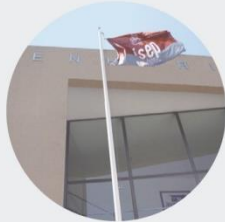


Qualidade da Energia Elétrica em Parques Eólicos com Diferentes Tipos de Aerogeradores

PAULO JORGE FERREIRA FONTES

julho de 2023



Qualidade da Energia Elétrica em Parques Eólicos com diferentes tipos de Aerogeradores

PAULO JORGE FERREIRA FONTES

Junho de 2023

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM PARQUES EÓLICOS COM DIFERENTES TIPOS DE AEROGERADORES

Paulo Jorge Ferreira Fontes



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia

2023

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE –
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Paulo Jorge Ferreira Fontes, Nº 1980273, 1980273@isep.ipp.pt

Orientação científica: José António Beleza Carvalho, jbc@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2023

Agradecimentos

Ao Professor Doutor José Beleza Carvalho, meu orientador, pela manifestação de incondicional apoio e disponibilidade, pelo aconselhamento assertivo e sentido crítico que muito contribuíram para aumentar a profundidade e a clareza da investigação.

Aos meus filhos por todo o apoio que me deram ao longo destes anos.

Aos meus dois amigos Fernando Salgado e Carlos Silva que sempre estiveram presentes nos momentos mais necessários.

Resumo

A presente dissertação pretende destacar a qualidade de energia como um fator crítico para garantir que os parques eólicos possam operar de maneira segura e eficiente, recorrendo, para isso, à simulação de diferentes parques com diferentes tipos de aerogeradores, quando estes operam em simultâneo. O objetivo é selecionar a máquina mais eficiente na produção de energia e com a menor perturbação na rede, perante três tipos de adversidades: consumo de energia reativa, efeito de cava de tensão e rajadas de vento.

Numa primeira abordagem, utilizando a ferramenta MatLab/Simulink, efetua-se a simulação de um parque eólico composto por quatro aerogeradores do tipo assíncrono ligados diretamente à rede. Dado o consumo de energia reativa deste tipo de máquina, é utilizada uma bateria de condensadores para corrigir o fator de potência. Salienta-se, que este aerogerador quando confrontado com um curto-circuito na rede, a sua recuperação é bastante lenta e com uma corrente de pico de cerca de três vezes a corrente nominal. Perante uma rajada de vento de 50 m/s, esta máquina atinge uma corrente de pico que a coloca fora de serviço.

Verificou-se, numa simulação posterior composta por aerogeradores assíncronos duplamente alimentados, que permanece o consumo de energia reativa, embora menor. Este aerogerador provou ser bastante rápido a recuperar perante a contingência de curto-circuito. Quando sujeita a uma rajada de vento, esta máquina não sofre alterações profundas na sua estabilidade.

Na simulação do parque eólico com aerogeradores síncronos de imanes permanentes, constata-se que o consumo de energia reativa é praticamente inexistente. Quando ocorre uma falha na rede, o sistema recupera os seus índices normais de estabilidade, sem necessidade de deslastrar a máquina do sistema. Após uma rajada de vento este tipo de máquina não altera a sua estabilidade.

Palavras-Chave

Qualidade de energia, aerogeradores, parques eólicos, perturbações na rede.

Abstract

This dissertation aims to highlight energy quality as a critical factor to ensure that wind farms can operate safely and efficiently through the simulation of different parks with different types of wind turbines, when they operate simultaneously. The aim is to select the most efficient machine in energy production and with a lower disturbance in the grid, when facing three types of adversities: reactive energy consumption, voltage dip effect and wind gusts.

At first and using the MatLab/Simulink tool, a simulation of a wind farm composed of four asynchronous wind turbines directly connected to the grid is carried out. Given the reactive power consumption of this type of machine, a battery of capacitors is used to correct the power factor. It should be noted that when this wind turbine is faced with a short circuit in the network, its recovery is quite slow and with a peak current of about three times the nominal current. Faced with a gust of wind of 50 m/s, this machine reaches a peak current that puts it out of service.

It was verified, in a later simulation composed of doubly fed asynchronous wind turbines, that the consumption of reactive energy remains, although lower. This wind turbine proved to be very quick to recover from the short-circuit contingency. When subjected to a gust of wind, this machine does not suffer profound changes in its stability.

In the simulation of the wind farm with permanent magnet synchronous wind turbines, it can be seen that the consumption of reactive energy is practically non-existent. When there is a failure in the grid, the system recovers its normal stability indexes, without the need to unload the machine from the system. After a gust of wind this type of machine does not alter its stability.

Keywords

Power Quality, wind turbines, wind farms, grid disturbances.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XV
SIGLAS E ACRÓNIMOS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS	2
1.3.ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	2
2. AEROGERADORES	5
2.1.ENQUADRAMENTO	5
2.2.QUALIDADE DE ENERGIA	10
2.3.GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA	22
2.4.TIPOS DE GERADORES EÓLICOS USADOS EM PORTUGAL	27
2.5.CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA	40
2.6.CONCLUSÃO	48
3. SIMULAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO COM AEROGERADORES ASSÍNCRONOS	51
3.1.AEROGERADORES ASSÍNCRONOS LIGADOS DIRETAMENTE À REDE	51
3.2.AEROGERADORES ASSÍNCRONOS DUPLAMENTE ALIMENTADOS	64
3.3.CONCLUSÃO	77
4. SIMULAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO COM AEROGERADORES SÍNCRONOS	79
4.1.INTRODUÇÃO	79
4.2.DESCRICÃO DO PARQUE EÓLICO.....	80
4.3.REPERCUSSÕES NA QUALIDADE DA ENERGIA	81
4.4.CONCLUSÃO	87
5. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS DIFERENTES ENSAIOS	89
5.1.INTRODUÇÃO	89

5.2.ANÁLISE DE RESULTADOS DO PARQUE S1	90
5.3.ANÁLISE DE RESULTADOS DO PARQUE S2	103
5.4.CONCLUSÃO	110
6. CONCLUSÕES.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

Índice de Figuras

- Figura 1 Dados das 10 maiores empresas fabricantes de turbinas eólicas e sua potência instalada no ano 2021
- Figura 2 Aerogerador Vestas V164 10 MW
- Figura 3 Aerogerador Gamesa, Adwen AD-180 8 MW
- Figura 4 Aerogerador Siemens Gamesa SWT-8.0-154 8 MW
- Figura 5 Aerogerador Enercon E126 7,5 MW
- Figura 6 Análise da onda resultante com uma distorção harmónica de ordem 2
- Figura 7 Análise da onda resultante com uma distorção harmónica de ordem 2, 3, 4 e 5
- Figura 8 Sistema de forças num perfil alar
- Figura 9 Esquema do aerogerador de indução com rotor em gaiola
- Figura 10 Aerogerador utilizado no Parque eólico da Bulgueira, Nordex N50/800
- Figura 11 Esquema do aerogerador de indução duplamente excitado com conversores
- Figura 12 Esquema equivalente de uma máquina de indução de rotor bobinado
- Figura 13 Aerogerador indução DA, parque eólico de Fafe, Gamesa G87
- Figura 14 Esquema do aerogerador síncrono de rotor bobinado
- Figura 15 Esquema do aerogerador síncrono de ímanes permanentes
- Figura 16 Aerogerador síncrono, parque eólico do Caramulo, ENERCON E70/E4
- Figura 17 Capacidade geradora na Europa no final de 2021
- Figura 18 Percentagem da nova capacidade geradora instalada no final de 2021

- Figura 19 Capacidade geradora instalada acumulada em Portugal
- Figura 20 Capacidade instalada na Europa no final de 2021 e projeção para o ano de 2026
- Figura 21 Produção de energia elétrica em Portugal referente a setembro de 2021
- Figura 22 Percentagem da nova capacidade geradora instalada no final de 2021
- Figura 23 Gráfico europeu de produção diário, 8 de novembro de 2022
- Figura 24 Balanço nacional de consumo diário em Portugal, 8 de novembro de 2022
- Figura 25 Potência elétrica e número de aerogeradores instalados no final de 2021
- Figura 26 Potência instalada por fabricante no final de 2021
- Figura 27 Potência instalada por fabricante no final de 2021
- Figura 28 Novas e total de instalações por países no mundo no final de 2021
- Figura 29 Parque eólico Changma, cidade de Yumen, província de Gansu, noroeste da China
- Figura 30 Parque eólico flutuante Hywind Tampen, Mar do Norte
- Figura 31 Parque eólico flutuante *WindFloat Atlantic*, 3 aerogeradores Vestas V164 8,4 MW, Viana do Castelo
- Figura 32 Parque eólico flutuante *WindFloat Atlantic*, 3 aerogeradores Vestas V164 8,4 MW, Viana do Castelo
- Figura 33 Esquema parque eólico com aerogeradores assíncronos ligados diretamente à rede
- Figura 34 Bloco de medição 1, 2, 3 e 4 do aerogerador
- Figura 35 Bloco 5, 6, 7, 8, 9 e 10 para cálculo de potência
- Figura 36 Bateria de condensadores automática de 6 MVar

- Figura 37 Análise gráfica das potências ativa e reativa à entrada do parque
- Figura 38 Análise gráfica da correção do fator de potência
- Figura 39 Análise da tensão simples após um curto-circuito durante um período de 100 ms
- Figura 40 Análise da corrente após um curto-circuito durante um período de 100 ms
- Figura 41 Análise das medidas tiradas do bloco de medição 2 para uma falha de 100 ms
- Figura 42 Bloco para a simulação de rajada de vento
- Figura 43 Análise gráfica do aerogerador 1 após uma rajada de vento de 50 m/s
- Figura 44 Gráfico do valor da corrente nominal do aerogerador
- Figura 45 Gráfico do valor da corrente após uma rajada de vento com velocidade de 50 m/s
- Figura 46 Esquema parque eólico com aerogeradores duplamente alimentados ligados à rede
- Figura 47 Bloco de medição 1, 2, 3 e 4 do aerogerador
- Figura 48 Bateria de condensadores automática
- Figura 49 Análise gráfica das potências ativa e reativa à entrada do parque
- Figura 50 Análise gráfica da correção do fator de potência
- Figura 51 Análise da tensão simples após um curto-circuito durante um período de 100 ms
- Figura 52 Análise das medidas tiradas do bloco de medição 2 para uma falha de 100 ms
- Figura 53 Gráfico do valor da corrente nominal do aerogerador
- Figura 54 Gráfico do valor da corrente do aerogerador após um curto-circuito de 100 ms
- Figura 55 Análise gráfica do conversor AC/DC/AC após um curto-circuito de 100 ms
- Figura 56 Análise gráfica do aerogerador 1 após uma rajada de vento de 50 m/s

- Figura 57 Análise gráfica do conversor AC/DC/AC após uma rajada de vento de 50 m/s aos 15 s
- Figura 58 Análise gráfica da corrente após uma rajada de vento de 50 m/s
- Figura 59 Esquema do parque eólico com aerogeradores assíncronos duplamente alimentados e síncronos de ímãs permanentes
- Figura 60 Bloco de medição do Aerogerador Síncrono, Bloco de medição 3
- Figura 61 Análise gráfica das potências ativa e reativa do Aerogerador 3
- Figura 62 Análise gráfica do Aerogerador 1 perante o curto-circuito
- Figura 63 Bloco para a simulação de rajada de vento
- Figura 64 Análise gráfica dos aerogeradores A1 e A3 com a ocorrência de rajada de vento em A1
- Figura 65 Esquema parque eólico com aerogeradores assíncronos duplamente alimentados e assíncronos ligados diretamente à rede
- Figura 66 Análise gráfica das potências ativa e reativa à entrada do parque
- Figura 67 Bateria de condensadores automática de 3,5 MVar
- Figura 68 Análise gráfica das potências ativa e reativa à entrada do parque
- Figura 69 Análise gráfica da correção do fator de potência
- Figura 70 Bloco para análise das tensões dos aerogeradores A1 e A3 após um curto-circuito de 100 ms
- Figura 71 Análise das tensões dos aerogeradores A1 e A3 após um curto-circuito de 100 ms
- Figura 72 Bloco para a simulação de rajada de vento no aerogerador 1 e 3

- Figura 73 Análise gráfica dos aerogeradores A1 e A3 com a ocorrência de rajada de vento em A1
- Figura 74 Análise gráfica dos aerogeradores A1 e A3 com a ocorrência de rajada de vento em A3
- Figura 75 Análise gráfica do aerogerador A4 com a ocorrência de rajada de vento em A3
- Figura 76 Análise gráfica dos aerogeradores A1 e A3 com a ocorrência de rajada de vento em A1 e A3
- Figura 77 Análise gráfica do aerogerador A2 com a ocorrência de rajada de vento em A1 e A3
- Figura 78 Esquema do parque eólico com aerogeradores síncronos de imanes permanentes com aerogeradores assíncronos duplamente alimentados
- Figura 79 Análise gráfica das potências ativa e reativa do Aerogerador 2 e 4
- Figura 80 Análise gráfica das tensões no conversor do Aerogerador 2 e 4.
- Figura 81 Análise gráfica do Aerogerador 1 e Aerogerador 3 perante o curto-circuito
- Figura 82 Bloco para a simulação de rajada de vento
- Figura 83 Pormenor dos diferentes tipos de aerogeradores onde os blocos de vento estão inseridos
- Figura 84 Análise gráfica dos aerogeradores A1, A2, A3 e A4 com a ocorrência de rajada de vento
- Figura 85 Análise gráfica dos aerogeradores A1 e A3 com a ocorrência de rajada de vento

Índice de Tabelas

Tabela 1 Dados de instalações no ano 2020 comunicados pelas empresas ao GWEC, incluindo energia eólica *onshore* e *offshore*

Tabela 2 Potenciais efeitos das turbinas eólicas na qualidade da energia elétrica

Siglas e Acrónimos

Cp – Rendimento da Turbina

DFIG – GERADOR de Indução Duplamente Alimentado (*Doubly Fed Induction Generator*)

GWEC – Conselho Global de Energia Eólica (*Global Wind Energy Council*)

IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*)

IT – Tecnologia da Informação (*Information Technology*)

Pw – Potência Eólica absorvida pela turbina

PWM – Modulação de Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation*)

RMS – Valor Eficaz (*Root Mean Square*)

SCIG – Gerador de Indução de Gaiola de Esquilo (*Squirrel-Cage Induction Generator*)

SMPS – Fonte de alimentação (*Switch Mode Power Supply*)

TSR – Razão de Velocidades da Pá (*Tip Speed Ratio*)

UPS – Fonte de Alimentação Ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply*)

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os nossos antepassados usavam fontes energéticas como o vento, a água e a lenha na produção de calor e de força motriz. Em épocas mais recentes, as novas fontes como o carvão, o petróleo, o gás e a nuclear, substituíram estas fontes tradicionais, em particular nos países que se foram industrializando. Nos últimos anos temos assistido a verdadeiras catástrofes com mais frequência e cada vez mais o planeta está mais quente. Desde 2015 que temos assistido a temperaturas na Terra nunca vistas, desde que há registos meteorológicos. Assim sendo, combater as alterações climáticas é imperativo para o futuro da Europa e do mundo.

A lei europeia em matéria de clima consagrou na legislação o objetivo de uma União Europeia com impacto neutro no clima até 2050. Em dezembro de 2015, 195 países concordaram com um tratado climático para limitar o aquecimento global. Em novembro de 2022 foi assinado um acordo no Egito, sobre a criação de um fundo específico monetário para países vulneráveis. O mundo está comprometido em combater este flagelo do aquecimento global. O ressurgimento das energias renováveis a partir dos choques petrolíferos da década de 70 criou, por um lado, a necessidade de assegurar a diversidade e a segurança no fornecimento de energia e, por outro, a obrigação de proteger o ambiente cuja degradação é acentuada pelo uso de combustíveis fósseis.

A energia eólica, objeto deste trabalho, é vista como uma das mais promissoras fontes de energia renovável, caracterizada por uma tecnologia madura, desenvolvida principalmente na Europa, EUA e China, como será desenvolvido no capítulo 2.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho de dissertação é avaliar a qualidade da energia em diferentes parques eólicos com diferentes tipos de máquinas e o seu consequente comportamento, quando confrontadas com rajadas de vento, cavas de tensão e excesso de potência reativa.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Neste capítulo 1, destaca-se a necessidade do recurso às energias renováveis no enquadramento do flagelo do aquecimento global.

No capítulo seguinte, são apresentados os principais aerogeradores e respetivos construtores, utilizados em Portugal, na Europa e no Mundo. Aborda-se também as origens dos principais problemas da qualidade de energia, onde se destaca a energia eólica referindo as suas vantagens e desvantagens.

No terceiro capítulo, descrevem-se três ensaios com máquinas assíncronas ligadas diretamente à rede e duplamente alimentadas. Estes ensaios consistem na análise, num primeiro momento, destes aerogeradores perante a simulação de situações de consumo de energia reativa do parque eólico. Numa segunda etapa, o desempenho dos mesmos perante a ocorrência de um curto-circuito fora do parque eólico, do qual resulta uma cava de tensão na rede. Finalmente, numa terceira fase abordar-se-á a performance destas máquinas assíncronas quando confrontadas com o fenómeno atmosférico das rajadas de vento.

No quarto capítulo, é apresentada a simulação de um parque eólico com aerogeradores síncronos de imanes permanentes e o seu comportamento perante os ensaios mencionados anteriormente.

No quinto capítulo, são apresentadas duas simulações de parques eólicos: um composto por 4 aerogeradores assíncronos (2 diretamente ligados à rede e 2 duplamente alimentados) e outro parque eólico com diferentes tipos de aerogeradores (2 assíncronos duplamente

alimentados e 2 síncronos de ímanes permanentes). Em ambas as simulações foram realizados os ensaios anteriormente mencionados com o objetivo de averiguar quais as máquinas com melhor desempenho.

No último capítulo, são reunidas as principais conclusões e perspectivada uma potencial solução para uma maior eficiência da produção da energia eólica.

2. AEROGERADORES

2.1. ENQUADRAMENTO

A sociedade atual é fortemente dependente da energia elétrica, quer para aplicações industriais quer para fins domésticos. A sua produção nem sempre é limpa nível ambiental, pelo facto de uma grande percentagem ser gerada pela queima de combustíveis fósseis. Após a assinatura do protocolo de Quioto em 11 de dezembro de 1997, novas vozes ambientalistas se levantaram e cada vez mais se tem a consciência das “agressões” que se fazem contra a natureza. Torna-se, por isso, necessário encontrar meios alternativos de geração de energia elétrica. Por outro lado, o facto das reservas de combustíveis fósseis se tornarem cada vez mais escassas, vem reforçar a ideia de desenvolver e implementar formas alternativas, que não produzam gases poluentes, nem sejam dependentes de fontes energéticas limitadas, são as vulgarmente denominadas fontes de energias renováveis.

Entre as várias tecnologias de produção de energia elétrica, a partir de fontes renováveis que têm sido implementadas em Portugal, destacam-se as centrais hídricas e, mais recentemente, os parques eólicos e os parques fotovoltaicos. Para Portugal, como país inserido na União Europeia, foi determinado que até ao ano de 2030 terá de produzir 47 % da energia consumida através de formas de energias renováveis.[1]

A energia eólica é uma fonte de energia renovável, abundante, limpa e disponível na maioria das regiões do globo. Um impacto ambiental reduzido comparativamente a outras fontes de produção de energia, a facilidade de desmantelamento e os baixos custos externos e sociais são alguns dos fatores que contribuíram para o presente estado da tecnologia, caracterizado por uma maturidade efetiva, grande diversidade de oferta e disponibilidade imediata. Também em termos sociais, o impacto da tecnologia é assinalável, pelo volume de emprego que gera, tanto nos países fabricantes, como a nível local nas zonas onde se instalam parques eólicos. A utilização do vento para a geração de energia elétrica, em escala comercial, teve início há pouco mais de 40 anos. Verificou-se desde então, o rápido desenvolvimento em termos de ideias e de conceitos resultantes da aplicação dos conhecimentos da indústria da aeronáutica.

A conversão da energia do vento em energia mecânica faz-se através da turbina eólica e a conversão da energia mecânica em energia elétrica faz-se através de geradores elétricos.

Atualmente, a indústria de turbinas eólicas tem registado crescimentos anuais de construção de máquinas de 39 %. Com o advento de novos materiais, melhor conhecimento de aerodinâmica e novas técnicas de projeto, surgiram turbinas eólicas de eixo horizontal de alto rendimento com rotores de três pás.[2]

No mercado atual, a empresa dinamarquesa Vestas é detentora do título de maior fornecedor mundial de turbinas eólicas, apesar do forte aumento dos pedidos da GE e dos fabricantes chineses. A Vestas tem diversificado muito as suas zonas geográficas com um forte desempenho nos EUA, Austrália, Brasil, Países Baixos, França, Polónia, Rússia e Noruega. A GE tem crescido muito no seu mercado interno, onde no ano de 2020 obteve mais de 10 GW de instalações, tornando-se o fornecedor número um dos EUA pelo segundo ano consecutivo. Não obstante, o seu forte investimento no mercado espanhol. Importante salientar o mercado chinês que tem crescido muito, a Goldwind mantém a terceira posição em 2020, embora tenha alcançado um ano recorde em seu mercado doméstico com mais de 12 GW de instalações e suas novas instalações em mercados estrangeiros ultrapassaram o marco de 1 GW pela primeira vez. Na figura seguinte é possível verificar a tabela das empresas líderes de mercado apresentada pela GWEC Market Intelligence no dia 23 de março de 2021.[3]

Classificação preliminar de 2020	Empresa	Instalações em 2020	Alternância	Comentário
1	Vestas	16.186 MW	-	Permanece na liderança pelo quinto ano consecutivo
2	GE Renewable Energy	14.135 MW	+2	Subindo duas posições da 4ª posição em 2019
3	Goldwind	13.606 MW	-	Permanece na 3ª posição pelo segundo ano consecutivo
4	Envision	10.717 MW	+1	Subindo da 5ª posição em 2019
5	Siemens Gamesa	8.678 MW	-3	Abaixo da 2ª posição em 2019

Tabela 1 – Dados de instalações no ano 2020 comunicados pelas empresas ao GWEC, incluindo energia eólica *onshore* e *offshore*.

No ano de 2021 segundo a BloombergNEF, foram instalados 99,2 GW em todo o mercado de energia eólica. A figura seguinte demonstra as 10 principais empresas instaladoras em todo o mundo.

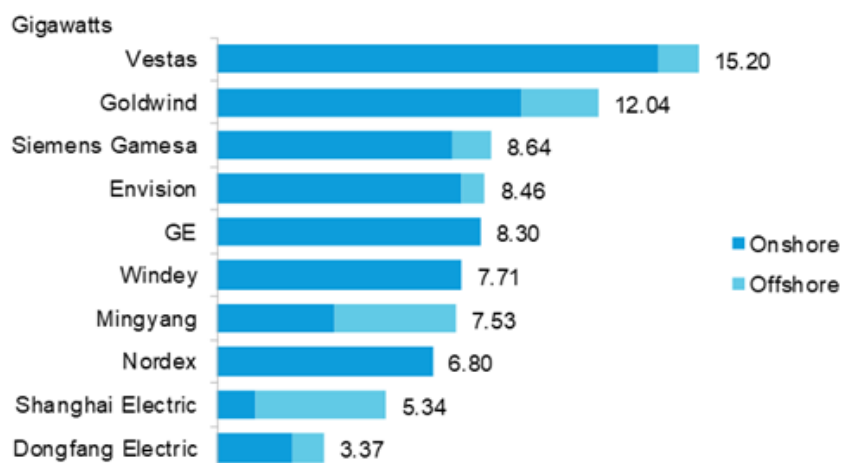


Figura 1 – As 10 maiores empresas fabricantes de turbinas eólicas e sua potência instalada no ano 2021.

É possível verificar nas duas figuras apresentadas anteriormente, só a empresa Vestas manteve o lugar de maior construtor e a GE caiu para o quinto posto.

Cada vez mais os aerogeradores têm mais capacidade de produção e maiores em tamanho, os que têm maior capacidade de produção encontram-se instalados em parques eólicos *offshore*. O maior aerogerador do mundo é da empresa Vestas com o modelo V164 9,5 MW, introduzido no mercado pela primeira vez em 2014[4]. Neste momento a Vestas já tem o modelo V164 10 MW, figura 2, que é o primeiro aerogerador a ser comercializado de dois dígitos.[5]



Figura 2 – Aerogerador Vestas V164 10 MW.

Dos vários protótipos a serem instalados, é de realçar dois novos modelos da Vestas que estão em desenvolvimento, V174 9,5 MW e V236 15 MW. Este protótipo V236 15 MW foi construído na Dinamarca e será instalado neste segundo semestre de 2022, sendo o maior aerogerador do mundo.[6]

Vários projetos de grandes aerogeradores têm sido instalados, dos quais o Adwen AD-180 é um produto *offshore* entre a Gamesa e a Areva. Este aerogerador tem uma capacidade de 8 MW e 180 metros de diâmetro.



Figura 3 – Aerogerador Gamesa, Adwen AD-180 8 MW.

A Siemens também tem efetuado atualizações e atualmente a turbina SWT-8.0-154, virada para o mercado *offshore*, atinge uma potência de 8 MW e um diâmetro até aos 154 metros.



Figura 4 – Aerogerador Siemens Gamesa SWT-8.0-154 8 MW.

Ao contrário dos exemplos anteriores, o Enercon E126 7,5 MW é projetado estritamente para o setor *onshore*. O E126 possui um rotor com um diâmetro de 127 metros. Desenvolvido a partir de uma máquina de 6 MW revelada em 2007. O E-126 da Enercon, continua a ser o maior gerador de energia eólica *onshore*. O tamanho e o custo deste design limitaram a sua aceitação, mas um total de 87 máquinas de 6 MW e 7,5 MW estão agora operacionais, incluindo 38 E126 instalados nos Países Baixos.[7]



Figura 5 – Aerogerador Enercon E126 7,5 MW.

2.2. QUALIDADE DE ENERGIA

A qualidade de energia é um assunto que se está a tornar cada vez mais importante para os consumidores de eletricidade. Os equipamentos sensíveis às perturbações da rede e cargas não lineares são agora vulgares, quer no sector comercial/industrial, quer em ambiente doméstico. Consequentemente, está a desenvolver-se uma maior consciência crítica global que abrange todos os quadrantes da sociedade. Ocorrências que afetavam o fornecimento de eletricidade e que até então eram consideradas aceitáveis pelas companhias que atuam no setor elétrico e pelos utilizadores, são agora consideradas um problema. Este documento aborda o assunto da qualidade de energia, tratando diferentes fenómenos do ponto de vista das causas que as originam e as implicações que provocam na rede.

O termo “qualidade de energia” tornou-se parte do vocabulário de muitos consumidores finais de eletricidade, quer no setor industrial quer no comercial. Os equipamentos

utilizados até há bem pouco tempo eram mais simples por isso mais robustos e insensíveis às variações no fornecimento de energia. As flutuações da tensão vindas da rede de distribuição não eram sentidas. Atualmente, são usados equipamentos que exigem uma melhor qualidade de serviço. Alguns autores consideram que “Cabe ao consumidor final proteger as cargas sensíveis das cargas que perturbam a qualidade de energia através da instalação de equipamento protetor.”

Um vasto leque de soluções para os problemas da qualidade de energia está disponível quer, para o operador da rede de distribuição quer para o consumidor final. Equipamento mais sofisticado de monitorização está mais rapidamente acessível ao consumidor final, que se enriquece com informações relacionados com o nível da qualidade de energia.[8]

Analisar particularmente a qualidade de energia produzida nos parques eólicos não é uma tarefa fácil. Torna-se necessário reconhecer alguns aspetos específicos da geração de energia eólica tais como: a dependência da produção de energia elétrica com a velocidade do vento, os parâmetros de qualidade das turbinas eólicas, as características da aerodinâmica e mecânica do rotor e do controlo e a qualidade de energia na rede elétrica. A integração de aerogeradores à rede, se não for devidamente planeada, pode causar interferências e problemas de qualidade da energia.

A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) começou a trabalhar para facilitar a qualidade de energia em 1996. A norma IEC 61400-21 “*Power Quality Requirements for a Grid Connected Wind Turbines*”, datada de 21 de dezembro de 2001, tem como princípio base a identificação e especificação, por parte dos fabricantes de aerogeradores, dos parâmetros capazes de afetar o funcionamento dos conversores eólicos e a qualidade de serviço da rede elétrica, em que estes estão integrados. A secção 21 desta norma trata da “Medição e Avaliação das características de qualidade de energia de turbinas eólicas conectadas à rede”.

A ligação de aerogeradores à rede elétrica pode influenciar a tensão da rede fundamentalmente pelas variações rápidas da tensão e pelas flutuações da tensão em regime permanente. Estes problemas da tensão podem ter origem na ligação de turbinas à rede, variação da velocidade do vento e a ocorrência de curto-circuito na rede, que pode levar os geradores a desconectarem-se da rede.

A norma NP EN 50160 retrata as características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia elétrica.[9]

A flutuação de tensão originada por uma turbina eólica deverá ser limitada da forma especificada na norma IEC 61000-3-7.[10]

A norma IEC 61000-2-8 é referente às quedas de tensão e interrupções em sistemas públicos de fornecimento de energia elétrica com resultados estatísticos de medição.[11]

As medições de harmónicos não são necessárias para turbinas eólicas de velocidade fixa, onde o gerador de indução com o rotor em gaiola está ligado diretamente à rede. As medições de harmónicos são necessárias apenas nas turbinas de velocidade variável equipadas com conversores eletrónicos de potência. A medição de harmónicos no aerogerador é problemática devido à influência da tensão harmónica já existente na rede. Os harmónicos de 5^a e 7^a ordem são os que afetam as medições. As turbinas de velocidade variável estão equipadas com um sistema a funcionar em modo PWM. Este tipo de sistema inversor tem a vantagem de controlar as potências reativa e ativa, mas também produzem componentes harmónicas de corrente, sendo assim é necessário a utilização de sistemas de filtros para eliminar a componente harmónica.

A distorção harmónica de acordo com a norma IEC 61000-3-6 refere os limites para a emissão de correntes harmónicas aplicável a geradores.[12]

O estudo do *flicker* torna-se necessário e importante à medida que aumenta o número de instalações de parques eólicos. Várias soluções têm sido encontradas para diminuir este efeito na rede. A técnica mais adotada é a compensação de potência reativa realizada pelo conversor do lado da rede ou pelo compensador síncrono estático conectado no ponto de acoplamento comum da central à rede de distribuição. O nível de *flicker* depende da amplitude, forma e frequência da onda de tensão. A avaliação do nível é baseada no medidor de *flicker* descrito na norma IEC 61000-4-15.[13]

A tabela seguinte demonstra as causas/efeitos dos potenciais efeitos das turbinas na qualidade da energia.[14]

CAUSA: Turbinas Eólicas	EFEITO: Ocorrência na Rede Elétrica
Aumento da produção média de energia	Variação do valor eficaz da tensão
Variação temporal da velocidade do vento (Regime permanente/normal de funcionamento do conversor)	<ul style="list-style-type: none"> • Flutuações dinâmicas da tensão • Flutuações da potência ativa fornecida e da potência reativa consumida pelos geradores de indução
Flutuações da potência produzida com origem em: <ul style="list-style-type: none"> • Efeito de sombra da torre • Camada limite atmosférica • Desalinhamento do eixo do rotor • Desregulação do ângulo das pás • Turbulência atmosférica 	<ul style="list-style-type: none"> • Flutuações dinâmicas da tensão • Flicker
Aerogeradores equipados com: <ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de retificação/inversão • Soft-starters • Sistemas variáveis de compensação de potência reativa 	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de harmônicas • Flicker
Variação temporal da velocidade do vento acima dos limites de funcionamento (Regime transitório de entrada ou saída do conversor na rede): <ul style="list-style-type: none"> • Ligação e desligação das turbinas à rede • Ligação e desligação das baterias de condensadores 	<ul style="list-style-type: none"> • Picos no valor da tensão • Flicker

Tabela 2 – Potenciais efeitos das turbinas eólicas na qualidade da energia elétrica.

Seguidamente são apresentadas algumas definições de fatores que põem em causa a qualidade de energia.

- *Cava de tensão* é a redução do valor eficaz da tensão na gama de 0,1 até 0,9 pu (retidos) com uma duração maior do que a metade do ciclo e menor que um minuto. Frequentemente designada como “cava”, quando a queda de tensão é abrupta. Causada por falhas, aumentos da exigência de carga e acontecimentos transitórios, tal como o arranque de um grande motor.

- *Elevação da tensão* é a elevação do valor eficaz da tensão na gama de 1,1 pu até 1,8 pu com uma duração maior do que a metade do ciclo e menor que um minuto. Causada por falhas no sistema, ligações de cargas e baterias de condensadores.
- A *transição* é um desvio momentâneo indesejado do fornecimento da tensão ou da corrente elétrica. As transições classificam-se em duas categorias: impulsivas e oscilatórias.
- Os *harmónicos* são distorções sinusoidais periódicas do fornecimento da tensão ou da corrente elétrica causadas por cargas não lineares. Os harmónicos são medidos em múltiplos da frequência. Usando a série de análise de Fourier, a frequência individual dos componentes da forma da onda distorcida pode ser descrita em termos de harmónicos, magnitude e fase de cada componente. Nas figuras 6 e 7 são ilustrados exemplos da distorção da onda com alguns harmónicos.

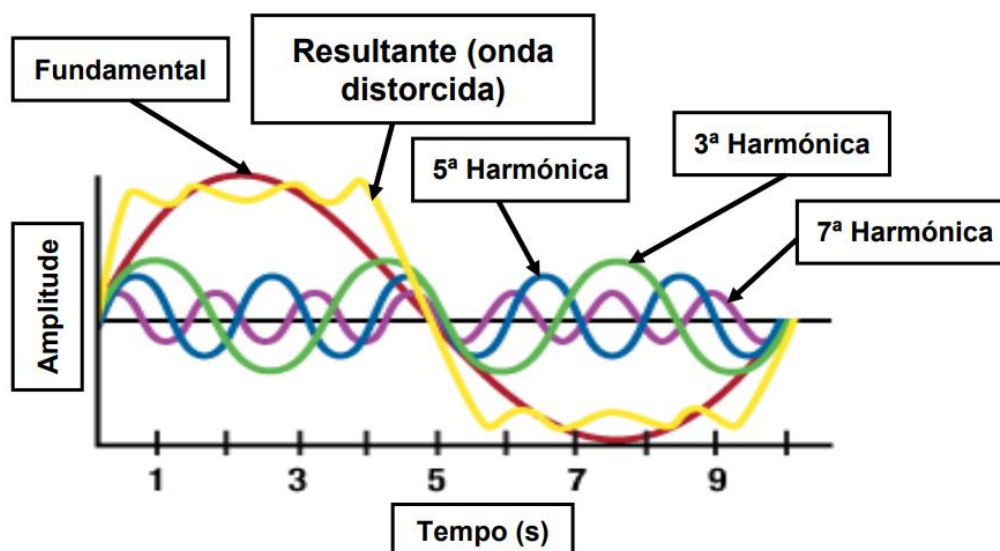


Figura 6 – Análise da onda resultante com uma distorção harmónica de ordem 3, 5 e 7.[15]

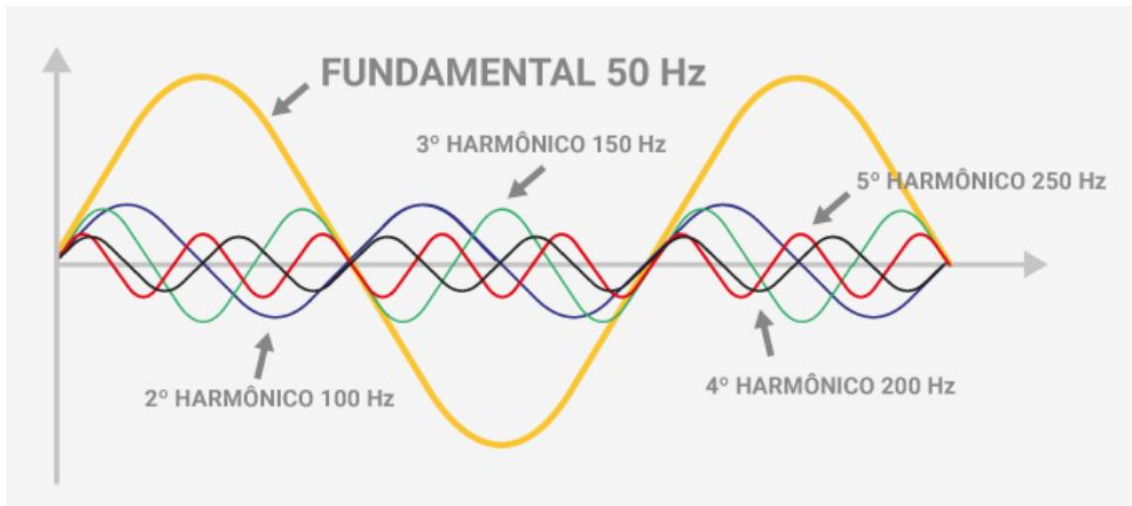


Figura 7 – Análise da distorção harmônica de ordem 2, 3, 4 e 5.[16]

- *Tensão distorcida* ou formas de onda contendo distorções periódicas de natureza sinusoidal, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental de fornecimento, são designados por inter-harmônicos.
- *Flicker* é um termo usado para descrever o efeito visual de pequenas variações de tensão em equipamento de iluminação elétrica (particularmente lâmpadas de filamento de tungstênio). O alcance da frequência das perturbações que afetam os aparelhos de iluminação e que são detetáveis pelo olho humano é de 1-30 Hz. Para proceder à avaliação do incómodo provocado pelo fenómeno de *flicker* foram então desenvolvidos equipamentos de medida. Estes equipamentos são designados por medidores de *flicker* ou *flickómetros* e baseiam o seu princípio de funcionamento na deteção de flutuações de tensão, que afetam a sensibilidade do olho humano. Outros indicadores são utilizados para avaliar o fenómeno de *flicker*, entre estes estão os índices *Pst* e *Plt*. Estes indicadores podem ser calculados de acordo com as expressões 1 e 2.

$$Pst = 0.36 * dr^{0.31} * RF \quad (1)$$

$$Plt = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^N \frac{Psti^3}{N}} \quad (2)$$

Onde:

d – Valor da variação relativa da tensão $\frac{\Delta U}{U}$ em %;

r – Número de variações da tensão por minuto;

R – Fator de frequência que toma valores dependentes do valor de r;

F – Fator de equivalência que depende da forma da flutuação da tensão (para uma flutuação regular retangular F=1);

N – Número de indicadores *Pst* considerados durante o intervalo de 2 horas.

Os fenómenos de *flicker* com duração inferior a 1,5 horas por semana podem ser desprezados.[17]

- *Desequilíbrio da tensão* é definido como um desvio na magnitude e/ou na fase de uma ou mais de umas das fases, de um fornecimento trifásico, com respeito à magnitude de outras fases e o ângulo normal de fase de 120°.
- O *desvio de frequência* é a variação na frequência do fornecimento nominal acima/abaixo de um nível predeterminado, normalmente +/- 0,1 %.
- Uma *interrupção transitória* é definida como uma redução do fornecimento da tensão ou da corrente elétrica para um nível menor do que 0,1 pu durante menos um minuto. As interrupções podem ser causadas por falha no sistema, falha do equipamento do sistema ou mau funcionamento do controlo ou da proteção. As interrupções são consideradas como acontecimentos mensuráveis abordados no campo da “qualidade de energia”.
- *Quebra de tensão* é definida como uma interrupção com a duração máxima de um minuto.

