

EOCEN: Sistema de Control de la Calidad de la Energía Eólica

Memoria Descriptiva

Gonzalo Pérez Noguerol

Tutor: D. José Luis Calvo Borrego

Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla

Junio de 2006



- 1. Introducción 2
 - 1.1. Planteamiento del problema..... 2
 - 1.2. Antecedentes 3
 - 1.2.1. Sistemas de Medida actuales. Restricciones y Limitaciones..... 3
 - 1.2.2. Soporte físico de los sistemas de comunicación..... 5
 - 1.2.3. Protocolos de Comunicación. 5
 - 1.2.4. Sistemas de Tratamiento de la Información..... 7
- 2. Objetivos del proyecto y descripción funcional del sistema 9
 - 2.1. Objetivos y alcance 9
 - 2.2. Sistemas de captación y procesado de los datos 12
 - 2.3. Protocolos y medios de comunicaciones..... 14
 - 2.4. Sistemas de gestión y control..... 16
- 3. Beneficios esperados..... 18
- 4. Organización del trabajo 20
 - 4.1. Empresas desarrolladoras..... 20
 - 4.2. Centro tecnológico 21
 - 4.3. Usuario final 21
 - 4.4. Proyecto final de carrera 22



1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El nuevo marco legislativo del mercado eléctrico, establecido por el **Real Decreto 436/2004** [1], endurece las medidas regulatorias sobre las características eléctricas de la energía producida por los parques eólicos y supone la aparición de condiciones restrictivas sobre la calidad de dicha energía, no controlada hasta el momento.

Entre estas medidas destacan las siguientes:

- **Generación de energía reactiva** en las franjas horarias necesarias, que será tarifada
- Participación en el procedimiento de control de tensiones vigente, aplicando sus mecanismos de retribución.
- Necesidad de **asegurar la calidad de la energía entregada a la red** (reducción de armónicos y ruido flicker) de forma que no se causen trastornos en el funcionamiento del sistema.
- Continuidad de suministro de energía ante huecos de tensión.

Actualmente, la mayoría de los aerogeneradores ya instalados en los parques eólicos en explotación carecen de las herramientas adecuadas para garantizar estas nuevas exigencias del mercado recogidas en la normativa recién promulgada.

El nuevo Real Decreto fija tanto las sanciones y limitaciones por el incumplimiento de las medidas de carácter obligatorio, así como las primas otorgadas a aquellos promotores que cumplan con aquellas de carácter opcional.

En este contexto nace el proyecto EOCEN, acrónimo de “Calidad de la Energía Eólica”, cuya finalidad es diseñar e implementar un “**Sistema de comunicaciones de altas prestaciones basado en tecnología inalámbrica (WI-FI) y digital (DSP) para la Supervisión, Gestión y Control de la calidad de la energía eléctrica producida en Parques Eólicos**”, que permita adaptar las instalaciones y medios de control de los parques



eólicos ya existentes a las nuevas exigencias tratando de minimizar el impacto tanto tecnológico como económico.

Los objetivos de este proyecto se enmarcan dentro de las prioridades temáticas del Programa Nacional de Tecnología Electrónica y Comunicaciones, y más específicamente en el Subprograma Nacional de Electrónica, que en el apartado 5º sobre “Integración de Sistemas para Aplicaciones Específicas” establece como una de sus prioridades los “Sistemas Electrónicos para la Producción y Distribución de Energía”.

La solución aportada así como las bases tecnológicas en las que se apoya y el esfuerzo investigador necesario para alcanzar la misma convierten a EOCEN en un **proyecto de I+D+I**, que pretende, además de cubrir las necesidades surgidas con el nuevo Real Decreto a través de un producto novedoso, buscar **alternativas a los sistemas tradicionales de control** basados en SCADA. Por todo ello, el proyecto cuenta con la financiación del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio a través del programa PROFIT (Programa de Fomento de la Investigación Técnica destinado a estimular a las empresas y a otras entidades a llevar a cabo actividades de investigación y desarrollo tecnológico) del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (I+D+I) 2004-2007.

1.2. Antecedentes

En este punto se analiza el estado y características de los sistemas de control que actualmente gestionan los parques eólicos en explotación, así como las limitaciones de éstos y las posibles soluciones e innovaciones que están adoptando los principales fabricantes y promotores. Las conclusiones extraídas de este estudio serán de gran utilidad a la hora de elegir las tecnologías adecuadas y diseñar el sistema que de solución a las necesidades planteadas.

1.2.1. Sistemas de Medida actuales. Restricciones y Limitaciones.

Los aerogeneradores actualmente existentes en el mercado disponen de sistemas de medida de elevadas prestaciones. Estos sistemas realizan un muestreo de las variables eléctricas del sistema trifásico (las tres tensiones y las tres intensidades) y son capaces de calcular y dar valores de potencia activa, reactiva y valores eficaces de tensión e intensidad, así como de frecuencia, en periodos de tiempo inferiores a 10ms (medida medio ciclo de red).



El uso que hasta ahora se le ha dado a estas medidas ha sido:

- Posibilitar el control de las maniobras de conexión y desconexión del aerogenerador en base al estado de la red (tensión o frecuencia fuera del rango de trabajo).
- Calcular la potencia entregada a la red para compararla con la curva de potencia garantizada por el fabricante.
- Almacenar estos datos, junto a las demás variables de funcionamiento del aerogenerador, para realizar un diagnóstico de fallo en el caso de darse, así como para mejorar la actuación de la máquina.

