

# PROYECTO FIN DE CARRERA

## ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LA CONEXIÓN DE GENERACIÓN EÓLICA A LA RED DE TRANSPORTE

PROYECTO FIN DE GRADO INGENIERÍA ELÉCTRICA

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA / EINA



AUTOR: ISRAEL BAIGORRI GARCIA

## **RESUMEN**

El principal objetivo de este trabajo fin de grado es el análisis del impacto de la generación eólica en una red mediante simulación tanto estática como dinámica del comportamiento del sistema.

En primer lugar se realiza un análisis del estado del arte, tanto en lo que respecta a la generación eólica como a los estudios de estabilidad en los sistemas de potencia. Para el análisis de la integración de generación renovable, es especialmente importante comprobar el cumplimiento de los requisitos de conexión. Por ello, en este proyecto se ha realizado una revisión de dichos requisitos correspondientes a la generación eólica conectada en España y en Dinamarca.

En este TFG, el estudio de la integración de renovables se realiza mediante simulación dinámica mediante el programa DigSILENT PowerFactory, que es un software comercial para el análisis de sistemas eléctricos de potencia. Por tanto, uno de los primeros pasos para la realización de los estudios necesarios ha sido la familiarización con el uso del software para el modelado y la simulación de la red bajo estudio.

El modelado del sistema eléctrico de potencia que va a ser analizado incluye nudos, líneas, transformadores, cargas, plantas de generación convencional, parques eólicos y dispositivos de compensación de reactiva. Además, el modelo incluye las características dinámicas de los tres últimos.

Se realizarán las simulaciones necesarias para la verificación del cumplimiento de los requisitos de conexión, incluyendo el estudio del flujo de potencia, contingencias y análisis dinámico.

# INDICE:

## Contenido

<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	3
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	3
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	5
1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO Y OBJETIVOS.....	5
2. PROBLEMÁTICA.....	6
2.1. INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA. ....	6
<b>ENERGÍA EÓLICA</b> .....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. AEROGENERADORES .....	8
2.1. DESCRIPCIÓN DE UN AEROGENERADOR.....	8
2.2. POTENCIA Y ENERGIA EXTRAIDA DE UN AEROGENERADOR.....	10
2.3. CURVA DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR.....	10
2.4. CONTROL DE POTENCIA Y VELOCIDAD EN AEROGENERADORES.....	11
<b>REQUISITOS DE CONEXIÓN:</b> .....	12
1. INTRODUCCIÓN A LOS REQUISITOS. ....	12
2. NORMATIVA ESPAÑOLA.....	12
2.1. CONSIDERACIONES GENERALES.....	13
2.2. REQUISITOS INSTALACIONES CONECTADAS A LA RED ESPAÑOLA.....	13
3. NORMATIVA DANESA.....	16
3.1. REQUISITOS INSTALACIONES CONECTADAS A LA RED DANESA.....	16
<b>MODELADO Y SIMULACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES</b> .....	20
<b>DESCRIPCIÓN DE LA RED:</b> .....	21
1. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA RED.....	21
2. RESULTADOS .....	21

## INDICE DE FIGURAS

IMAGEN 1: PARTES AEROGENERADOR .....	8
IMAGEN 2: CURVA DE POTENCIA.....	11
IMAGEN 3: HUECOS TENSIÓN ESPAÑA.....	14
IMAGEN 4: HUECOS DINAMARCA.....	17

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Armónicos España .....	15
Tabla 2: Distorsión armónica España .....	16
Tabla 3: Flicker Dinamarca plantas entre 11 KW y 1,5 MW.....	18
Tabla 4: Flicker Dinamarca plantas superiores a 1,5 MW.....	18
Tabla 5: Armónicos Dinamarca plantas entre 11 kW y 25 kW.....	18
Tabla 6: Armónicos Dinamarca plantas eólicas entre 25 kW y 1,5 MW .....	19
Tabla 7: Armónicos Dinamarca plantas eólicas superiores 1,5 MW.....	19

# **MEMORIA**

## **ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LA CONEXIÓN DE GENERACIÓN EÓLICA A LA RED DE TRANSPORTE**

## INTRODUCCIÓN

### 1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO Y OBJETIVOS

La integración de la energía eólica en el sistema eléctrico precisa el análisis del posible impacto que este tipo de generación puede tener en el sistema. Este posible impacto aumenta conforme lo hace el índice de penetración eólico, por lo que en caso de que los operadores del sistema de los diferentes países han desarrollado requisitos de conexión que permitan que la integración de estas tecnologías se realice sin afectar a la calidad, estabilidad y seguridad del sistema. España es un país pionero en cuanto a generación eólica. Es el segundo país en cuanto a penetración eólica en el mercado tras Dinamarca, y el tercero en cuanto a potencia instalada.

Los estudios de impacto de generación eólica en la red se realizan mediante de herramientas de simulación, que permiten predecir el comportamiento del parque tanto en condiciones normales de operación como ante los diferentes eventos que puedan producirse en el sistema.

El objetivo del proyecto es introducir y ejemplificar un estudio de conexión a la red de un parque eólico mediante el software de simulación de sistemas eléctricos de potencia DlgSILENT PowerFactory. La red analizada es una red ejemplo desarrollada por la Universidad de Dinamarca y descrita en el artículo "A reduced wind power grid model for Research and education" de V. Akhmatov. Esta red se toma como base para el estudio de impacto de un parque eólico offshore.

El análisis realizado en esta memoria cuenta con un estudio en estado estacionario y un estudio dinámico. En el estudio estacionario se han realizado flujos de cargas, que permiten conocer el estado de los diferentes elementos de la red en condiciones normales de operación. Mediante el flujo de cargas se pueden detectar problemas de sobrecargas en los elementos o de tensiones fuera de rango en dichas condiciones. El estudio de contingencias permite visualizar las condiciones del sistema en caso de que se produzca la desconexión de uno de los elementos de la red, bien sea por la ocurrencia de un evento o debido a posibles labores de mantenimiento. En los estudios dinámicos se puede observar la evolución respecto al tiempo de las diferentes variables del sistema tras la ocurrencia de un evento, como puede ser un hueco de tensión o la desconexión de generación y/o cargas. En este TFG se empleará el módulo de simulación RMS de DlgSILENT.