2.2.1. ORIGENS DOS PROBLEMAS DA QUALIDADE DE ENERGIA

Aparelhos de energia eletrônicos

Os aparelhos de energia eletrônicos que originam a distorção harmônica podem ser suscetíveis a quedas de tensão se não forem adequadamente protegidos. O problema mais frequente que danifica os aparelhos envolve o uso de *drives* de frequência variável. Os *drives* de acionamento dos motores de velocidade variável são altamente suscetíveis às perturbações de queda de tensão e causam problemas em processos industriais, onde a perda de sincronismo mecânico é um fator grave para a produção.[8]

A solução ideal para os problemas desta natureza, seria os fabricantes destes aparelhos desenvolverem equipamentos com limites alargados ao fenómeno das cavas de tensão. O problema económico que mais afeta a qualidade de energia está diretamente relacionada com a utilização de *drives* de frequência variável. De acordo com Ian Hunter, a solução eficaz para anular os problemas que afetam a qualidade de energia reside numa relação de colaboração estratégica entre o operador da rede de distribuição e os seus clientes.

Equipamento de Inversão de Tensão

Os equipamentos de inversão de tensão que fornecem energia operam num modo tipo interruptor (SMPS – “*Switch Mode Power Supply*” (fornecimento de energia em modo comutado)), e são a causa de um aumento significativo do nível dos 3º, 5º e 7º harmónicos de tensão. Dado que o terceiro harmónico é um harmónico “triplicado”, é uma fase de sequência de ordem zero e, daí, aumenta a corrente no neutro. O aumento do uso de equipamento de inversão de tensão teve como consequência uma maior preocupação com o excesso de carga dos condutores neutros e também com o sobreaquecimento dos transformadores.

Os desenvolvimentos recentes debruçam-se sobre o uso da SMPS em aplicações de iluminação fluorescente. Estas aplicações representam cerca de 50 % da potência dos edifícios modernos. Muitos edifícios comerciais modernos possuem uma grande quantidade de condutores neutros para “pactuarem” com os níveis do terceiro harmónico, que podem alcançar teoricamente uma magnitude três vezes superior à fundamental.

Aparelhos de arco

Fornos de arco elétricos, soldadores de arco e lâmpada de descarga elétrica são todas as formas de aparelhos de arco elétrico. Estes aparelhos são de potências não lineares. A onda da corrente elétrica desenhada é caracterizada pelo aumento de uma corrente em arco limitada unicamente pelo impedimento da rede. As grandes instalações de fornos a arco possuem tipicamente uma exigência de corrente na ordem dos 10 000 A; aparelhos de soldadura retiram corrente na casa dos milhares de amperes; as lâmpadas individuais de descarga elétrica retiram apenas frações de 1 A, mas quando se considera uma grande percentagem de potência doméstica e comercial, a exigência deste tipo de energia já tem um impacto significativo.

Todos os aparelhos de arco são fontes de distorção harmónica. A potência em arco pode ser representada como uma fonte de tensão harmónica relativamente estável. Os efeitos dos fornos de arco são difíceis de minimizar; equilibrar as fases com outros fornos nunca será eficiente, dado que os fornos em arco operam em modos variados, levando ao desequilíbrio da fase. Normalmente, os soldadores de arco causam transições na rede local devido ao interruptor intermitente e, por isso, alguns equipamentos eletrónicos podem precisar de proteção.[8]

Ligação de cargas

O efeito de ligação de grandes cargas na rede local é um problema comum que causa a propagação de transições para outro equipamento elétrico próximo. Estas transições podem ser de grande magnitude de tensão, mas possuem muito pouca energia devido à sua curta duração, que é normalmente medida em milissegundos. Os equipamentos podem ser protegidos deste tipo de transições isolando a sua ligação eletricamente.

Ligação de grandes motores

O arranque direto de motores de indução origina uma solicitação de corrente neste período de 6 a 8 vezes a respetiva corrente nominal, o que poderá originar cavas de tensão na rede. A maior parte dos motores modernos estão equipados com conversores eletrónicos de potência, que controla a corrente de arranque do motor para um nível aceitável.

Equipamentos sensíveis

Não fosse o aumento do uso do equipamento sofisticado, o assunto da qualidade de energia não teria sido abordado nos recentes anos. As principais áreas de preocupação são:

- Um mau funcionamento de equipamento;
- A corrupção de dados;
- A qualidade reduzida do processo e conseqüentemente do produto;
- A quantidade de material desperdiçado nos processos de produção;
- As falhas de processo;
- Equipamento danificado;
- Normas de segurança.

Qualquer aparelho depende de um *chip* volátil de memória para armazenamento de informação que está potencialmente em risco em termos de qualidade de energia, pelo que estes aparelhos requerem proteção. Muitos processos industriais dependem de sistemas de controlo de microprocessadores. As soluções para os problemas de energia relacionados com este tipo de equipamento, frequentemente consistem numa proteção autónoma para o controlo do sistema.

Danos relacionados com fenómenos atmosféricos

As descargas atmosféricas são a causa de sobretensões transitórias que levam frequentemente a cortes de fornecimento de energia na rede. Nem sempre os relâmpagos caem sobre as linhas. Os que caem nas proximidades podem ser perigosos, devido ao facto de a corrente percorrer a terra e entrar na instalação através do neutro que se encontra ligado à terra e, por conseguinte, danificar as instalações.

Ventos fortes e os temporais têm um efeito destrutivo muito alargado e causam a disrupção no fornecimento das redes. Nos locais onde as disrupções são causadas por falhas, estas podem ser solucionadas em menos de um minuto. Finalmente, e a título de referência, a

formação de neve e gelo, o clima húmido e quente e mesmo a colisão de aves ou a queda de árvores têm um efeito severo nas linhas aéreas.[8]

2.2.2. MEDIÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA

Após identificado o problema da qualidade de energia, o próximo passo consiste em analisar a melhor solução económica para o caso. Isto requer informação sobre:

- A natureza do problema da qualidade de energia;
- O custo estimado da perturbação;
- A frequência da ocorrência;
- As horas a que o problema ocorreu;
- Informação acerca do equipamento afetado;
- Informação acerca do equipamento próximo;
- Monitorização prévia levada a cabo no local.

As quantidades mensuráveis da qualidade de energia incluem: variações do fornecimento da tensão, interrupções curtas/longas, quedas e elevações de tensão, harmónicos, *flicker*, desequilíbrios de tensão e desvios de frequência.

2.2.3. ATENUAÇÃO DOS PROBLEMAS DA QUALIDADE DE ENERGIA

Linhas subterrâneas

O vasto número de problemas da qualidade de energia está relacionado com a incorreta colocação das linhas subterrâneas. A verificação das linhas subterrâneas deve ser a primeira investigação a ser conduzida.

“Stanby” UPS (Uninterruptible Power Supply – fonte de alimentação ininterrupta)

É um equipamento constituído por retificador, bateria, inversor e interruptor estático, é o UPS mais utilizado atualmente. Quando há uma perturbação que leve à redução da tensão principal, abaixo de um nível pré-determinado os interruptores abrem-se e fecham-se

respetivamente. A potência será, então, alimentada pela bateria através do inversor assegurando a continuação do fornecimento de energia. A saída do inversor de um UPS de *stanby* deve sempre estar em sincronismo com o fornecimento da frequência, para assegurar uma transição suave de um fornecimento para o outro.

“Online” UPS

Equipamento “Online” UPS está configurado de forma que a potência seja sempre alimentada pelo próprio. Desta forma, a potência está isolada do fornecimento principal em todas as ocasiões. Estes sistemas são caros e têm grandes perdas de operação. Diferenciam-se do sistema de *Stanby* pelo facto de possuírem um interruptor de sistema manual, em vez de interruptores de transferência estáticos.

Filtros ativos

O controlo da energia reativa e, conseqüentemente, dos harmónicos pode ser adquirido controlando a proporção dos sistemas de energia através do elemento reativo. Convencionalmente, isto é conseguido ligando bobines e condensadores à terra usando tirístores.

Filtros passivos

Os filtros passivos são filtros simples constituídos por condensadores discretos e/ou bobines. São, normalmente, concebidos para atenuar frequências altas (filtros passa baixo), adaptados a equipamentos para remover os harmónicos de ordem alta da rede.

Condensadores

Os condensadores são usados para fornecer compensação de energia reativa e reduzir as perdas do sistema. Alguns condensadores estão permanentemente ligados à rede, outros estão ligados para servirem as condições de potência. Quando os condensadores estão ligados à rede ocorrem transições de tensão devido à interação dos elementos indutivos da rede com a capacidade adicional. Quando são instalados condensadores de correção de fator de potência no local do cliente, o efeito da ligação de transição pode tornar-se de natureza oscilatória e elevada.

Autotransformadores

Os autotransformadores são usados com o objetivo de regular a tensão. Eles podem ter um comutador eletrônico ou mecânico para ajustar a razão de transformação do transformador. Os reguladores eletrônicos podem responder a mudanças de potência num curto espaço de tempo, enquanto que os aparelhos mecânicos estão mais adaptados a mudanças de potências mais lentas.[8]

2.3. GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

O aerogerador funciona extraindo a energia cinética que passa através do seu rotor. A energia cinética do vento é dada pela equação 3.

$$Ec = \frac{1}{2} * m * Vw^2 \quad (3)$$

Onde,

Ec – Energia cinética em J;

Vw – Velocidade do vento em m/s;

m – Massa do ar em kg.

A potência do vento é igual à variação da energia cinética em relação ao tempo de acordo com a equação (4).

$$P = \frac{\partial Ec}{\partial t} = \frac{1}{2} * \frac{\partial m}{\partial t} * Vw^2 \quad (4)$$

A Lei de Betz diz que só se pode converter menos de 16/27 (59 %) da energia cinética em energia mecânica ao utilizar um aerogerador, portanto, apenas uma fração da potência do vento é extraída pela turbina. Assim, a potência absorvida pela turbina é proporcional à potência do vento, vezes um rendimento dado por (5).[18][19]

$$Cp = \frac{Pw}{P} \quad (5)$$

C_p – Rendimento da Turbina conhecido com coeficiente de potência;

P_w – Potência Eólica absorvida pela a turbina em W.

Como, $\frac{\partial m}{\partial t} = \rho * \pi * R^2 * V_w$, a potência extraída do vento pela turbina é:

$$P_w = \frac{\rho}{2} * \pi * R^2 * C_p * V_w^3 \quad (6)$$

No qual:

ρ - Densidade do ar em kg/m^3 ;

R - Raio da área varrida pelas pás em metros.[20]

É importante localizar qualquer turbina geradora de eletricidade em áreas de alta velocidade de vento anual. A disponibilidade da fonte eólica é um fator importante para determinar onde é que as centrais estão localizadas. Frequentemente, as áreas mais ventosas estarão afastadas das habitações. A distribuição de rede elétrica associada conduz à exigência de uma consideração cuidada em torno da implementação de aerogeradores, em distribuições da rede elétrica relativamente fracas. A diferença entre a densidade dos fluidos de operação (água e ar) ilustra claramente porque é que um rotor de um aerogerador é mais largo do que um hidrogerador. Um aerogerador de 1,5 MW terá um rotor com um diâmetro de 60 metros montado numa torre com 60-90 metros. O aerogerador deve ser projetado para suportar grandes forças durante os temporais. A maior parte dos designs modernos usam um rotor de eixo horizontal com três pás, dado que este fornece um bom valor de pico C_p juntamente com um design estético agradável.

Para a produção de energia elétrica em grande escala, só poderão ser admitidos locais com valores de velocidades de vento de média anual superior a 6 m/s. De facto, a velocidade à qual os aerogeradores começam a rodar localiza-se nos 3-5 m/s (velocidade de ligação). No entanto, abaixo de 5 m/s a quantidade de energia no vento é muito baixa e a turbina apenas começa a funcionar por volta dos 5 m/s. Os valores ideais de aproveitamento andam à volta dos 9-10 m/s. Todavia, as turbinas podem ser desenhadas para uma eficiência máxima,

dependendo da zona de velocidade de vento onde esteja a maior parte da energia. O valor limite estrutural para as turbinas ronda os 25 m/s (velocidade de corte).

A relação entre a velocidade linear (m/s) da extremidade da pá da turbina de raio r (m), rodando à velocidade ω (rad/s), e a velocidade do vento u (m/s) é caracterizada por um fator adimensional, conhecido por *razão de velocidades da pá* (TSR – Tip Speed Ratio).[21]

$$TSR = \lambda = \frac{\omega r}{u} \quad (7)$$

O binário de um rotor de um aerogerador de eixo horizontal contém um componente periódico na frequência na qual as pás passam sobre a torre. Este binário cíclico deve-se à variação da velocidade do vento vista pelo rodar da pá. A variação da velocidade do vento deve-se à combinação de efeito sombra, recorte do vento e turbulência. Num aerogerador de velocidade fixa a variação do binário do rotor traduz-se numa mudança na saída de energia e, conseqüentemente, numa variação de tensão na rede. Estas variações de tensão dinâmicas são frequentemente referidas como *flicker*, por causa do efeito que elas têm em lâmpadas incandescentes.

2.3.1. REGULAÇÃO DA POTÊNCIA

A regulação da potência pode ser feita por meios ativos ou meios passivos. Nos meios ativos controla-se variando o passo das pás do rotor (controlo de *Pitch*), enquanto nos meios passivos as pás são desenhadas de modo que entrem em perda aerodinâmica (controlo de *Stall*).

Uma das vantagens ao optar por uma solução do tipo *Pitch*, é o bom controlo de potência para todas as gamas de variação da velocidade do vento. Permite também, a redução dos esforços de fadiga com vento muito forte devido à pá apresentar uma menor superfície frontal em relação ao vento. Outra vantagem relaciona-se com o facto de o processo de arranque ser assistido, porque o ângulo de passo pode ser variado de modo a conseguir um embalamento do rotor até a velocidade de rotação nominal. Tem que se ter em conta que a sua complexidade e o seu custo são fatores inconvenientes.

As máquinas que usarem a solução do tipo *Stall* têm a vantagem de serem sistemas mais simples, por terem menos partes em movimento, e serem também mais baratas. Contudo, as desvantagens deste método consistem em métodos mais complicados de cálculo aerodinâmico para definir o ângulo de ataque, para o qual a pá entra em perda.

Seguidamente é apresentado na figura 8 um perfil alar, onde se pode observar as várias forças incidentes nas pás do aerogerador.

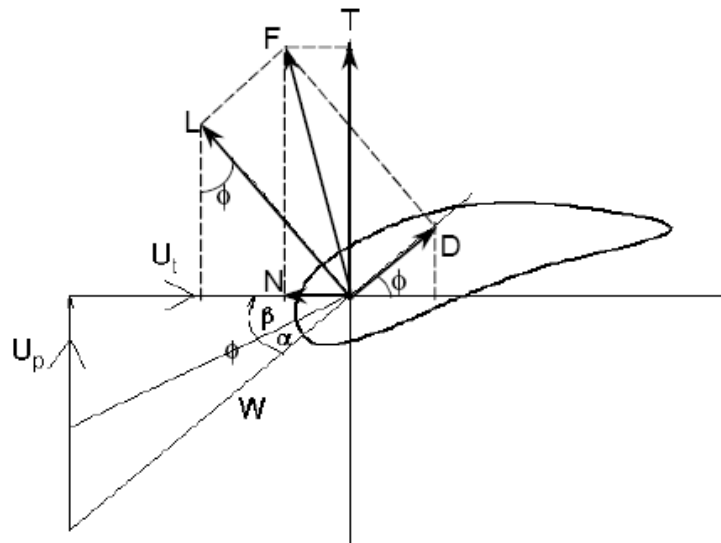


Figura 8 – Sistema de forças num perfil alar.[22]

Onde,

W – Vetor velocidade relativa do vento, que atua o elemento de pá;

U_p – Velocidade do vento;

U_t – Velocidade tangencial da pá;

F – Vetor força, resultante das forças *L* e *D*;

L – Força de sustentação;

D – Força de arrastamento;

T – Binário motor; $T=L*\cos(\phi)+D*\sen(\phi)$

α - Ângulo de ataque;

β - Ângulo de passo;

ϕ - Ângulo de escoamento, $\phi = \alpha + \beta$;

N - Movimento da pá; $N = L \cdot \sin(\phi) - D \cdot \cos(\phi)$. [4]

2.3.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA

A energia eólica apresenta várias vantagens, entre as quais se podem destacar as seguintes:

- O seu impacto no meio ambiente é mínimo: não emite substâncias tóxicas ou gases, logo não contaminam o ar, a água, o solo, não provoca o efeito estufa e o aquecimento global;
- O vento é uma fonte de energia inesgotável e abundante. Estima-se que, teoricamente, existe potencial eólico para suplantar até 15 vezes mais a exigência atual de energia no mundo;
- A tecnologia não usa combustíveis e o vento é um recurso do próprio país, logo é uma das fontes mais baratas;
- Em comparação com outras tecnologias aplicadas para a eletrificação rural, o funcionamento do sistema eólico é muito barato e simples. O sistema não precisa de grande manutenção, para além de uma revisão periódica das baterias (se as possuírem) e uma limpeza das pás nas épocas secas;
- Os projetos de energia eólica podem construir-se a curto prazo. Por exemplo, um parque eólico de 50 MW pode instalar-se num ano.

Por outro lado, como toda a fonte de energia, a eólica também tem as suas desvantagens:

- A variabilidade do vento pode influenciar o custo do projeto e a qualidade da energia. Pode influenciar também a tensão e a frequência, colocando assim em risco a alimentação da rede;
- O custo inicial é alto em comparação com outras fontes térmicas de geração de energia, ou pode ser uma barreira à realização do projeto sobretudo nas zonas rurais;
- É uma opção que não se pode aplicar em qualquer lugar;
- O impacto visual é muito forte do ponto de vista estético o que pode provocar um choque inevitável na alteração da paisagem.

2.4. TIPOS DE GERADORES EÓLICOS USADOS EM PORTUGAL

Os geradores eólicos exibem características que os diferenciam dos geradores hídricos ou térmicos convencionais. Distinguem-se, por um lado, pela natureza do seu recurso energético e, por outro, pela tecnologia usada na conversão mecânico-elétrica que não está padronizada. Efetivamente, o antagonismo primordial entre os variados sistemas de geração eólica reside na forma como a turbina controla a potência mecânica. Sendo assim, em Portugal, os geradores mais usuais são: gerador de indução com rotor em gaiola; gerador de indução duplamente alimentado e gerador síncrono de velocidade variável.

2.4.1. GERADOR DE INDUÇÃO COM RÓTOR EM GAIOLA

Este tipo de gerador surgiu em Portugal no final da década de 80. Caracteriza-se por possuir uma turbina do tipo *Stall* em que o controlo da potência mecânica é adquirido por meio do design das pás do rotor. Estas estão unidas ao cubo com um ângulo fixo. O seu perfil foi aerodinamicamente desenhado para assegurar que, num momento em que a velocidade do vento seja demasiado alta, crie turbulência na parte da pá que não dá vento. Esta incapacidade de sustentação evita que a pressão ascendente da pá atue sobre o rotor. Uma vez que este tipo de máquina se desloca através do uso do vento, a sua mecânica deve ser por exigência mais robusta. Um dispositivo de controlo aplicado ao gerador de indução pode estar programado para reduzir o efeito de *flicker*, melhorar a eficiência e o fator de potência e controlar a energia reativa. A máquina de indução com rotor em gaiola funciona como gerador nas situações em que a velocidade angular do rotor é superior à velocidade angular do campo girante, para escorregamentos negativos. Devido à variação da

velocidade admissível da máquina ser muito pequena em relação à velocidade de sincronismo, esta máquina opera a uma velocidade constante. O campo eletromagnético desta máquina é estabelecido através do estator da máquina, isto implica que esta absorva sempre potência reativa da rede. O aumento da potência ativa gerada resulta num aumento do fator de potência da máquina, sendo esta variação não linear. Para compensar o fator de potência, é sempre necessário equipar estes geradores com bancos de condensadores. Comercialmente é possível encontrar estes equipamentos com um número variável de pares de polos, dependendo da velocidade da turbina. Esta possibilidade faculta a adaptação da velocidade específica da ponta da pá, λ a um valor que optimize o coeficiente de potência, C_p .

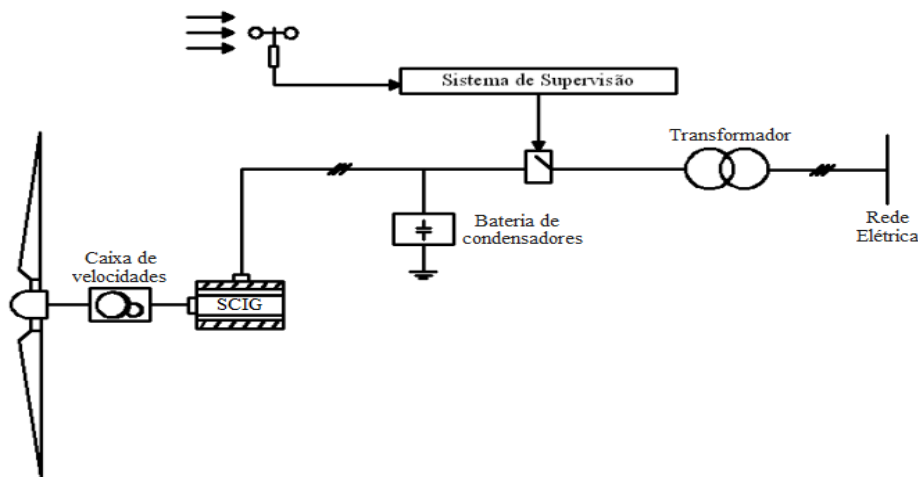


Figura 9 – Esquema do aerogerador de indução com rotor em gaiola.[23]

2.4.1.1. GERADOR DE INDUÇÃO COM RÓTOR EM GAIOLA UTILIZADO EM PORTUGAL

O parque eólico da Bulgueira, Vila Pouca de Aguiar, Distrito de Vila Real, foi instalado no ano de 2003. Dispõe de 3 turbinas da marca Nordex, utilizando o modelo N50 de 800 kW cada, com 50 metros de diâmetro das pás e velocidade de 1510 rpm, equipado com um sistema de controlo do tipo *Stall*, velocidade máxima de 62,18 m/s e velocidades de vento compreendidas entre 3 e 25 m/s, velocidades de arranque e paragem respetivamente, com uma velocidade nominal de 14 m/s. A capacidade total de produção é de 2400 kW, produz anualmente cerca de 5 GWh.



Figura 10 – Aerogerador utilizado no Parque eólico da Bulgueira, Nordex N50/800.

2.4.2. GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO (DFIG)

A máquina de indução com rotor bobinado foi, durante muito tempo, uma máquina pouco popular nas aplicações eletrotécnicas mais usuais, devido ao facto de ser uma máquina de maiores dimensões, ocupar mais espaço e necessitar de uma maior manutenção devido às escovas de ligação do rotor. No entanto, a possibilidade de atuar através das escovas e, por consequência, no valor da resistência rotórica, possibilita a obtenção de um grau de liberdade adicional no controlo da máquina.

Estes aerogeradores são equipados com turbinas do tipo *Pitch* e têm incorporado um sistema de caixa de velocidades que permite adaptar a velocidade de rotação da máquina à velocidade da turbina. As máquinas de indução duplamente alimentadas possuem um estator ligado diretamente à rede elétrica e o rotor ligado à rede de energia elétrica através de conversores AC/DC/AC. Este tipo de máquina assenta na possibilidade de controlar a sua velocidade variando a resistência do rotor. É possível resumir os modos de funcionamento da máquina de indução duplamente alimentada, em função do escorregamento e do trânsito de potência no rotor.

Uma vantagem reside no modo de funcionamento em que o DFIG consegue funcionar como gerador para deslizamentos positivos, modo este que não é suportado pela máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo.

Outra vantagem relevante reside no facto de o DFIG, para valores de deslizamentos negativos (quando a velocidade angular do rotor é superior à velocidade de sincronismo), poder fornecer potência ativa à rede pelo rotor e pelo estator.

Quanto à potência reativa esta pode ser fornecida quer pelo estator, quer pelo rotor.

O conceito referido tem grandes vantagens ao nível do controlo da potência gerada (caso gerador) ou recebida (caso motor) pela máquina. Em ambos os casos pode-se ter a máquina a gerar ou consumir uma potência superior à potência nominal do estator.

A máquina entregará potência à rede diretamente através do estator e pelo rotor, através de um conversor de frequência e controlador de potência.

O sistema de controlo por modulação da largura de impulso dos conversores impõe uma forma de onda alternada sinusoidal com amplitude, frequência e fase ajustáveis aos terminais dos conversores, na parte alternada. Os conversores AC/DC/AC têm como função assegurar a maximização do coeficiente de potência, C_p , da turbina. Na grande maioria dos casos, o facto de estar equipado com um sistema modulador, não necessita da utilização de baterias de condensadores.

As turbinas eólicas têm um valor mínimo de velocidade de funcionamento, abaixo do qual são desligadas, devido à baixa potência extraída e ao baixo rendimento.

Do mesmo modo, acima de um certo valor, a turbina é desligada por razões de segurança.

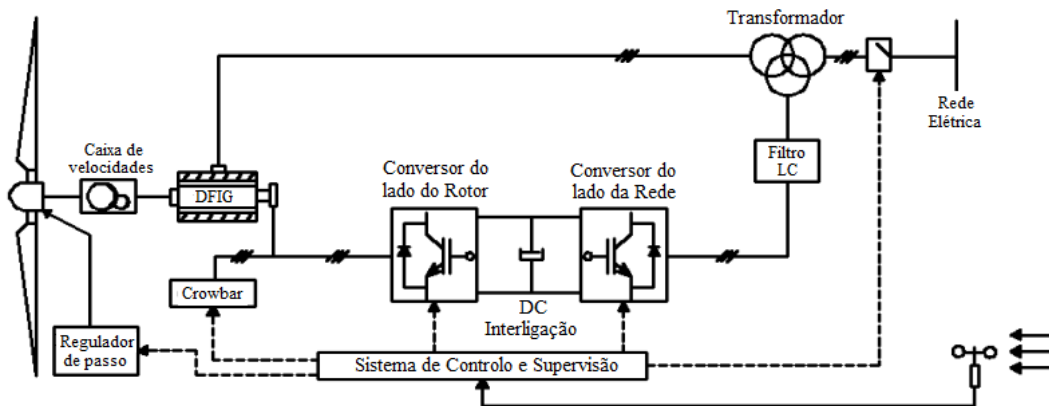


Figura 11 – Esquema do aerogerador de indução duplamente excitado com conversores.[23]

2.4.2.1. CÁLCULO DE POTÊNCIAS NA MÁQUINA DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADA

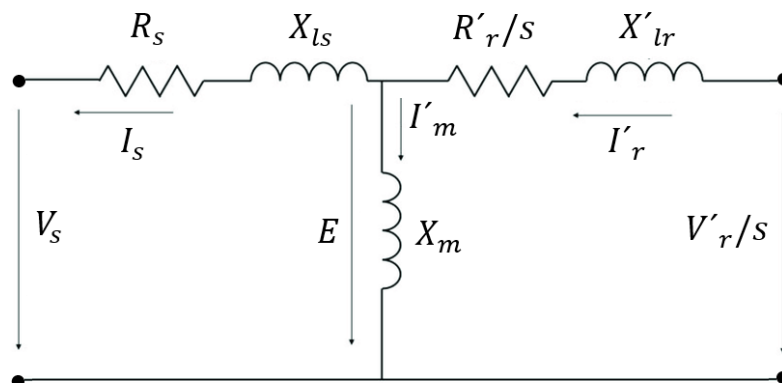


Figura 12 - Esquema equivalente de uma máquina de indução de rotor bobinado.[22]

O esquema representado na Figura 12 é referente a uma máquina de indução deduzido num referencial síncrono com o campo girante do estator (que gira à velocidade angular $\omega_s = 2\pi 50 \text{ rad/s}$) e em que os parâmetros do rotor se encontram referidos ao estator.[22]

A partir do diagrama da figura 12 obtém-se (9).

$$V_s = -(R_s + jX_{ls})I_s + E$$

(9)

$$\frac{V'_r}{s} = \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{lr} \right) I'_r + E$$

R_s – Resistência do Estator

X_{ls} – Reatância do Estator

R'_r – Resistência do Rotor

X'_{lr} – Reatância do Rotor

X_m – Reatância de magnetização

E – Força eletromotriz

ω_r – Velocidade angular do Rotor

A força eletromotriz e o deslizamento podem ser representadas pelas seguintes expressões:

$$E = jX_m I_m$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

As equações que traduzem as transferências de potência ativa e reativa no estator são:

$$P_s = \text{Re}\{V_s I_s^*\} = -R_s I_s^2 + P_{ag}$$

(10)

$$Q_s = \text{Im}\{V_s I_s^*\} = -X_{ls} I_s^2 + Q_{ag}$$

P_s e Q_s representam as potências ativa e reativa fornecidas à rede; serão positivas se a transferência for no sentido da máquina para a rede.

As equações que traduzem as transferências de potência ativa e reativa no rotor são:

$$\frac{P'_r}{s} = \text{Re} \left\{ \frac{V'_r}{s} I'_r{}^* \right\} = \frac{R'_r}{s} I'_r{}^2 + P_{ag}$$

(11)

$$\frac{Q'_r}{s} = \text{Im} \left\{ \frac{V'_r}{s} I'_r{}^* \right\} = X'_{lr} I'_r{}^2 + X_m I_m{}^2 + Q_{ag}$$

$\frac{P'_r}{s}$ e $\frac{Q'_r}{s}$ representam as potências ativa e reativa transferidas no circuito rotorico, vistas de um referencial que gira à velocidade do campo girante.

P_{ag} e Q_{ag} representam as potências ativa e reativa que transitam no entreferro da máquina e podem ser representadas pelas seguintes expressões:

$$P_{ag} = \text{Re}[EI_s{}^*]$$

(12)

$$Q_{ag} = \text{Im}[EI_s{}^*]$$

A equação de balanço de potência ativa no rotor da máquina conduz a:

$$P_{ag} = P'_r - R'_r I'_r{}^2 + P_{mec}$$

(13)

Com a expressão obtida em (11), é possível deduzir que:

$$sP_{ag} = P'_r - R'_r I'_r{}^2$$

(14)

P_{mec} significa a potência mecânica transferida no rotor da máquina, quando se apresenta no modo de funcionamento como gerador toma valor positivo e no sentido contrário como motor. A expressão (14), permite concluir que, da potência P_{ag} que é transferida no entreferro, a parcela sP_{ag} é transferida do rotor (P'_r), depois de descontadas as perdas. Com as expressões obtidas em (13) e (14), é possível obter:

$$P_{mec} = (1 - s)P_{ag} \quad (15)$$

Quando a máquina funciona como DFIG, podendo receber potência através do rotor ($P'_r > 0$) ou mesmo fornecer ($P'_r < 0$), podemos definir as perdas na máquina pelas seguintes expressões:

$$P_p = R_s I_s^2 + R'_r I_r^2 \quad (16)$$

$$Q_p = X'_{lr} I_r^2 + X_m I_m^2 + X_{ls} I_s^2$$

É possível escrever as equações para o balanço de potências na máquina, tendo em conta a expressões (10) e (13) apresentadas anteriormente:

$$\frac{P'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} I_r^2 + P_s + R_s I_s^2 \quad (17)$$

$$\frac{Q'_r}{s} = Q_s + Q_p$$

$$P_s = P'_r + P_{mec} - P_p \quad (18)$$

2.4.2.2. GERADOR ASSINCRONO DUPLAMENTE ALIMENTADO UTILIZADO EM PORTUGAL

Podemos encontrar um gerador deste tipo no parque eólico de Fafe, parque eólico Terras Altas de Fafe. Foi desenvolvido em duas fases: os primeiros 80 MW em 2004/2005, e uma extensão de 26 MW em 2008. É constituído por 53 aerogeradores Gamesa, modelo G87 de 2 MW de potência unitária, tendo entrado em funcionamento em dezembro de 2004. Este ativo representou um investimento de 142 milhões de euros.

A produção média anual é de 197 900 MWh, o que representa aproximadamente o consumo de eletricidade de Fafe, Celorico de Basto e Cabeceiras de Basto.[24]

Gerador duplamente alimentado, com conversores que controlam a velocidade e a potência. Possui um rotor com velocidade variável entre 9 a 19 rpm e equipado com um sistema de controlo *Pitch*. A intensidade de turbulência é de 10 %.



Figura 13 – Aerogerador indução DA, parque eólico de Fafe, Gamesa G87.

2.4.3. GERADOR SINCRONO COM CONVERSORES

O gerador síncrono é diferente do gerador anteriormente estudado, porque não está ligado diretamente à rede elétrica. O controlo da frequência angular do campo do estator feito pela excitação do rotor é limitado. Neste sistema, o fluxo de potência é unidirecional e os parâmetros, como a potência ativa, a potência reativa ou tensão introduzidos na rede, são

determinados pelo conversor no lado da rede, dependendo do sinal de controlo do bloco controlador. A tensão induzida no estator do aerogerador é diretamente proporcional à velocidade do rotor e à tensão de excitação do rotor, portanto pode ser controlada a partir desses dois parâmetros. Contudo, a velocidade do rotor será controlada indiretamente para extração máxima de potência, restando a tensão de excitação do rotor para controlo da tensão do estator. Os aerogeradores utilizados em Portugal não possuem caixa de velocidades. Em contrapartida, o uso de conversores AC/DC/AC pode inserir componente harmónica na corrente. A utilização destes conversores de potência pode injetar na rede potência reativa variável e programável. Tipicamente estas máquinas têm uma velocidade de rotação muito baixa, pode variar entre 17 e 36 rpm, sendo assim possuem um número elevado de pares de polos. Na figura 14 é apresentado o esquema de um gerador síncrono de rotor bobinado.

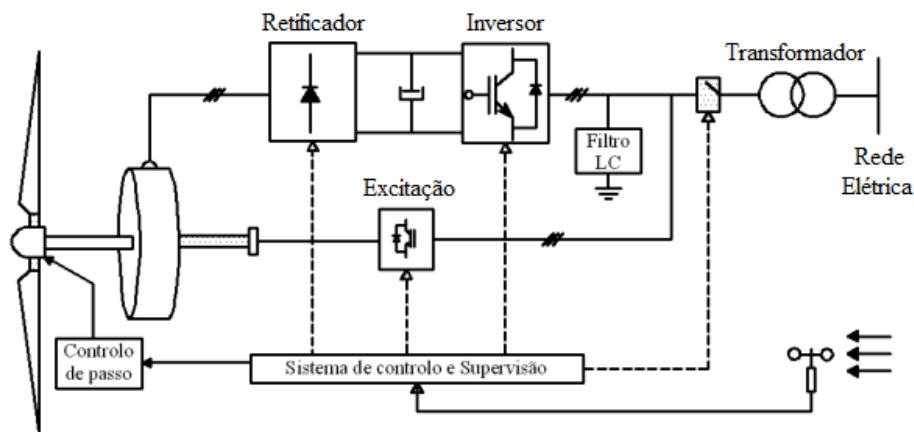


Figura 14 - Esquema do aerogerador síncrono de rotor bobinado.[23]

2.4.3.1. CARATERISTICAS MAIS IMPORTANTES DAS MÁQUINAS SINCRONAS

Em regime permanente, existe uma relação fixa entre a velocidade de rotação e a frequência de alimentação. Enquanto a máquina se encontrar em sincronismo, a velocidade não sofre qualquer variação desde que a frequência se mantenha constante. Fora desta velocidade, esta máquina não pode funcionar em regime permanente. Assim sendo, tem-se:

$$\omega_m = \frac{\omega_s}{p} \quad (15)$$

Onde,

ωm - Velocidade de rotação em rad/s;

ωs - Frequência de alimentação do estator;

p - Número de pares de polos.

Uma grande vantagem resulta do facto de se poder ajustar o fator de potência às necessidades da aplicação.

Para ajustar a velocidade da máquina síncrona às necessidades da carga, será necessário atuar na frequência de alimentação, utilizando para isso um conversor apropriado.

A variação de frequência da máquina síncrona deverá ser acompanhada de uma variação simultânea do valor eficaz da tensão aplicada ao estator.[25]

2.4.3.2. MÁQUINAS SINCRONAS DE IMANES PERMANENTES

O circuito de excitação de uma máquina síncrona serve apenas para a criação de fluxo indutor não se realizando nele conversão eletromecânica de energia. As máquinas de ímanes permanentes resultam da substituição do enrolamento de excitação por ímanes permanentes. Perde-se a capacidade do ajuste do fator de potência diretamente na máquina, podendo esse ajuste ser efetuado através do conversor. No entanto, ganha-se a vantagem de não serem necessários anéis e escovas, nem circuito de excitação, bem como todo o sistema de controlo desta corrente.

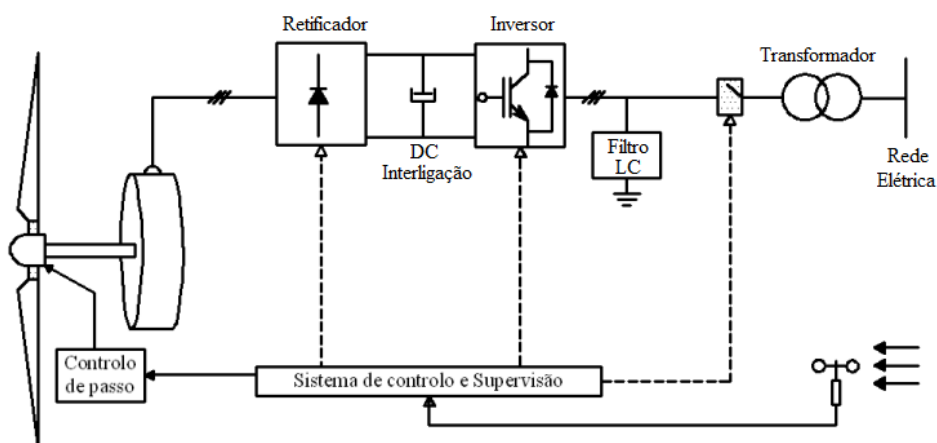


Figura 15 - Esquema do aerogerador síncrono de ímanes permanentes.[23]

2.4.3.3. MODELO MATEMÁTICO DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS DE IMANES PERMANENTES

O modelo matemático das máquinas síncronas de ímanes permanentes é semelhante ao modelo matemático das máquinas síncronas em geral. A relação entre os fluxos e as correntes é dada por 16.[25]

$$\psi_d = \psi_{fo} + L_d * i_d \quad (16)$$

$$\psi_q = L_q * i_q$$

Onde,

ψ_d e ψ_q - Fluxos no referencial de Park;

ψ_{fo} - Fluxo no estator provocado por ímanes permanentes;

L_d e L_q - Coeficientes de auto-indução segundo os eixos d e q;

i_d e i_q - Correntes no referencial de Park.

O fluxo ψ_{fo} resulta da presença de ímanes permanentes. O binário é determinado pela expressão (17).

$$M_{em} = p * (\psi_d * i_q - \psi_q * i_d) \quad (17)$$

Substituindo as equações 16 em 17, obtém-se (18).

$$M_{em} = p * (\psi_{fo} * i_q + (L_d - L_q) * i_d * i_q) \quad (18)$$

2.4.3.4. GERADOR SINCRONO UTILIZADO EM PORTUGAL

Um gerador deste tipo utilizado em Portugal encontra-se na Serra do Caramulo. Este parque eólico foi feito em duas partes. A primeira parte foi instalada no ano de 2006, com a aplicação de 42 turbinas da marca Enercon, utilizando o modelo E70/E4 de 2000 kW com 70 metros de diâmetro das pás. A capacidade total de produção é de 84 000 kW. A segunda parte foi instalada três turbinas da marca Enercon, utilizando o modelo E82/2000 de 2000 kW com 82 metros de diâmetro das pás. É de salientar, que este modelo é fabricado em Portugal (Viana do Castelo). No ano de 2021 foi instalado neste parque eólico um gerador do tipo assíncrono duplamente alimentado da marca Nordex, utilizando o modelo N149 de 4800 kW. O parque eólico tem um total de potência instalada de 94,8 MW.[26]

O E70 é um conversor de energia eólica com um rotor de três pás, com um sistema de controlo *Pitch* e que opera a velocidade variável. A altura da torre situa-se entre 64 e 113 metros.



