

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia



***Desenvolvimento de uma metodologia baseada em
redes neuronais para o cálculo da energia produzida
por aerogeradores***

Tese de Mestrado

José Manuel Neves Macedo

Tese realizada sobre orientação:

Professor Doutor José António Beleza Carvalho

Professor Doutor Roque Filipe Mesquita Brandão

Porto, Julho 2012

Os meus AGRADECIMENTOS:

À MINHA ESPOSA

Pelo apoio, compreensão e incentivo dado nos momentos mais importantes.

À MINHA FAMÍLIA

Pelo ambiente e condições de estudo que me proporcionaram, imprescindíveis para a minha formação como Engenheiro e fundamentalmente como Homem.

AOS PROFESSORES DOUTORES JOSÉ ANTONIO BELEZA CARVALHO E ROQUE FILIPE MESQUITA BRANDÃO

Pela orientação, conhecimentos e experiências transmitidas durante os últimos anos.

AOS COLEGAS DA EDP RENOVÁVEIS

Pelo apoio prestado, decisivo no realizar do estudo e investigação.

A TODO O MEUS AMIGOS

Em especial aqueles que partilharam comigo, nos últimos anos, o espírito de dedicação e trabalho.

AOS MEUS COLEGAS DE CURSO

Com a lembrança dos momentos passados juntos e pelas horas de estudo partilhadas.

RESUMO

O uso da energia eólica para a produção de eletricidade apresenta na última década um crescimento apreciável. Monitorizar o desempenho dos aerogeradores torna-se um processo incontornável, quer por motivos financeiros, quer por questões operacionais.

Os investimentos despendidos na construção de parques eólicos são muito consideráveis, pelo que é essencial a análise constante dos aspetos preponderantes no retorno do investimento. A maximização da energia produzida por cada aerogerador é o objetivo principal da monitorização dos parques eólicos.

Os sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADAs) instalados nos parques eólicos permitem uma supervisão em tempo real relativamente ao estado e funcionamento dos aerogeradores, adquirindo uma elevada importância na avaliação dos rendimentos energéticos e anomalias de funcionamento, garantido desta forma melhorias de produtividade.

O objetivo deste trabalho é estimar a energia produzida pelos aerogeradores quando ocorrem falhas de comunicação com o seu contador interno ou avaria do mesmo. A ocorrência destas situações não permite a monitorização da energia produzida durante esse período. Foram analisados dados operacionais dos aerogeradores relativos a um parque eólico localizado na zona Norte de Portugal, sendo usados os dados recolhidos pelo sistema SCADA sobre a forma de médias de 10 min referentes ao período de janeiro de 2011 a agosto 2011.

O desempenho da rede neuronal depende da qualidade e quantidade do conjunto de dados usados para o treino da rede. Os dados usados devem representar de forma fiel o estado que se pretende para o equipamento.

Para a obtenção do objetivo proposto foi fundamental a identificação das grandezas disponíveis a utilizar no método de cálculo da energia produzida.

Os resultados obtidos com aplicação das redes neuronais no método de cálculo da energia produzida por aerogeradores demonstram que independentemente do período de indisponibilidade da informação referente à energia produzida é possível estimar o valor da mesma.

Palavras-Chave: Aerogerador, monitorização, energia produzida, redes neuronais.

ABSTRACT

The use of wind power for the production of electricity has seen a remarkable growth in the past decade. Monitoring the wind-turbine generators (WTG) becomes now an indispensable process, by financial or operational reasons.

The investments made on building wind farms are of a considerable amount, which makes it essential for the constant analysis of every item that might influence the return of such investments. Maximizing the energy produced by each WTG is the key issue of a wind farm operation.

The SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems installed on the wind farms allow a real-time supervision of the status and working conditions of the WTGs, acquiring a high level of importance on evaluating energy income and operating anomalies, this way ensuring productivity improvements.

The purpose of this work is to estimate the energy produced by WTGs when communication failures occur with its internal counter or even when this object is malfunctioning. The occurrence of both these situations does not allow the monitoring of the energy produced during this period. Operational data was analyzed, from a wind-farm located in the north of Portugal, having used the data collected by the SCADA in the form of 10 minute average data referring to the period from January 2011 to August 2011.

The performance of this neural network depends on the quality and quantity of the set of data used to train this network. This data should represent faithfully the state that is required for the equipment.

To obtain this purpose it was fundamental to identify the magnitudes available to use on the method of calculating the produced energy.

The results obtained with applying neural networks on the method of calculating the produced energy by WTG demonstrate that, independently of the period of unavailability of the information referring to the energy produced, it is still possible to estimate it's value.

Key-words: wind-turbine generator, monitoring, energy produced, neural networks.

ÍNDICE

Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
1. Introdução	23
1.1. Enquadramento geral da Energia Eólica.....	23
1.1.1. A Energia Eólica no Mundo	25
1.1.2. A Energia Eólica na Europa.....	27
1.1.3. A Energia Eólica em Portugal.....	29
1.2. Enquadramento da Tese.....	32
1.3. Objetivos do trabalho	34
1.4. Estrutura da Tese.....	35
2. Produção de Energia Eólica	39
2.1. Vento – Função e Características	39
2.2. Evolução Histórica.....	40
2.3. Constituição e Características dos Aerogeradores	42
2.3.1. Tipos de Aerogeradores	42
2.3.2. Componentes do Aerogerador	44
2.4. Ligação dos Parques Eólicos à rede elétrica	56
2.4.1. Requisitos Técnicos das Ligações à Rede	58
2.4.2. Requisitos Técnicos.....	59

2.4.3. Requisitos Técnicos Gerais	59
2.5. Capacidade de Suportar as Cavas de Tensão - <i>Ride-Through Fault</i>	63
2.5.1. Aplicação do sistema <i>Ride-through Fault</i>	64
2.5.2. Implementação do sistema <i>Ride-through Fault</i> em Portugal	65
2.6. Centros de Controlo e Despacho de Produção Eólica	67
2.6.1. Funcionamento dos Centros de Controlo e Despacho dos Parques Eólicos	69
2.6.2. Objetivos, Funções e Benefícios dos Centros de Controlo e Despacho de Produção Eólica	74
3. Aplicação das Redes Neuronais no cálculo da energia produzida por aerogeradores	79
3.1. Rede Neuronal Cerebral	79
3.2. Redes Neuronais Artificiais	82
3.3. Tipos de Funções de Ativação	83
3.4. Arquiteturas de Rede	84
3.5. Redes Multi Camadas com Aprendizagem <i>Backpropagation</i>	87
3.5.1. Limitações do <i>Backpropagation</i>	88
3.6. Software Usado no treino Das Redes Neuronais Artificiais.....	89
3.6.1. Matlab - NNtool.....	90
3.7. Treino da Rede Neuronal.....	93
3.7.1. Correlação entre as variáveis	95
3.7.2. Atraso	96
3.8. Aplicação do <i>Software</i>	97

4. Método desenvolvido para a previsão da energia produzida pelos aerogeradores	101
4.1. Caracterização do Parque Eólico.....	101
4.2. Características dos aerogeradores	102
4.3. Aquisição de dados dos Aerogeradores.....	105
4.4. Seleção das variáveis a utilizar no método desenvolvido	108
4.5. Preparação dos dados a utilizar na metodologia	114
4.6. Características e treino da rede neuronal adotada	115
4.7. Análise dos resultados obtidos.....	118
4.7.1. Análise do Cenário 1	119
4.7.2. Análise do Cenário 2	123
4.7.3. Análise dos resultados dos vários cenários.....	126
5. Conclusão	131
6. Referências Bibliográficas	135
Anexo A – Esquema da rede de comunicações de um Parque Eólico.....	143
Anexo B – Registo de estados de um aerogerador.....	147
Anexo C – Características do aerogerador E-82 da Enercon.....	151
Anexo D – Relatório disponível no SCADA <i>Database</i>	157
Anexo E – Cenário 3	161
Anexo F – Cenário 4.....	165
Anexo G – Cenário 5	169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Crescimento da capacidade Produtora Eólica [1]	25
Figura 1.2 - Capacidade instalada em 2011 e capacidade acumulada no final de 2011 [2]	26
Figura 1.3 - Instalação Anual de Energia Eólica na União Europeia em GW [3]	27
Figura 1.4 - Percentagem de potência instalada na europa em 2011 [1]	28
Figura 1.5 – Capacidade produtora de base Eólica na Europa em 2011 [1] ...	29
Figura 1.6 – Capacidade instalada por distrito e regiões autónomas no final 2011 [1]	30
Figura 1.7 – Potencia instalada por fabricante em Portugal no final de 2011 [1]	31
Figura 1.8 – Quota de Mercado dos fabricantes de aerogeradores em Portugal no final 2011 [1].....	31
Figura 1.9 – Contextualização do Centro de Controlo e Despacho de Produção Eólica no funcionamento do sistema elétrico de energia	33
Figura 2.1 - Evolução da dimensão dos aerogeradores ao longo do tempo [3]	41
Figura 2.2 – Representação de um aerogerador eólico de eixo vertical [9].....	43
Figura 2.3 - Representação de um aerogerador eólico de eixo horizontal [10]	43
Figura 2.4 – Representação da constituição de um aerogerador de eixo horizontal [11].....	44
Figura 2.5 – Esquema de um aerogerador típico [11]	45
Figura 2.6 – Gerador de indução de gaiola de esquilo [18].....	49
Figura 2.7 – Gerador assíncrono de rotor bobinado [19].....	50

Figura 2.8 – Aspeto construtivo do gerador síncrono [20]	51
Figura 2.9 – Ângulo de passo e de ataque [15].....	54
Figura 2.10 – Forças de arrasto e sustentação [15]	56
Figura 2.11 - Curva tensão-tempo da capacidade exigida às instalações de produção eólica para suportarem cavas de tensão na sequência de defeitos trifásicos, monofásicos e bifásicos [25]	60
Figura 2.12 - Curva de fornecimento de reativa pelas instalações de produção eólica durante cavas de tensão [25].....	61
Figura 2.13 - Curvas de tolerância de tensão adotadas por diferentes operadores de rede [27]	65
Figura 2.14 - Curva de tolerância de tensão exigida aos produtores em caso de cavas de tensão [25]	66
Figura 2.15 – Hierarquia de comando técnico entre despachos.....	68
Figura 2.16 – Infraestruturas de comunicações.....	69
Figura 2.17 – Tipos de comunicações.....	70
Figura 2.18 – Topologias das comunicações	71
Figura 2.19 – Comunicação dos elementos de um parque eólico com o CCDPE	71
Figura 2.20 – Esquema de funcionamento do SCADA central dos Centros de Controlo e Despacho de Produção Eólica [30].....	73
Figura 3.1 – Estrutura de um neurónio biológico [34]	80
Figura 3.2 – Contraste entre redes neuronais biológicas e artificiais [35]	81
Figura 3.3 – Funções de Ativação de Redes Neuronais [36].....	84
Figura 3.4 – Arquitetura de uma Rede Neuronal unidirecional de uma camada [37]	85
Figura 3.5 – Arquitetura de uma Rede Neuronal Multi Camadas [37]	86

Figura 3.6 - Arquitetura de uma Rede Neuronal Recorrente [37]	87
Figura 3.7 – Funcionamento do Algoritmo <i>Backpropagation</i> [40]	88
Figura 3.8 – Interface gráfico inicial da <i>NNtool</i> no <i>Matlab</i>	91
Figura 3.9 - Interface gráfico de seleção de variáveis da <i>NNtool</i> no <i>Matlab</i>	91
Figura 3.10 - Interface gráfico de definição da rede neuronal na <i>NNtool</i> no <i>Matlab</i>	92
Figura 3.11 - Interface gráfico de treino da rede neuronal na <i>NNtool</i> no <i>Matlab</i>	93
Figura 3.12 - Correlação entre Potência Ativa e a Energia Produzida	95
Figura 4.1 – Aerogerador do Parque Eólico em estudo.....	101
Figura 4.2 – Apresentação esquemática da <i>nacelle</i> [44].....	103
Figura 4.3 – Sistema de ligação à rede do aerogerador [44].....	104
Figura 4.4 – Sistema SCADA do parque eólico [45].....	105
Figura 4.5 – Fluxo de dados dos aerogeradores através do SCADA [45].....	106
Figura 4.6 – Correlação entre a velocidade do vento média e a energia produzida.....	109
Figura 4.7 - Correlação cruzada entre a velocidade de vento média e a energia produzida.....	110
Figura 4.8 - Correlação entre a velocidade de rotação média e a energia produzida.....	110
Figura 4.9 – Correlação cruzada entre a velocidade de rotação média e a energia produzida.....	111
Figura 4.10 – Correlação entre a potência ativa média e a energia produzida	111
Figura 4.11 – Correlação cruzada entre a potência ativa média e a energia produzida.....	112

Figura 4.12 – Correlação entre a potência reativa média e a energia produzida	112
Figura 4.13 – Correlação cruzada entre a potência reativa média e a energia produzida.....	113
Figura 4.14 – Configuração da Rede Neuronal para previsão da energia produzida pelo aerogerador	116
Figura 4.15 – Esquema da rede neuronal treinada na <i>NNtool</i>	116
Figura 4.16 – Fluxograma representativo do processo adotado para o treino da rede	117
Figura 4.17 – Esquema de Potência do Aerogerador [44].....	118
Figura A.0.1 - Esquema das Comunicação dos aerogeradores de um parque eólico.....	143
Figura B.0.1 - Registo de estados e alarmes de um aerogerador no SCADA <i>Remote</i>	147
Figura C.0.1 – Curva de Potência do aerogerador E-82	152
Figura C.0.2 – Dimensões do aerogerador	153
Figura D.0.1 – Relatório disponível no SCADA <i>DataBase</i>	157

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Caracterização da potência eólica instalada em Portugal continental [4].....	29
Tabela 2.1 - Esquemática das topologias de ligação dos geradores	52
Tabela 2.2 - Características das ligações dos geradores	53
Tabela 2.3 - Fornecimento de energia reativa à rede de transporte [25]	62
Tabela 2.4 - Fornecimento de energia reativa à rede de distribuição [25]	63
Tabela 4.1 - Elementos existentes na <i>nacelle</i>	103
Tabela 4.2 – Registo disponibilidade de cada aerogerador do parque em estudo	115
Tabela 4.3 - Resultado do treino da rede alterando o número de neurónios na camada intermédia.....	117
Tabela 4.4 – Tabela Resultados do Cenário 1	120
Tabela 4.5 - Tabela Resultados do Cenário 2.....	123
Tabela 4.6 – Resultados dos cenários em estudo	126
Tabela C.0.1 – Características do aerogerador E-82.....	151
Tabela E.0.1 – Resultados Cenário 3	161
Tabela F.0.1 – Resultados Cenário 4	165
Tabela G.0.1 – Resultados Cenário 5.....	169

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AT - Alta Tensão

CCDPE - Centros de Controlo e Despacho de Produção Eólica

CE - Comunidade Europeia

DL – Decreto de Lei

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

ERSE - Entidade Reguladora do Sector Elétrico

EUA – Estados Unidos da América

MT - Média Tensão

MAT - Muito Alta Tensão

NNTOOL - *Neural Network Toolbox*

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

ORT - Operador de Rede de Transporte

PLC - Controlador Lógico Programável

PNAEE - Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PNAER - Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis

RESP - Rede Elétrica de Serviço Público

RNA - Redes Neuronais Artificiais

RND - Rede Nacional de Distribuição

RNT - Rede Nacional de Transporte

RTU - Unidade de Controlo Remoto

SEE - Sistema Elétrico de Energia

SEI - Sistema Elétrico Independente

SEP - Sistema Elétrico Público

SEN - Sistema Elétrico Nacional

SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*

SLA – Acordo de Nível de Serviço Prestado

TCMA – Taxa de Crescimento Média Anual

UE - União Europeia

WTG – *Wind-Turbine Generator*

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL DA ENERGIA EÓLICA

A necessidade do homem procurar fontes de energia que lhe permitam tornar confortável a sua sobrevivência existe desde os primórdios da humanidade. O homem pré-histórico começou por conseguir utilizar o fogo, o que lhe permitiu um salto qualitativo na sua vida. Posteriormente passou a domar e a usar a força animal como fonte de energia mecânica.

A energia proveniente do sol favorecia a agricultura e o vento era usado como força motora, inicialmente na movimentação dos barcos e depois também em moinhos para a moagem de cereais e bombagem de água.

Nos séculos XVIII e XIX, com a descoberta da máquina a vapor e do motor de combustão interna, que possibilitaram a revolução industrial, deu-se um crescimento exponencial no consumo de energia. A utilização de combustíveis fósseis passou a constituir a matriz energética mundial. Além da dependência criada por este tipo de recurso energético, estes originaram elevados custos ambientais.

Com o surgimento das duas grandes guerras mundiais a escassez de combustíveis fósseis e o aumento do seu preço permitiu às nações começarem a perceber a sua forte dependência energética.

Terminada a 2ª Grande Guerra Mundial, os preços baixaram e houve um período de menor preocupação.

A crise energética de 1973 recuperou novamente a discussão sobre o paradigma da dependência energética dos combustíveis fósseis e o tamanho das suas reservas. A comunidade científica e a comunidade em geral passaram a ter uma maior consciencialização dos efeitos que o uso dos combustíveis fósseis tinha, nomeadamente para o ambiente, agravando o

efeito de estufa. As nações passaram a incentivar ativamente a pesquisa na área das fontes de energia renováveis, da qual faz parte a energia eólica.

Neste contexto surgiu o Protocolo de Quioto, processo que se iniciou em 1988 no Canadá, através da conferência “*Toronto Conference on the Changing Atmosphere*”, e se concluiu no Japão em 1997, com a assinatura do protocolo pelos dos países aderentes. Este protocolo sugere aos países aderentes um conjunto de metas que, uma vez alcançadas, permitirão uma redução da quantidade de emissão de gases poluentes de, pelo menos, 5,2% até ao presente ano, em relação aos níveis observados em 1990.

Na sequência deste protocolo, a Comunidade Europeia (CE) definiu um conjunto de diretivas nos quais define os limites de emissão de gases responsáveis pelo efeito de estufa, para cada país membro.

Na CE foram assinados alguns acordos, dos quais fazem parte a Diretiva Comunitária 2001/77/CE, que visa a promoção da geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, de forma a cumprir o acordado pelo Protocolo de Quioto. Mais recentemente a Diretiva Comunitária 2009/28/CE, estabelece como meta para 2020, uma redução dos gases com efeito de estufa comparativamente a 1990 e um aumento de 20 % da contribuição de energia proveniente de fontes de energia renováveis no consumo total de energia.

Atualmente, a ideia de um mundo sem uma organização social, económica e política baseada num auxílio computacional seria inconcebível. Parece claro que sem este desenvolvimento, para o qual contribuiu em muito a revolução industrial, seria impossível conhecer o mundo como hoje o conhecemos. Ciente de tudo isto, a preocupação do homem, tem cada vez mais vindo a ser redirecionada no sentido de otimizar e desenvolver novos meios e fontes de exploração energética atuais, utilizando para isso o recurso a fontes energéticas renováveis e tentando reduzir a dependência de energias não renováveis.

Nas energias renováveis reside a principal esperança da humanidade para enfrentar os enormes desafios em termos energéticos que atualmente são

colocados. As energias renováveis são seguras, limpas e abundantes. Ao contrário dos combustíveis convencionais, as energias renováveis são de uma forma de energia praticamente disponível em todos os países do mundo, sendo a energia eólica a de maior interesse na atualidade.

1.1.1. A ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

O recurso a energia eólica tem registado um aumento significativo nos últimos 20 anos a nível mundial, com especial referência nos Estados Unidos da América (EUA), Europa, China e Índia, como é possível verificar na figura 1.1.

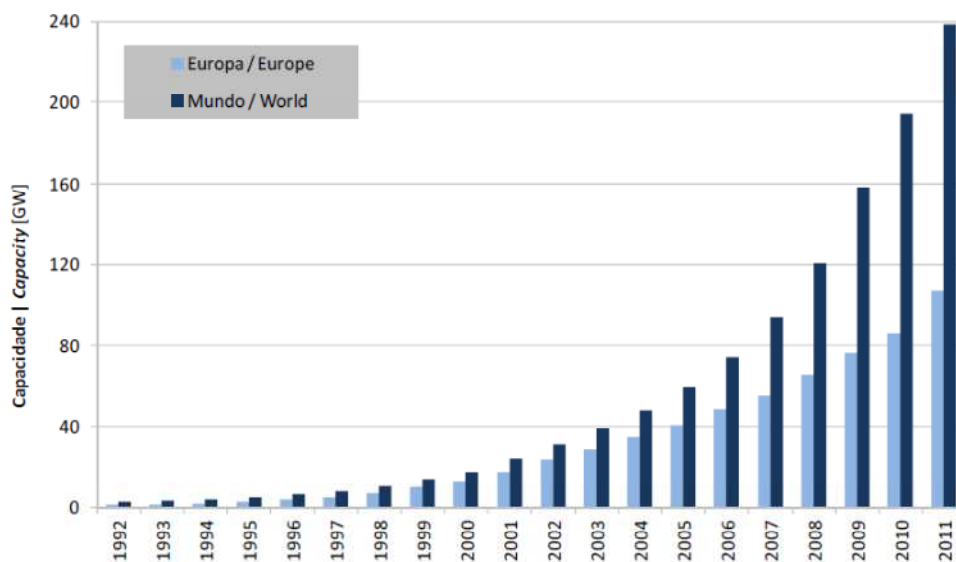


FIGURA 1.1 - CRESCIMENTO DA CAPACIDADE PRODUTORA EÓLICA [1]

Durante o ano 2011, foram instalados, a nível mundial cerca de 41 GW em energia eólica, elevando a potência instalada total para mais de 238 GW.

Desenvolvimento de uma Metodologia baseada em redes neuronais para o cálculo da energia produzida por aerogeradores

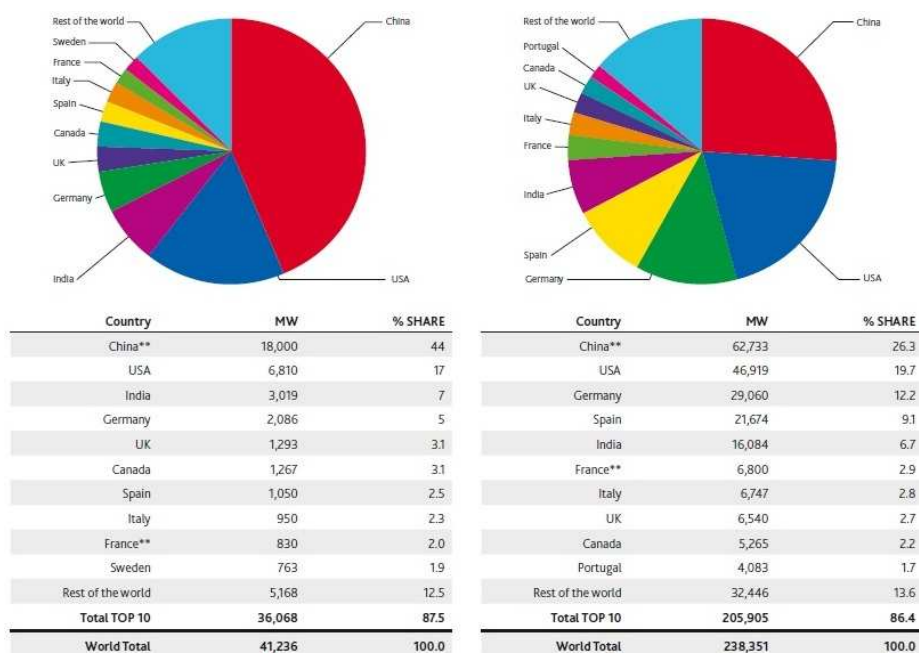


FIGURA 1.2 - CAPACIDADE INSTALADA EM 2011 E CAPACIDADE ACUMULADA NO FINAL DE 2011 [2]

Neste contexto, verifica-se que existem mais de 80 países no mundo com instalações de energia eólica, sendo que 22 deles já ultrapassam o valor de 1 GW de potência instalada.

O estado atual da economia global originou um abrandamento na potência instalada nos países com crescimento acentuado nos últimos anos. Pelo segundo ano consecutivo, a maioria das novas instalações foram construídas fora da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico) e novos mercados como a América latina, África e Ásia estão a impulsionar o crescimento do sector [2].

A China tem consolidado a sua posição como líder no mercado global, com uma capacidade acumulada de mais de 62 GW, apesar de 2011 não ter sido um ano fácil para a indústria de energia eólica chinesa.

Na Índia, o acréscimo de instalações em 2011 elevaram a capacidade total para os 16 GW.

Após um ano difícil em 2010, o setor eólico americano esteve novamente em ascensão, foram acrescentados mais de 6,8 GW de instalações eólicas. As

instalações construídas em 2011 fornecem a energia elétrica suficiente para quase dois milhões de lares americanos [2].

1.1.2. A ENERGIA EÓLICA NA EUROPA

A instalação anual de energia eólica na União Europeia (UE) aumentou sustentadamente durante 17 anos. Em 1995 existia 814 MW de potência eólica instalada, em 2011 existem 9,6 GW, o que equivale a uma taxa de crescimento anual média de 15,6%.

A Alemanha permanece como o país da UE com maior capacidade instalada, seguida pela Espanha, França, Itália e pelo Reino Unido. O crescimento das instalações *onshore* na Alemanha e na Suécia, e *offshore* no Reino Unido, em conjunto com o forte desempenho de alguns mercados emergentes na Europa Oriental, foi superior à queda nas instalações dos mercados consolidados, tais como França e Espanha. A figura 1.3 apresenta a instalação anual de energia eólica na UE.

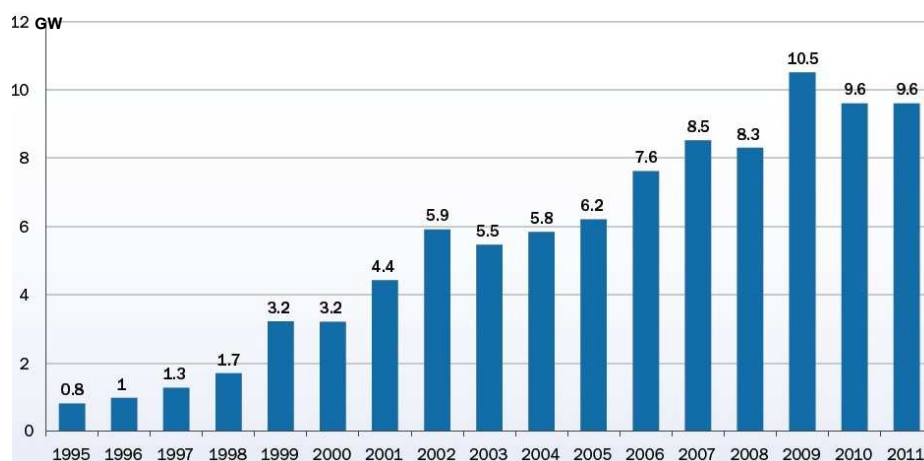


FIGURA 1.3 - INSTALAÇÃO ANUAL DE ENERGIA EÓLICA NA UNIÃO EUROPEIA EM GW [3]

Durante 2011, 10,3 GW de potência eólica foram instalados na Europa. Na UE, foram instalados 9,6 GW, um aumento da capacidade acumulada instalada de

11%, comparado ao ano anterior, totalizando 93,957 GW, valor suficiente para fornecer 6,3% da energia elétrica da UE.

Dos 9,6 GW de potência instalada na UE, 8,750 GW são instalações *onshore* e 866 MW *offshore* [3]. Na figura 1.4 é possível verificar a distribuição da potência instalada na Europa durante 2011.

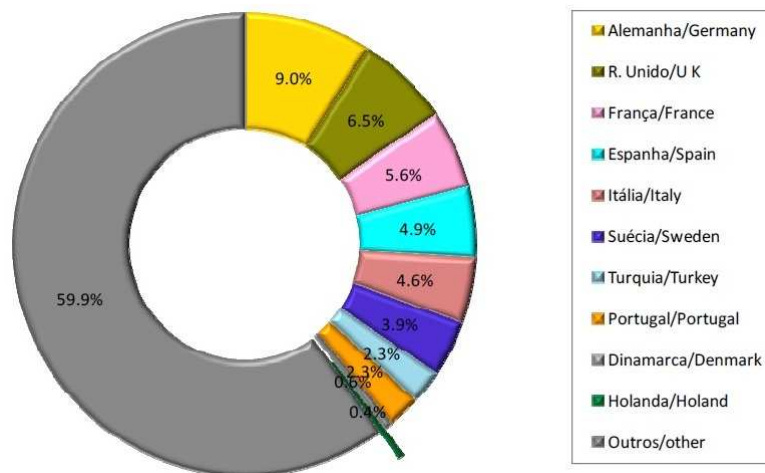


FIGURA 1.4 - PERCENTAGEM DE POTÊNCIA INSTALADA NA EUROPA EM 2011 [1]

A Alemanha continua a ser o maior mercado europeu de energia eólica, instalando quase 2,1 GW de nova produção durante 2011. O Reino Unido está em segundo lugar na capacidade instalada com 1,3 GW, em que 752 MW (58%) são instalações *offshore*, seguido pela Espanha com 1 GW, Itália com 950 MW, França com 830 MW, Suécia com 763 MW, seguidos pela Roménia 520 MW. As instalações *offshore* representam 8.9% das instalações totais acrescentadas na UE durante o ano de 2011.

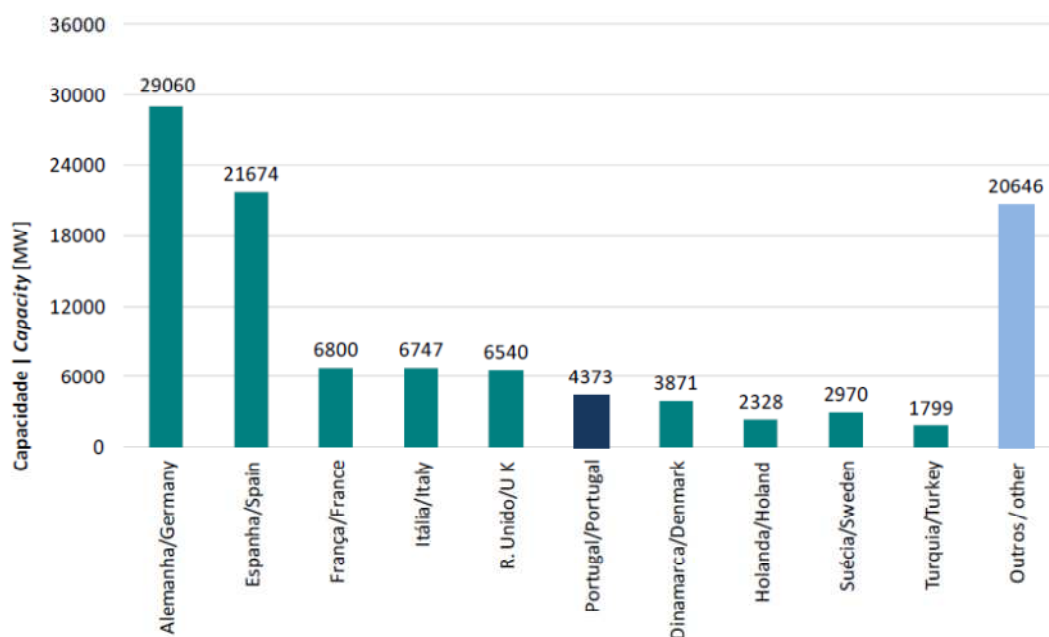


FIGURA 1.5 – CAPACIDADE PRODUTORA DE BASE EÓLICA NA EUROPA EM 2011 [1]

1.1.3. A ENERGIA EÓLICA EM PORTUGAL

Os dados mais recentes indicam que no final de 2011, a potência eólica instalada era de 4302 MW, distribuída por 218 parques, com um total de 2240 aerogeradores ao longo de todo o território continental e 1 aerogerador instalado *offshore*.

TABELA 1.1 - CARACTERIZAÇÃO DA POTÊNCIA EÓLICA INSTALADA EM PORTUGAL CONTINENTAL [4]

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	TCMA
Potência instalada (MW)	253	537	1 047	1 681	2 446	3 012	3 507	3 865	4 302	42,5%
Offshore									2	
Microprodução								0,62	0,62	
Nº parques instalados	42	71	103	139	152	174	198	208	218	22,9%
Nº de aerogeradores instalados	276	441	702	1 003	1 137	1 609	1 864	2 034	2 241	29,9%
Offshore									1	
Potência média (MW)										
dos parques	6,0	7,6	10,2	12,1	16,1	17,3	17,7	18,6	19,7	16,0%
dos aerogeradores instalados	0,9	1,2	1,5	1,7	2,2	1,9	1,9	1,9	1,9	9,7%
dos aerogeradores instalados em cada ano	0,5	1,7	2,0	2,1	5,7	1,2	1,9	2,1	2,1	19,7%

Cerca de 36% da potência instalada situa-se em parques eólicos com potência igual ou inferior a 25 MW. A produção, em 2011, ficou nas 2093 horas equivalentes por MW, valor substancialmente inferior ao registado em 2010, que se situou nas 2348 horas equivalentes por MW.

Os distritos com maior potência instalada, em dezembro de 2011, são Viseu, C. Branco, Coimbra, Lisboa, V. Real, V. do Castelo. Os distritos com maior recurso de vento foram Faro, Bragança, Guarda, Lisboa, Santarém e Beja [4]. A capacidade instalada e em construção distribuídas em Portugal são apresentadas na figura 1.6.

