

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Microgeração na rede de BT - Limites Técnicos

Rui André de Jesus Silva

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof^a Doutora Maria Teresa Costa P. da Silva Ponce de Leão

Julho de 2009

Resumo

Hoje em dia, tem se verificado que o Planeta Terra tem vindo a ser fustigado pelas alterações climáticas resultado da poluição ambiental provocada pelo Homem. Assim os países mais desenvolvidos estabeleceram compromissos relativamente às emissões de gases com efeito de estufa, tendo por base o Protocolo de Kyoto com o objectivo de minimizar estes efeitos deletérios.

A iniciativa «Renováveis na Hora» é uma das medidas previstas no plano para a política de energia e alterações climáticas, apresentado em Fevereiro de 2008, pelo Ministério da Economia e da Inovação português.

Actualmente, em Portugal, existe um mercado emergente para a MG, que se rege segundo a legislação aplicada recentemente, que estabelece o novo regime jurídico aplicável à produção de energia por intermédio de unidades de microprodução. Esta iniciativa levará à criação de um novo paradigma de exploração e utilização de energia. Deste modo, é fundamental avançar com alguns alertas das condições de exploração.

Foi estudado um sistema microeólico (ME), porque sendo uma tecnologia em que se prevê um grande crescimento de investimento a nível nacional, quer na integração na rede quer mesmo na sua industrialização, se afigura como de interesse relevante para o estudo uma vez que o seu diagrama de produção não coincide em valores ao longo do tempo, em geral, com as necessidades registadas nos diagramas da procura.

Assim o propósito deste trabalho é estudar o impacto da introdução de microgeração, foi modelizada uma rede de distribuição em baixa tensão típica com inserção de um sistema de microgeração eólico, na qual foram simulados os trânsitos de potência nas linhas tendo em atenção á produção dos sistemas microeólicos e os limites técnicos associados. Para efeitos de simulação foi utilizado o programa IPSA Power.

Os resultados estão comentados para cada cenário de exploração.

Palavras-chave: microgeração, microgeração eólica, micro-turbinas, rede de distribuição em baixa tensão

Abstract

Climatic changes are the result of human pollution. Aware of this, humankind, by the action of our governors established compromises reducing the level of GHG country emissions and made a compromise settled in Kyoto Protocol.

The initiative «Renewables in one hour» consists as one of the measures foreseen by the portuguese government plan to mitigate climate changes. This plan was presented in 2008 February by the Minister of Economy and Innovation.

Today in Portugal there is an emergent market for microgeneration. Legislation will lead to a new paradigm regarding exploitation and use of energy. This way it is crucial to provide new conditions for the exploitations of these systems in adequate and safe conditions.

As we foresee a great deployment for microeolic systems, we studied the impact regarding big scale network integration for these systems taking into account that the production diagram of these kind of systems are not correlated with consumption figures.

Was studied a microeolic system, because it is a technology which provides a large growth of investment at national level, both in integrating the network and even in its industrialization, is as interest for the study since the your diagram does not coincide in the production values over time in general with the needs of demand recorded in the charts.

As such the main purpose of this work was the study the behavior of a Low Voltage network with a Great deal of penetration of these kind of systems. To simulate the work out in near real conditions we used IPSA Power software.

The results are commented for several scenario of exploitation.

Keywords: *microgeneration, small wind turbines, micro turbines, low voltage distribution network*

Agradecimentos

À minha orientadora, Prof. Dr^a. Maria Teresa Costa Pereira da Silva Ponce de Leão, pelos seus conselhos motivadores e por ter aceite este desafio.

Ao Prof. Dr. Hélder Leite, pela sua disponibilidade e fundamental ajuda neste trabalho.

A todos os meus colegas pelo companheirismo demonstrados.

Aos meus amigos, em especial ao Filipe, Bernardo e Ricardo, pelo apoio nos momentos difíceis e me manterem sempre motivado.

Aos meus pais e irmãos, por todo o apoio revelado nos momentos mais complicados.