La memoria de este TFG se estructura de la siguiente forma. A continuación se describe brevemente la problemática asociada a la integración de generación eólica en la red. Posteriormente se muestran algunos de los fundamentos de la energía eólica y los requisitos actuales para la conexión de la generación eólica a la red. Finalmente se detallan la red simulada y los resultados obtenidos en su análisis.

## 2. PROBLEMÁTICA

### 2.1. INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA.

En la mayor parte del mundo la energía eólica representa una pequeña fracción del suministro total eléctrico, existen excepciones en las que este tipo de energía representa una gran parte del suministro, como es el caso de Dinamarca, Alemania o España.

En el futuro se estima que la mayoría de países opte por un mayor uso de este tipo de energía renovable, no solo por la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> sino por realizar un aprovechamiento económico de áreas de regímenes de viento compatibles con la instalación de fuentes renovables eólicas.

La integración de altos niveles de energía eólica a redes o sistemas de interconexión existentes presenta el problema de que se necesita realizar un rediseño paso a paso del sistema de potencia existente.

Desde el punto de vista técnico, el objetivo de los sistemas de energía es suministrar electricidad a los clientes cuando ellos la demanden.

La principal dificultad con la que se topa la integración de un sistema de energía eólica es la discontinua o fluctuante fuerza del viento.

El reto fundamental en cuanto a la integración de los sistemas eólicos a la red consiste en los dos siguientes aspectos:

- Mantener un nivel de tensión adecuado para los consumidores
- Mantener las condiciones de calidad, estabilidad y seguridad del sistema

Algunos de los factores clave para la integración de la energía eólica en la red son:

- **Fluctuación del viento:**

Las masas de aire se mueven debido a diferencias térmicas, por tanto podemos afirmar que la velocidad del viento varía en función del tiempo y de la temperatura

Uno de los principales problemas de la energía eólica es la variación aleatoria del viento, que puede provocar variaciones en la potencia activa generada así como en la reactiva generada o consumida por los aerogeneradores; estos cambios de potencia pueden dar lugar a variaciones en la tensión de los nodos y la frecuencia del sistema.

- **Reserva:**

Otro problema con el que se enfrenta la energía eólica es el tema de la reserva y despacho. Definimos reserva como la planta generadora que puede comenzar de manera casi instantánea a generar debido a un incremento en la demanda o por otras causas como el fallo en un generador.

Los aerogeneradores no pueden actuar como plantas de reserva debido a la aleatoriedad del viento.

- **Velocidad de desconexión:**

Ante vientos de alta velocidad, las turbinas eólicas están diseñadas de tal manera que se desconectan ya que si se mantiene su funcionamiento la fuerza del viento podría provocar fallos mecánicos.

La energía a estas velocidades no es lo suficientemente importante como para justificar el costo de inversión en materiales estructurales que permitan el funcionamiento bajo estas condiciones.

Por este motivo los sistemas se diseñan de tal forma que se pueda responder ante grandes pérdidas de generación. Si bien es cierto ante vientos de alta velocidad no todas las turbinas de una planta eólica se desconectan simultáneamente, ya que hay turbinas que están expuestas a diferentes rachas de viento debido a la irregularidad del terreno.

La desconexión de una planta eólica entera por tanto es un hecho que no ocurre de manera frecuente, por ello debido a la dispersión geográfica en el territorio, una pérdida general de generación eólica es un evento que no tiene muchas probabilidades de ocurrir.

- **Redes de transmisión:**

Los lugares en los que las características de viento son adecuadas para la instalación de aerogeneradores suelen ser lugares remotos, en estos lugares de interés la actividad humana suele ser casi nula por lo cual normalmente nos encontramos con que las líneas de transmisión suelen ser de poca potencia.

La infraestructura actual es normalmente no apta para llevar la potencia del viento desde estos lugares deshabitados hasta los lugares de demanda.

Por este motivo en la mayoría de las ocasiones será necesario construir una nueva infraestructura de transmisión, lo cual no es una tarea fácil ya que detrás de la construcción de cualquier red de transmisión están asociados temas legales y medioambientales los cuales presentan unos requisitos que se tienen que cumplir.

Los tiempos de obra de las nuevas redes asociados a la inversión necesaria para la ejecución de dicho proyecto hace que en muchas ocasiones la integración de la energía eólica resulte inviable al no poder superar estas barreras.

- **Potencia Reactiva:**

Como comentaré más adelante en el apartado de energía eólica en la descripción de aerogeneradores, la mayoría de estos necesitan energía reactiva para poder generar. Si el sistema de potencia no puede suministrar esta reactiva se puede producir una inestabilidad de tensión.

Debido a esto un control de reactivos será necesario para mantener la estabilidad de la tensión.

- **Control y monitorización:**

Todas las plantas eólicas deben de ser controladas y monitorizadas en todo momento para regular la generación de energía. Para llevar esto a cabo se necesita disponer de importantes redes de comunicación, lo cual requiere una gran inversión.

Esta inversión puede resultar un obstáculo a la hora de la integración de a la red.



# ENERGÍA EÓLICA

## 1. INTRODUCCIÓN.

La energía eólica genera energía eléctrica a través de la fuerza del viento, esto se traduce en el uso de la fuerza del viento para generar energía cinética.

Este tipo de energía no es algo emergente, ya se usaba desde la antigüedad en pequeños molinos, sin embargo se ha podido ver en este tipo de energía una fuente de poder renovable que es respetuosa con el medio ambiente.

En la actualidad la energía eólica es una de las energías renovables más desarrolladas.

La fuerza del viento mueve las palas y este movimiento, mediante un sistema mecánico, hace girar el rotor de un generador, que produce la energía eléctrica.

La energía eólica está en continuo auge, pese a que en España han disminuido las subvenciones a la energía renovable, ésta ha crecido en torno a un 10%, situando a España entre los países pioneros en este tipo de energía.

Otro país en la que la demanda eólica está fuertemente presente es en Dinamarca, país con el que este trabajo guarda estrecha relación ya que el modelo de red escogido para el estudio de integración se basa en una red de diseño Danés.