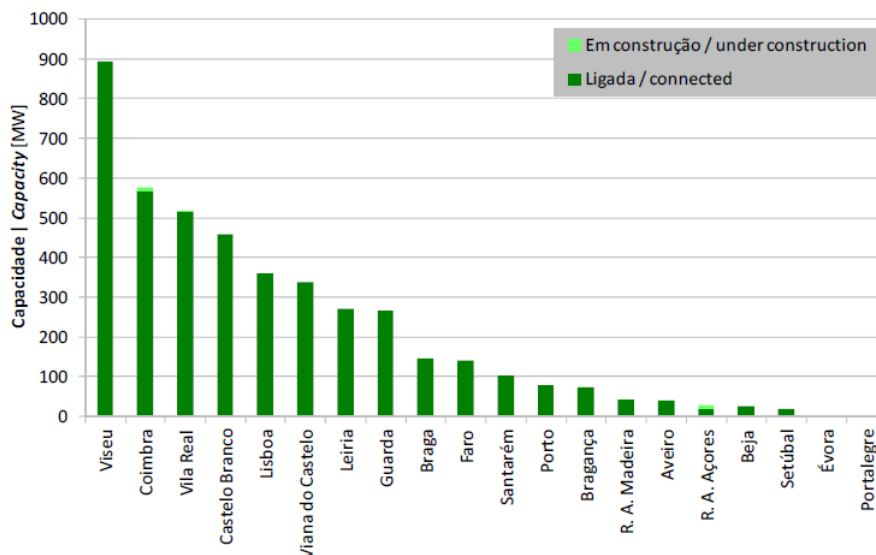


FIGURA 1.6 – CAPACIDADE INSTALADA POR DISTRITO E REGIÕES AUTÓNOMAS NO FINAL 2011 [1]

O total de aerogeradores ligados à rede acrescidos dos que se encontram em construção e adjudicados permitem identificar a *Enercon* como o fabricante com maior cota de mercado em Portugal, pouco mais de 2250 MW instalados. O segundo maior fabricante presente em Portugal, a *Vestas*, tem cerca de 600 MW instalados. Nas figuras 1.7 e 1.8 são apresentadas as distribuições da potência instalada em Portugal por fabricante de aerogeradores.

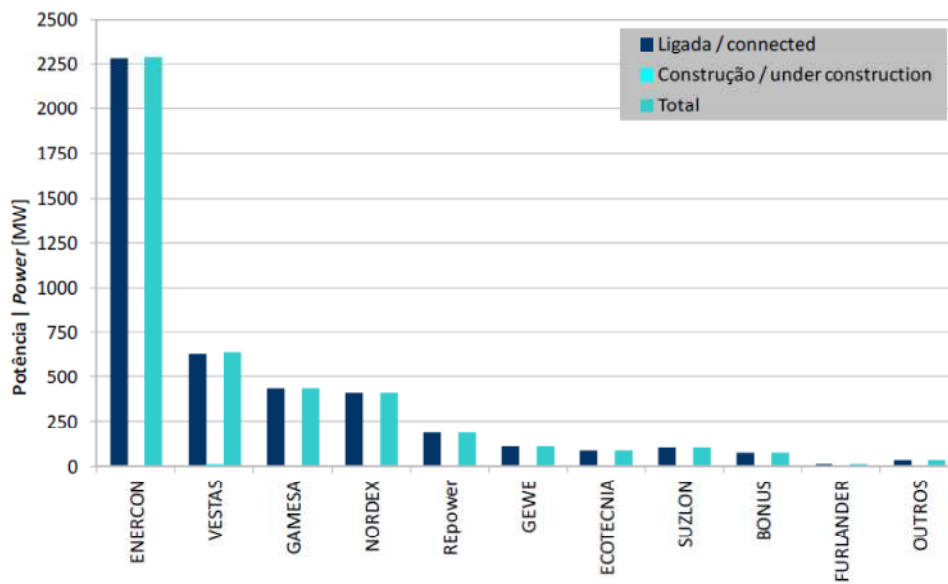


FIGURA 1.7 – POTENCIA INSTALADA POR FABRICANTE EM PORTUGAL NO FINAL DE 2011 [1]

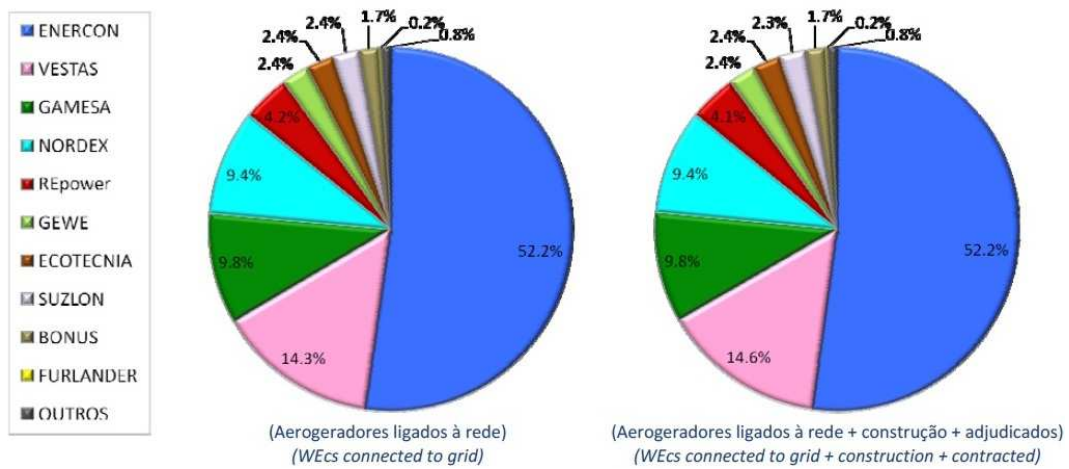


FIGURA 1.8 – QUOTA DE MERCADO DOS FABRICANTES DE AEROGERADORES EM PORTUGAL NO FINAL 2011 [1]

1.2. ENQUADRAMENTO DA TESE

O aumento progressivo do volume de integração de energia transformada através das energias renováveis e em especial a de base eólica deve-se essencialmente, à disponibilidade do recurso no nosso país, à remuneração atrativa e à maturidade da tecnologia.

Dada a vulnerabilidade associada aos recursos endógenos, é primordial a utilização de um conjunto vasto de tecnologias que permitam aumentar o leque de opções. Sendo assim, estas tecnologias baseadas na diversificação das fontes de energia primária contribuem para um aumento do fator de segurança de abastecimento.

Os recursos endógenos e em particular o eólico estão associados a um grau elevado de volatilidade e variabilidade que desde logo se traduzem em problemas de participação em mercados de eletricidade, segurança no abastecimento, gestão dos centros produtores e gestão dos parques eólicos.

A elevada integração de unidades de geração eólica, em detrimento das centrais térmicas convencionais de carvão, petróleo bruto, gás natural, entre outras, implica uma necessidade aos sistemas de distribuição e transporte de desenvolver novos conceitos relacionados com a monitorização, controlo e gestão dessas unidades de produção, considerando as restrições de rede e o funcionamento do mercado de eletricidade. Neste contexto, os Centros de Controlo e Despacho de Produção Eólica (CCDPE) adotarão uma arquitetura de controlo hierárquico, como se descreve na figura 1.9. Considera-se a possibilidade dos parques eólicos injetarem energia na rede de transporte ou na rede de distribuição, o que requer um diálogo entre o CCDPE e os operadores da rede de transporte e distribuição.

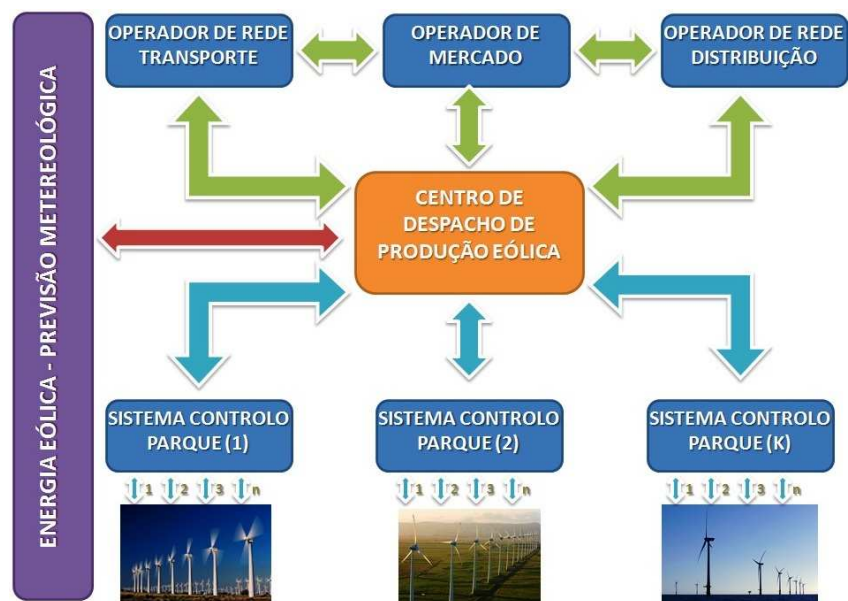


FIGURA 1.9 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO CENTRO DE CONTROLO E DESPACHO DE PRODUÇÃO EÓLICA NO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DE ENERGIA

A comunicação do CCDPE com os operadores de rede representa a participação dos parques eólicos no Sistema Elétrico Nacional (SEN). Estes diálogos implicam um conhecimento da produção de cada parque, pelo CCDPE, o que implica uma necessidade técnica de comunicação com o parque eólico e em especial com cada um dos aerogeradores para a receção dos estados e medidas fundamentais, permitindo saber em tempo real a sua performance. Assim sendo, de forma natural entende-se, que o grau de complexidade e nível de exigência, tanto em relação aos níveis de tecnologia utilizada, como em processos de controlo, comunicação e armazenamento de dados, venham sendo melhorados e tratados como ferramentas essenciais para o sucesso.

Atualmente, são instalados em parques eólicos sistemas de *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) que procedem ao registo de parâmetros essenciais para permitir controlar os equipamentos e retirar conclusões sobre o desempenho da operação dos aerogeradores. Os sistemas SCADAs instalados nos parques eólicos estão, na sua maioria ligados em tempo real aos CCDPEs.

Isto permite, entre outras coisas, avaliar rendimentos energéticos e anomalias de funcionamento, garantido desta forma melhorias de produtividade.

Nesta dissertação é desenvolvida uma metodologia para o cálculo da energia produzida por aerogeradores em caso de falha de comunicação ou avaria dos seus contadores. A ferramenta informática desenvolvida recorre ao uso de redes neuronais para efetuar a estimação da energia produzida.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

Tendo em conta a crescente aposta nas energias renováveis, em especial na energia eólica, os CCDPEs focalizam a sua atividade no controlo e otimização do desempenho dos parques eólicos e em particular de cada aerogerador. O conhecimento da energia produzida pelos aerogeradores é fundamental para o controlo económico do funcionamento do parque.

Como objetivos específicos para este trabalho, enumeram-se os seguintes:

- Sintetizar a situação atual e desenvolvimento da energia eólica;
- Abordar as técnicas relacionadas com a atividade de produção de energia eólica;
- Identificar e analisar as grandezas recolhidas de um aerogerador;
- Determinar a configuração da rede neuronal que melhor modeliza um aerogerador;
- Escolher as grandezas de entrada e saída da rede neuronal;
- Desenvolver uma metodologia de cálculo da energia produzida;
- Obter e analisar os resultados.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

De forma a permitir uma melhor compreensão do trabalho que se segue, este está organizado em 5 capítulos distintos.

Depois deste 1º capítulo de introdução, no capítulo 2 faz-se uma apresentação teórica sobre a energia eólica onde é referenciado o seu potencial, a formação e caracterização do vento, a tecnologia e constituição dos aerogeradores, questões técnicas da ligação dos parques eólicos à rede elétrica, aspetos fundamentais relacionados com o controlo e monitorização da produção de energia eólica.

No capítulo 3 apresenta-se uma abordagem às redes neuronais, apresentando algumas características. Neste capítulo é descrito o processo inicial de aplicação de um *software* de treino de redes neuronais ao trabalho proposto.

No capítulo 4 é apresentada a ferramenta de previsão de energia desenvolvida, bem como as simulações efetuadas e uma análise dos resultados obtidos.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido. São também apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

2. PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

2.1. VENTO – FUNÇÃO E CARACTERÍSTICAS

A energia do vento tem sido utilizada pelo homem desde há bastantes séculos, para a produção de energia mecânica em moinhos de vento para a moagem de cereais e para a bombagem de água. O vento consiste no deslocamento de massas de ar resultante de diferenças de pressão que se verificam na atmosfera, cuja origem se deve ao aquecimento diferenciado produzido pela radiação solar. Em termos globais, cerca de 1 a 2% da energia proveniente do sol é convertida em energia do vento.

As regiões próximas do equador sofrem um aquecimento superior ao que ocorre nas restantes regiões e o ar quente sobe em altitude e depois desloca-se em direção aos polos. Este movimento, que é influenciado pela rotação da terra, é acompanhado por um movimento inverso de ar mais frio gerando desta forma a circulação de massas de ar na atmosfera. Esta circulação global denomina-se vento geostrófico, e ocorre a partir de uma altitude de aproximadamente 1000 metros. Próximo da superfície da terra a intensidade e direção do vento são bastante influenciadas pelo clima da região em questão, pela orografia (relevo) e tipo de superfície (rugosidade). Existem também fenómenos locais que influenciam a estrutura do vento, como por exemplo a brisa marítima e os ventos de montanha. Todos estes fatores têm que ser tidos em consideração na seleção dos melhores locais para instalação de parques eólicos [5, 6].

O primeiro passo para a seleção do local para a produção de energia eólica é o conhecimento do regime de ventos. Por outro lado, a velocidade do vento aumenta com a altura acima do solo, sendo esta variação bastante influenciada pela rugosidade do solo e pela existência de obstáculos nas proximidades do local. Por exemplo, a superfície da água e o terreno descoberto apresentam dos mais baixos valores de rugosidade, ao passo que o espaço urbano e as

florestas densas apresentam os mais elevados. Quando maior a rugosidade do local menos pronunciado será o aumento da velocidade do vento com a altura. Com o objetivo de maximizar o aproveitamento da energia do vento, os locais com menor rugosidade são os preferidos para a instalação de parques eólicos, uma vez que para uma determinada altura se tem uma velocidade média do vento superior. Outros locais que normalmente são utilizados para a instalação de parques eólicos são os cumes de montanhas, uma vez que nesses locais ocorre uma aceleração do vento devido ao efeito da orografia. Por norma, locais com velocidades médias anuais do vento superiores a 6m/s e altura de 50 metros, são considerados bons locais [7].

2.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Nos EUA em 1981 deu-se o primeiro passo no desenvolvimento dos aerogeradores eólicos de grandes dimensões, com cerca de 91 metros de diâmetro e 2,5 MW de potência, incorporando os conhecimentos tecnológicos adquiridos até à data. Na mesma altura apareceram os primeiros consórcios entre empresas americanas e europeias em programas de investigação e desenvolvimento dos aerogeradores eólicos.

As investigações potenciaram o desenvolvimento da indústria de energia eólica, começando pelos aerogeradores de dimensões muito reduzidas. No início dos anos 80 nos EUA e na Europa instalaram-se os primeiros aerogeradores comerciais com dimensões entre os 10 e 20 metros de diâmetro e potência de 50 a 100 kW.

O grande investimento privado na energia eólica originou um rápido desenvolvimento da tecnologia. Em 1987 a potência instalada no mundo era de 1,5 GW em cerca de 15000 aerogeradores, com diâmetros entre os 15 e os 25 metros. Os bons resultados obtidos com aerogeradores mais pequenos, em conjunto com as investigações efetuadas, levaram a que a dimensão dos aerogeradores eólicos comerciais não tenha parado de crescer. No início dos

anos 90 a capacidade dos aerogeradores era cerca de 300 kW e atualmente já se situa na gama entre os 1,5 MW e os 10 MW.

Do ponto de vista económico e ambiental o aumento do tamanho dos aerogeradores revela-se vantajoso. Quanto maior for a potência unitária por aerogerador mais energia é produzida, e melhor aproveitadas são as infraestruturas elétricas e de construção civil. Para a mesma potência, atualmente, são necessários menos rotores em movimento, logo, o seu impacto visual é inferior.

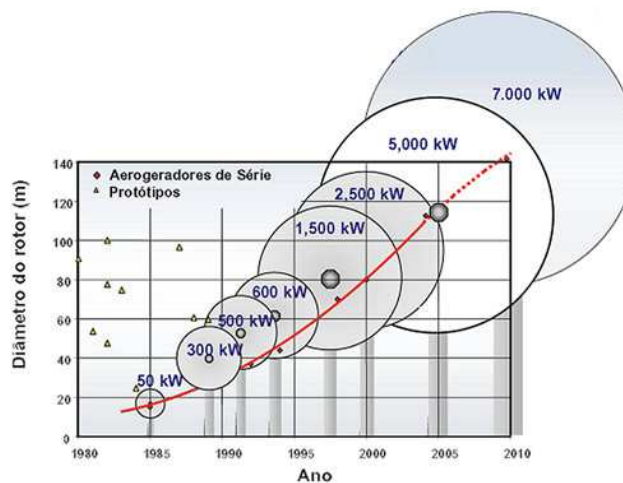


FIGURA 2.1 - EVOLUÇÃO DA DIMENSÃO DOS AEROGERADORES AO LONGO DO TEMPO [3]

As ofertas comerciais demonstram uma uniformização das opções básicas de projeto, designadamente, os aerogeradores de eixo horizontal relativamente aos aerogeradores verticais e os rotores de 3 pás (cerca de 90%) em relação aos de duas.

Apesar das convergências citadas anteriormente, subsiste ainda algumas questões de projeto não consensuais. As matérias empregues no fabrico de pás e torre, o tipo de rotor, o sistema de controlo de potência para velocidades do vento acima da normal, o tipo de gerador elétrico, o modo de exploração diverge entre os vários fabricantes, existindo características muito particulares de aerogerador de diferentes fabricantes [8].

2.3. CONSTITUIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS AEROGERADORES

A energia captada do vento é convertida em energia mecânica através de um aerogerador eólico. Esta energia é depois transformada em eletricidade através de um gerador elétrico.

Um aerogerador é um sistema constituído pelo rotor onde estão acopladas as pás, pela *nacelle* e pela torre.

2.3.1. TIPOS DE AEROGERADORES

A dimensão dos aerogeradores eólicos depende principalmente da potência pretendida. Desta forma, quanto maior a potência pretendida, maior deverá ser o aerogerador eólico. Atualmente a potência média ronda os 2,5 MW, já existindo, no entanto, aerogeradores de 10 MW. A potência do aerogerador é influenciada pela dimensão das pás, o que influencia a altura da instalação.

Nem todos os aerogeradores eólicos são iguais. Basicamente existem dois tipos aerogerador de eixo vertical e de eixo horizontal.

Os aerogeradores com rotor de eixo vertical dispensam mecanismos de apoio para as variações da direção do vento, captando-o em qualquer direção. Constituem normalmente sistemas de complexidade de projeto menor. Este tipo de aerogerador eólico é normalmente usado em instalações de baixa potência instalada, tal como o bombeamento de água em zonas rurais. A figura 2.2 apresenta um aerogerador eólico de eixo vertical.

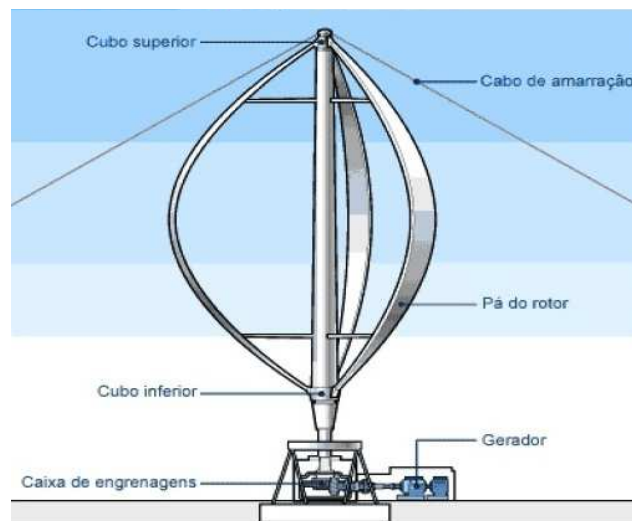


FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO DE UM AEROGERADOR EÓLICO DE EIXO VERTICAL [9]

Os aerogeradores de eixo horizontal são os mais conhecidos e os mais utilizados. Constituídos por uma torre, uma *nacelle* e um rotor onde estão ligadas três pás aerodinâmicas que podem ser orientadas de acordo com a direção do vento.

Esta disposição necessita de um mecanismo que permita o posicionamento do eixo do rotor em relação à direção do vento, para um melhor aproveitamento global, principalmente onde exista muita mudança na direção dos ventos.

Na figura 2.3 está representado um aerogerador eólico de eixo horizontal.



FIGURA 2.3 - REPRESENTAÇÃO DE UM AEROGERADOR EÓLICO DE EIXO HORIZONTAL [10]

As vantagens dos aerogeradores de eixo vertical são:

- Não necessitam de sistemas orientação;
- Os elementos que requerem manutenção podem situar-se ao nível do solo;
- Não requerem mecanismos de mudança de velocidade, pois não são utilizados em aplicações que necessitam de velocidade angular constante.

As vantagens dos aerogeradores de eixo horizontal são:

- Maior rendimento;
- Maior velocidade de rotação (caixas multiplicadoras simples);
- Menor superfície das pás para a mesma área de varrimento;
- Podem ser instaladas a alturas elevadas e em zonas de velocidades de vento superiores.

2.3.2. COMPONENTES DO AEROGERADOR

Existem várias modelos e tecnologias de aerogeradores, sendo que os mais usuais são os de eixo ou rotor horizontal com 3 pás. De entre eles existem 3 tecnologias de conversão e controlo, conforme se encontram apresentados na figura 2.4.

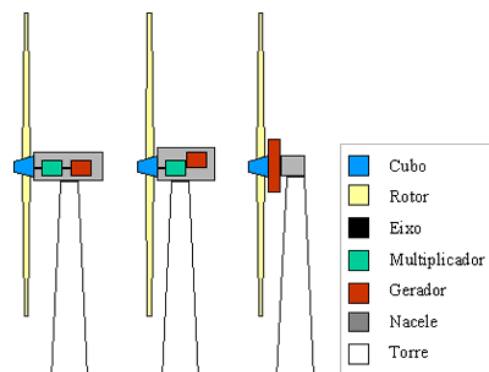


FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO DA CONSTITUIÇÃO DE UM AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL [11]

Os aerogeradores da figura 2.4 são caracterizados pelo tipo de *nacelle* e tipo de gerador que usam. O primeiro da figura representa um aerogerador cujo rotor do gerador (assíncrono duplamente alimentado) está ligado às pás através de uma caixa multiplicadora e tem uma velocidade de rotação constante. O segundo representa o mesmo mas com um gerador de indução, de velocidade variável. Finalmente existem os aerogeradores sem caixa multiplicadora cujo gerador é constituído por multi-pólos.

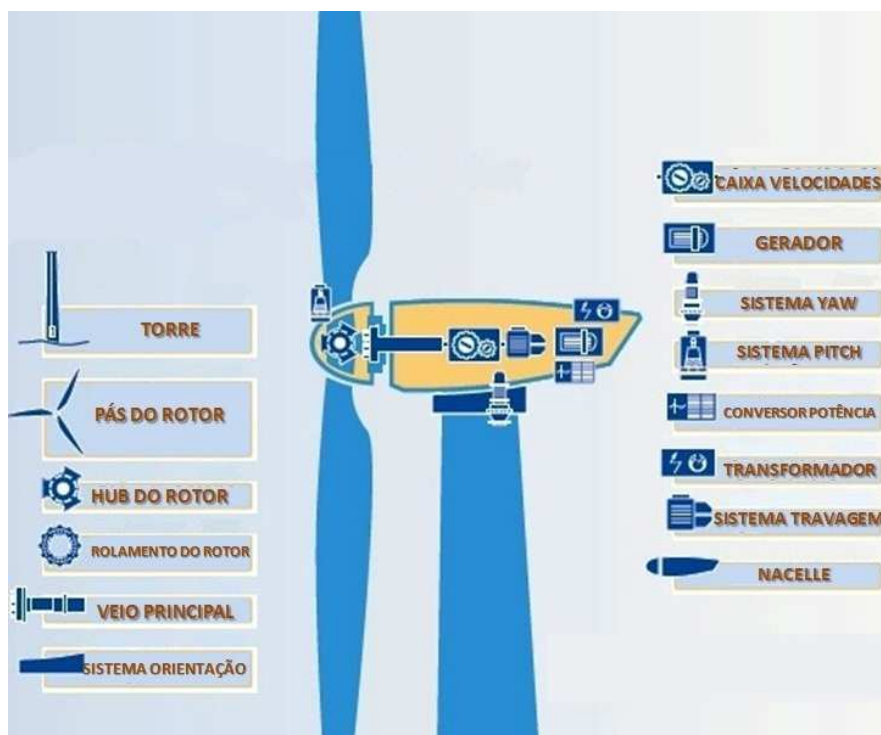


FIGURA 2.5 – ESQUEMA DE UM AEROGERADOR TÍPICO [11]

Torre

Denomina-se por torre o elemento que apoiado sobre as fundações sustenta o resto dos componentes do aerogerador. Existem diferentes tipos de torres, sendo as torres tubulares metálicas e as torres de anéis de betão as mais utilizadas.

Em geral, os aerogeradores de grande potência utilizam torres tubulares metálicas. Como a velocidade do vento aumenta conforme nos afastamos do nível do solo é importante dispor de torres altas [12]. Uma turbina moderna de 2 MW tem, normalmente, uma torre de 64 a 72 metros.

Nacelle

Denomina-se por *nacelle* o conjunto situado sobre a torre, contendo os componentes chaves do aerogerador, incluindo entre outros equipamentos, o veio principal, o travão de disco, a caixa multiplicadora (quando existe), o gerador elétrico e o mecanismo de orientação [13].

Rotor

O rotor do aerogerador é composto pelas pás e pelo cubo do rotor. As pás são encarregues de captar o vento e transmitir a potência através do cubo do rotor. A dimensão das pás está relacionada com a potência do gerador, a pá de um pequeno aerogerador de menos de 1 kW pode ser de um metro, a de um aerogerador de 1 MW mede cerca de 27 metros e para aerogeradores de maior potência pode ultrapassar os 60 metros.

A forma da pá é fruto de um complicado desenho, sendo as suas secções variáveis em função da distância à base. A aerodinâmica das pás permite que a velocidade na ponta da pá possa ser 8 vezes maior que a velocidade do vento.

Sistema de Orientação

O objetivo do sistema de orientação é manter o aerogerador direcionado de frente para o vento, de modo a maximizar a potência produzida. Para captar a intensidade e direção do vento existe um anemómetro e um sensor de direção (cata-vento). Quando o cata-vento deteta a alteração da direção do vento, o sistema de controlo interpreta esses dados e dá ordem ao sistema de orientação para rodar o conjunto *nacelle*-rotor.

Normalmente, o aerogerador orienta-se poucos graus de cada vez, quando o vento muda de direção. As velocidades de rotação do conjunto são baixas, normalmente meio grau por segundo [14, 15].

Sistema de Potência

A energia eólica captada pelas pás do aerogerador tem que ser transmitida ao gerador elétrico, que transforma a energia mecânica em energia elétrica. Esta transmissão faz-se através do denominado sistema de potência, que é composto por veio principal, caixa multiplicadora e veio secundário. O veio principal, ou lento, é o veio que está unido ao cubo do rotor e por isso roda à mesma velocidade que o rotor.

Gerador

Um gerador é uma máquina que converte a energia mecânica transmitida ao veio em energia elétrica, através do entreferro do gerador. Os geradores mais comuns são de dois tipos, assíncronos e síncronos.

Os geradores assíncronos são os mais utilizados devido à sua simplicidade, baixa manutenção e menor custo. Os geradores síncronos, apesar de o custo

ser maior, têm uma maior possibilidade de regulação quando existem perturbações na rede, comportando-se de uma forma mais estável.

Um denominador comum que ambos têm é a relação entre a velocidade de rotação e a frequência da tensão gerada nos terminais do gerador [16].

Gerador Assíncrono

Sob o ponto de vista construtivo, esta máquina rotativa é a mais robusta, com pouca manutenção e preço razoável. Tomando o seguinte exemplo, se a velocidade de sincronismo (velocidade do campo estatórico) é 1500 rpm, o rotor rodará por si mesmo a uma velocidade de, 1420 rpm. A diferença neste tipo de geradores, é a necessidade da existência de correntes no rotor, sendo estas as que provocam um binário. A diferença chama-se deslizamento [17]. Os geradores assíncronos podem ser de dois tipos, de rotor de gaiola de esquilo (ou curto-circuito) ou rotor bobinado.

Rotor de Gaiola de esquilo

O rotor é formado por uma serie de lâminas ao longo da sua periferia curto-circuitadas nos extremos através de anéis condutores. Nas máquinas pequenas as lâminas frequentemente embutidas em chapas de ferro formam o núcleo do rotor.

A grande vantagem deste tipo de máquina é a manutenção reduzida a comprovar através do desgaste dos rolamentos. Tem a desvantagem de não ser possível alterar nenhuma característica elétrica com o objetivo de variar a velocidade ou potência.

Tem a desvantagem de necessitar da colocação de condensadores externos para compensar o consumo de energia reativa do próprio gerador [16].

Na figura 2.6 é apresentado o gerador de indução de gaiola de esquilo.

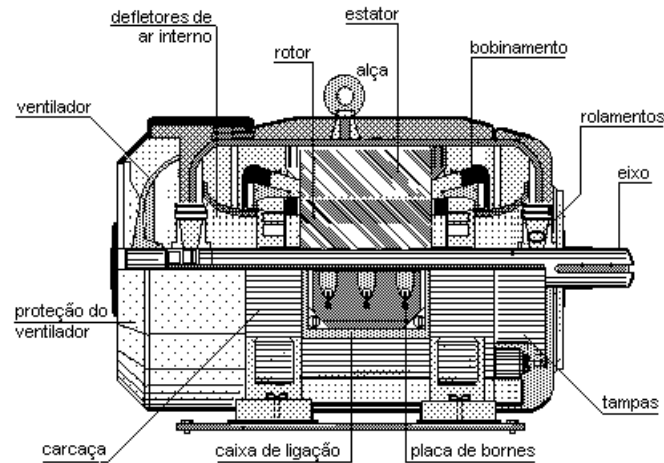


FIGURA 2.6 – GERADOR DE INDUÇÃO DE GAIOLA DE ESQUILO [18]

Rotor bobinado

Possui um enrolamento semelhante ao do estator, cujos terminais estão ligados a anéis metálicos isolados, montados sobre o veio, sendo a corrente conduzida ao exterior através de escovas de carbono que deslizam sobre os anéis [16].

O objetivo desta ligação é poder modificar os parâmetros da impedância do rotor para assim variar as características do binário, deslizamento, velocidade, fator de potência e intensidade.

Existem vários métodos para modificar os parâmetros elétricos do rotor, entre eles a “modificação do deslizamento por troca das características rotóricas”, estas são:

- Variação da resistência rotórica;
- Modificação da corrente rotórica;
- Injeção de tensões de diferentes frequências através de conversores estáticos para fazer trabalhar a máquina em regime hipersíncrono.

A figura 2.7 apresenta um exemplo de um gerador assíncrono de rotor bobinado.



FIGURA 2.7 – GERADOR ASSÍNCRONO DE ROTOR BOBINADO [19]

Geradores síncronos

Este tipo de máquinas, utilizam um sistema multipolar para criar o campo girante principal. Estas máquinas podem ser de ímanes permanentes ou de núcleos de ferro bobinados.

Se os enrolamentos do indutor (rotor) forem alimentados por uma fonte de tensão contínua e a máquina rodar a uma determinada velocidade, manifesta-se uma tensão no induzido (estator) que será proporcional à velocidade de rotação e à corrente do indutor.

Esta tensão alternada terá uma frequência que dependerá da velocidade de rotação da máquina e do número de pares de pólos.

Aplicando uma corrente contínua no indutor através de uma fonte, podem modificar-se dois parâmetros: a tensão nos terminais do alternador e a potência reativa entregue à rede. A primeira pode ser modificada quando o alternador está desacoplado da rede ou quando esta seja baixa. A segunda pode ser modificada quando o alternador está acoplado a uma rede suficientemente forte, de modo a não ser possível modificar a tensão, de tal forma que, com um

sistema de controlo adequado, pode-se variar a potência reativa e consequentemente o fator de potência, no ponto de ligação do aerogerador. Esta situação é importante já que evita a colocação de baterias de condensadores para suportar potências reativas.

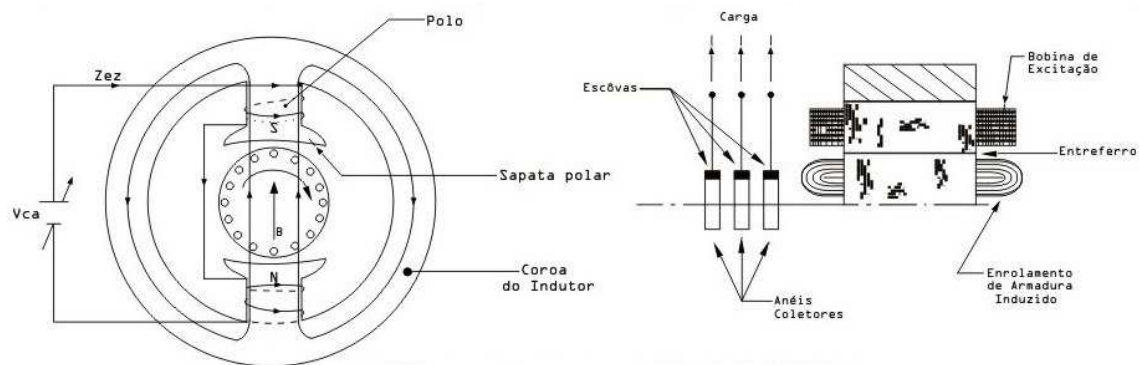


FIGURA 2.8 – ASPETO CONSTRUTIVO DO GERADOR SÍNCRONO [20]

Uma característica importante é o funcionamento em sistema isolado; isto é, quando acontece uma falha na tensão da rede, o aerogerador está preparado para funcionar de forma autónoma, produzindo energia localmente. Existindo um bom sistema de controlo, sem se desligar da rede, pode fornecer energia de forma transitória quando existirem baixas de tensão devido a perturbações. Utilizam-se principalmente em aerogeradores de alta potência [17].