Figura 16 – Aero gerador síncrono, parque eólico do Caramulo, ENERCON E70/E4.

2.5. CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

A capacidade de produção de energia eólica depende de vários fatores. Entre eles destacam-se a situação geográfica, económica e política dos países. Fazendo uma análise mais concreta a nível europeu, em primeiro lugar surge a Alemanha como o país com a maior capacidade de produção de energia eólica, atingindo cerca de 64 GW produzidos no final de 2021. Segue-se a Espanha com cerca de 28 GW e em terceiro lugar o Reino Unido com aproximadamente 27 GW. Portugal encontra-se na décima quarta posição com uma produção de quase 6 GW, conforme se pode verificar na figura 17.

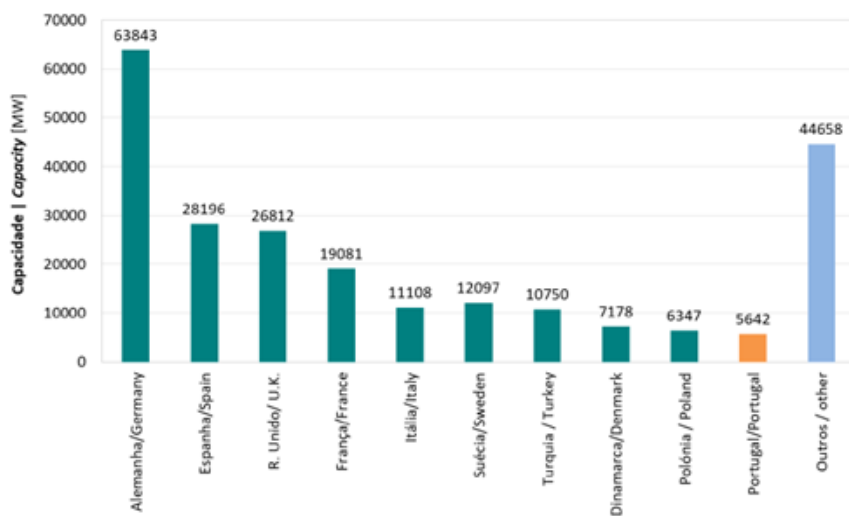


Figura 17 – Capacidade geradora na Europa no final de 2021.[27]

No gráfico seguinte, figura 18, podemos constatar a percentagem da nova capacidade geradora que Portugal contribuiu para a Europa com 0,8 %.

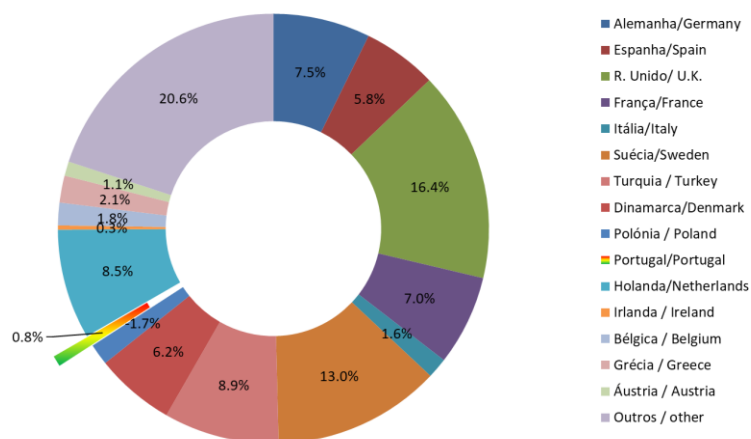


Figura 18 – Percentagem da nova capacidade geradora instalada no final de 2021.[27]

No gráfico seguinte, figura 19, podemos observar a capacidade instalada em Portugal no final do ano de 2021. Claramente consegue-se observar que Portugal vive um período de pouco crescimento nestes últimos 5 anos. O gráfico da figura 20, demonstra que até ao ano de 2026 não haverá grande crescimento, ao contrário de países na Europa que continuam a crescer muito, nomeadamente a Alemanha, Reino Unido, Espanha e França.

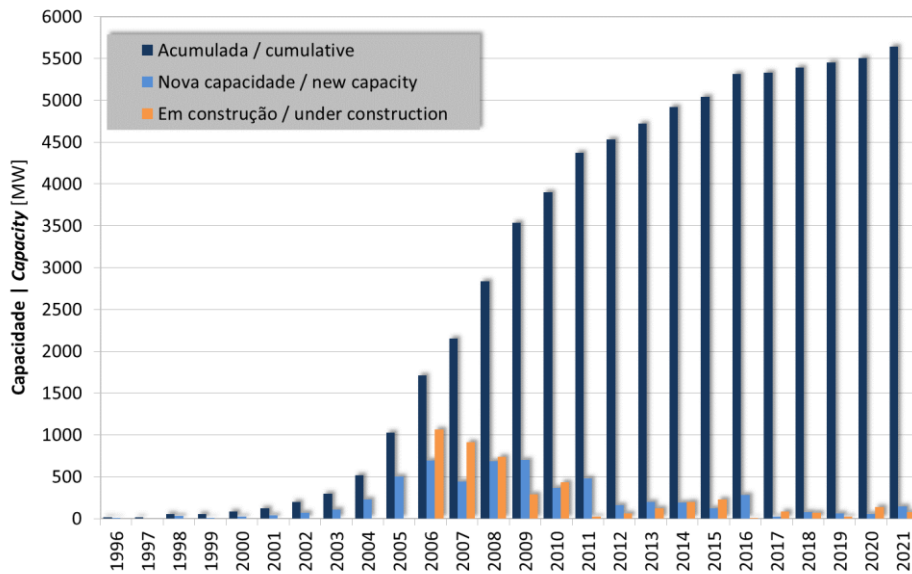


Figura 19 – Capacidade geradora instalada acumulada em Portugal.[26]

Portugal apenas começa a sentir uma expressão mais relevante na sua capacidade de produção de energia eólica no ano de 2001. O problema é que um aerogerador tem como vida útil aproximadamente 20 anos e a pergunta que se prende no futuro breve é o que irá ser feito a estes aerogeradores e respetivos parques eólicos que estão a ficar envelhecidos.

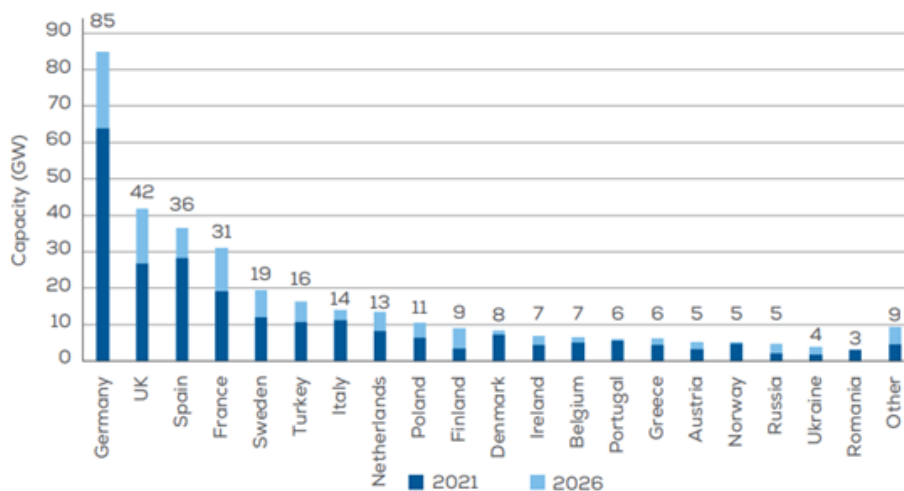


Figura 20 – Capacidade instalada na Europa no final de 2021 e projeção para o ano de 2026.[27]

A figura 21 demonstra a produção de energia elétrica referente ao mês de setembro de 2022, com um valor de 3393 GWh, sendo a contribuição eólica com um valor de 27,1 % da energia produzida. É de salientar ainda um valor bastante alto das energias não renováveis em Portugal, com uma contribuição de 42 %. Na figura 22, podemos observar a percentagem do peso da produção eólica relativamente às outras fontes ao longo de 13 meses, desde setembro de 2021 até setembro de 2022. Em dezembro passado, a contribuição da energia eólica obteve 42,7 %.

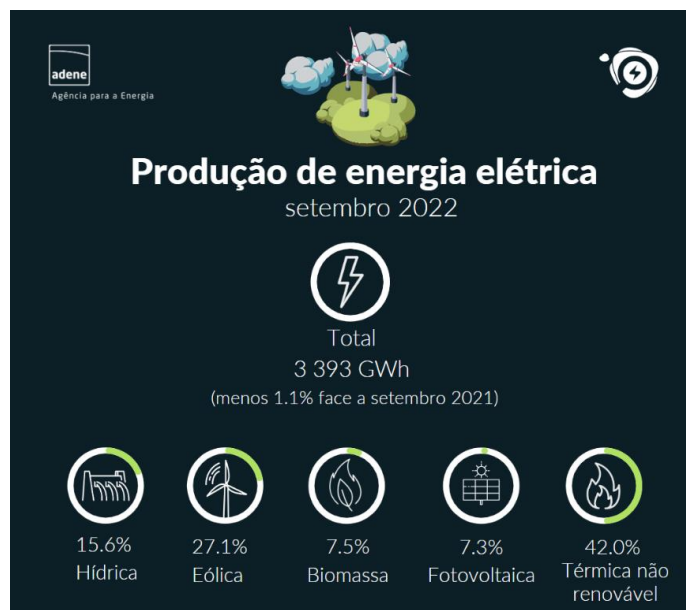


Figura 21 – Produção de energia elétrica em Portugal referente a setembro de 2021.[28]

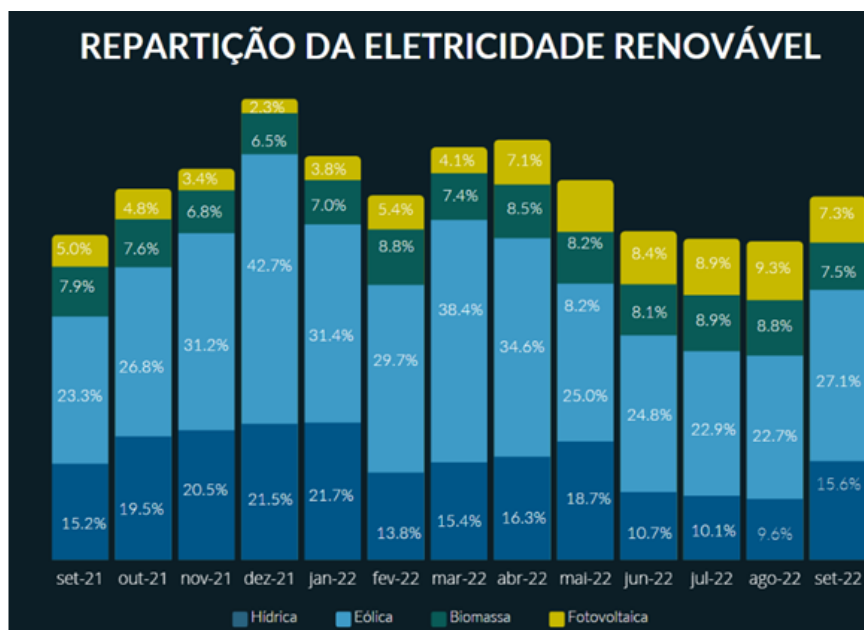


Figura 22 – Percentagem da nova capacidade geradora instalada no final de 2021.[28]

O quadro seguinte, figura 23, descreve a energia produzida no dia 8 de novembro de 2022. Portugal teve uma produção de 60 GWh, sendo quase a sua totalidade em parques eólicos *onshore*. A Alemanha, Reino Unido, França e Espanha como comprovado em gráficos anuais têm liderado este setor das energias renováveis.

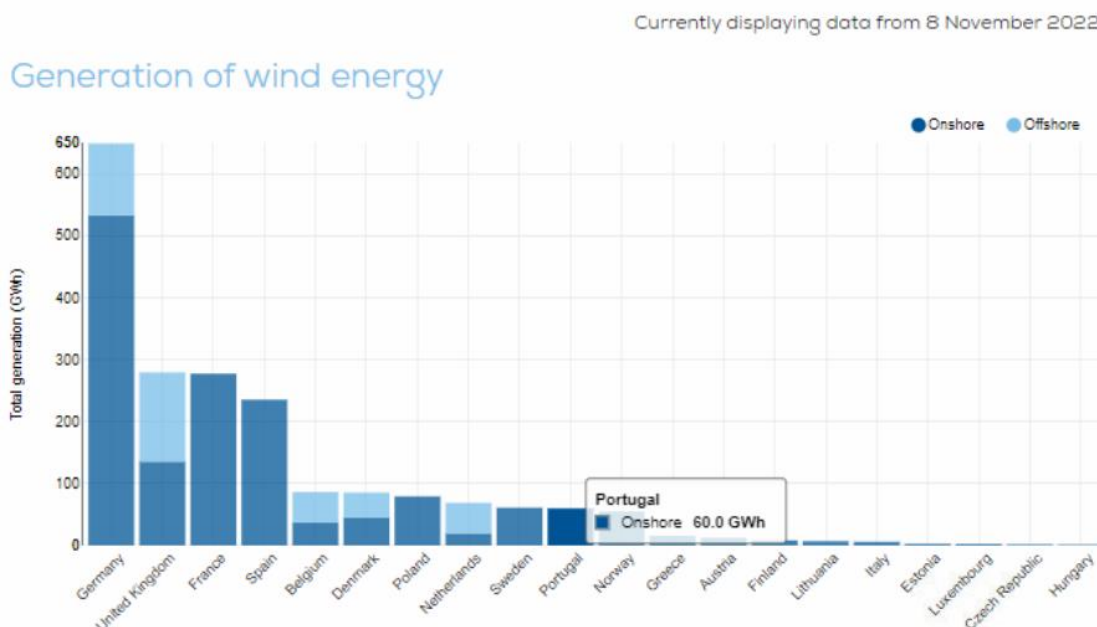


Figura 23 – Gráfico Europeu de produção diária, 8 de novembro de 2022.[29]

A figura 24 ilustra o balanço diário, dia 8 de novembro de 2022 em Portugal, de modo reduzido de todas as grandezas elétricas importantes. Neste referido dia, Portugal não conseguiu produzir a sua energia consumida sendo necessário importar 12 GWh.



Figura 24 – Balanço nacional de consumo diário em Portugal, 8 de novembro de 2022.[30]

No final de 2021 devido à existência de 2804 aerogeradores ligados, Portugal atingiu uma produção de 5642,1 MW, que poderá aumentar para 5717,9 MW aquando da instalação de mais 21 aerogeradores ligados à rede, figura 25.

CENTRAIS EÓLICAS EM PORTUGAL <i>WIND FARMS IN PORTUGAL</i>	Ligados à rede <i>Grid connected</i>		Em construção <i>Under construction</i>		TOTAL <i>Total</i>	
	MW	Aerog. WECS	MW	Aerog. WECS	MW	Aerog. WECS
CONTINENTE <i>MAINLAND</i>	5516,2	2682	75,8	21	5592,0	2703
MADEIRA <i>MADEIRA</i>	64,2	64	0,0	0	64,2	64
AÇORES <i>AZORES</i>	36,7	55	0,0	0	36,7	55
OFFSHORE <i>OFFSHORE</i>	25,0	3	0,0	0	25,0	3
TOTAL <i>TOTAL</i>	5642,1	2804	75,8	21	5717,9	2825

Figura 25 – Potência elétrica e número de aerogeradores instalados no final de 2021.[26]

O maior número de aerogeradores utilizados em Portugal é síncrono de ímanes permanentes, uma vez que o fabricante Enercon é líder do mercado português e a Vestas também utiliza este tipo de tecnologia. Os três maiores parques eólicos situam-se no norte de Portugal.

O maior parque eólico está localizado no distrito de Viana do Castelo, Parque eólico Alto Minho I, com 130 aerogeradores instalados e uma potência instalada de 263,5 MW. Os 130 aerogeradores instalados são da Enercon, 59 aerogeradores E70 E4 com potência de 2000 kW, 61 aerogeradores E82 com potência de 2000 kW e 10 aerogeradores E92 com potência de 2350 kW.

O segundo maior parque eólico está localizado no distrito de Viseu, Parque eólico Alto Douro, com 111 aerogeradores instalados e uma potência instalada de 253,2 MW. Os 111 aerogeradores instalados são da Enercon, 7 aerogeradores E82 com potência de 2000 kW, 99 aerogeradores E82 com potência de 2000 kW e 5 aerogeradores E92 com potência de 2000 kW.

Em terceiro, fica o parque eólico que está situado no distrito de Vila Real, Parque eólico Alto Da Coutada, com 72 aerogeradores e uma potência instalada de 165,6 MW. Os 72 aerogeradores instalados são da Enercon, modelo E82, com potência de 2300 kW.

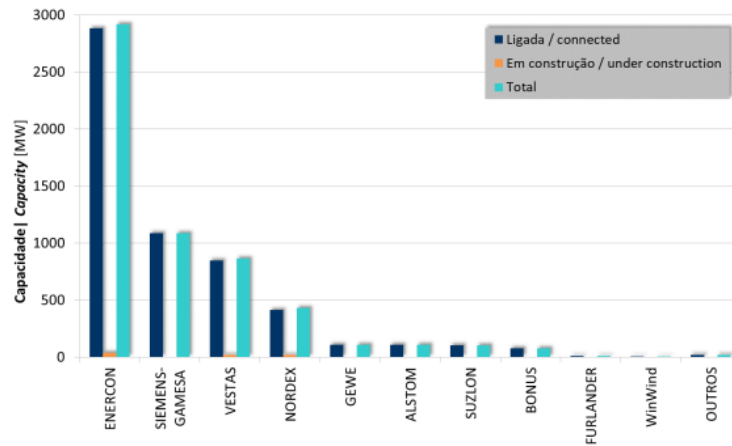


Figura 26 – Potência instalada por fabricante no final de 2021.[26]

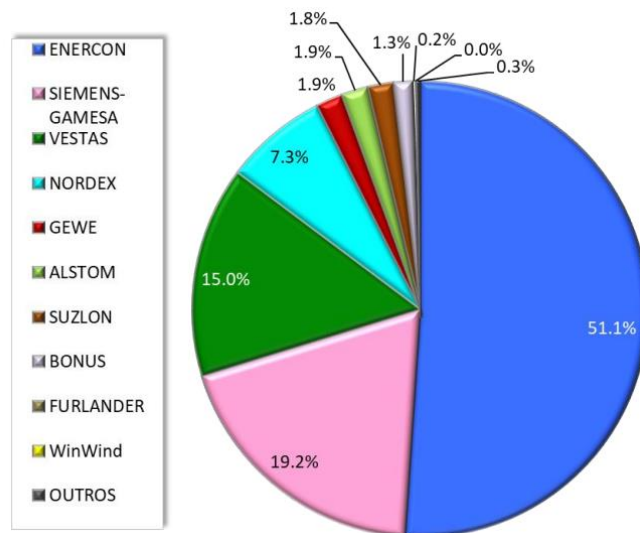


Figura 27 – Potência instalada por fabricante no final de 2021.[26]

Na figura 28, é possível verificar as novas instalações e o acumulado da energia eólica produzida no mundo inteiro. A China tornou-se no maior produtor de energia eólica *offshore*, bem como o maior em geral. Ultrapassou o Reino Unido, que anteriormente era o líder mundial, com uma enorme expansão de capacidade em 2021. A capacidade global de energia eólica está em cerca de 743 GW.[27]

Em 2021, a geração de eletricidade eólica aumentou um recorde de 273 TWh (aumento de 17%). Este foi um crescimento 55% maior do que o alcançado em 2020 e foi o mais alto entre todas as tecnologias de energia renovável. A energia eólica continua a ser a principal

tecnologia renovável não hídrica, gerando 1870 TWh em 2021, quase tanto quanto todas as outras combinadas.[32]



Figura 28 – Novas e total de instalações por países no mundo no final de 2021.[31]

O maior parque eólico do mundo é o Parque Eólico *Gansu*, na China com 7000 turbinas e uma capacidade de 10 GW. A maioria das turbinas instaladas neste parque são do construtor Sinovel Wind Group com o modelo SL1500/82.[33]

O maior parque eólico *offshore* do mundo é *Hornsea*, no Mar do Norte, na costa da Inglaterra. O parque eólico é composto por 174 aerogeradores do construtor Siemens Gamesa com o modelo SWT-7.0-154 de 7 MW e uma capacidade instalada de 1,2 GW.[34]

O maior parque eólico dos EUA é o *Alta Wind Energy Center (AWEC)* perto de Mojave, na Califórnia e também é o terceiro maior do mundo, com 600 turbinas Vestas V90 3 MW e capacidade de 1,54 GW.[35]



Figura 29 – Parque eólico Changma, cidade de Yumen, província de Gansu, noroeste da China.[31]

O primeiro parque eólico flutuante do mundo denominado por *Hywind Scotland*, foi instalado no Mar do Norte, a cerca de 24 quilómetros da costa de Petershead, Escócia. O parque eólico consiste em cinco aerogeradores Siemens Gamesa de 6 MW com cerca de 253 metros de altura, 78 dos quais estão submersos. O primeiro protótipo foi construído em 2009 e o parque começou a produzir na sua totalidade em outubro de 2017. A instalação destas cinco turbinas custou cerca de cerca de 226,17 milhões de euros.[36][37]

O maior parque eólico flutuante do mundo, *Hywind Tampen*, fica situado no Mar do Norte norueguês. Este parque eólico está equipado com 11 turbinas Siemens Gamesa, modelo SG 8.0-167 DD de 8 MW, ficando com uma capacidade instalada de 88 MW. A produção de energia da primeira turbina começou no dia 13 de novembro de 2022. O valor estimado para esta obra será de 507,49 milhões de Euros.[38][39]



Figura 30 - Parque eólico flutuante Hywind Tampen, Mar do Norte.[38]

O primeiro parque eólico flutuante em Portugal denominado de *WindFloat Atlantic*, foi instalado a 20 km da costa de Viana do Castelo. Inicialmente com uma turbina da marca Vestas, modelo V80 2 MW, esteve em testes no período de 2011 a 2016. Posteriormente foram instalados três aerogeradores da marca Vestas, modelo V164 8,4 MW, com uma potência instalada de 25 MW, distanciados entre si de cerca de 600 metros. A primeira das três plataformas foi ligada com sucesso em dezembro de 2019, ficando finalizado totalmente em maio de 2020. Este parque produz a energia necessária para dois terços da população do concelho de Viana do Castelo. Este projeto ainda é o que tem a turbina de maior potência elétrica em todo mundo. O valor deste projeto custou cerca de 100 milhões de Euros.[40][41]

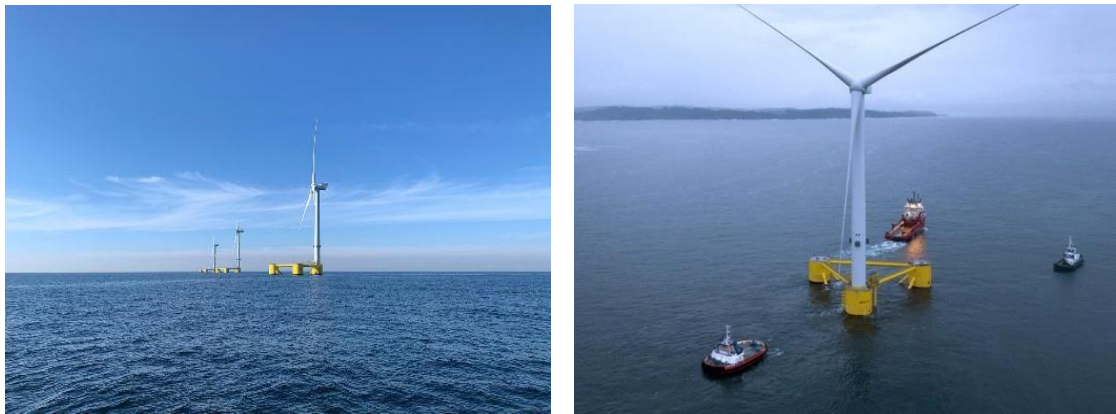


Figura 31 e Figura 32 – Parque eólico flutuante *WindFloat Atlantic*, 3 aerogeradores Vestas V164 8,4 MW, Viana do Castelo.[42][40]

2.6. CONCLUSÃO

Neste capítulo foi analisado o problema da qualidade da energia elétrica, particularmente no que diz respeito à qualidade da energia produzida pelos aerogeradores nos parques eólicos, de que forma pode ser medida e como se pode melhorar essa mesma qualidade. Foram ainda mencionadas as normas que regulam alguns dos problemas que colocam em causa a qualidade de energia.

Abordou-se também o processo da produção da energia eólica, bem como a forma de regular a sua potência. Enumerou-se as vantagens e desvantagens deste tipo de energia, assim como os diversos tipos de máquinas utilizados em Portugal para a produção da mesma. De entre elas analisaram-se: gerador de indução com rotor em gaiola, gerador de

indução duplamente alimentado e, por fim, o gerador síncrono de rotor bobinado e de ímanes permanentes.

Por último, apresentou-se a capacidade de produção instalada nos principais produtores europeus, mundiais e em particular em Portugal bem como os três maiores parques eólicos em todo mundo e a situação atual relativamente aos parques eólicos flutuantes.

3. SIMULAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO COM AEROGERADORES ASSÍNCRONOS

3.1. AEROGERADORES ASSÍNCRONOS LIGADOS DIRETAMENTE À REDE

3.1.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo contempla uma simulação em MatLab/Simulink de um parque eólico, composto por quatro aerogeradores do tipo assíncrono ligados diretamente à rede. O principal objetivo deste ponto é verificar o comportamento deste tipo de máquina perante situações anómalas que vão ser simuladas no programa utilizado. Inicialmente, analisar-se-á o consumo de energia reativa do parque. Seguidamente, um curto-circuito trifásico à terra fora do parque e, por fim, uma rajada de vento num dos aerogeradores.

Para explicitar estas ocorrências vão ser criados blocos que irão ser colocados em pontos estratégicos para medição da potência reativa e ativa, bem como a tensão naquele ponto da rede.

Para a correção do fator de potência do parque eólico impõe-se a criação de uma bateria de condensadores automática.

3.1.2. DESCRIÇÃO DO PARQUE EÓLICO

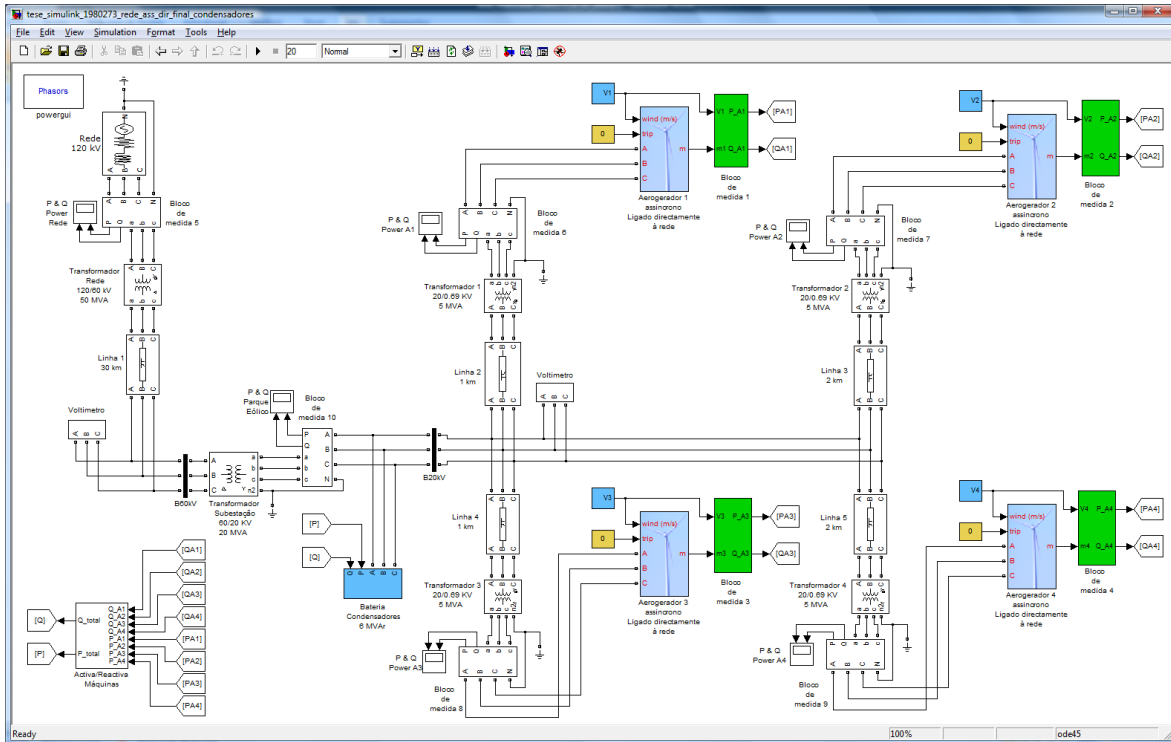


Figura 33 - Esquema parque eólico com aerogeradores assíncronos ligados diretamente à rede.

O esquema da figura 33 divide-se em três partes: rede de alimentação à subestação, subestação e o parque eólico simulado.

A primeira parte é constituída por uma rede de 120 kV, com uma potência de curto-circuito de 100 MVA que vai interligar-se a um transformador abaixador cuja função é transformar o nível de tensão de 120 para 60 kV. À entrada do transformador tem uma unidade de medida designada por “bloco de medição 5”, que possui uma função será explicada mais adiante. Esta rede, até chegar à subestação, tem um comprimento de 30 km.

A segunda parte elenca uma subestação constituída por um barramento de chegada das linhas designado por “B60kV” que vai ligar a um transformador abaixador, que tem como função transformar o nível de tensão de 60 para 20 kV. Associado a este barramento há um voltímetro para se poder medir o nível de tensão à chegada da subestação. Existe também um barramento designado por “B20kV” que é a saída da subestação para o parque eólico.

Anexado a este barramento tem ainda uma unidade de medida designada por “bloco de medição 10” e, por fim, uma bateria de condensadores para corrigir o fator de potência do parque eólico.

A terceira parte é composta pelo parque eólico, constituído por 4 aerogeradores do tipo assíncrono ligado diretamente à rede. Perto de cada aerogerador existe uma cabina, onde se encontra um transformador abaixador que tem como função transformar o nível de tensão de 20 para 0,69 kV que é a tensão gerada pelo aerogerador. Contém também unidades de medida designadas por “blocos de medição (1, 2, 3 e 4)” que facultam diversas leituras do estado da máquina em cada instante, conforme ilustrado na figura 34. O aerogerador tem uma potência de 1500 kW, $\cos \phi$ igual a 0,9 e uma frequência de 50 Hz.

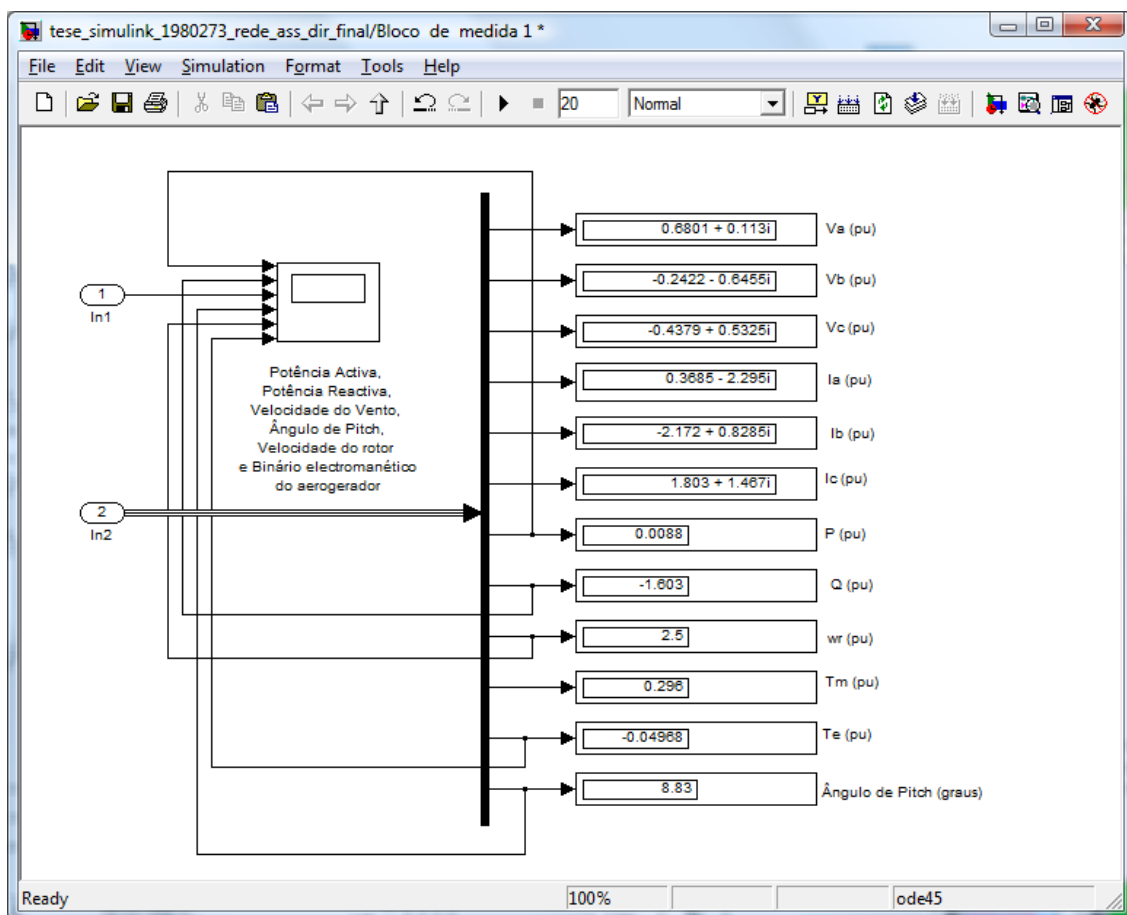


Figura 34 - Bloco de medição 1, 2, 3 e 4 do aerogerador.

De modo a reproduzir de forma semelhante a geração de energia, foi introduzido um bloco de vento que opera em função da velocidade do vento em metro por segundo (m/s) e do tempo em segundos (s).

É importante destacar os blocos de medição 5, 6, 7, 8, 9 e 10 cujo esquema está representado na figura 35 que visam calcular a potência aparente, ativa e reativa, bem como algumas análises gráficas, nomeadamente a análise da tensão naquele ponto específico da rede.

Para a ocorrência de um curto-circuito trifásico à terra utilizou-se um bloco com uma impedância de 30 ohm.

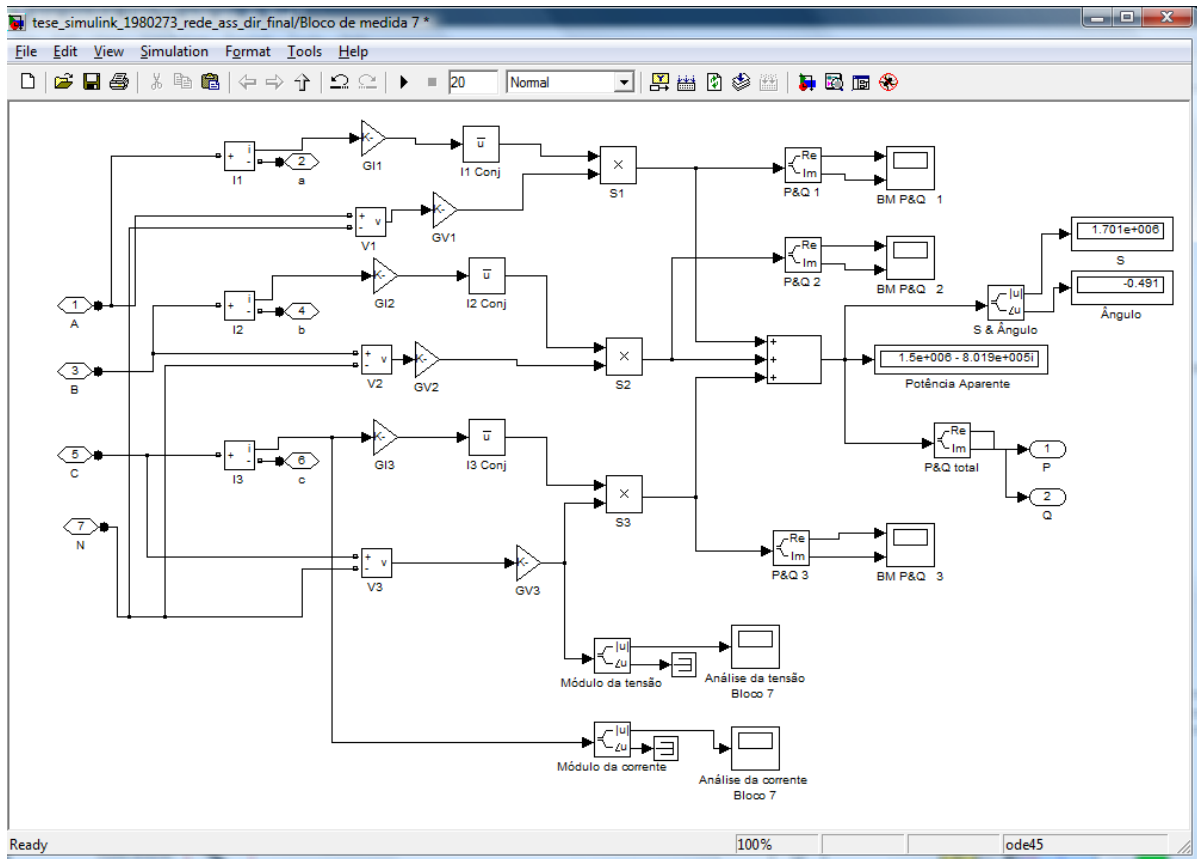


Figura 35 – Bloco 5, 6, 7, 8, 9 e 10 para cálculo de potência.

3.1.3. EXCESSO DE CONSUMO DE POTÊNCIA REATIVA

Como já foi referido, as máquinas aerogeradoras são assíncronas, logo consomem energia reativa. Para retificar esta situação, foi elaborada uma bateria de condensadores totalmente automática de modo a corrigir a potência reativa lida na rede do parque eólico conforme ilustrado na figura 36.

Partindo deste pressuposto, foi calculada para as quatro máquinas uma bateria de condensadores automática de 6 MVar, constituída por 6 módulos de 1 MVar cada.