À minha esposa, companheira e amiga Diana. Neste últimos anos tem sido uma fonte de motivação e uma presença preciosa na minha vida, nos momentos mais difíceis demonstrou sempre a paciência e compreensão que necessitava.

Aos meus sogros e cunhados, pelo apoio e motivação que me deram até ao fim.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos.....	vii
Índice	ix
Lista de figuras.....	xi
Lista de tabelas	xiii
Abreviaturas e Símbolos	xv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Caracterização do problema	1
1.2 - Caracterização da metodologia a adoptar	4
1.3 - Motivação	5
1.4 - Enquadramento legal	6
1.5 - Objectivos	7
1.6 - Estrutura da dissertação	8
Capítulo 2	9
Microgeração Eólica	9
2.1 - Recurso eólico	9
2.2 - Tecnologia eólica.....	11
2.3 - Turbinas eólicas	14
2.3.1- Aerogerador de eixo vertical.....	14
2.3.2- Aerogerador de eixo horizontal.....	17
2.4 - Gerador	21
2.4.1 - Gerador síncrono	21
2.4.2 - Gerador assíncrono.....	21
2.4.3- Sistema de controlo.....	22
2.4.4- Medição do vento	22

2.5 - Características dos principais tipos de aerogeradores	22
2.5.1- Aerogerador de indução convencional	22
2.5.2- Aerogerador Síncrono	23
2.5.3- Aerogerador de indução duplamente alimentado	24
2.6 - Mecanismos de controlo	26
2.6.1- Controlo de passo Variável	26
2.6.2- Controlo de passo fixo	27
2.7 - Exemplos de microgeradores eólicos	28
2.7.1- Turbina micro-éolica T.Urban	28
2.7.2- Turbina micro-éolica Donqi	29
2.7.3- Turbina micro-éolica Proven	30
2.8 - Interligação com a rede	31
Capítulo 3	35
Impacto da geração eólica na rede eléctrica	35
3.1 - Impacto em regime dinâmico	35
3.1.1 - Qualidade de energia e aerogerador	36
3.1.2 - Fenómenos adicionais relacionados a aerogeradores	37
3.2 - Impacto em regime estacionário	38
Capítulo 4	39
Plataforma de Simulação da rede BT	39
4.1 - Introdução	39
4.2 - Ferramenta de simulação	39
4.3- Caracterização da rede de baixa tensão	40
4.4- Modelização do microgerador	44
Capítulo 5	49
Apresentação e Análise de Resultados	49
5.1 - Apresentação de resultados	49
5.2 - Caso em que os consumidores apresentam valores máximos de carga	49
5.2.1 - Cenário 1 da rede de baixa tensão sem ME's	50
5.2.2 - Cenário 2 da rede de baixa tensão com ligação dos ME (1000W)	51
5.2.3 - Cenário 3 da rede de baixa tensão com ligação de ME (2500W)	52
5.3 - Caso em que os consumidores apresentam valores de vazio de carga	55
5.3.1 - Cenário 1 da rede de baixa tensão sem ME	55
5.3.2 - Cenário 2 da rede de baixa tensão com ligação de ME (1000W)	56
5.3.3 - Cenário 3 da rede de baixa tensão com ligação de ME (2500W)	57
Capítulo 6	61
Conclusões e Perspectivas Futuras	61
6.1 - Conclusões	61
6.2 - Perspectivas futuras	62
Referências	63
Anexos	67
Anexo 1 - Características gerais de alguns modelos de micro-turbinas eólicas	67
Anexo 2 - Características técnicas de micro-turbinas eólicas	71
Anexo 3 - Diagramas de Carga	73