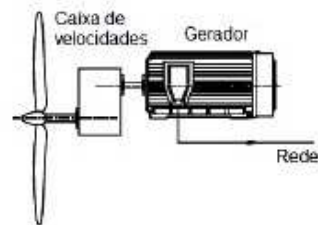
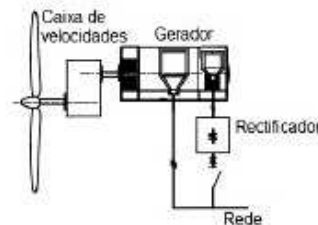
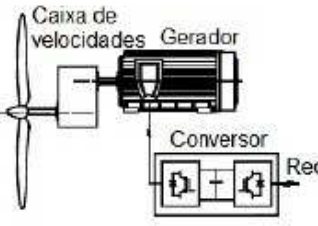


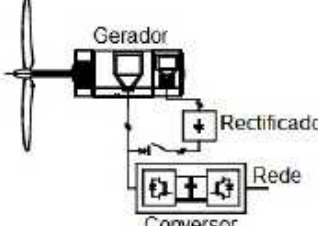
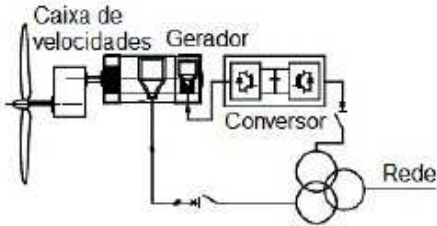
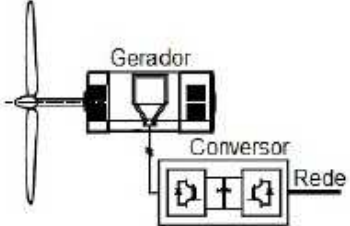
Ligações dos Geradores para controlo da velocidade

Existe a possibilidade da velocidade do rotor ser fixa ou variável. Os geradores elétricos têm características que permitem implementar diferentes tipos de controlos em combinação com a eletrónica de potência [21].

Na tabela 2.1 apresenta-se as combinações possíveis referentes à ligação dos geradores. Na coluna da esquerda estão representados os geradores assíncronos e na direita os geradores síncronos.

O sistema de regulação de potência usado nos aerogeradores é extremamente importante, pois é este que determina o grau de estabilidade e qualidade da energia entregue à rede elétrica. Deve-se ter em conta o nível de emissão de harmónicos gerados por este regulador de potência.

TABELA 2.1 - ESQUEMATIZAÇÃO DAS TOPOLOGIAS DE LIGAÇÃO DOS GERADORES

Geradores Assíncronos	Geradores Síncronos
<p>A.1 - Ligação directa à rede eléctrica</p> 	<p>S.1 - Ligação directa à rede eléctrica</p> 
<p>A.2 - Ligação à rede através de conversor CA/CC/CA</p> 	<p>S.2 - Ligação à rede através de inversor CA/CC/CA</p> 
<p>A.3 - Controlo dinâmico do Binário</p> 	<p>S.3 - Ligação à rede através do conversor CA/CC/CA e sem caixa de velocidades</p> 
<p>A.4 - Gerador duplamente alimentado</p> 	<p>S.4 - Excitação de ímãs permanentes e ligação à rede através de inversor CA/CC/CA</p> 

Quanto ao tipo de ligação dos geradores, existem características particulares conforme descrito na tabela 2.2.

TABELA 2.2 - CARACTERÍSTICAS DAS LIGAÇÕES DOS GERADORES

Geradores Assíncronos		Geradores Síncronos	
Configuração	Principal Característica		Configuração
A.1 - Ligação directa à rede eléctrica	Consome potência reactiva	Controla a potência reactiva	S.1 - Ligação directa à rede eléctrica
A.2 - Ligação à rede através de conversor CA/CC/CA	Possível controlo da potência reactiva (depende do conversor)	Possível controlo da potência reactiva (depende do conversor)	S.2 - Ligação à rede através de inversor CA/CC/CA
A.3 - Controlo dinâmico do Binário	Consome potência reactiva	Possível controlo da potência reactiva (depende do conversor)	S.3 - Ligação à rede através do conversor CA/CC/CA e sem caixa de velocidades
A.4 - Gerador duplamente alimentado	Controlo do factor de potência	Possível controlo da potência reactiva (depende do conversor)	S.4 - Excitação de ímans permanentes e ligação à rede através de inversor CA/CC/CA

Controlo de potência

Os aerogeradores estão projetados para produzir energia elétrica da forma mais eficiente possível. Assim sendo, estão geralmente projetados para trabalhar no máximo da sua potência para velocidades de vento que rondam os 15m/s. Não se projetam aerogeradores que maximizem o seu rendimento para ventos fortes, já que estes não são comuns [22].

No caso de ventos mais fortes é necessário dispensar parte do excesso da energia do vento para evitar danos na estrutura do aerogerador. Em consequência, todos os aerogeradores estão projetados com algum tipo de controlo de potência. Existe duas formas de efetuar o controlo em segurança nos aerogeradores modernos, que são o ângulo de passo e a perda aerodinâmica.

A. Regulação por mudança do ângulo de passo das pás (*Pitch Controlled*)

Nos aerogeradores de regulação por mudança do ângulo de passo, o controlador eletrônico do aerogerador verifica, com uma determinada frequência, a potência produzida. Quando esta alcança um valor demasiado elevado, o controlador envia uma ordem ao mecanismo de mudança do ângulo de passo, que imediatamente faz rodar as pás do rotor ligeiramente. Na perspetiva contrária, as pás voltam a virar-se contra o vento quando este diminui [15].

As pás do rotor devem ser capazes de rodar em torno do eixo longitudinal, variar o ângulo de passo. Durante a operação, as pás rodam uma fração de grau de cada vez.

O desenho de aerogeradores controlados por mudança do ângulo de passo requer uma engenharia muito desenvolvida, para assegurar que as pás rodam exatamente o ângulo desejado. Neste tipo de aerogeradores, o controlador permite uma rotação das pás de poucos graus manter um ângulo ótimo que proporcione o máximo rendimento para todas as velocidades de vento.

Na figura 2.9 é representado o ângulo de passo da pá.

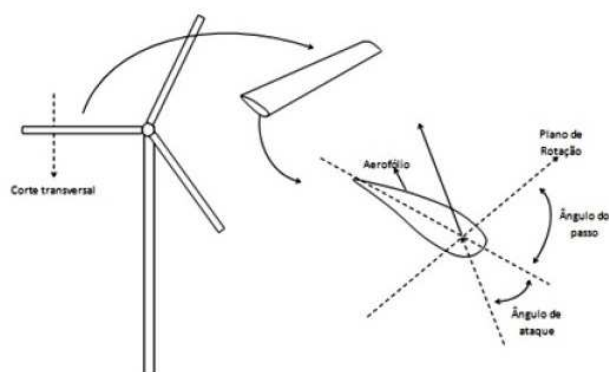


FIGURA 2.9 – ÂNGULO DE PASSO E DE ATAQUE [15]

B. Regulação passiva por perda aerodinâmica (*Stall Regulation*)

Os aerogeradores de regulação passiva por perda de aerodinâmica têm as pás do rotor unidas ao cubo com um ângulo fixo.

O perfil da pá é aerodinamicamente desenhado para assegurar que, no momento em que a velocidade do vento seja demasiado elevada, criará turbulência na parte da pá que não apanha vento. Esta perda de força de sustentação evita que a força ascendente da pá atue sobre o rotor.

Conforme aumenta a velocidade real do vento no local, o ângulo de ataque da pá do rotor também aumenta, até chegar ao ponto de começar a perder sustentação.

A pá do rotor de um aerogerador regulado por perda aerodinâmica, está ligeiramente torcida ao longo do eixo longitudinal. Esta situação serve para assegurar que a pá perde sustentação de forma gradual, quando a velocidade do vento alcança o valor crítico.

A principal vantagem da regulação por perda aerodinâmica é a de evitar as partes móveis do rotor e um complexo sistema de controlo. Por outro lado, a regulação por perda aerodinâmica representa um problema de desenho aerodinâmico muito complexo, influenciando o desenho da dinâmica estrutural de todo o aerogerador, para evitar as vibrações provocadas pela perda de sustentação [15].

Cerca de um terço dos aerogeradores que atualmente estão instalados em todo mundo são máquinas de regulação por perda aerodinâmica.

A figura 2.10 apresenta as forças de arrasto e sustentação na pá.

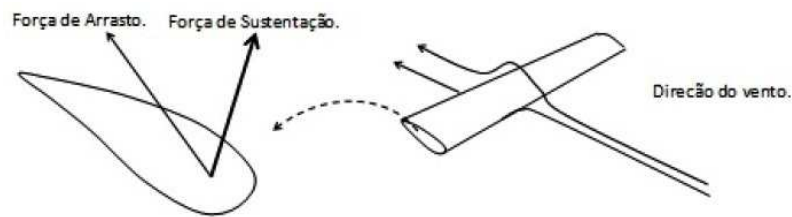


FIGURA 2.10 – FORÇAS DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO [15]

2.4. LIGAÇÃO DOS PARQUES EÓLICOS À REDE ELÉTRICA

A energia elétrica em Portugal é em grande parte produzida através das centrais termoelétricas. Portugal não tem recursos conhecidos de petróleo ou gás natural e os recursos de carvão estão extintos. Adicionando estes factos à escalada constante do preço do petróleo, Portugal vê-se confrontado com a necessidade de procurar novas formas alternativas de produção de energia elétrica, recorrendo à promoção e incentivo à utilização das energias renováveis.

Em 1988 o estado português viu-se na necessidade de regular a produção de energia elétrica pelos produtores independentes, publicando a primeira legislação referente a esse tema.

O Decreto-Lei (DL) n.º189/88 de 27 de Maio estabeleceu as regras aplicáveis à produção de energia elétrica a partir de recursos renováveis e à produção combinada de calor e eletricidade.

A criação do mercado interno da energia conduziu à aprovação de diretivas que introduziram profundas reformas liberalizadoras na forma como esse setor funciona. Por outro lado, as crescentes preocupações com a defesa do ambiente, a nível global, tornam necessário um maior estreitamento das políticas energéticas e ambiental, de forma a viabilizar o cumprimento dos compromissos internacionais que se avizinham, nomeadamente em matéria de limitação das emissões dos gases que provocam o efeito de estufa, em resultado da implementação do Protocolo de Quioto [8, 23].

Com o DL n.º 168/99 de 18 Maio é efetuada a revisão do DL n.º 189/88, de 27 de Maio, com a redação que lhe foi dada pelo DL n.º 313/95, de 24 de Novembro, criando um novo impulso ao desenvolvimento dos recursos renováveis, contribuindo para uma mais ampla utilização das fontes endógenas de energia e permitindo uma maior articulação entre as políticas da energia e do ambiente, sendo criado o regulamento para autorização das instalações de produção de energia elétrica integrados no Sistema Elétrico Independente (SEI), baseado na utilização de recursos renováveis.

O enquadramento legal da produção de energia elétrica a partir de energias renováveis encontra-se no DL n.º 189/88, de 18 de Maio, com a redação dada pelo DL n.º 168/99, de 18 de Maio, e pelo DL n.º 538/99, de 13 de Dezembro.

Contudo, a execução dos objetivos destes diplomas tem-se defrontado com o constrangimento de capacidade das redes do Sistema Elétrico Público (SEP) para receção da energia elétrica proveniente dos centros electroprodutores do SEI, dificuldade que conduz frequentemente à inviabilização dos projetos apresentados pelos promotores [24].

Neste contexto, o governo português aprovou em 2001 o DL n.º 312/2001 de 10 de dezembro, considerando necessário para se alcançar maior garantia de acesso às redes do SEP dos produtores em regime especial, procedimentos administrativos e requisitos técnicos eficientes que assegurem a igualdade de tratamento, a objetividade e a transparência das decisões.

A situação da energia eólica em Portugal atualmente é completamente diferente, depois de se assistir a um dinamismo e crescimento durante os últimos anos, a estagnação começou a verificar-se após 2010. Os principais fatores para o acentuado desenvolvimento da energia eólica em Portugal foram as várias legislações aprovadas e os vários incentivos a essa produção. Com a alteração do cenário macroeconómico a nível global e principalmente a nível nacional o investimento em novas instalações reduziu-se. Na atualmente encontram-se em fase de conclusão apenas projetos já aprovados.

Neste sentido em janeiro de 2012 o Governo decidiu suspender, com efeitos imediatos, a atribuição de potências de injeção na Rede Elétrica de Serviço Público (RESP), prevendo ainda regulamentar as situações de exceção em "casos de relevante interesse público". A decisão suspende a atribuição de pedidos de informação prévia, a primeira fase do processo para a atribuição de potência para a produção de energia elétrica a partir de energias renováveis. Esta decisão decorre das orientações de política energética previstas no programa do governo e que apontam para a necessidade de ponderar e reavaliar o enquadramento legal da produção de eletricidade em regime especial [24].

2.4.1. REQUISITOS TÉCNICOS DAS LIGAÇÕES À REDE

As condições técnicas a que deve obedecer a ligação de instalações de produção em regime especial estão legisladas em vários DLs e Regulamentos. No que respeita aos DLs o DL 189/88, DL 168/99 e DL 312/2001 são os mais importantes. Em termos de condições necessárias às interligações, os regulamentos seguintes contemplam toda a informação necessária:

- Regulamento da Rede de Transporte;
- Regulamento da Rede de Distribuição;
- Regulamento de Acesso à Rede e às Interligações;
- Guia Técnico das Instalações de Produção Independente de Energia Elétrica;
- Regulamento de Operação das Redes;
- Regulamento de Qualidade de Serviço.

Em seguida são citados alguns pontos essenciais no que respeita aos requisitos necessários, para um parque eólico poder ligar-se à RNT (Rede Nacional de Transporte) e RND (Rede Nacional de Distribuição) [24].

2.4.2. REQUISITOS TÉCNICOS

Os requisitos técnicos estabelecem os condicionamentos técnicos básicos que a construção e exploração das instalações licenciadas devem respeitar, os objetivos são:

- Garantir os critérios de segurança aprovados pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) e pela Entidade Reguladora do Sector Elétrico (ERSE);
- Assegurar a manutenção da qualidade do serviço;
- Medir adequadamente as grandezas de que depende a faturação da energia fornecida pelo produtor;
- A ligação das instalações à rede recetora deve ser executada de acordo com as normas de projeto e de construção aplicáveis;
- O ramal de ligação deve ser executado por prestadores de serviço qualificados;
- O gestor da rede pública pode propor o sobredimensionamento do ramal de ligação, com o objetivo de obter solução globalmente mais económica para o conjunto das utilizações possíveis do ramal, participando nos respetivos encargos de constituição;
- No exercício da sua atividade, compete ao produtor observar as disposições legais aplicáveis em matéria de ambiente, adotando, para o efeito, as providências adequadas à minimização de impactes ambientais;
- A DGEG deve informar o gestor da rede pública das instalações que forem sendo autorizadas.

2.4.3. REQUISITOS TÉCNICOS GERAIS

Nas instalações de produção eólica os transformadores de interligação devem ter as ligações dos enrolamentos principais em estrela do lado da rede e em

triângulo do lado da instalação de produção, o neutro do enrolamento em estrela deve ser ligado rigidamente à terra.

O Operador de Rede de Transporte (ORT) indica que os transformadores de interligação das instalações de produção eólica podem ter de ser dimensionados de modo que a ligação do seu neutro à terra possa ser efetuada através de uma impedância limitadora.

As instalações de produção eólica devem suportar incidentes, sem se desligarem da rede, nas seguintes condições:

- Desvios de frequência entre 47,5 e 51,5 Hz;
- Componente inversa da corrente, até 5 % da corrente nominal;

As instalações de produção eólica, devem poder permanecer ligadas à rede para cavas de tensão decorrentes de defeitos trifásicos, bifásicos ou monofásicos sempre que a tensão no lado da rede esteja acima da curva apresentada na figura 2.11, não podendo consumir potência ativa ou reativa durante o defeito e na fase de recuperação da tensão. [25]

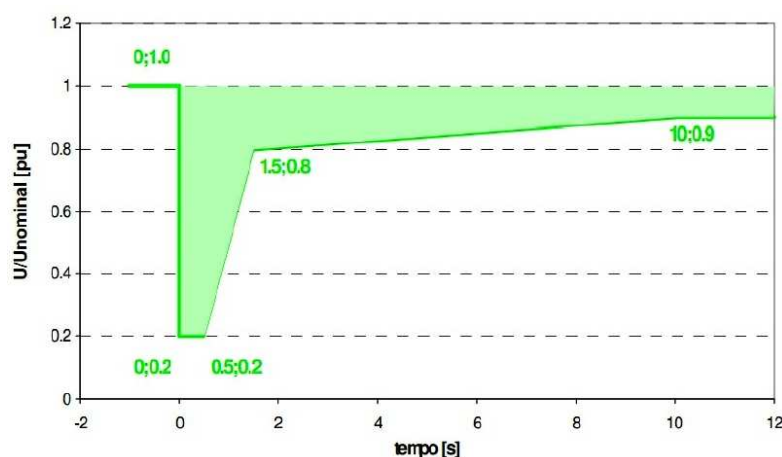


FIGURA 2.11 - CURVA TENSÃO-TEMPO DA CAPACIDADE EXIGIDA ÀS INSTALAÇÕES DE PRODUÇÃO EÓLICA PARA SUPORTAREM CAVAS DE TENSÃO NA SEQUÊNCIA DE DEFEITOS TRIFÁSICOS, MONOFÁSICOS E BIFÁSICOS [25]

Após a eliminação do defeito e início da recuperação da tensão do lado da rede, a potência ativa produzida deve recuperar de acordo com uma taxa de crescimento por segundo não inferior a 5% da sua potência nominal [25].

As instalações de produção eólica ligadas à rede devem fornecer potência reativa durante cavas de tensão, de acordo com a figura 2.12, proporcionando desta forma suporte para a tensão na rede.

O cumprimento desta curva de produção mínima de potência reativa durante afundamentos de tensão, pelas instalações de produção eólica deve iniciar-se com um atraso máximo de 50ms após a deteção da cava de tensão [25].

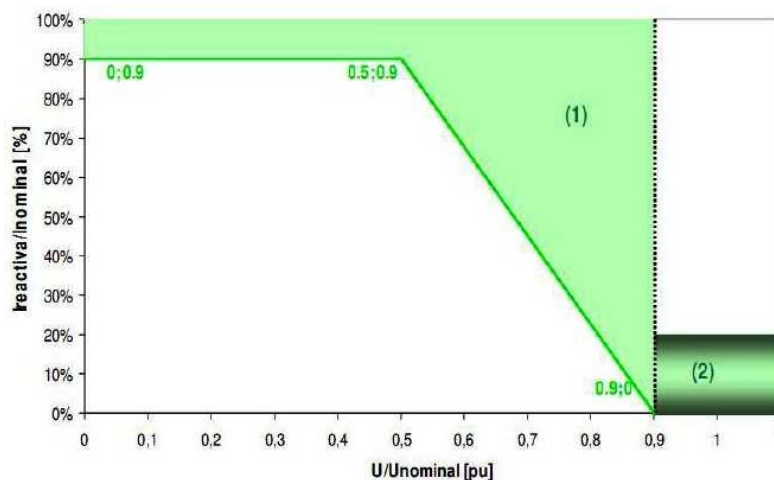


FIGURA 2.12 - CURVA DE FORNECIMENTO DE REATIVA PELAS INSTALAÇÕES DE PRODUÇÃO EÓLICA DURANTE CAVAS DE TENSÃO [25]

A zona 1 do gráfico da figura 2.12 correspondente ao regime de funcionamento em defeito e recuperação. O produtor eólico, na sequência de um defeito que provoque cavas de tensão superiores a 10%, deve cumprir a curva de produção mínima de potência reativa com um atraso máximo de 50ms após a deteção da cava de tensão.

A zona 2 correspondente ao regime de funcionamento normal, ao entrar nesta zona de fornecimento o produtor eólico deve regressar ao regime decorrente das regras de reativa em vigor.

O cumprimento dos requisitos anteriores é obrigatório para todos os promotores das instalações de produção eólica que venham a obter licença de exploração, devendo apresentar à DGEG e ao operador da rede, previamente à emissão da licença de exploração, a Declaração de Conformidade.

A Declaração de Conformidade é um documento onde o fabricante e o promotor assumem que os equipamentos instalados cumprem os requisitos focados anteriormente [25].

O fornecimento de energia reativa pelos parques eólicos ligados em Muito Alta Tensão (MAT) e Alta Tensão (AT) geridos e controlado pelo ORT, deve o produtor ter a capacidade de modular, a pedido daquele, o fornecimento de energia reativa no intervalo correspondente a uma tangente ($\text{tg } \phi$) de 0 a 0,2, conforme descrito na tabela 2.3 [25].

TABELA 2.3 - FORNECIMENTO DE ENERGIA REATIVA À REDE DE TRANSPORTE [25]

Tensão nominal no ponto de ligação	$\text{tg } \phi$	
	Horas CP	Horas VS
MAT	0,2	0
AT	0,2	0

Relativamente aos valores fixados, na tabela 2.4, para as quantidades de energia reativa, admite-se uma tolerância de $\pm 5\%$ da energia ativa no mesmo período [25].

TABELA 2.4 - FORNECIMENTO DE ENERGIA REATIVA À REDE DE DISTRIBUIÇÃO [25]

Tensão nominal no ponto de ligação	tg Φ	
	Horas CP	Horas VS
AT.....	0	0
MT (P > 6 MW).....	0	0
MT (P ≤ 6 MW).....	0,3	0
BT.....	0	0

2.5. CAPACIDADE DE SUPORTAR AS CAVAS DE TENSÃO - *RIDE-THROUGH FAULT*

Os requisitos de ligação à rede elétrica de transporte ou distribuição exigidos aos produtores de energia têm como finalidade a segurança e qualidade de serviço no que respeita ao equilíbrio entre a produção e o consumo.

Devido ao aumento da utilização de energia eólica para a produção de eletricidade, as potências instaladas até ao momento justificam a utilização da tecnologia no cumprimento dos requisitos impostos.

A imprevisibilidade de produção devido à intermitência do vento, flutuações de tensão e congestionamento dos nós deram origem a desafios no que respeita à exploração da rede, de modo a garantir a estabilidade e qualidade da energia.

Na sequência dos problemas de rede associados à produção de eólica, existem procedimentos requeridos e em implementação que visam minimizar ou anular as falhas de rede, tais como o controlo da tensão e energia reativa, controlo primário de frequência, capacidade de despacho em caso de ser necessário limitar temporariamente a produção eólica em situação de emergência, e a capacidade de suportar cavas de tensão, *Ride-through Fault*, sendo esta capacidade um enorme desafio para os produtores eólicos e fabricantes de aerogeradores.

O sistema *Ride-through Fault*, presente na tecnologia dos aerogeradores, permite resistir a cavas de tensão resultantes de curtos-circuitos na rede elétrica [26, 27].

2.5.1. APLICAÇÃO DO SISTEMA *RIDE-THROUGH FAULT*

O *Ride-through Fault* foi exigido aos fabricantes de aerogeradores envolvidos nos últimos concursos para a instalação de novos parques eólicos em Portugal.

Ao *Ride-through Fault* está associada uma curva que define os valores mínimos de tensão em função do tempo, que deverão existir na interligação do parque eólico com a rede, sob pena de dar-se a saída de serviço do parque caso essa curva seja violada. Existe também uma curva de corrente reativa/tensão que deverá ser respeitada.

Na Europa foram definidas curvas de *Ride-through Fault* com diferentes características, quer de tempo, quer de tensão sendo que estas características têm como fundamento as proteções de rede, adotadas por cada um dos operadores nos diferentes países. O intervalo de tempo em que a tensão é mínima corresponde à duração máxima admitida para a permanência do aerogerador em serviço até que se verifique a eliminação do defeito.

A figura 2.13 apresenta as curvas de tolerância de tensão adotadas por alguns operadores de rede, incluindo o operador de rede em Portugal [26].

As condições presentes na 2.13 foram inicialmente definidas pela empresa alemã E.ON e desde então têm vindo a ser utilizadas como base na elaboração dos requisitos técnicos, adotados em outros países para lidar com este problema.

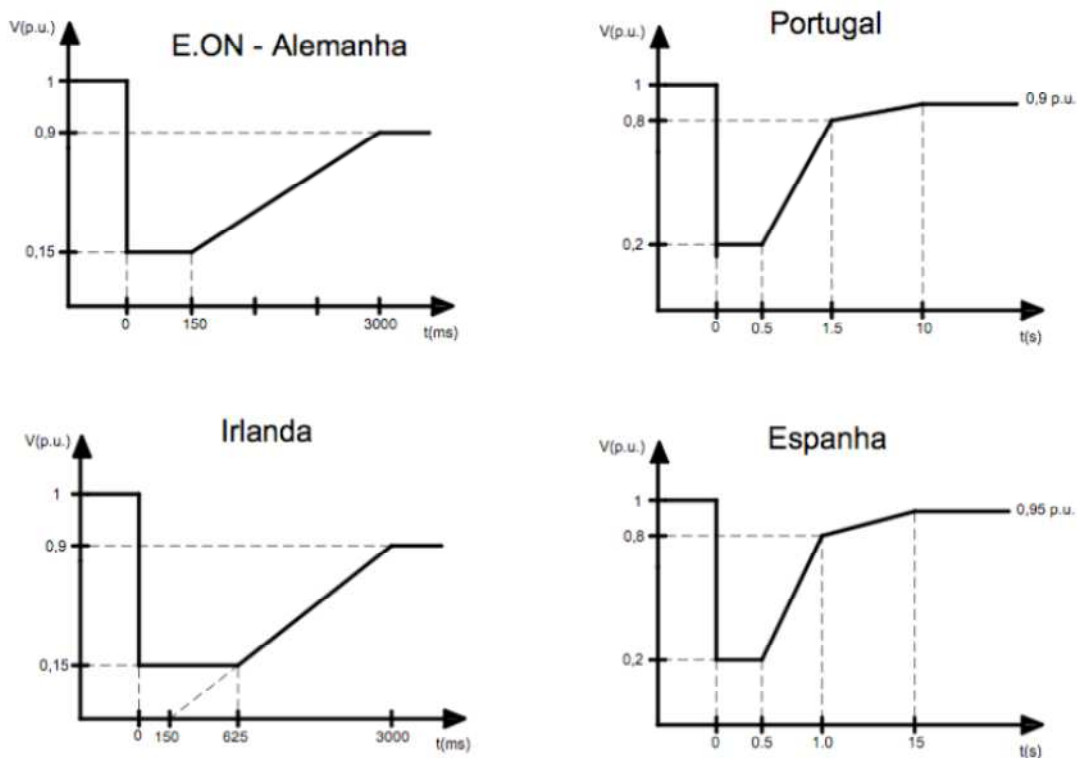


FIGURA 2.13 - CURVAS DE TOLERÂNCIA DE TENSÃO ADOTADAS POR DIFERENTES OPERADORES DE REDE [27]

2.5.2. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA *RIDE-THROUGH FAULT* EM PORTUGAL

Até à definição do *Ride-through Fault* em Portugal, um defeito que provocasse uma queda de tensão originava a atuação das proteções, retirando o parque eólico de serviço, sendo este novamente ligado após a eliminação do defeito.

No seguimento do crescimento da potência instalada nos atuais parques eólicos, situações que originem a saída de serviço dos parques podem provocar instabilidade no sistema elétrico, devido à perda de produção, o que levaria à quebra de equilíbrio entre consumo e produção. Deste modo, à semelhança do existente em outros países, implementou-se a tecnologia *Ride-through Fault* de modo a promover a estabilidade do sistema elétrico.

As condições de *Ride-through Fault* adotadas em Portugal tiveram origem no procedimento adotado pela empresa alemã E.ON, responsável pela gestão das

redes AT e MAT, em que foi definida uma curva de tensão acima da qual o sistema teria que se manter ligado à rede, sendo também, definido o tempo dentro do qual o defeito teria que ser eliminado.

A curva de *Ride-through Fault* para Portugal, representada na figura 2.14, define os valores mínimos de tensão em função do tempo que os parques eólicos sujeitos ao requisito do sistema, deverão ter após uma cava de tensão provocada por um defeito.

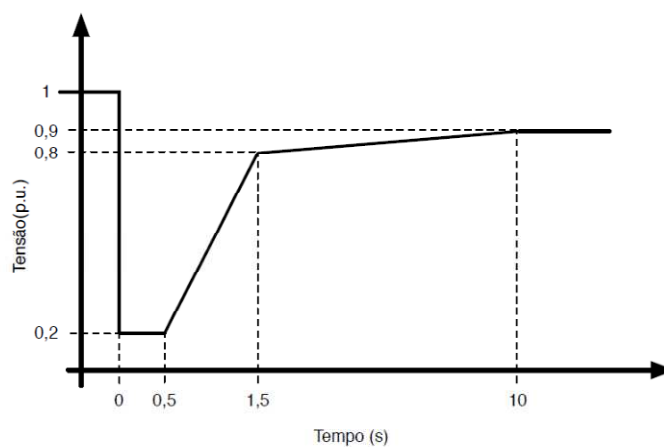


FIGURA 2.14 - CURVA DE TOLERÂNCIA DE TENSÃO EXIGIDA AOS PRODUTORES EM CASO DE CAVAS DE TENSÃO [25]

Durante as cavas de tensão acima da curva de *Ride-through Fault*, existe outro requisito exigido aos produtores eólicos [27].

Este requisito refere-se ao fornecimento de energia reativa por parte do parque eólico de modo a que este, durante as cavas de tensão mantenha o nível especificado de tensão no ponto de interligação.

2.6. CENTROS DE CONTROLO E DESPACHO DE PRODUÇÃO EÓLICA

O aumento da energia eólica no sistema elétrico acarreta um conjunto de desafios, operacionais e técnicos, que atravessam várias áreas desde os mercados, ao funcionamento dos parques eólicos, passando pela gestão das redes elétricas garantindo a sua segurança e estabilidade.

Controlar o vento é impossível, logo, capturar a força do vento é diferente de ser capaz de gerir e controlar a energia produzida pelos parques eólicos, com equipamentos de diferentes fabricantes e situados em locais dispersos. A capacidade de controlo, incluindo o envio de ordens de paragem e de arranque, bem como a limitação da energia produzida ao nível dos equipamentos no terreno, constitui uma obrigação regulamentar.

A multiplicação de parques eólicos, pelo território abrangido por cada operador de rede, tornou cada vez mais importante, para esse operador, a monitorização do seu comportamento. Ao mesmo tempo revelou-se impraticável fazer incidir a monitorização, por parte do produtor e do operador de rede, sobre cada parque eólico individualmente.

Começam então a emergir os CCDPEs, como necessidade dos promotores eólicos, por um lado, mas também pela necessidade de serem capazes de intermediar a comunicação técnica necessária com os despachos dos operadores de rede distribuição e transporte, a que os parques eólicos em questão se ligam.

Em Portugal já funcionam alguns CCDPEs. Alguns deles estão já ligados ao Despacho de Condução do operador de rede de transporte. A monitorização que isso possibilita, em conjunto com a ligação também prevista para breve com o Despacho da Distribuição, irá abranger toda a produção eólica ligada à MAT bem como à AT e média tensão (MT).

Uma arquitetura de sistema de controlo da energia eólica inovadora que emergiu recentemente, tira partido desta organização hierárquica de centros de

condução e despacho e conjuga-a com o interesse de se estruturar a multiplicidade de parques, uns já a operar e outros em construção ou ainda em projeto, em agregados que por um lado facilitaríamos uma previsão da sua produção (agregada) e que por outro lado se tornariam nos destinatários de primeira linha das instruções de despacho emitidas pelo operador de rede.

Na figura 2.15 é apresentada uma hierarquia de comando em que os CCDPEs se subordinam ao despacho central (do operador da rede de transporte ou distribuição) do ponto de vista da gestão técnica do Sistema Elétrico de Energia (SEE), e os parques eólicos aos CCDPEs [28, 29].

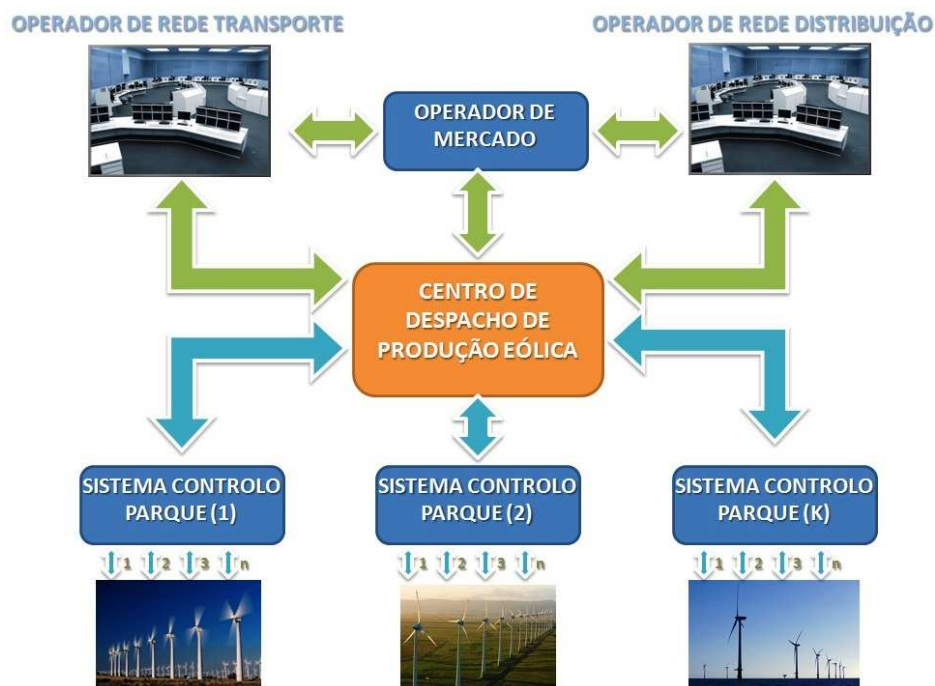


FIGURA 2.15 – HIERARQUIA DE COMANDO TÉCNICO ENTRE DESPACHOS

Esta hierarquização substitui as instruções do despacho central (do operador da rede de transporte ou distribuição) destinadas a parques individuais e veiculadas através dos CCDPEs por instruções concebidas para vários parques.