## 2. AEROGENERADORES

### 2.1. DESCRIPCIÓN DE UN AEROGENERADOR

Un aerogenerador lo podemos definir como una máquina que se encarga de captar la energía de las corrientes de viento y la convierte en energía eléctrica, para que este fenómeno sea posible la energía del viento primero se transforma en energía mecánica y de ésta pasa a energía eléctrica.

Un aerogenerador consta de las siguientes partes:

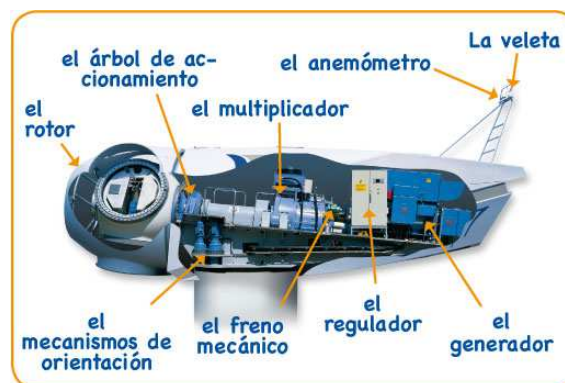


IMAGEN 1: PARTES AEROGENERADOR

- **Torre:** La torre la podemos definir como el elemento de sustentación, ésta además de soportar la góndola, permite que las palas se encuentren a una determinada altura respecto del suelo. Por tanto la torre es el elemento estructural normalmente de acero que soporta todo el peso del aerogenerador, es hueca para permitir el acceso a la góndola por parte de los operarios.
- **Góndola:** La góndola la podemos describir como la sala de máquinas del aerogenerador. En el interior de la góndola se encuentran diversos mecanismos como son: caja de cambios, el eje principal, el regulador o sistema de control, el generador, los frenos y los mecanismos de giros.
  - **Caja de cambios:** La función que realiza la caja de cambios es la de ajustar la velocidad de giro del eje del aerogenerador a la que el generador necesita. También se la conoce como caja multiplicadora, transforma la baja velocidad del eje en alta velocidad de rotación. Los tipos de cajas de cambio utilizadas son de ejes paralelos de 2 o 3 etapas
  - **Generador:** El generador es uno de los componentes principales, gracias a la alta velocidad de rotación obtenida de la caja multiplicadora se genera la electricidad. Los tipos de generadores se verán más en detalle en el ANEXO IV-TIPOS DE GENERADORES.
  - **Sistema de control o regulador:** El sistema de control está formado por un conjunto de elementos que su función es la de comprobar el correcto funcionamiento del aerogenerador. El sistema de control está formado por anemómetros, veletas, unidades de refrigeración, sistemas de control de potencia.
  - **Frenos:** El sistema de frenado permite parar el molino en caso de emergencias o de mantenimiento.
  - **Mecanismos de giro:** En la actualidad la mayoría de los aerogeneradores utilizan un sistema de orientación asistida, ésta orientación es llevada a cabo por un servomotor. Este tipo de diseño es llevado a cabo fundamentalmente en pequeños aerogeneradores.
- **Rotor:** El rotor es el elemento que se encuentra unido al eje principal para la transmisión de giro, lo podemos dividir en 3 partes:
  - **Nariz:** Es un elemento de tipo aerodinámico que se sitúa en frente de la dirección del viento, sobresale en la zona de unión entre las palas y el buje. Su misión es la de evitar turbulencias ya que re direcciona el viento de la parte frontal a los respiraderos de la góndola
  - **Buje:** El buje lo podemos definir como la pieza de unión entre las palas y el eje principal, esta unión debe ser de forma rígida si el aerogenerador posee 3 palas, si el aerogenerador es bipala la unión debe permitir cierta oscilación.
  - **Palas:** Las palas reciben la fuerza del viento, por ello suelen ser fabricadas con materiales de gran resistencia ante fatiga ya que deben soportar una vida media de 25 años. Los aerogeneradores más comunes son los tripala, aunque existen también monopala y bipala.

## 2.2. POTENCIA Y ENERGIA EXTRAIDA DE UN AEROGENERADOR.

Como paso previo al conocimiento de la potencia y energía que puede extraerse de un aerogenerador, es necesario conocer la energía del viento. Esta energía se presenta en forma de energía cinética y se describe como el siguiente producto:

$$E_{viento} = \frac{1}{2}mv^2$$

Introduciendo el concepto de flujo másico, el flujo de aire que atraviesa una superficie por unidad de tiempo, la ecuación queda:

$$P_{viento} = \frac{1}{2}\rho Sv^3$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire, y en general se toma como 1,225 kg/m<sup>3</sup>.

La potencia que el aerogenerador es capaz de extraer del viento viene definida mediante el coeficiente de potencia, que se define como la relación que existe entre la potencia generada y la potencia total del viento:

$$Cp = \frac{P_{generada}}{P_{viento}} = \frac{P_{generada}}{\frac{1}{2}\rho Sv_{viento}^3}$$

## 2.3. CURVA DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR.

Una curva de potencia representa la relación de la potencia eléctrica en bornes del aerogenerador respecto a la velocidad del viento que incide sobre el rotor.

La curva de potencia es muy importante ya que conociendo la relación que nos ofrece podemos hacer estudios de comparación entre diferentes aerogeneradores en base a la realización de un proyecto.

Es tarea del fabricante proporcionar la curva de potencia junto con las características técnicas de la turbina eólica.

A modo de ejemplo, la siguiente imagen muestra una curva de potencia típica. En ella pueden observarse tres velocidades características que son:

- Velocidad de arranque: es la velocidad del viento por encima de la cual comienza a generarse la energía. Suele ser de unos 5 m/s
- Velocidad nominal: Velocidad del viento para la que la máquina alcanza la potencia nominal
- Velocidad de corte: Velocidad de viento a la que se produce la desconexión del aerogenerador para evitar posibles daños.