Lista de figuras

Figura 1- Atlas Eólico de Portugal (fonte INETI)	2
Figura 2- Potência produzida em função da Área de varrimento da turbina	13
Figura 3- Esquema do princípio de funcionamento do rotor de Savonius	15
Figura 4- Esquema do rotor de Savonius	15
Figura 5 - Esquema do rotor de Darrieus.....	15
Figura 6- Esquema de uma eólica de eixo horizontal "upwind"	17
Figura 7- Esquema de uma eólica de eixo horizontal "downwind"	18
Figura 8- componentes de uma turbina eólica	18
Figura 9- diâmetro das pás e sua potência	19
Figura 10- Esquema simplificado de aerogerador de indução convencional e banco de condensadores [22].	23
Figura 11- Esquema simplificado de aerogerador síncrono de íman permanente [22].	24
Figura 12- Esquema simplificado de aerogerador com gerador de indução duplamente alimentado [22].....	25
Figura 13 - Micro-turbina T.Urban	28
Figura 14 - Potência característica da T.Urban.....	28
Figura 15 - Micro-turbina Donqi	29
Figura 16 Curva de potência da turbina eólica Proven	30
Figura 17 - - (a): Micro-turbina eólica com gerador síncrono com rectificador, barramento DC e inversor. (b): Micro turbina eólica com gerador síncrono com rectificador, barramento DC, <i>chopper</i> e inversor. (c): Micro turbina eólica com sistema de transmissão, gerador assíncrono com <i>soft starter</i> (d): Micro turbina eólica com gerador síncrono com conversor AC/AC [25]	32
Figura 18 - Diagrama de diferentes tipos de sistema de conversão operando a velocidade variável [11].....	32

Figura 19 - Comportamento durante curto-circuito	37
Figura 20 - Traçado da rede em estudo, com 48 nós e 46 linhas	41
Figura 21 - Linearização da curva de potência do aerogerador <i>Proven 2,5</i>	44
Figura 22 - Rede de Baixa tensão com ME distribuídos pelas 3 saídas da subestação	46
Figura 23 - Rede de Baixa tensão com ME distribuídos só numa saída da subestação	46
Figura 24 - Resultados das perdas activas totais em horas de ponta para os cinco cenários..	53
Figura 25 - Resultados das perdas reactivas totais em horas de ponta para os três tipos de cenários	53
Figura 26 - Características das tensões nos barramentos em horas de ponta nos cenários 1, 2 e 3	54
Figura 27 - Características das tensões nos barramentos em horas de ponta nos cenários 1, 4 e 5	54
Figura 28 - Resultados das perdas activas totais em horas de vazio para os cinco tipos de cenários	58
Figura 29 - Resultados das perdas reactivas totais em horas de vazio para os cinco tipos de cenários	58
Figura 30 - Característica das tensões nos barramentos em horas de vazio nos cenários 1, 2 e 3	59
Figura 31 - Característica das tensões nos barramentos em horas de vazio nos cenários 1, 4 e 5	59
Figura 32 - Curva de potência da turbina eólica	71
Figura 33 - Diagrama de Carga de cada habitação.....	73
Figura 34 - Diagrama de Carga de cada armário	74

Lista de tabelas

Tabela 1- Remuneração e limite da energia produzida para as tecnologias fotovoltaica e micro-eólica [6]	7
Tabela 2- Características dos aerogeradores [22].	25
Tabela 3 - Características da T.Urban	29
Tabela 4 - Característica da Donqi	30
Tabela 5 - Característica da Proven 2,5 kW	31
Tabela 6 - Denominação das variações de tensão de curtas durações	36
Tabela 7 - Relacionamento do impacto de tecnologias de aerogeradores nos parâmetros de qualidade de energia e fenómenos adicionais	38
Tabela 8- Características das linhas em pu	40
Tabela 9 - Tipo de habitação em função da potência contratada	42
Tabela 10 - Tipo de Armários em função do número de habitações	42
Tabela 11 - Localização dos armários para os respectivos barramentos	42
Tabela 12 - Limites das linhas da rede de baixa tensão.....	43
Tabela 13 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em horas de ponta ..	50
Tabela 14 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em horas de ponta	50
Tabela 15 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em horas de ponta e com introdução de microgeradores eólicos (1000W).	51
Tabela 16 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em horas de ponta e com introdução de ME (1000W).....	51
Tabela 17 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em horas de ponta e com introdução de microgeradores eólicos (2500W)	52
Tabela 18 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em horas de ponta e com introdução de microgeradores (2500W)	52