2.6.1. FUNCIONAMENTO DOS CENTROS DE CONTROLO E DESPACHO DOS PARQUES EÓLICOS

Os CCDPEs são recintos onde técnicos qualificados monitorizam todos os aerogeradores, torres meteorológicas e subestações de cada um dos parques eólicos, de um produtor ou de vários. São monitorizados o desempenho e a eficiência de cada aerogerador e observado cuidadosamente todos os estados e medidas das subestações e torres meteorológicas.

Comunicação entre os Aerogeradores/Subestação/Torre Meteorológica, o SCADA de Controlo e os Centros de Controlo e Despacho dos Parques Eólicos

Um elemento vital da operação é o sistema SCADA. Cada aerogerador tem um controlador lógico programável (PLC). Os sensores de velocidade do vento, direção do vento, velocidade de rotação e outras medidas/estados recolhem e transferem dados para o PLC. Todos os aerogeradores estão ligados ao SCADA do parque fornecido pelo seu fabricante.

No aerogerador existe uma ligação, na base da torre, à rede local do parque, normalmente efetuada por cabo, fibra ou em sistema transmissão sem fios, conforme esquematizado na figura 2.16.



FIGURA 2.16 – INFRAESTRUTURAS DE COMUNICAÇÕES

O tipo de comunicação usada na rede local entre os aerogeradores, torre meteorológica, subestação e o SCADA varia de parque para parque. Existe a possibilidade de usar quatro tipos de comunicação, serie, *ethernet*, *master/slave* e ponto-a-ponto.

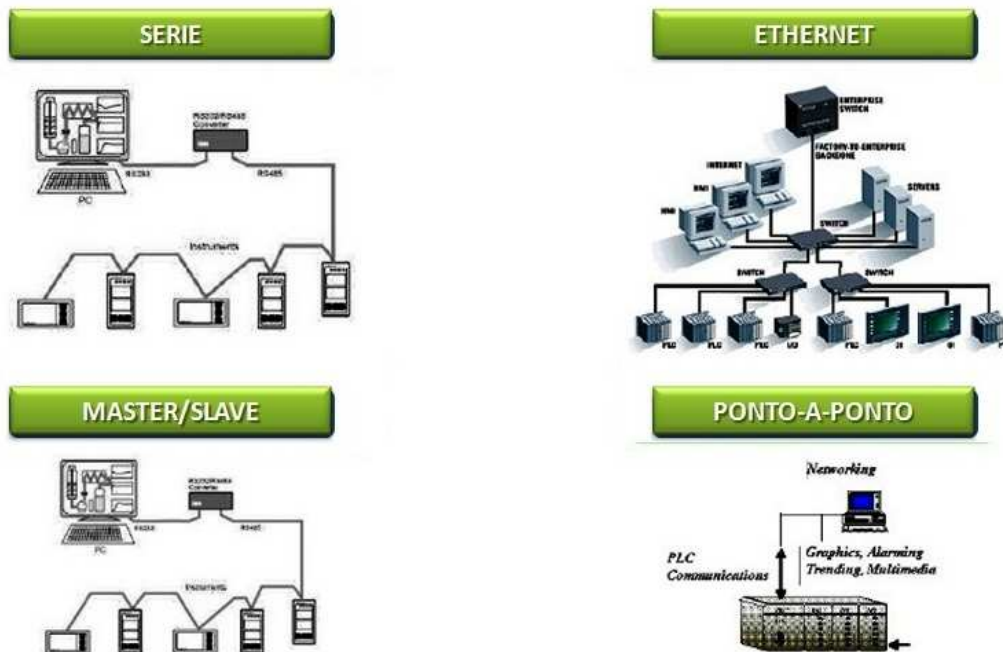


FIGURA 2.17 – TIPOS DE COMUNICAÇÕES

A topologia de comunicação usada nos parques eólicos para a comunicação da rede local entre os vários equipamentos e o SCADA pode ser bus, estrela, anel e em malha. No Anexo A é apresentado um exemplo de topologia aplicada num parque eólico.

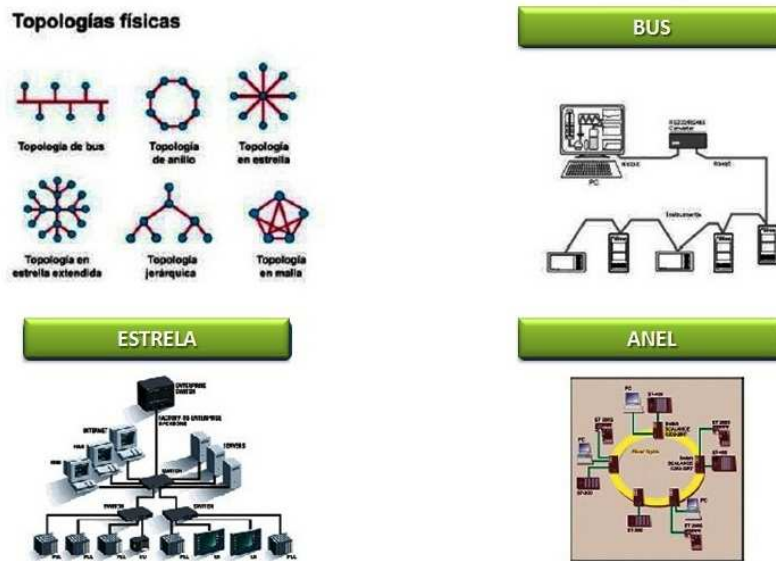


FIGURA 2.18 – TOPOLOGIAS DAS COMUNICAÇÕES

Inicialmente o acesso aos sistemas SCADAs dos aerogeradores e da subestação dos parques eólicos era efetuado em separado, tal como se apresenta com a linha a tracejado laranja, da figura 2.19. Alguns SCADAs dos aerogeradores integram informação da subestação e da torre meteorológica.

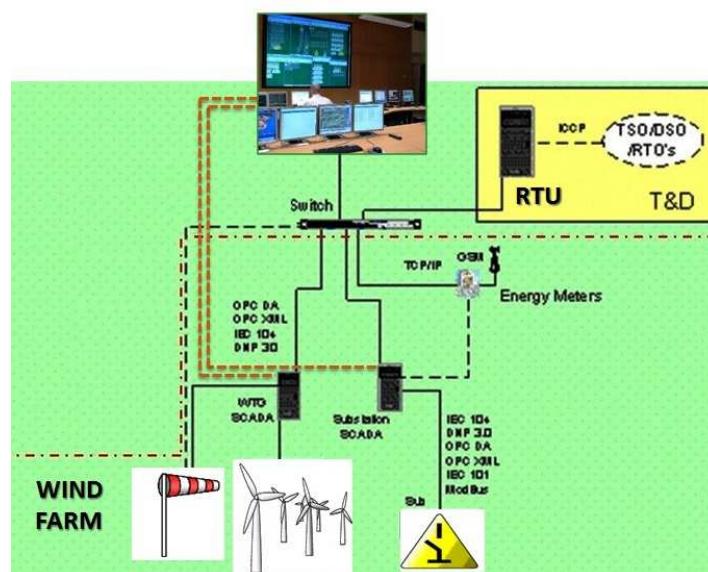


FIGURA 2.19 – COMUNICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE UM PARQUE EÓLICO COM O CCDPE

O acesso aos SCADAs fornecidos pelos fabricantes dos vários equipamentos existentes nos parques eólicos, em muitas situações só permite o acesso a um dos parques de cada vez, logo não permite a simultaneidade de monitorização.

Os vários fabricantes de aerogeradores e subestações fornecem o seu próprio controlo/sistema SCADA, este fato não satisfaz plenamente as necessidades de operacionalidade em tempo real dos CCDPEs.

Os operadores e proprietários dos parques eólicos, detentores de várias tecnologias de aerogeradores e subestações, têm à sua disposição um número elevado de diferentes SCADAs para monitorizar, tendo cada um deles especificações particulares, o que faz essa situação incomportável para os CCDPEs.

O uso de um sistema SCADA central permite não estar vinculado a nenhum fornecedor de PLC, de modo que opera independentemente do tipo de aerogerador e subestação.

A aplicação de um sistema SCADA central permite monitorizar num único sistema todos os aerogeradores, subestações e torres metereólogas, mesmo que, o fabricante seja diferente.

A rede local é ligada a uma unidade de controlo remoto (RTU) com um sistema de controlo que controla e recolhe dados, ajusta as configurações dos vários equipamentos e fornece recursos como alarmes, comandos e relatórios através do SCADA central.

A aquisição de dados oriundos dos aerogeradores, subestações e torres meteorológicas é realizada por RTUs instaladas em cada um dos parques eólicos. Em cada um dos parques ou conjunto de parques eólicos, é instalada uma RTU e infraestruturas de suporte associadas, que assegurarão localmente o *interface* com os sistemas já existentes de obtenção de sinal fornecidos pelos fabricantes de aerogeradores e subestação. A solução para a infraestrutura de servidores (RTUs) é implementada em todos os parques eólicos, satisfazendo as necessidades de protocolo, *OPC* ou *ModBus*, e *interfaces*, *Ethernet* ou *série*, com os sistemas existentes e com o sistema central.

O sistema SCADA presente na RTU comunica essa informação ao sistema SCADA central instalado no CCDPE, ao qual o parque eólico se encontra ligado. Nestes centros é realizada a supervisão e controlo dos diversos parques eólicos, através de um *interface* gráfico pertencente ao sistema SCADA. Na figura 2.20 é apresentado o esquema de funcionamento do SCADA central.

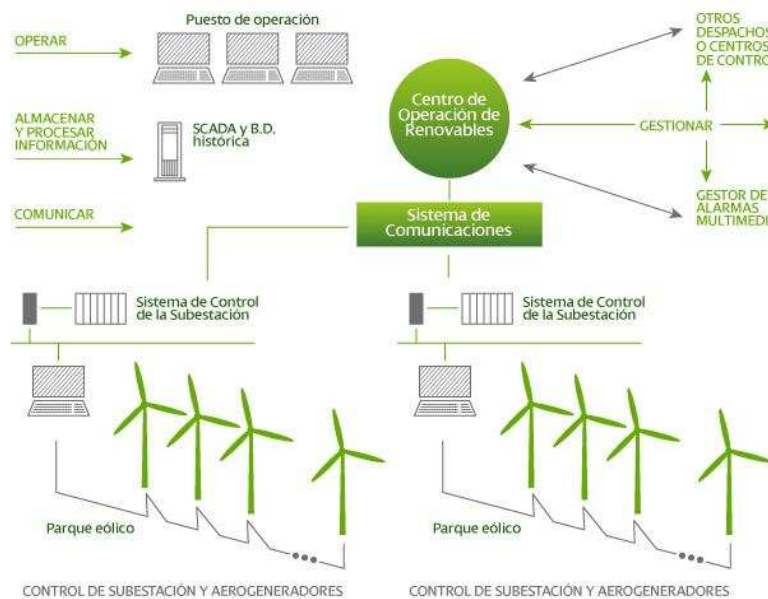


FIGURA 2.20 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SCADA CENTRAL DOS CENTROS DE CONTROLO E DESPACHO DE PRODUÇÃO EÓLICA [30]

O sistema central é uma tecnologia SCADA desenhada com o intuito de compatibilizar as mais avançadas tecnologias de protocolos.

Os modelos de dados orientados para a tecnologia eólica podem ser tratados através do sistema. Uma das características mais fortes deste sistema é a sua capacidade de integração, tratando-se de uma plataforma sobre a qual outras aplicações podem correr.

O sistema central recebe os dados enviados pelas RTUs presentes nos diversos parques eólicos. Deste modo, a sua base de dados corresponde à aglutinação das bases de dados de todos os parques eólicos.

2.6.2. OBJETIVOS, FUNÇÕES E BENEFÍCIOS DOS CENTROS DE CONTROLO E DESPACHO DE PRODUÇÃO EÓLICA

A centralização da gestão de parques eólicos permite aos Centros de Controlo e Despacho atingir os seguintes objetivos:

- Gestão remota mais eficiente dos aerogeradores maximizando a produção e mantendo a fiabilidade da rede elétrica;
- Monitorizar em tempo real o desempenho dos aerogeradores e diagnosticar falhas de modo a minimizar os custos de exploração e manutenção;
- Antecipar com maior precisão os padrões de produção, a partir de previsões de vento, aumentando a disponibilidade dos recursos e reduzindo os problemas de intermitência;
- Otimização de oportunidades de *Trading*.

Os Centros de Controlo e Despacho de Produção Eólica têm as seguintes funções:

- Análise da energia prevista/produzida;
- Determinação dos custos de indisponibilidade;
- Gestão otimizada da potência ativa e reativa, no que concede às limitações de potência;
- Supervisão e comando dos vários parques eólicos;
- Operação de incidências: detetar de imediato as incidências que ocorrem em qualquer instalação, providenciar a sua pronta resolução em coordenação com os serviços locais;
- Interação com os operadores de rede (Transporte e Distribuição): o produtor envia dados ao operador do sistema em tempo real;

- Registo e análise da informação operativa, para otimização da eficiência das instalações e operação das subestações e linhas de alta tensão, para garantir a evacuação da energia.

Os produtores de energia eólica recorrem aos Centros de Controlo e Despacho para assegurar os seguintes benefícios:

- Redução dos custos de operação e manutenção. Através da monitorização contínua e centralizada em tempo real diminuem as necessidades de equipas locais, permitindo uma otimização dos recursos e uma melhoria da qualidade.
- Melhoria da integração na rede. Melhora a comunicação com o operador da rede de transporte e com o operador da rede de distribuição, traduzindo numa melhoria substancial da operação do sistema elétrico.
- Melhoria da disponibilidade e maior eficiência. Com a monitorização contínua de cada instalação é possível aumentar a disponibilidade e melhorar a eficiência das instalações;
- Melhoria da gestão dos diferentes fornecedores (garantias, SLA, etc);
- Agregação eficiente do elevado volume de dados dos diversos sistemas;
- Suporte à integração dos sistemas externos de previsão de produção, manutenção e gestão das equipas locais.

CAPÍTULO 3 - APLICAÇÃO DAS REDES NEURONAIS NO CÁLCULO DA ENERGIA PRODUZIDA POR AEROGERADORES

3. APLICAÇÃO DAS REDES NEURONAIS NO CÁLCULO DA ENERGIA PRODUZIDA POR AEROGERADORES

As Redes Neuronais Artificiais (RNA), também designadas de Redes Neuronais, surgiram em 1943, pelo trabalho de McCulloch e Pitts [31], inspiradas no funcionamento do cérebro humano. Hoje constituem uma área de interesse da Inteligência Artificial, a par de métodos como os Algoritmos Genéticos, a Lógica Difusa, Sistemas Simbólicos e outros.

Em linhas gerais, as RNAs são modelos computacionais inspirados na biologia, constituídos por unidades de processamento (nós ou neurónios), ligações entre estes, algoritmos de treino e algoritmos de ativação [32].

De acordo com [33], as RNAs podem ser definidas da seguinte forma:

“Uma rede neuronal artificial é um processador massivamente distribuído em paralelo constituído por unidades de processamento simples, que tem a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para ser utilizado. Assemelha-se ao cérebro em dois aspetos:

- *O conhecimento é adquirido pela rede a partir do meio envolvente através de um processo de aprendizagem;*
- *As intensidades das ligações entre neurónios, conhecidas como pesos sinápticos, são usadas para armazenar o conhecimento adquirido.”*

3.1. REDE NEURONAL CEREBRAL

As RNAs não são apenas uma ferramenta inspirada num modelo natural, são, para além disso, uma ferramenta orientada para auxiliar o estudo do cérebro. Assim, esta é uma temática pluridisciplinar, em que psicólogos, neurologistas, matemáticos, informáticos e engenheiros tomam parte ativa. Neste enquadramento, pensa-se que conhecer, ainda que superficialmente, a relação

de paralelismo entre as redes neuronais artificiais e biológicas é uma valência importante para o utilizador das RNA.

Os neurónios, tal como estabeleceu Santiago Ramón y Cajal, são as células que constituem a unidade base do sistema nervoso. São compostos pelo corpo celular (ou soma), árvore dendrítica e axónio. Na figura 3.1 apresenta-se o diagrama completo de um neurónio.

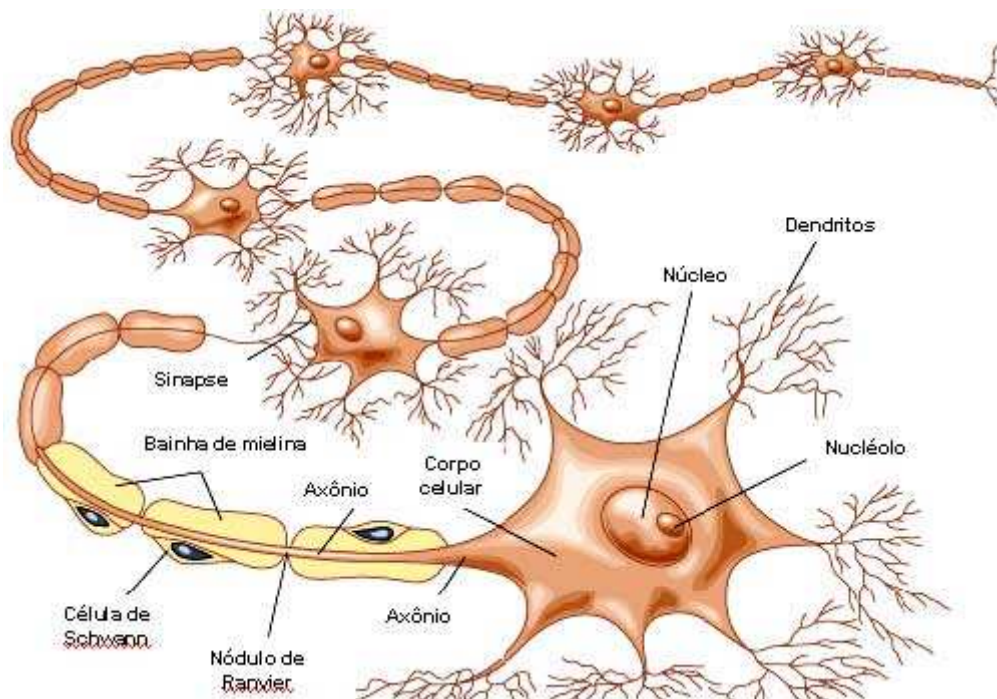


FIGURA 3.1 – ESTRUTURA DE UM NEURÓNIO BIOLÓGICO [34]

O sistema nervoso humano é composto por cerca de dez mil milhões de neurónios, podendo cada neurónio estabelecer ligações sinápticas com cerca de 10 000 outras células [33].

No caso mais comum, os estímulos nervosos são recebidos através das dendrites e do corpo celular, enquanto a emissão de sinais é predominantemente feita através dos axónios. Uma vez que cada neurónio é envolvido por uma membrana que o isola dos restantes, a comunicação processa-se por via eléctrica e por via química por intermédio de substâncias

denominadas neurotransmissores. Face ao estímulo, a membrana polarizada no neurónio pode propagar sinais elétricos que resultam na segregação dos neurotransmissores, que atravessam a ligação sináptica e se ligam à célula seguinte da cadeia.

Quando, em 1943, McCulloch e Pitts conceberam o seu modelo computacional e lançaram as fundações das RNAs pretendiam construir um modelo digital do neurónio biológico. Na primeira vaga de interesse pelas RNAs, os resultados obtidos, não só por McCulloch e Pitts, mas também por outros cientistas, acompanhados por progressos na área da neurologia, estimularam a perceção das RNAs como objetos de estudo para compreensão do sistema nervoso.

Paralelamente, alguns pioneiros no desenvolvimento da inteligência artificial depositaram esperanças nas RNAs, razões pelas quais a biologia acabou por ter uma grande influência no seu desenvolvimento. Só posteriormente, quando se comprovou o interesse prático destes modelos para a resolução de problemas concretos, se vislumbraram aplicações à engenharia.

Assim, as RNAs retêm muitas características dos sistemas biológicos. Apesar das RNAs demonstrarem potencialidades interessantes, o sistema nervoso é uma rede de complexidade admirável, incomparavelmente superior às RNAs modernas sob todos os pontos de vista. As construções mentais derivam do processamento de informação a vários níveis, desde interações moleculares até circuitos inter-regionais e ao próprio sistema nervoso central. Tal como os neurónios artificiais são básicos quando comparados com os biológicos, também as RNAs são básicas quando comparadas com os circuitos locais encontrados no cérebro [33]. Na figura 3.2 são apreciáveis as diferenças.

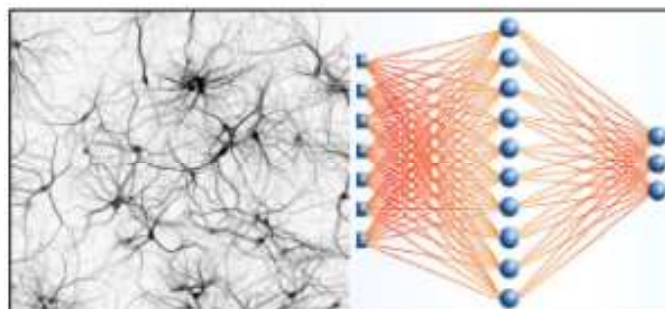


FIGURA 3.2 – CONTRASTE ENTRE REDES NEURONAIS BIOLÓGICAS E ARTIFICIAIS [35]

3.2. REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

As RNAs consistem numa técnica estatística moderna que tem sido amplamente utilizada, como método de aprendizagem automática, em diversos domínios reais. O primeiro modelo de uma RNA surgiu no ano de 1943, nos quais se pretendia estudar e modelizar as capacidades de aprendizagem dos humanos. Desde então, muitas variantes foram criadas, as quais se distinguem pelos modelos funcionais considerados e pelas técnicas de treino aplicadas.

As razões da crescente utilização das RNAs em todos estes campos prendem-se, sem dúvida, com os benefícios que lhes estão associados:

- Aprendizagem – Uma RNA pode ser iniciada “sem conhecimento” e treinada com um dado conjunto de exemplos (inputs e outputs, no caso de treino supervisionado ou apenas inputs, no caso de treino não supervisionado); através do treino, as intensidades das ligações entre neurónios alteram-se de tal forma que a rede aprende a produzir o resultado desejado para os dados introduzidos;
- Generalização – Se um novo conjunto de dados diferir dos exemplos conhecidos for introduzido na rede, esta produz o melhor resultado possível com base nos exemplos usados;
- Paralelismo massivo potencial – No decurso do processamento da informação, vários neurónios “disparam” simultaneamente;
- Robustez – Se alguns neurónios “falharem”, o sistema pode ainda ter um bom desempenho;
- Correspondência parcial – Na maior parte dos casos uma correspondência total aos casos de exemplo não é necessária.

Estes benefícios, na prática traduzem-se em que as RNAs consigam encontrar boas soluções, mesmo com dados sujeitos a ruído, falhas, informações imprecisas ou corrompidas [32].

Face à quantidade de dados que pode ser armazenada hoje em dia, entende-se que as RNAs podem ser aplicadas com bastante sucesso à modelação do funcionamento de um aerogerador [31, 32].

Não foi considerado relevante nos objetivos da presente dissertação realizar o estado da arte relativo a esta matéria, descreve-se apenas a estrutura utilizada na previsão da energia produzida por um aerogerador, para a qual foi adotada a rede neuronal do tipo Perceptrão Multicamada, denominada, na literatura anglo-saxónica, *Multilayer Perceptrons* – MLP. Este tipo de RNA é frequentemente indicado como um dos métodos mais fiáveis dentro da aprendizagem automática. Para o treino da rede foi usado o algoritmo designado por *Backpropagation*.

Como problemas da utilização deste tipo de modelo funcional, é costume referir-se o elevado tempo de cálculo exigido durante o processo de treino.

As RNAs são também, consideradas “caixas negras”, atendendo à dificuldade de se conseguir interpretar as relações entre cada variável de saída e de entrada a partir da simples observação da estrutura treinada.

De uma forma geral, pode-se dizer que uma RNA é composta por elementos de processamento simples com um elevado grau de conexão entre eles.

3.3. TIPOS DE FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO

As funções de ativação de um neurónio, também chamadas por alguns autores de funções de transferência, podem ser agrupadas em lineares ou não lineares. A função de ativação é um elemento importante no modelo artificial do neurónio, porque define o sinal de saída, de acordo com os sinais de entrada.

Exemplos das funções de ativação lineares são a função limiar e limiar por partes. Exemplos de funções de ativação não lineares são a função logística e tangente hiperbólica. A escolha da função de ativação vai depender do tipo de

problema que se pretende resolver e também tendo em conta a satisfação das especificidades do problema em concreto.

A função de ativação logística, também conhecida por função sigmoide, é a função mais usada na construção de redes neuronais. Tendo a forma aproximada de um "S" deitado, é uma função crescente que mostra um balanceamento entre um comportamento linear e não linear.

A figura 3.3 apresenta as referidas funções de ativação.

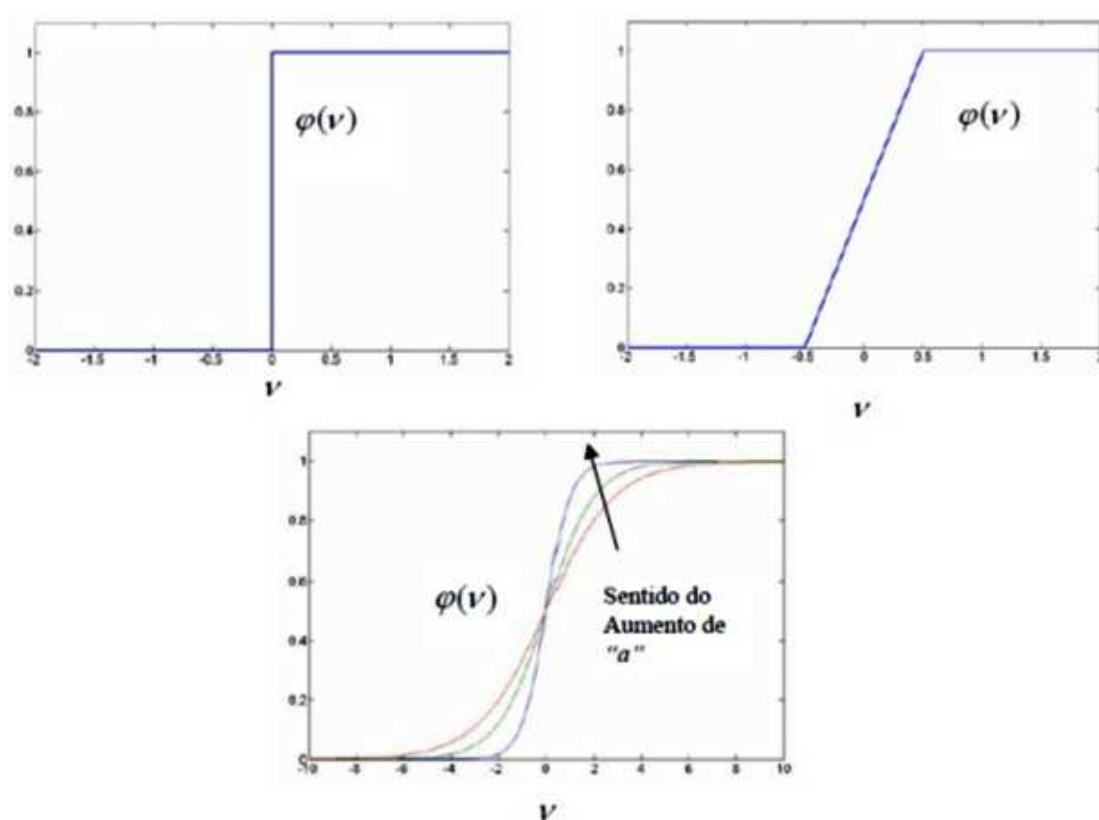


FIGURA 3.3 – FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO DE REDES NEURONAIS [36]

3.4. ARQUITETURAS DE REDE

A forma como os neurónios se interligam numa estrutura de rede é denominada por arquitetura ou topologia. Existem inúmeros tipos de

arquiteturas de RNAs, cada uma com as suas próprias particularidades. Em geral, podem ser divididas em três arquiteturas:

- Redes Feed-Forward de uma só camada - Uma RNA *Feed-Forward* pode ser organizada por camadas, pois não existem ciclos, dado que as conexões são sempre unidirecionais (convergentes ou divergentes). Na sua forma mais simples uma rede é composta por uma camada de entradas, cujos valores de saída são fixados externamente, e por uma camada de saída. De referir que a camada de entrada não é contabilizada como camada numa RNA devido ao facto de nesta não se efetuarem quaisquer cálculo. A figura 3.4 apresenta a arquitetura desta rede.

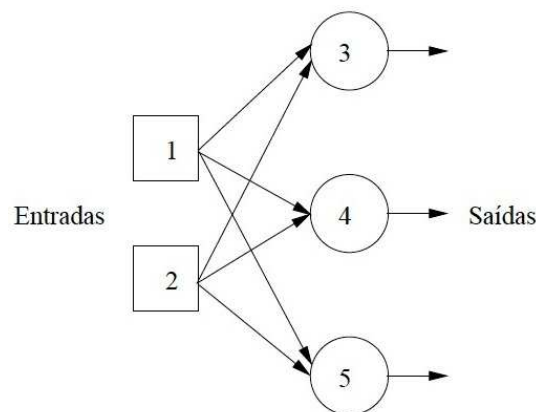


FIGURA 3.4 – ARQUITETURA DE UMA REDE NEURONAL UNIDIRECIONAL DE UMA CAMADA [37]

- Redes Feed-Forward Multi Camada - A segunda classe de redes *Feed-Forward* distingue-se pelo facto de possuir uma ou mais camadas intermédias, cujos neurónios são designados por neurónios intermédios. A função destes é intervir de forma útil entre a entrada e a saída da rede. Ao se acrescentarem camadas intermédias está-se a aumentar a capacidade da rede em modular funções de maior complexidade, uma particularidade bastante útil quando o número de neurónios na camada de entrada é elevado. Por outro lado, este aumento também transporta

um senão, uma vez que, o tempo de aprendizagem aumenta de forma exponencial. Um exemplo desta arquitetura é apresentado na figura 3.5.

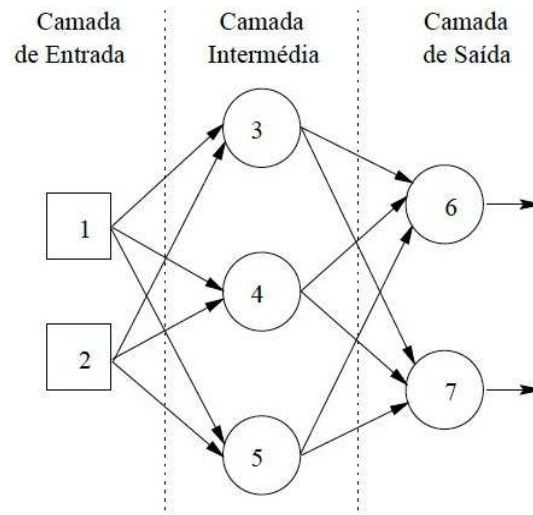


FIGURA 3.5 – ARQUITETURA DE UMA REDE NEURONAL MULTI CAMADAS [37]

- Redes Recorrentes – A recorrência existe em sistemas dinâmicos quando uma saída de um elemento influencia de algum modo a entrada para esse mesmo elemento, criando-se assim um ou mais circuitos fechados tal como apresentado na figura seguinte. Assim que uma ou mais conexões cíclicas são incluídas numa rede, esta passa a ter um comportamento não linear, de natureza espacial e/ou temporal, que podem ser utilizados para modelar novas funções cognitivas tais como as de memória associativa e/ou temporal. Ao conter ciclos, as saídas não são função exclusivamente das conexões entre nodos, mas também de uma dimensão temporal. Na figura 3.6 é apresentada a arquitetura de uma RNA recorrente.

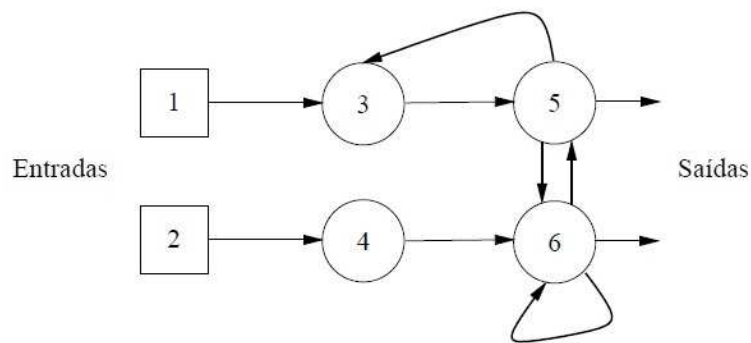


FIGURA 3.6 - ARQUITETURA DE UMA REDE NEURONAL RECORRENTE [37]

3.5. REDES MULTI CAMADAS COM APRENDIZAGEM *BACKPROPAGATION*

Sabemos que o interesse de redes neuronais de uma única camada é relativamente pequeno, já que apenas podem ser empregues em problemas que não exijam mais do que um hiperplano a separar o espaço de classificação. Sendo assim, houve necessidade de encontrar técnicas que permitissem a aprendizagem a redes compostas por mais do que uma camada. Foi então que vários investigadores apresentaram um processo que permite ajustar os pesos de redes *feed-forward* com mais do que uma camada. Este processo sofreu vários melhoramentos e modificações ao longo dos anos por vários investigadores, com vista a diminuir o tempo de treino e aumentar a capacidade de aprendizagem (encontrar mínimos globais e generalizar). Este método conhecido por *backpropagation* ou por *regra delta generalizada* baseia-se na técnica de descida segundo a direção do gradiente que tenta minimizar um determinado erro fornecido por uma função que traduz a diferença entre os valores de saída originados pela rede e os valores pretendidos. O termo *backpropagation* significa a propagação do erro no sentido da saída da rede para a sua entrada, conforme se pode verificar na figura 3.7 [38-40].

