, reduciendo las posibilidades de congestión en la red y mejorando la seguridad del sistema. La elección de hardware

especializado, como switches industriales y rúters optimizados para entornos exigentes, ha sido clave para alcanzar la robustez y fiabilidad necesarias en un entorno marino.

Además, la implementación de protocolos de comunicación estándar como PROFINET y RS422 asegura la interoperabilidad entre los diferentes componentes del sistema, facilitando la integración y futura expansión de este. El uso de fibra óptica para la transmisión de datos a larga distancia también ha sido un factor determinante en la capacidad del sistema para soportar las condiciones adversas del entorno marino, minimizando la latencia y garantizando la integridad de los datos.

6.1 TRABAJOS FUTUROS

- (i) **Optimización del Ancho de Banda y Gestión del Tráfico:** Dado el crecimiento esperado en la cantidad de datos generados por el aerogenerador, se hace necesario explorar nuevas técnicas de optimización del ancho de banda. Esto incluye la implementación de Quality of Service (QoS) para asegurar que los datos críticos, como los de control y monitoreo, tengan prioridad sobre otros tipos de tráfico menos urgentes. Además, se pueden estudiar algoritmos de balanceo de carga que distribuyan eficientemente el tráfico de red en situaciones de alta demanda.

- (ii) **Integración con Sistemas de Mantenimiento Predictivo y Análisis de Datos:** Una de las áreas con mayor potencial de desarrollo es la integración del sistema de control con plataformas avanzadas de mantenimiento predictivo. Utilizando técnicas de análisis de datos y machine learning, es posible prever fallos y optimizar las operaciones de mantenimiento. Esto no solo reduciría los tiempos de inactividad y los costos operativos, sino que también prolongaría la vida útil de los componentes críticos del aerogenerador. Un enfoque futuro podría incluir el desarrollo de algoritmos específicos para el análisis de los datos recogidos por los sensores, con el fin de detectar patrones que indiquen el deterioro de los componentes.

- (iii) Fortalecimiento de la Ciberseguridad: En un entorno donde las infraestructuras críticas están cada vez más expuestas a amenazas cibernéticas, es imperativo desarrollar un plan de ciberseguridad robusto. Este plan debería incluir la implementación de firewalls industriales avanzados, sistemas de detección y prevención de intrusiones (IDS/IPS), y cifrado de extremo a extremo en todas las comunicaciones sensibles. También sería beneficioso realizar auditorías de seguridad periódicas y establecer un protocolo de respuesta ante incidentes para mitigar cualquier posible ataque de manera rápida y efectiva.
- (iv) Escalabilidad y Flexibilidad del Sistema: Considerando la posibilidad de expandir el parque eólico marino o de replicar el sistema en otros aerogeneradores, es crucial estudiar la escalabilidad del sistema. Esto implica analizar la capacidad de los componentes actuales para manejar un mayor número de dispositivos y un volumen creciente de datos, así como explorar la posibilidad de integrar nuevas tecnologías que faciliten la expansión, como redes definidas por software (SDN). También sería útil evaluar el impacto de la incorporación de nuevos sensores o actuadores en la infraestructura existente y desarrollar un plan de actualización tecnológica a mediano y largo plazo.
- (v) Pruebas Operativas y Validación en Entornos Reales: Para garantizar que el sistema de control y comunicaciones pueda soportar las condiciones extremas del entorno marino, es fundamental realizar pruebas exhaustivas en condiciones operativas reales. Estas pruebas deben incluir la simulación de fallos en componentes críticos, la evaluación del rendimiento bajo condiciones climáticas adversas, y la validación del tiempo de respuesta del sistema ante eventos imprevistos. Además, se podrían implementar simulaciones en tiempo real para modelar el comportamiento del sistema en escenarios de alta demanda, lo que permitiría ajustar los parámetros de operación antes de su despliegue final.
- (vi) Innovación en Tecnologías de Comunicación: Finalmente, es recomendable explorar e investigar nuevas tecnologías de comunicación que puedan complementar o