Las limitaciones que se han observado y considerado en los sistemas actuales son principalmente dos:

La primera es la **incapacidad de realizar la medida y el procesamiento de transitorios rápidos del sistema eléctrico**. A pesar de ser sistemas digitales con unas altas tasas de muestreo, no han sido diseñados para realizar un análisis de armónicos e íter armónicos, o capturar los transitorios que aparecen en una máquina debido a huecos de tensión. Para llevar a cabo dicho estudio se necesita una tasa de muestreo muy alta y una capacidad elevada de almacenamiento de datos, así como flexibilidad para programar disparos para la adquisición de estos datos y formas de onda (no es práctico almacenar las seis variables características de la red durante las 24 horas del día, sino sólo cuando sea interesante hacerlo, situación que ha de ser posible captar y procesar adecuadamente). Esta carencia provoca efectos nocivos en muchos de los sistemas de medida actuales que no son capaces de funcionar correctamente en el caso de transitorios muy rápidos o elevadas tasas de distorsión armónica, ya sea por la pérdida de datos relevantes por una insuficiente velocidad de muestreo, o bien por la aplicación de normas de cálculo válidas para una red trifásica, muy cercana a la senoidal, pero con pocos efectos distorsionantes.

En segundo lugar, en los sistemas actuales de adquisición de datos es habitual que sea el propio **autómata** de control del aerogenerador el **encargado de mantener las comunicaciones** con el SCADA o equipo de gestión del parque mediante PLC. De esta forma, la **velocidad de envío y la cantidad de información transmisible están limitadas por la capacidad del autómata**. El independizar el sistema de adquisición de datos del control de la máquina aumenta considerablemente la cantidad de datos que es posible enviar, así como la frecuencia con que éstos son enviados.



En definitiva, el actual sistema de medida de la red eléctrica instalado en los aerogeneradores existentes, cumple sobradamente los requisitos para un adecuado control de la máquina cuando esta funciona dentro de los márgenes anteriormente impuestos por el marco regulatorio previo. Sin embargo, para ser capaces de conseguir la versatilidad y flexibilidad en la generación eólica, impuestas para acogerse al nuevo régimen surgido a partir del nuevo Real Decreto, **es necesario un aumento importante en las prestaciones** de los dispositivos de captación de datos, así como en rendimiento del sistema de comunicación empleado, logrando así un control absoluto de todas las variables del sistema.

1.2.2. Soporte físico de los sistemas de comunicación

Actualmente, la mayoría de los sistemas de comunicación empleados en parques eólicos se basan en **tendidos de cable** (coaxiales o de pares) que poseen un ancho de banda limitado pero suficiente para la transmisión de las señales necesarias para control en tiempo real.

La **reutilización** de estos medios es **complicada**, debido a que la mayor parte del ancho de banda disponible es utilizado por los sistemas de control actualmente implantados, haciendo necesario llevar a cabo **ampliaciones de las redes instaladas** para dar soporte a las nuevas necesidades de transmisión de datos.

Sin embargo, debido a las características de las centrales eólicas, las dificultades referentes a la instalación, mantenimiento y ampliación de este tipo de medios se ven agravadas, surgiendo la **necesidad de abordar el empleo de sistemas inalámbricos** que solventan las limitaciones de las redes cableadas y ofrecen ventajas competitivas en términos de coste, flexibilidad y facilidad de uso.

1.2.3. Protocolos de Comunicación.

Actualmente los sistemas de comunicaciones en parques eólicos **utilizan protocolos propietarios de comunicación**, basados en buses de campo más o menos tradicionales en la industria sobre medios de transmisión cableados, como por ejemplo, el protocolo Lonworks modificado empleado por algunos fabricantes (MADE-GAMESA).

Estos protocolos presentan algunas **limitaciones** en cuanto a la capacidad para la supervisión y telecontrol del sistema, tanto desde el puesto de operación local como



remotamente estén muy limitadas, bien por la **velocidad de refresco** (retrasos en el refresco de ciertos parámetros hacen inútil su supervisión) o por la **imposibilidad de transmitir toda la información necesaria** (limitaciones en el número de parámetros admitidos por el protocolo). Por ello, es prácticamente imposible dotar al sistema de las nuevas funcionalidades necesarias para adaptarse al mercado eléctrico actual o a posibles modificaciones futuras del mismo.

Esta situación obliga, para permitir el estudio exhaustivo de los parámetros que caracterizan íntegramente el comportamiento eléctrico del sistema, a **dotar** al mismo de nuevos medios que garanticen el ancho de banda suficiente, así como **de un protocolo de transmisión estándar capaz de soportar el tráfico en tiempo real** asociado a los parámetros de control de datos, atendiendo a las características de este tipo de sistemas (tiempo de refresco, ancho de banda necesario, bidireccionalidad de la información, etc.)

El sistema deberá además **garantizar la compatibilidad e interoperabilidad con otros sistemas de supervisión y gestión ya existentes** e implantados en los diversos parques eólicos. Para cumplir esta última premisa es necesario recurrir al uso, en la medida de lo posible, de **protocolos estándares** de comunicación que faciliten su futura compatibilidad con cuantos sistemas de control deban ínter operar.