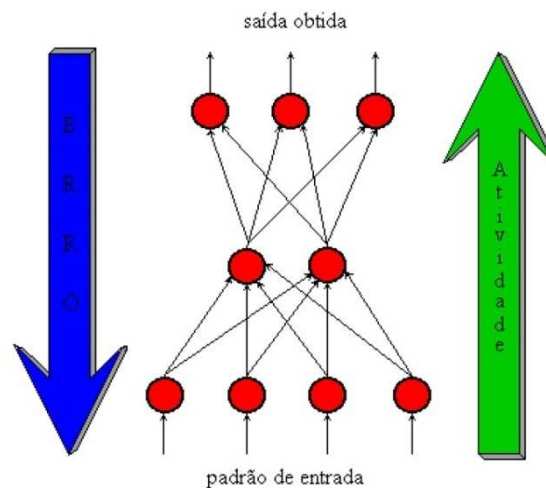


FIGURA 3.7 – FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO *BACKPROPAGATION* [40]

O treino de uma rede usando o algoritmo *backpropagation* pode dividir-se em três etapas sequentes. A primeira, conhecida por *feed-forward*, consiste na computação das saídas da rede para um vetor de treino de entrada. A seguinte etapa compara o vetor de saída resultante da computação anterior com o vetor pretendido e retro-propaga o erro associado para as camadas anteriores, isto é, no sentido das unidades de entrada. Na última etapa os pesos são ajustados de acordo com o erro propagado na etapa anterior. Esta sequência é então repetida durante vários ciclos de conjuntos de padrões de entrada e saída até que o erro global entre os padrões de saída e os resultados desejados sejam minimamente conseguidos [41].

3.5.1. LIMITAÇÕES DO *BACKPROPAGATION*

As redes neurais que utilizam *backpropagation*, assim como muitos outros tipos de redes neurais artificiais, podem ser vistas como "caixas negras", na qual quase não se sabe porque a rede chega a um determinado resultado, uma vez que os modelos não apresentam justificção para os resultados. Neste sentido, muitas pesquisas vêm sendo realizadas visando a extração de conhecimento de redes neurais artificiais, e na criação de procedimentos explicativos, onde se tenta justificar o comportamento da rede em determinadas situações.

Uma outra limitação refere-se ao tempo de treino de redes neurais utilizando *backpropagation*, que tende a ser muito lento. É muito difícil definir a arquitetura ideal da rede de forma que ela seja tão grande quanto o necessário para conseguir obter as representações necessárias, ao mesmo tempo pequena o suficiente para se ter um treino mais rápido. Não existem regras claras para se definir quantas unidades devem existir nas camadas intermediárias, quantas camadas, ou como devem ser as conexões entre essas unidades. Para resolver este tipo de problema, algoritmos genéticos poderiam ser utilizados para encontrar automaticamente boas arquiteturas de redes neurais, eliminando muitas armadilhas associadas às abordagens de engenharia humana [41].

3.6. SOFTWARE USADO NO TREINO DAS REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

As RNAs podem ser aplicadas em diversas áreas, uma vez que são ferramentas versáteis. A crescente necessidade de aplicação das RNAs nas investigações científicas levou ao desenvolvimento de ferramentas informáticas que, de uma forma intuitiva, permitem aos utilizadores não especializados as usarem nos seus trabalhos.

As aplicações informáticas atualmente usadas no treino de redes neuronais artificiais são inúmeras, pode-se encontrar no mercado aplicações *freeware* ou *shareware*, sendo o código de implementação das redes escrito em várias línguas de programação.

No trabalho desenvolvido nesta dissertação foi utilizado um *software* de implementação de redes neuronais de acesso não livre, o *Matlab*, mais especificamente *Neural Network Toolbox (NNtool)*.

A arquitetura implementada neste trabalho foi a de uma rede alimentada diretamente com multi-camadas (*Multi Layer Perceptron*), já abordada ao longo do presente capítulo.

3.6.1. MATLAB - NNTOOL

O nome *Matlab* deriva de *MATrix LABoratory*. O *Matlab* é um sistema interativo cujo elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento. Esse sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em linguagem *Fortran*, *Basic* ou *C*. Além disso, as soluções dos problemas são expressas quase exatamente como elas são escritas matematicamente.

Embora na sua versão base o *Matlab* já possua um vasto conjunto de funções de carácter genérico, existem várias bibliotecas de funções adicionais (designadas por *toolboxes*) que expandem as suas capacidades em domínios de aplicação mais específicos.

As *toolboxes* constituem um vasto conjunto de funções que permitem resolver rápida e eficientemente classes particulares de problemas de grande complexidade em diversas áreas de interesse (Sistemas de Controlo, Otimização, Redes Neuronais Artificiais).

A *nntool* inclui funções de linha de comando e ferramentas gráficas para criação, implementação, treino, visualização e simulação de redes neurais. As ferramentas gráficas facilitam o desenvolvimento das redes neurais em comparação com a necessidade de criação de código para ativação das funções da ferramenta.

A *toolbox* oferece suporte às redes *feed-forward*, redes de base radial, redes dinâmicas, mapas de auto-organização e outros paradigmas de redes comprovadas.

Depois de criar as redes, as ferramentas podem gerar automaticamente código *Matlab* para capturar o resultado do treino e automatizar tarefas. A figura 3.8 representa o interface gráfico inicial da *toolbox* [42].

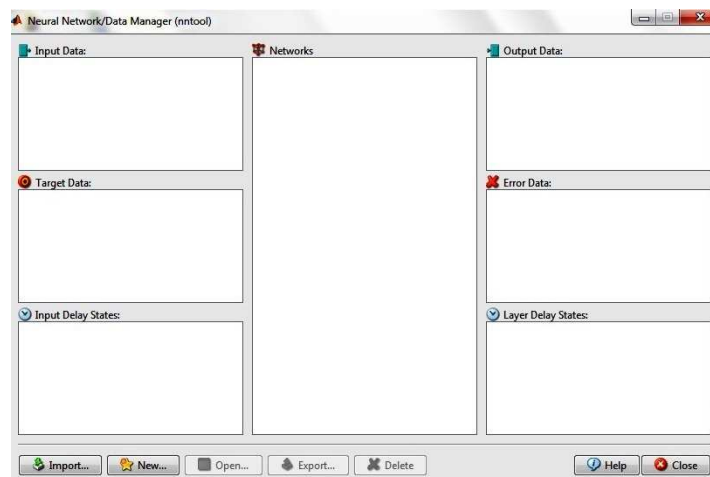


FIGURA 3.8 – INTERFACE GRÁFICO INICIAL DA *NNTOOL* NO *MATLAB*

Para iniciar a implementação da rede é necessário selecionar a opção “*Import*” para introduzir os dados de entrada, os dados escolhidos vão aparecer no campo “*Input Data*” e introduzir informação sobre a variável de saída da rede, no campo “*Target Data*”. A figura 3.9 representa o interface gráfico de seleção das variáveis.

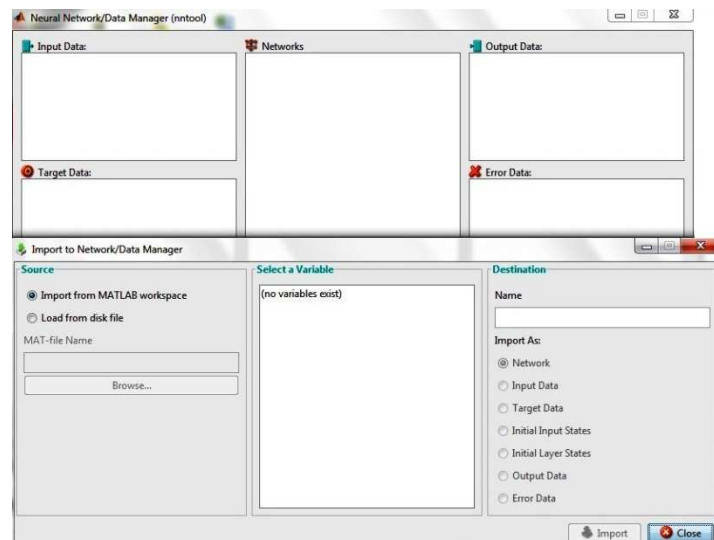


FIGURA 3.9 - INTERFACE GRÁFICO DE SELEÇÃO DE VARIÁVEIS DA *NNTOOL* NO *MATLAB*

Os dados que se pretende importar devem ser previamente carregados no *Matlab* através da leitura de ficheiros do tipo *Excel*.

Após a introdução da informação referida, é necessário criar a rede neuronal e definir qual o seu tipo e estrutura pretendida. A figura 3.10 apresenta o interface gráfico de definição da rede neuronal a criar.

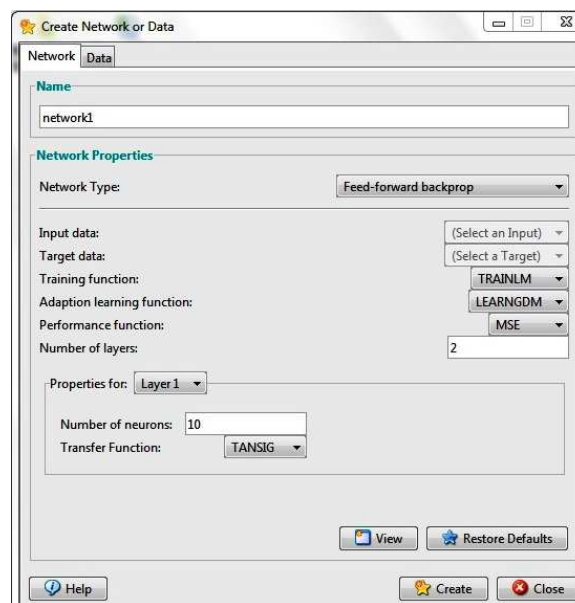


FIGURA 3.10 - INTERFACE GRÁFICO DE DEFINIÇÃO DA REDE NEURONAL NA *NNTOOL* NO *MATLAB*

Depois de definida a estrutura da rede é necessário treiná-la, com um conjunto de treino que represente a imagem do sistema que queremos modelizar com a rede neuronal. Para obter bons resultados pela rede neuronal é importante que o conjunto de treino escolhido seja o mais fidedigno possível.

O treino da rede é efetuado pela *toolbox* “*nntraintool*” que, de acordo com os dados introduzidos, faz o treino da rede definida anteriormente. Com esta *toolbox*, o treino da rede é executado e apenas é necessário definir os critérios de paragem do treino. A *toolbox* é apresentada na figura 3.11 [42].

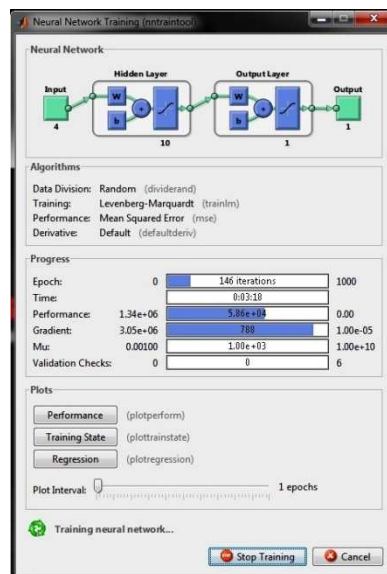


FIGURA 3.11 - INTERFACE GRÁFICO DE TREINO DA REDE NEURONAL NA *NNTOOL* NO *MATLAB*

No final do treino da rede neuronal é possível introduzir novos dados e obter a previsão de resultados pela rede neuronal treinada. Os resultados obtidos ficam guardados num vetor, podendo ser usado noutras aplicações do *Matlab*, assim como exportar para o *Microsoft Excel*.

3.7. TREINO DA REDE NEURONAL

A fiabilidade do desempenho da rede neuronal depende da qualidade do conjunto de dados usados para o treino da rede. Os dados usados devem representar de forma fiel o estado que se pretende para o equipamento. O número de grandezas e a qualidade das mesmas são fundamentais na aplicação das redes neuronais [42].

O cálculo da energia produzida pelos aerogeradores é o objetivo do trabalho desenvolvido. Uma avaria ou a falha comunicação com o contador de energia faz com que não exista acesso aos dados de produção em tempo real. No aerogerador, a grandeza que se pretende estimar, é a energia produzida.

Para que isso aconteça é necessário selecionar criteriosamente os dados que serão usados para treinar a rede. Uma rede neuronal, bem treinada, tem que ser capaz de generalizar, ou seja, na presença de dados que não pertençam ao conjunto de treino, terá que obter um resultado próximo do esperado, baseado nesses novos dados. Se o conjunto de treino contiver erros, ou se as grandezas usadas contiverem ruído, a rede pode adaptar-se aos erros e perder a capacidade de generalizar [43]. Quanto maior for o conjunto de treino, melhor será o ensino da rede neuronal, mas também mais probabilidade existe de o conjunto de dados possuir valores errados. Por este motivo, a escolha do conjunto de dados a usar para treino da rede é importante e devem ser usadas ferramentas de seleção dos dados [42].

Para a escolha do período de dados a ser usado para o treino das redes, foram analisados os dados referentes à disponibilidade técnica e o registo de estados dos aerogeradores, disponibilizados pelo SCADA do fabricante dos aerogeradores instalados no parque, que serviu de base de estudo. Estes dados possuem toda a informação sobre as avarias, limitações de potência, manutenção e reparação efetuadas nos aerogeradores. Através da análise dos registos disponíveis é possível detetar períodos de tempo em que os aerogeradores funcionam sem paragens. Um exemplo dos registos disponibilizados no SCADA pode ser consultado no Anexo B. Para a seleção das grandezas, que irão fazer parte do conjunto de treino, foi usada a experiência e sentido crítico dos elementos do CCDPE que pela prática adquirida, sabem em que situações o funcionamento normal dos aerogeradores é influenciado. Foi também analisada a correlação entre medidas, dado que medidas fortemente correlacionadas com a grandeza a estimar, indicam que são influentes na sua variação. Foi ainda analisado o comportamento temporal de cada uma das medidas correlacionadas e por fim foram analisados os atrasos que as referidas grandezas possuem. No próximo capítulo, são apresentadas as grandezas que são medidas e guardadas pelo sistema de aquisição de dados do aerogerador. Das grandezas medidas, apenas quatro grandezas vão ser usadas como entrada da rede neuronal desenvolvida, para cálculo da energia produzida. A seleção das grandezas foi

feita seguindo os testes enumerados anteriormente e que de seguida serão apresentados [42].

3.7.1. CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS

A análise da correlação compreende a análise de dados para saber se e como as duas ou mais variáveis estão relacionadas uma com a outra.

A análise de correlação dedica-se a inferências estatísticas das medidas de associação linear que se seguem:

- Coeficiente de correlação simples: mede a “força” ou “grau” de relacionamento linear entre duas variáveis
- Coeficiente de correlação múltiplo: mede a “força” ou “grau” de relacionamento entre uma variável dependente e um conjunto de outras variáveis.

Tendo sido definida a grandeza a ser estimada, que será a grandeza de saída da rede neuronal, será preciso fazer análise da correlação entre as grandezas de entrada e a grandeza de saída.

Na figura 3.12 é possível verificar a existência de uma forte correlação entre as duas grandezas. Por esse motivo a potencia ativa medida no aerogerador é uma grandeza importante na previsão da energia produzida.



FIGURA 3.12 - CORRELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA ATIVA E A ENERGIA PRODUZIDA

No estudo da correlação entre as grandezas de entrada e a grandeza de saída foi usado o *Microsoft Excel*. No próximo capítulo é possível observar as restantes correlações.

3.7.2. ATRASO

As grandezas medidas pelos sensores instalados nos aerogeradores nem sempre apresentam uma influência no instante medido. A alteração de uma variável de entrada, na saída, pode não ser imediata. Esse atraso tem que ser programado na rede neuronal, influenciando as grandezas que o possuem. Para se fazer esse estudo, usou-se a análise da correlação cruzada entre sinais. Quando dois sinais evoluem em sincronismo, ou seja, variam ao mesmo tempo e sem atrasos, o valor máximo que se obtém com a correlação cruzada dos dois sinais é zero. Quando o valor máximo obtido é diferente de zero, então é porque existe um atraso de um sinal em relação ao outro.

A análise de correlação cruzada entre as duas grandezas tem o máximo no valor 1. Isso quer dizer que uma grandeza está atrasada, em relação à outra, um período de tempo [42].

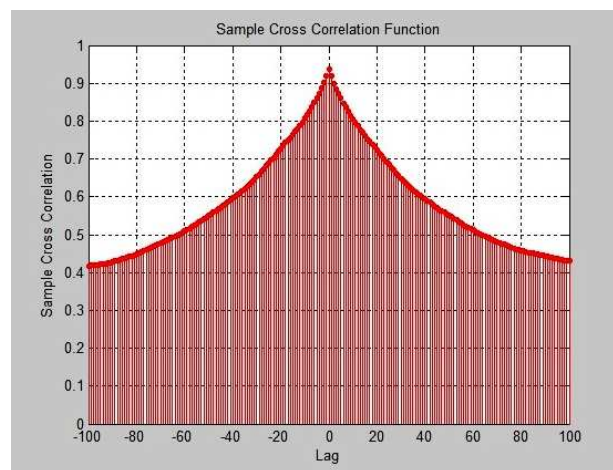


GRÁFICO 3.1 – CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE A POTÊNCIA ATIVA E A ENERGIA PRODUZIDA

Para se fazer esta análise foi usada a função “*Crosscorr*” do *Matlab*. Esta validação foi efetuada para as grandezas usadas e está demonstrado no capítulo seguinte.

3.8. APLICAÇÃO DO SOFTWARE

O *software* apresentado no ponto 3.6, foi usado para implementação da rede neuronal, de forma a ser efetuada a previsão de dados com o objetivo de calcular a energia produzida por um aerogerador.

O método consiste em usar como entrada da rede neuronal algumas das medidas recolhidas do SCADA do fabricante de aerogeradores, aplicando as ferramentas de análise descritas no ponto anterior, fazer a escolha das grandezas que serão colocadas na camada de entrada da rede neuronal.

O método desenvolvido para o cálculo de energia produzida vai ser totalmente explicado no capítulo 4.

**CAPÍTULO 4 - MÉTODO
DESENVOLVIDO PARA O
CÁLCULO DA ENERGIA
PRODUZIDA POR
AEROGERADORES**

4. MÉTODO DESENVOLVIDO PARA A PREVISÃO DA ENERGIA PRODUZIDA PELOS AEROGERADORES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE EÓLICO



FIGURA 4.1 – AEROGERADOR DO PARQUE EÓLICO EM ESTUDO

O parque eólico alvo de estudo tem 5 aerogeradores do fabricante *Enercon*, modelo E-82, de 2000 kW, com um gerador síncrono, situado na zona norte de Portugal.

A potência total instalada é de 10000 kW. No entanto, de forma a limitar a potência injetada na rede, está instalado um sistema automático de controlo. Este sistema de controlo global da potência injetada monitoriza as potências ativas e reativas injetadas no barramento de 60 kV da subestação e atua sobre o sistema de controlo de cada um dos aerogeradores no sentido de, por um lado, não ser ultrapassado o limite imposto de potência injetada e, por outro, fazer respeitar os condicionamentos relativos a injeção de potência reativa na rede.

A tensão aos terminais de cada aerogerador é de 400 V, e estão ligados à rede MT do parque através de um transformador de grupo com a razão de transformação 400 V/20 kV.

Os dois ramais convergem num monobloco de 20 kV e este faz a ligação à rede AT de 60 kV, através do transformador de interligação.

Este parque foi selecionado para o estudo em questão porque os aerogeradores são de um fabricante cujo sistema SCADA disponibiliza medidas importantes sobre o funcionamento dos mesmos.

4.2. CARACTERÍSTICAS DOS AEROGERADORES

Os aerogeradores usados neste parque eólico são do modelo E-82 (2000 kW) do fabricante *Enercon*.

O E-82 é um aerogerador com um rotor de três pás, ajuste ativo das pás (regulação do *pitch*), funciona com rotação variável e uma potência nominal de 2000 kW. Com um diâmetro do rotor de 80 metros, uma altura da torre de 67 metros e uma altura ao topo de aerogerador de 107 metros.

O componente rotativo do gerador E-82 e o rotor constituem uma única unidade. Esta unidade do gerador está aparafusada diretamente ao cubo, rodando, assim, com a mesma baixa rotação. Como não existe caixa multiplicadora, nem componentes que rodem a alta velocidade, as perdas de energia entre o rotor e o gerador, a emissão de ruídos, o uso de óleo na caixa multiplicadora e o desgaste mecânico são consideravelmente reduzidos ou inexistentes.

Cada uma das três pás do rotor está equipada com um sistema elétrico de controlo de posição da pá (controlo de *pitch*). O sistema de controlo do *pitch* permite controlar a rotação do rotor e a energia absorvida do vento. Isto permite que a capacidade da E-82 seja limitada com precisão ao seu valor nominal, mesmo por pouco tempo.

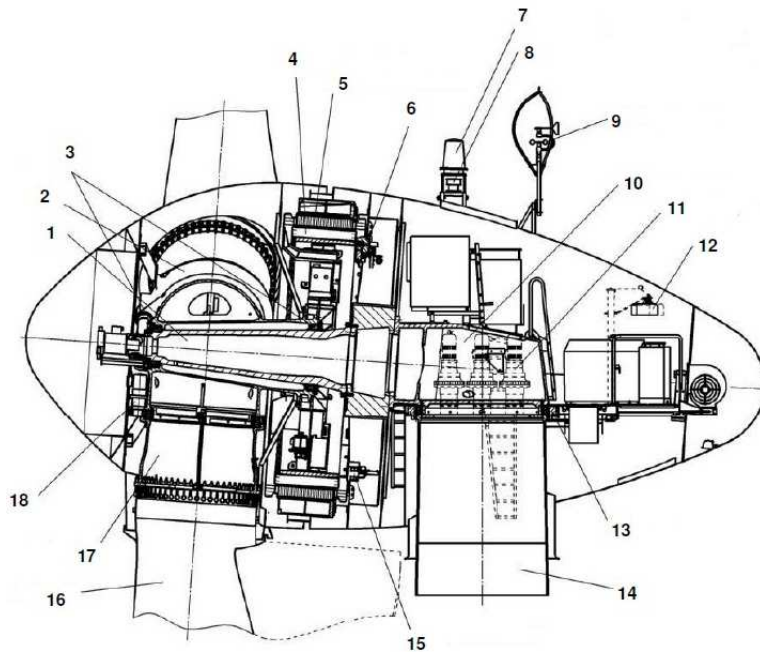


FIGURA 4.2 – APRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA NACELLE [44]

TABELA 4.1 - ELEMENTOS EXISTENTES NA NACELLE

1 – Eixo Axial	10 – Transmissor Principal
2 – Cubo do Rotor	11 – Sistema Yaw
3 – Rolamento do Rotor	12 – Guincho
4 – Rotor do Gerador	13 – Rolamento Yaw
5 – Estator do Gerador	14 – Torre
6 – Travão do Rotor	15 – Bloqueio do Rotor
7 – Sinalização Dia	16 – Pá do Rotor
8 – Sinalização Noturna	17 – Adaptador da Pá
9 - Anemómetro	18 – Sistema de <i>Pitch</i>

As três pás do rotor são ajustadas por um sistema de ajuste das pás independente, comandado por um microprocessador. O ângulo definido da pá é constantemente controlado por um sistema de medição e os ângulos das três

pás são sincronizados entre si. Isto permite um rápido e preciso ajuste do ângulo da pá de acordo com as condições do vento predominante.

A potência produzida pelo gerador do E-82 é transmitida, por meio do sistema de circuitos de alimentação, até à rede de distribuição. O sistema de circuitos de alimentação à rede integra uma unidade retificadora/inversora (transformador), a qual garante os parâmetros de qualidade da energia injetada na rede.

Este sistema de ligação à rede permite que o rotor da E-82 funcione com rotações variáveis. O rotor roda lentamente quando a velocidade do vento é baixa e a velocidades mais altas quando a velocidade do vento é mais elevada. Isto permite o vento fluir com maior eficiência em torno das pás do rotor. A rotação variável permite ainda a redução das cargas impostas por rajadas de vento.

O gerador de anel da E-82 é acionado diretamente pelo rotor. O gerador multipolar baseia-se no princípio da uma máquina síncrona. O gerador em anel é acoplado à rede através da unidade de ligação à rede fornecida pela Enercon. Este sistema consiste num retificador, um circuito intermédio de tensão contínua e inversores modulares. Na figura 4.3 é apresentado o sistema de ligação à rede do aerogerador.

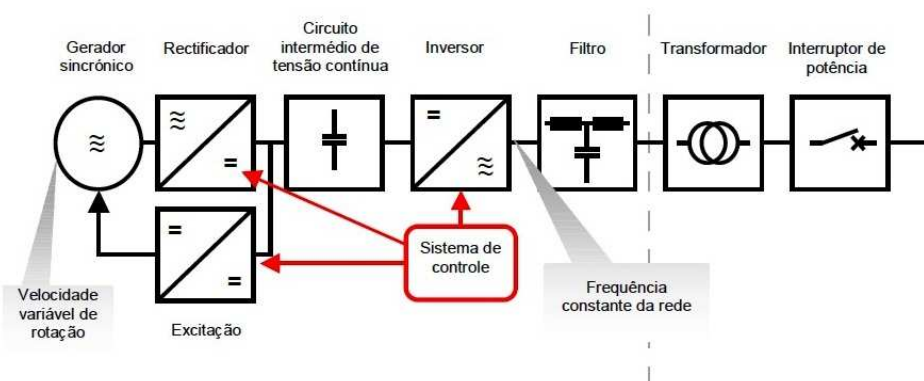


FIGURA 4.3 – SISTEMA DE LIGAÇÃO À REDE DO AEROGERADOR [44]

Alterações súbitas da velocidade do vento resultam em alterações controladas da potência gerada para a rede. Analogamente, falhas na rede elétrica quase não têm efeitos no lado mecânico. A potência elétrica gerada pelo E-82 pode ser regulada exatamente de 0 kW até 2000 kW. Um resumo referente às especificações técnicas do aerogerador encontra-se no Anexo C deste documento.

4.3. AQUISIÇÃO DE DADOS DOS AEROGERADORES

Cada aerogerador possui o seu próprio controlador (PLC) na base da torre e funciona de forma independente. O controlo geral dos aerogeradores do parque eólico é realizado através de um sistema SCADA fornecido pelo fabricante, a figura 4.4 apresenta esse sistema. Cada aerogerador está ligado ao SCADA através de linhas de comunicação. O *bus* de dados é realizado através de um condutor de fibra ótica.

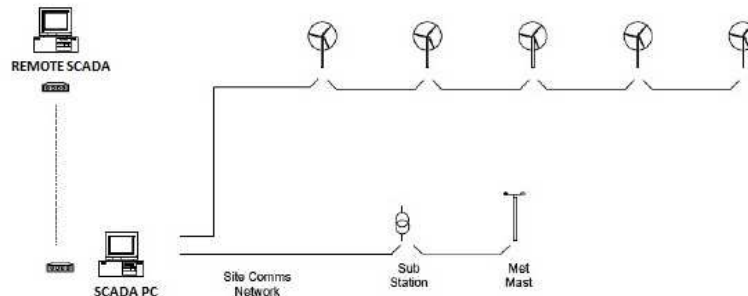


FIGURA 4.4 – SISTEMA SCADA DO PARQUE EÓLICO [45]

O sistema SCADA permite o controlo remoto e a monitorização individual de cada aerogerador do parque eólico, quer a partir do computador local (SCADA PC) ou de um computador remoto (SCADA *Remote*).

O SCADA presente no parque eólico em estudo denomina-se “ENERCON SCADA”, este sistema serve como base, para efetuar o comando/regulação e comunicação dos aerogeradores no parque eólico.

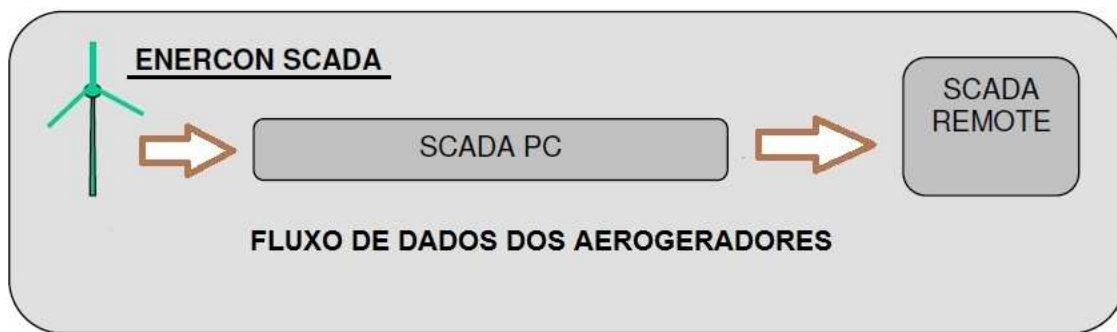


FIGURA 4.5 – FLUXO DE DADOS DOS AEROGERADORES ATRAVÉS DO SCADA [45]

O SCADA PC no parque eólico assume as funções de comando interno, ou seja, regulação e arquivo de dados, assim como a comunicação para o exterior. O SCADA *Remote* permite o controlo à distância e apresentação de dados de funcionamento, com apoio da base de dados (SCADA *DATABASE*).

Nos aerogeradores os sensores de medição registam uma série de dados que são transmitidos para o controlador e seguidamente alguns deles enviados para o sistema SCADA.

Relativamente aos dados recolhidos, existe diferença entre dados operacionais e dados sobre o estado e as comunicações do aerogerador. No que concede aos dados operacionais, são recolhidos:

- Velocidade rotação;
- Posição da nacelle;
- Tensão, corrente e frequência nas 3 fases;
- Potência ativa e reativa;
- Energia Produzida;
- Velocidade e direção do vento;
- Temperatura exterior;
- Temperaturas das pás do rotor;
- Temperatura no interior da nacelle;
- Temperatura no interior da torre, e em outros locais;
- Tempo de funcionamento.

Os dados sobre o estado e as comunicações do aerogerador são gerados por diversas comunicações dentro do aerogerador, atualizados quatro vezes por segundo, e indicam a situação atual de funcionamento, assim como, os acontecimentos que influenciam o funcionamento. O estado do aerogerador é definido a qualquer altura, por um respetivo estado claramente definido.

Os aerogeradores, independentemente do sistema SCADA podem continuar a fornecer energia, nos casos de falha na comunicação dos dados. Existe diferenças entre falha na comunicação com elementos internos do aerogerador, falha na comunicação dentro do parque eólico e falha na comunicação do parque eólico (SCADA PC) com o SCADA *Remote*.

O controlador do aerogerador recebe as medidas enviadas pelos seus componentes (anemómetro, cata-vento, contador de energia, sensores velocidade, etc...), a falha de comunicação entre o controlador e esses componentes pode acontecer por dois fatores: avaria nas comunicações entre eles ou avaria do componente de medida. Se acontecer avaria nas comunicações, durante esse período não há registo de medida, se ocorrer avaria no equipamento é gerado um alarme para o SCADA.

Quando ocorre uma falha na comunicação dentro do parque eólico, o aerogerador arquiva as 10 últimas mensagens do estado, que serão recebidas pelo SCADA PC após a comunicação estar novamente reestabelecida. Os valores por minuto dos dados de funcionamento não são arquivados. Durante a avaria na comunicação as mensagens do estado do aerogerador são formadas pelo sistema SCADA.

A falha na comunicação do parque eólico (SCADA PC) com o SCADA *Remote* faz com que no SCADA PC sejam arquivados, em disco duro, todos os dados do funcionamento e mensagens do SCADA. A capacidade está prevista, de forma a poder arquivar em regra, todos os dados de 20 anos de funcionamento. Se forem incluídos na receção de dados do SCADA a subestação, a torre meteorológica ou semelhantes, a quantidade de dados

pode ser aumentada consideravelmente, atingindo assim mais rapidamente o limite da capacidade. Quando a capacidade do disco duro tiver atingido 90% da capacidade, o SCADA envia uma mensagem de aviso.

Os dados dos aerogeradores podem ser obtidos através da ligação com o computador do parque eólico (SCADA PC), onde são visualizados diretamente todos os dados através do SCADA *Remote* ou através de uma ligação com o computador do parque eólico (SCADA PC) e solicitar a aquisição dos dados disponíveis através do SCADA *Remote* e posterior análise estatística.

Os dados disponíveis para aquisição através do (SCADA *Remote*) são os seguintes:

- Estado operacional dos aerogeradores, com indicação da data e hora das alterações;
- Disponibilidade diária, semanal, mensal e anual dos aerogeradores;
- Medições dos aerogeradores com intervalos de 10 minutos (valores médios/máximos/mínimos relativos à velocidade do vento, velocidade de rotação, potência ativa e reativa, horas de operação, horas/kilowatt);
- Dados para relatórios diários, semanais, mensais e anuais dos aerogeradores (valores médios/máximos/mínimos relativos à velocidade do vento, velocidade de rotação, potência ativa e reativa, horas de operação, horas/kilowatt);

4.4. SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS A UTILIZAR NO MÉTODO DESENVOLVIDO

A seleção e tratamento dos dados são a base de qualquer aplicação de redes neuronais. Apesar de provado pelo teorema da aproximação que os Perceptrões Multicamada podem aproximar, a qualquer grau, qualquer função, na prática verifica-se que o processo de preparação dos dados é crucial para o

sucesso da aplicação. Assim, na fase inicial da metodologia proposta efetua-se uma análise criteriosa dos dados disponíveis, identificando claramente o objetivo atingir.

Relativamente aos dados recolhidos e de acordo com o explicado no ponto 4.3, foram selecionados para desenvolvimento do método, os dados diários (10 minutos) do aerogerador número 5 do parque, valores médios relativos à velocidade do vento, velocidade de rotação, potência ativa, potência reativa, para o período compreendido entre janeiro e agosto de 2011.

Durante a seleção das variáveis foi analisada a correlação e correlação cruzada entre as variáveis.

Correlação entre a velocidade de vento média e a energia produzida

Coeficiente de correlação entre as duas variáveis: 0,94

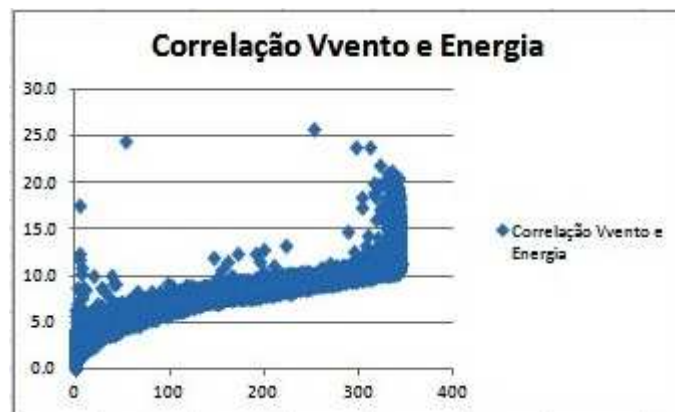


FIGURA 4.6 – CORRELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DO VENTO MÉDIA E A ENERGIA PRODUZIDA

Correlação cruzada entre a velocidade de vento média e a energia produzida

Na figura 4.7 verifica-se que as duas grandezas evoluem em sincronismo, ou seja, variam ao mesmo tempo e sem atrasos.