mejorar las soluciones actuales. Por ejemplo, la integración de redes 5G o el uso de tecnologías de comunicación por satélite podrían ofrecer ventajas adicionales en términos de velocidad, latencia y cobertura, especialmente para la transmisión de datos a tierra desde parques eólicos ubicados en zonas remotas. Estas innovaciones podrían no solo mejorar el rendimiento del sistema, sino también abrir nuevas posibilidades para la monitorización y control remoto de aerogeneradores en tiempo real.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Siemens. "SIMATIC S7-1500 Communication Function Manual". Siemens Industry, 2019. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/925/59192925/att_901175/v2/s71500_communication_function_manual_en-US_en-US.pdf.
- [2] Siemens. "SIMATIC S7-1500 CPU 1516-3 PN/DP Manual". Siemens Industry, 2018. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/914/59191914/att_915307/v1/s71500_cpu1516_3_pn_dp_manual_en-US_en-US.pdf.
- [3] Siemens. "SINAMICS G220 Operating Instructions". Siemens Industry, 2023. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/984/109820984/att_1157766/v1/G220_op_instr_0823_en-US.pdf.
- [4] Siemens. "SIMATIC S7-1500 CM PTP RS422/485HF Manual". Siemens Industry, 2017. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/372/59061372/att_88133/v1/s71500_cm_ptp_rs422-485hf_manual_es-ES_es-ES.pdf.
- [5] Siemens. "SCALANCE SC-600 Operating Instructions". Siemens Industry, 2021. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/812/109754812/att_1122572/v1/BA_SCALANCE-SC-600_78.pdf.
- [6] Temposonics. "R-Series V Operation Manual (Profinet)". MTS Sensors, 2022. https://www.temposonics.com/portals/mts_sensors/documents/R-seriesV/Operation_Manual_R-SeriesV_Profinet_551973_EN.pdf.
- [7] "Global Wind Atlas". 2024. <https://globalwindatlas.info/es>.
- [8] Rackonline. "¿Qué es un SAI y tipos de SAI?". 2020. <https://www.rackonline.es/content/que-es-un-sai-y-tipos-de-sai>.
- [9] Konetia Automatización. "¿Qué es un sistema SCADA?". 2021. <https://www.konetia-automatizacion.com/que-es-un-sistema-scada/>.
- [10] "PID Control System". ResearchGate, 2023. https://www.researchgate.net/figure/PID-control-system-6_fig1_382036279.

ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS

Este proyecto se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. A continuación, se describen ejemplos específicos de cómo las innovaciones y desarrollos realizados en el sistema de control y comunicaciones de un aerogenerador eólico marino contribuyen directamente a estos objetivos globales:

ODS 7 – Energía Asequible y No Contaminante: La implementación del sistema de control optimizado para los aerogeneradores marinos ha mejorado significativamente la eficiencia de captación de energía. Esto no solo hace la energía más asequible al reducir los costes operativos y de mantenimiento, sino que también promueve el uso de una fuente de energía limpia y renovable, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y sus emisiones contaminantes asociadas.

ODS 9 – Industria, Innovación e Infraestructura: El diseño avanzado del sistema de comunicaciones utilizando tecnologías como PROFINET y OPC UA para la gestión eficaz y en tiempo real de los datos del aerogenerador, refleja un significativo avance en las infraestructuras tecnológicas y la innovación industrial. Esta infraestructura robusta y resiliente es fundamental para el desarrollo sostenible de la industria energética marina.

ODS 13 – Acción por el Clima: El uso extendido de los aerogeneradores marinos diseñados en este proyecto ayuda a mitigar el cambio climático al proporcionar una alternativa renovable y de bajo carbono a las fuentes de energía tradicionales. Al reducir la emisión de gases de efecto invernadero, el proyecto contribuye de manera efectiva a las estrategias de acción climática global.

ODS 14 – Vida Submarina: Se han adoptado en el proyecto medidas para minimizar los impactos ambientales en los ecosistemas marinos durante la instalación y operación de los

aerogeneradores. Esto incluye la selección cuidadosa de las ubicaciones para evitar áreas críticas de biodiversidad y la implementación de tecnologías que limitan la perturbación acústica, apoyando así la conservación de la vida marina.

ODS 11 – Ciudades y Comunidades Sostenibles: Al proporcionar una fuente constante de energía renovable, los aerogeneradores marinos apoyan el desarrollo de comunidades y ciudades más sostenibles. La energía generada contribuye a mejorar la calidad del aire y a reducir la huella ecológica en áreas urbanas, haciendo que las comunidades sean menos dependientes de las fuentes de energía que contribuyen al calentamiento global y la degradación ambiental.

Estos ejemplos demuestran el compromiso del proyecto con el desarrollo sostenible y su contribución directa a los esfuerzos globales para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

ANEXO II

ESPECIFICACIONES DEL SENSORES Y HARDWARE DE COMUNICACIÓN

| <i>Sensor de Paso de Pala</i> | |
|---------------------------------------|--|
| Especificaciones Básicas | |
| Fabricante | MTS Sensors |
| Modelo | Temposonics RH5 |
| Interfaz | PROFINET RT, PROFINET IRT versión 2.3 |
| Protocolo de datos | Perfil lineal y perfil de codificador V4.2 |
| Velocidad de transmisión de datos | 100 MBit/s (máximo) |
| Velocidad medida | Posición, opción de velocidad: mediciones simultáneas de posiciones y velocidades de hasta 30 imanes |
| Resolución | Posición 0.5...100 μm (seleccionable) |
| Tiempo de ciclo | 250 μs a 4000 μs (dependiendo de la longitud de carrera) |
| Desviación lineal | $\pm 50 \mu\text{m}$ a $< 0.01 \%$ F.S. (dependiendo de la longitud de carrera) |
| Histéresis | $< 4 \mu\text{m}$ típico |
| Coefficiente de temperatura | $< 15 \text{ ppm/K}$ típico |
| Temperatura de operación | $-40 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$ ($-40 \dots +185 \text{ }^\circ\text{F}$) |
| Protección de ingreso | IP67 (conectores correctamente instalados) |
| Velocidad de movimiento del imán | Cualquiera |
| Longitud de carrera | 25...7620 mm (1...300 in.)/RH5-J: 25...5900 mm (1...232 in.) |
| <i>Sensor de Velocidad del Viento</i> | |
| Especificaciones Básicas | |
| Fabricante | Gill Instruments |
| Modelo | WindObserver 70/75 |