Para solucionar estas limitaciones, los principales fabricantes de aerogeneradores están adaptando sus protocolos de comunicación a las exigencias del mercado, basándose principalmente en protocolo Ethernet a través de los medios de comunicación ya existentes en parque.

Es cierto que esta solución permitirá aumentar el número de parámetros recogidos, así como la velocidad en el refresco de datos. No obstante, su aplicación en parques ya existentes es costosa y poco atractiva para los distintos promotores, ya que requieren modificaciones en las instalaciones físicas del parque (cableado) para asegurar la adecuada transmisión de la señal y en el software de los autómatas.

Por otro lado, esta solución, a pesar de estar basada en un estándar (**Ethernet**), no permite su fácil interconexión con otros sistemas, ya que los protocolos de comunicación con el autómata son propietarios de cada fabricante, por lo que dicha solución sigue presentando serias limitaciones en este aspecto.

Por tanto, el mercado está evolucionando en la dirección descrita en este proyecto, pero las soluciones propuestas hasta la fecha no garantizan la adaptación de los sistemas a futuros cambios del mercado eléctrico (nuevas restricciones o exigencias que requieran la



supervisión más parámetros con tiempos de refrescos inferiores a los actualmente establecidos).

No obstante las soluciones desarrolladas deben ser compatibles con las propuestas por los fabricantes de aerogeneradores, manteniendo así en todo momento la interoperabilidad entre los distintos sistemas.

1.2.4. Sistemas de Tratamiento de la Información.

La ubicación geográfica de los parques eólicos así como su estructura, compuesta por varias decenas de máquinas (en algunos casos centenas) emplazadas en distintos lugares de orografía diversa, **limitan** la instalación **medios de comunicación** así como la capacidad de transmisión disponible para permitir el telecontrol centralizado de los aerogeneradores de una central y de distintas centrales de una región.

Otro factor limitante es el **elevado volumen de información** que manejan los centros de control locales (de un parque), información **que debe ser transmitida** en tiempo real desde cada aerogenerador a los sistemas de gestión y telecontrol remoto.

Debido a estos factores, para poder reducir el tráfico de la red y ajustarse a las limitaciones anteriormente mencionadas, es **necesario disponer de sistemas distribuidos de procesamiento de datos** (uno en cada aerogenerador). Estos **autómatas**, además de discriminar y priorizar la información a transmitir al centro de telecontrol remoto, **realizan un preprocesado de la señal** in situ, reduciendo de esta manera la carga de trabajo del servidor principal.

En la actualidad, como ya se mencionó en el punto 1.2.1, la mayoría de los aerogeneradores en explotación están dotados de autómatas, aunque su funcionalidad es muy limitada, limitándose al tratamiento de las señales eléctricas básicas necesarias para controlar la energía producida (intensidades, tensiones, potencias y energías). Los autómatas se integran en **sistemas de control centralizados basados en SCADAS propietarios en los que recae la mayor parte de la carga de procesos**. Estos sistemas **presentan serias limitaciones** a la hora de procesar volúmenes elevados de información:

- Limitación en el número de puertas del sistema, aumentando el coste de la licencia con el número de variables contempladas
- Restricciones en el tipo y tamaño de los datos a utilizar



- Retrasos en la transmisión y procesado de los datos
- Imposibilidad de realizar tratamientos matemáticos complejos en tiempo real, no permitiendo realizar estudios exhaustivos de la calidad de la señal (espectros, transitorios, huecos de tensión, etc.) requeridos para verificar el cumplimiento de las restricciones impuestas en el Real Decreto 436/2004 (ver Anexo A).
- Indisponibilidad de herramientas adecuadas para aplicar el mismo tratamiento a conjuntos de variables, obligando a tener que procesar cada variable de manera independiente
- Alto coste a la hora de ampliar o realizar modificaciones estructurales en el sistema para adaptarlo a nuevas necesidades.

La rápida evolución, elevada capacidad de procesamiento de señales en tiempo real y reducido coste de los **microprocesadores DSP** existentes en el mercado los convierte en candidatos idóneos para llevar a cabo las nuevas tareas de tratamiento de señales distribuido necesario para este proyecto.

Para solventar los problemas derivados del uso de SCADAS propietarios será necesario desarrollar una **solución** alternativa, siendo las **nuevas tecnologías de la información basadas en Internet y desarrolladas en fuentes abiertas** la principal opción.



2. Objetivos del proyecto y descripción funcional del sistema

En este apartado se concretan los objetivos específicos que debe cubrir el sistema resultante del proyecto EOCEN.

Posteriormente, se realiza una breve descripción cualitativa de los diversos elementos que compondrán el sistema diseñado para alcanzar estos hitos, así como las tecnologías empleadas, justificando la elección de las mismas. En sucesivos apartados se profundizará en el diseño e implementación de cada uno de los componentes.

2.1. Objetivos y alcance

Ante la situación descrita en la introducción de este documento, este proyecto plantea alcanzar los siguientes objetivos, a través de las soluciones tecnológicas descritas en puntos posteriores.

- Supervisión de la energía inyectada en la red.
- **Supervisión de la potencia reactiva** de cada aerogenerador y cálculo de las bonificaciones correspondientes según el nuevo real decreto (Anexo A)
- Supervisión del comportamiento de la máquina frente a huecos de tensión.
- **Supervisión de la calidad de la energía inyectada en la red.** Cumplimiento de las normativas de armónicos e ínter armónicos.
- **Supervisión de los eventos** que se puedan producir en cualquier máquina.
- Interfuncionamiento con los sistemas de control ya implantados en parque.