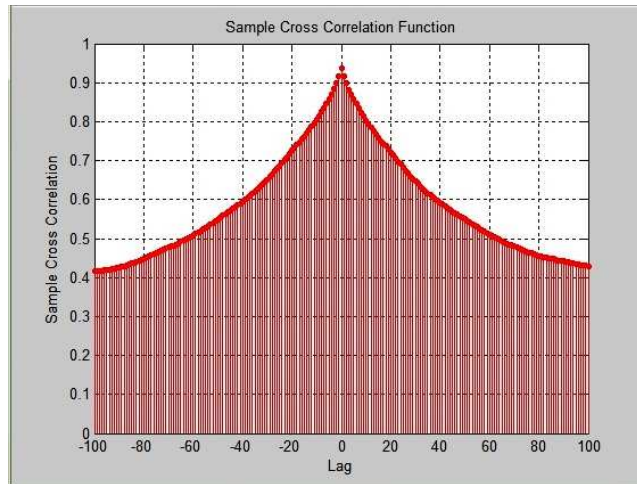


FIGURA 4.7 - CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE A VELOCIDADE DE VENTO MÉDIA E A ENERGIA PRODUZIDA

Correlação entre a velocidade de rotação média e a energia produzida

Coefficiente de correlação entre as duas variáveis: 0,84



FIGURA 4.8 - CORRELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE ROTAÇÃO MÉDIA E A ENERGIA PRODUZIDA

Correlação cruzada entre a velocidade de rotação e a energia produzida

Na figura 4.9 verifica-se que as duas grandezas evoluem em sincronismo, ou seja, variam ao mesmo tempo e sem atrasos.

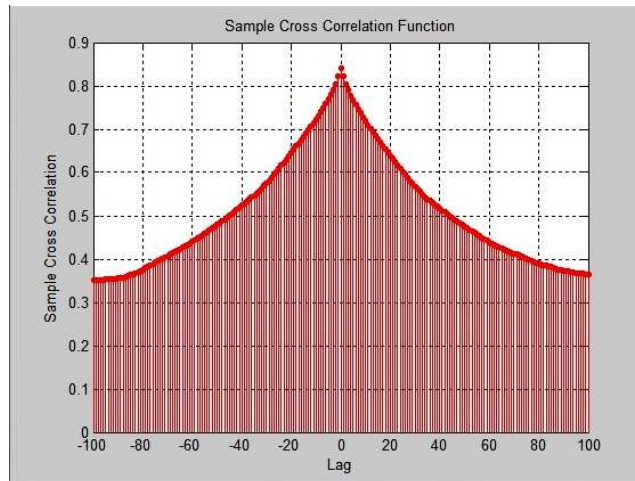


FIGURA 4.9 – CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE A VELOCIDADE DE ROTAÇÃO MÉDIA E A ENERGIA PRODUZIDA

Correlação entre a potência ativa média e a energia produzida

Coefficiente de correlação entre as duas variáveis: 0,99



FIGURA 4.10 – CORRELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA ATIVA MÉDIA E A ENERGIA PRODUZIDA

Correlação cruzada entre a potência ativa média e a energia produzida

Na figura 4.11 verifica-se que as duas grandezas evoluem em sincronismo, ou seja, variam ao mesmo tempo e sem atrasos.

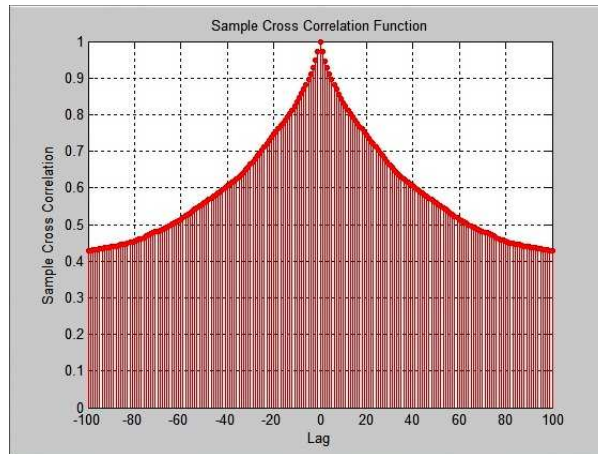


FIGURA 4.11 – CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE A POTÊNCIA ATIVA MÉDIA E A ENERGIA PRODUZIDA

Correlação entre a potência reativa média e a energia produzida

Coefficiente de correlação entre as duas variáveis: 0,49

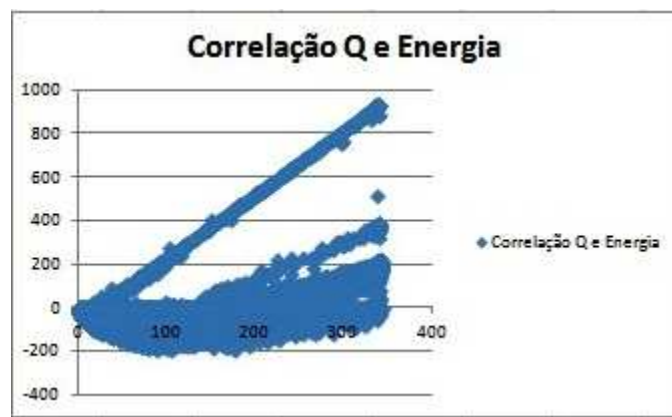


FIGURA 4.12 – CORRELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA REATIVA MÉDIA E A ENERGIA PRODUZIDA

Correlação cruzada entre a potência ativa média e a energia produzida

Na figura 4.13 verifica-se que as duas grandezas evoluem em sincronismo, ou seja, variam ao mesmo tempo e sem atrasos.

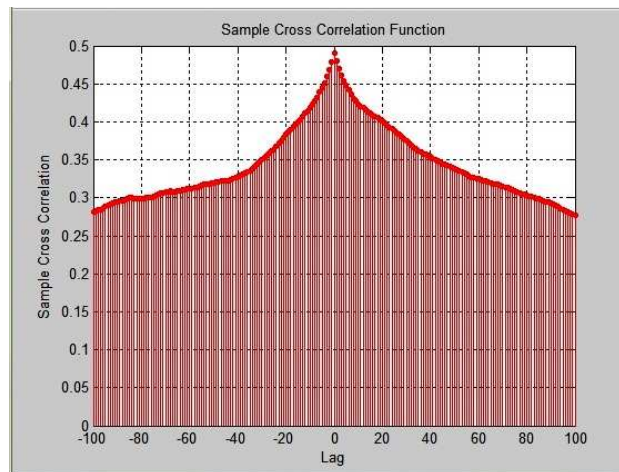


FIGURA 4.13 – CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE A POTÊNCIA REATIVA MÉDIA E A ENERGIA PRODUZIDA

Após analisar as variáveis disponíveis, foram escolhidas as seguintes variáveis como entradas da rede neuronal:

- Valor médio da velocidade do vento (m/s);
- Valor médio da velocidade de rotação (rpm);
- Potência ativa média (kW);
- Potência reativa média (kVAr).

A grandeza de saída da rede neuronal deverá ser selecionada de entre o conjunto de grandezas disponíveis e deverá traduzir o comportamento da grandeza que se pretende prever.

A variável de saída selecionada foi a energia produzida (kWh) pelo aerogerador.

A seleção das variáveis mais importantes para a caracterização da metodologia a adotar teve em conta que, quanto maior o número de variáveis e mais complexas as suas relações, de mais dados necessitará a RNA escolhida para ser devidamente treinada.

4.5. PREPARAÇÃO DOS DADOS A UTILIZAR NA METODOLOGIA

Uma vez escolhidas as variáveis a utilizar, é boa prática preparar os dados para que o treino da rede neuronal seja o mais eficiente possível.

No âmbito deste trabalho foram adotadas as seguintes metodologias:

- Análise do valor diário da disponibilidade técnica associada ao aerogerador durante o período dos dados disponíveis, conforme exemplo da tabela 4.2;
- Verificação dos motivos de eventuais paragens durante o período a analisar, avarias, manutenções, limitações de potência, paragens para trabalhos na rede interna ou rede externa do parque;
- Análise crítica das variáveis em situações que os seus valores registavam o valor “0” ou valores anormais;
- Comparação entre o valor registado pelo contador de energia e o valor médio calculado para o mesmo período;
- Confrontação entre os valores das variáveis presentes nos dados e os valores apresentados nos relatórios do SCADA. Um exemplo desse relatório pode ser consultado no Anexo D.

TABELA 4.2 – REGISTO DISPONIBILIDADE DE CADA AEROGERADOR DO PARQUE EM ESTUDO

Jan-11							Fev-11						
Gross Cap (KW)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	10,000	Gross Cap (KW)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	10,000
Day	WTG 1	WTG 2	WTG 3	WTG 4	WTG 5	Avail/day	Day	WTG 1	WTG 2	WTG 3	WTG 4	WTG 5	Avail/day
1	100.00	100.00	100.00	0.00	100.00	80.00	1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	100.00	100.00	100.00	25.95	100.00	85.19	2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3	100.00	100.00	100.00	86.49	89.07	95.11	3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4	100.00	100.00	100.00	100.00	97.61	99.52	4	100.00	99.96	100.00	100.00	100.00	99.99
5	99.83	90.91	99.54	100.00	99.96	98.05	5	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
6	100.00	99.69	100.00	100.00	99.96	99.93	6	100.00	99.03	100.00	100.00	100.00	99.81
7	100.00	99.97	100.00	100.00	100.00	99.99	7	98.26	97.72	100.00	100.00	100.00	99.20
8	100.00	99.94	100.00	100.00	100.00	99.99	8	100.00	100.00	98.73	95.93	97.17	98.37
9	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	9	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
10	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	10	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
11	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	11	100.00	100.00	100.00	100.00	90.80	98.16
12	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	12	100.00	97.12	100.00	100.00	100.00	99.42
13	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	13	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
14	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	14	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
15	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	15	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	16	100.00	90.93	99.98	31.10	99.93	84.39
17	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	17	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
18	100.00	100.00	100.00	100.00	55.52	91.10	18	100.00	100.00	100.00	80.53	99.97	96.10
19	100.00	100.00	100.00	100.00	78.54	95.71	19	100.00	99.48	100.00	100.00	100.00	99.90
20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	20	100.00	99.55	100.00	100.00	100.00	99.91
21	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	21	100.00	98.62	100.00	100.00	100.00	99.72
22	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	22	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
23	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	23	100.00	98.18	100.00	100.00	100.00	99.64
24	100.00	100.00	100.00	99.97	100.00	99.99	24	100.00	66.92	100.00	100.00	100.00	93.38
25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
26	100.00	100.00	99.97	100.00	100.00	99.99	26	100.00	49.15	100.00	100.00	100.00	89.83
27	92.71	82.89	91.18	99.83	99.94	93.31	27	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
28	92.81	99.89	99.62	99.40	88.07	95.96	28	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
29	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	Avail/WTG	99.94	96.31	99.95	96.70	99.57	98.49
30	99.77	100.00	100.00	100.00	100.00	99.95							
31	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00								
Avail/WTG	99.52	99.14	99.69	93.92	97.05	97.79							

A análise dos valores “anormais” presentes nos dados disponibilizados pelo SCADA foi a primeira abordagem efetuada para a deteção de incongruências nos dados recolhidos. O objetivo era perceber se, os valores “anormais” poderiam apresentar uma falha na aquisição dos dados, uma avaria no aerogerador ou anomalia numa única grandeza.

4.6. CARACTERÍSTICAS E TREINO DA REDE NEURONAL ADOTADA

A rede neuronal utilizada é do tipo Perceptrão Multicamada (denominada *Multilayer Perceptrons – MLP*) com aprendizagem *Backpropagation*.

Como apresentado no ponto 4.4, foram definidas 4 variáveis de entrada e uma variável de saída.

A camada de entrada da rede neuronal tem um número de neurónios igual ao número de variáveis que foram escolhidas como entradas da rede. Cada uma dessas grandezas presentes na entrada irá alimentar um neurónio. A figura 4.14 representa a configuração da rede neuronal.

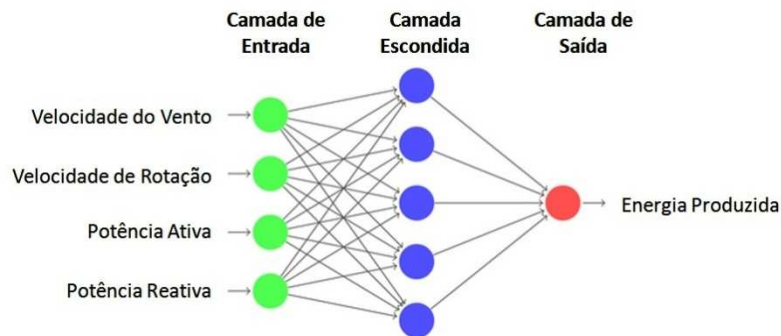


FIGURA 4.14 – CONFIGURAÇÃO DA REDE NEURONAL PARA PREVISÃO DA ENERGIA PRODUZIDA PELO AEROGERADOR

A informação colocada na camada de entrada da rede é depois transmitida para as camadas escondidas. A camada escondida pode conter várias camadas e cada uma possuir vários neurónios.

Para a implementação da rede neuronal foi usada uma camada escondida.

Inicialmente conforme pré-definido na ferramenta *NNtool* foram usados 10 neurónios na camada escondida da rede treinada. Na figura 4.15 está demonstrada a rede usada na ferramenta *NNtool*.

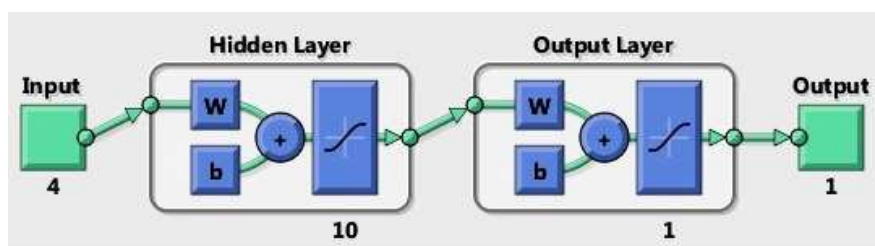


FIGURA 4.15 – ESQUEMA DA REDE NEURONAL TREINADA NA NNTOOL

A rede foi treinada nas mesmas condições alterando os neurónios na camada escondida para 15 e para 20. Conforme apresentado na tabela 4.3, os resultados mais satisfatórios obtiveram-se com o uso de 10 neurónios na camada escondida, apesar do tempo de treino mais elevado.

TABELA 4.3 - RESULTADO DO TREINO DA REDE ALTERANDO O NÚMERO DE NEURÓNIOS NA CAMADA INTERMÉDIA

Nº de Neurónios	Duração Treino da Rede	Percentagem de erro
10	17m:20s	0,002%
15	15m:35s	0,004%
20	14m:16s	0,897%

O valor de percentagem presente na tabela 4.3 refere-se ao erro existente entre o valor total da produção real de energia e o valor total da produção de energia estimada através do treino da rede neuronal.

Na figura 4.16 apresenta-se um fluxograma que pretende clarificar os vários passos executados na definição da rede a usar, no treino da mesma e na avaliação do desempenho da rede.

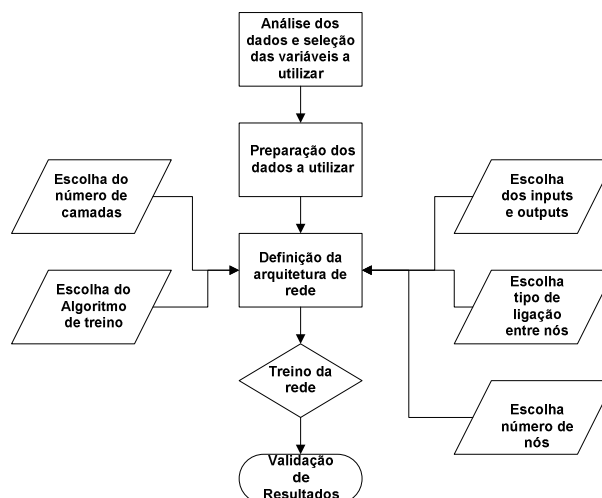


FIGURA 4.16 – FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO ADOTADO PARA O TREINO DA REDE

4.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

O método desenvolvido para o cálculo da energia produzida por aerogeradores é baseado na previsão de uma grandeza, através de uma rede neuronal, e posterior comparação com os dados reais, com objetivo de verificar desvios entre as grandezas em comparação.

A rede neuronal treinada permitiu obter para o período compreendido entre janeiro de 2011 e agosto de 2011 uma diferença de 65 kWh entre a produção real e a produção apresentada através do treino da rede neuronal do aerogerador, esta diferença representa 0.002% da produção total real do período em questão.

Após verificar que os resultados obtidos no treino da rede são bastante satisfatórios, procedeu-se à simulação dos valores de produção do aerogerador para as situações de avaria ou falha de comunicação com o contador de energia conforme ilustrado na figura 4.17.

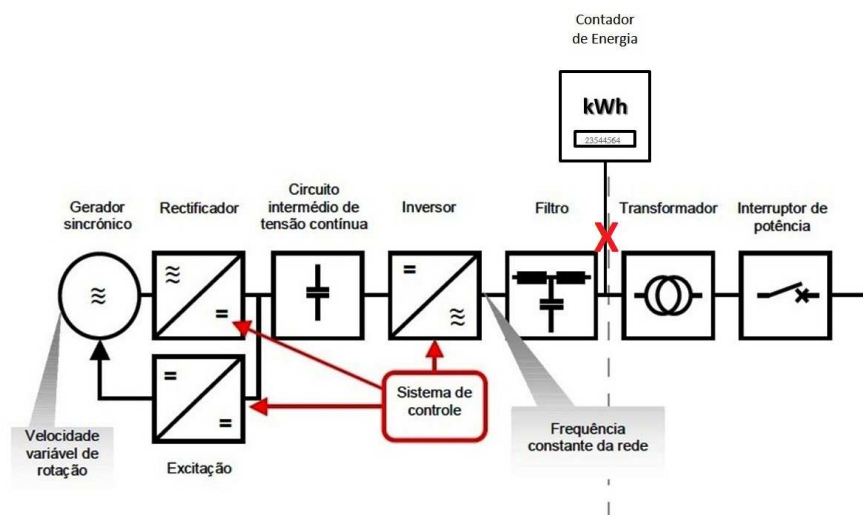


FIGURA 4.17 – ESQUEMA DE POTÊNCIA DO AEROGERADOR [44]

As falhas de comunicação ou avaria do contador não ocorrem num período de tempo específico, pode ter duração de alguns minutos, horas, dias, ou até

mesmo meses se for necessário substituir o contador ou a fibra de comunicação.

No seguimento das situações enunciadas, foram criados 5 cenários temporais em que não é possível saber o valor da produção de energia do contador do aerogerador. Os cenários são os seguintes:

- Cenário 1: dia 1 de setembro de 2011 entre as 10h e as 20h;
- Cenário 2: dia 24 de julho de 2011;
- Cenário 3: segunda quinzena de agosto de 2011;
- Cenário 4: mês de julho de 2011;
- Cenário 5: entre maio de 2011 e junho de 2011.

4.7.1. ANÁLISE DO CENÁRIO 1

O primeiro cenário refere-se ao período entre as 10h e as 20h do dia 1 de setembro de 2011. Durante esse período foi simulada a falha do contador de energia do aerogerador, aplicando a rede neuronal treinada.

Os dados referentes ao período anterior ao dia 1 de setembro de 2011 encontram-se agrupados por dia, tendo sido calculado os valores médios das grandezas nesses dias, devido à elevada quantidade de dados (dados 10 minutos).

Para o cenário descrito obtiveram-se os seguintes resultados:

Desenvolvimento de uma Metodologia baseada em redes neuronais para o cálculo da energia produzida por aerogeradores

TABELA 4.4 – TABELA RESULTADOS DO CENÁRIO 1

Data	H	M	S	V. Médio	Vrot. Médio	P Média	Q Média	E. Prod. (kWh)
01-08-2011				3,6	24,8	24,8	0	447
02-08-2011				9,8	318,3	318,3	0	6539
03-08-2011				6,4	112,2	112,2	0	2617
04-08-2011				11,6	427,3	427,3	0	10151
05-08-2011				12,3	507,2	507,2	0	12014
06-08-2011				15,2	1029,8	1029,8	0	24557
07-08-2011				12,4	481,4	481,4	0	11444
08-08-2011				11,9	461,1	461,1	0	10933
09-08-2011				12,9	489,3	489,3	0	11594
10-08-2011				11,1	501,8	501,8	0	11960
11-08-2011				7,9	105,7	105,7	0	2350
12-08-2011				7,3	92,2	92,2	0	2037
13-08-2011				9,8	264,8	264,8	0	6192
14-08-2011				12,2	391,2	391,2	0	9196
15-08-2011				6,2	77,4	77,4	0	1755
16-08-2011				8,5	115,0	115,0	0	2598
17-08-2011				8,3	100,5	100,5	0	2272
18-08-2011				6,9	78,8	78,8	0	1768
19-08-2011				8,5	133,4	133,4	0	3020
20-08-2011				10,5	306,8	306,8	0	7065
21-08-2011				13,5	787,8	787,8	0	18627
22-08-2011				10,6	237,0	237,0	0	5443
23-08-2011				9,0	146,8	146,8	0	3372
24-08-2011				7,9	101,1	101,1	0	2289
25-08-2011				12,8	464,7	464,7	0	10996
26-08-2011				13,8	643,1	643,1	0	15305
27-08-2011				9,4	191,8	191,8	0	4449
28-08-2011				10,3	209,0	209,0	0	4814
29-08-2011				3,4	25,2	25,2	0	558
30-08-2011				9,8	310,1	310,1	0	7100
31-08-2011				12,7	425,6	425,6	0	9862
01-09-2011	0	0	0	6,7	14,02	984	0	164
01-09-2011	0	10	0	7,0	14,66	600	0	100
01-09-2011	0	20	0	7,5	15,70	774	0	129
01-09-2011	0	30	0	7,6	15,79	792	0	132
01-09-2011	0	40	0	7,5	15,47	726	0	121
01-09-2011	0	50	0	7,2	15,25	695	0	115
01-09-2011	1	0	0	7,4	15,39	731	0	122
01-09-2011	1	10	0	8,1	16,24	939	0	157
01-09-2011	1	20	0	8,4	16,46	1128	0	189
01-09-2011	1	30	0	8,8	16,66	1321	0	222
01-09-2011	1	40	0	9,3	17,00	1534	0	257
01-09-2011	1	50	0	9,0	16,64	1317	0	220
01-09-2011	2	0	0	9,6	16,96	1576	0	265
01-09-2011	2	10	0	9,4	16,91	1538	0	257
01-09-2011	2	20	0	9,6	17,04	1637	0	274
01-09-2011	2	30	0	9,6	17,02	1620	0	270
01-09-2011	2	40	0	8,9	16,68	1347	0	225
01-09-2011	2	50	0	8,9	16,60	1284	0	215
01-09-2011	3	0	0	8,4	16,44	1091	0	183
01-09-2011	3	10	0	7,7	15,93	817	0	136
01-09-2011	3	20	0	7,3	14,84	629	0	104
01-09-2011	3	30	0	8,4	16,42	1077	0	180
01-09-2011	3	40	0	7,0	15,01	682	0	113
01-09-2011	3	50	0	7,4	15,26	690	0	115
01-09-2011	4	0	0	7,3	15,45	717	0	119
01-09-2011	4	10	0	7,2	15,29	714	0	119
01-09-2011	4	20	0	7,4	15,42	756	0	125
01-09-2011	4	30	0	6,3	13,47	470	0	77
01-09-2011	4	40	0	6,7	13,59	485	0	79
01-09-2011	4	50	0	6,5	13,11	437	0	71
01-09-2011	5	0	0	7,5	15,05	696	0	116

Desenvolvimento de uma Metodologia baseada em redes neuronais para o cálculo da energia produzida por aerogeradores

01-09-2011	5	10	0	8.0	15.57	897	0	149	
01-09-2011	5	20	0	7.4	14.54	682	0	113	
01-09-2011	5	30	0	6.7	12.92	447	0	72	
01-09-2011	5	40	0	7.4	14.45	705	0	117	
01-09-2011	5	50	0	7.7	15.56	834	0	139	
01-09-2011	6	0	0	8.0	15.46	814	0	136	
01-09-2011	6	10	0	8.5	16.33	1141	0	191	
01-09-2011	6	20	0	8.7	16.24	1087	0	182	
01-09-2011	6	30	0	8.3	16.03	1051	0	176	
01-09-2011	6	40	0	8.0	15.61	935	0	155	
01-09-2011	6	50	0	7.4	14.97	720	0	120	
01-09-2011	7	0	0	8.2	15.92	924	0	154	
01-09-2011	7	10	0	8.2	15.91	939	0	157	
01-09-2011	7	20	0	6.5	13.62	503	0	82	
01-09-2011	7	30	0	7.0	13.99	601	0	99	
01-09-2011	7	40	0	5.3	11.94	224	0	36	
01-09-2011	7	50	0	6.1	12.98	367	0	59	
01-09-2011	8	0	0	5.4	12.17	227	0	36	
01-09-2011	8	10	0	5.3	10.77	221	0	35	
01-09-2011	8	20	0	5.2	10.80	229	0	37	
01-09-2011	8	30	0	5.9	12.44	369	0	59	
01-09-2011	8	40	0	5.2	11.27	267	0	43	
01-09-2011	8	50	0	5.3	11.20	265	0	42	
01-09-2011	9	0	0	5.8	12.17	345	0	56	
01-09-2011	9	10	0	5.3	11.41	284	0	45	
01-09-2011	9	20	0	5.7	11.97	329	0	53	
01-09-2011	9	30	0	5.0	10.73	215	0	34	
01-09-2011	9	40	0	4.1	10.06	99	0	15	
01-09-2011	9	50	0	4.9	9.62	153	0	24	
01-09-2011	10	0	0	3.7	8.20	84	0	SEM CONTAGEM	13
01-09-2011	10	10	0	4.2	9.00	116	0	SEM CONTAGEM	18
01-09-2011	10	20	0	4.5	8.92	115	0	SEM CONTAGEM	18
01-09-2011	10	30	0	5.4	10.99	241	0	SEM CONTAGEM	38
01-09-2011	10	40	0	5.3	10.72	223	0	SEM CONTAGEM	35
01-09-2011	10	50	0	5.8	11.97	318	0	SEM CONTAGEM	51
01-09-2011	11	0	0	5.9	12.41	359	0	SEM CONTAGEM	58
01-09-2011	11	10	0	6.2	12.96	411	0	SEM CONTAGEM	67
01-09-2011	11	20	0	6.1	13.17	437	0	SEM CONTAGEM	71
01-09-2011	11	30	0	5.7	11.97	325	0	SEM CONTAGEM	52
01-09-2011	11	40	0	5.5	11.49	281	0	SEM CONTAGEM	45
01-09-2011	11	50	0	4.7	9.91	171	0	SEM CONTAGEM	27
01-09-2011	12	0	0	5.0	10.38	198	0	SEM CONTAGEM	31
01-09-2011	12	10	0	4.2	9.27	143	0	SEM CONTAGEM	22
01-09-2011	12	20	0	4.4	9.54	152	0	SEM CONTAGEM	24
01-09-2011	12	30	0	5.2	11.13	251	0	SEM CONTAGEM	40
01-09-2011	12	40	0	5.4	11.47	274	0	SEM CONTAGEM	44
01-09-2011	12	50	0	6.1	12.30	348	0	SEM CONTAGEM	56
01-09-2011	13	0	0	5.6	11.96	322	0	SEM CONTAGEM	52
01-09-2011	13	10	0	5.6	11.58	284	0	SEM CONTAGEM	45
01-09-2011	13	20	0	4.8	10.01	174	0	SEM CONTAGEM	27
01-09-2011	13	30	0	4.6	10.02	171	0	SEM CONTAGEM	27
01-09-2011	13	40	0	4.6	9.72	154	0	SEM CONTAGEM	24
01-09-2011	13	50	0	4.7	9.96	167	0	SEM CONTAGEM	26
01-09-2011	14	0	0	4.8	10.12	180	0	SEM CONTAGEM	28
01-09-2011	14	10	0	4.3	9.25	126	0	SEM CONTAGEM	20
01-09-2011	14	20	0	4.9	10.16	187	0	SEM CONTAGEM	29
01-09-2011	14	30	0	5.4	11.77	300	0	SEM CONTAGEM	48
01-09-2011	14	40	0	5.2	11.16	250	0	SEM CONTAGEM	40
01-09-2011	14	50	0	5.5	11.52	280	0	SEM CONTAGEM	45
01-09-2011	15	0	0	5.3	10.95	235	0	SEM CONTAGEM	37
01-09-2011	15	10	0	6.0	12.65	378	0	SEM CONTAGEM	61
01-09-2011	15	20	0	6.3	13.32	443	0	SEM CONTAGEM	72
01-09-2011	15	30	0	5.4	11.47	274	0	SEM CONTAGEM	44

E. Prod. Estimada (kWh)

Desenvolvimento de uma Metodologia baseada em redes neurais para o cálculo da energia produzida por aerogeradores

01-09-2011	15	40	0	4.7	10.04	176	0	SEM CONTAGEM	28
01-09-2011	15	50	0	6.4	13.18	441	0	SEM CONTAGEM	72
01-09-2011	16	0	0	5.9	11.98	320	0	SEM CONTAGEM	51
01-09-2011	16	10	0	5.4	11.71	312	0	SEM CONTAGEM	50
01-09-2011	16	20	0	4.7	9.51	148	0	SEM CONTAGEM	23
01-09-2011	16	30	0	5.8	11.60	284	0	SEM CONTAGEM	45
01-09-2011	16	40	0	5.7	11.91	313	0	SEM CONTAGEM	50
01-09-2011	16	50	0	4.3	9.36	141	0	SEM CONTAGEM	22
01-09-2011	17	0	0	5.5	11.34	263	0	SEM CONTAGEM	42
01-09-2011	17	10	0	5.5	11.44	278	0	SEM CONTAGEM	44
01-09-2011	17	20	0	6.3	13.14	427	0	SEM CONTAGEM	69
01-09-2011	17	30	0	7.5	15.42	778	0	SEM CONTAGEM	129
01-09-2011	17	40	0	7.6	15.84	792	0	SEM CONTAGEM	132
01-09-2011	17	50	0	7.6	15.86	822	0	SEM CONTAGEM	137
01-09-2011	18	0	0	7.0	14.80	625	0	SEM CONTAGEM	103
01-09-2011	18	10	0	6.8	13.94	528	0	SEM CONTAGEM	86
01-09-2011	18	20	0	7.2	14.73	632	0	SEM CONTAGEM	104
01-09-2011	18	30	0	7.8	15.53	768	0	SEM CONTAGEM	128
01-09-2011	18	40	0	7.9	15.96	850	0	SEM CONTAGEM	142
01-09-2011	18	50	0	8.7	16.41	1147	0	SEM CONTAGEM	192
01-09-2011	19	0	0	8.9	16.77	1423	0	SEM CONTAGEM	238
01-09-2011	19	10	0	8.8	16.54	1243	0	SEM CONTAGEM	208
01-09-2011	19	20	0	8.3	16.36	1023	0	SEM CONTAGEM	171
01-09-2011	19	30	0	9.0	16.65	1323	0	SEM CONTAGEM	222
01-09-2011	19	40	0	8.8	16.66	1331	0	SEM CONTAGEM	223
01-09-2011	19	50	0	8.2	16.38	1070	0	SEM CONTAGEM	179
01-09-2011	20	0	0	7.8	15.98	820	0	SEM CONTAGEM	137
01-09-2011	20	10	0	7.4	15.22	693	0	SEM CONTAGEM	115
01-09-2011	20	20	0	7.5	15.01	654	0	SEM CONTAGEM	108
01-09-2011	20	30	0	6.7	13.97	524	0	SEM CONTAGEM	86
01-09-2011	20	40	0	5.5	11.59	287	0	SEM CONTAGEM	46
01-09-2011	20	50	0	5.5	11.33	263	0	SEM CONTAGEM	42
01-09-2011	21	0	0	4.7	9.55	147	0		23
01-09-2011	21	10	0	5.2	11.09	248	0		39
01-09-2011	21	20	0	4.7	10.29	190	0		31
01-09-2011	21	30	0	5.4	11.22	258	0		41
01-09-2011	21	40	0	6.0	12.86	407	0		66
01-09-2011	21	50	0	6.6	13.83	504	0		83
01-09-2011	22	0	0	5.8	12.29	352	0		57
01-09-2011	22	10	0	5.7	11.79	300	0		48
01-09-2011	22	20	0	5.8	11.93	313	0		51
01-09-2011	22	30	0	6.1	12.39	351	0		56
01-09-2011	22	40	0	5.6	11.77	299	0		48
01-09-2011	22	50	0	5.8	12.59	369	0		60
01-09-2011	23	0	0	6.1	13.41	457	0		75
01-09-2011	23	10	0	6.1	13.48	464	0		76
01-09-2011	23	20	0	5.6	12.53	364	0		59
01-09-2011	23	30	0	5.3	11.74	295	0		47
01-09-2011	23	40	0	5.2	10.45	199	0		32
01-09-2011	23	50	0	6.0	12.49	363	0		58

Total Produção dia 01/09/2011 10h às 20h	4767 kWh
Total Simulação dia 01/09/2011 10h às 20h	4759 kWh
Diferença de Produção	-8 kWh
Porcentagem erro	0.17 %

Conforme demonstrado na tabela 4.4 e no resumo dos resultados obtidos, a diferença entre a produção real e a produção estimada é insignificante (8 kWh), a diferença entre ambas não ultrapassa os 0.2%, sendo este valor extremamente satisfatório.