Tabela 19 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em vazio	55
Tabela 20 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em vazio	56
Tabela 21 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em vazio com ligação de microgeradores (1000W)	56
Tabela 22 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em vazio com microgeradores eólicos (1000W)	57
Tabela 23 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em vazio com ligação de microgeradores (2500W)	57
Tabela 24 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em vazio com microgeradores eólicos (2500W)	58
Tabela 25 - Características gerais de alguns modelos de micro-turbinas eólicas.....	67
Tabela 26 - Características gerais de alguns modelos de micro-turbinas eólicas (cont)	68
Tabela 27 - características técnicas de alguns microgeradores existentes no mercado	69
Tabela 28 - Características da turbina modelizada [28]	71

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

BT	Baixa Tensão
DGEG	Direcção-Geral de Energia e geologia
DL	Decreto-Lei
ME	Microgeradores Eólicos
MG	Microgeração
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
rpm	Rotações por minuto

Lista de símbolos

v_0	Velocidade instantânea do vento
ρ	Massa específica do ar
c_p	Coefficiente de Betz
A	Área de varrimento das pás da turbina
P	Potência activa
P_{dis}	Potência que o vento transfere à turbina
T	Binário mecânico induzido nas pás
W_R	velocidade angular do rotor
W	velocidade angular
λ	velocidade especifica na ponta da pá

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Caracterização do problema

Nos dias de hoje, nenhuma política económica séria pode ficar indiferente à questão das alterações climáticas provocadas pelo efeito de estufa resultado das emissões excessivas de dióxido de carbono. O mesmo se aplica, por maioria de razão, à política de energia uma vez que a energia que consumimos é responsável por cerca de 80€ das emissões de CO₂. Urge portanto tomar medidas que implicam comportamentos mais responsáveis no concerne a economia de energia e/ou redução do consumo de combustíveis fósseis.

A aplicação de medidas que visam o equilíbrio ambiental não é incompatível com uma estratégia de crescimento da economia [1], a investigação e tecnologia colocaram e continuarão a colocar à disposição das comunidades de meios que permitem menos consumo, produção a partir de fontes renováveis e medidas de mitigação do impacto negativo do consumo de energia. Em suma o problema ambiental que o nosso planeta enfrenta surge também como uma oportunidade para o desenvolvimento de fontes limpas de produto de energia com impacto no desenvolvimento económico.

A energia eléctrica é hoje em dia um bem imprescindível ao funcionamento de qualquer sociedade. A população mundial tem aumentado e com ela as necessidades energéticas também cresceram, pelo que se prevê um aumento gradual do consumo de energia eléctrica nos próximos anos [2] , responsável por grande parte das emissões se pensarem que o sector o sector energético é responsável por mais de 80% das emissões globais de CO₂ e que destas cerca de 60 % são resultantes de GGE, estima-se que o crescimento entre 2006 e 2030 em emissões, se nada for feito atinge 45%de CO₂.

Como já referido o impacto das alterações climáticas, obriga a medidas para reverter a situação. A aposta em fontes de energia renovável e não poluente tornou-se cada vez mais presente, constituindo uma forma de combater a dependência dos combustíveis fósseis na produção de energia, bem como de precaver uma eventual quebra de disponibilidade de esses combustíveis a longo prazo, isto é reduzir o aumento das emissões poluentes, aumentar a

segurança de abastecimento e diversificar as fontes de produção. Em Portugal, a produção de energia é responsável por cerca de 30% das emissões de CO₂ (dióxido de carbono) para a atmosfera [3]. Assim, os governos por todo mundo estão a tomar medidas e a traçar metas, numa extensão do protocolo de Quioto, de modo a reduzir o impacto da emissão deste tipo de gases no aquecimento global. A política europeia de energia aponta como prioridades a criação de mercados competitivos e a necessidade de redução de emissões de CO₂. Em ambos aspectos, Portugal está bem colocado no ranking europeu [1]. Uma das principais medidas é, então, o investimento em energias renováveis (como a eólica, solar, biomassa, geotérmica, ondas e marés). A energia eólica destaca-se, dentro das restantes, devido à sua maior fiabilidade e rendimento, pois a tecnologia inerente à sua produção tem evoluído rapidamente nos últimos anos [2].