El alcance del proyecto abarca desde los estudios previos necesarios para determinar las necesidades reales de los usuarios finales hasta la obtención, validación, divulgación y explotación de una solución que satisfaga todas las carencias detectadas.



Como primera aproximación a la problemática planteada, se puede optar por tres soluciones de carácter bien diferenciado:

- Adaptar el sistema de control de los aerogeneradores instalados
- Dotar a las subestaciones y líneas de tensión de los elementos necesarios para supervisar y controlar dichos parámetros.
- Combinar las prestaciones de los aerogeneradores realizando la adaptación indicada en el primer punto, hasta el límite de lo técnica y económicamente viable y complementarlo con la instalación de equipos centralizados en SET.

Ante estas opciones, dadas las características de heterogeneidad de los aerogeneradores, tanto en su sistema de control como en su tipología interna, es tecnológicamente más viable y económicamente más rentable la tercera opción: **dotar a los aerogeneradores de los elementos adecuados para la evaluación y supervisión de las variables** necesarias, que permitirán en posteriores fases de este proyecto la compensación y control de los parámetros anteriormente indicados desde la subestación o desde el propio aerogenerador.

De esta manera, la **solución** propuesta es **independiente del tipo de máquina empleada**, fácilmente adaptable a cualquier tipología de aerogenerador o subestación, requiriendo por tanto un único desarrollo para satisfacer todas las necesidades del promotor.

No obstante, no sólo es necesario disponer de los elementos necesarios para supervisar, compensar o controlar dichos parámetros, también es vital el telecontrol de los mismos y su integración en sistemas de gestión integrales tanto locales (control de los aerogeneradores del parque desde la subestación) como centralizados (coordinan el telecontrol de conjuntos de parques eólicos, permitiendo compensar las desviaciones en la producción o en la generación de reactiva entre los mismos). Para ello, es necesario **dotar al sistema de los medios de comunicación** adecuados que permitan la **transmisión bidireccional, robusta y fiable de los datos entre el sistema de gestión del parque y los aerogeneradores**.

Para alcanzar estos objetivos, este proyecto pretende desarrollar un sistema que consta de tres apartados bien diferenciados:

- Desarrollo e integración de los **analizadores de red** encargados de realizar el preprocesado de la información tomando como señales de partida los datos de tensión e intensidad del aerogenerador.



- Desarrollo e implementación de los **protocolos de comunicación** necesarios para transmitir dichas medidas al Sistema de Gestión Integral.
- Desarrollo e integración de **los sistemas expertos de gestión** que permitan el análisis, estudio y tratamiento de dichos datos.

La planificación del proyecto prevé la ejecución en cuatro etapas bien diferenciadas, habiéndose finalizado en el momento de escribir el presente documento las dos primeras con resultados satisfactorios.

La primera fase consiste en una investigación sobre las tecnologías existentes relacionadas con la materia. En ella se definirán las especificaciones técnicas y funcionales de los diferentes dispositivos integrantes.

A continuación se realizará una segunda fase de desarrollo, cuya meta final es instalar un prototipo experimental del sistema en dos aerogeneradores del parque eólico de Tahivilla, explotado por Endesa, empresa que se encargará de verificar las cualidades del sistema así como la capacidad de éste para ínter operar con su sistema de control de parques eólicos en explotación (OPEN). Este primer objetivo requiere del diseño e implementación de todos los subsistemas recogidos en las especificaciones funcionales del el proyecto.

A pesar de tratarse de un prototipo experimental, debe ser diseñado e implementado de forma **que sea totalmente escalable**, ya que si los resultados obtenidos durante la fase de pruebas son satisfactorios, en una tercera etapa del proyecto el sistema se implantará en todos los parques eólicos gestionados y explotados por ECYR (Endesa Cogeneración y Renovables), sección de Endesa dedicada a las energías renovables, que actualmente es el primer productor nacional de energía eólica.

Del éxito de esta tercera fase depende la ejecución de una cuarta en la que el desarrollo se adaptaría para convertir al sistema en un producto genérico implantable por cualquiera de los diversos promotores que actualmente gestionan parques eólicos.



2.2. Sistemas de captación y procesado de los datos

La aplicación a desarrollar plantea la necesidad de tratar grandes cantidades de datos obtenidos de los diversos aerogeneradores que componen el parque, en **tiempo real**, por lo que se hace imprescindible el desarrollo de una plataforma hardware que soporte la captación, el tratamiento y el procesado de los mismos.

A la hora de diseñar un sistema de estas características se puede optar por dos alternativas: centralizar la capacidad de procesado y control o distribuir ésta entre los distintos dispositivos de la red.

Debido al análisis en tiempo real que se pretende realizar sobre los parámetros obtenidos de la red, las ventajas de la segunda opción son evidentes, ya que sería inviable la transmisión de las formas de ondas de todos y cada uno de los parámetros medidos desde los dispositivos captadores hasta el sistema central de control y el procesado de dichos datos por éste.

Por lo tanto, objeto del proyecto EOCEN en cuanto a la captación y procesado de datos es **desarrollar redes de control independientes para cada aerogenerador**, que a su vez se **interconecten con el sistema de gestión local** del parque intercambiando los datos obtenidos tras el preprocesado de las señales. Con esta estructura se podrá disminuir el tráfico de datos soportado por la red de comunicación principal y la carga de procesos del sistema central de control.