4.7.2. ANÁLISE DO CENÁRIO 2

O período de estudo do cenário 2 refere-se às 24h do dia 24 de julho de 2011. Durante esse dia simula-se a não existência de dados no contador de energia referente à energia produzida pelo aerogerador.

Os dados dos restantes dias do mês de julho 2011 encontram-se agrupados por dia, devido ao número elevado de dados (dados de 10 minutos), tendo sido calculado os valores médios das grandezas nesses dias.

Para o cenário descrito obtiveram-se os seguintes resultados:

TABELA 4.5 - TABELA RESULTADOS DO CENÁRIO 2

Data	H	M	S	V. Médio	Vrot. Médio	P Média	Q Média	E. Prod. (kWh)		
01-07-2011				5.2	11.0	284.4	-57.2	6632		
02-07-2011				4.2	9.4	149.8	-47.1	3401		
03-07-2011				5.2	11.1	303.8	-53.5	7114		
04-07-2011				4.9	10.7	254.6	-53.1	5923		
05-07-2011				5.7	11.8	361.5	-55.3	8313		
06-07-2011				6.2	12.5	483.4	-22.9	11496		
07-07-2011				8.1	15.2	882.7	0.0	20996		
08-07-2011				9.1	16.0	1176.9	0.0	26486		
09-07-2011				5.7	11.4	294.2	0.0	6856		
10-07-2011				3.4	6.9	65.4	0.0	1463		
11-07-2011				2.8	6.6	40.7	0.0	717		
12-07-2011				7.6	13.2	899.9	0.0	12826		
13-07-2011				8.0	15.0	994.3	0.0	20160		
14-07-2011				3.3	6.3	79.7	0.0	1590		
15-07-2011				3.6	7.3	194.1	0.0	4557		
16-07-2011				6.2	12.4	558.9	0.0	13259		
17-07-2011				9.1	16.4	1320.9	0.0	31626		
18-07-2011				7.1	13.0	835.3	0.0	18565		
19-07-2011				8.4	15.5	1097.9	0.0	26315		
20-07-2011				7.1	11.6	792.0	0.0	18253		
21-07-2011				7.1	13.6	664.6	0.0	15739		
22-07-2011				5.5	11.1	304.7	0.0	7140		
23-07-2011				5.7	11.4	388.8	0.0	15600		
24-07-2011	0	10	0	10.0	16.66	1338	0	SEM DADOS	E. Prod. Estimada (kWh)	224
24-07-2011	0	20	0	9.8	16.46	1181	0	SEM DADOS		198
24-07-2011	0	30	0	9.4	16.33	964	0	SEM DADOS		161
24-07-2011	0	40	0	9.0	16.25	916	0	SEM DADOS		153
24-07-2011	0	50	0	9.0	16.24	909	0	SEM DADOS		152
24-07-2011	1	0	0	8.8	16.08	827	0	SEM DADOS		138
24-07-2011	1	10	0	8.7	15.82	747	0	SEM DADOS		124
24-07-2011	1	20	0	8.5	15.71	727	0	SEM DADOS		121
24-07-2011	1	30	0	8.7	15.87	766	0	SEM DADOS		127
24-07-2011	1	40	0	8.3	15.30	670	0	SEM DADOS		111
24-07-2011	1	50	0	8.1	14.88	617	0	SEM DADOS		102
24-07-2011	2	0	0	8.8	15.57	708	0	SEM DADOS		118
24-07-2011	2	10	0	9.3	16.23	908	0	SEM DADOS		152
24-07-2011	2	20	0	9.5	16.46	1038	0	SEM DADOS		174
24-07-2011	2	30	0	8.8	15.99	798	0	SEM DADOS		133
24-07-2011	2	40	0	8.3	15.73	741	0	SEM DADOS		123
24-07-2011	2	50	0	7.9	14.31	550	0	SEM DADOS		90
24-07-2011	3	0	0	7.9	14.35	554	0	SEM DADOS		91
24-07-2011	3	10	0	8.5	15.15	660	0	SEM DADOS		109
24-07-2011	3	20	0	9.1	16.17	884	0	SEM DADOS		148
24-07-2011	3	30	0	9.6	16.52	1184	0	SEM DADOS		198
24-07-2011	3	40	0	10.1	16.75	1400	0	SEM DADOS		234
24-07-2011	3	50	0	8.1	15.52	753	0	SEM DADOS		125
24-07-2011	4	0	0	7.8	14.17	537	0	SEM DADOS		88
24-07-2011	4	10	0	8.5	15.12	678	0	SEM DADOS		112
24-07-2011	4	20	0	8.9	16.26	934	0	SEM DADOS		156
24-07-2011	4	30	0	9.1	16.30	954	0	SEM DADOS		159
24-07-2011	4	40	0	8.7	16.03	841	0	SEM DADOS		140
24-07-2011	4	50	0	8.0	15.23	684	0	SEM DADOS		113
24-07-2011	5	0	0	7.3	13.78	493	0	SEM DADOS		81
24-07-2011	5	10	0	7.8	14.10	532	0	SEM DADOS		87
24-07-2011	5	20	0	8.2	15.10	655	0	SEM DADOS		108
24-07-2011	5	30	0	8.5	15.80	832	0	SEM DADOS		139
24-07-2011	5	40	0	10.0	16.79	1437	0	SEM DADOS		240
24-07-2011	5	50	0	10.3	16.79	1444	0	SEM DADOS		242
24-07-2011	6	0	0	9.7	16.61	1293	0	SEM DADOS		216
24-07-2011	6	10	0	10.1	16.62	1302	0	SEM DADOS		218
24-07-2011	6	20	0	9.4	16.27	965	0	SEM DADOS		161
24-07-2011	6	30	0	10.2	16.73	1369	0	SEM DADOS		229

Desenvolvimento de uma Metodologia baseada em redes neuronais para o cálculo da energia produzida por aerogeradores

24-07-2011	6	40	0	12.5	17.65	1908	0	SEM DADOS	317
24-07-2011	6	50	0	12.1	17.81	2017	0	SEM DADOS	335
24-07-2011	7	0	0	10.9	17.20	1716	0	SEM DADOS	286
24-07-2011	7	10	0	11.3	17.42	1861	0	SEM DADOS	310
24-07-2011	7	20	0	9.1	16.29	990	0	SEM DADOS	166
24-07-2011	7	30	0	8.9	16.24	934	0	SEM DADOS	156
24-07-2011	7	40	0	9.4	16.50	1136	0	SEM DADOS	190
24-07-2011	7	50	0	9.9	16.66	1328	0	SEM DADOS	222
24-07-2011	8	0	0	10.3	16.88	1512	0	SEM DADOS	253
24-07-2011	8	10	0	10.2	16.70	1366	0	SEM DADOS	229
24-07-2011	8	20	0	9.8	16.50	1194	0	SEM DADOS	200
24-07-2011	8	30	0	9.7	16.59	1271	0	SEM DADOS	213
24-07-2011	8	40	0	8.4	15.73	797	0	SEM DADOS	133
24-07-2011	8	50	0	9.0	16.18	942	0	SEM DADOS	157
24-07-2011	9	0	0	7.3	14.10	529	0	SEM DADOS	87
24-07-2011	9	10	0	7.6	14.87	664	0	SEM DADOS	110
24-07-2011	9	20	0	7.3	14.32	575	0	SEM DADOS	95
24-07-2011	9	30	0	7.4	13.93	513	0	SEM DADOS	84
24-07-2011	9	40	0	7.1	13.06	417	0	SEM DADOS	68
24-07-2011	9	50	0	6.0	11.55	277	0	SEM DADOS	44
24-07-2011	10	0	0	6.4	11.86	300	0	SEM DADOS	48
24-07-2011	10	10	0	6.0	11.13	248	0	SEM DADOS	39
24-07-2011	10	20	0	5.1	9.57	142	0	SEM DADOS	22
24-07-2011	10	30	0	4.9	9.42	135	0	SEM DADOS	21
24-07-2011	10	40	0	4.2	8.80	102	0	SEM DADOS	16
24-07-2011	10	50	0	4.6	9.45	136	0	SEM DADOS	21
24-07-2011	11	0	0	4.8	9.77	158	0	SEM DADOS	25
24-07-2011	11	10	0	4.4	9.14	124	0	SEM DADOS	19
24-07-2011	11	20	0	5.3	10.08	184	0	SEM DADOS	29
24-07-2011	11	30	0	4.0	8.90	110	0	SEM DADOS	17
24-07-2011	11	40	0	4.1	8.98	113	0	SEM DADOS	17
24-07-2011	11	50	0	5.0	10.06	174	0	SEM DADOS	27
24-07-2011	12	0	0	5.0	10.58	209	0	SEM DADOS	33
24-07-2011	12	10	0	4.8	10.25	190	0	SEM DADOS	30
24-07-2011	12	20	0	4.7	10.06	184	0	SEM DADOS	29
24-07-2011	12	30	0	5.1	10.67	219	0	SEM DADOS	35
24-07-2011	12	40	0	5.1	10.91	231	0	SEM DADOS	37
24-07-2011	12	50	0	5.2	10.98	238	0	SEM DADOS	38
24-07-2011	13	0	0	4.1	10.22	145	0	SEM DADOS	22
24-07-2011	13	10	0	3.6	10.09	125	0	SEM DADOS	19
24-07-2011	13	20	0	4.6	10.09	172	0	SEM DADOS	27
24-07-2011	13	30	0	4.2	9.08	124	0	SEM DADOS	19
24-07-2011	13	40	0	4.6	8.95	124	0	SEM DADOS	19
24-07-2011	13	50	0	4.1	8.14	83	0	SEM DADOS	13
24-07-2011	14	0	0	3.5	7.37	59	0	SEM DADOS	9
24-07-2011	14	10	0	3.2	7.21	42	0	SEM DADOS	6
24-07-2011	14	20	0	4.2	8.18	75	0	SEM DADOS	11
24-07-2011	14	30	0	3.9	7.87	66	0	SEM DADOS	10
24-07-2011	14	40	0	3.6	7.14	36	0	SEM DADOS	5
24-07-2011	14	50	0	5.9	11.62	284	0	SEM DADOS	45
24-07-2011	15	0	0	5.5	10.98	242	0	SEM DADOS	38
24-07-2011	15	10	0	5.6	11.52	280	0	SEM DADOS	45
24-07-2011	15	20	0	5.4	9.92	169	0	SEM DADOS	27
24-07-2011	15	30	0	5.4	10.78	223	0	SEM DADOS	35
24-07-2011	15	40	0	4.6	9.85	162	0	SEM DADOS	25
24-07-2011	15	50	0	5.5	12.61	253	0	SEM DADOS	40
24-07-2011	16	0	0	5.5	9.82	161	0	SEM DADOS	25
24-07-2011	16	10	0	6.3	12.58	382	0	SEM DADOS	62
24-07-2011	16	20	0	8.0	15.55	747	0	SEM DADOS	124
24-07-2011	16	30	0	7.9	15.74	779	0	SEM DADOS	130
24-07-2011	16	40	0	8.3	15.91	907	0	SEM DADOS	151
24-07-2011	16	50	0	8.3	16.04	885	0	SEM DADOS	148
24-07-2011	17	0	0	7.5	14.83	634	0	SEM DADOS	105

Desenvolvimento de uma Metodologia baseada em redes neuronais para o cálculo da energia produzida por aerogeradores

24-07-2011	17	10	0	7.1	13.24	434	0	SEM DADOS	70
24-07-2011	17	20	0	7.1	13.56	464	0	SEM DADOS	76
24-07-2011	17	30	0	5.4	11.76	293	0	SEM DADOS	47
24-07-2011	17	40	0	6.7	12.66	373	0	SEM DADOS	60
24-07-2011	17	50	0	7.9	14.95	697	0	SEM DADOS	115
24-07-2011	18	0	0	8.5	15.92	832	0	SEM DADOS	139
24-07-2011	18	10	0	8.2	15.68	774	0	SEM DADOS	129
24-07-2011	18	20	0	8.4	15.58	759	0	SEM DADOS	126
24-07-2011	18	30	0	8.5	15.76	844	0	SEM DADOS	141
24-07-2011	18	40	0	7.4	14.08	532	0	SEM DADOS	87
24-07-2011	18	50	0	8.7	16.16	902	0	SEM DADOS	151
24-07-2011	19	0	0	7.7	14.59	591	0	SEM DADOS	97
24-07-2011	19	10	0	8.7	15.97	844	0	SEM DADOS	141
24-07-2011	19	20	0	8.2	15.32	751	0	SEM DADOS	125
24-07-2011	19	30	0	8.5	15.85	821	0	SEM DADOS	137
24-07-2011	19	40	0	7.9	14.97	650	0	SEM DADOS	107
24-07-2011	19	50	0	8.0	14.61	603	0	SEM DADOS	99
24-07-2011	20	0	0	7.9	15.15	697	0	SEM DADOS	115
24-07-2011	20	10	0	8.1	15.22	685	0	SEM DADOS	113
24-07-2011	20	20	0	8.7	15.73	790	0	SEM DADOS	131
24-07-2011	20	30	0	8.0	14.67	598	0	SEM DADOS	99
24-07-2011	20	40	0	7.8	14.49	581	0	SEM DADOS	96
24-07-2011	20	50	0	6.8	13.05	428	0	SEM DADOS	69
24-07-2011	21	0	0	7.4	13.30	444	0	SEM DADOS	72
24-07-2011	21	10	0	8.1	14.54	583	0	SEM DADOS	96
24-07-2011	21	20	0	6.7	12.67	376	0	SEM DADOS	61
24-07-2011	21	30	0	6.4	12.28	342	0	SEM DADOS	55
24-07-2011	21	40	0	7.0	12.67	374	0	SEM DADOS	60
24-07-2011	21	50	0	7.7	14.41	618	0	SEM DADOS	102
24-07-2011	22	0	0	9.4	16.44	1108	0	SEM DADOS	185
24-07-2011	22	10	0	8.5	15.91	829	0	SEM DADOS	138
24-07-2011	22	20	0	9.4	16.50	1143	0	SEM DADOS	191
24-07-2011	22	30	0	9.9	16.60	1294	0	SEM DADOS	217
24-07-2011	22	40	0	9.7	16.59	1252	0	SEM DADOS	210
24-07-2011	22	50	0	10.2	16.71	1374	0	SEM DADOS	230
24-07-2011	23	0	0	10.1	16.58	1276	0	SEM DADOS	214
24-07-2011	23	10	0	9.4	16.34	1010	0	SEM DADOS	169
24-07-2011	23	20	0	9.2	16.17	921	0	SEM DADOS	154
24-07-2011	23	30	0	10.5	16.84	1474	0	SEM DADOS	246
24-07-2011	23	40	0	10.6	16.94	1555	0	SEM DADOS	260
24-07-2011	23	50	0	10.1	16.69	1342	0	SEM DADOS	225
25-07-2011	0	0	0	9.3	16.41	1113	0	SEM DADOS	186
25-07-2011				7.4	13.6	633.2	0.0		14028
26-07-2011				7.3	12.9	647.4	0.0		13818
27-07-2011				6.5	12.4	467.6	0.0		10728
28-07-2011				5.3	10.5	312.9	0.0		7366
29-07-2011				4.5	9.1	164.4	0.0		3655
30-07-2011				3.8	8.6	139.3	0.0		3167
31-07-2011				3.8	7.9	108.4	0.0		2436

Total Produção de 24 de Julho	
16638 kWh	
Total de Produção Estimativa 24 Julho	
16656 kWh	
Diferença de Produção	
18 kWh	
Porcentagem erro	
0.11 %	

Os resultados obtidos demonstram que a diferença entre a produção real e a produção estimada é insignificante (18 kWh), a diferença entre ambas não ultrapassa os 0.11%, sendo este valor extremamente satisfatório.

4.7.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS VÁRIOS CENÁRIOS

A rede neuronal treinada neste trabalho permitiu obter um excelente resultado, a da diferença entre a produção real do aerogerador e a produção estimada é insignificante em termos operacionais, conforme demonstrado anteriormente.

Os cenários selecionados abrangem um leque de períodos temporais sem disponibilização dos dados do contador do aerogerador.

O método desenvolvido para o cálculo da energia produzida pelo aerogerador é baseado na previsão da produção de energia, através de uma rede neuronal, e posterior comparação com os dados reais, com objetivo de verificar desvios entre as grandezas em comparação, este método foi aplicado nos cenários selecionados.

Na tabela 4.6 é apresentado um resumo das comparações efetuadas entre a energia produzida e a energia produzida estimada em cada um dos cenários.

TABELA 4.6 – RESULTADOS DOS CENÁRIOS EM ESTUDO

Cenário	Energia Produzida Real (kWh)	Energia Produzida Estimada (kWh)	Diferença de Produção (kWh)	Percentagem da diferença (%)
1	4767	4759	8	0,17
2	16638	16656	11	0,11
3	99538	99633	95	0,10
4	355368	355332	36	0,01
5	490790	491072	282	0,06

O cenário em que se verificou maior diferença entre o valor real e o estimado foi o cenário 1, correspondente a 0,17% de diferença. Na globalidade a

diferença entre a energia estimada e a energia real não ultrapassou os 0,2%, valor esse que do ponto vista da operação dos parques eólicos representa uma diferença insignificante.

Os excelentes resultados obtidos devem-se em grande parte à preparação dos dados de entrada da rede neuronal, de modo que, traduzissem de forma fidedigna o funcionamento do equipamento a estimar.

Os anexos E, F e G disponibilizam os dados referentes aos cenários 3, 4 e 5 e os respectivos resultados. Nesses cenários devido à quantidade de dados (dados 10 minutos), foram apresentados os dados médios diários para as variáveis presentes.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

5. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação procurou dar um contributo para a melhoria da monitorização da energia produzida pelos aerogeradores. As falhas de comunicação e avarias dos contadores de energia nos aerogeradores na maioria das situações originam o desconhecimento da energia produzida pelo aerogerador num período temporal. Apesar da existência em todos os parques eólicos de um contador de energia referente à produção global dos aerogeradores, torna-se de elevada importância o conhecimento da produção de energia individual de cada aerogerador para o estudo e acompanhamento do seu desempenho.

Os Centros de Condução e Despacho efetuam uma supervisão do desempenho dos aerogeradores através de todas as ferramentas disponíveis pelos fabricantes dos mesmos. A utilização dos dados operacionais dos aerogeradores pelos Centros de Condução e Despacho é de grande utilidade, permitindo contribuir para a melhor compreensão do seu funcionamento. No entanto, a sua manipulação não é de caráter fácil, sendo necessário um grande esforço computacional.

A seleção das redes neuronais artificiais para trabalhar a elevada quantidade de dados disponíveis, assume-se como uma escolha acertada. Este tipo de ferramenta apresenta uma grande facilidade em analisar os dados e entender a relação existente entre as variáveis, tornando-se uma mais-valia no cálculo da energia produzida por aerogeradores.

A qualidade dos dados de entrada da rede neuronal a ser treinada é fundamental, os dados devem traduzir de forma fidedigna o funcionamento do equipamento a estimar. No trabalho desenvolvido foi adotada uma metodologia de seleção das variáveis mais importantes e influentes no cálculo pretendido. O período temporal selecionado para o treino da rede foi baseado na análise da disponibilidade técnica dos aerogeradores do parque eólico em questão.

Com os dados disponíveis foi possível treinar a rede neuronal para a estimativa do valor da energia produzida pelo aerogerador. O treino obtido permite simular vários cenários temporais referentes à indisponibilidade de dados pelo contador de energia.

A análise efetuada aos resultados obtidos permite concluir que os mesmos foram excelentes, sendo possível calcular a energia produzida pelo aerogerador através do método com um erro nunca superior a 0,2% considerando os cenários estudados.

Este trabalho de investigação proporciona um conhecimento da energia produzida pelo aerogerador quase em tempo real (necessário efetuar aquisição dos dados antes de iniciar o treino) em caso de falha de comunicação/avaria do contador de uma forma rápida e eficaz. O método desenvolvido usa apenas a informação presente nos dados disponibilizados pelo sistema SCADA dos aerogeradores.

TRABALHOS FUTUROS A DESENVOLVER

Os conhecimentos adquiridos na execução desta dissertação permitem desenvolver futuras metodologias de cálculo a aplicar pelos Centros de Condução e Despacho na monitorização do funcionamento dos aerogeradores.

Podem ser desenvolvidos estudos nas seguintes áreas:

- Aplicação do método desenvolvido no cálculo do fator de carga dos aerogeradores;
- Aplicação do método desenvolvido na verificação do cumprimento da produção de energia prevista aquando dos estudos levados a cabo na fase de projeto do parque eólico;
- Aplicação do método desenvolvido na verificação do cumprimento pelos aerogeradores da curva de potência garantida pelos fabricantes durante o seu funcionamento e fatores relacionadas com o seu incumprimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INEGI, APREN, "Parques Eólicos em Portugal", Dezembro 2011
- [2] GWEC, "*A energia eólica avança apesar da crise econômica*", consultado em: Junho 2012, disponível em: www.gwec.net
- [3] EWEA, "Wind in power 2011 European statistics", 2012
- [4] DGEG, "Renováveis, Estatísticas Rápidas Dezembro 2011", 2012
- [5] CITAI, "Formación de Promotores de Renovables", Neo-Energia, Oviedo, 2007
- [6] Sousa JNMS. "Previsão da Produção Elétrica em Parques Eólicos". Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007
- [7] Bessa RJGSB. "Treino On Line de Redes Neuronais com Critérios de Informação Aplicado à Previsão Eólica". Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [8] Castro RMG, "Condições Técnicas de Ligação de Produção Descentralizada Renovável", IST, Lisboa, 2004
- [9] Aeromini, "*Funcionamento de um aerogerador*", consultado em: Maio 2012, disponível em: http://aero-mini.blogspot.pt/2009/11/funcionamento-de-um-aerogerador_27.html
- [10] Buratto S, "*Aerogerador E-70*", consultado em: Junho 2012, disponível em: <http://www.flickr.com/photos/22069116@N00/2296328339>
- [11] CRESESB, "*Tutorial de Energia Eólica - Princípios e Tecnologias (2008)*", consultado em: Maio disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>
- [12] COTEC, "*Energia Eólica - Anexo Técnico IX*", consultado em: Maio 2012, disponível em: <http://www.cotec.es/>

- [13] Castro RMG, Jesus JMF, "Equipamentos Elétricos dos Geradores Eólicos", IST, Lisboa, 2008

- [14] Gamesa, "Formación Técnica Aerogenerador", Neo-Energia, Asturias, 2007

- [15] Amenedo JLR, Gómez SA, Díaz JCB. "Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica": Rueda, 2003.

- [16] Paiva JPS. "redes de energia elétrica: Uma análise sistémica": IST Press, 2011.

- [17] Palma JCP. "Accionamentos electromecânicos de velocidade variável": Calouste Gulbenkian, 1999.

- [18] Wordpress, "*Motor de Indução Trifásico*", consultado em: Junho 2012, disponível em: <http://mperador.wordpress.com/2010/03/07/150/>

- [19] Motores M, "*Gerador Assíncrono Trifásico Duplamente Alimentado*", consultado em: Junho 2012, disponível em: <http://www.mapmotores.com.br/mapnews.php?ano=2010&mes=1>

- [20] Bagi C, "*Geradores Síncronos - Princípio de Funcionamento*", consultado em: Maio 2012, disponível em: <http://bagi.sites.uol.com.br/PrincipFuncGerador.htm>

- [21] Lopes JAP, "Tipos de Aerogeradores, Modelização, Controlo e Proteções.", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006

- [22] e-LEE A, "*E-Learning Tools for Electrical Engineering*", consultado em: Junho 2012, disponível em: <http://sites-final.uclouvain.be/e-lee/PO/association/association.htm>

- [23] Lopes JAP, "Definição das Condições de Ligação à Rede", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003

- [24] Macedo JMN, Silva DMP. "Regulação de Proteções na Interligação de Parques Eólicos com a Rede Elétrica". Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2008.
- [25] Lei D. Portaria nº 596 de 30 de Julho de 2010, "Regulamento de Redes de Transporte" e "Regulamento de Redes de Distribuição", Diário da Republica nº 147/2010 – 1ª Série. 2010.
- [26] Almeida R. "Contribuições para a Avaliação ao da Capacidade de Fornecimento de Serviços de sistema por parte de Aerogeradores de Indução Duplamente Alimentados". Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [27] Silva BMA. "Parques Eólicos com "Ride-through Fault: Validação de um Novo Sistema de Proteção em Tempo Real com ajuda do RTDS". Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [28] Osório J, Pestana R, Andrade M. "O Projecto Europeu Wind on the Grid". O electricista. 2008.
- [29] Osório J, Pestana R, Andrade M. "Integração de geração eólica em redes eléctricas: controlabilidade da produção eólica". XIII ERIAC Décimo Terceiro Encuentro Regional Iberoamericano DE CIGRÉ. Puerto Iguazú - Argentina, 2009. p. 8.
- [30] Iberdrola, "*How to operate*", consultado em: Maio 2012, disponível em: <http://www.iberdrola.com/webibd/corporativa/iberdrola?IDPAG=ENWEBRESINNRENCOREFUN&codCache=13433257786288800>
- [31] Lingireddy S, Brion GM, Environmental, Institute WR. "Artificial Neural Networks in Water Supply Engineering": American Society of Civil Engineers, 2005.
- [32] Kasabov NK. "Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering": Mit Press, 1996.
- [33] Haykin SS. "Neural networks : a comprehensive foundation". 2nd ed. ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall ; London : Prentice-Hall International, 1999.

- [34] Gama CV, "*Neurónios - Células do Sistema Nervoso*", consultado em: Junho 2012, disponível em: <http://ciencias3c.cvg.com.pt/nono/neuronios.html>
- [35] Matos JCGSC. "Utilização de redes neuronais artificiais para a modelação da degradação de sistemas de distribuição de água". Lisboa: IST, 2008.
- [36] Andrade AC. "Análise da estabilidade de tensão em sistemas elétricos de energia". Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [37] Neves J, Cortez P, "Redes Neuronais Artificiais ", Escola Engenharia do Minho, Braga, 2000
- [38] Russell SJ, Norvig P. "Artificial intelligence : a modern approach". Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall ; London : Prentice-Hall International, 1995.
- [39] Dhar V, Stein R. "Seven methods for transforming corporate data into business intelligence". Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall ; London : Prentice-Hall International (UK), 1997.
- [40] Yamamoto Y, Nikiforuk PN. "A new supervised learning algorithm for multilayered and interconnected neural networks". *Ieee Transactions on Neural Networks*. 2000;11(1):36-46.
- [41] Carvalho APLF, "Perceptron Multicamadas", USP, São Paulo, 2002
- [42] Brandão RFM. "Assinatura Digital de Geradores Eólicos". Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [43] Duin RPW. Learned from Neural Networks. Sixth Annual Conference of the Advanced School for Computing and Imaging. Belgium2000. p. 5.
- [44] Anlas S, Kuhlmann M, "Descrição técnica do E-82", Enercon, Viana Castelo, 2005

- [45] Anlas S, Kuhlmann M, "ENERCON SCADA Remote ", Enercon, Viana Castelo, 2005

ANEXO A

ANEXO A – ESQUEMA DA REDE DE COMUNICAÇÕES DE UM PARQUE EÓLICO

Este esquema permite ter a perceção da ligação em anel da fibra ótica entre o SCADA PC e os aerogeradores de um parque eólico.

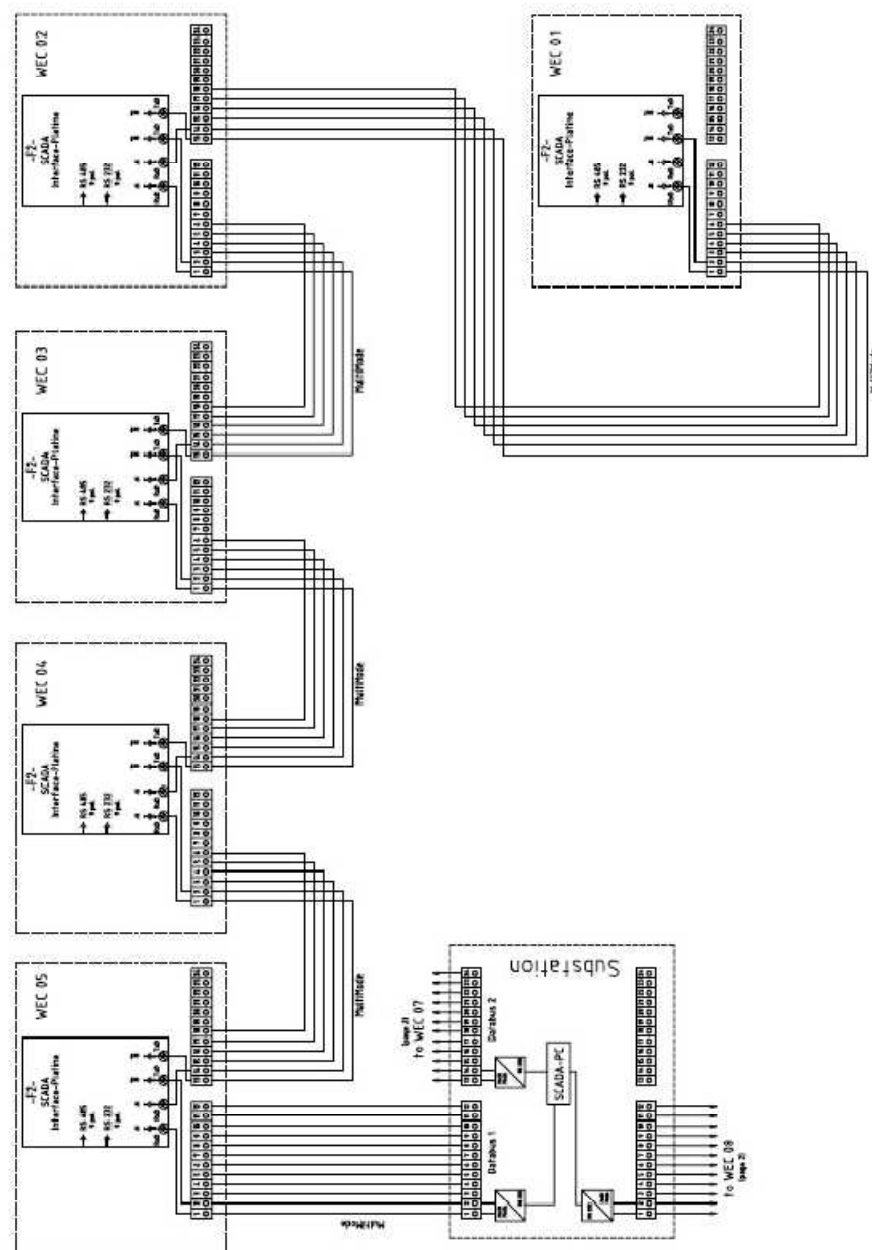


FIGURA A.0.1 - ESQUEMA DAS COMUNICAÇÃO DOS AEROGERADORES DE UM PARQUE EÓLICO

ANEXO B

ANEXO B – REGISTO DE ESTADOS DE UM AEROGERADOR

O SCADA *Remote* permite visualizar o histórico de estados de cada um dos aerogeradores de um parque eólico, assim como, os alarme ativo em caso de avaria.