| | |
|-----------------------------------|---|
| Parámetros | UV, Polar, NMEA |
| Salida | 1,2,4 Hz |
| Promediado | Flexible 1-3600 segundos o promediado ajustable para aplicaciones de clima en carretera |
| Rango | 0 - 70m/s (WindObserver 70) o 0-75m/s (WindObserver 75) |
| Precisión | ±2% a 12m/s |
| Resolución | 0.01m/s |
| Unidades de Medida | m/s, Knots, MPH, KPH ft/min |
| Rango | 0-359 Grados |
| Precisión | ±2° |
| Resolución | 1° |
| Estado del Anemómetro | Suministrado como parte del mensaje estándar |
| Umbral de inicio | 0.01 m/s |
| Voltaje de entrada | 9-30V DC 50mA @ 12V DC |
| Protección contra voltaje inverso | SÍ |
| Comunicación | RS422, full duplex, instalación en red |
| Tasas de Baud | 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400 |
| Formatos | 8 bits de datos, impar, par o sin paridad, 1 bit de parada |
| Protección contra humedad | IP66 (NEMA4X) |
| Temperatura de operación | -55°C a +70°C (versión calefactada) |
| Humedad | 0% a 100% HR |

| | |
|---------------------------------|--|
| SWITCH | |
| Especificaciones Básicas | |
| Fabricante | Siemens |
| Modelo | SCALANCE X308-2M |
| Conexiones Ethernet | 8 puertos Ethernet 10/100/1000 Mbps RJ45 |
| Conexiones SFP | 2 puertos SFP |
| Tasa de Transferencia | 10/100/1000 Mbps |
| Velocidad de Conmutación | 24 Gbps |

| | |
|----------------------------------|---|
| Capacidad de Tablas MAC | 8K entradas |
| Protocolos Soportados | IEEE 802.3, IEEE 802.3u, IEEE 802.3ab, IEEE 802.3z, IEEE 802.3x |
| Funciones de Gestión | IGMP Snooping, VLAN, QoS, RSTP, SNMP, Web-based Management |
| Seguridad | 802.1x Authentication, SSH, SSL |
| Alimentación | 24 V DC |
| Consumo de Energía | 15 W (máx.) |
| Conector de Alimentación | Bloque de terminales de 4 polos enchufable |
| Protección contra Sobretensiones | Sí |
| Rango de Temperatura | -40°C a +70°C |
| Protección | IP30 |
| Humedad | 5% a 95% (sin condensación) |
| Certificaciones | CE, FCC, EN 50155, EN 50121-4, EN 61000-6-2, EN 61000-6-4 |

| | |
|----------------------------------|--|
| Rúter | |
| Especificaciones Básicas | |
| Fabricante | Siemens |
| Modelo | SCALANCE SC642-2C |
| Conexiones Ethernet | 2 puertos combo-eléctricos/ópticos (RJ45 o SFP) |
| Tasa de Transferencia | 10/100/1000 Mbps |
| Protocolos Soportados | IEEE 802.3, IEEE 802.3u, IEEE 802.3ab, IEEE 802.3x |
| Funciones de Gestión | IGMP Snooping, VLAN, QoS, RSTP, SNMP, Web-based Management |
| Seguridad | 802.1x Authentication, SSH, SSL |
| Alimentación | 24 V DC |
| Consumo de Energía | 9.12 W |
| Conector de Alimentación | Bloque de terminales de 4 polos enchufable |
| Protección contra Sobretensiones | Sí |
| Rango de Temperatura | -40°C a +70°C |
| Protección | IP20 |
| Humedad | 5% a 95% (sin condensación) |