El avance experimentado en la electrónica digital permite hoy día la creación de dispositivos electrónicos de alta prestaciones diseñados específicamente para cada una de las tareas a desarrollar en esta aplicación. El proyecto alcanza tanto el diseño como el desarrollo de dos dispositivos que, instalados en cada aerogenerador, cubren las necesidades de captación y preprocesado de datos. El siguiente diagrama de la imagen 1 se recogen los distintos elementos necesarios para la captación y procesado de los datos:

- **Analizador de Red Principal (ARP)**

El ARP es un dispositivo electrónico con **alta capacidad de proceso** de datos cuya misión consiste en realizar todos los algoritmos necesarios para obtener, a partir de las medidas suministradas por los sensores instalados en el aerogenerador, todos y cada uno de los parámetros requeridos por el sistema de control central del parque.



Posee además una **memoria de almacenamiento** de tamaño medio que permite guardar los resultados del tratamiento de las distintas señales.

Como se observa en el esquema anterior, los sistemas de comunicación a utilizar para el intercambio de datos tanto con los otros módulos de la red local del aerogenerador como con el sistema de control central del parque, son inalámbricos y de altas prestaciones, por lo que se dotará al ARP de los componentes electrónicos auxiliares necesarios para hacer labores de interfaz (periféricos específicos que liberen al DSP de realizar la implementación de los diferentes protocolos), evitando así disminuciones de la capacidad de procesado del DSP.

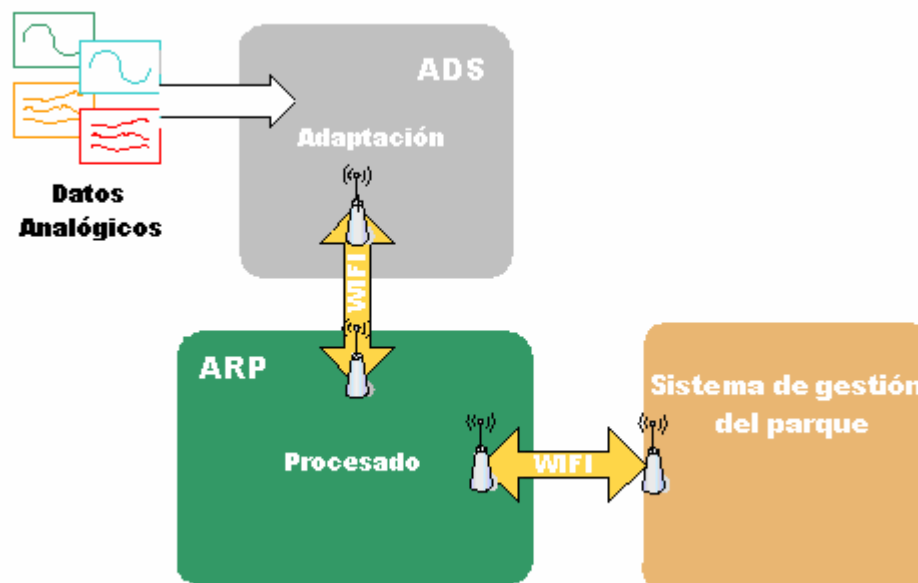


Figura 1: Diagrama de bloques de la red de control de un aerogenerador propuesta

- **Analizador de Datos Secundario (ADS)**

Es el dispositivo encargado de **la captación y adaptación de las medidas provenientes de los sensores**. No necesita gran capacidad de proceso de datos, por lo que basta con la inclusión de un microcontrolador de gama media como unidad central de proceso. Su conexión con el resto de elementos la realizará a través de un periférico específico.

Se desarrollará utilizando una **estructura modular y fácilmente escalable** que permita intercambiar las diferentes etapas de adaptación de medidas conveniente para cada uno de los distintos sensores existentes en las instalaciones actuales. Según las necesidades



específicas de cada modelo de aerogenerador, se recoge la posibilidad de instalar uno o varios ADS por máquina para poder gestionar todos los sensores.

2.3. Protocolos y medios de comunicaciones

Como ya se comentó en el punto 1.2.2, debido a las características propias de los parques eólicos, el empleo de medios de transmisión basados en cableado presenta múltiples problemas. Por ello, se opta por la utilización de **medios de transmisión** de señales **inalámbricos**, los cuales son especialmente aptos para sistemas aislados, en terrenos poco favorables y en los que las distancias son significativas (del orden de varios cientos de metros entre cada elemento).

Estos medios permitirán abaratar costes, garantizando a su vez una **alta flexibilidad**, ya que permiten una cierta independencia frente a la topografía del terreno, distancia física entre los elementos y accesibilidad del parque eólico (mayores costes de instalación de tendidos de cables).