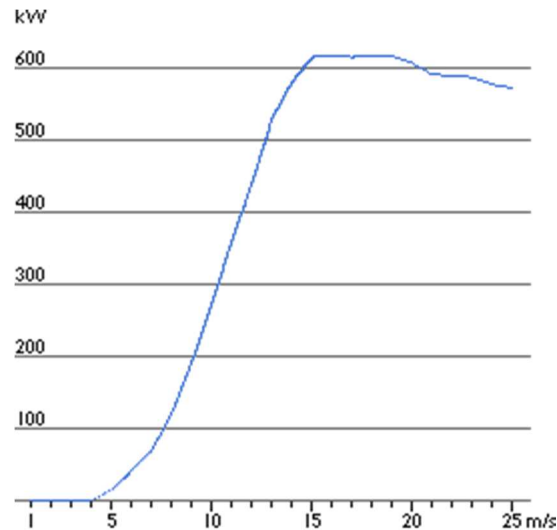


IMAGEN 2: CURVA DE POTENCIA

#### 2.4. CONTROL DE POTENCIA Y VELOCIDAD EN AEROGENERADORES.

El objetivo del control de potencia en aerogeneradores depende del rango de velocidad de viento en el que el aerogenerador está trabajando.

Cuando las velocidades de viento son inferiores a la nominal, el objetivo es maximizar el coeficiente de potencia con el fin de captar la máxima energía posible. En caso de velocidad de viento superior a la nominal, la potencia total del viento es superior a la nominal del generador y por lo tanto la captación de la energía debe ser limitada para que ésta no sea superada y pueda dañarse el aerogenerador.

En cuanto al control de velocidad, existen dos tipos de aerogeneradores: de velocidad fija y de velocidad variable. En los aerogeneradores de velocidad fija, la velocidad de giro del rotor es constante y depende de la frecuencia de la red, la multiplicadora y el diseño del generador, independientemente de la velocidad del viento. La variación de la velocidad es menor del 2%.

Los aerogeneradores de velocidad variable permiten, la velocidad de giro del generador se adapta para mejorar la eficiencia en un mayor rango de velocidades de viento, de esta manera se aumenta la energía anual generada.

Los tipos de control de velocidad van a depender de si se trata de un aerogenerador de velocidad fija o constante, existen tres alternativas de control:

- Control de potencia por variación de Ángulo de Paso o "Pitch controlled"
- Control activo de potencia por pérdida aerodinámica "Active Stall controlled"
- Control de potencia por pérdida aerodinámica "Stall controlled"

Las características de estos tipos de control de potencia se describen con mayor detalle en el ANEXO III- SISTEMAS DE CONTROL

## REQUISITOS DE CONEXIÓN:

### 1. INTRODUCCIÓN A LOS REQUISITOS.

Los requisitos de conexión hacen referencia a la serie de normas que se han de cumplir en el punto de conexión a la red.

Tal y como se ha comentado en la introducción de la presente memoria, la conexión de generación eólica puede afectar al correcto funcionamiento del sistema eléctrico por lo que es necesario el desarrollo de unos requisitos que lo impidan. Estos requisitos han sido desarrollados por los operadores del sistema de los diferentes países adaptándose a las características específicas de sus redes y a los niveles de penetración máximos establecidos.

Estos requisitos de conexión describen el comportamiento que este tipo de generación debe tener, tanto en condiciones normales de operación del sistema como ante diferentes eventos.

Actualmente en España, los requisitos que los parques eólicos deben cumplir vienen detallados en el Procedimiento de Operación 12.3 “Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas”, que regula el comportamiento de los parques eólicos ante huecos de tensión. En este P.O. se establece que los parques eólicos deben permanecer conectados en caso de producirse un hueco de tensión en su punto de conexión, según las características descritas en el documento. El objetivo de que la generación eólica permanezca conectada durante y tras una falta en el sistema que genere el hueco de tensión es que la desconexión momentánea que se produciría en caso contrario afectara a la estabilidad del sistema.

En esta memoria se describe la normativa española y danesa respecto a la conexión de parques eólicos.

### 2. NORMATIVA ESPAÑOLA.

Como ya se ha comentado, la normativa vigente en cuanto a requisitos de conexión es la relativa al comportamiento ante huecos de tensión en el P.O.12.3. En la actualidad existe un borrador del P.O. 12.2 “Instalaciones conectadas a la red de transporte y equipo generador: Requisitos mínimos de diseño, equipamiento, funcionamiento, puesta en servicio y seguridad” de Septiembre del 2010 en el que se regularía la conexión de cualquier tipo de generación a la red de transporte, y también de la generación eólica.

Como bien se indica en las líneas anteriores esta normativa se encuentra desde el año 2010 en estado de borrador a la espera de ser aprobada. Aunque los límites establecidos pueden variar hasta que se produzca su aprobación, se espera que este borrador se mantenga en sus líneas generales, por lo que los requisitos descritos en esta memoria son los correspondientes a dicho borrador.

## 2.1. CONSIDERACIONES GENERALES.

Red Eléctrica, como único gestor de la red de transporte es el responsable de los procedimientos de acceso y conexión para los usuarios que tienen intención de establecer una nueva instalación a la red de transporte.

Toda la instalación que solicite una conexión a la red de transporte debe cumplir con una serie de requisitos que garanticen que su funcionamiento no va a interferir en la correcta operación del sistema además de que tendrá un comportamiento de acuerdo a lo previsto tanto en situaciones normales como excepcionales.

## 2.2. REQUISITOS INSTALACIONES CONECTADAS A LA RED ESPAÑOLA.

### 2.2.1 CRITERIOS DE CALIDAD.

Los criterios de calidad hacen referencia a las características de la onda de tensión en su conjunto. Este grupo de características quedan recogidas a continuación.

#### 2.2.1.1 HUECOS DE TENSIÓN:

Se define hueco de tensión como la disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor el cual se sitúa entre el 90% y el 1% de la tensión nominal de la red, después de esta disminución seguidamente se produce el restablecimiento de la tensión después de un periodo breve de tiempo.

El convenio estipula un periodo de 10 ms a 1 minuto como la duración de un hueco de tensión. El hueco de tensión tiene una característica muy importante llamada profundidad, ésta se define como diferencia que existe entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión nominal.

En lo que respecta a este trabajo el cual data de la integración a la red de distribución de un parque eólico a la red, al tratarse de una instalación de energía eólica debe cumplir los requisitos frente a huecos de tensión que se detallan en la Resolución del 4 de Octubre de 2006 de la secretaría general de Energía, por la que se aprueba el procedimiento de operación 12. 3 donde se establecen los requisitos de respuesta frente a huecos de tensión en instalaciones eólicas.