Data	Tempo	Nota	Estado	T		Vento [m/s]	Duração	Aviso	
12.07.2012	21:28:20	Informação				6,60		0:0	
	21:28:17	Informação				6,20		235:0	Tower door
	21:28:14	Estado	0:0	1	Turbine in operation	6,50	0:48:32	235:1	Tower door
	21:26:14	Estado	0:8	1	Turbine in operation during maintenance	6,60	0:02:00		
	20:35:58	Estado	8:0	6	Maintenance	6,90	0:50:16		
	20:35:52	Estado	0:8	1	Turbine in operation during maintenance	7,20	0:00:06		
	20:35:49	Informação				7,20		0:0	
	20:35:46	Mensagem de Aviso				7,50		235:1	Tower door
	19:26:16	Estado	0:0	1	Turbine in operation	10,70	1:09:36		
	19:26:23	Estado	0:1	1	Turbine starting	9,40	0:00:53		
	19:23:39	Estado	0:2	1	Turbine operational	8,40	0:01:44		
	19:23:31	Estado	220:2	6	Processor reset	I/O board	8,30	0:00:08	
	19:23:23	Estado	222:3	6	Turbine reset	Scada system	6,20	0:00:08	0:0
	19:14:17	Mensagem de estado	42:23	6	Pitch control error	Motor current to high blade B	8,70	0:09:06	
	18:48:16	Estado	0:0	1	Turbine in operation	10,50	0:26:01		
	18:47:19	Estado	0:1	1	Turbine starting	9,50	0:00:57		
	18:46:14	Estado	0:2	1	Turbine operational	7,60	0:01:05		
	18:45:41	Estado	42:23	6	Pitch control error	Motor current to high blade B	10,60	0:00:33	
	18:33:15	Estado	0:0	1	Turbine in operation	10,20	0:12:26		
	18:32:20	Estado	0:1	1	Turbine starting	8,50	0:00:55		
	18:30:46	Estado	0:2	1	Turbine operational	10,30	0:01:34		
	18:30:17	Estado	42:23	6	Pitch control error	Motor current to high blade B	11,20	0:00:29	
	18:19:15	Estado	0:0	1	Turbine in operation	10,00	0:11:02		
	18:18:18	Estado	0:1	1	Turbine starting	10,70	0:00:57		
	18:16:46	Estado	0:2	1	Turbine operational	10,90	0:01:32		
	18:16:16	Estado	42:23	6	Pitch control error	Motor current to high blade B	9,60	0:00:30	
	18:04:15	Estado	0:0	1	Turbine in operation	8,70	0:12:01		
	18:03:19	Estado	0:1	1	Turbine starting	9,10	0:00:56		
	18:01:46	Estado	0:2	1	Turbine operational	8,30	0:01:33		
	18:01:18	Estado	42:23	6	Pitch control error	Motor current to high blade B	10,10	0:00:28	
	17:51:15	Estado	0:0	1	Turbine in operation	9,40	0:10:03		
	17:50:18	Estado	0:1	1	Turbine starting	10,10	0:00:57		
	17:48:50	Estado	0:2	1	Turbine operational	10,20	0:01:28		
	17:48:20	Estado	42:23	6	Pitch control error	Motor current to high blade B	10,00	0:00:30	
	16:13:16	Estado	0:0	1	Turbine in operation	8,30	1:35:04		
	16:12:20	Estado	0:1	1	Turbine starting	9,10	0:00:56		

FIGURA B.0.1 - REGISTO DE ESTADOS E ALARMES DE UM AEROGERADOR NO SCADA *REMOTE*

ANEXO C

ANEXO C – CARACTERÍSTICAS DO AEROGERADOR E-82 DA ENERCON

TABELA C.0.1 – CARACTERÍSTICAS DO AEROGERADOR E-82

Rotor	
Tipo	E82-1
Diâmetro do rotor	82 m
Área varrida pelas pás	5281 m ²
Regulação da potência	Ângulo de passo das pás
RPM	Variável 6 –20,5 min ⁻¹
Velocidade do vento – início de produção	2,5 m/s
Velocidade do vento – corte de produção	24 – 34 m/s
Velocidade do vento – potência nominal	ca 11,5 m/s
Velocidade de destruição	59,5 m/s
Caixa de engrenagens	
Não aplicável	Nenhuma caixa de engrenagens
Pás	
Fabricante	ENERCON
Comprimento das pás:	38,8 m
Material	PRFV (epóxi)
Protecção contra descargas atmosféricas	Incluída
Gerador	
Fabricante	ENERCON
Potência nominal:	2000 kW
Tipo (modelo)	Gerador em anel síncrono com accionamento directo
Velocidade síncrona:	Variável, 6 -21,5 rpm
Classe de protecção	IP 23
Sistema de orientação	
Tipo	6 motores eléctricos
Controlo de orientação	Activo (baseado no sinal do cata-vento)
Velocidade de orientação	0,5°/s
Controlador	
Fabricante	ENERCON
Tipo	Microprocessador
Ligação à rede eléctrica	Através do conversor ENERCON
Comunicação remota	Sistema de monitorização remota ENERCON
UPS	Incluído

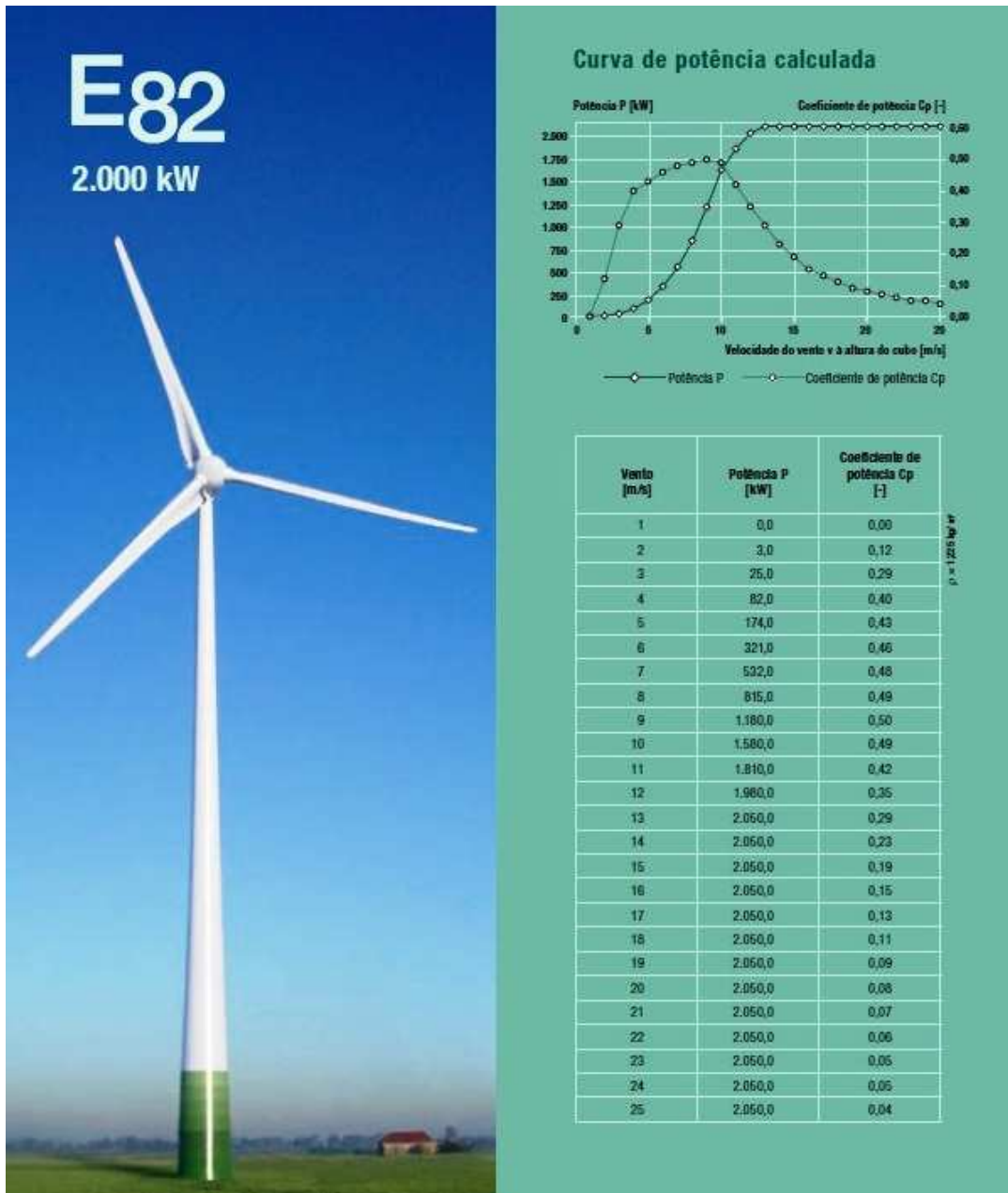


FIGURA C.0.1 – CURVA DE POTÊNCIA DO AEROGERADOR E-82

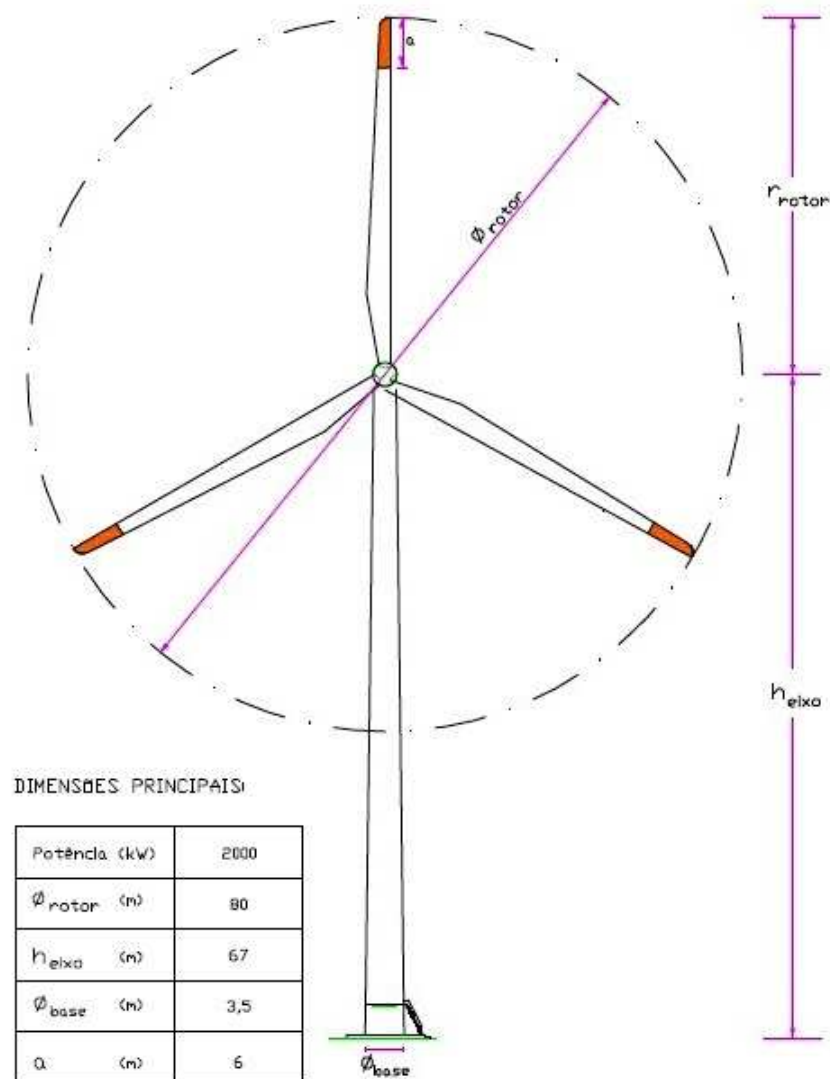



FIGURA C.0.2 – DIMENSÕES DO AEROGERADOR

ANEXO D

ANEXO D – RELATÓRIO DISPONÍVEL NO SCADA DATABASE



Dados de 10min

Turbina	Alias	Nº de Série	Data/Hora	Erro %	Vento			rpm			KW			Nacelle Posição °	KWh
					min m/s	média m/s	max m/s	min rpm	média rpm	max rpm	min kW	média kW	max kW		
5			01-01-2011 19:10	0	2,5	3,3	4,7	7,05	7,3	7,69	35	46	64	301	7,67
			19:20	0	2,3	3,5	4,9	7,15	7,47	7,71	39	53	65	301	8,83
			19:30	0	2,6	3,5	4,9	7,17	7,5	7,76	41	55	67	301	9,17
			19:40	0	2,4	2,9	4	6,66	6,94	7,26	24	33	47	302	5,50
			19:50	0	2,4	2,8	3,7	6,37	6,6	6,81	16	22	31	308	3,67
			20:00	0	2,3	2,6	3,3	6,2	6,4	6,69	10	18	27	310	3,00
			20:10	0	1,9	2,8	3,6	6,23	6,58	6,75	14	22	28	311	3,67
			20:20	0	2,1	2,5	3,1	6,03	6,37	6,63	9	17	24	316	2,83
			20:30	0	1,9	2,4	3,3	4,95	5,45	6,03	0	4	11	318	0,67
			20:40	0	1,5	2,3	3,5	5,27	5,64	6,28	2	6	16	300	1,00
			20:50	0	1,8	2,4	3,4	5,78	5,98	6,17	6	9	14	308	1,50
			21:00	0	1,6	2,4	3,4	5,69	5,9	6,18	5	9	14	308	1,50
			21:10	0	1,6	2,1	3,3	5,25	5,52	5,99	2	4	10	312	0,67
			21:20	0	1,5	2,6	3,6	5,42	6,36	7,22	3	19	45	317	3,17
			21:30	0	1,9	2,9	3,8	6,5	6,89	7,16	18	31	43	318	5,17
			21:40	0	2,5	3,1	4,3	6,54	7,06	7,47	19	38	57	321	6,33
			21:50	0	2,3	3,1	5,1	6,38	6,83	7,37	16	30	51	320	5,00
			22:00	0	1,8	2,6	4,7	5,98	6,35	6,91	5	17	34	315	2,83
			22:10	0	1,3	2,6	4,3	5,38	6,12	6,73	2	13	27	334	2,17
			22:20	0	1,3	2,8	4,7	5,87	6,35	7,01	4	17	39	340	2,83
			22:30	0	2,2	2,7	3,6	6,32	6,7	7,04	15	26	37	337	4,33
			22:40	0	1,8	2,8	4,3	6,27	6,57	6,89	8	22	35	339	3,67
			22:50	0	2,1	3	4,3	6,33	6,75	7,13	15	27	43	342	4,50

FIGURA D.0.1 – RELATÓRIO DISPONÍVEL NO SCADA DATABASE

ANEXO E

ANEXO E – CENÁRIO 3

Os dados presentes referem-se ao período de julho e agosto de 2011. A estimativa efetuada e os resultados apresentados referem-se à 2ª quinzena de agosto de 2011.

TABELA E.0.1 – RESULTADOS CENÁRIO 3

Data	V. Médio	Vrot. Médio	P Média	Q Média	E. Prod. (kWh)
01-07-2011	5.2	11.0	284.4	-57.2	6632
02-07-2011	4.2	9.4	149.8	-47.1	3401
03-07-2011	5.2	11.1	303.8	-53.5	7114
04-07-2011	4.9	10.7	254.6	-53.1	5923
05-07-2011	5.7	11.8	361.5	-53.3	8313
06-07-2011	6.2	12.5	483.4	-22.9	11496
07-07-2011	8.1	15.2	882.7	0.0	20996
08-07-2011	9.1	16.0	1176.9	0.0	26486
09-07-2011	5.7	11.4	294.2	0.0	6856
10-07-2011	3.4	6.9	65.4	0.0	1463
11-07-2011	2.8	6.6	40.7	0.0	717
12-07-2011	7.6	13.2	899.9	0.0	12826
13-07-2011	8.0	15.0	994.3	0.0	20160
14-07-2011	3.3	6.3	79.7	0.0	1590
15-07-2011	3.6	7.3	184.1	0.0	4557
16-07-2011	6.2	12.4	558.9	0.0	13259
17-07-2011	9.1	16.4	1320.9	0.0	31626
18-07-2011	7.1	13.0	835.3	0.0	18565
19-07-2011	8.4	15.5	1097.9	0.0	26315
20-07-2011	7.1	11.6	792.0	0.0	18253
21-07-2011	7.1	13.6	664.6	0.0	15739
22-07-2011	5.5	11.1	304.7	0.0	7140
23-07-2011	5.7	11.4	388.8	0.0	15600
24-07-2011	7.7	14.0	697.7	0.0	16638
25-07-2011	7.4	13.6	633.2	0.0	14028
26-07-2011	7.3	12.9	647.4	0.0	13818
27-07-2011	6.5	12.4	467.6	0.0	10728
28-07-2011	5.3	10.5	312.9	0.0	7366
29-07-2011	4.5	9.1	164.4	0.0	3655
30-07-2011	3.8	8.6	139.3	0.0	3167
31-07-2011	3.8	7.9	108.4	0.0	2436
01-08-2011	2.4	4.7	30.2	0.0	447
02-08-2011	5.2	10.4	320.9	0.0	6539
03-08-2011	3.4	6.9	132.8	0.0	2617
04-08-2011	6.3	12.3	482.5	0.0	10151
05-08-2011	7.1	13.4	855.0	0.0	12014
06-08-2011	6.7	13.5	635.9	0.0	24557
07-08-2011	6.4	13.3	585.5	0.0	11444
08-08-2011	5.4	11.8	424.8	0.0	10933
09-08-2011	6.7	13.5	617.6	0.0	11594
10-08-2011	4.3	9.0	275.3	0.0	11960
11-08-2011	3.8	8.0	114.8	0.0	2350
12-08-2011	3.5	7.3	84.6	0.0	2037
13-08-2011	4.6	10.4	291.5	0.0	6192
14-08-2011	5.8	11.6	385.3	0.0	9196
15-08-2011	3.1	6.1	57.1	0.0	1755
16-08-2011	4.1	9.2	141.4	0.0	SEM CONTAGEM
17-08-2011	3.0	6.7	67.4	0.0	SEM CONTAGEM
18-08-2011	3.4	7.7	83.7	0.0	SEM CONTAGEM
19-08-2011	4.7	10.3	236.2	0.0	SEM CONTAGEM
20-08-2011	4.7	9.8	245.5	0.0	SEM CONTAGEM
21-08-2011	7.0	13.5	789.0	0.0	SEM CONTAGEM
22-08-2011	4.6	9.9	198.4	0.0	SEM CONTAGEM
23-08-2011	4.3	9.4	163.6	0.0	SEM CONTAGEM
24-08-2011	4.0	8.8	170.2	0.0	SEM CONTAGEM
25-08-2011	6.5	13.3	580.6	0.0	SEM CONTAGEM
26-08-2011	6.0	12.6	471.9	0.0	SEM CONTAGEM
27-08-2011	4.4	9.8	221.9	0.0	SEM CONTAGEM
28-08-2011	3.8	8.3	140.8	0.0	SEM CONTAGEM
29-08-2011	2.0	3.8	32.1	0.0	SEM CONTAGEM
30-08-2011	5.7	11.8	420.8	0.0	SEM CONTAGEM
31-08-2011	6.0	12.6	392.0	0.0	SEM CONTAGEM
					E. Prod. Estimada (kWh)
					2604
					2257
					1757
					3035
					7206
					18789
					5415
					3346
					2273
					10965
					15288
					4431
					4790
					557
					7081
					9840

Total Produção na 2ª Quinzena Agosto 2011	
99538	kWh
Total Produção Estimada na 2ª Quinzena Agosto 2011	
99633	kWh
Diferença de Produção	
95	kWh
Porcentagem erro	
0.10	%

ANEXO F

ANEXO F – CENÁRIO 4

Os dados presentes referem-se ao período de junho, julho e agosto de 2011. A estimativa efetuada e os resultados apresentados referem-se ao mês de julho de 2011.

TABELA F.0.1 – RESULTADOS CENÁRIO 4

Data	V. Médio	Vrot. Médio	P Média	Q Média	E. Prod. (kWh)	
01-06-2011	8.4	15.6	1136.3	23.8	27289	
02-06-2011	9.1	15.5	1184.9	50.0	28346	
03-06-2011	7.1	14.0	802.7	-6.1	19195	
04-06-2011	4.6	9.8	266.3	-39.6	6261	
05-06-2011	2.9	6.5	61.2	-26.8	1369	
06-06-2011	4.8	9.4	335.3	-30.3	7950	
07-06-2011	6.8	13.6	568.9	-47.7	13933	
08-06-2011	5.3	11.1	378.7	-37.0	8939	
09-06-2011	2.7	6.5	71.8	-29.0	1605	
10-06-2011	3.7	8.5	114.4	-43.2	2586	
11-06-2011	3.4	7.4	82.1	-33.4	1845	
12-06-2011	4.6	9.7	219.5	-49.1	5105	
13-06-2011	6.9	13.4	741.4	-9.0	17604	
14-06-2011	3.3	6.9	103.1	-30.8	2350	
15-06-2011	6.1	12.5	467.7	-46.3	11092	
16-06-2011	4.6	10.5	246.3	-53.5	5728	
17-06-2011	8.7	15.8	1214.6	33.5	29112	
18-06-2011	5.9	11.8	520.9	-30.1	12408	
19-06-2011	2.6	5.6	39.5	-20.4	868	
20-06-2011	4.2	9.4	188.7	-45.4	4369	
21-06-2011	5.6	11.8	453.8	-40.8	10752	
22-06-2011	4.9	10.1	334.1	-38.6	7887	
23-06-2011	3.9	8.9	181.5	-35.8	4221	
24-06-2011	4.9	10.0	351.3	-37.0	8358	
25-06-2011	5.1	11.1	359.8	-45.1	8500	
26-06-2011	4.0	8.7	120.6	-36.5	2607	
27-06-2011	5.3	11.2	289.6	-45.9	6572	
28-06-2011	3.9	8.8	125.9	-45.3	2649	
29-06-2011	6.5	13.0	629.0	-24.3	15018	
30-06-2011	5.3	11.1	366.9	-38.6	9179	
01-07-2011	4.9	10.4	240.4	-57.2	SEM CONTAGEM	6640
02-07-2011	4.2	9.4	155.5	-47.1	SEM CONTAGEM	3408
03-07-2011	5.4	11.3	316.6	-53.5	SEM CONTAGEM	7116
04-07-2011	4.9	10.6	247.5	-53.1	SEM CONTAGEM	5920
05-07-2011	6.3	12.9	490.4	-55.3	SEM CONTAGEM	8309
06-07-2011	6.6	12.8	609.5	-22.9	SEM CONTAGEM	11481
07-07-2011	8.0	15.1	830.3	0.0	SEM CONTAGEM	20971
08-07-2011	8.7	15.6	1050.0	0.0	SEM CONTAGEM	26466
09-07-2011	5.3	10.7	243.6	0.0	SEM CONTAGEM	6827
10-07-2011	3.1	6.5	53.1	0.0	SEM CONTAGEM	1448
11-07-2011	3.2	7.2	70.9	0.0	SEM CONTAGEM	705
12-07-2011	9.3	16.1	1298.5	0.0	SEM CONTAGEM	12801
13-07-2011	6.9	13.2	715.8	0.0	SEM CONTAGEM	20153
14-07-2011	2.7	4.9	45.2	0.0	SEM CONTAGEM	1582
15-07-2011	4.2	8.6	230.4	0.0	SEM CONTAGEM	4548
16-07-2011	6.8	13.5	698.0	0.0	SEM CONTAGEM	13273
17-07-2011	8.8	15.7	1234.8	0.0	SEM CONTAGEM	31688
18-07-2011	7.9	14.0	1073.0	0.0	SEM CONTAGEM	18557
19-07-2011	8.6	15.5	1124.0	0.0	SEM CONTAGEM	26331
20-07-2011	6.1	10.6	545.9	0.0	SEM CONTAGEM	18254
21-07-2011	7.4	13.9	683.7	0.0	SEM CONTAGEM	15723
22-07-2011	5.4	11.1	321.3	0.0	SEM CONTAGEM	7120
23-07-2011	6.2	12.0	461.3	0.0	SEM CONTAGEM	15572
24-07-2011	7.4	13.6	655.2	0.0	SEM CONTAGEM	16656
25-07-2011	7.6	13.9	663.8	0.0	SEM CONTAGEM	14038
26-07-2011	7.3	13.0	682.7	0.0	SEM CONTAGEM	13822
27-07-2011	6.3	12.4	411.4	0.0	SEM CONTAGEM	10737
28-07-2011	4.5	9.1	193.0	0.0	SEM CONTAGEM	7371
29-07-2011	4.5	9.4	180.7	0.0	SEM CONTAGEM	3662
30-07-2011	3.9	8.4	134.1	0.0	SEM CONTAGEM	3188
31-07-2011	3.1	6.0	81.4	0.0	SEM CONTAGEM	2447
01-08-2011	3.2	6.6	70.2	0.0		447
02-08-2011	4.5	8.8	282.3	0.0		8539
03-08-2011	3.8	8.2	153.5	0.0		2617
04-08-2011	6.8	13.1	545.3	0.0		10151
05-08-2011	7.4	14.0	944.2	0.0		12014
06-08-2011	5.9	12.2	487.8	0.0		24557
07-08-2011	7.3	14.8	794.4	0.0		11444
08-08-2011	5.2	11.6	327.4	0.0		10933
09-08-2011	6.9	13.7	703.0	0.0		11594
10-08-2011	3.1	7.0	62.7	0.0		11960
11-08-2011	4.1	8.5	135.8	0.0		2350
12-08-2011	3.2	6.8	62.9	0.0		2037
13-08-2011	5.1	11.6	362.1	0.0		6192

Desenvolvimento de uma Metodologia baseada em redes neuronais para o cálculo da energia produzida por aerogeradores

14-08-2011	5.1	9.7	307.0	0.0	9196
15-08-2011	3.3	7.1	69.5	0.0	1755
16-08-2011	4.2	9.5	153.1	0.0	2598
17-08-2011	2.9	6.6	63.2	0.0	2272
18-08-2011	3.8	8.1	106.4	0.0	1768
19-08-2011	5.1	10.8	307.6	0.0	3020
20-08-2011	4.7	9.8	279.8	0.0	7065
21-08-2011	6.7	13.1	699.2	0.0	18627
22-08-2011	4.1	9.0	148.3	0.0	5443
23-08-2011	4.4	9.6	174.8	0.0	3372
24-08-2011	4.5	9.7	233.4	0.0	2289
25-08-2011	6.6	13.5	603.6	0.0	10996
26-08-2011	5.5	11.8	415.8	0.0	15305
27-08-2011	4.5	10.1	224.4	0.0	4449
28-08-2011	3.0	6.0	85.9	0.0	4814
29-08-2011	2.9	6.1	86.5	0.0	558
30-08-2011	5.8	12.1	450.1	0.0	7100
31-08-2011	6.0	12.5	390.0	0.0	9862

Total Produção Julho 2011
355368 kWh
Total Produção Estimada Julho 2011
355332 kWh
Diferença de Produção
-36 kWh
Percentagem erro
0.01 %

ANEXO G

ANEXO G – CENÁRIO 5

Os dados presentes referem-se ao período de abril, maio, junho e julho de 2011. A estimativa efetuada e os resultados apresentados referem-se aos meses de maio e junho de 2011.

TABELA G.0.1 – RESULTADOS CENÁRIO 5

Data	V. Médio	Vrot. Médio	P Média	Q Média	E. Prod. (kWh)	
01-04-2011	7.0	14.2	761.4	-81.2	24550	
02-04-2011	4.4	9.9	228.8	-73.9	5360	
03-04-2011	5.2	11.1	373.5	-77.1	8775	
04-04-2011	4.4	9.4	202.0	-74.6	4692	
05-04-2011	6.8	13.8	691.3	-84.3	16520	
06-04-2011	7.3	13.6	820.4	-39.4	19683	
07-04-2011	6.9	13.9	692.3	-76.7	16470	
08-04-2011	5.5	12.1	426.0	-99.9	9966	
09-04-2011	6.3	13.0	540.6	-87.2	12611	
10-04-2011	9.5	16.0	1277.4	32.3	30654	
11-04-2011	6.2	11.8	573.8	-41.5	13613	
12-04-2011	5.6	11.6	474.6	-73.1	11334	
13-04-2011	3.6	7.9	97.6	-60.0	2198	
14-04-2011	3.7	7.5	175.0	-48.7	3762	
15-04-2011	5.6	11.4	365.8	-92.1	6523	
16-04-2011	6.8	13.0	732.6	-36.9	17526	
17-04-2011	4.1	8.5	143.1	-72.5	3272	
18-04-2011	5.4	11.3	425.6	-79.5	10103	
19-04-2011	7.0	14.0	639.2	-94.7	4027	
20-04-2011	5.6	11.4	358.1	-83.3	6434	
21-04-2011	6.9	14.1	713.1	-79.8	17072	
22-04-2011	3.6	8.1	120.8	-53.6	2770	
23-04-2011	2.9	5.8	73.5	-29.7	1685	
24-04-2011	6.5	13.5	563.7	-79.8	13375	
25-04-2011	5.4	11.0	366.7	-70.2	6898	
26-04-2011	5.8	12.2	439.7	-61.3	10402	
27-04-2011	6.5	12.8	734.0	-21.7	17617	
28-04-2011	4.3	9.4	196.8	-67.9	4559	
29-04-2011	4.9	10.4	292.3	-68.3	6850	
30-04-2011	3.0	7.4	70.0	-42.5	1571	
01-05-2011	3.1	7.0	67.2	-34.7	SEM CONTAGEM	1572
02-05-2011	4.3	8.8	227.4	-39.6	SEM CONTAGEM	4478
03-05-2011	5.2	10.2	330.6	-42.5	SEM CONTAGEM	6617
04-05-2011	4.4	9.2	203.2	-45.1	SEM CONTAGEM	4060
05-05-2011	4.1	8.5	123.6	-43.1	SEM CONTAGEM	3813
06-05-2011	6.0	11.9	447.7	-41.1	SEM CONTAGEM	8055
07-05-2011	9.6	16.3	1432.2	71.9	SEM CONTAGEM	24447
08-05-2011	5.6	11.1	439.8	25.4	SEM CONTAGEM	13362
09-05-2011	3.0	6.9	58.0	-34.2	SEM CONTAGEM	1837
10-05-2011	3.5	7.8	99.6	-41.6	SEM CONTAGEM	2323
11-05-2011	4.1	8.7	132.7	-37.3	SEM CONTAGEM	2236
12-05-2011	3.9	8.8	167.1	-37.6	SEM CONTAGEM	2412
13-05-2011	4.9	10.6	238.4	-58.3	SEM CONTAGEM	7061
14-05-2011	6.7	12.3	777.3	-10.1	SEM CONTAGEM	10667
15-05-2011	9.9	17.0	1531.2	90.7	SEM CONTAGEM	37625
16-05-2011	5.5	11.7	385.1	-19.8	SEM CONTAGEM	14226
17-05-2011	4.1	9.1	154.9	-46.6	SEM CONTAGEM	5157
18-05-2011	6.4	13.1	537.4	-43.4	SEM CONTAGEM	9764
19-05-2011	3.6	7.6	137.5	-36.0	SEM CONTAGEM	6618
20-05-2011	3.5	8.0	95.7	-32.3	SEM CONTAGEM	2158
21-05-2011	3.7	7.8	132.2	-35.2	SEM CONTAGEM	3007
22-05-2011	2.8	6.6	41.5	-21.9	SEM CONTAGEM	592
23-05-2011	3.7	7.8	119.9	-47.7	SEM CONTAGEM	3056
24-05-2011	3.7	7.7	116.2	-33.9	SEM CONTAGEM	12167
25-05-2011	3.8	8.2	141.8	-44.0	SEM CONTAGEM	3962
26-05-2011	3.0	6.6	84.2	-24.8	SEM CONTAGEM	1875
27-05-2011	3.6	7.8	125.9	-29.4	SEM CONTAGEM	2226
28-05-2011	4.2	7.7	103.6	-38.9	SEM CONTAGEM	2090
29-05-2011	4.3	8.9	186.2	-46.4	SEM CONTAGEM	5096
30-05-2011	5.1	10.1	351.3	-29.5	SEM CONTAGEM	4229
31-05-2011	5.9	11.9	535.2	-38.4	SEM CONTAGEM	9264
01-06-2011	8.4	15.6	1136.3	23.8	SEM CONTAGEM	27309
02-06-2011	9.1	15.5	1184.9	50.0	SEM CONTAGEM	28394
03-06-2011	7.1	14.0	802.7	-6.1	SEM CONTAGEM	19205
04-06-2011	4.6	9.8	266.3	-39.6	SEM CONTAGEM	6257
05-06-2011	2.9	6.5	61.2	-26.8	SEM CONTAGEM	1377
06-06-2011	4.8	9.4	335.3	-30.3	SEM CONTAGEM	7950
07-06-2011	6.8	13.6	588.9	-47.7	SEM CONTAGEM	13926
08-06-2011	5.3	11.1	378.7	-37.0	SEM CONTAGEM	8943
09-06-2011	2.7	6.5	71.8	-29.0	SEM CONTAGEM	1611
10-06-2011	3.7	8.5	114.4	-43.2	SEM CONTAGEM	2588
11-06-2011	3.4	7.4	82.1	-33.4	SEM CONTAGEM	1848
12-06-2011	4.6	9.7	219.5	-49.1	SEM CONTAGEM	5100
13-06-2011	6.9	13.4	741.4	-9.0	SEM CONTAGEM	17633

Desenvolvimento de uma Metodologia baseada em redes neuronais para o cálculo da energia produzida por aerogeradores

14-06-2011	3.3	6.9	103.1	-30.8	SEM CONTAGEM	2354
15-06-2011	6.1	12.5	467.7	-46.3	SEM CONTAGEM	11088
16-06-2011	4.8	10.5	246.3	-53.5	SEM CONTAGEM	5728
17-06-2011	8.7	15.8	1214.6	33.5	SEM CONTAGEM	29158
18-06-2011	5.9	11.8	520.9	-30.1	SEM CONTAGEM	12408
19-06-2011	2.6	5.6	39.5	-20.4	SEM CONTAGEM	876
20-06-2011	4.2	9.4	188.7	-45.4	SEM CONTAGEM	4381
21-06-2011	5.6	11.8	453.8	-40.6	SEM CONTAGEM	10775
22-06-2011	4.9	10.1	334.1	-38.6	SEM CONTAGEM	7906
23-06-2011	3.9	8.9	181.5	-35.8	SEM CONTAGEM	4228
24-06-2011	4.9	10.0	351.3	-37.0	SEM CONTAGEM	8335
25-06-2011	5.1	11.1	359.8	-45.1	SEM CONTAGEM	8533
26-06-2011	4.0	8.7	120.6	-36.5	SEM CONTAGEM	2734
27-06-2011	5.3	11.2	289.6	-45.9	SEM CONTAGEM	6753
28-06-2011	3.9	8.8	125.9	-45.3	SEM CONTAGEM	2856
29-06-2011	6.5	13.0	629.0	-24.3	SEM CONTAGEM	15025
30-06-2011	5.3	11.1	386.9	-38.6	SEM CONTAGEM	9187
01-07-2011	4.9	10.4	240.4	-57.2	6632	
02-07-2011	4.2	9.4	155.5	-47.1	3401	
03-07-2011	5.4	11.3	316.6	-53.5	7114	
04-07-2011	4.9	10.6	247.5	-53.1	5923	
05-07-2011	6.3	12.9	490.4	-55.3	8313	
06-07-2011	6.6	12.8	609.5	-22.9	11496	
07-07-2011	8.0	15.1	830.3	0.0	20996	
08-07-2011	8.7	15.6	1050.0	0.0	26486	
09-07-2011	5.3	10.7	243.6	0.0	6656	
10-07-2011	3.1	6.5	53.1	0.0	1463	
11-07-2011	3.2	7.2	70.9	0.0	717	
12-07-2011	9.3	16.1	1298.5	0.0	12826	
13-07-2011	6.9	13.2	715.8	0.0	20160	
14-07-2011	2.7	4.9	45.2	0.0	1590	
15-07-2011	4.2	8.6	230.4	0.0	4557	
16-07-2011	6.8	13.5	698.0	0.0	13259	
17-07-2011	8.8	15.7	1234.8	0.0	31626	
18-07-2011	7.9	14.0	1073.0	0.0	18565	
19-07-2011	8.6	15.5	1124.0	0.0	26315	
20-07-2011	6.1	10.6	545.9	0.0	18253	
21-07-2011	7.4	13.9	683.7	0.0	15739	
22-07-2011	5.4	11.1	321.3	0.0	7140	
23-07-2011	6.2	12.0	461.3	0.0	15600	
24-07-2011	7.4	13.6	655.2	0.0	16638	
25-07-2011	7.6	13.9	663.8	0.0	14028	
26-07-2011	7.3	13.0	682.7	0.0	13818	
27-07-2011	6.3	12.4	411.4	0.0	10728	
28-07-2011	4.5	9.1	193.0	0.0	7366	
29-07-2011	4.5	9.4	180.7	0.0	3655	
30-07-2011	3.9	8.4	134.1	0.0	3167	
31-07-2011	3.1	6.0	81.4	0.0	2436	

Total Produção dos meses de Maio e Junho 2011	
	490790 kWh
Total Produção Estimada dos meses de Maio e Junho 2011	
	491072 kWh
Diferença de Produção	
	282 kWh
Porcentagem erro	
	0.06 %