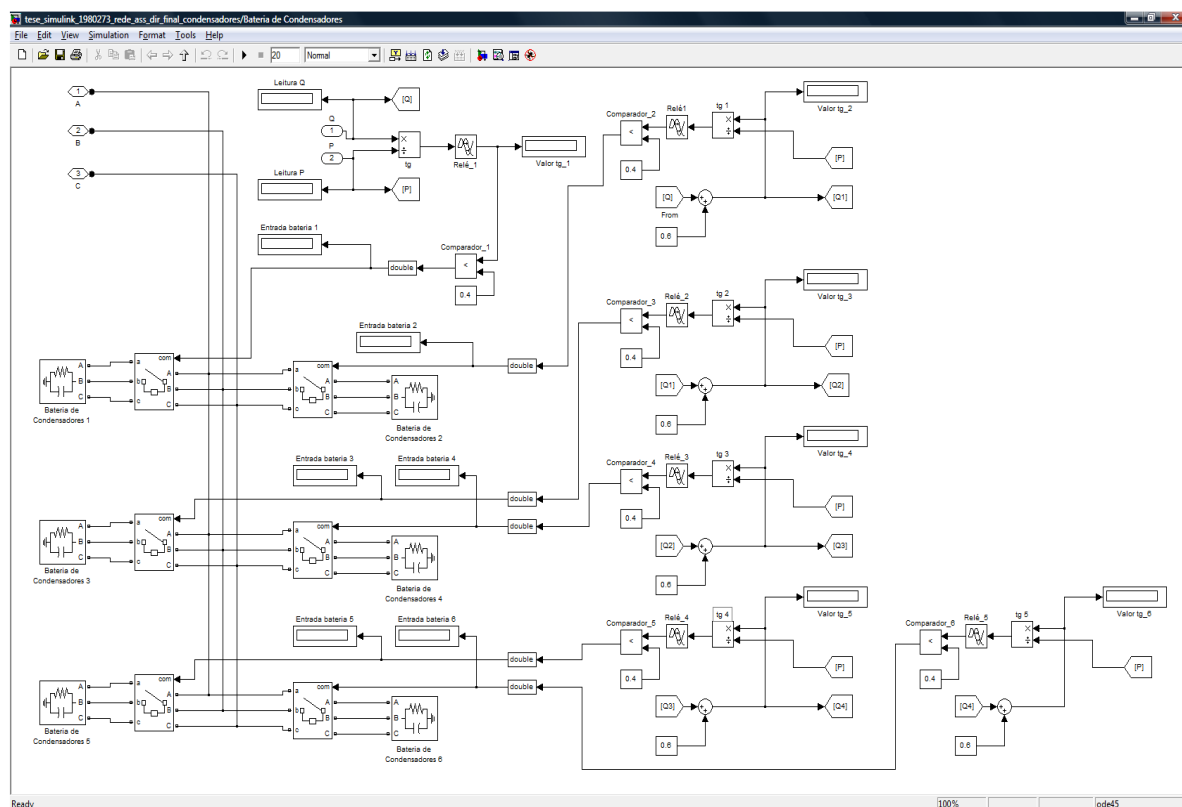


Figura 36 – Bateria de condensadores automática de 6 MVar.

3.1.3.1. CÁLCULO DA BATERIA DE CONDENSADORES

A figura 36 mostra a análise gráfica do equipamento “P & Q Parque Eólico”, onde se pode observar que o consumo de energia reativa total do parque é de cerca de 3 MVar para a produção de 6 MW de potência ativa.

O decreto-lei 168/99 estipula que as instalações de produção independente devem, nos períodos fora de vazio, fazer acompanhar o fornecimento de energia ativa de uma quantidade de energia reativa correspondente, no mínimo, a 40 % da energia ativa fornecida ($\text{tg } \varphi \geq 0,4 \text{ cap}$).

Após esta análise, é construída uma bateria de condensadores respeitando o valor da $\text{tg } \varphi$, apresentado anteriormente na figura 36. Esta bateria é totalmente automática, os módulos entram automaticamente em função da energia reativa lida no sistema da bateria.

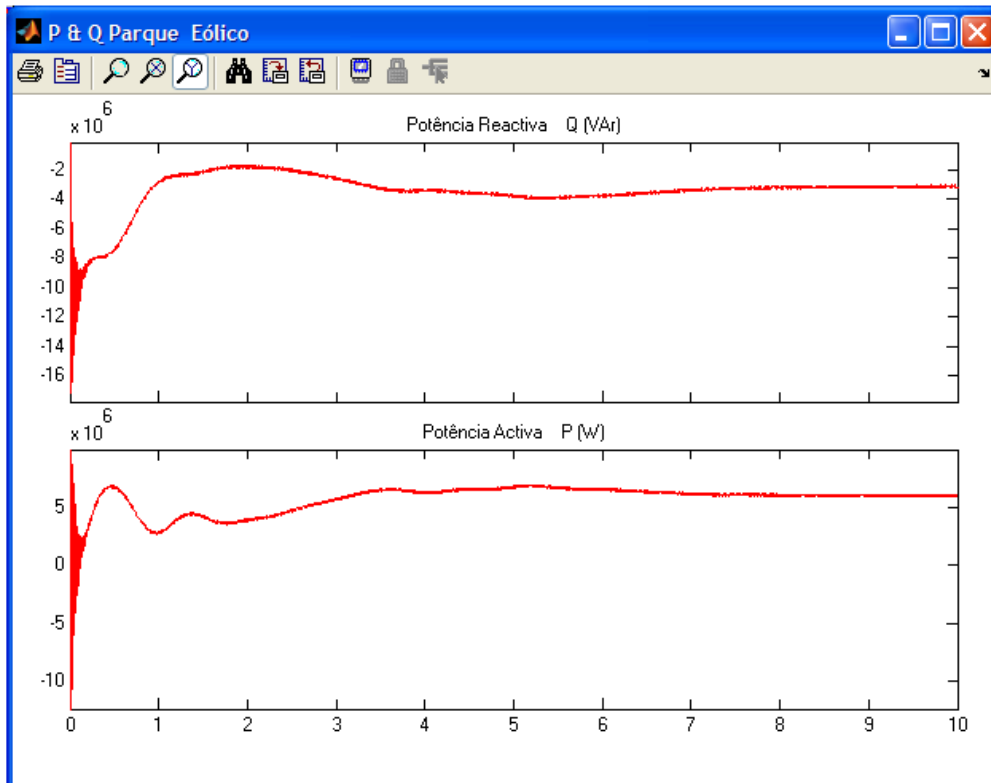


Figura 37 – Análise gráfica das potências ativa e reativa à entrada do parque.

Posteriormente calcula-se uma bateria de condensadores da seguinte forma:

A Potência reativa consumida pelo parque eólico é de 3 MVar, este é o valor de Q_1 para ser usado na expressão que se segue adiante. Este é o valor para que as máquinas do parque deixem de consumir energia reativa da rede, mas a verdade é que no período fora das horas de vazio as máquinas têm que produzir energia reativa até atingir a $\text{tg } \varphi$ igual a um valor de 0,4.

A seguinte expressão vai-nos calcular o valor de Q_2 :

$$Q_2 = P * \text{tg } \varphi \quad (19)$$

P é a potência ativa produzida por cada máquina, que neste caso é de 1,5 MW, logo nas quatro máquinas temos 6 MW. Utilizando a expressão, calcula-se:

$$Q_2 = 6000 * 0,4 = 2,4 \text{ MVar}$$

Sendo já conhecidos os valores de Q_1 e Q_2 , pode-se calcular o valor da bateria para o parque eólico, que é denominado por Q_{total} :

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 = 3 + 2,4 = 5,4 \text{ MVar} \approx 6 \text{ MVar} \quad (20)$$

O valor de Q_{total} é o valor da nossa bateria de condensadores, apresentada anteriormente na figura 36. Esta bateria é totalmente automática, os módulos entram automaticamente em função da energia reativa lida no sistema da bateria.

Na figura 38 é demonstrado graficamente a correção da bateria no sistema.

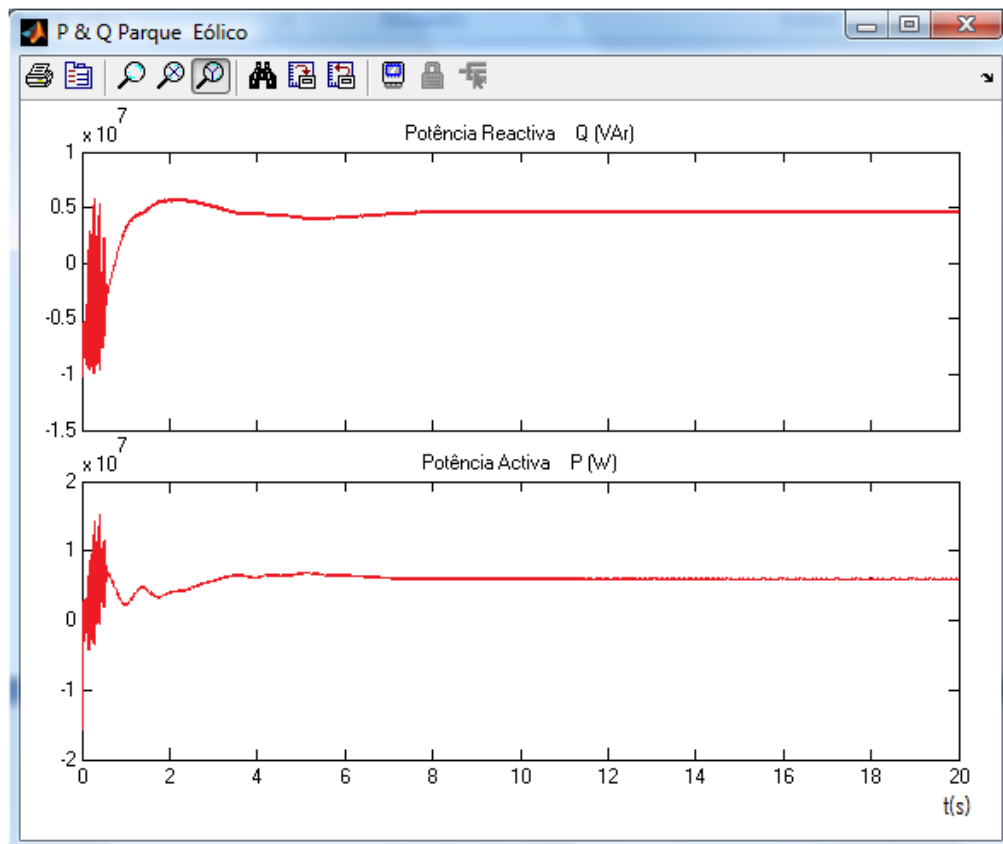


Figura 38 – Análise gráfica da correção do fator de potência.

3.1.4. CAVA DE TENSÃO

Na simulação é apresentada a capacidade que o aerogerador assíncrono ligado diretamente à rede tem em recuperar a tensão aos seus terminais depois de uma perturbação na rede.

Para a análise de uma cava de tensão, foi provocado um curto-circuito trifásico no barramento “B60kV” com uma duração de 100 ms, representado na figura 39.

A tensão simples medida no bloco de medição 7 existente logo à saída do aerogerador 2, permite observar que a tensão simples ronda os 370 V. Aos 11 segundos dá-se um curto-circuito trifásico à terra mesmo à saída do parque onde a tensão cai abruptamente, chegando mesmo a atingir um valor cerca de 110 V. Após 100 ms a falha deixa de existir e verifica-se que o aerogerador recupera a sua tensão em cerca de 3 segundos depois do início da falha.

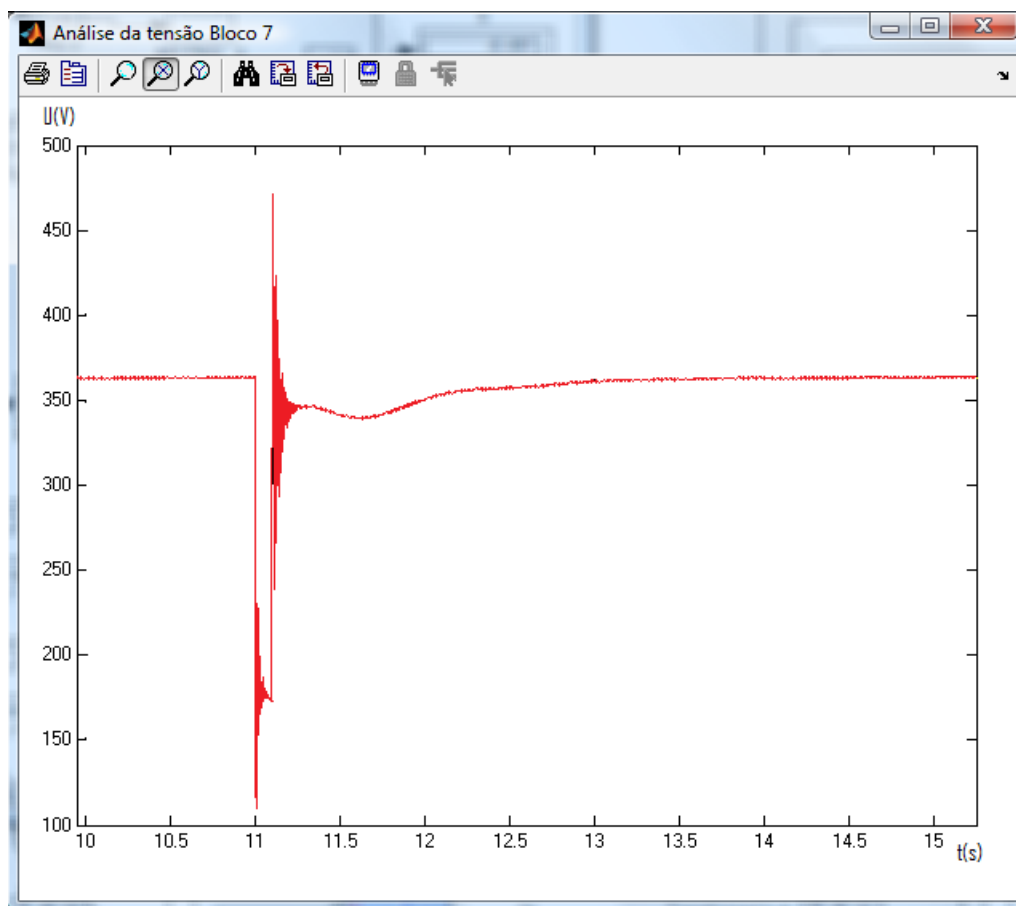


Figura 39 – Análise da tensão simples após um curto-circuito durante um período de 100 ms.

É importante fazer a análise das correntes com a ocorrência de um curto-circuito. A figura 40 demonstra o pico elevadíssimo da corrente, cerca de três vezes mais, conforme o esperado. Depois da eliminação do defeito, a corrente não volta imediatamente aos valores iniciais, demorando cerca de três segundos. Este fenômeno pode ser explicado pela absorção de elevados valores de potência reativa depois do curto-circuito, possibilitando a recuperação do fluxo magnético, que sofre redução significativa com a queda de tensão nos terminais do aerogerador.

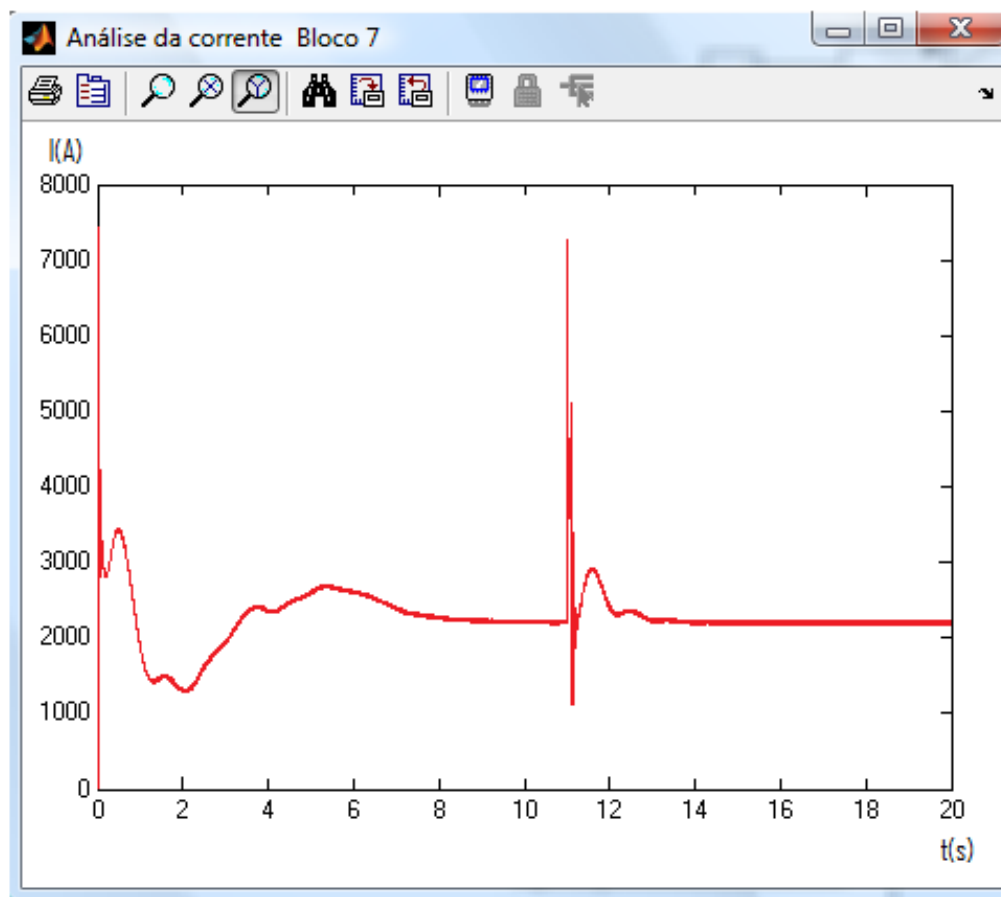


Figura 40 – Análise da corrente após um curto-circuito durante um período de 100 ms.

Pode-se ainda fazer uma análise em relação à velocidade do rotor e ao binário elétrico com o surgimento desta falha na rede. Analisando graficamente a figura 41, conclui-se que durante a queda da tensão a máquina reduz a velocidade do rotor e o binário elétrico sofre também uma redução, que pode ser explicado pela diminuição do fluxo magnético. A velocidade do aerogerador aumenta e acaba por encontrar o seu ponto de equilíbrio cerca de três segundos depois, como se tem verificado nos exemplos anteriores. Relativamente

ao ângulo de *Pitch* ele reduz após a ocorrência do curto-circuito, corrigindo o seu valor com a extinção do mesmo.

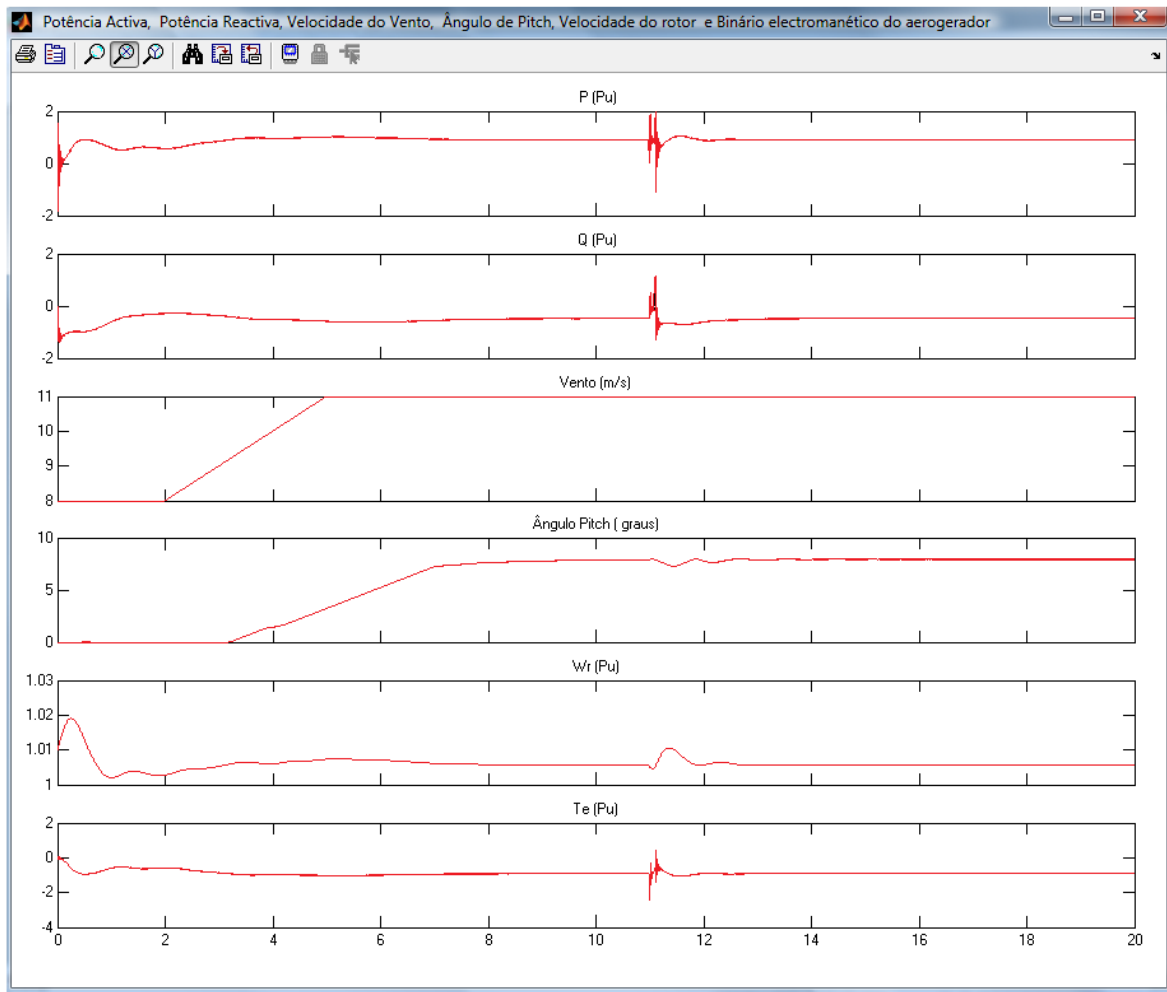


Figura 41 – Análise das medidas tiradas do bloco de medição 2 para uma falha de 100 ms.

3.1.5. RAJADA DE VENTO NA TURBINA A1

Este capítulo contempla o estudo do comportamento do aerogerador 1 perante uma rajada de vento de 50 m/s. Foi usado um bloco para a simulação deste efeito durante um período de 20 segundos, como demonstra a figura 42.

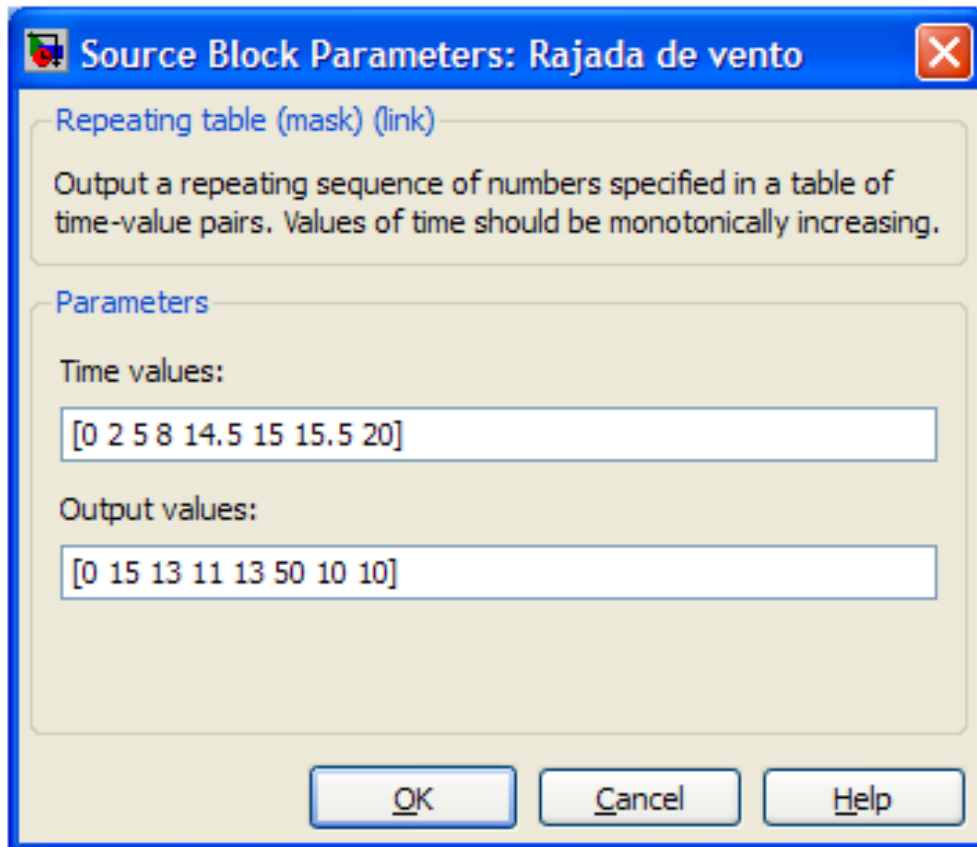


Figura 42 - Bloco para a simulação de rajada de vento.

Pode observar-se no bloco que aos 14,5 segundos dá-se início a uma rajada de vento durante um período de meio segundo. Meio segundo depois, o vento tem uma velocidade de 12 m/s e acaba o ensaio com 10 m/s. Pretende-se com este ensaio analisar o comportamento do aerogerador 1. Com a ajuda do gráfico da figura 43, observa-se que há um aumento repentino da velocidade do vento, por conseguinte, a velocidade do rotor aumenta também. O controlo das pás, através do ângulo de *Pitch*, é lento e traduz-se num aumento quer da produção de potência ativa, quer do consumo de potência reativa por parte do aerogerador.

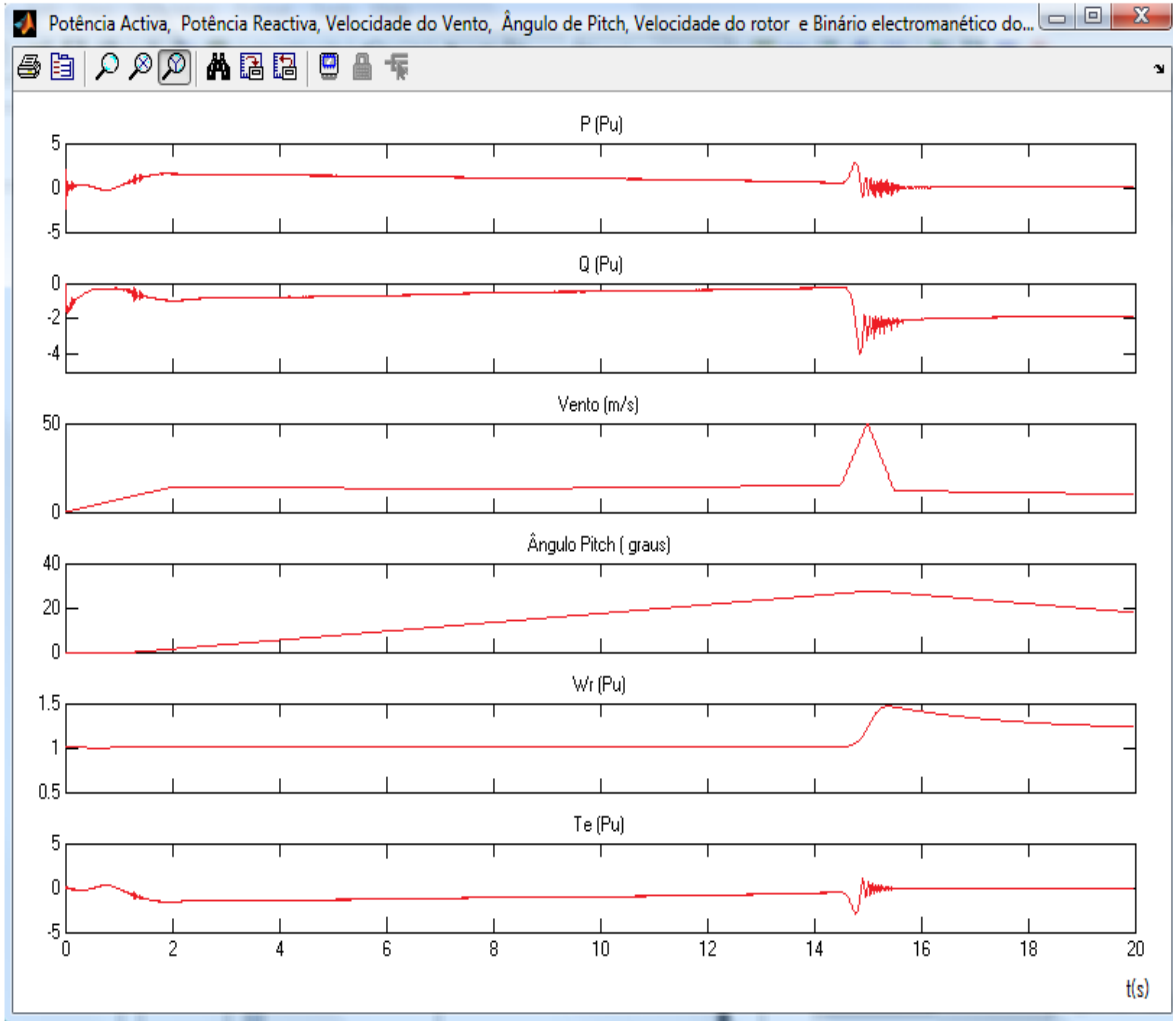


Figura 43 - Análise gráfica do aerogerador 1 após uma rajada de vento de 50 m/s.

É possível ainda visualizar o gráfico da figura 45, onde se verifica a corrente elevadíssima, chegando a atingir cerca de quatro vezes a corrente nominal. Estes valores de corrente provocam a saída do aerogerador de serviço. Pode ser observado na figura 43 que, após o defeito, a máquina deixa de produzir potência ativa.

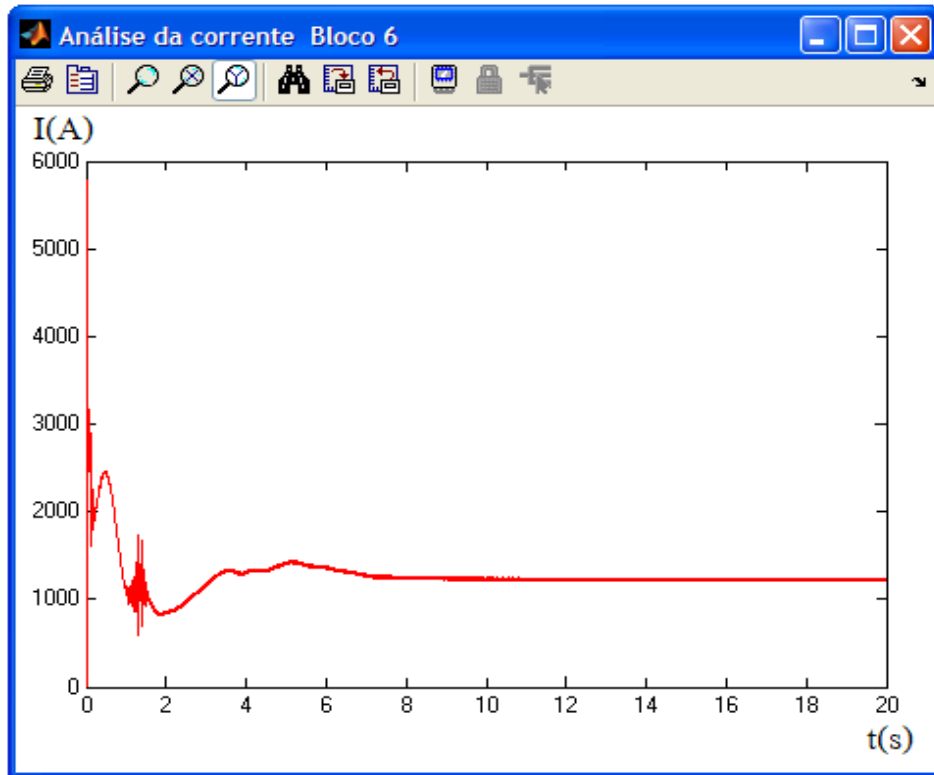


Figura 44 – Gráfico do valor da corrente nominal do aerogerador.

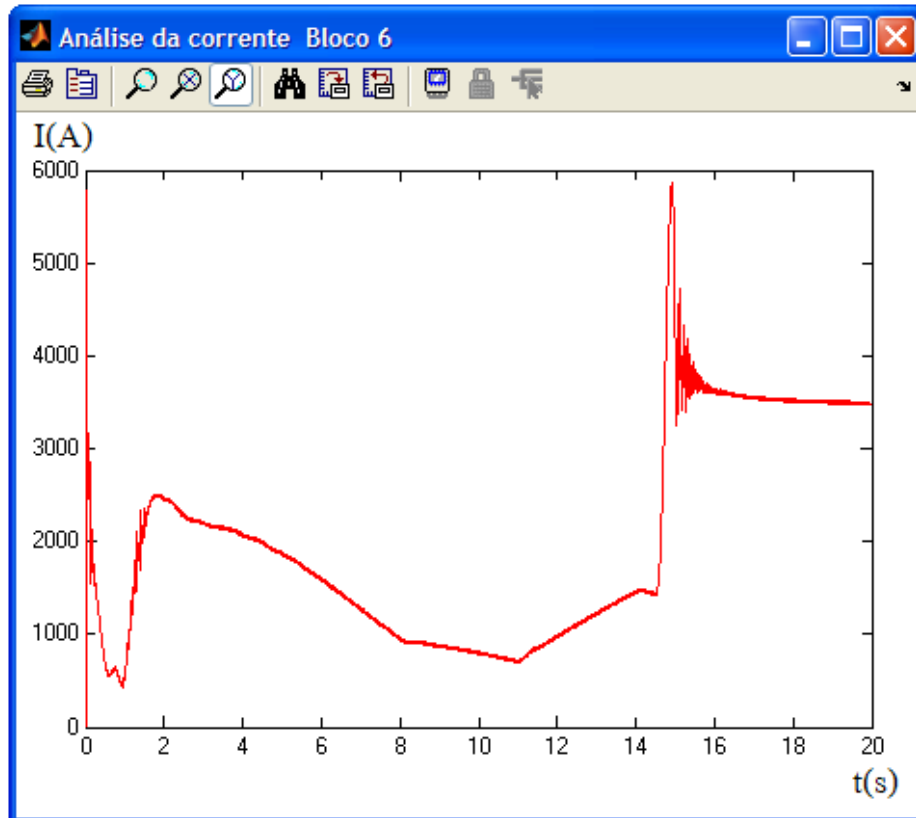


Figura 45 – Gráfico do valor da corrente após uma rajada de vento com velocidade de 50 m/s.

3.2. AEROGERADORES ASSÍNCRONOS DUPLAMENTE ALIMENTADOS

3.2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo, assim como o anterior, contempla uma simulação em MatLab/Simulink de um parque eólico constituído por quatro aerogeradores do tipo assíncrono duplamente alimentados ligados à rede. O objetivo é fazer os mesmos ensaios para que no capítulo seguinte sejam comparados os resultados obtidos nos diferentes tipos de máquinas. Do mesmo modo, vai-se iniciar o processo com a análise do consumo de energia reativa do parque eólico. Posteriormente, o processo de um curto-circuito trifásico à terra e por fim a análise de uma rajada de vento no aerogerador 1. De apoio à análise surgem os blocos criados e apresentados anteriormente.

3.2.2. DESCRIÇÃO DO PARQUE EÓLICO

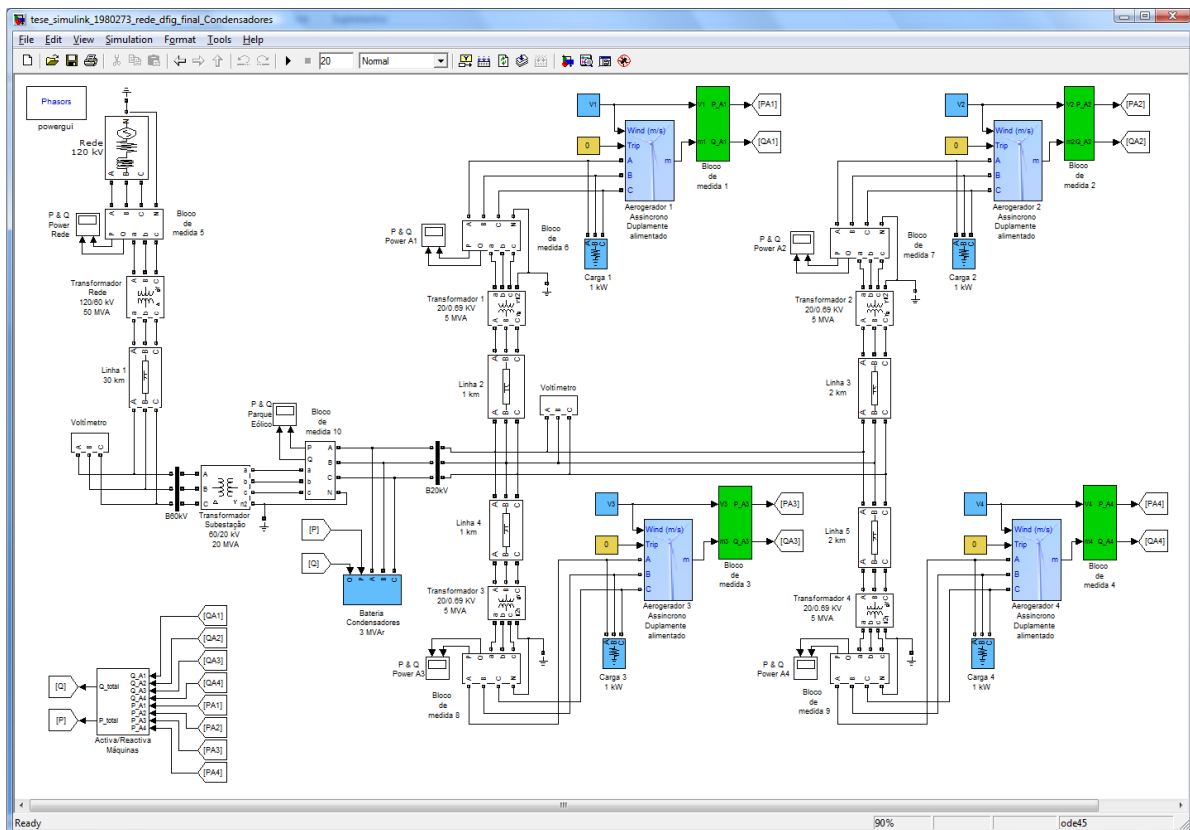


Figura 46 – Esquema parque eólico com aerogeradores duplamente alimentados ligados à rede.

O esquema da figura 46 divide-se em três partes, apresentadas da mesma forma no capítulo 3.2. A única diferença é que o parque eólico é constituído por aerogeradores do tipo

assíncrono duplamente alimentados. A tensão gerada é de 690 V com uma potência por máquina de 1500 kW. Associado a cada uma das máquinas implementaram-se blocos de medição (1, 2, 3 e 4) que facultam diversas leituras do estado da máquina em cada instante, conforme ilustrado na figura 47.