Portugal é um país com escassos recursos energéticos próprios, nomeadamente, aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos (como o petróleo, o carvão e o gás).

Tal situação de escassez conduz a uma elevada dependência energética do exterior (82,9% em 2007), nomeadamente das importações de fontes primárias de origem fóssil. Importa assim aumentar a contribuição das energias renováveis: hídrica, eólica, solar, geotérmica, biogás e lenhas e resíduos [4]. Portugal é no entanto um país rico em recursos renováveis naturais, tem recursos hídricos abundantes, tem a melhor exposição solar da Europa, tem um potencial de vento (Figura 1) propício ao aproveitamento do recurso e possui uma longa costa que permite o aproveitamento de energia do mar.

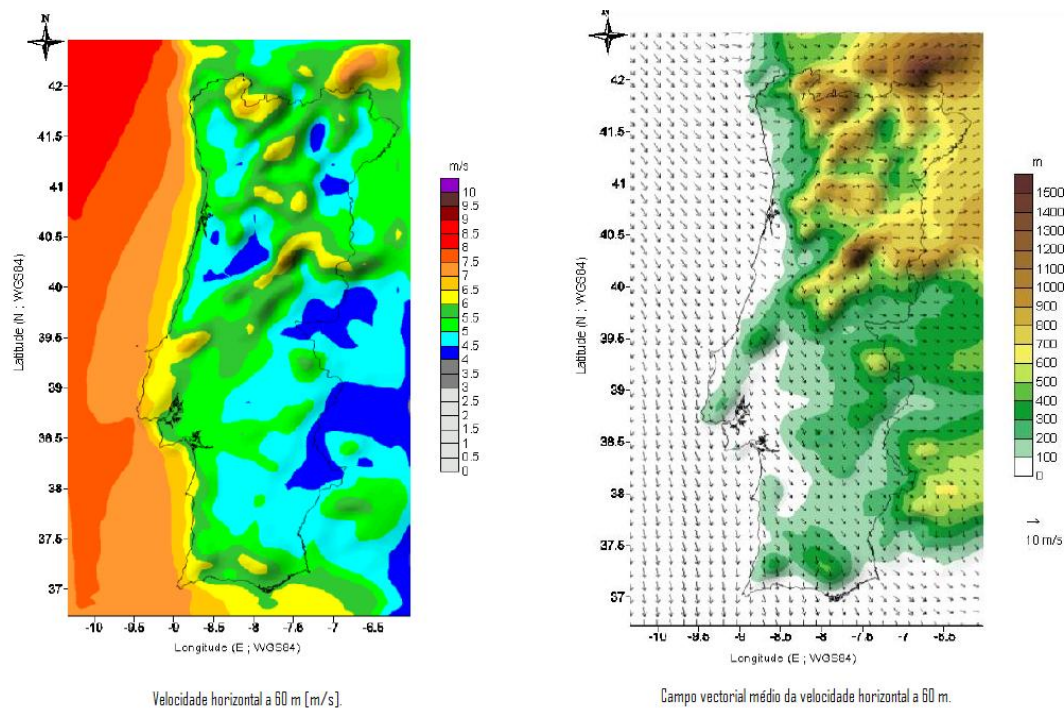


Figura 1- Atlas Eólico de Portugal (fonte INETI)

A abundância dos recursos renováveis é também um factor importante na explicação do forte crescimento da produção descentralizada, e sendo Portugal rico nestes recursos, faz sentido explorá-los, para reduzir a dependência energética, conduzindo deste modo à sustentabilidade energética do nosso país [4].

No que respeita à redução das emissões de CO₂, o governo Português definiu uma das metas mais ambiciosas em termos de energias renováveis, sendo que em 2006 fomos o segundo país da Europa em que a energia eólica mais cresceu [1]. O governo português ambiciona liderar no campo das energias renováveis [1].