Funciones Adicionales

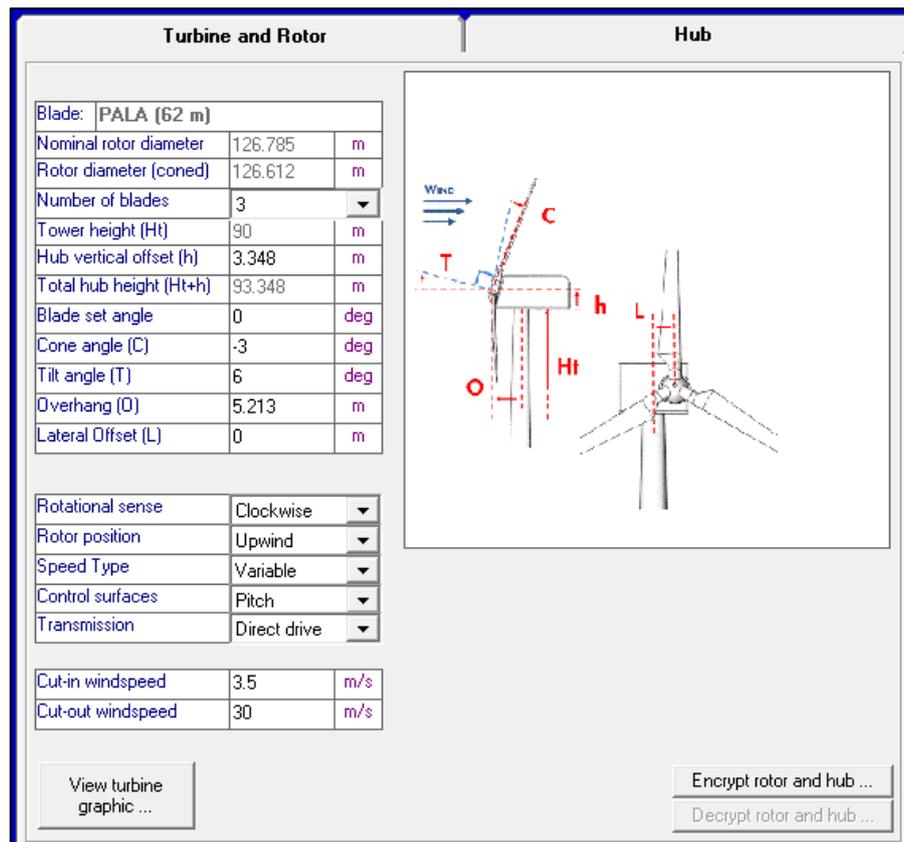
Firewall, VPN, NAT/NAPT, DHCP, DynDNS,
SysLog

MODELO PRELIMINAR (BLADED EDUCATIONAL)

Para el desarrollo del proyecto, y cumpliendo con los objetivos establecidos se hace uso del software de Bladed Educational para desarrollar un modelo preliminar en el que basar el diseño.

Los diferentes parámetros establecidos figuran a continuación.

ROTOR



| Turbine and Rotor | | Hub | |
|-------------------------|--------------|-----|--|
| Blade: | PALA (62 m) | | |
| Nominal rotor diameter | 126.785 | m | |
| Rotor diameter (coned) | 126.612 | m | |
| Number of blades | 3 | | |
| Tower height (Ht) | 90 | m | |
| Hub vertical offset (h) | 3.348 | m | |
| Total hub height (Ht+h) | 93.348 | m | |
| Blade set angle | 0 | deg | |
| Cone angle (C) | -3 | deg | |
| Tilt angle (T) | 6 | deg | |
| Overhang (O) | 5.213 | m | |
| Lateral Offset (L) | 0 | m | |
| Rotational sense | Clockwise | | |
| Rotor position | Upwind | | |
| Speed Type | Variable | | |
| Control surfaces | Pitch | | |
| Transmission | Direct drive | | |
| Cut-in windspeed | 3.5 | m/s | |
| Cut-out windspeed | 30 | m/s | |

View turbine graphic ...

Encrypt rotor and hub ...

Decrypt rotor and hub ...

Ilustración 38: Parámetros del Rotor en Bladed

Turbine and Rotor

Blade Root

| | | |
|----------------------|-----|---|
| Root Length (L) | 1.5 | m |
| Diameter (D) | 3.2 | m |
| Drag Coefficient | 0 | - |
| Spinner diameter (S) | 3 | m |

Teetered hub

Pitch-teeter coupling:
 Delta-3 Special

Delta-3 Angle: 0 deg

Direct drive generator

| | | |
|---------------|--------|------------------|
| Rotor inertia | 289000 | kgm ² |
|---------------|--------|------------------|

Assign Mass

Hub mass properties:

| | | |
|--------------------------------------|-------|------------------|
| Mass (including internal hub system) | 40000 | kg |
| Centre of mass | 0 (H) | m |
| Inertia about shaft | 60000 | kgm ² |
| Inertia perpendicular to shaft | 60000 | kgm ² |

Direct drive generator (if not included in nacelle):

| | | |
|---|-----------|------------------|
| Total mass (rotor + stator) | 105000 | kg |
| Centre of mass (rotor + stator) | 3.873 (K) | m |
| Inertia about shaft (stator only) | 638046 | kgm ² |
| Inertia perpendicular to shaft (rotor + stator) | 470565 | kgm ² |

Mass (including imbalance mass)

| | | |
|------|-------|----|
| Mass | 40000 | kg |
|------|-------|----|

Counterweight for one-bladed turbine

| | | |
|---------------------|---|------------------|
| Mass | 0 | kg |
| Inertia about shaft | 0 | kgm ² |