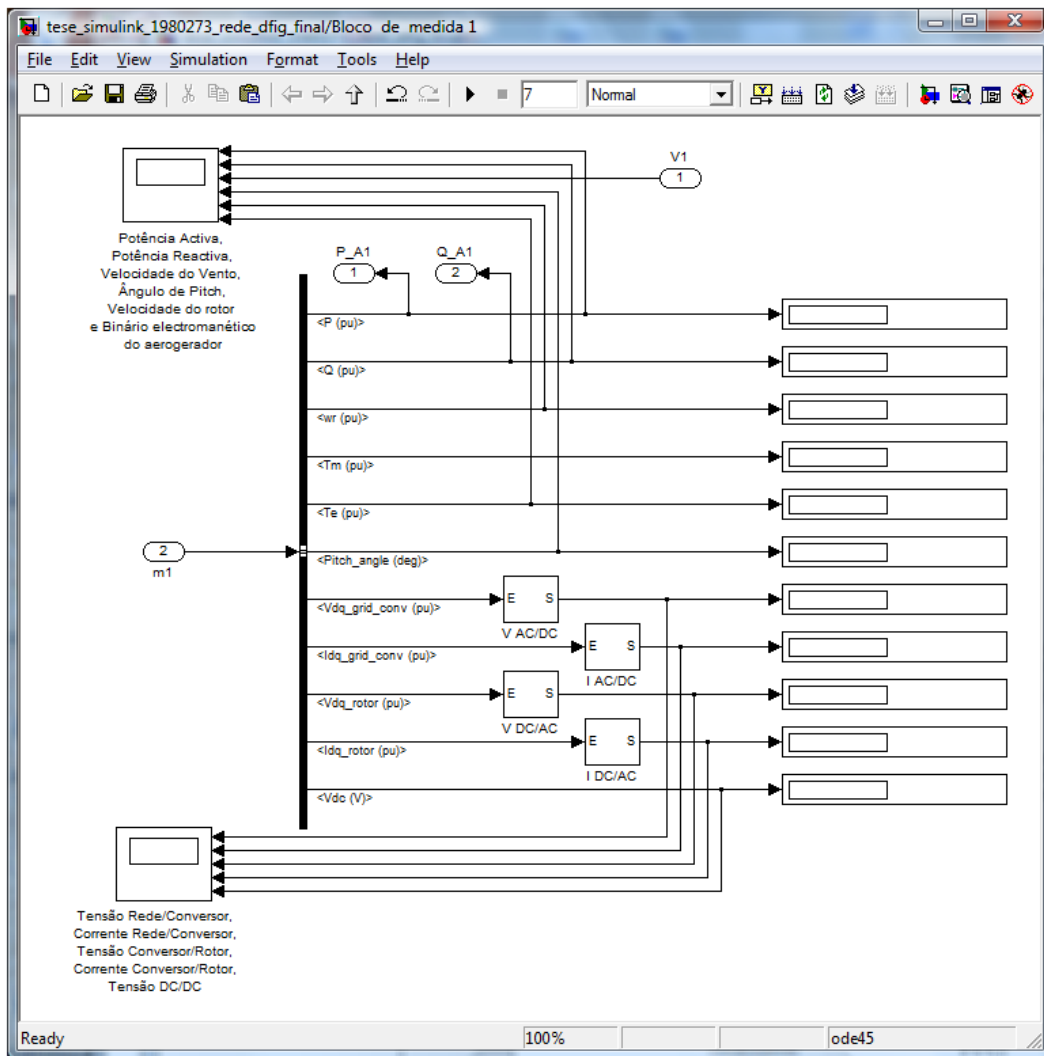


Figura 47 - Bloco de medição 1, 2, 3 e 4 do aerogerador.

A grande diferença entre este bloco e o da figura 34 é que temos as leituras das grandezas referentes ao rotor e ao conversor AC/DC/AC. Este bloco demonstra os valores das tensões e correntes antes e depois do conversor e o valor da tensão da componente DC do conversor. Foi ainda acrescentado a este bloco mais um osciloscópio para podermos analisar graficamente as grandezas referentes ao conversor. Os blocos de medição 5, 6, 7, 8, 9 e 10 foram mantidos para as mesmas análises já referidas anteriormente.

O bloco utilizado para o curto-circuito trifásico à terra é o mesmo do capítulo anterior.

3.2.3. EXCESSO DE CONSUMO DE POTÊNCIA REATIVA

No capítulo anterior verificou-se que as máquinas consumiam energia reativa. As máquinas duplamente alimentadas também consomem energia reativa, mas em menor escala. Este tipo de aerogeradores utiliza um conversor de frequência conectado entre o circuito do rotor e a rede, estando o estator conectado diretamente à rede. O facto de esta máquina consumir menos energia reativa deve-se à capacidade do conversor conseguir controlar o deslizamento da máquina.

Apesar do consumo de energia reativa ser bastante menor que a máquina do capítulo anterior, é necessário corrigir o fator de potência. Para isso, foi elaborada uma bateria de condensadores similar à anterior, mas com menos capacitância, ilustrada na figura 48, de modo a corrigir o fator de potência do parque eólico.

Partindo deste pressuposto, foi calculada para as quatro máquinas uma bateria de condensadores automática de 3 MVar, constituída por 6 módulos de 500 kVar cada.

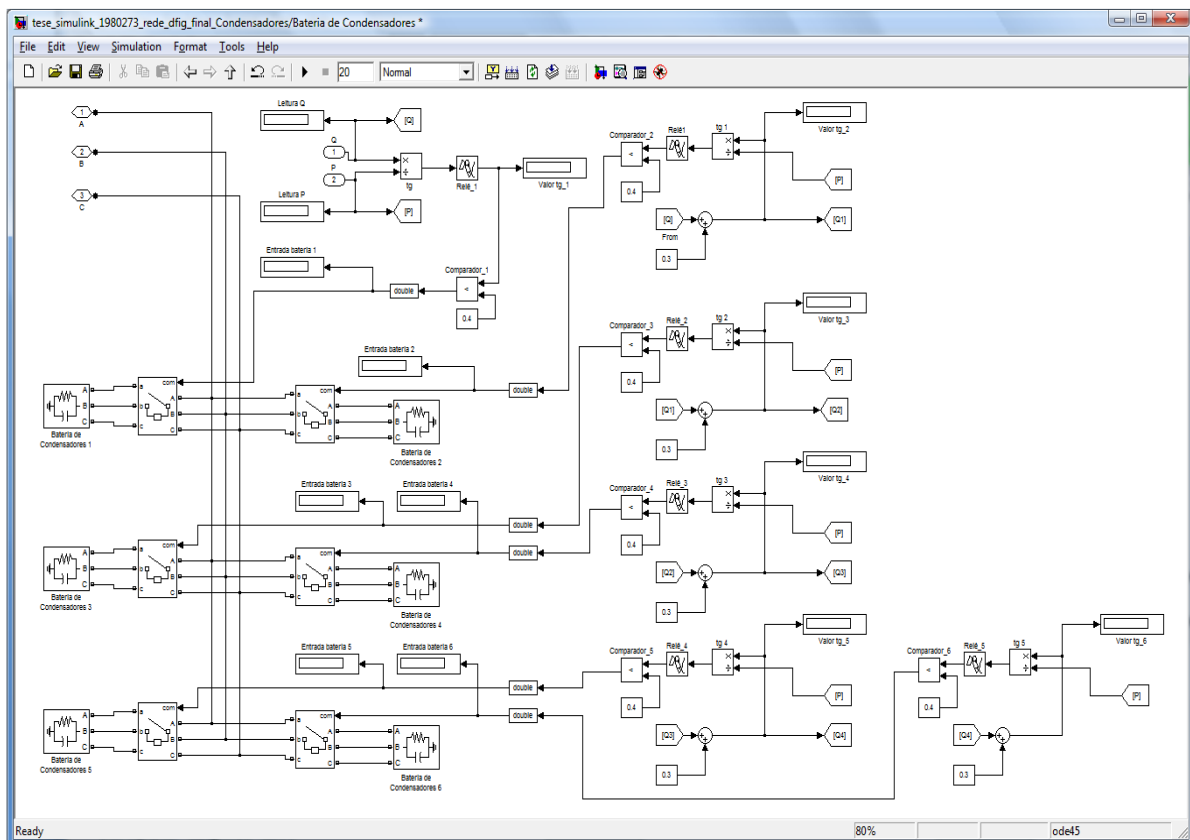


Figura 48 – Bateria de condensadores automática.

Como foi referido no capítulo 3.1.3, tem que se cumprir o decreto-lei 168/99, que estipula que as instalações de produção independente devem, nos períodos fora de vazio, fazer acompanhar o fornecimento de energia ativa de uma quantidade de energia reativa correspondente, no mínimo, a 40 % da energia ativa fornecida ($\text{tg } \varphi \geq 0,4 \text{ cap}$).

Após esta análise, é construída uma bateria de condensadores respeitando o valor da $\text{tg } \varphi$, apresentado anteriormente na figura 48. Esta bateria é totalmente automática, os módulos entram em função da energia reativa lida no sistema da bateria.

3.2.3.1. CÁLCULO DA BATERIA DE CONDENSADORES

A figura 49 mostra a análise gráfica do equipamento “P & Q Parque Eólico”. Pode observar-se que o consumo de energia reativa total do parque é de cerca de 0,38 MVar.

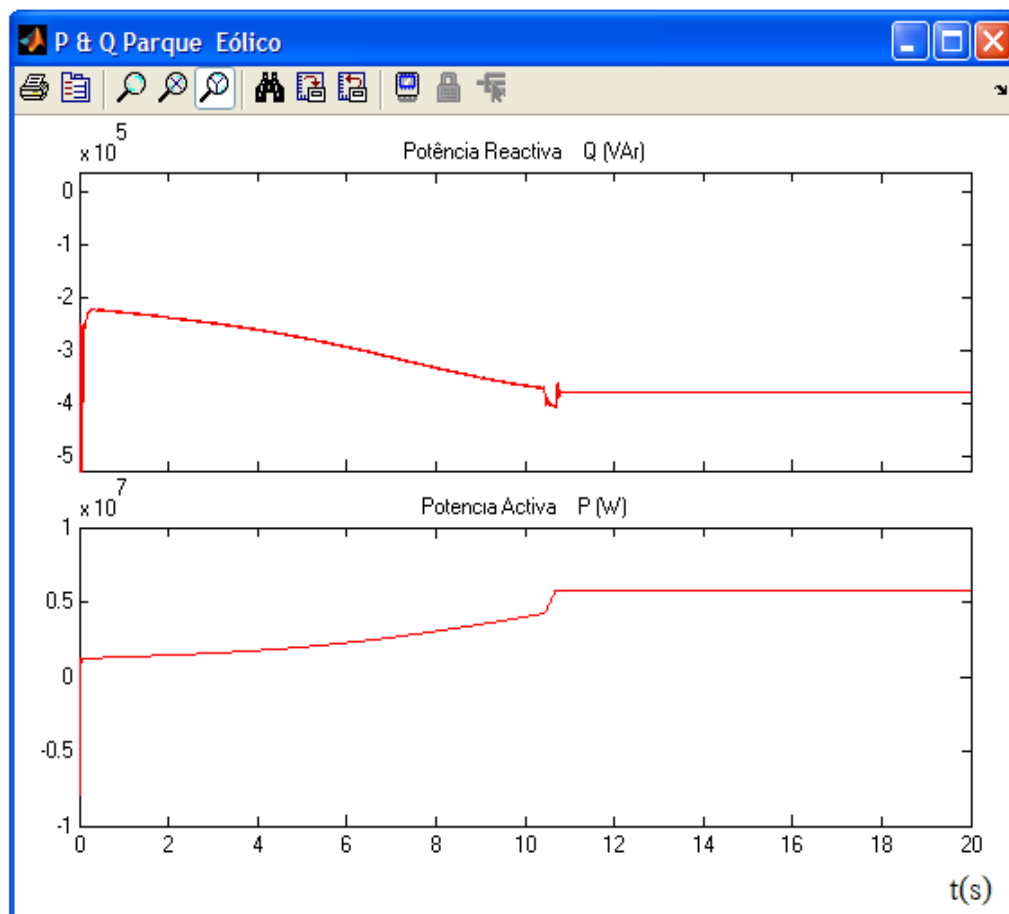


Figura 49 – Análise gráfica das potências ativa e reativa à entrada do parque.

Após esta análise, é calculada uma bateria de condensadores da seguinte forma:

A Potência reativa consumida pelo parque eólico é de 0,38 MVar, este é o valor de Q_1 para ser usado na expressão que se segue adiante. Este é o valor para que as máquinas do parque deixem de consumir energia reativa da rede, mas a verdade é que no período fora das horas de vazio as máquinas têm que produzir energia reativa até atingir a $\text{tg } \varphi$ igual a um valor de 0,4.

A seguinte expressão vai calcular o valor de Q_2 :

$$Q_2 = P * \text{tg } \varphi$$

P é a potência ativa produzida por cada máquina, que neste caso é de 1,5 MW, logo nas quatro máquinas temos 6 MW. Utilizando a expressão, calcula-se:

$$Q_2 = 6000 * 0,4 = 2,4 \text{ MVar}$$

Sendo já conhecidos os valores de Q_1 e Q_2 , pode-se calcular o valor da bateria para o parque eólico, que é denominado por Q_{total} :

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 = 0,38 + 2,4 = 2,78 \text{ MVar} \approx 3 \text{ MVar}$$

O valor de Q_{total} é o valor da nossa bateria de condensadores, apresentada anteriormente na figura 48.

Na figura 50 é demonstrado graficamente a correção da bateria no sistema.

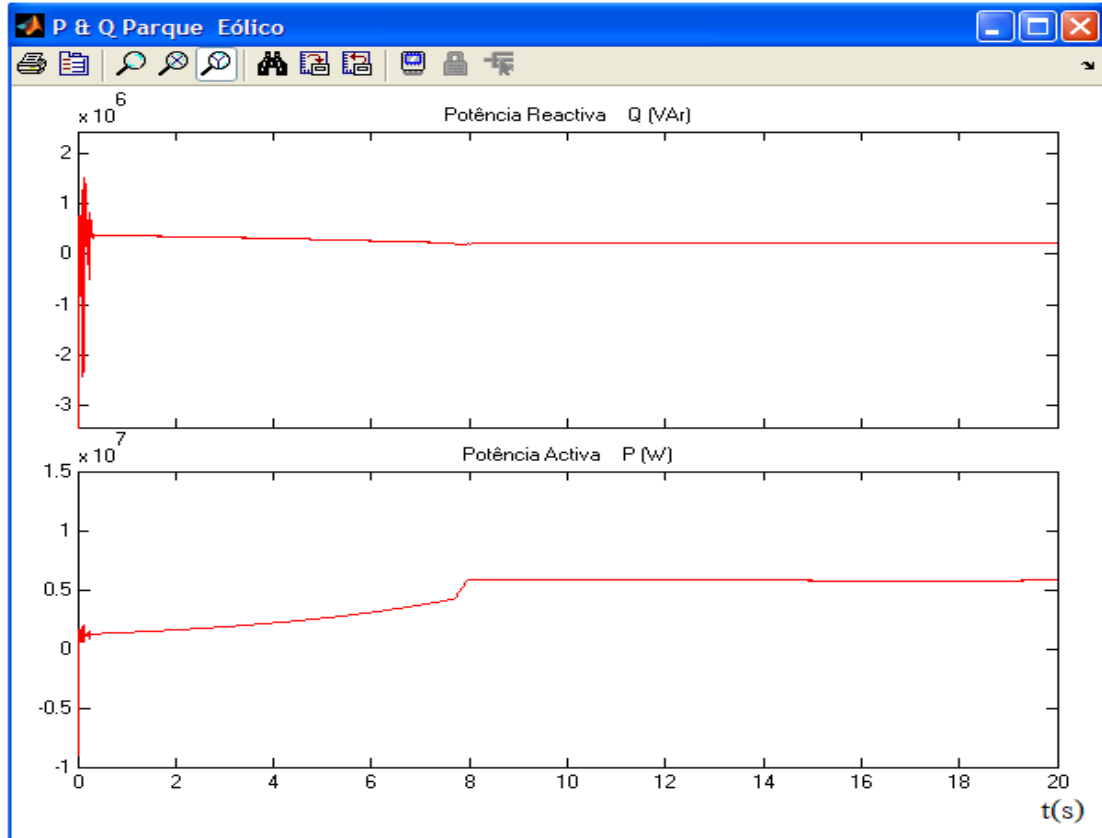


Figura 50 – Análise gráfica da correção do fator de potência.

3.2.4. CAVA DE TENSÃO

Neste ensaio, vai-se submeter o aerogerador assíncrono duplamente alimentado a um curto-circuito nas mesmas condições que foram apresentadas no capítulo 3.1.4 para o aerogerador assíncrono ligado diretamente à rede. Pretende-se saber a capacidade que este aerogerador tem em recuperar a tensão aos seus terminais perante este defeito quando ligado a uma rede.

Para a análise de uma cava de tensão, foi provocado um curto-circuito trifásico no barramento “B60kV” com uma duração de 100 ms, representado na figura 51.

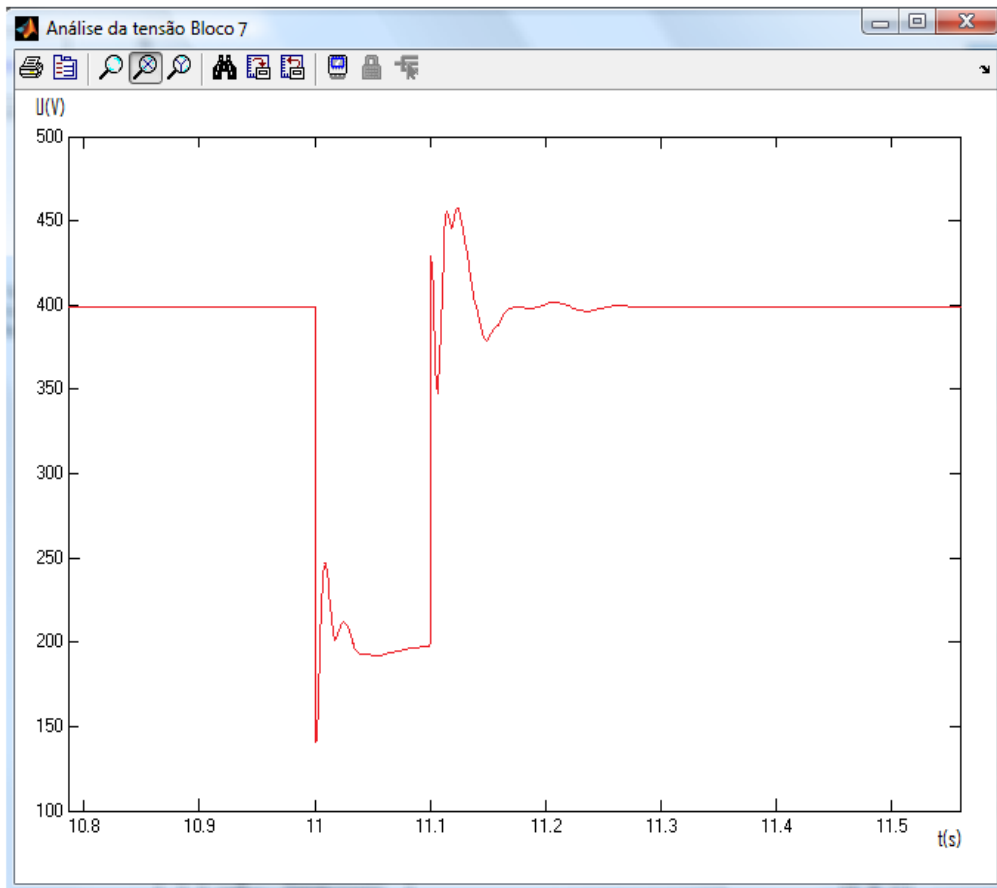


Figura 51 – Análise da tensão simples após um curto-circuito durante um período de 100 ms.

Antes da falha ter início, a tensão tem um valor de 1 pu, ou seja, 400 volts de tensão simples. Aos 11 segundos o curto-circuito tem início com uma duração de 100 ms.

Mostra-se, na figura 51, que a falha causa a queda de tensão até cerca de 140 volts no instante em que ocorre o curto-circuito.

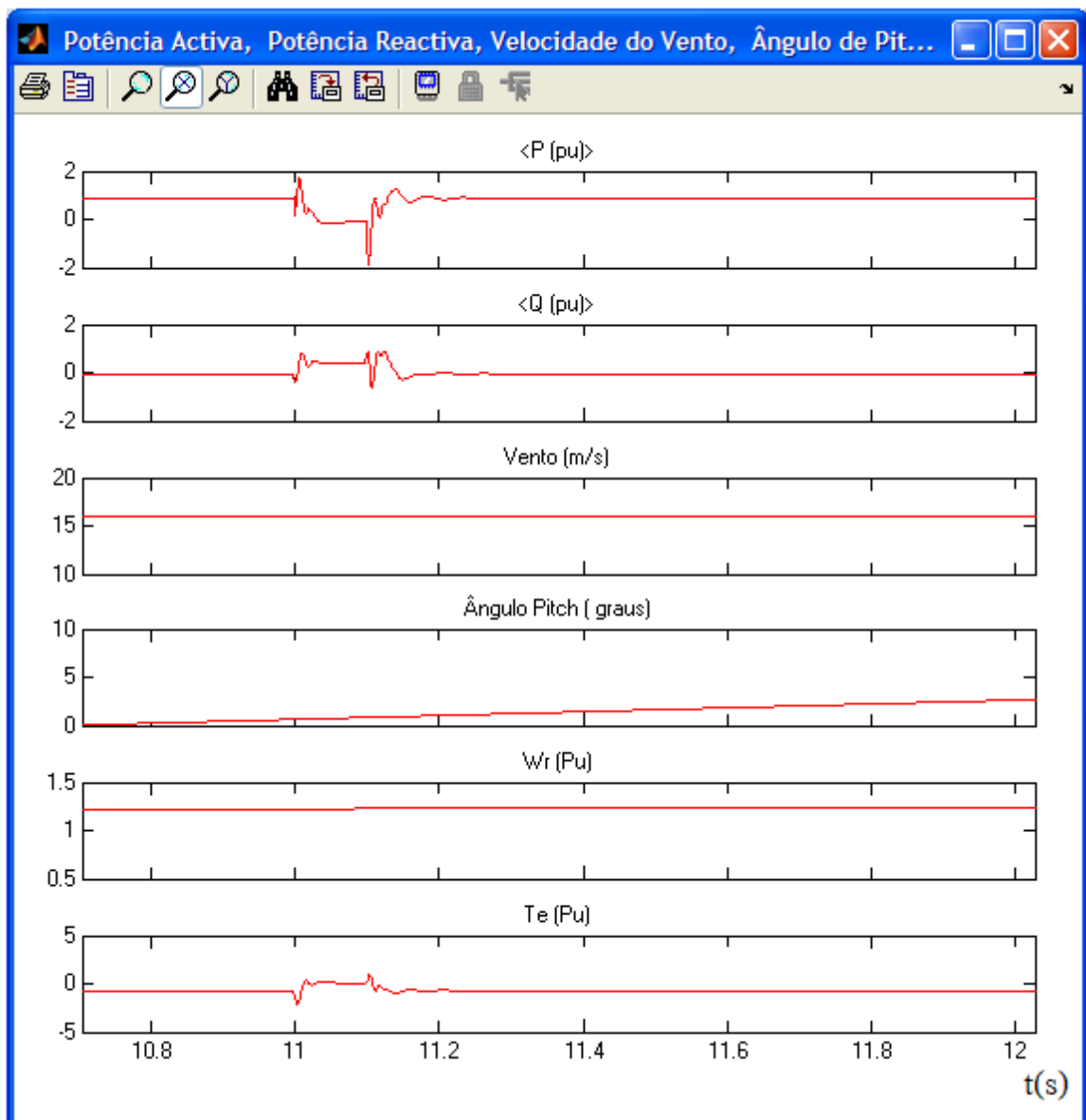


Figura 52 – Análise das medidas tiradas do bloco de medição 2 para uma falha de 100 ms.

Pode observar-se na figura 52 que o surgimento da falha dá origem a que o gerador funcione na condição de motor. O consumo de potência ativa é elevadíssimo, chegando mesmo a consumir cerca de 2 pu no instante $t=11,1s$.

Mesmo assim, a falha não é suficiente para desencadear a proteção de curto-circuito, e por isso o aerogerador assíncrono duplamente alimentado é capaz de atravessar a cava de tensão sem nenhuma ação de proteção. Após a falha de 100 ms, verifica-se que a tensão aos terminais da máquina é recuperada durante um período de 200 ms. Esta rápida recuperação da tensão deve-se à capacidade que o aerogerador tem em controlar a potência reativa.

Da mesma forma que se fala do consumo de potência ativa, deve-se fazer a análise das correntes com a ocorrência de um curto-circuito. Pode-se observar na figura 53 que a corrente nominal é de 1730 A. Com a ocorrência do curto-circuito o valor de pico chega a ser de 6280 A ou seja cerca de 3,5 vezes mais, como demonstrado na figura 54. Depois da eliminação do defeito, a corrente não volta imediatamente aos valores iniciais, demorando cerca de meio segundo. Este fenómeno pode ser explicado pela absorção de elevados valores de potência reativa depois do curto-circuito, possibilitando a recuperação do fluxo magnético, que sofre redução significativa com a queda de tensão nos terminais do aerogerador.

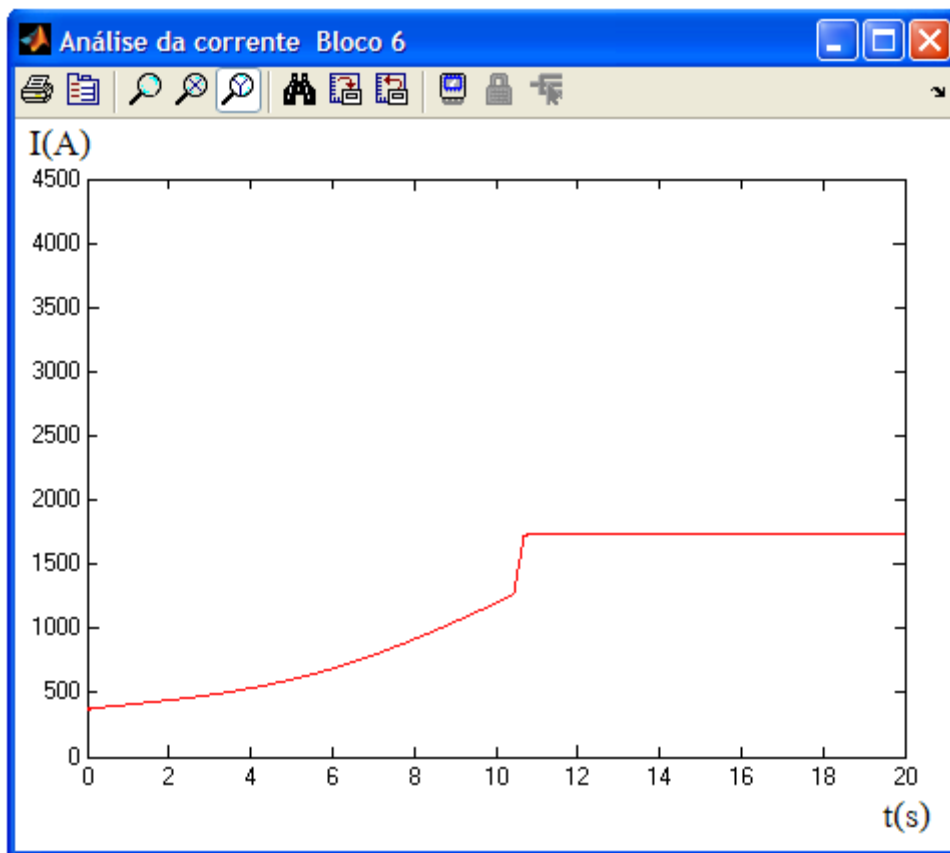


Figura 53 - Gráfico do valor da corrente nominal do aerogerador.

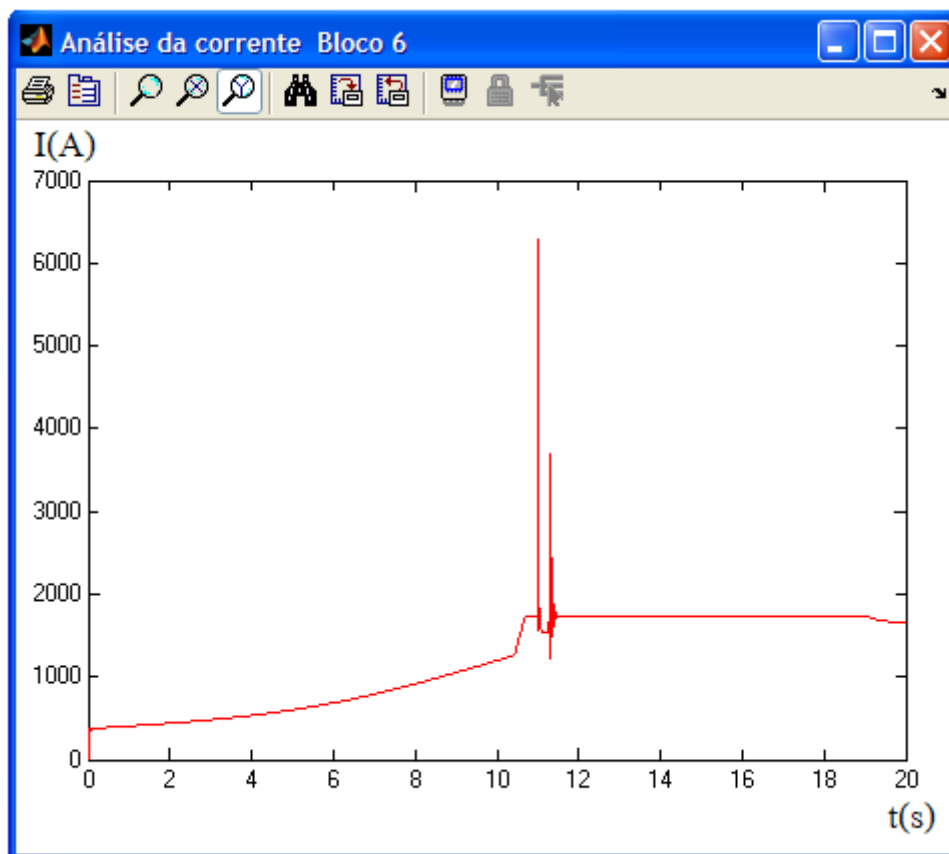


Figura 54 - Gráfico do valor da corrente do aerogerador após um curto-circuito de 100 ms.

Por se tratar de uma máquina assíncrona duplamente alimentada, é ainda possível analisar o estado do conversor perante este defeito. A figura seguinte, figura 55, demonstra cinco dados importantes do conversor. Inicialmente fornece o valor da tensão de alimentação ao conversor, onde se verifica a ocorrência da falha durante um período de 100 ms e cerca de 200 ms depois a tensão de alimentação ao conversor é reposta ao valor de 1 pu. Relativamente à corrente à entrada do conversor, pode-se observar que chega a atingir precisamente o valor de 1 pu. Analisando a terceira leitura, que é a tensão de alimentação ao rotor, esta chega a atingir uma tensão de 0,72 pu para uma corrente de 2,3 pu. O conversor na parte retificada chega a atingir um valor de pico de 1890 volts no instante em que se inicia a falha, ou seja, um aumento de 63,5 % da sua tensão nominal que é de 1200 volts.

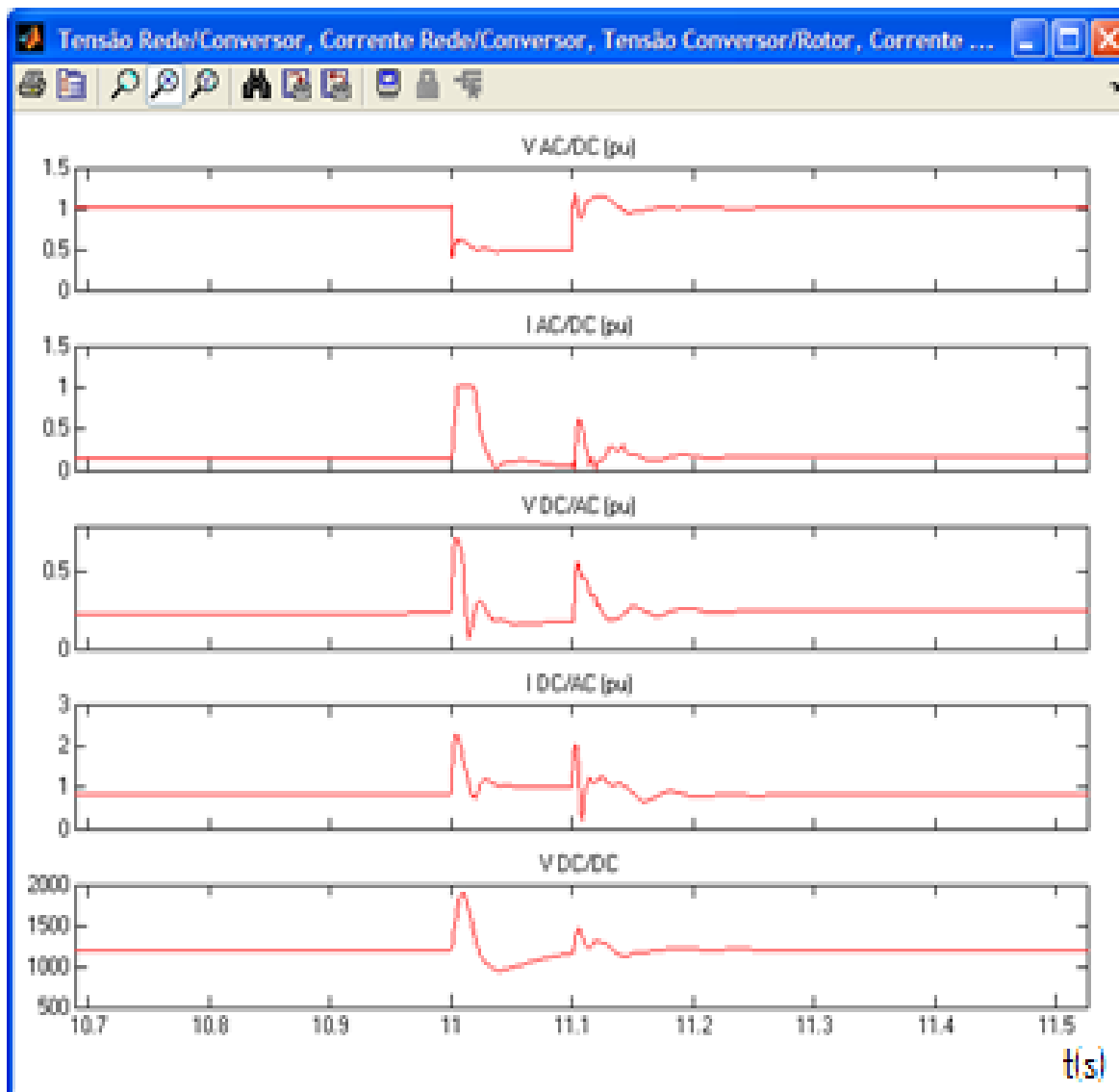


Figura 55 – Análise gráfica do conversor AC/DC/AC após um curto-circuito de 100 ms.

3.2.5. RAJADA DE VENTO NA TURBINA A1

Neste capítulo, assim como no 3.1.5, vão simular-se as mesmas condições de vento. Para isso, utiliza-se o mesmo bloco de vento que terá uma velocidade de 50 m/s durante o mesmo período da simulação já realizada.

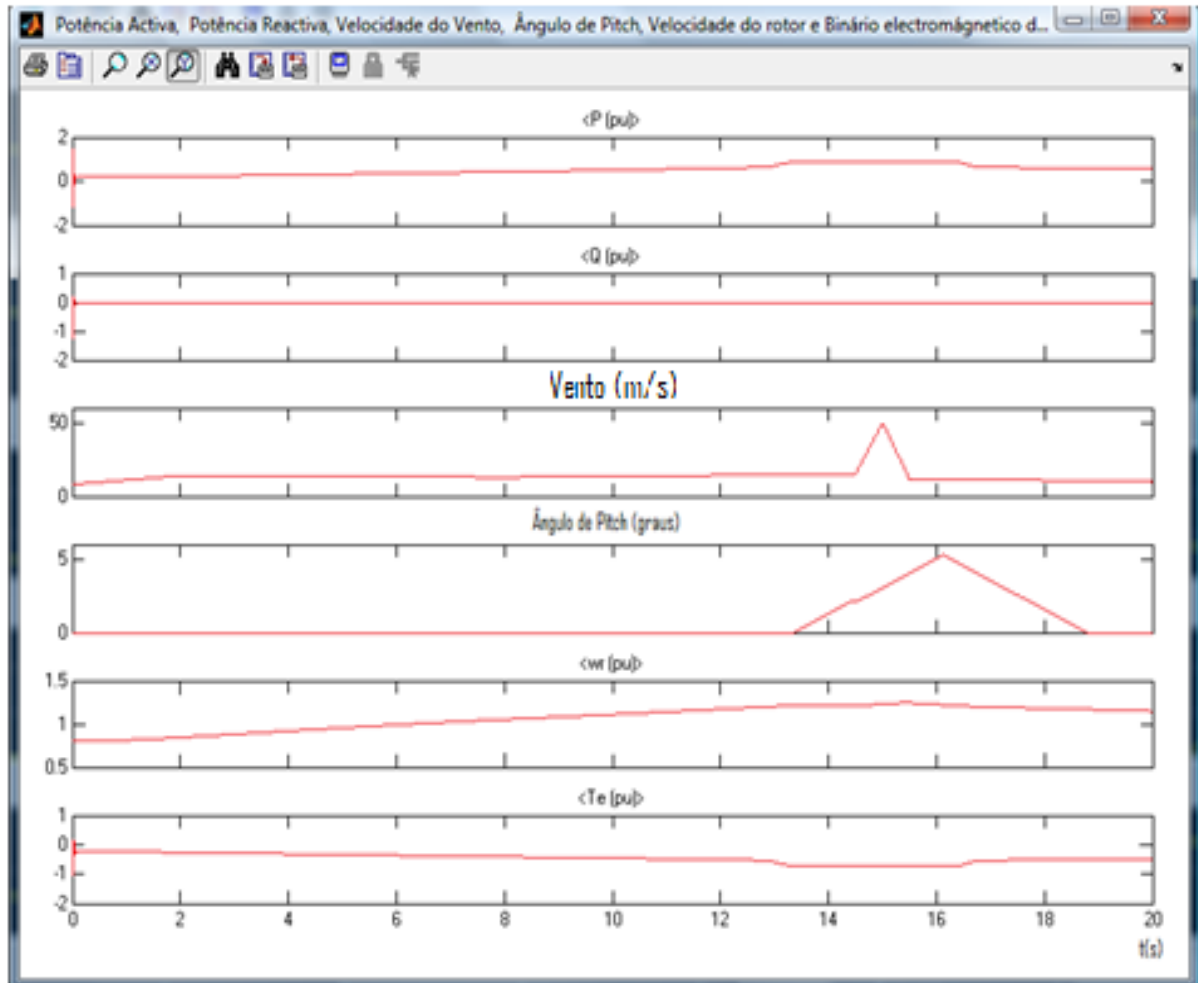


Figura 56 - Análise gráfica do aerogerador 1 após uma rajada de vento de 50 m/s.

Ao contrário do aerogerador anterior, onde a existência de uma rajada de vento de 50 m/s teve influência nos valores da potência ativa e reativa, traduzindo-se na produção em excesso da potência ativa e um consumo excessivo de potência reativa. Aqui neste tipo de máquina os valores de influência foram praticamente insignificantes, traduzindo-se assim no pleno funcionamento da máquina ligada à rede. Pode-se ainda observar que, com o aumento repentino do vento, o rotor da máquina não aumenta repentinamente a sua velocidade, pois o ajuste do controlo do ângulo das pás é perfeito, sendo também importante o desempenho do conversor no controlo da velocidade do rotor, como pode ser observado na figura 57. Observa-se, nesta mesma figura, que o aumento da corrente no conversor em $t=15$ s é simplesmente 0,1 pu.