Este criterio se aplicará a todas aquellas conexiones a la red de nuevos parques eólicos que se conecten al sistema eléctrico cuya fecha de inscripción definitiva en el registro administrativo sea posterior al 1 Enero 2007.

El titular de la instalación será quien adopte las medidas de diseño necesarias para que todas las instalaciones de generación que estén bajo su titularidad se mantengan acopladas al sistema eléctrico sin sufrir desconexión por causa de los huecos de tensión directamente asociados a la existencia de cortocircuitos correctamente despejados que se puedan presentar en el sistema eléctrico.

La propia instalación será la que soporte sin desconexión los huecos de tensión, en el punto de conexión a la red, que sean producto de cortocircuitos de ámbito trifásico, bifásico a tierra o monofásico.

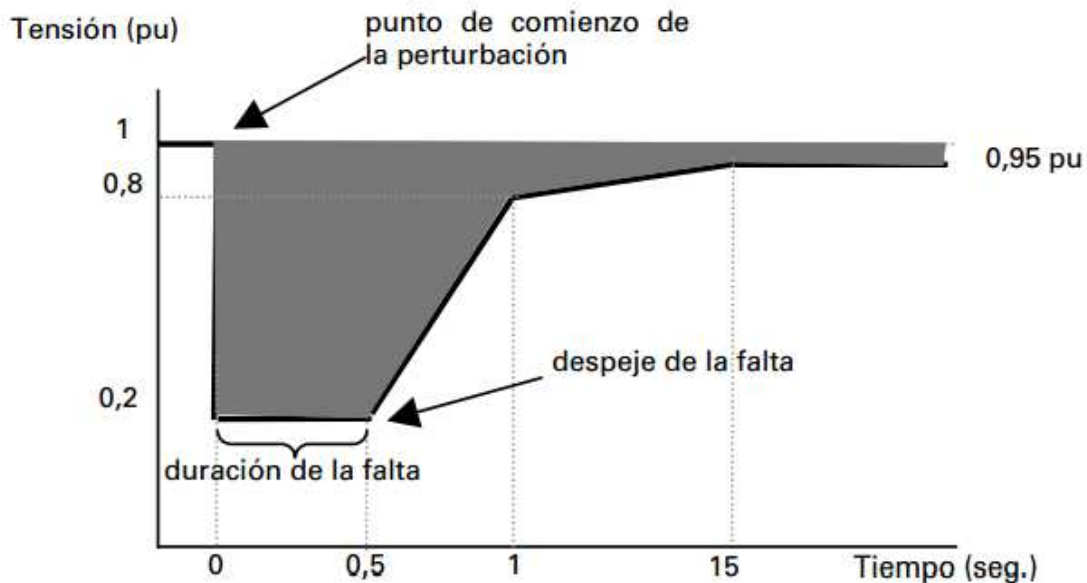


IMAGEN 3: HUECOS TENSIÓN ESPAÑA

Por tanto no se debe producir la desconexión de las instalaciones para huecos de tensión en el punto de conexión a red que estén incluidos en el área sombreada.

Un caso especial es el de cortocircuito bifásico a tierra, en este caso el área sombreada del hueco de tensión en la que no se debe producir la desconexión será la misma de la imagen anterior pero teniendo en cuenta que el límite inferior de tensión queda fijado en 0.6 pu en lugar de 0.2 p.u.

En faltas equilibradas trifásicas tanto durante el periodo de mantenimiento de la falta como durante el periodo de recuperación no se admite en el punto de conexión a la red el consumo de potencia reactiva por parte de la instalación durante un periodo elevado de tiempo, estableciéndose un límite de consumos puntuales de energía reactiva de 150 ms posterior al inicio de la falta y 150 ms justo en los instantes posteriores al despeje de la misma siempre y cuando se cumpla que:

- Durante un periodo de 150 ms desde la falta, el consumo neto de reactiva de la instalación en cada ciclo de 20 ms no deberá ser superior al 60% de la nominal registrada.
- Durante los 150 ms desde el despeje de la falta el consumo neto de reactiva no debe ser superior al 60 % de la nominal y el consumo de intensidad reactiva de la instalación en cada ciclo de 20 ms no debe ser superior a 1,5 veces la intensidad correspondiente a la potencia nominal registrada.

En el caso de consumo de potencia activa se establecen los mismos límites, con la salvedad de que se admiten consumos de potencia activa durante el resto de la falta siempre que no sea superiores al 10% de la potencia nominal registrada.

Para el caso de faltas desequilibradas, se admiten consumos de potencia reactiva en los 150 ms después de la falta y los 150 ms posteriores al despeje de la misma. Se admite consumos transitorios durante el resto de la falta siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- El consumo neto de reactiva en la instalación deberá ser superior a la energía reactiva equivalente al 40% de la potencia nominal registrada de la instalación durante un periodo de 100 ms.
- El consumo neto de reactiva de la instalación en cada ciclo de 20 ms no deberá ser superior al 40 % de su potencia nominal registrada.

Análogamente al caso de la reactiva, se establecen los mismos límites en el caso del consumo de potencia activa, con la salvedad de que durante el resto de periodo de mantenimiento de la falta para que se admitan consumos se debe de cumplir que el consumo neto de energía activa no deberá ser superior al de energía activa equivalente al 45% de la potencia nominal registrada de la instalación durante 100 ms y que el consumo de potencia activa para cada ciclo de 20 ms no debe ser superior al 30% de su potencia nominal registrada.

#### 2.2.1.2 PARPADEO (FLICKER)

Las variaciones en la tensión provocan intermitencia en la luminancia del alumbrado, esto provoca un fenómeno físico llamado parpadeo.

Los límites de emisión de parpadeo en cada nudo de la red de transporte son los siguientes:

$$Pst \leq 0.8$$

$$Pst \leq 0.6$$

#### 2.2.1.3 ARMÓNICOS

La tensión armónica se define como la tensión sinusoidal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación.