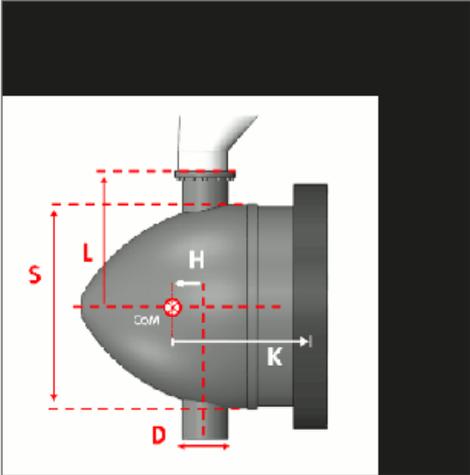


Ilustración 39: Parámetros del Rotor en Bladed

TORRE

Tower Structure

| | | | |
|--------------------------|-----------------|-----|-----|
| Tower Station Number | | 1 | 2 |
| Height above surface | m | -40 | 90 |
| Outside diameter | m | | |
| Mass per unit length | kg/m | 5.6 | 5.6 |
| Bending Stiffness | Nm ² | | |
| Shear Stiffness | N | | |
| Torsional stiffness | Nm ² | | |
| Polar mom. of inertia | kgm | | |
| Wall thickness | mm | 0 | 0 |
| Material | - | 0 | 0 |
| Hydro drag coeff. | - | | |
| Hydro inertia coeff. | - | | |
| Point masses (1 defined) | | 0 | 0 |

Ilustración 40: Parámetros de la torre en Bladed

TREN DE POTENCIA

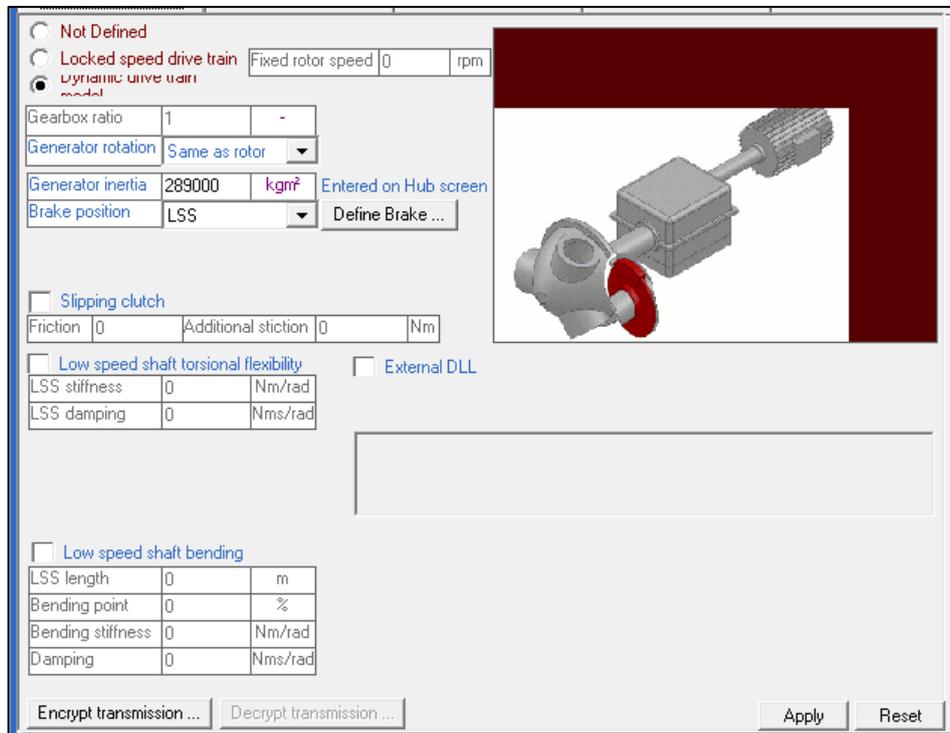


Ilustración 41: Parámetros del Tren de Potencia en Bladed

Como se puede ver en la imagen superior se hace uso de una transmisión directa en el modelo inicial.