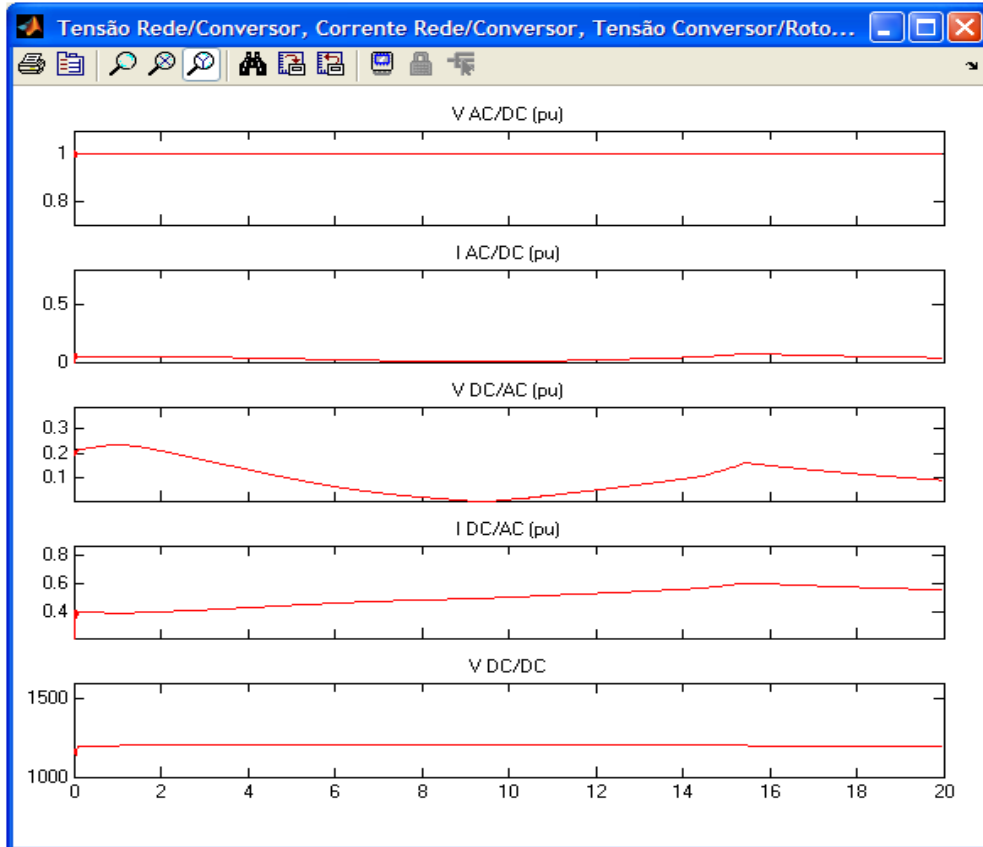


Figura 57 – Análise gráfica do conversor AC/DC/AC após uma rajada de vento de 50 m/s aos 15 s.

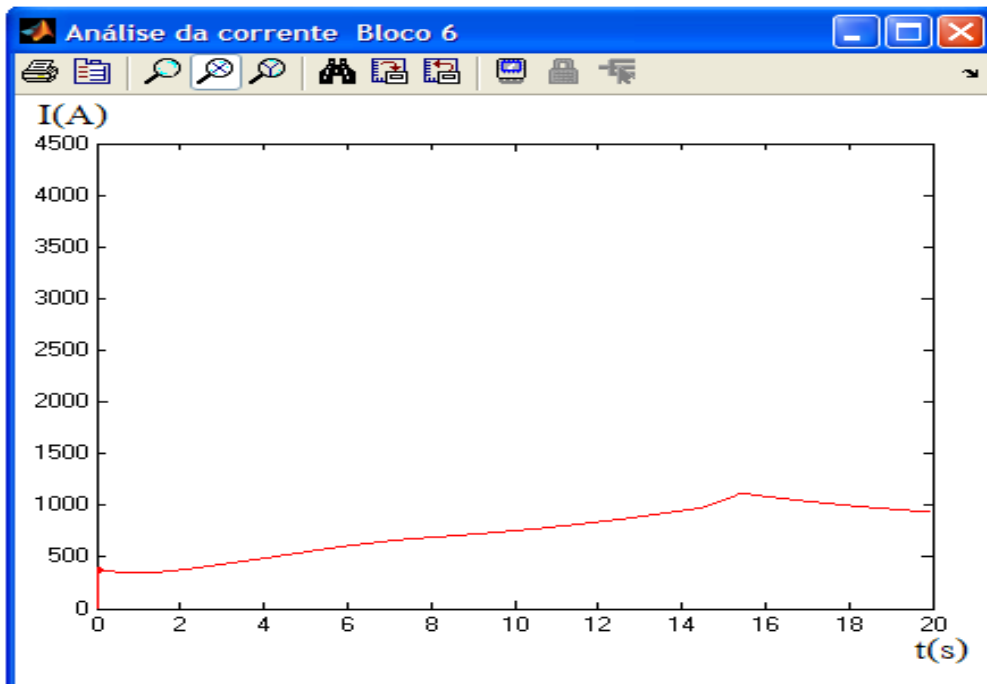


Figura 58 – Análise gráfica da corrente após uma rajada de vento de 50 m/s.

É possível ainda visualizar o valor de pico da corrente, através do gráfico da figura 58, onde se verifica que a corrente nem chega ao seu valor nominal. Isto deve-se ao facto de o valor do vento antes da rajada de vento ser de 13 m/s. O valor de V2, bloco de vento do aerogerador 2, a 16 m/s produz uma potência quase a valores de 0,9 pu. Como o vento passa em meio segundo de 13 para 50 e, meio segundo depois, passa para a velocidade de 10 m/s, não se sente efeito em termos de corrente de pico na análise da figura 58. Ao contrário do outro tipo de aerogerador apresentado anteriormente, onde chega mesmo a ficar fora de serviço devido ao valor enormíssimo da corrente.

3.3. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que as máquinas assíncronas de velocidade constante têm diversos problemas. Nas análises aqui estudadas, verifica-se que têm um consumo excessivo de energia reativa chegando a consumir cerca de 50 % desta energia face à produção da potência ativa, sendo instalada uma bateria de condensadores de 3 MVar. Por outro lado, as máquinas assíncronas duplamente alimentadas têm bons resultados quanto ao consumo de energia reativa, consumindo apenas cerca de 6 % de potência reativa do valor produzido de 6 MW de potência ativa em todo o parque eólico.

O segundo ensaio, retrata a ocorrência de um curto-circuito trifásico à terra, onde se observa que a máquina assíncrona ligada diretamente à rede regista uma queda de tensão de cerca de 30 % com uma corrente de pico a atingir cerca de três vezes a nominal e uma duração de 3 segundos até encontrar a estabilidade, tendo em conta que a falha foi durante 100 ms. Por oposição e enquadrada no mesmo ensaio, a máquina assíncrona duplamente alimentada tem um comportamento bastante aceitável. Os valores da queda de tensão e o pico de corrente não estão muito longe dos valores atingidos no anterior estudo, a grande vantagem é que esta máquina recupera a sua estabilidade em cerca de meio segundo.

No último ensaio ocorre uma rajada de vento que faz com que o aerogerador de velocidade constante produza uma potência ativa muito elevada e um consumo de potência reativa também elevado, atingindo um valor de pico de corrente cerca de 4 vezes a nominal, levando o aerogerador a ficar fora de serviço. Por sua vez, quando confrontado com a mesma adversidade, o aerogerador duplamente alimentado a uma velocidade de 50 m/s não altera o comportamento da máquina. O trabalho desempenhado pelo rotor é fundamental no controlo da velocidade deste tipo de máquina.

4. SIMULAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO COM AEROGERADORES SÍNCRONOS

4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo estudar o comportamento dos aerogeradores síncronos de imanes permanentes. O principal objetivo deste ponto é verificar o comportamento deste tipo de máquina perante os mesmos ensaios realizados no capítulo anterior.

4.2. DESCRIÇÃO DO PARQUE EÓLICO

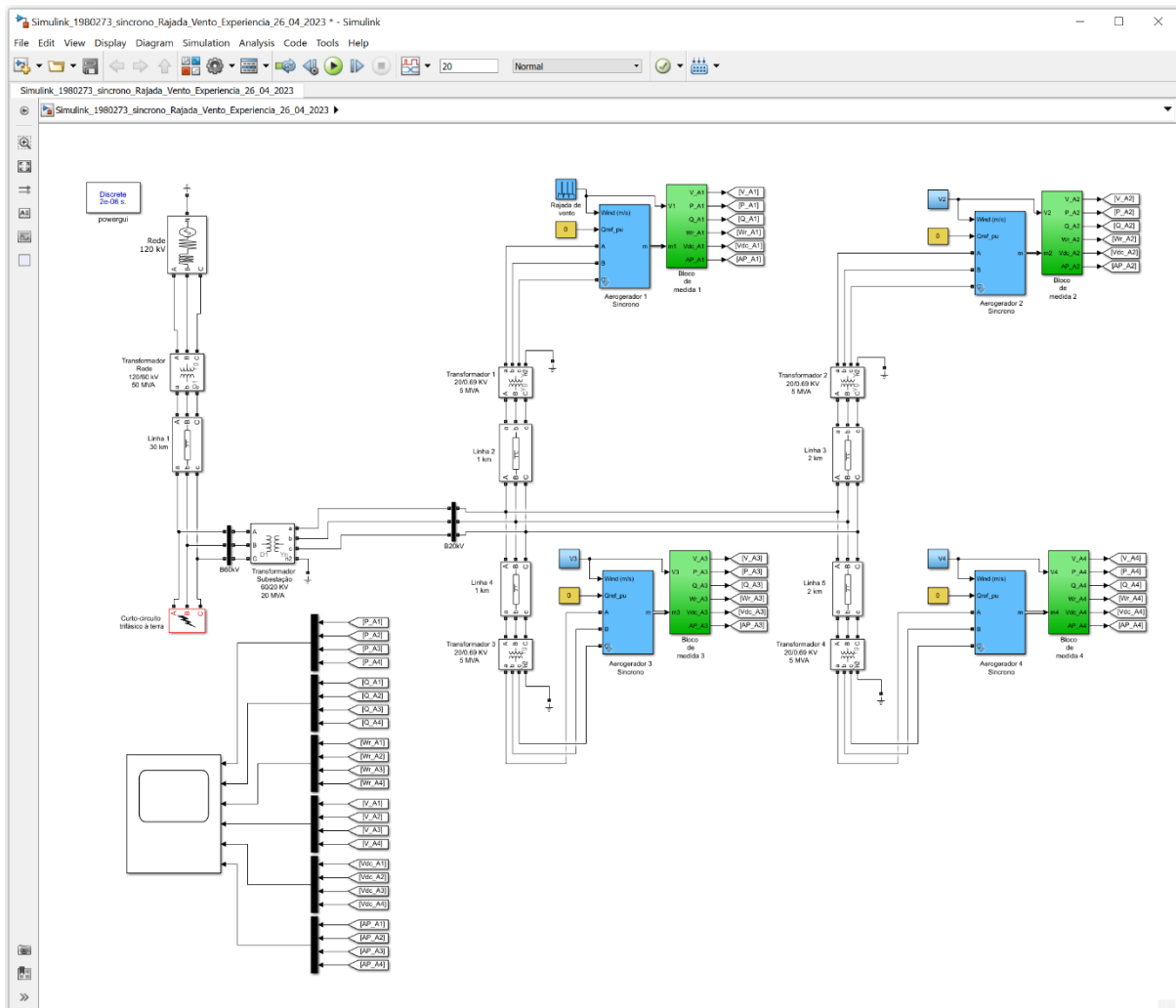


Figura 59 – Esquema do parque eólico com aerogeradores síncronos de ímãs permanentes.

Este parque eólico tem exatamente a mesma disposição que os parques anteriormente estudados, sendo constituído por 4 aerogeradores síncronos de ímãs permanentes com as mesmas características, como pode ser observado na figura 59. Neste parque foram introduzidos pequenos ajustes nos equipamentos de medida, para que seja possível medir todas as grandezas ao mesmo tempo no mesmo osciloscópio. Os transformadores e impedâncias de linha foram mantidos para cada aerogerador.

4.3. REPERCUSSÕES NA QUALIDADE DA ENERGIA

4.3.1. EXCESSO DE CONSUMO DE POTÊNCIA REATIVA

Constatou-se anteriormente que ambas as máquinas assíncronas apresentadas consumiam energia reativa, na figura 60 e figura 61 é possível verificar que o desempenho da máquina síncrona não consome praticamente energia reativa. Este facto, deve-se às características da própria máquina em ser síncrona de imanes permanentes e ao desempenho do seu conversor, que acaba por isolar a máquina da rede.

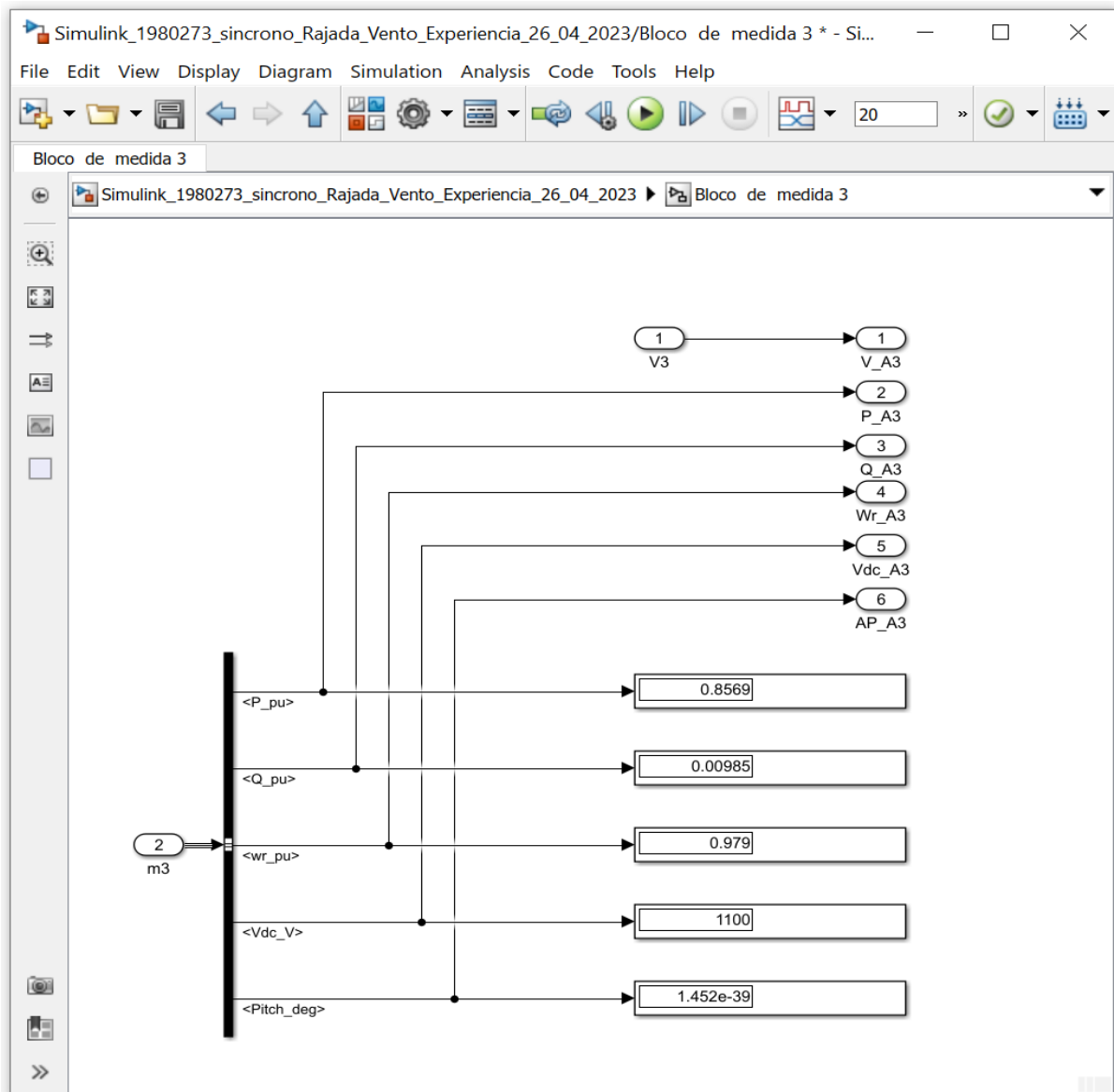


Figura 60 – Bloco de medição do Aerogerador Síncrono, Bloco de medição 3.

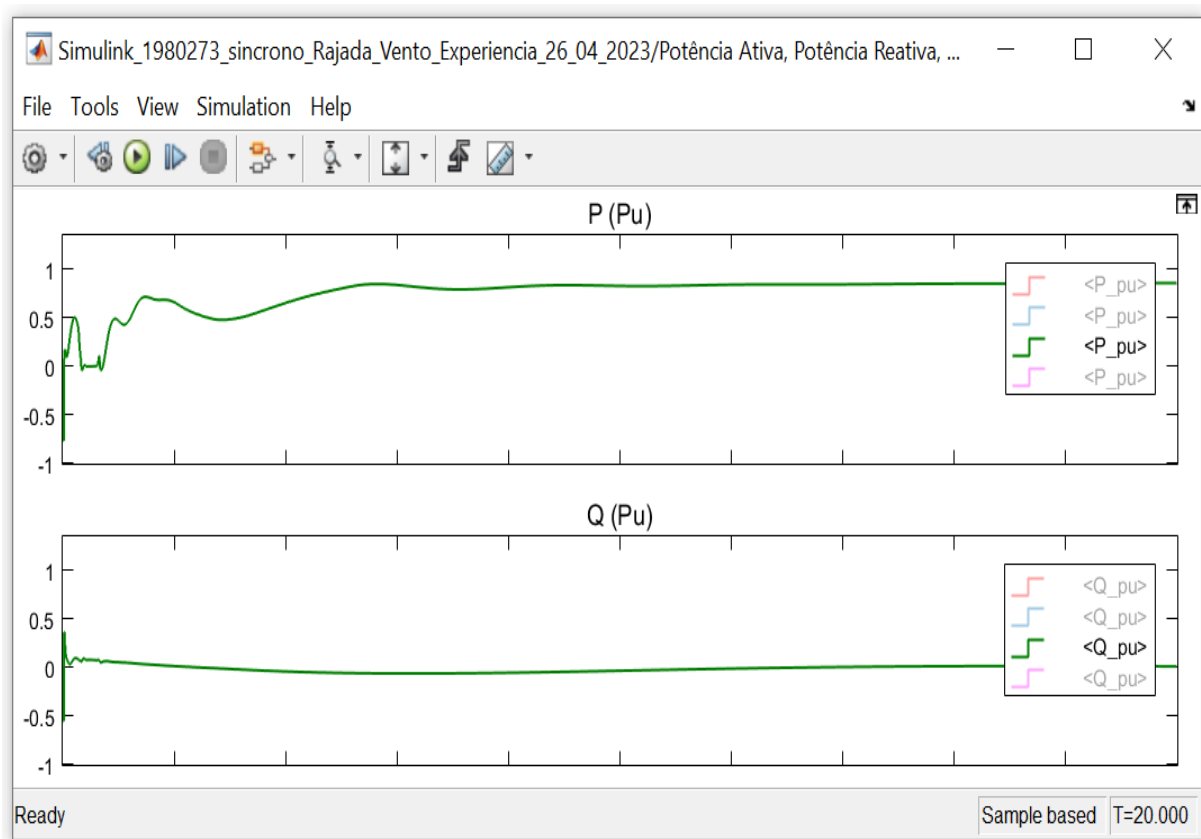


Figura 61 – Análise gráfica das potências ativa e reativa do Aero gerador 3.

4.3.2. CAVA DE TENSÃO

Este capítulo tem como objetivo avaliar o desempenho do aerogerador síncrono de imanes permanentes perante o curto-circuito trifásico à terra, que tem sido apresentado anteriormente.

Na figura 62, verifica-se o comportamento do aerogerador síncrono de imanes permanentes, aerogerador 1, perante a ocorrência deste defeito durante o período de 100 ms, como tem sido apresentado nos capítulos anteriores.

É possível observar que após ter ocorrido a falha, o sistema recupera os seus índices normais de estabilidade após cerca de 400 ms, sem se ter desligado do sistema.

Tendo em conta as condições do vento, 11 m/s, a máquina produz uma potência ativa pouco mais de 60 % da sua capacidade e quando ocorre a falha chega a atingir valores de quase o dobro da potência produzida. No que diz respeito à potência reativa, é possível verificar quase um aumento de 8 vezes superior quando comparada com o seu funcionamento normal, a situação fica reposta cerca de 200 ms após o defeito.

Relativamente à velocidade do rotor, nota-se uma pequena subida quando ocorre o defeito, mas praticamente mantém a sua velocidade ao longo do tempo, considerando sempre o vento constante de 11 m/s. No gráfico “Vdc” podemos observar que a tensão no conversor mantém-se estabilizada nos 1100 V e quando ocorre o curto-circuito chega a atingir um pico cerca de 1250 V. Esta tensão vai ao longo do tempo oscilando até encontrar a sua estabilidade ao fim de 1,2 s. No que concerne ao ângulo de *Pitch*, nota-se uma pequena subida, mas mantém-se praticamente sem nenhum reajuste ao longo do tempo. No capítulo seguinte será feita a comparação deste aerogerador com o aerogerador assíncrono duplamente alimentado para que seja possível visualizar as diferenças de comportamento perante a ocorrência do curto-circuito.

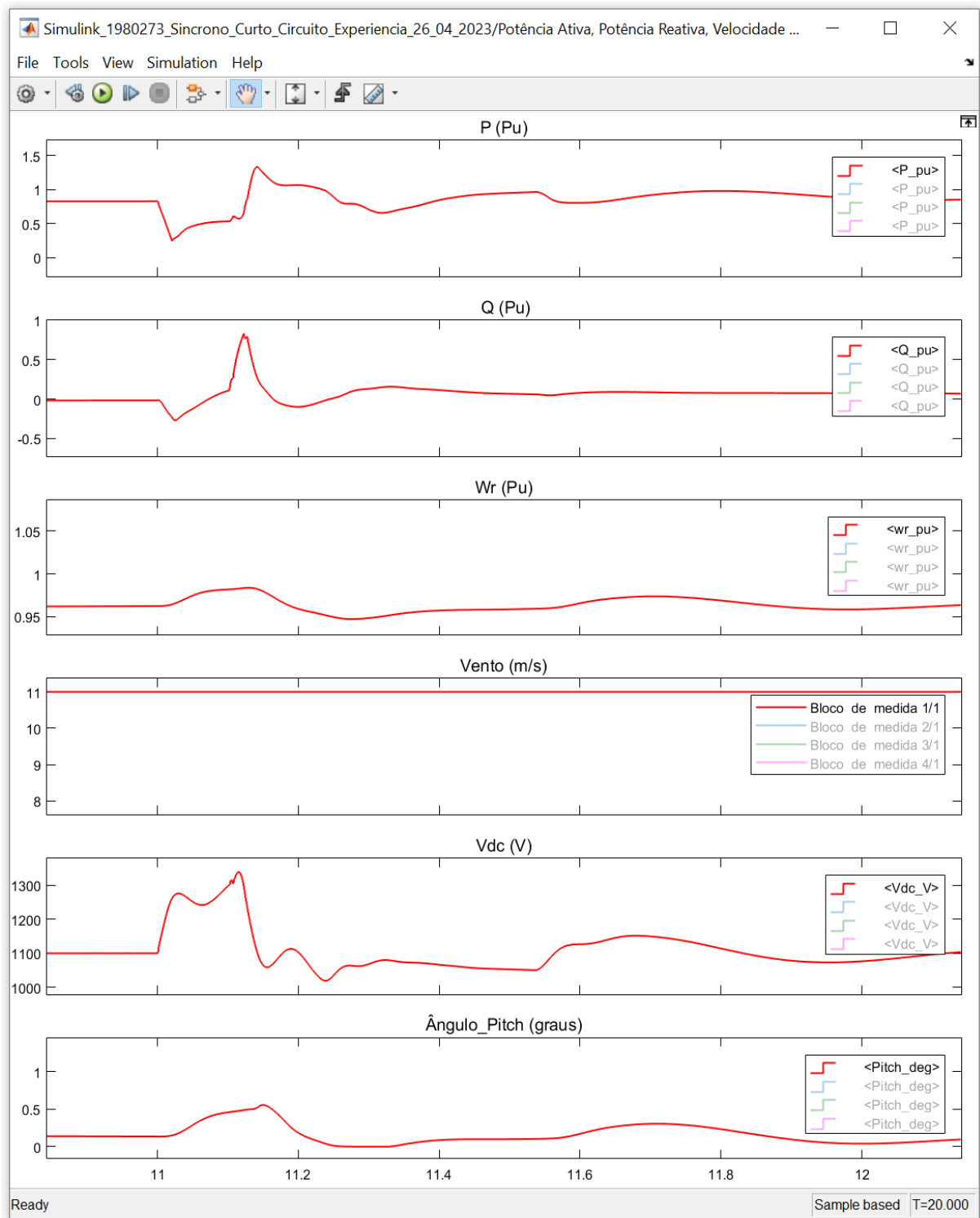


Figura 62 – Análise gráfica do Aerogerador 1 perante o curto-circuito.

4.3.3. RAJADA DE VENTO

Neste capítulo irá ser estudado o comportamento do aerogerador síncrono perante as mesmas condições de vento, as quais irão ser apresentadas no bloco da figura 63. O vento é variável e sem grande oscilação. Aos 15 segundos de ensaio dar-se-á uma rajada de vento de 50 m/s no aerogerador 1.

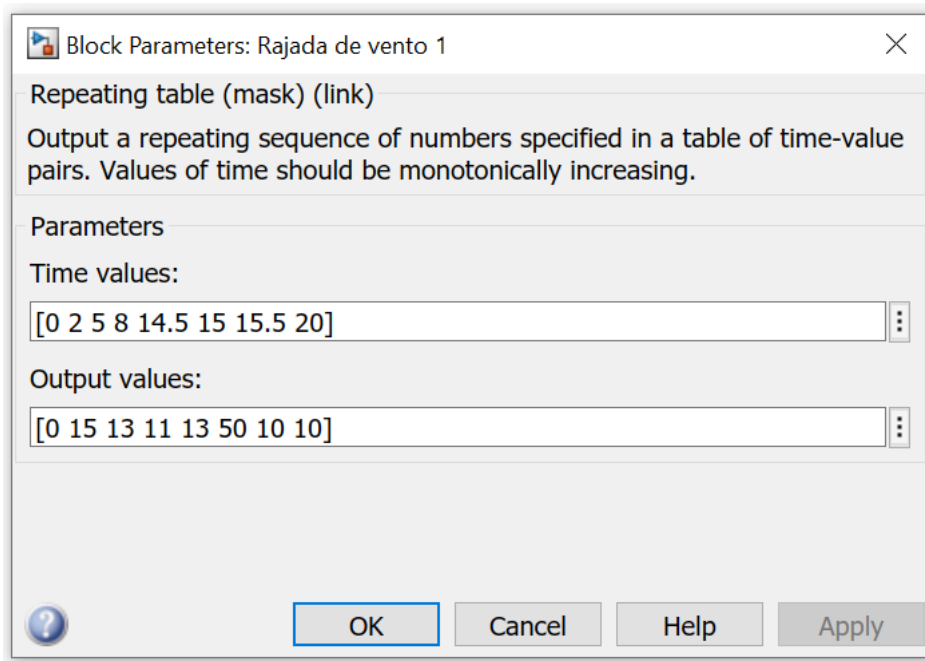


Figura 63 - Bloco para a simulação de rajada de vento.

Na figura 64 estão apresentados os desempenhos dos aerogeradores relativamente às condições de vento propostas. O aerogerador 3, representado pela cor verde, encontra-se com uma condição de vento constante de 11 m/s. O aerogerador 1, cor vermelha, está com as condições referidas no bloco da figura 63.

É possível verificar na análise gráfica das potências ativa, tendo em conta que velocidade do vento do aerogerador 1 é superior a 11 m/s, a potência ativa no aerogerador 1 é superior ao aerogerador 3. Relativamente à parte da potência reativa, verifica-se que o aerogerador 1 está a gerar reativa para a rede, enquanto o aerogerador 3 está praticamente com o valor nulo. Importante verificar que o comportamento da tensão do conversor é bastante diferente. Com o aumento da velocidade da máquina o conversor chega a um valor de 3 000 V, ou seja, o triplo do valor quando comparado com uma velocidade fixa do vento de 11 m/s. No ensaio anterior, ensaio de curto-circuito, o controlo do ângulo de *Pitch* é

bastante mais ativo no aerogerador 1, chegando a ser cerca de cinco vezes maior perante a rajada de vento.

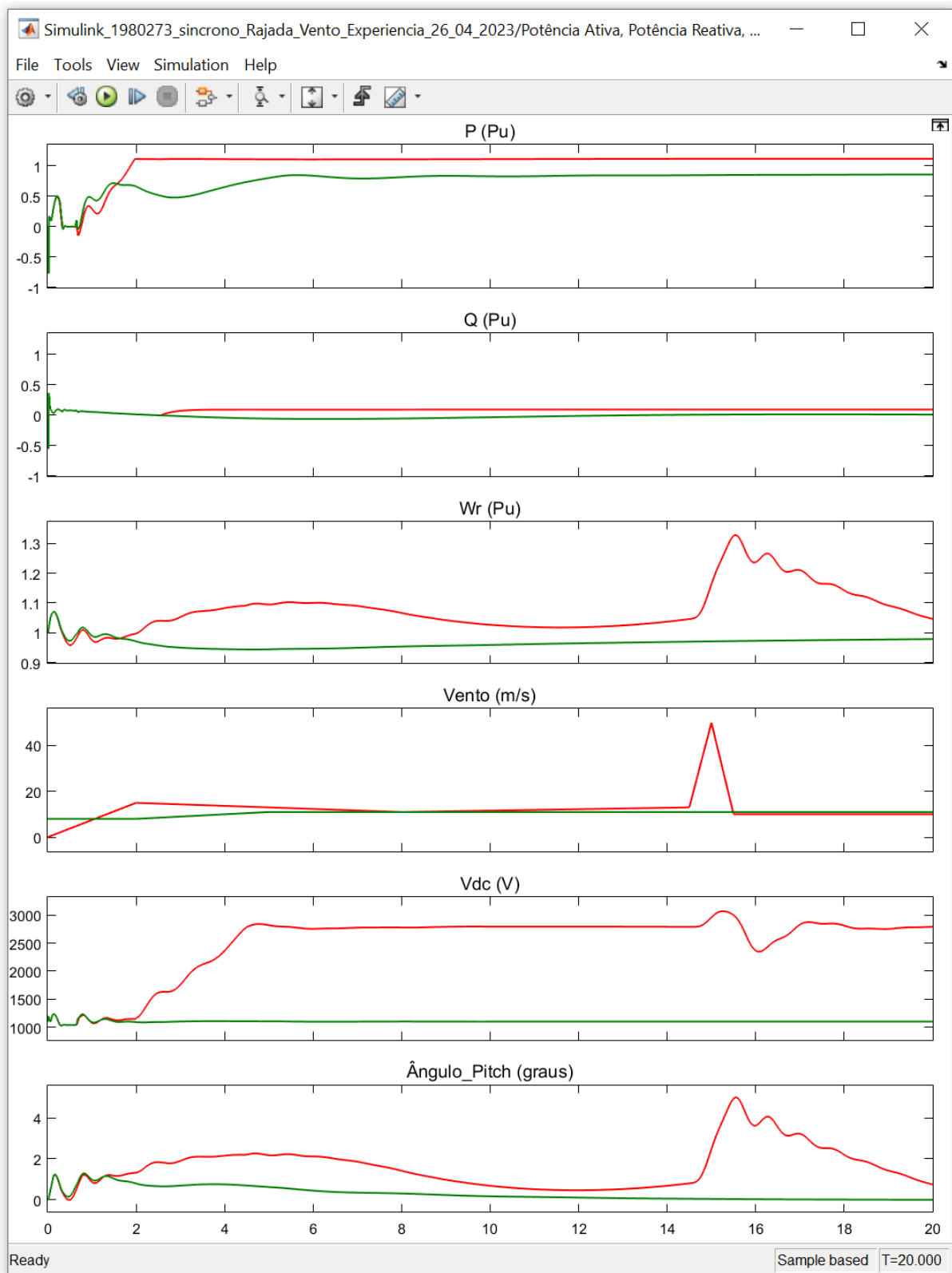


Figura 64 – Análise gráfica dos aerogeradores A1 e A3 com a ocorrência de rajada de vento em A1.

4.4. CONCLUSÃO

Dos diferentes aerogeradores aqui estudados e analisados, a máquina síncrona de ímãs permanentes destaca-se pelo seu excelente desempenho a todos os níveis de exigência da qualidade de energia produzida. Efetivamente, constatou-se que o consumo de energia reativa é praticamente inexistente. Quando ocorre uma falha na rede, o sistema recupera os seus índices normais de estabilidade em 400 ms e uma corrente de pico de cerca do dobro da corrente nominal, sem se ter desligado do sistema. Após uma rajada de vento este tipo de máquina não altera a sua estabilidade.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS DIFERENTES ENSAIOS

5.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como principal objetivo estudar o comportamento dos diferentes tipos de aerogeradores no mesmo parque eólico. Tendo sido estudado anteriormente cada máquina individualmente, vai-se agora comparar as vantagens e desvantagens em utilizar os diferentes tipos.

O primeiro parque simulado, de agora em diante denominado de *Parque S1*, é composto por 4 aerogeradores: 2 assíncronos ligados diretamente à rede e 2 aerogeradores assíncronos duplamente alimentados.

O segundo parque simulado, identificado como *Parque S2*, é constituído por 4 máquinas: 2 assíncronos duplamente alimentados e 2 síncronas de imanes permanentes.

A comparação entre ambos os parques, terá como base a análise do consumo de energia reativa do parque, a reação dos diferentes aerogeradores perante uma cava de tensão e quando confrontados com rajadas de vento a uma velocidade de 50 m/s.

5.2. ANÁLISE DE RESULTADOS DO PARQUE S1

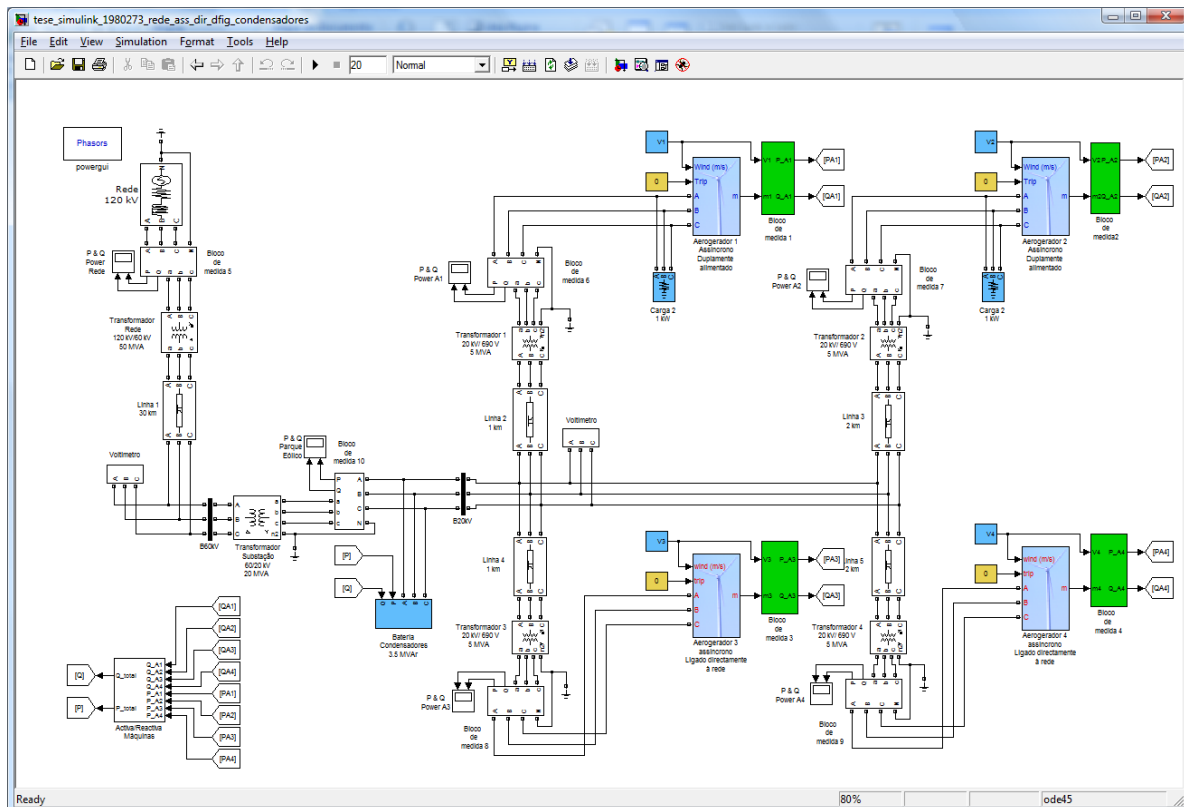


Figura 65 – Esquema parque eólico com aerogeradores assíncronos duplamente alimentados e assíncronos ligados diretamente à rede.

Este parque eólico tem exatamente a mesma disposição que os parques anteriormente estudados. A única diferença é que temos 2 tipos de máquinas diferentes no mesmo parque, com duas máquinas cada, como pode ser observado na figura 65. Todos os equipamentos de medida, transformadores e impedâncias de linha foram mantidos para cada aerogerador. A bateria de condensadores para corrigir o fator de potência tem que ser novamente calculada tendo em conta que se alterou o parque.

5.2.1. EXCESSO DE CONSUMO DE POTÊNCIA REATIVA

Verificou-se anteriormente que ambos os parques apresentavam consumo de energia reativa. Este apresentado agora também consome como pode ser visto na figura 66.

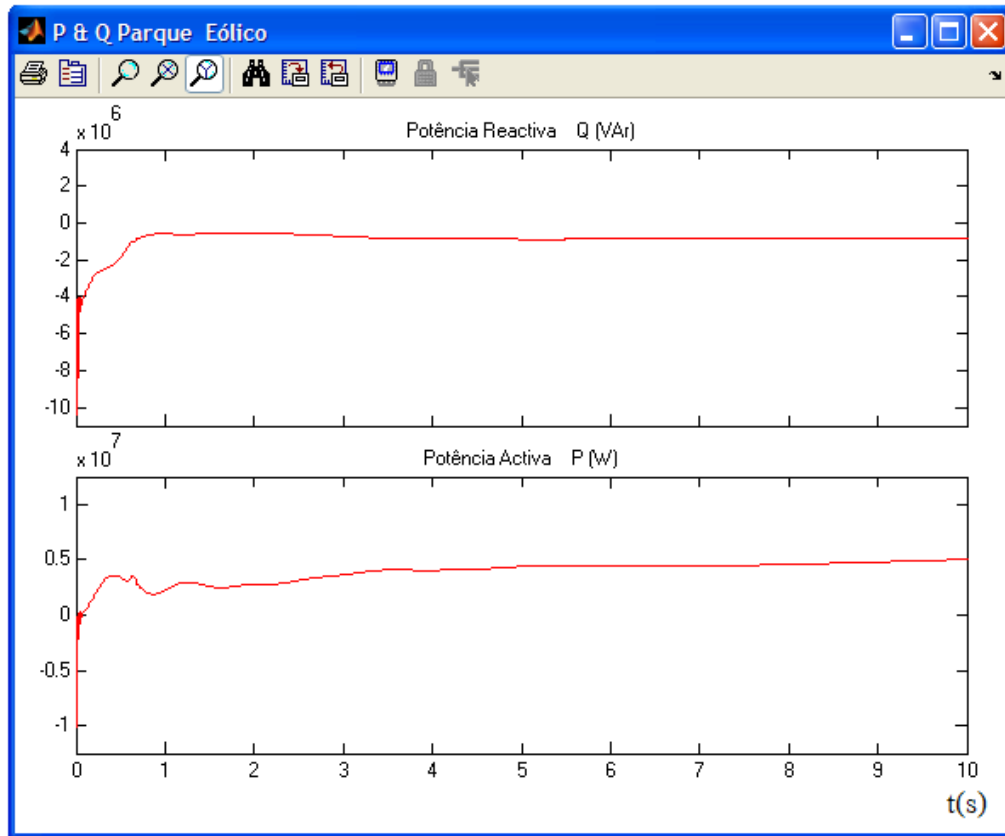


Figura 66 – Análise gráfica das potências ativa e reativa à entrada do parque.

O consumo de energia reativa do parque eólico é cerca de 800 kVar. De modo a corrigir o fator de potência, foi calculada uma bateria de condensadores automática de 3,5 MVar, constituída por 6 módulos: 2 módulos de 1 MVar, 2 módulos de 0,5 MVar, 1 módulo de 0,3 MVar e 1 módulo de 0,2 MVar. A figura 61 demonstra a constituição da bateria de condensadores.