Con el objeto de no sobrepasar los límites de planificación para los que se ideó la red de transporte se establecen los siguientes límites de armónicos:

Orden Armónico (n)	Tasa Armónico (%)	Orden Armónico (n)	Tasa Armónico (%)
3	1.80	2	1.00
5	1.80	4	0.90
7	1.80	6	0.40
9	0.90	8	0.20
11	1.30	10	0.20
13	1.30	12	0.20
15	0.30	14	0.20
17	0.90	16	0.20

Tabla 1: Armónicos España



19	0.90	18	0.20
21	0.20	20	0.20
23	0.60	22	0.20
25	0.60	>22	0.20
>25	0.20		
<b>TASA TOTAL DE DISTORSIÓN ARMÓNICA (THD) 3.00%</b>			

Tabla 2: Distorsión armónica España

#### 2.2.1.4 DESEQUILIBRIOS DE TENSIÓN.

El desequilibrio de tensión corresponde a un estado en el cual los valores eficaces de las tensiones de las fases o sus desfases entre tensiones de fase consecutivas en un sistema trifásico no son iguales.

Los emisores de este tipo de perturbación no deberán de sobrepasar los siguientes valores:

- $\mu \leq 0.7\%$  para valoraciones en el rango de minutos (límite de corta duración)
- $\mu \leq 1\%$  para valoraciones en el rango de segundos (límite de muy corta duración)

### 3. NORMATIVA DANESA.

La regulación que a continuación va a ser expuesta debe ser cumplida por las plantas eólicas con potencias superiores a 11kW para conectarse a la red Danesa, la cual se recoge en los documentos Technical regulation TF 5.8.1 (Måleforskrift til systemdriftsformål) y Technical regulation TF 3.2.5.

#### 3.1. REQUISITOS INSTALACIONES CONECTADAS A LA RED DANESA.

##### 3.1.1 CALIDAD

Los criterios de calidad son los que se establecen en las siguientes normas Danesas.

- IEC TR 61000-3-6 EMC: límites de emisión de armónicos
- IEC TR 61000-3-7: límites de las fluctuaciones de tensión y parpadeo.
- IEC 61400-21: medición y evaluación de la calidad de la energía características de conexión a red de aerogeneradores.

### 3.1.1.1 TOLERANCIA FRENTE A HUECOS DE TENSIÓN.

En el punto de conexión una planta de generación eólica debe ser capaz de poder hacer frente a caídas de tensión del 20% del tensión en el punto de conexión por un periodo de 0.5 segundos sin desconectarse como se muestra en la siguiente figura.

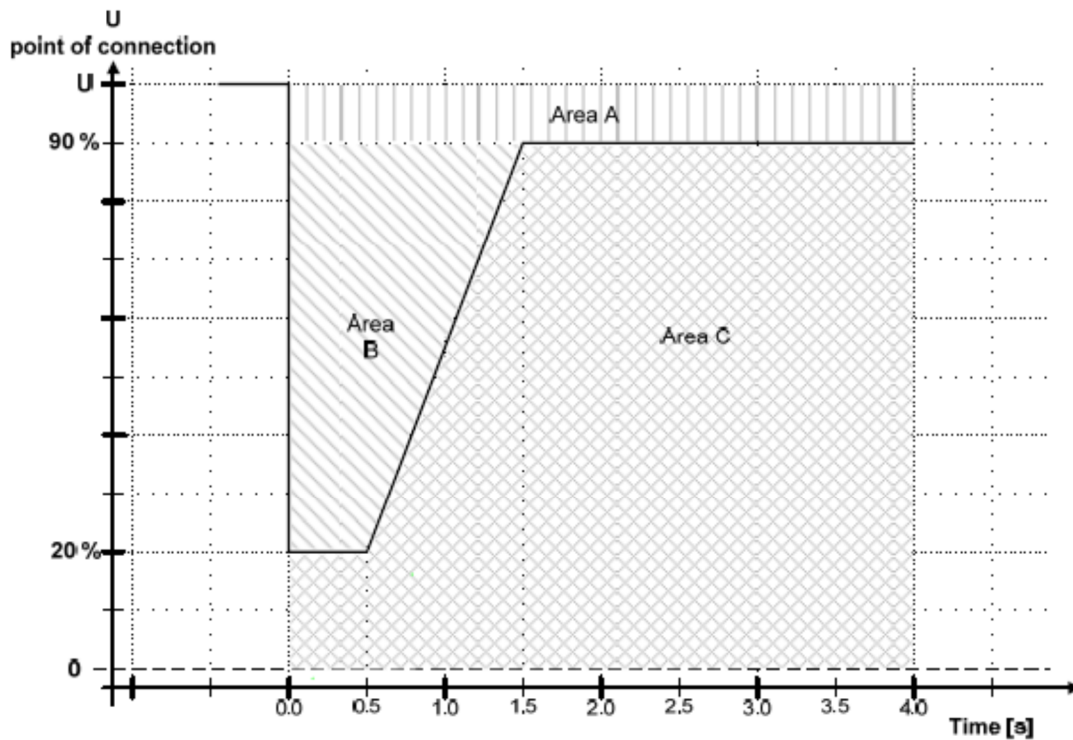


IMAGEN 4: HUECOS DINAMARCA

El área A indica que la planta debe permanecer conectada y mantener la producción.

El área B, la planta debe permanecer conectada a la red. La planta eólica debe proporcionar el máximo tensión mediante el suministro de una cantidad controlada de potencia reactiva.

En el área C, se permite la desconexión de la planta.

La planta debe permanecer conectada después de faltas que hayan ocurrido, los requerimientos se piden en el punto de conexión, pero las secuencias de falta pueden tener lugar en cualquier parte de la red.

La planta debe ser capaz de soportar las faltas que se especifican en la siguiente tabla, incluso si se dan dos faltas de las especificadas en dos minutos:

## 3.1.1.2 PARPADEO (FLICKER).

Las plantas eólicas según el rango de potencia deben de cumplir con unos límites de flicker u otros.

- Plantas eólicas con potencia de salida entre 11kW y 1.5 MW:

<i>Voltage level (AC)</i>	$P_{st}$	$P_{lt}$
$U_n \leq 1 \text{ kV}$	0.35	0.25
$U_n > 1 \text{ kV}$	0.30	0.20

Tabla 3: Flicker Dinamarca plantas entre 11 KW y 1,5 MW

- Plantas eólicas con una potencia de salida superior a 1.5MW:

<i>Voltage level (AC)</i>	$P_{st}$	$P_{lt}$
$U_n \leq 35 \text{ kV}$	-	0.50
$35 \text{ kV} < U_n \leq 100 \text{ kV}$	-	0.35
$U_n > 100 \text{ kV}$	0.30	0.20

Tabla 4: Flicker Dinamarca plantas superiores a 1,5 MW

## 3.1.1.3 ARMÓNICOS.

Como en el caso anterior los límites de armónicos se establecen según la potencia de salida de las plantas eólicas.