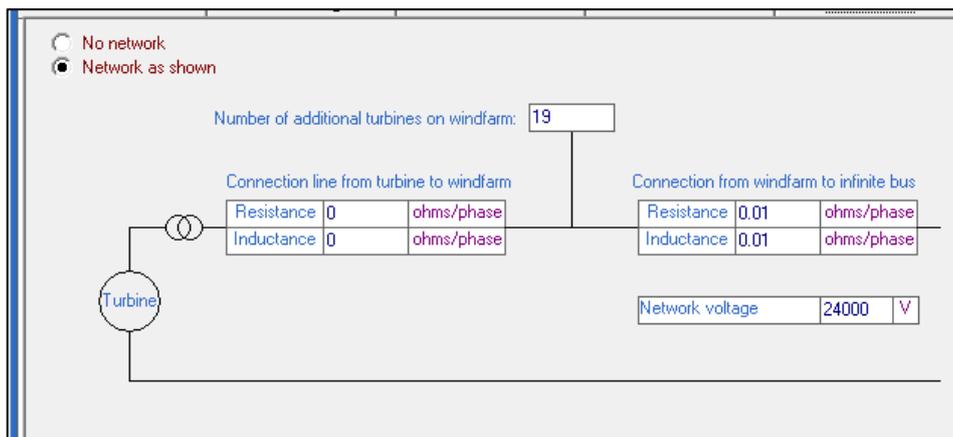
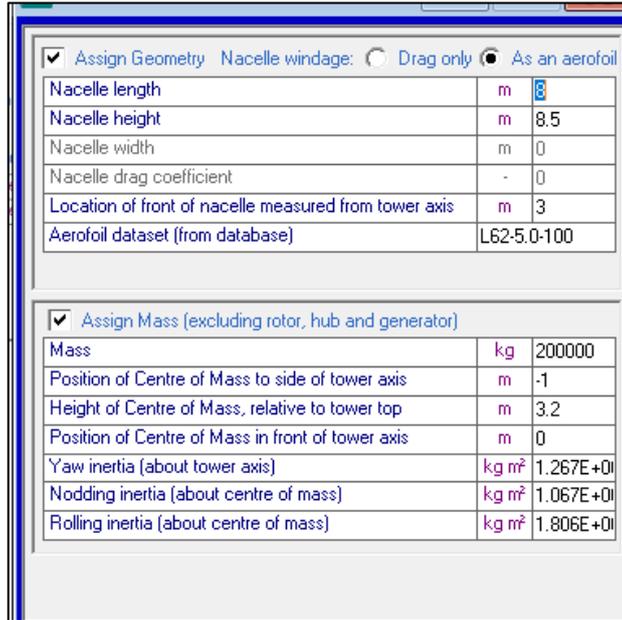


Ilustración 42: Parámetros de la red de estaciones en Bladed

Nuestra estación, como se expone anteriormente, forma parte de una red de 19 estaciones idénticas, con una tensión de red de 24000V.

GÓNDOLA



Assign Geometry Nacelle windage: Drag only As an aerofoil

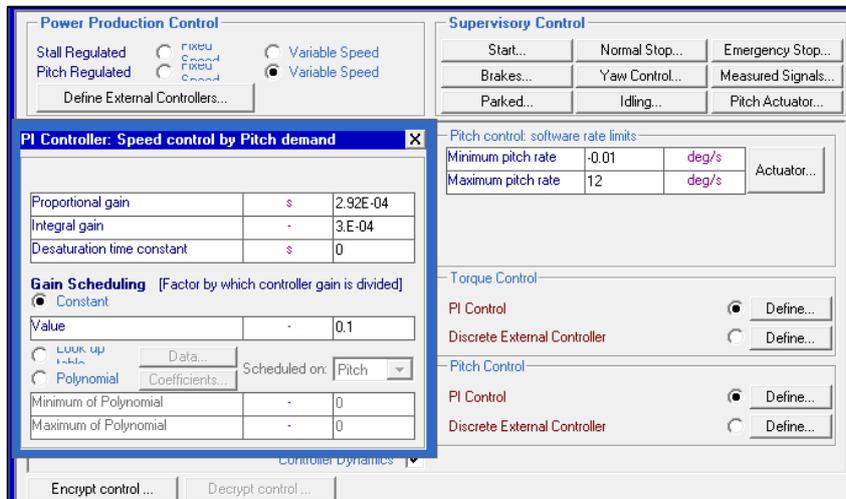
| | | |
|---|---|-------------|
| Nacelle length | m | 8 |
| Nacelle height | m | 8.5 |
| Nacelle width | m | 0 |
| Nacelle drag coefficient | - | 0 |
| Location of front of nacelle measured from tower axis | m | 3 |
| Aerofoil dataset (from database) | | L62-5.0-100 |

Assign Mass (excluding rotor, hub and generator)

| | | |
|---|-------------------|-----------|
| Mass | kg | 200000 |
| Position of Centre of Mass to side of tower axis | m | -1 |
| Height of Centre of Mass, relative to tower top | m | 3.2 |
| Position of Centre of Mass in front of tower axis | m | 0 |
| Yaw inertia (about tower axis) | kg m ² | 1.267E+01 |
| Nodding inertia (about centre of mass) | kg m ² | 1.067E+01 |
| Rolling inertia (about centre of mass) | kg m ² | 1.806E+01 |

Ilustración 43: Parámetros de la góndola en Bladed

SISTEMAS DE CONTROL



Power Production Control

Stall Regulated Fixed Speed Variable Speed
Pitch Regulated Fixed Pitch Variable Speed

Define External Controllers...

PI Controller: Speed control by Pitch demand

| | | |
|----------------------------|---|----------|
| Proportional gain | s | 2.92E-04 |
| Integral gain | - | 3.E-04 |
| Desaturation time constant | s | 0 |

Gain Scheduling [Factor by which controller gain is divided]

Constant

Value: 0.1

Look up table Data... Polynomial Coefficients... Scheduled on: Pitch

| | | |
|-----------------------|---|---|
| Minimum of Polynomial | - | 0 |
| Maximum of Polynomial | - | 0 |

Controller Dynamics

Encrypt control ... Decrypt control ...

Supervisory Control

Start... Normal Stop... Emergency Stop...
Brakes... Yaw Control... Measured Signals...
Parked... Idling... Pitch Actuator...