A necessidade de controlar as alterações climáticas inspirou desde o início a Estratégia Nacional para a Energia aprovada em Outubro de 2005. Esta estratégia tem como objectivos principais criar mais concorrência e promover a sustentabilidade ambiental. Distingue-se da estratégia dos anteriores governos, que apontavam para a criação de monopólios no sector da energia (deixando os consumidores sem escolha) e tinham menos ambição nas energias renováveis [1].

A iniciativa «Renováveis na Hora» é uma das medidas do plano para a política de energia e alterações climáticas, apresentado em Fevereiro de 2008 pelo Ministério da Economia e da Inovação português. O objectivo é promover a instalação de 50 mil sistemas fotovoltaicos ou micro-eólicos até 2010, com um especial incentivo à instalação de colectores solares para aquecimento de água em habitações [1]. Este novo conceito de consumidor (empresa ou particular) poderá utilizar equipamentos de pequena escala para produção de energia, e poderão ter acesso a dois regimes distintos de remuneração: regime geral ou regime bonificado.

De acordo com Ministério da Economia e da Inovação, nos próximos anos, prevê-se uma crescente penetração do fenómeno da microgeração (MG) que poderá alterar profundamente o conceito global de um sistema eléctrico de distribuição de energia até hoje vigente.

O novo decreto-lei abrange a microgeração com recurso a fontes renováveis, incluindo recursos a energias solar, biomassa, geotérmicas e eólicas, assim como a micro-cogeração, com produção de electricidade e calor.

A forte penetração da MG que se prevê levará à criação de novos paradigmas da exploração das redes de distribuição de BT. Este recente conceito terá as seguintes vantagens de acordo com [5]:

↳ Em relação ao ambiente:

- Redução das emissões de gases, e consequentemente, uma atenuação nas mudanças climáticas
- Maior sensibilização dos consumidores para a energia
- Sistema de produção de energia de menor porte relativamente aos tradicionais grandes centrais hídricas e termoeléctricas

↳ Em relação ao sistema eléctrico de energia:

- Redução da distância entre a produção e os centros de consumo

- Redução de perdas nas redes a montante
- Redução ou adiamento de investimentos em transmissão e produção em grande escala

↳ Em relação à qualidade de serviço:

- Aumento da qualidade de serviço
- Atenuação do impacto de falhas na distribuição e transmissão

↳ Em relação ao mercado:

- Possível desenvolvimento de novas abordagens de mercado
- Eventual redução do poder de mercado das grandes empresas
- Possível contribuição para a redução dos preços de electricidade, já que as redes de transporte e distribuição são usadas de forma menos intensiva.

Porém também existe algumas desvantagens para a penetração da MG:

- No caso da energia solar a existência de variações nas quantidades produzidas de acordo com a situação climática (chuvas, neve), além de que durante a noite não existe produção alguma, o que obriga a que existam meios de armazenamento da energia produzida durante o dia em locais onde os painéis solares não estejam ligados à rede de transmissão de energia.
 - As formas de armazenamento da energia solar são poucos eficientes comparativamente aos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), e a energia hidroeléctrica (água).
 - Entre os principais impacto socio-ambientais dos parques eólicos, destacam-se os sonoros e os visuais. Estes devem-se ao ruído dos rotores e variam de acordo com as especificações dos equipamentos.

1.2 - Caracterização da metodologia a adoptar

Os sistemas de microgeração (MG) por serem sistemas que surgem junto dos consumidores têm impactos benéficos junto das redes de distribuição tradicionalmente exploradas de forma radial e com fluxo de carga unidireccional. A produção junto do consumo reduz as necessidades de produção centralizada e para a redução das perdas na rede e se renovável contribui para a segurança e diversidade de abastecimento. Existem ainda outros benefícios relacionados com a possibilidade de explorar estes sistemas para os serviços auxiliares do sistema de distribuição.