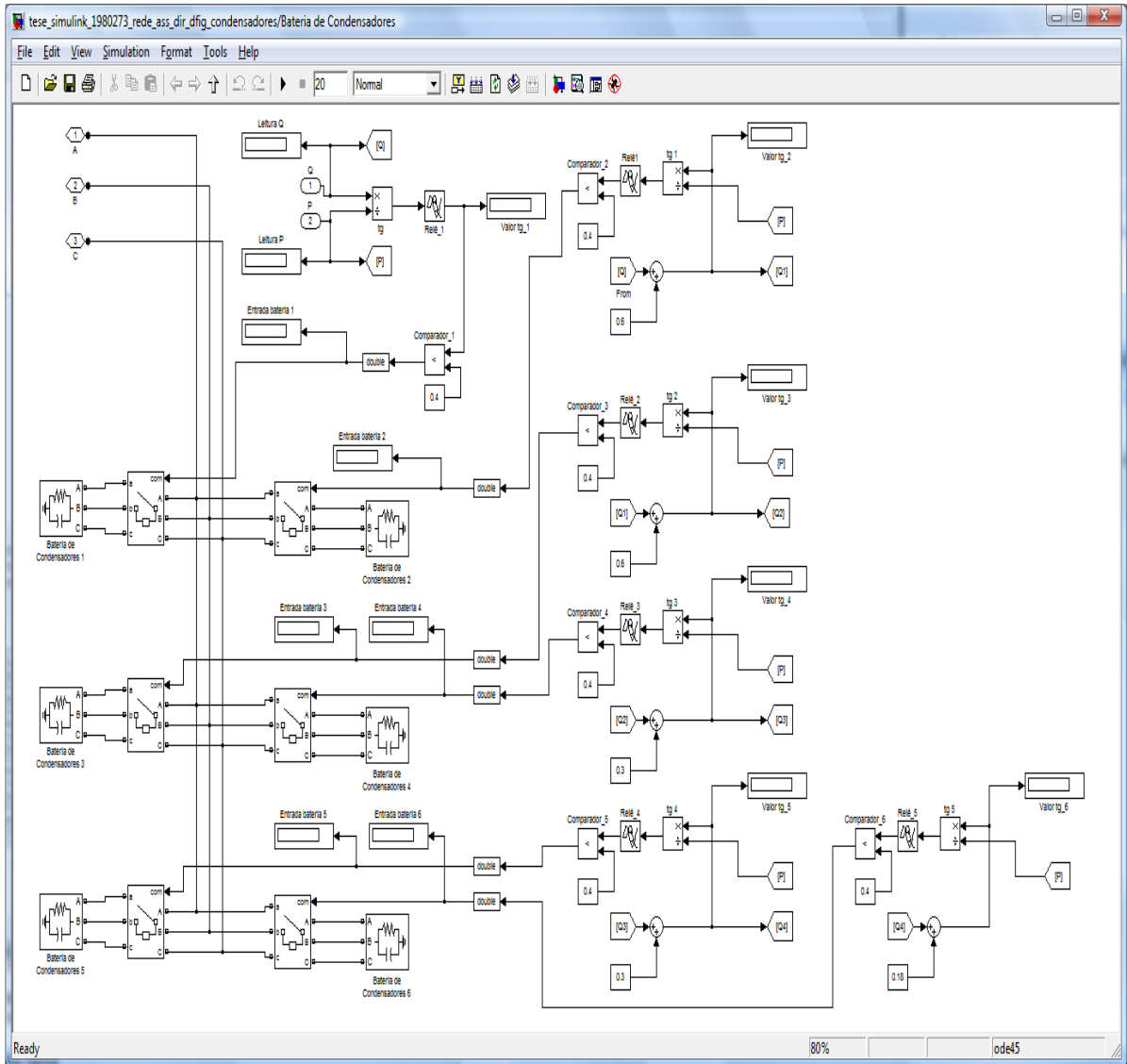


Figura 67 – Bateria de condensadores automática de 3,5 MVar.

5.2.1.1. CÁLCULO DA BATERIA DE CONDENSADORES

A figura 68 mostra a análise gráfica do equipamento “P & Q Parque Eólico”. Pode-se observar que o consumo de energia reativa total do parque é de cerca de 0,8 MVar.

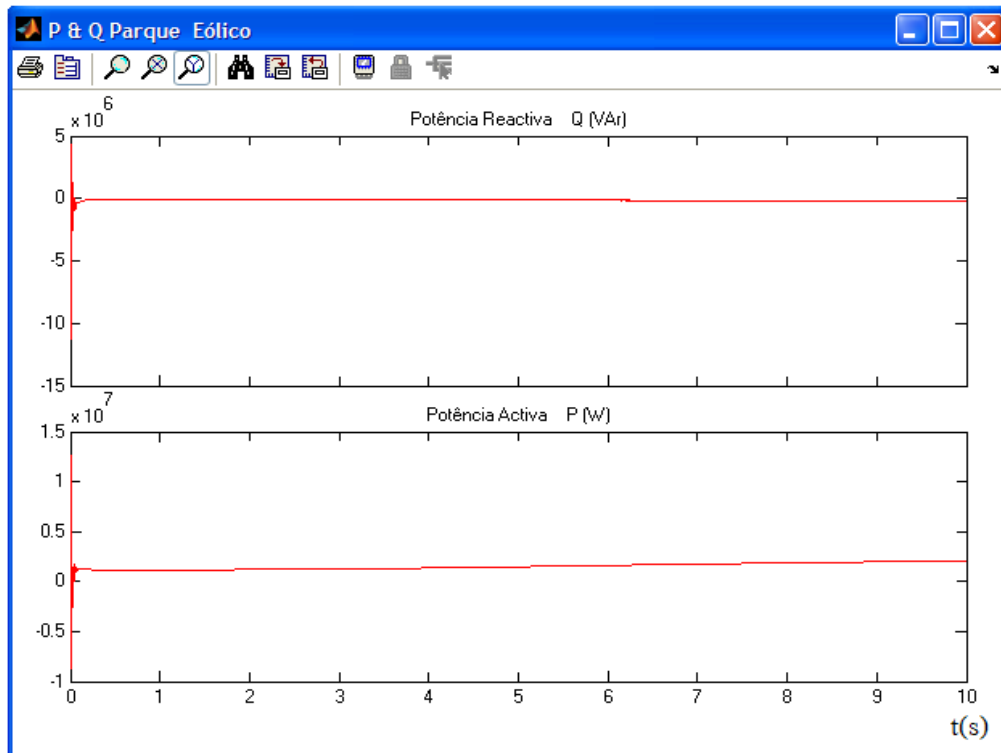


Figura 68 – Análise gráfica das potências ativa e reativa à entrada do parque.

Após esta análise, é calculada uma bateria de condensadores da seguinte forma:

A Potência reativa consumida pelo parque eólico é de 0,8 MVar, este é o valor de Q_1 para ser usado na expressão que se segue adiante. Este é o valor para que as máquinas do parque deixem de consumir energia reativa da rede, mas a verdade é que no período fora das horas de vazio as máquinas têm que produzir energia reativa até atingir a $\text{tg } \varphi$ igual a um valor de 0,4.

A seguinte expressão calcula o valor de Q_2 :

$$Q_2 = P * \text{tg } \varphi$$

P é a potência ativa produzida por cada máquina, que neste caso é de 1,5 MW, logo nas quatro máquinas temos 6 MW. Utilizando a expressão, calcula-se:

$$Q_2 = 6000 * 0,4 = 2,4 \text{ MVar}$$

Sendo já conhecidos os valores de Q_1 e Q_2 , pode-se calcular o valor da bateria para o parque eólico, que é denominado por Q_{total} :

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 = 0,8 + 2,4 = 3,2 \text{ MVar} \approx 3,5 \text{ MVar}$$

O valor de Q_{total} é o valor da bateria de condensadores que está instalada na subestação, apresentada anteriormente na figura 61. Esta bateria é totalmente automática, os módulos entram automaticamente em função da energia reativa lida no sistema da bateria.

Na figura 69 é demonstrado graficamente a correção da bateria no sistema.

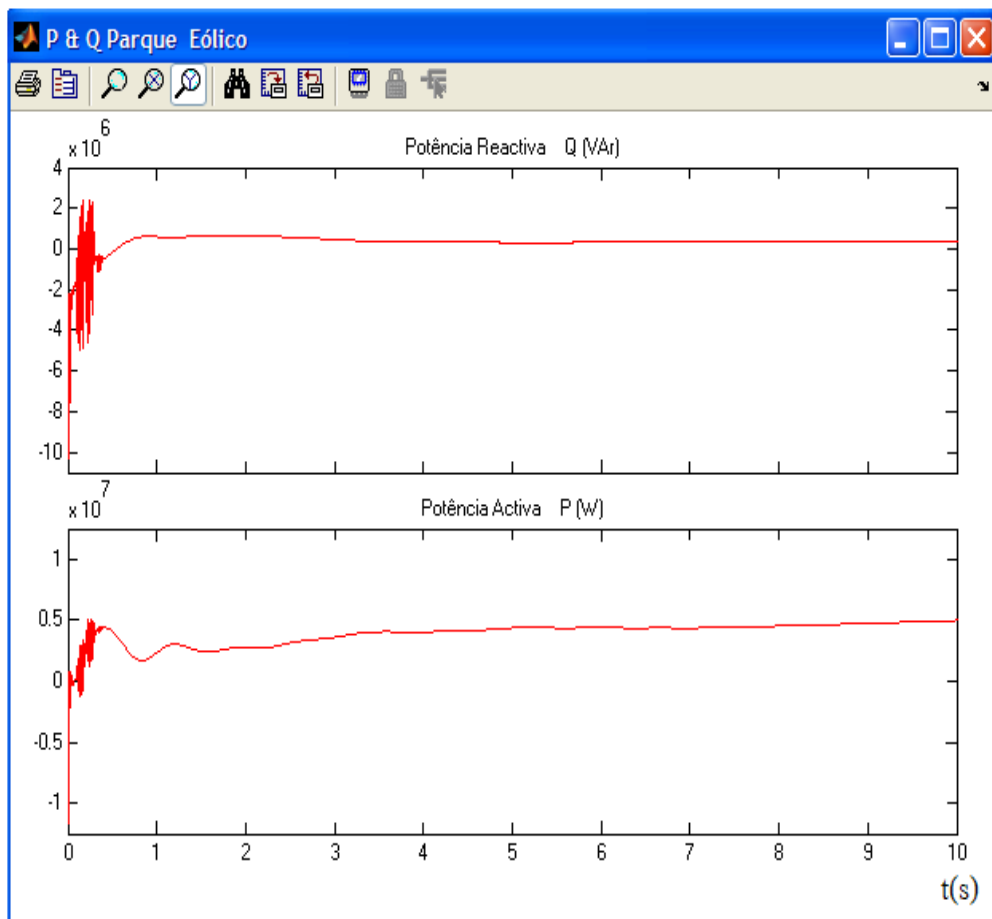


Figura 69 – Análise gráfica da correção do fator de potência.

5.2.2. CAVA DE TENSÃO

Este capítulo tem como objetivo comparar os diferentes tipos de aerogeradores perante um curto-circuito trifásico à terra como apresentado anteriormente. Vão ser apresentadas, no gráfico da figura 71, as tensões simples dos dois aerogeradores para concluir qual o que “sofre” menos com a cava de tensão. Para isso, foi criado um bloco para que se possa medir as tensões compostas. Este bloco pode ser observado na figura 70.

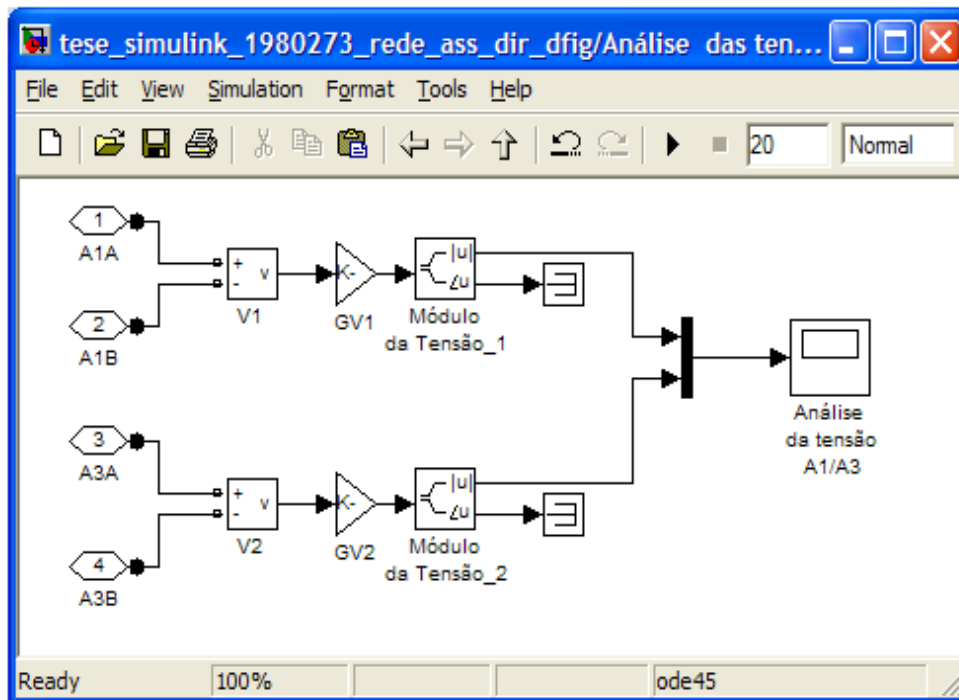


Figura 70 – Bloco para análise das tensões dos aerogeradores A1 e A3 após um curto-circuito de 100 ms.

Pode observar-se na figura 71 que ocorre um curto-circuito durante um período de 100 ms. Neste gráfico constata-se a existência das tensões dos dois aerogeradores estudados. A cor vermelha representa a tensão composta do aerogerador assíncrono duplamente alimentado e a azul o aerogerador assíncrono ligado diretamente à rede. O curto-circuito resulta numa cava de tensão a qual tende para um ponto inadequado de operação durante 100 ms.

No aerogerador de velocidade fixa aquando da falha, a tensão cai abruptamente para cerca de 220 volts. Quando a falha se extingue verifica-se que o gerador eólico excede claramente o limite de estabilidade transitória recuperando o seu valor de tensão ao fim de cerca de 3 segundos.

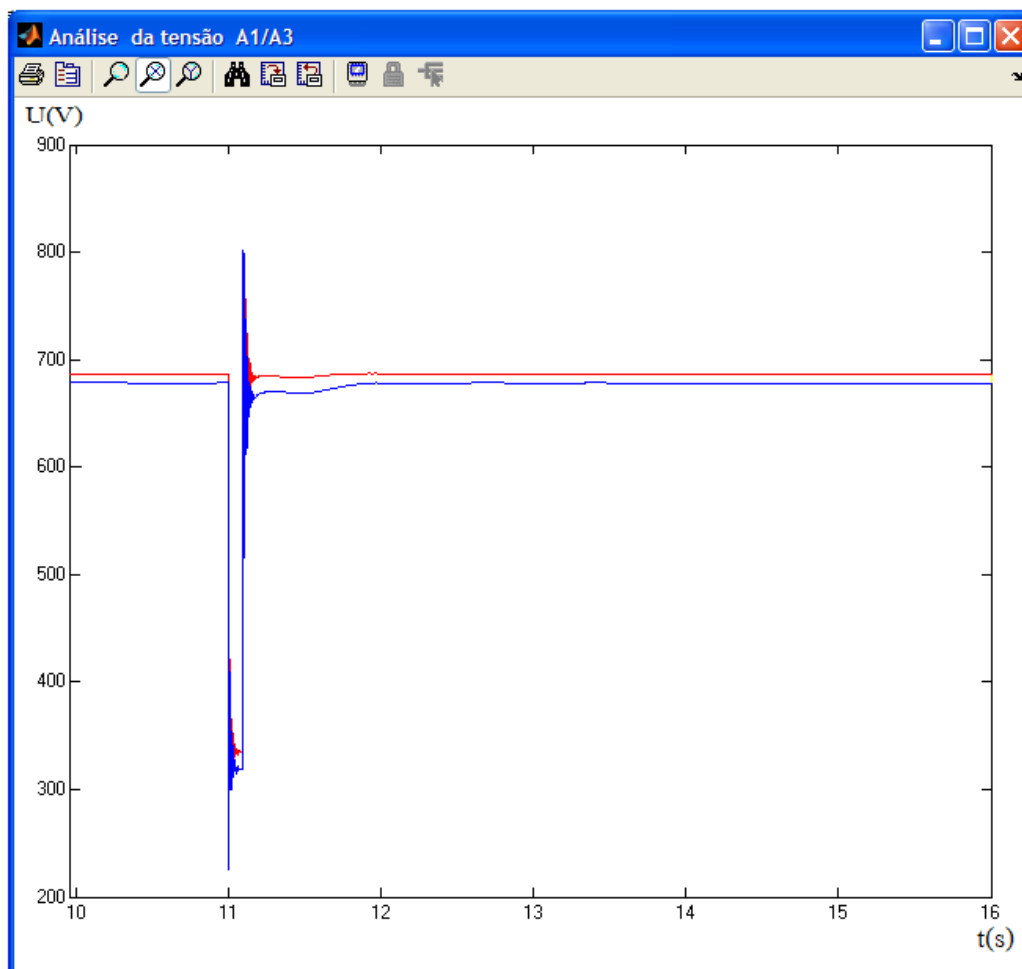


Figura 71 – Análise das tensões dos aerogeradores A1 e A3 após um curto-circuito de 100 ms.

O aerogerador duplamente alimentado no momento da falha, a tensão não cai de forma tão extensa ficando pelos 320 volts. Com a extinção da falha, nota-se que a tensão não sobe tanto como no anterior gerador, recuperando a tensão nominal ao cabo de 4 ms.

Esta recuperação, quase instantânea, é obtida pela ação rápida do conversor que alimenta o rotor na máquina duplamente alimentada.

5.2.3. RAJADA DE VENTO

Este capítulo pautar-se-á por alguns ensaios. Inicialmente, vai-se aplicar o bloco de vento da figura 72 ao aerogerador A1 para se verificar o comportamento deste aerogerador, bem como os restantes aerogeradores do parque eólico. Seguidamente, colocar-se-á este bloco somente no aerogerador A3 e, por fim, nos dois aerogeradores supracitados ao mesmo tempo.

Como foi referido anteriormente, o primeiro estudo começa por utilizar o bloco de vento no aerogerador A1, gerador assíncrono duplamente alimentado. A figura 73 mostra o comportamento do aerogerador perante uma rajada de vento com 50 m/s, onde se verifica que o gerador reage de uma forma muito satisfatória, ficando a produzir cerca de 0,9 pu após a rajada de vento. Para além disso, o aerogerador A3 bem como os restantes ficam a produzir como se nada tivesse acontecido.

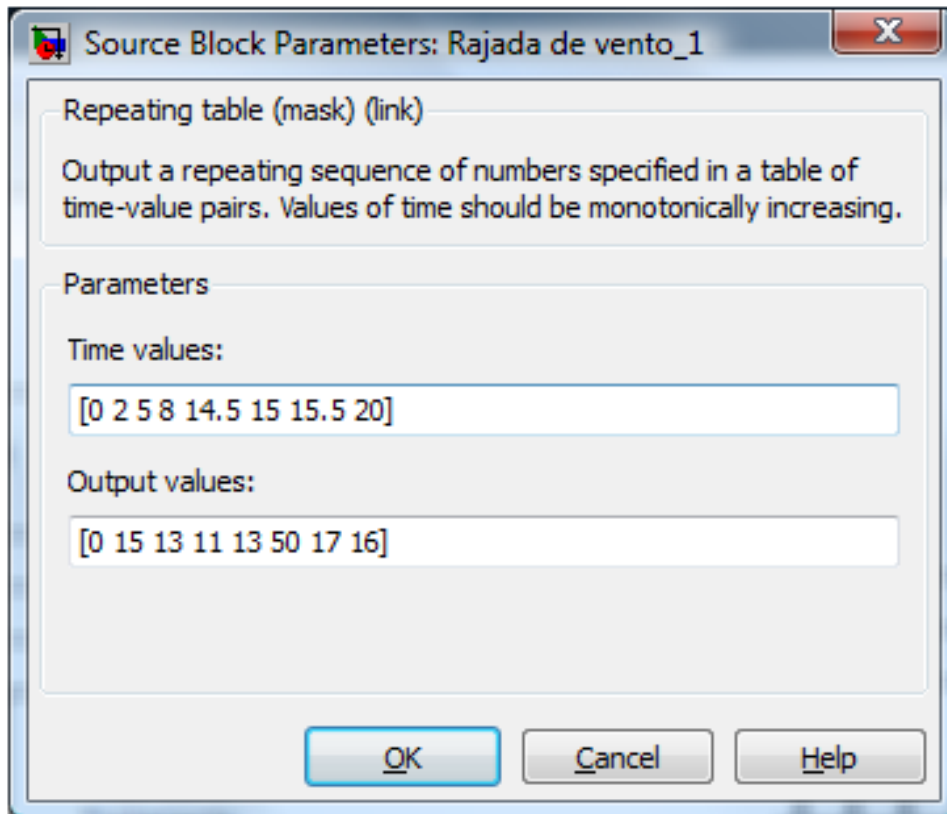


Figura 72 - Bloco para a simulação de rajada de vento no aerogerador 1 e 3.

Posteriormente, o mesmo bloco é aplicado ao aerogerador 3. Este aerogerador com a ocorrência desta velocidade de vento na sua turbina fica fora de serviço, como pode ser observado na figura 74.

É possível ainda verificar que, através do ensaio, o A1 fica fora de serviço bem como o A2. O mesmo não acontece com o A4 que é de velocidade fixa, fica a trabalhar como pode ser observado na figura 75. Nota-se que o A4 sente a rajada de vento. Observando os valores de “ W_r ”- velocidade do rotor, verifica-se que a máquina desce de rotação, alterando assim o valor da potência ativa quer reativa.

Por fim, vai ser colocado o bloco de vento em A1 e A3 ao mesmo tempo. O que acontece, como demonstra a figura 74, é que os aerogeradores A1 e A3 deixam de funcionar. Na figura 77, constata-se que o aerogerador A2 também fica fora de serviço com a ocorrência deste fenómeno nos aerogeradores vizinhos.

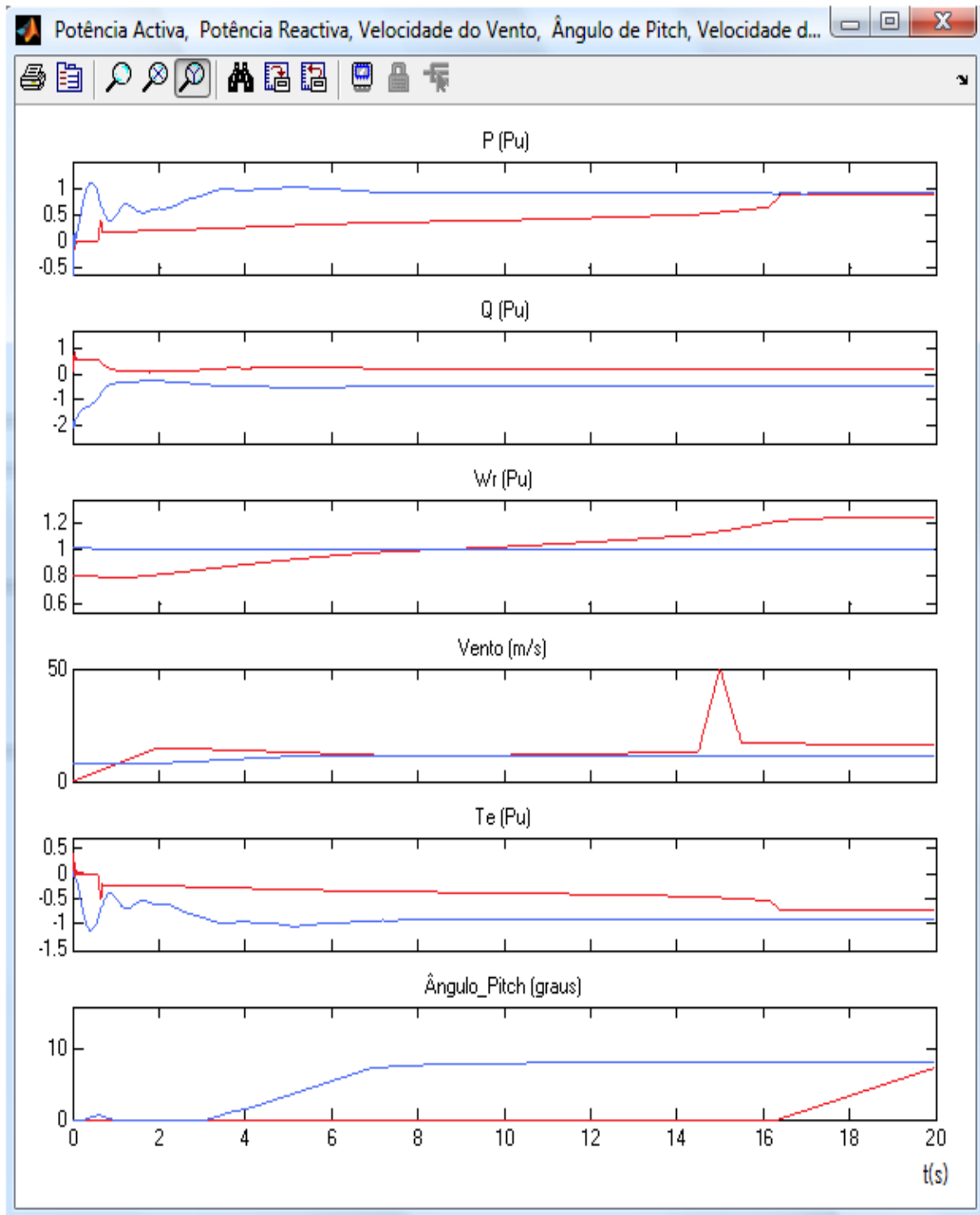


Figura 73 – Análise gráfica dos aerogeradores A1 e A3 com a ocorrência de rajada de vento em A1.

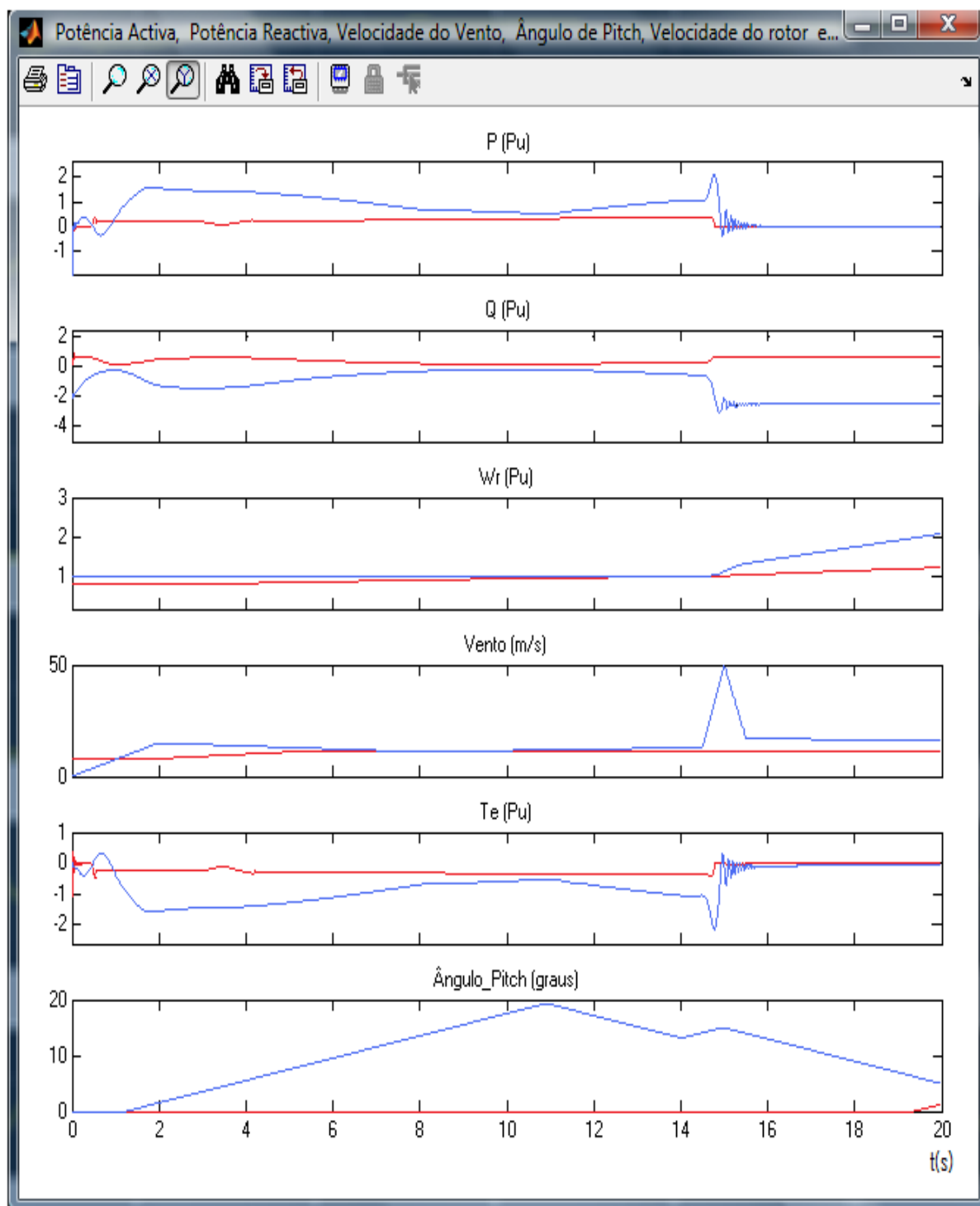


Figura 74 – Análise gráfica dos aerogeradores A1 e A3 com a ocorrência de rajada de vento em A3.

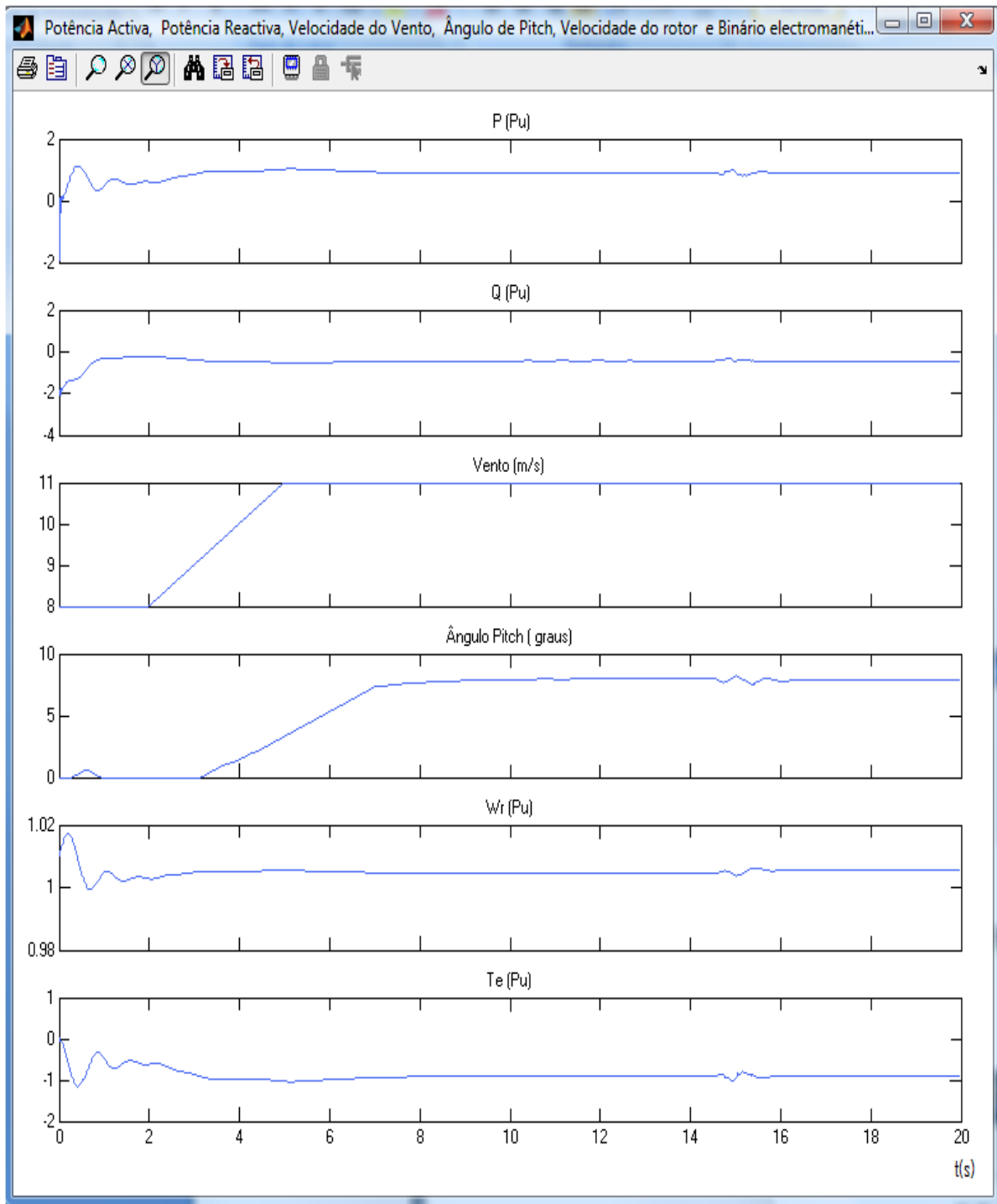


Figura 75 – Análise gráfica do aerogerador A4 com a ocorrência de rajada de vento em A3.

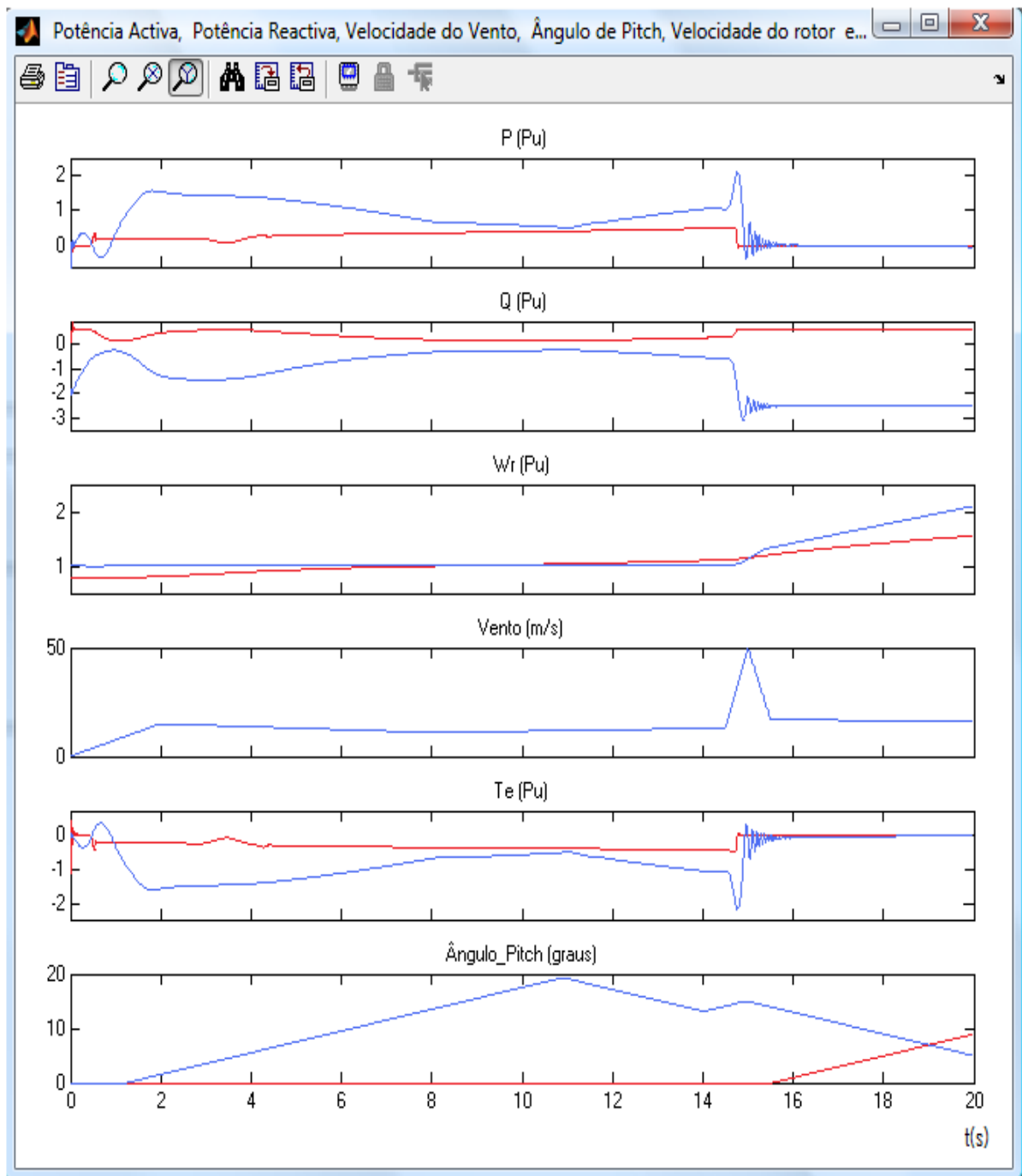


Figura 76 – Análise gráfica dos aerogeradores A1 e A3 com a ocorrência de rajada de vento em A1 e A3.

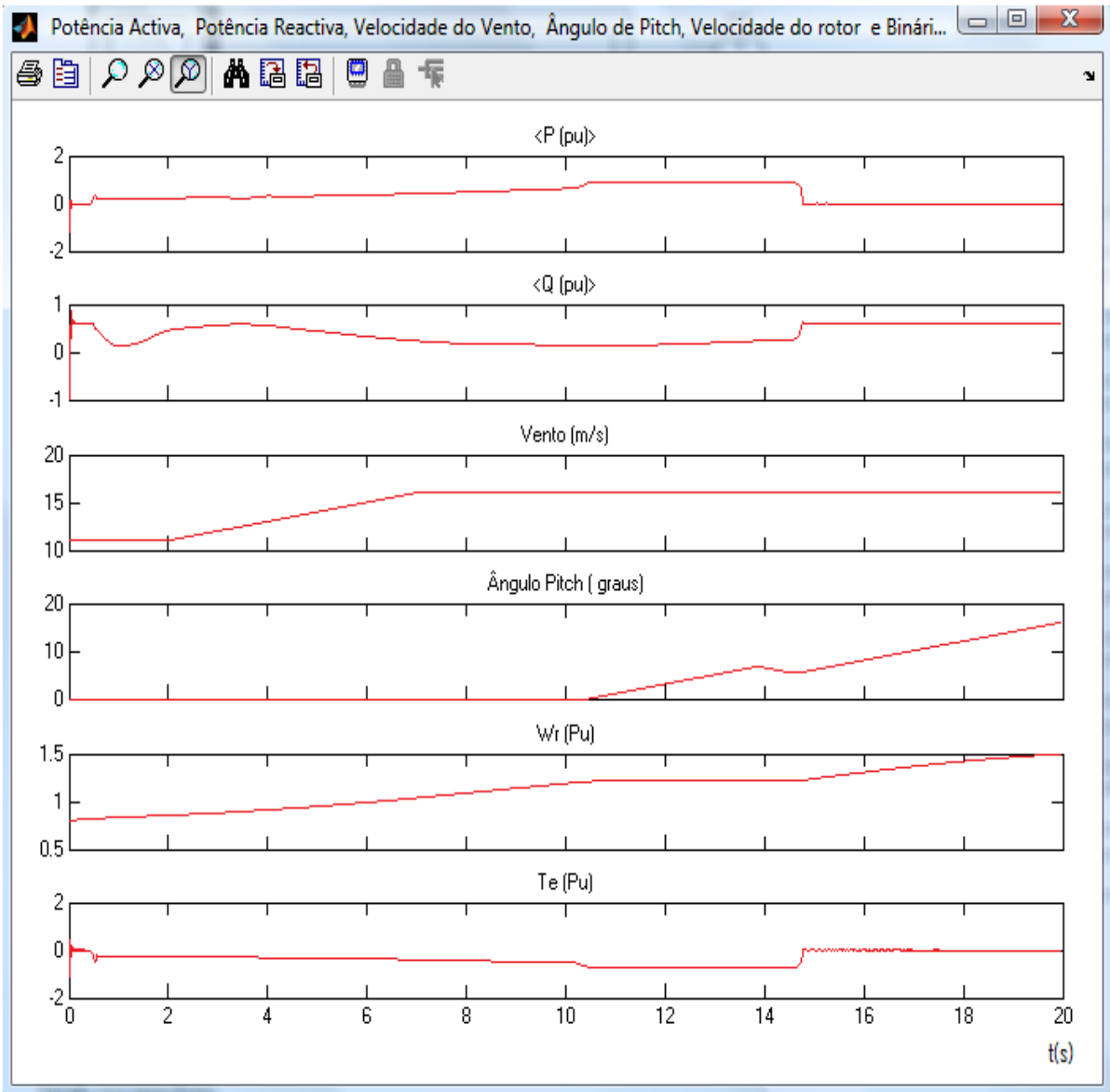


Figura 77 – Análise gráfica do aerogerador A2 com a ocorrência de rajada de vento em A1 e A3.