Pitch control: software rate limits

| | | | |
|--------------------|-------|-------|-------------|
| Minimum pitch rate | -0.01 | deg/s | Actuator... |
| Maximum pitch rate | 12 | deg/s | |

Torque Control

PI Control Define...
Discrete External Controller Define...

Pitch Control

PI Control Define...
Discrete External Controller Define...

Ilustración 44: Parámetros de los sistemas de control y estados operativos en Bladed

Como se puede ver en la imagen superior, la velocidad del regulador es variable, pero se pueden establecer tanto los límites de la tasa de cambio como las constantes del PI. Esto, junto con los estados operativos presentes, ayuda a modelar la salida del sistema en diferentes condiciones.

CONDICIONES DEL ENTORNO

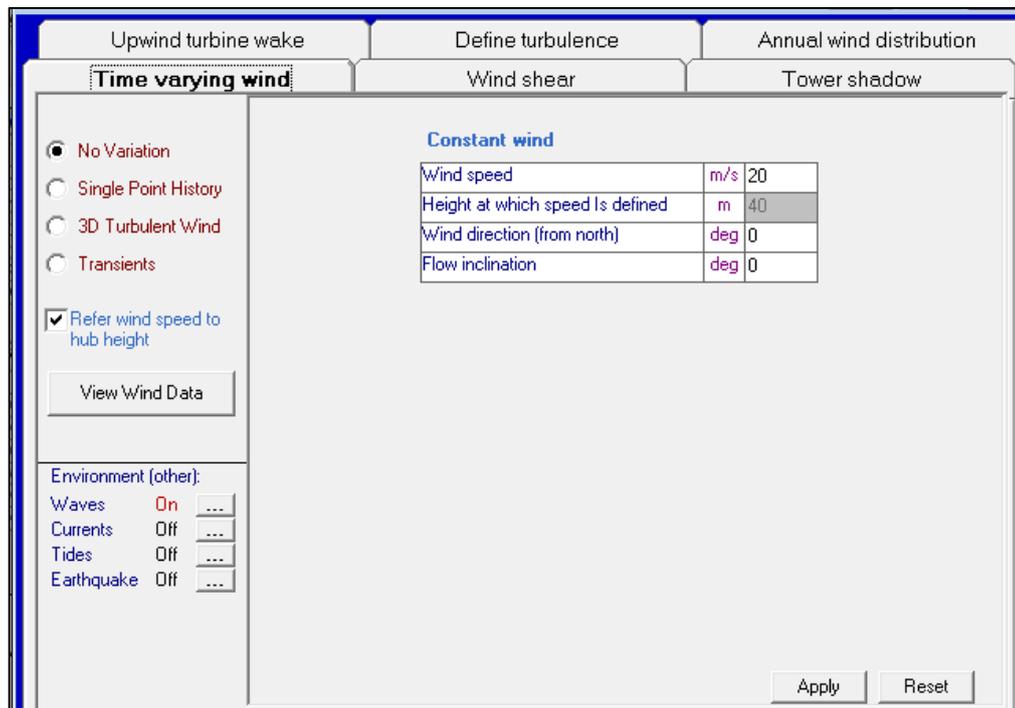


Ilustración 45: Condiciones del viento a modelar en Bladed

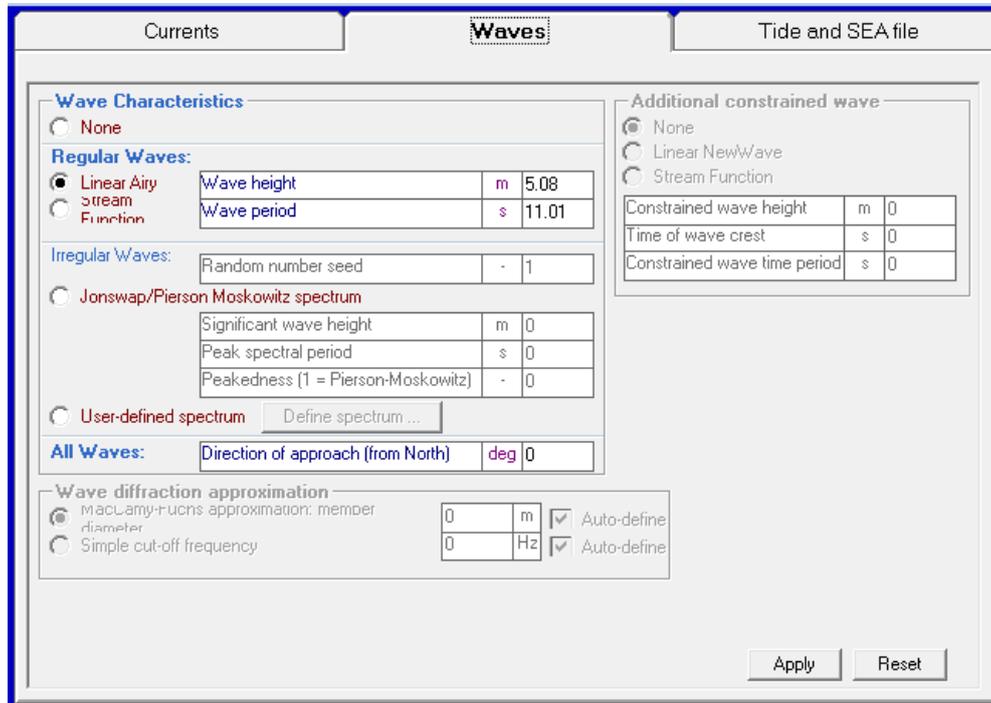


Ilustración 46: Condiciones del mar en Bladed

Con todo lo anterior, se establece un marco inicial para desarrollar el diseño del sistema de control y comunicaciones del proyecto, en consonancia con lo realizado a lo largo del mismo.

OB1

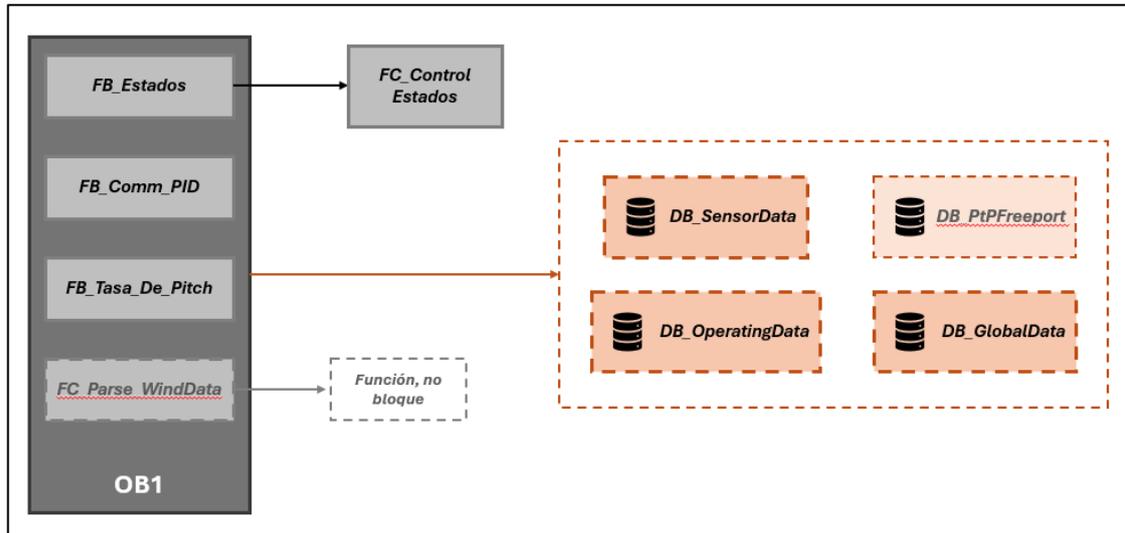


Ilustración 47: Diagrama de la distribución programática

```

ORGANIZATION_BLOCK OB1

VAR_TEMP
  error: BOOL;
  input_manual: INT;
  velocidad_viento: REAL;
  v_gen: REAL;
  DataString: STRING[255];
  ParsedData: DB_SensorData;