Tras realizar un estudio sobre las distintas tecnologías inalámbricas disponibles en el mercado, teniendo en cuenta las necesidades de tráfico de datos del sistema y las distancias a cubrir para interconectar los distintos elementos, se plantea una primera solución basada en los siguientes protocolos:

- Estándar **WIFI 802.11 b/g** para la transmisión de datos entre los elementos de **la red del aerogenerador**. Trabaja en la banda de 2.4 GHz y ofrece una velocidad de transmisión de hasta 54 Mbps. Además, permite el control de regulación de tráfico en tiempo real y utiliza técnicas de modulación OFDM (Ortogonal Frequency División Multiplexing), que dota a los enlaces de gran robustez. Todas estas características lo convierten en el candidato idóneo para el intercambio de las señales sin procesar entre el ADS y el ARP.
- Estándar **WWISE (802.11n)** para el **enlace entre cada aerogenerador y el centro de control de parque**. Esta tecnología soporta canales de 200 MHz de ancho de banda, trabajando en las bandas de 2.4 y 5 GHz, con velocidades de transmisión de hasta 135 Mbps gracias al empleo de estructuras MIMO (Multiple Input – Multiple Output) Además posee unos potentes códigos correctores, dotando al sistema de una elevada robustez.

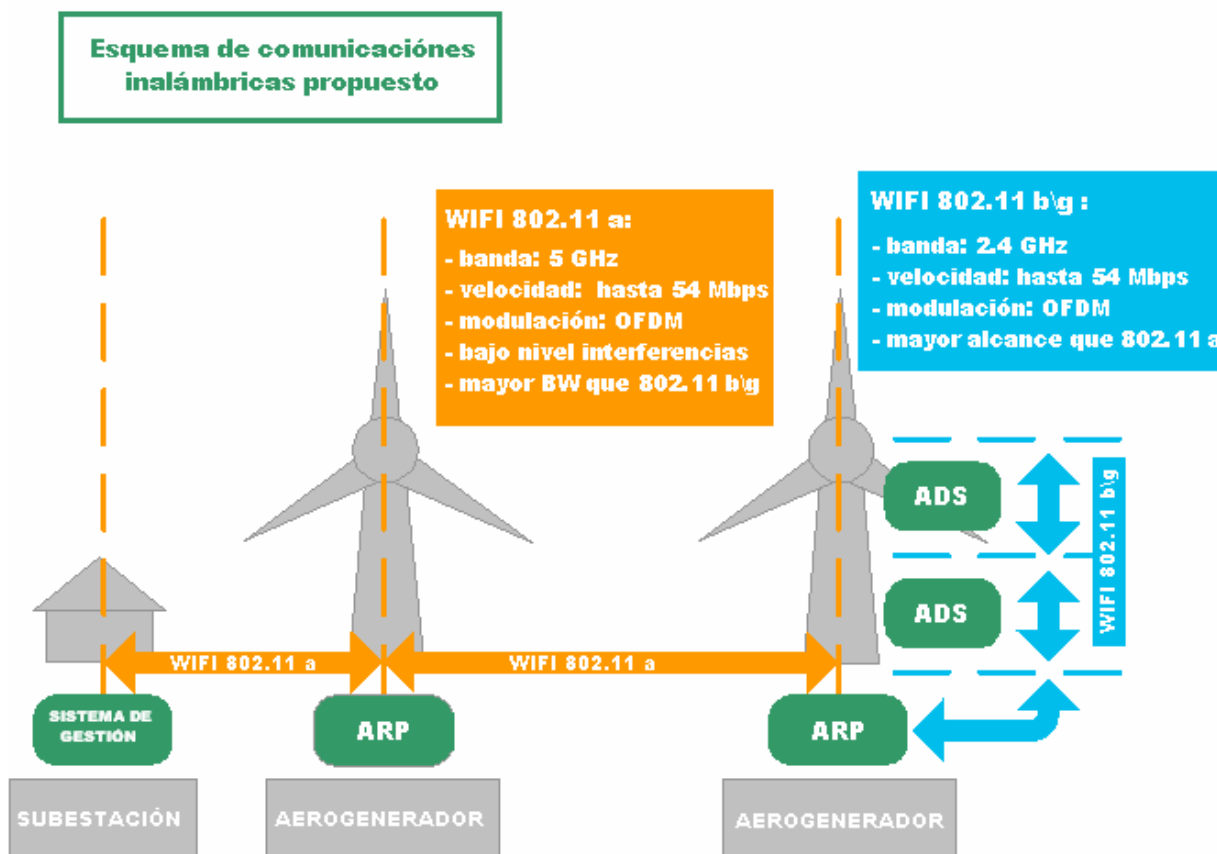


Figura 2: Esquema de protocolos de comunicación propuestos

Sin embargo, a la hora de realizar el diseño del sistema, la tecnología WWISE aún se encuentra en período de estudio y no se prevé que se apruebe hasta finales de 2006, por lo que se decide reemplazarla por una solución inalámbrica basada en el **estándar WIFI 802.11 a** con características similares a WWISE: trabaja en la banda de 5 GHz, que presenta menos interferencias que la de 2.4 GHz pero un peor comportamiento en cuanto a la cobertura, quedando restringida al alcance visual. Al igual que la 802.11 b/g utiliza modulación OFDM y alcanza velocidades de hasta 54Mbps, pero ofrece un ancho de banda efectivo mayor, lo que permite interconectar más equipos entre sí a alta velocidad.

Los protocolos elegidos garantizan la **robustez y fiabilidad** del sistema, el **ancho de banda adecuado** a las exigencias de tiempo real del mismo y la compatibilidad con otros sistemas expertos permitiendo además futuras ampliaciones del sistema, tanto a nivel de volumen de información transmitida como de funcionalidades del mismo.