- Plantas eólicas entre 11 kW y 25 kW:

Voltage level (AC)	Odd-order harmonics $h$ (no multiple of 3)					Even-order harmonics $h$ (no multiple of 3)		
	5	7	11	13	$17 \leq h \leq 49$	2	4	$8 \leq h \leq 50$
$U_n \leq 1 \text{ kV}$	4.8	3.3	1.3	0.9	-	-	-	-
$U_n > 1 \text{ kV}$	4.0	4.0	2.0	2.0	$\frac{400}{h^2}$ *)	0.8	0.2	0.1

Tabla 5: Armónicos Dinamarca plantas entre 11 kW y 25 kW.

- Plantas eólicas entre 25 kW y 1.5 MW:

Voltage level (AC)	Odd-order harmonics $h$ (no multiple of 3)					Even-order harmonics $h$ (no multiple of 3)		
	5	7	11	13	$17 \leq h \leq 49$	2	4	$8 \leq h \leq 50$
$U_n \leq 1$ kV	3.6	2.5	1.0	0.7	-	-	-	-
$U_n > 1$ kV	4.0	4.0	2.0	2.0	$\frac{400}{h^2} *$	0.8	0.2	0.1

Tabla 6: Armónicos Dinamarca plantas eólicas entre 25 kW y 1,5 MW

- Plantas eólicas mayores de 1.5 MW:

Voltage level (AC)	Odd-order harmonics $h$ (no multiple of 3)									
	5	7	11	13	$17 \leq h \leq 49$	3	9	15	$21 \leq h \leq 45$	
$U_n \leq 35$ kV	5.0	4.0	3.0	2.5	$1,9 \cdot \frac{17}{h} - 0,2$ *)	4.0	1.2	0.3	0.2	
$U_n > 35$ kV	2.0	2.0	1.5	1.5	$1,2 \cdot \frac{17}{h}$ *)	2.0	1.0	0.3	0.2	

Tabla 7: Armónicos Dinamarca plantas eólicas superiores 1,5 MW.

## MODELADO Y SIMULACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

Modelar un sistema eléctrico basado en energías renovables permite reproducir de la manera más exacta posible, un entorno real. La simulación se lleva a cabo con el objetivo de predecir cómo se va a comportar un sistema frente a un caso de estudio en concreto y poder analizar los resultados obtenidos para aplicarlos al caso real.

La simulación es llevada a cabo mediante diversos programas de ordenador los cuales son útiles cuando experimentar con el sistema real resulta inviable, como en el caso de faltas eléctricas.

Para los estudios como el de este proyecto de impacto de conexión a la red resulta muy útil el uso de software de simulación ya que nos permite modificar parámetros con muy poco esfuerzo y observar lo que ocurre para luego aplicarlo al modelo real.

Para estos estudios es necesario que tengamos en cuenta tanto el modelo físico como el modelo de control, los cuales van a depender de la configuración del aerogenerador.

En el caso de este presente proyecto el software elegido ha sido DlgSILENT PowerFactory, el cual aunque a primera vista resulta un poco complejo de manejar, con la práctica da lugar a una potente herramienta para el análisis de casos de estudio.

Para un usuario novel, se anexa una guía de usuario de este programa donde se recogen desde los aspectos básicos hasta casos más complejos, esta guía se puede consultar en el ANEXO I-GUIA DE USUARIO.

Los modelos de los aerogeneradores son modelos estándar obtenidos de la librería que el propio programa nos ofrece, el modelado de un aerogenerador resulta complejo y son necesarios amplios conocimientos físicos y de teoría de control que están fuera de lugar en este proyecto.

## DESCRIPCIÓN DE LA RED:

### 1. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA RED.

La red, se obtiene del documento técnico “A Reduced Wind Power Grid Model for Research and Education”, presenta en un modelo reducido un sistema de transporte con penetración eólica.

La incorporación de la energía eólica en las líneas de transmisión requiere un gran conocimiento sobre la producción de energía eólica y redes de transmisión, una pregunta muy común y a la que éste proyecto intenta dar respuesta es: ¿Qué le ocurre en una línea de transmisión con gran cantidad de energía eólica cuando se produce una falta?

Con el objetivo de dar respuesta a estas preguntas, se ha modelado la red descrita en el artículo titulado “A reduced wind power grid model for research and education” de Akhmatov et al, desarrollado por la universidad de Dinamarca y por TSO Energinet.dk.

El sistema contiene:

- 17 nudos de conexión cuyas tensiones oscilan entre los 0,7 kV y los 400 kV.
- 4 Plantas de generación convencional.
- Cargas de consumo.
- 10 Líneas de conexión.
- 12 transformadores de dos devanados, 2 de ellos con cambio automático de tomas
- Baterías de condensadores para compensar la potencia reactiva.
- Parque eólico de aerogeneradores de jaula de ardilla, que se representa mediante un equivalente agrupado.
- Parque eólico offshore de aerogeneradores doblemente alimentados, representado mediante un equivalente agrupado.

La totalidad de la red así como las características de cada elemento que la compone se encuentra en el ANEXO II- DESCRIPCIÓN DE LA RED

### 2. RESULTADOS

En el presente apartado se detalla un resumen de los resultados obtenidos después de todo el proceso de simulación, el análisis general detallado de todo el procedimiento de ensayo abordado en este proyecto se encuentra en el Anexo V-Resultados.

Una vez modelada la red se procede a su estudio, para ello se realizan simulaciones tanto estacionarias como dinámicas en dos escenarios distintos, siendo el primero de ellos con el parque de jaula de ardilla conectado y el segundo con el parque desconectado.

El análisis estacionario de la red se realiza mediante el flujo de cargas, para ello el software utiliza el método Newton Raphson.

Situándonos en el primer escenario el cálculo converge y nos da como resultado un flujo de potencia donde ningún elemento tiene un índice de carga superior al 100%, advirtiéndose solo un índice de mayor grado en los centros de generación y sus respectivos transformadores, sin embargo esto es un resultado esperado ya que si la central de generación se encuentra cerca del límite de su capacidad también lo estarán sus transformadores.