END_VAR

VAR
  DB_GlobalData: DB_GlobalData;
  DB_OperatingData: DB_OperatingData;
  DB_SensorData: DB_SensorData;
  DB_PtPFreeport: DB_PtPFreeport;
  FB_Estados_Instance: FB_Estados;
  FB_Tasa_De_Pitch_Instance: FBTasa_De_Pitch;
  FB_Comm_PID_Instance: FB_Comm_PID;
  FC_Parse_WindData_Instance: FC_Parse_WindData;
END_VAR

BEGIN
  // Inicialización de Variables
  error := DB_GlobalData.Error;
  input_manual := 0; // Valor inicial para entrada manual
  velocidad_viento := DB_SensorData.WindSpeed;
  v_gen := DB_OperatingData.RotorSpeed;

```

```
// Lectura de los datos del sensor de viento y parsing
FC_Parse_WindData_Instance(
    DataString := DB_PtPFreeport.rcvPtPData,
    ParsedData := DB_SensorData
);

// Actualizar los datos del sensor parseado en DB_SensorData
DB_SensorData := ParsedData;

// Lógica de control de estados
FB_Estados_Instance(
    error := error,
    input_manual := input_manual,
    velocidad_viento := velocidad_viento,
    v_gen := v_gen,
    estado := DB_GlobalData.estado_control_actual,
    DB_GlobalData := DB_GlobalData,
    DB_OperatingData := DB_OperatingData
);

// Control de la tasa de pitch
FB_Tasa_De_Pitch_Instance(
    DB_OperatingData := DB_OperatingData,
    DB_GlobalData := DB_GlobalData,
    DB_SensorData := DB_SensorData
);

// Control de la comunicación PID
FB_Comm_PID_Instance(
    DB_OperatingData := DB_OperatingData
);

END_ORGANIZATION_BLOCK
```