2.4. Sistemas de gestión y control

El sistema de control distribuido diseñado en este proyecto necesita una **interfaz** que permita al operador de parque procesar en tiempo seudo – real (los retrasos pueden llegar a ser del orden de varios segundo dependiendo de las características del parque, de la prioridad establecida para cada tipo de dato y de las necesidades de procesado del mismo) la información proveniente de cada aerogenerador para poder realizar las tareas de control y tomar las medidas correctivas necesarias en caso de que el régimen de funcionamiento del parque eólico o de una máquina en particular no sea el adecuado.

Así mismo, debe mantener una **base de datos históricos** con los parámetros más importantes para permitir analizar el comportamiento del parque: valores acumulativos de potencias y energías activas y reactivas diarias, mensuales y anuales; fecha y causa de cada uno de los eventos que provoquen el disparo de una alarma, así como la evolución de las principales magnitudes eléctricas en el momento de producirse la misma y los instantes posteriores (cyclics), que permitan identificar la causa y posibles consecuencias del fallo.

La tercera misión del sistema de gestión consiste **en permitir el telecontrol de los sistemas de captación de datos de cada uno de los aerogeneradores** del parque. Mediante el envío de tramas de órdenes posibilita la sincronización de los ARP, la modificación de los parámetros que éstos deben enviar al centro local de control, el reseteo de los contadores acumulativos de potencia y energía o la programación de las magnitudes eléctricas y valores umbrales que al sobrepasarse generan las alarmas.

En último lugar, para verificar la conformidad con las restricciones impuestas por el RD 436/2004, se dota al sistema de la funcionalidad necesaria para generar **estudios de calidad**, constituido por los valores de los 50 primeros armónicos y 15 interarmónicos asociados a cada uno de ellos, de las tres tensiones trifásicas, para **comparar los datos obtenidos en tiempo real con los valores límites** recogidos en dicha norma, permitiendo identificar de manera instantánea cualquier desviación sobre la misma.

Para abordar todos estos objetivos se diseña un sistema **SCADA de altas prestaciones basado en tecnologías de fuentes abiertas**, lo que supone una gran innovación sobre las soluciones de control existentes en el mercado, basadas en SCADAS propietarios, aportando un **alto grado de valor añadido** al proyecto. La apuesta, siguiendo la tendencia actual de las diversas empresas de software, por las tecnologías de fuentes abiertas implica un **ahorro considerable** en el coste del sistema (**licencias necesarias**) y **supera las limitaciones de los SCADA propietarios**.



El desarrollo de un sistema de estas características supone un coste elevado en horas de trabajo ya que obligan a realizar un esfuerzo en investigación y desarrollo considerable.

Un último factor a tener en cuenta es la necesidad de que el **sistema resultante sea jerárquico y fácilmente ampliable**. Como ya se comentó anteriormente, en esta primera fase del proyecto, el sistema de gestión será local (un sistema por parque), si bien está previsto que en un futuro se añadan dos niveles de jerarquía más: el regional (un centro de control por región que gestione los diversos parques de la misma) y el central (un único centro de gestión desde el que se puedan controlar todos los parques eólicos de las diversas regiones).

Para permitir un acceso fácil a la interfaz de control, se opta por una **solución basada en Internet que permita el acceso al sistema desde cualquier ordenador conectado a la red**, teniendo en cuenta en el diseño los **requisitos de seguridad necesarios** para garantizar la confidencialidad de los datos y evitar intrusiones en el sistema.



3. Beneficios esperados

Dada las características del sistema propuesto expuestas en los puntos anteriores, éste reportará una serie de ventajas a los promotores de parques eólicos a través de la realización de las siguientes tareas:

- **Medida de la calidad del suministro eléctrico** del aerogenerador o parque. Se obtendrá el grado de armónicos inyectado en corriente y tensión para cualquier estado de la máquina o el parque, proporcionando una información muy valiosa en **tiempo real** de la calidad de la energía eléctrica generada por el aerogenerador. De esta forma se puede actuar a tiempo, anticipándose a los problemas que puede ocasionar en la red.
- **Cálculo de la energía activa y reactiva cedida por cada aerogenerador.** Este cálculo permite determinar y realizar las actuaciones pertinentes sobre el factor de potencia del parque o del aerogenerador, con el objeto de cumplir con la demanda de reactiva solicitada, o de asegurar la potencia inyectada dentro de los límites establecidos por el RD 436/2004, permitiendo a los promotores del parque **beneficiarse de las bonificaciones establecidas** por el gobierno para las empresas que cumplan con estas medidas de carácter optativo. El cálculo se realizará por diversos métodos matemáticos, dando como resultado tanto la reactiva total, como la del primer armónico. De esta manera se tiene un control exacto de la reactiva aunque la red se encuentre contaminada con armónicos.
- **Medida de las vibraciones en cualquier punto de la máquina** y en cualquier dirección, realizando la descomposición en frecuencia de las mismas. Sobre estos datos se puede llevar a cabo un estudio de fatiga del aerogenerador, lo cual nos puede permitir la toma de decisiones acerca de los límites de funcionamiento de la máquina, mantenimiento predictivo, o detección de causas de fallos.
- **Medida de eventos** con base de temporal común. Mediante la sincronización con una base temporal (señal de reloj establecida por el centro de control local del parque) es posible relacionar las medidas tomadas en distintos aerogeneradores ante un evento transitorio externo. Esta aplicación es de suma importancia para el **estudio de huecos de tensión.**

Además, debido a la gran flexibilidad del sistema, aportada por el uso de tecnologías inalámbricas, cabe la posibilidad de realizar sucesivas ampliaciones del sistema que permitan



añadir nuevas funcionalidades que sean demandadas por un promotor de parque eólico para mejorar la monitorización de su sistema.