5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DO PARQUE S2

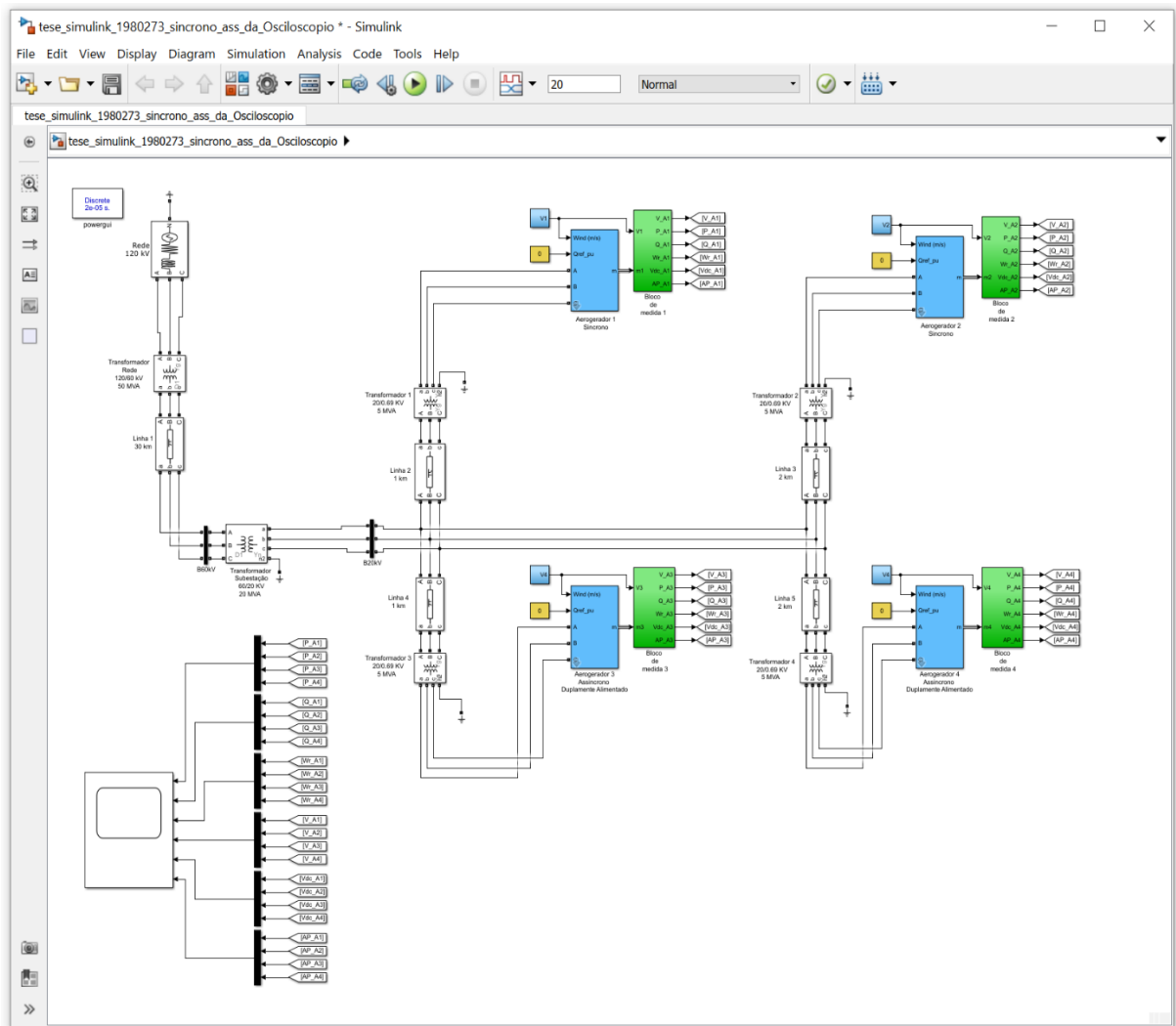


Figura 78 – Esquema do parque eólico com aerogeradores síncronos de ímãs permanentes e com aerogeradores assíncronos duplamente alimentados.

Este parque eólico tem exatamente a mesma disposição que os parques anteriormente estudados, sendo constituído por 2 tipos de máquinas diferentes, com duas máquinas cada, como pode ser observado na figura 78. Todos os equipamentos de medida, transformadores e impedâncias de linha foram mantidos para cada aerogerador.

5.3.1. EXCESSO DE CONSUMO DE POTÊNCIA REATIVA

Na figura 79 é possível verificar o gráfico correspondente às potências ativa e reativa dos aerogeradores 2 e 4, síncrono de imanes permanentes e assíncrono duplamente alimentados respectivamente.

Como tinha sido referido já no capítulo anterior, a máquina síncrona não consome praticamente energia reativa e a máquina assíncrona duplamente alimentada consome, embora o valor não é excessivo como pode ser observado na figura apresentada. O maior problema é mesmo o arranque da máquina assíncrona que chega a atingir um valor de 2 pu encontrando a sua estabilidade quando atinge os 3 s.

Na figura 80 verifica-se o comportamento do conversor de ambos os aerogeradores, o conversor do aerogerador assíncrono, no seu início, chega a atingir um pico de tensão na ordem dos 1350 V mas estabiliza praticamente de forma instantânea enquanto que o conversor síncrono ajusta a sua tensão de modo a ficar estável e isso verifica-se no gráfico das potências que não tem grande oscilação.

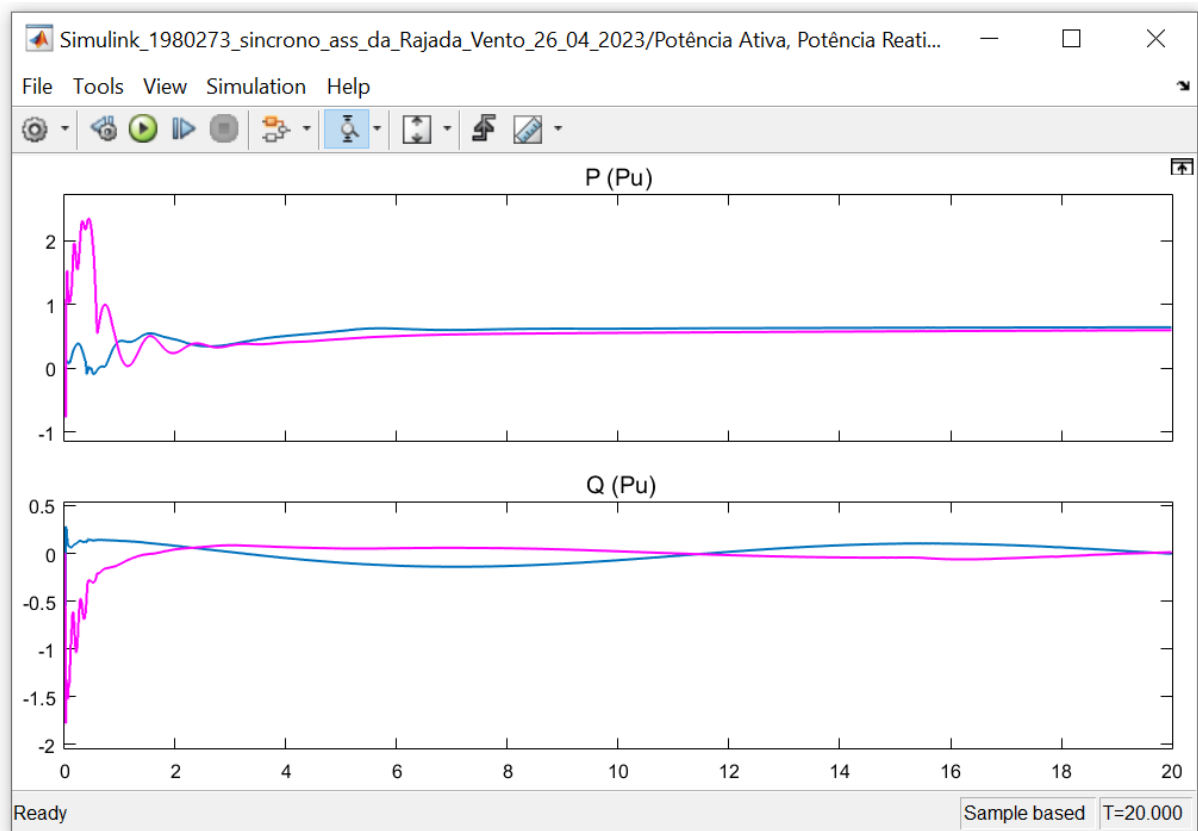


Figura 79 – Análise gráfica das potências ativa e reativa do Aerogerador 2 e 4.

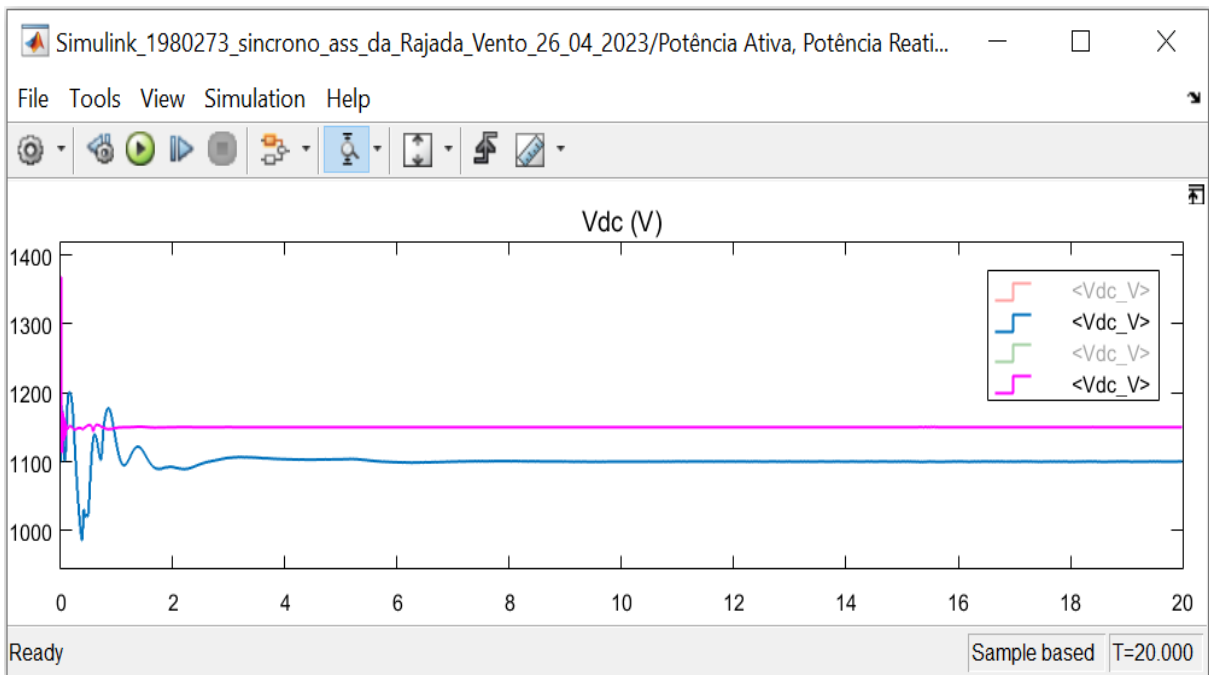


Figura 80 – Análise gráfica das tensões no conversor do Aeroerador 2 e 4.

5.3.2. CAVA DE TENSÃO

Assim como foi estudado no capítulo 5.2.2, irá ser avaliada a reação do aerogerador assíncrono duplamente alimentado e o aerogerador síncrono de imanes permanentes ao curto-circuito trifásico no barramento “B60kV” com uma duração de 100 ms.

Na figura 81 observa-se a análise gráfica do ensaio com o tempo de 20 s, dando maior relevância ao tempo de ocorrência do defeito e a sua respetiva recuperação onde ocorre a anomalia aos 11 s. O aerogerador síncrono, aqui representado pela cor vermelha, e o aerogerador assíncrono duplamente alimentado, cor verde, verifica-se que estes tipos de máquinas reagem de forma diferente ao defeito, a máquina síncrona recupera em menos tempo a sua estabilidade. Ao analisar o gráfico Vdc, ou seja, a tensão do conversor, verifica-se que o defeito quando deixa de estar presente o conversor do aerogerador síncrono estabiliza a tensão, enquanto que o aerogerador assíncrono demora imenso a recuperar a sua estabilidade. No que diz respeito ao controlo de *Pitch*, o aerogerador 3 reage mais à adversidade, enquanto o aerogerador 1 praticamente mantém-se igual. Esta situação poderá existir devido ao facto de a máquina síncrona ter uma velocidade maior para as mesmas condições de vento, vento constante de 11 m/s. Ao longo deste ensaio, nenhum dos 4 aerogeradores saiu de serviço devido à ocorrência do curto-circuito fora do parque eólico.

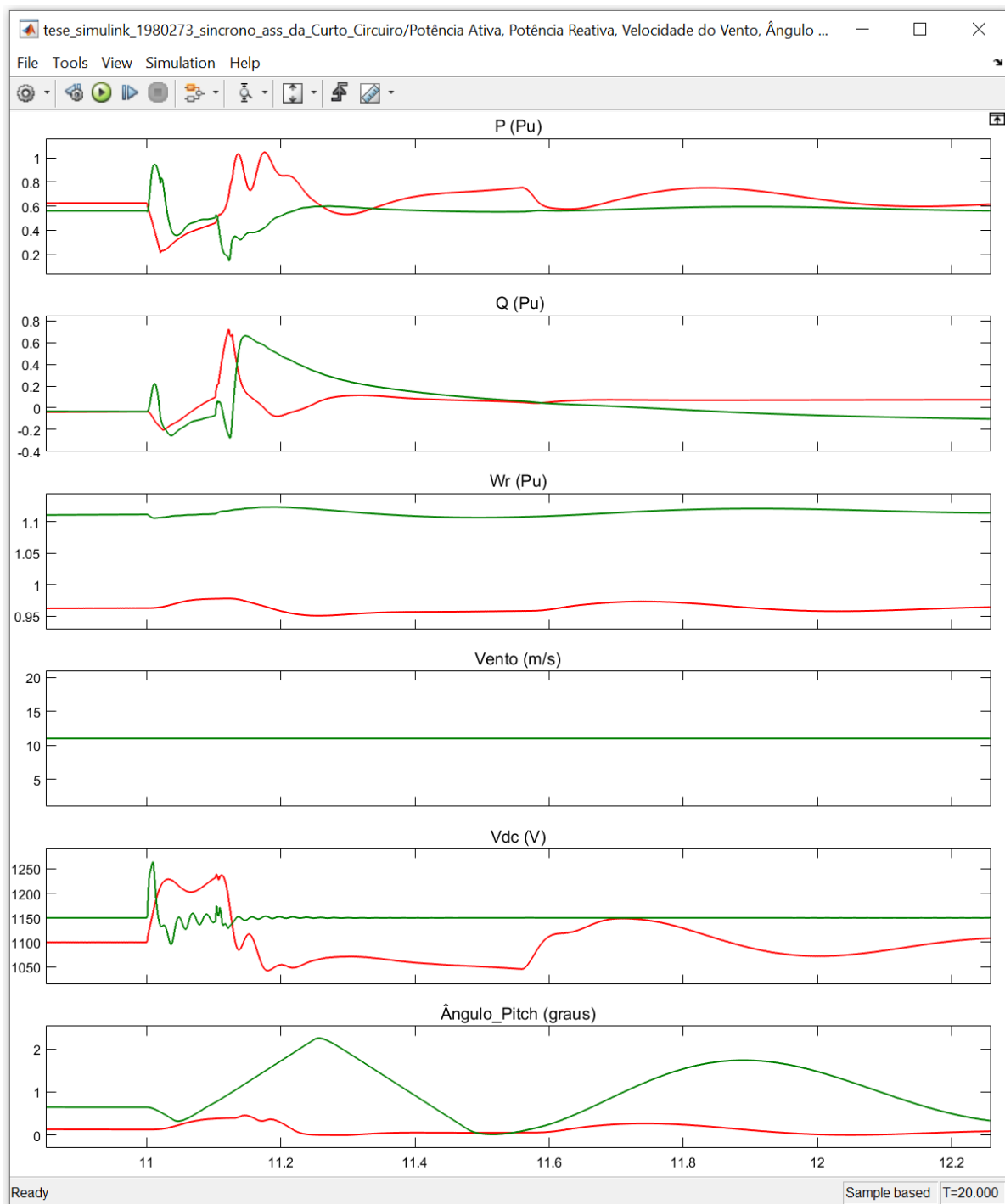


Figura 81 – Análise gráfica do Aerogerador 1 e Aerogerador 3 perante o curto-circuito.

5.3.3. RAJADA DE VENTO

Neste capítulo irá ser estudado o comportamento destes dois aerogeradores perante as mesmas condições de vento, as quais irão ser apresentadas no bloco da figura 82. O vento é variável e sem grande oscilação, aos 15 segundos de ensaio dar-se-á uma rajada de vento de 50 m/s nos aerogeradores 1 e 3.

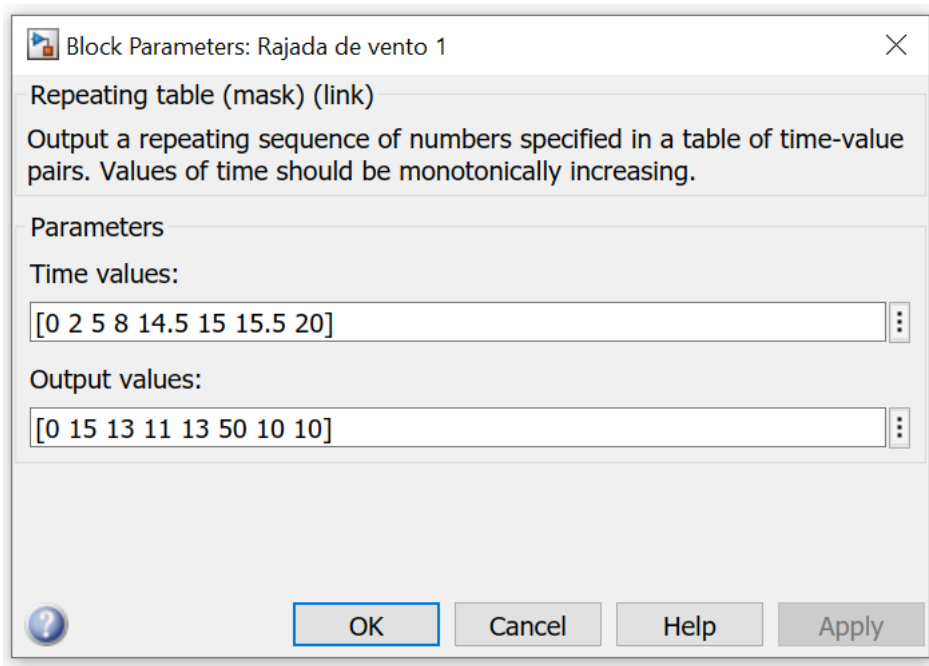


Figura 82 - Bloco para a simulação de rajada de vento.

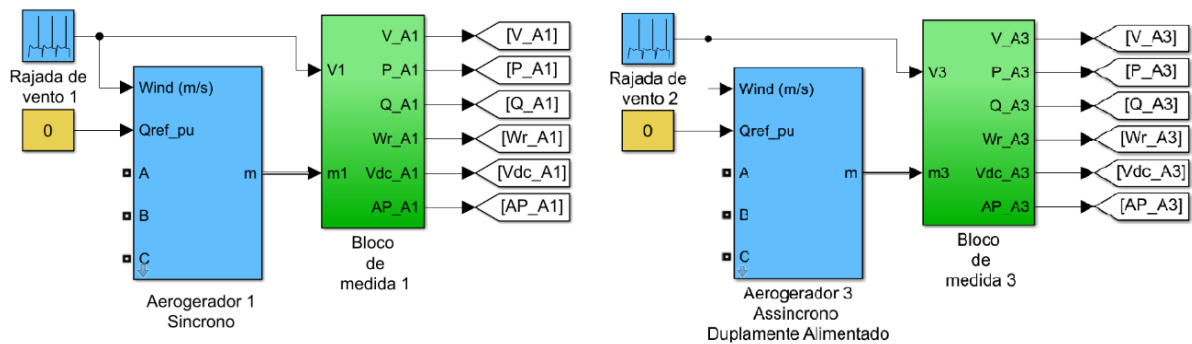


Figura 83 – Pormenor dos diferentes tipos de aerogeradores onde os blocos de vento estão inseridos.

Na figura 84 estão apresentados os desempenhos dos aerogeradores relativamente às condições de vento propostas. O aerogerador 1 e 3 estão com as condições referidas no bloco da figura 81 e os aerogeradores 2 e 4 estão com uma condição de vento constante de 11 m/s.

O aerogerador 1 apresenta-se com a cor vermelha, o aerogerador 2 com a cor azul, o aerogerador 3 com a cor verde e por fim o aerogerador 4 com a cor lilás.

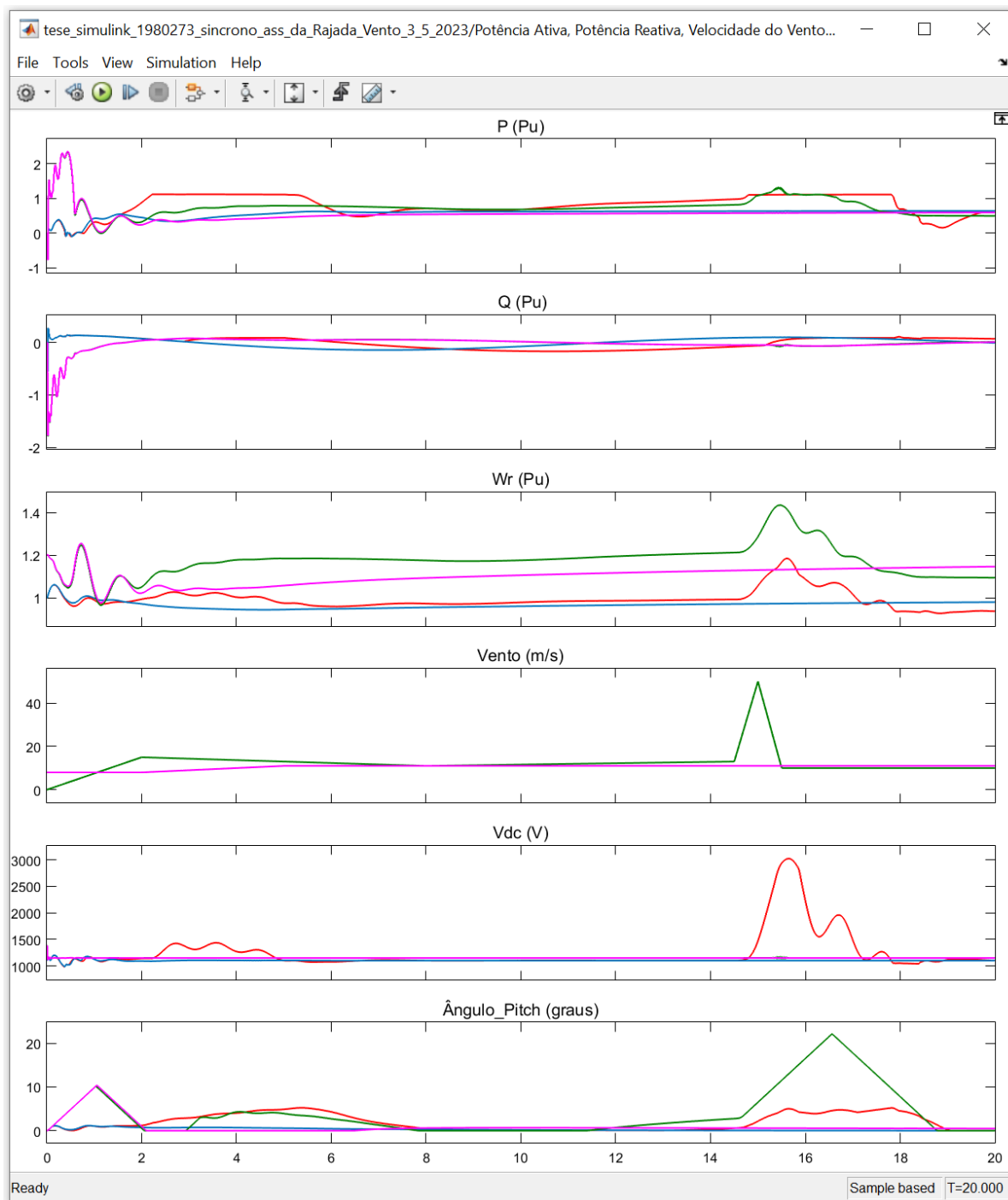


Figura 84 – Análise gráfica dos aerogeradores A1, A2, A3 e A4 com a ocorrência de rajada de vento.

Seguidamente, irão ser estudadas as diferenças de comportamento dos aerogeradores 1 e 3 perante as referidas condições adversas de vento.

É possível verificar que a análise gráfica das potências é muito semelhante entre ambos, mas o comportamento da tensão do conversor é bastante diferente. O aerogerador síncrono é bastante mais estável, pois a sua tensão praticamente não tem nenhuma oscilação e a sua

velocidade é sempre superior quando comparada à da máquina assíncrona. Assim como no capítulo anterior, ensaio de curto-circuito, o controlo do ângulo de *Pitch* é bastante mais ativo chegando a ser quase quatro vezes maior perante a rajada de vento.

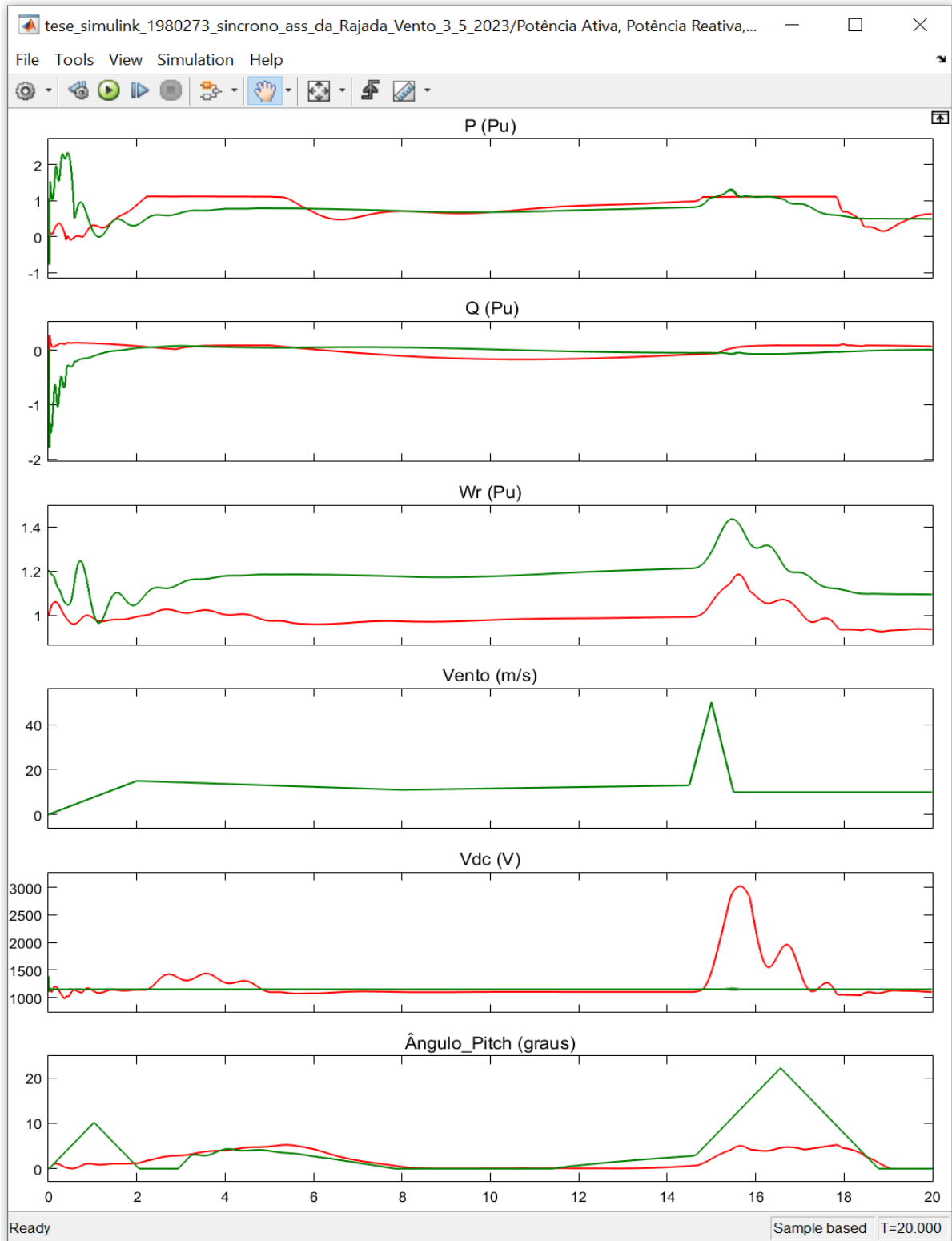


Figura 85 – Análise gráfica dos aerogeradores A1 e A3 com a ocorrência de rajada de vento.

5.4. CONCLUSÃO

Em suma, as máquinas aqui apresentadas têm um comportamento divergente, perante os fenómenos aqui estudados. Efetivamente, a máquina síncrona de ímanes permanentes aqui apresentada, traz mais vantagens em ser utilizada, quer no consumo de energia reativa, quer perante ocorrências de cavas de tensão provocadas por curto-circuito ou, eventualmente, entrada em serviço de grandes cargas na rede, bem como fenómenos atmosféricos, como foi o caso apresentado de uma rajada de vento incidida nas turbinas dos aerogeradores. Apesar de se revelarem geradores mais eficientes e compactos com menores perdas de energia, eles têm uma limitação em relação à velocidade de rotação máxima e são mais adequados para aplicações de baixa potência. Para além do referido, é importante avaliar custo-benefício em relação ao desempenho e à eficiência do gerador, uma vez que o conversor usado neste tipo de aerogerador é extremamente caro, sendo por vezes quase o mesmo preço do próprio aerogerador.

Por outro lado, embora o aerogerador assíncrono se tenha revelado uma máquina não tão vantajosa quando comparada com o síncrono, a sua dupla alimentação permite que o gerador opere em velocidades variáveis e forneça controle de potência superior em relação ao gerador síncrono de ímãs permanentes. Estes geradores são mais adequados para aplicações de alta potência.

6. CONCLUSÕES

A qualidade de energia está dependente de diversos fatores, quer a nível da otimização tecnológica, quer a nível da implementação do trabalho projeto.

Nas últimas décadas, tem existido um forte investimento na procura de alternativas aos combustíveis fósseis, onde se destaca o reforço a nível mundial na preconização das energias renováveis. Neste âmbito, a energia eólica tem ocupado um papel de grande destaque, nomeadamente com instalação de parques eólicos *offshore*. Esta exigência obriga a que os construtores projetem aerogeradores de maior dimensão e potência.

A participação dos aerogeradores na regulação da tensão é um fator preponderante em qualquer equação energética, uma vez que tem uma grande importância para a análise da estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica com forte penetração de energia eólica.

Assim sendo, com o estudo das diversas simulações dos parques eólicos apresentados no decorrer desta dissertação, procurou-se encontrar o aerogerador mais eficiente na produção de energia e com a menor perturbação na rede. De facto, realizados os diferentes ensaios demonstrou-se a eficiência das máquinas, quando expostas a problemáticas como: consumo de energia reativa, cava de tensão na rede provocada por uma ocorrência de curto-circuito fora do parque e a existência de uma rajada de vento.

Num primeiro momento, constatou-se que os aerogeradores assíncronos diretamente ligados à rede, têm um consumo elevado de energia reativa e não têm a capacidade de participar na regulação de tensão, contribuindo assim para a instabilidade de tensão do sistema elétrico. Uma forma de atenuar este problema é a utilização de baterias de condensadores para a correção do fator de potência. No entanto, importa salientar que mesmo com o recurso a este equipamento, verificou-se que os parques eólicos sem capacidade de regulação de tensão através da não injeção de energia reativa acabam por sair de serviço, conforme foi verificado no ensaio da rajada de vento.

De seguida, destacaram-se as principais tecnologias dos aerogeradores de grande potência, realçando os geradores de indução duplamente alimentados e os geradores síncrono de ímanes permanentes que têm vindo a substituir os tradicionais geradores de indução ligados diretamente à rede.

No que respeita às máquinas de indução duplamente alimentadas, embora assíncrona, o conversor que a equipa permite-lhe a regulação de tensão através da injeção de energia reativa para estabilizar a rede elétrica. Todavia, a potência dos conversores é de somente cerca de 30 % da potência nominal da máquina o que não a torna totalmente isolada da rede. De facto, os conversores são muito sensíveis e podem ficar expostos a correntes elevadas durante a ocorrência de defeitos.

Relativamente às máquinas síncronas de ímanes permanentes, são reconhecidas por terem um bom comportamento face a cavas de tensão, consumo de energia reativa e conforme explicito no ensaio perante uma rajada de vento. O conversor desta máquina permite o isolamento total entre a rede elétrica e o gerador originando maiores níveis de eficiência de energia na rede.

Finda esta sequência de ensaios, conclui-se que a máquina síncrona de ímanes permanentes obteve um melhor desempenho nos casos aqui estudados, sendo aquela que em condições normais cria menor perturbação na rede. Por outro lado, apesar de ser a máquina mais eficiente pode não ser a melhor solução, em virtude do custo monetário do conversor ser extremamente elevado.

Para além da dissertação aqui explanada, a reflexão em trabalhos futuros, tendo estas simulações como base e em torno das problemáticas da rede, poderá revelar-se importante o aprofundar do estudo dos harmónicos e do efeito de *flicker*.

Referências Bibliográficas

- [1] <https://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2020/12/PNEC-2030-Plano-Nacional-Energia-e-Clima.pdf>, dezembro 2022.
- [2] <https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/03/GWEC-GLOBAL-WIND-REPORT-2022.pdf>, setembro 2022.
- [3] <https://gwec.net/gwec-releases-global-wind-turbine-supplier-ranking-for-2020>, setembro 2022.
- [4] <https://www.vestas.com/en/products/track-record>, setembro 2022.
- [5] <https://www.vestas.com/en/products/offshore/V164-10-0-MW>, setembro 2022.
- [6] <https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW/V236-15MW>, setembro 2022.
- [7] <http://noctula.pt/maiores-aerogeradores-do-mundo>, setembro 2022.
- [8] SANKARAN, C. – Power Quality, 2002. ISBN: 0-8493-1040-7.
- [9] <https://www.erse.pt/media/xu5g55m1/mpqs-vers%C3%A3o-livro-2021.pdf>, setembro 2022.
- [10] <https://webstore.iec.ch/publication/4156>, setembro 2020.
- [11] <https://webstore.iec.ch/publication/4140>, setembro 2020.
- [12] <https://webstore.iec.ch/publication/4155>, setembro 2020.
- [13] <https://ieeexplore.ieee.org/document/6053977>, setembro 2022.
- [14] <https://www.researchgate.net/publication/259538547>, outubro 2022.
- [15] <https://www.voltimum.pt/sites/www.voltimum.pt/files/pdflibrary/harmonicass.pdf>
- [16] <https://powercontrol.pt/pt/o-que-sao-harmonicass>
- [17] https://paginas.fe.up.pt/~jpl/textos/QUAT_FF.pdf, outubro 2022.
- [18] Godfrey Boyle – Renewable Energy, 2004. ISBN: 0-19-926178-4.
- [19] Sathyajith Mathew – Wind Energy, 2006. ISBN: 3-540-30905-5.
- [20] Vladislav Akhmatov – Induction Generators for Wind Power, 2005. ISBN: 0-906522-40-4.
- [21] PATEL, Mukund R. – Wind and Solar Power Systems, 1999. ISBN: 0-8493-1605-7.
- [22] CASTRO, Rui - Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-Hídrica, 2011. ISBN: 978-972-8469-01-6.

- [23] JARDIM, A. Utilização de Máquina de Indução Duplamente Alimentada sem Escovas como Gerador Eólico. 2014.
- [24] <https://www.trustenergy.pt/pt/activity/asset/terras-altas-de-fafe>, outubro 2022.
- [25] CONCORDIA, Charles – Synchronous machines, theory and performance, John Wiley & Sons, 1951.
- [26] https://e2p.inegi.up.pt/relatorios/Portugal_Parques_Eolicos_2021.pdf, outubro 2022.
- [27] <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2021-statistics-and-the-outlook-for-2022-2026>, outubro 2022.
- [28] <https://www.observatoriodaenergia.pt/pt/comunicar-energia/post/10311/boletim-producao-de-eletricidade>, outubro 2022.
- [29] <https://windeurope.org/about-wind/daily-wind/top-countries>, outubro 2022.
- [30] <https://datahub.ren.pt/pt/eletricidade/balanco-diario>, outubro 2022.
- [31] <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>, outubro 2022.
- [32] <https://www.iea.org/reports/wind-electricity>, outubro 2022.
- [33] <https://www.power-technology.com>, outubro 2022.
- [34] <https://orsted.co.uk/energy-solutions>, outubro 2022.
- [35] <https://www.power-technology.com/projects/alta-wind-energy-center-awec-california>, novembro 2022.
- [36] <https://www.natgeo.pt/meio-ambiente/2017/12/veja-o-primeiro-parque-eolico-flutuante-do-mundo>, novembro 2022.
- [37] <https://www.equinor.com/energy>, novembro 2022.
- [38] <https://www.equinor.com/news/20221114-first-power-from-hywind-tampen>, novembro 2022.
- [39] <https://www.nsenergybusiness.com/projects/hywind-tampen-floating-wind-farm>, dezembro 2022/.
- [40] <https://www.nsenergybusiness.com/projects/windfloat-atlantic-project>, dezembro 2022.
- [41] <https://www.edp.com/en/innovation/windfloat>, dezembro 2022.
- <https://www.minhodigital.com/news/parque-eolico-flutuante-ao>, dezembro 2022.