No entanto, para estudar o impacto dos sistemas de MG nas entidades produtoras/consumidoras e segundo a perspectiva pretendida, é necessário verificar para situações reais qual o desempenho das redes em função da penetração de MG. Para isso é necessário simular situações reais, sendo essencial a análise de redes típicas com vários cenários de penetração de sistemas de MG, sendo necessário também utilizar uma ferramenta capaz de simular e avaliar adequadamente o problema em causa.

É ainda importante referir que a qualidade do estudo baseado na simulação e consequentemente as conclusões, dependem muito da qualidade dos modelos adoptados e da metodologia utilizada. Será essencial conceber um sistema micro-produtor de electricidade robusto face a eventuais anomalias na rede de distribuição, assim como capaz de garantir uma boa qualidade de serviço.

Os diagramas de consumo apresentam padrões variáveis ao longo do dia, da semana e das estações do ano. Também os diagramas de produção a partir de fontes renováveis apresentam variabilidade face à incerteza do recurso. Assim, este tipo de estudos requer que se proceda a um elevado número de simulações para os vários cenários representativos dos diferentes regimes de operação da rede em estudo, sendo que os consumidores-produtores poderão optar por duas situações distintas: auto consumo ou venda da produção de energia à empresa de distribuição. A filosofia da protecção deste tipo de sistemas será utilizar as mesmas estratégias tanto para o caso de funcionar em modo isolado, como interligado á rede. Em suma, pretende-se simular o estudo de uma rede típica de distribuição em BT com vários regimes de funcionamento em regime permanente e com integração de vários tipos de sistemas MG.

1.3 - Motivação

O aumento gradual dos consumos energéticos bem como a questão ambiental são factores condicionantes fundamentais para o desenvolvimento económico e sustentável do nosso país. A procura intensiva de novas alternativas energéticas assume deste modo um papel crucial para satisfazer os requisitos energéticos e ambientais.

O previsível aumento significativo de sistemas de MG nas redes de distribuição, levará à criação de um novo paradigma de exploração e utilização de energia. Deste modo é necessário avançar com alguns alertas e propostas para o melhoramento das condições de exploração.

No passado recente, a ausência de regulamentação para o mercado de micro-geração fez com que o desenvolvimento deste tipo de tecnologia não crescesse tão rapidamente como a geração de maior porte. Esta situação é muito visível para as micro-turbinas eólicas cujo mercado ainda é muito incipiente quando comparado com as turbinas de grande porte.

Acresce que, a maioria das interfaces de ligação, como rectificadores e inversores, são projectados para utilizar sistemas de produção de energia fotovoltaica. Com esta nova legislação prevê-se os seguintes potenciais investimentos associados à MG, segundo as previsões da INTELI (Inteligência em Inovação):

- Micro-eólica em 100.000 casas até 2020
- Solar térmico em 350.000 casas até 2020
- Investimento potencial em MG superior 1.200 milhões de euros até 2020 em Portugal

No entanto não basta legislar com vista ao acelerar da penetração destes equipamentos e incentivar ao sector industrial associado. É necessário conhecer o impacto destes sistemas nas redes, definir regulamentos e protocolos de utilização para que a segurança e continuidade do abastecimento sejam mantidas nos padrões actuais. Para isso é necessário conhecer o impacto da sua integração em grande escala em regime normal e transitório. Este tipo de estudos tem sido feito ao nível da rede de transporte mas ainda pouco se tem feito, neste domínio, na rede de distribuição.

Portanto, é preciso conhecer o comportamento destes sistemas e da rede de distribuição de baixa tensão para que seja possível uma revisão das normas mais importantes para se poder definir uma ligação à rede que cumpra todas as condições de funcionamento adequado.

É no regime permanente que vamos debruçar o nosso estudo sendo que a tecnologia que se analisou neste trabalho foi a microgeração eólica.