El sistema es **totalmente modular, siendo 100 % adaptable a cualquier tipo de máquina** sólo con cambiar los módulos de adaptación para adecuarlo a cada máquina en concreto.

Estas funcionalidades permitirán a los promotores de parques eólicos optimizar la explotación de los parques ya instalados, que se traduce en un aumento de los beneficios, mejorando el rendimiento global del sistema, manteniendo el control de la calidad de la energía producida, y permitiendo una mayor capacidad de regulación sobre la totalidad del parque.

Así mismo, la versatilidad del sistema **facilita la adaptación a futuras exigencias del mercado eléctrico.**



4. Organización del trabajo

A la hora de abordar el diseño e implementación de una solución integral como la propuesta en este proyecto con un **alto grado de investigación e innovación**, es imprescindible contar con un equipo humano altamente especializado y con experiencia en campos de conocimiento muy amplios junto con las infraestructuras necesarias.

Para hacer frente a estas necesidades y poder llevar a cabo el proyecto, se crea un consorcio formado por la asociación de varias empresas y centros tecnológicos asentados en este sector y con una amplia experiencia en el campo de la investigación. Además, el consorcio cuenta con el apoyo en materia de investigación y formación de la Universidad de Sevilla a través de AICIA.

4.1. Empresas desarrolladoras

ISOTROL: empresa especializada en la consultoría, diseño e implantación de soluciones tecnológicas integrales de control con amplia experiencia en el campo energético. Ha sido la encargada de desarrollar, entre otros, los sistemas que actualmente controlan los parques eólicos de empresas como Endesa, Made y Unión Fenosa. Su papel en el proyecto consiste en:

- Coordinar y gestionar el proyecto en todas sus fases: estudios previos, desarrollo, integración y puesta en marcha
- Diseñar e implementar el sistema de gestión local (del parque)
- Diseñar e implementar el protocolo de comunicaciones con los distintos ARP, así como del driver que permita incorporar los datos procedentes de los ARP en el sistema de gestión
- Integrar del sistema EOCEN con los sistemas de control de parque existentes
- Integrar los distintos módulos de los que consta el sistema y realizar las pruebas de funcionamiento, tanto en la oficina como en campo



Las tareas relacionadas con el diseño e implementación de se llevan a cabo por terceras empresa de gran base tecnológica en España por su oferta en servicios de I+D+I en los sectores industrial y energético, especializadas en sistemas de potencia, control y adquisición de datos basados en la tecnología de DSP y FPGA. Su misión en el proyecto consiste en:

- Diseñar e implementar los analizadores de red (ARP y ADS) encargados de la captación de señales así como el software de preprocesado de datos realizado por los mismos.
- Diseñar e implementar el protocolo e interfaz de comunicaciones entre los ARP y los ADS
- Diseño de la interfaz de comunicaciones con el sistema de gestión del parque

4.2. Centro tecnológico

Con la finalidad de aportar una visión global del proyecto, orientar el desarrollo tecnológico y seguir la evolución y resultados del proyecto se solicitó el apoyo de un centro tecnológico con gran **experiencia en proyectos de I+D+I**. Su misión consistió en:

- Diseñar el sistema de I+D+I del consorcio en el marco del proyecto, teniendo en cuenta los requisitos de la familia de normas UNE 166.000
- Desarrollar el plan de explotación, incluyendo el plan de comercialización, financiación y gestión de la idea de negocio asociada al producto obtenido.
- Asesorar sobre las principales tendencias y posibilidades tecnológicas que existen actualmente para abarcar los problemas planteados en el proyecto
- Validar los resultados obtenidos
- Divulgar los avances tecnológicos alcanzados

4.3. Usuario final

Para poder evaluar las bondades del sistema final resultante del proyecto y depurar los posibles fallos, se requiere de la participación en el consorcio de algún promotor de parques



eólicos que aporte experiencia práctica en la problemática planteada así como las infraestructuras necesarias para poder realizar las pruebas.

En este sentido, el consorcio cuenta con el apoyo de **ECYR** (Endesa Cogeneración y Renovables), sección de Endesa encargada de la explotación de los parques eólicos que posee dicha empresa (actualmente gestión más del 25% de la energía eólica producida en España).

ECYR se encargará, además de facilitar las instalaciones que se usarán como banco de pruebas (**parque eólico de Tahivilla**) y ayudar a realizar las instalaciones y pruebas de campo, de asesorar en la elaboración de las especificaciones de detalle del sistema.

4.4. Proyecto final de carrera

El alcance del presente proyecto de final de carrera se limita al trabajo realizado por el alumno, que como miembro perteneciente al área de Energías Renovables de la empresa ISOTROL S.A. ha sido el encargado del **diseño**, asesorado por especialistas en las diversas tecnologías empleadas, **e implementación del sistema de gestión y control** del proyecto EOCEN, así como de la **integración de todos los módulos que componen el sistema** y la realización de las pruebas en fábrica del prototipo desarrollado.

La documentación referente a los diversos diseños e implementaciones del sistema de gestión y control queda recogida en la memoria de cálculos de este proyecto final de carrera.