En lo que respecta al análisis dinámico se estudia el efecto de faltas trifásicas en la red, en concreto en los nudos 105, 111 y 115.

- Cortocircuito nudo 115.

La falta en el nudo 115 provoca un aumento en la reactiva del parque eólico DFIG, reduciendo la potencia activa la cual en ningún momento cae por debajo de 0, lo que indica que no estamos consumiendo. Los aerogeneradores dotados de los sistemas de control restablecen las potencias cuando la falta es despejada.

La carga analizada es la LD4, situada en el nudo 105, ésta ante la falta cae la tensión por debajo de los 0.9 p.u situándose fuera del rango normalizado.

Por último se analiza las consecuencias que tiene la falta en el nudo 111 al cual se conecta el parque de generadores de jaula de ardilla, aquí la tensión cae por debajo de los 0.85 p.u. por tanto el comportamiento del parque sería la desconexión.

- Cortocircuito nudo 111.

El primer análisis realizado es la influencia de ésta falta en el nudo 115, nudo al que se conecta el parque de DFIG dando como resultado un hueco de tensión inferior al 0,2 p.u. resultado que si lo cotejamos con la normativa se encuentra fuera de rango, por tanto la instalación se encontraría fuera de la legislación vigente.

En lo referente a la carga el análisis nos muestra que la tensión se sitúa otra vez por debajo del régimen de operación normal.

- Cortocircuito nudo 105.

La carga LD4 se encuentra conectada directamente al nudo por lo que durante la duración de la misma y hasta su despeje y restablecimiento de la red, los clientes conectados se quedarían sin servicio.

El cortocircuito trifásico afecta al nudo 115 con una caída de tensión que a diferencia de los casos anteriores se sitúa por debajo del 0,2 p.u. que indica la normativa, por ello en esta ocasión la instalación está dentro de rango.

En el segundo escenario se desconecta el parque de Jaula de Ardilla, y se repite el patrón de los análisis anteriores, sin embargo en este caso sólo se analiza el nudo 111.

El estudio del flujo de potencia nos muestra una red más inestable que en el caso anterior, marcando en color naranja (índice de carga al límite) un mayor número de elementos y en

color rojo (máximo índice de carga superado) el nudo 115 nudo al que está conectado el parque de generadores DFIG.

En lo que respecta al análisis dinámico se estudia el efecto de faltas trifásicas en la red, en concreto al nudo 111.

- Cortocircuito nudo 111

El cortocircuito en este caso afecta en menor medida al punto de conexión siendo la potencia activa y reactiva de menor medida que en los casos anteriores.

La carga se ve afectada presentando un comportamiento anormal totalmente fuera de rango.

La instalación cumple con la normativa para este caso ya que presenta un límite inferior menor al 0.2 p.u marcado por la legislación.



## CONCLUSIONES

Con el objetivo de mantener la estabilidad en los sistemas de potencia y fomentar la participación de energías renovables, es necesario asegurar que la incorporación de dichas energías no afecte al correcto funcionamiento de la red a la que se conectan, por lo que es necesario llevar a cabo estudios de impacto en la red.

Programas específicos para el modelado, simulación y análisis de sistemas eléctricos como es el caso de DlgSILENT PowerFactory constituyen herramientas de gran utilidad para llegar al objetivo antes marcado. Estos softwares tienen muchos modelos implementados lo que facilita la tarea de modelado y simulación.

En este proyecto se realiza el estudio de impacto de un parque eólico que se conecta a una red cuyo modelo se describe en el artículo "A Reduced Wind Power Grid Model for Research and Education" del autor Akhmatov. La red se ha intentado modelar de la forma más similar posible ámbito complicado ya que el documento original presentaba escasez de datos si los comparamos con los que nos requería el programa.

Ante las simulaciones realizadas puedo concluir que los sistemas eléctricos pierden inercia con el aumento de la participación de las energías renovables, lo cual los hace más débiles ante perturbaciones. Por tanto será necesario dotar a la red de los elementos de protección adecuados y por supuesto a la instalación eólica.

Los cortocircuitos pueden causar un aumento en el consumo de potencia reactiva en el caso de los generadores de jaula de ardilla, lo cual en consecuencia trae una reducción en la tensión de los terminales de los generadores eólicos llegando incluso a actuar las protecciones y disparar o dañar el aerogenerador.

En el caso de los DFIG, estos presentan una mayor versatilidad ya que pueden soportar mejor los huecos de tensión como se comprobó en las simulaciones.

Otro punto importante a mencionar es que gracias a la simulación podemos comprobar la cantidad de reactiva que genera nuestro sistema y en consecuencia establecer los medios adecuados como bancos de condensadores para cumplir la normativa.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Vladislav Akhmatov, Torsten Lund, Anca D. Hansen, Poul Sorensen, Arne H. Nielsen. "A Reduced Wind Power Grid Model for Research and Education".
- [2] DIgSILENT GmbH, DIgSILENT Technical Documentation - PowerFactory DSL Models, August 2006.
- [3] "Specifications for connecting wind farms to the transmission network", 2nd Ed., ELTRA Transmission System Planning, Denmark: ELT1999- 411a, 2000.
- [4] Thomas Ackermann. Wind Power in Power Systems, 2nd Edition. ISBN: 978-0-470-97416-2. Capítulos 3,4,5,6,7,8
- [5] M. Milošević. Generation Control in Small Isolated Power Systems.
- [6] P.O. 12.3 Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas
- [7] P.O. 12.2 Instalaciones conectadas a la red de transporte: requisitos mínimos de diseño, equipamiento, funcionamiento y seguridad y puesta en servicio
- [8] Grid Code Connection Conditions Compliance: Testing & Submission of the Compliance Report
- [9] Technical regulation 3.2.5 for wind power plants with a power output greater than 11 kW
- [10] Principles of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG) Courseware Sample
- [11] <http://www.ambientum.com/revistanueva/2007-01/energia/tension.asp>
- [12] [http://fglongatt.org/OLD/DIgSILENT\\_Cur\\_Basico.html](http://fglongatt.org/OLD/DIgSILENT_Cur_Basico.html)