1.4 - Enquadramento legal

Iremos estudar o enquadramento legal que regula a ligação destas unidades à rede:

- **Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 Novembro** (Ministério da Economia e da Inovação) que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de energia por intermédio de unidades de microprodução
- **Norma Europeia CENELEC - prEN50438 de Dezembro de 2007** - estabelece requisitos técnicos para ligação e exploração de micro-geradores ligados à rede de distribuição em BT
- Os consumidores de BT que pretenderem produzir electricidade têm no mercado várias tecnologias que podem utilizar no caso de: micro fotovoltaica, microeólica, mini hídrica, cogeração a biomassa ou pilhas a hidrogénio. Os especialistas referem que não há apenas uma única solução standardizada para se começar a produzir electricidade em casa, podendo o microprodutor optar por apenas uma, ou pela conjugação de várias. A eficiência é que tem de determinar a escolha. Na Tabela 1 são apresentados alguns factores potenciadores da forte penetração da MG em relação às duas principais tecnologias emergentes.

O presente trabalho debruçar-se-á em mais detalhe na microgeração eólica (ME), porque sendo uma tecnologia em que se prevê um grande crescimento de investimento a nível nacional, quer na integração na rede quer mesmo na sua industrialização, se afigura como de interesse relevante para o estudo uma vez que o seu diagrama de produção não coincide em

valores ao longo do tempo, em geral, com as necessidades registadas nos diagramas da procura.

Tabela 1- Remuneração e limite da energia produzida para as tecnologias fotovoltaica e micro-eólica [6]

	<i>Fotovoltaica</i>	<i>Eólica</i>
Remuneração ¹ aos primeiros 10 MW instalados	€ 650/MWh	€ 455/MWh
Limite de energia vendida á rede	2,4 MWh/ano	4 MWh/ano

Os sistemas de MG, podem funcionar em modo isolado ou ligado à rede, sendo esta ligação realizada através de conversores electrónicos de potência. No entanto, este tipo de equipamento acarreta problemas para a rede, como por exemplo, a produção de harmónicos, e desta forma, degrada a qualidade de serviço e altera a performance de equipamentos electrónicos. Não é objectivo deste trabalho a análise dinâmica trata-se de um estudo com vista a avaliar o impacto da ligação destas unidades em regime estacionário, isto é calcular o impacto da integração do padrão de produção com os padrões de consumo. O caso de estudo seleccionado foi a microgeração eólica uma vez que o seu padrão de produção, como referido atrás, está pouco correlacionado com o consumo.

Pretende-se identificar implicações no trânsito de potências nas linhas e nas tensões nos nós na rede BT perante situações de integração de sistemas produtores. Para este efeito, recorreu-se ao software de análise de sistemas de potência IPSA Power (www.ipsa-power.com). Simulou-se uma rede real de baixa tensão e se integrou vários geradores eólicos em diferentes cenários.

1.5 - Objectivos

O objectivo do trabalho é estudar o impacto da microgeração em regime estacionário da rede de baixa tensão, assim será necessário fazer a estruturação e modelização do conjunto de incertezas na inclusão da produção distribuída na rede, para que seja possível estimar o modo de funcionamento da rede com o impacto da produção.

No entanto, em muitos casos não estão criadas as condições para a utilização dos modelos de representação da incerteza, ou porque não há suficiente base estatística no caso da energia eólica.

O meio mais vulgar de ultrapassar estas dificuldades é o recurso de um conjunto de cenários futuros, perante os quais é possível realizar uma avaliação de carácter praticamente determinístico.

¹ Regime bonificado

Assim, é recorrendo a cenários que vamos simular os diferentes modos de funcionamento da rede para períodos onde se verificam extremos máximos e mínimos na expectativa de analisar o que acontece nessas situações, quer em termos dos limites técnicos das linhas quer em termos do perfil das tensões.

1.6 - Estrutura da dissertação

No capítulo 2 efectua-se uma descrição do princípio de funcionamento e constituição dos principais componentes do sistema produção ME. Foi elaborada uma revisão das tecnologias existentes no mercado e uma descrição dos mecanismos de ligação à rede relativos aos sistemas ME.

No capítulo 3 aborda-se sob o ponto de vista da rede, o impacto da geração de energia dispersa, particularmente relacionada com os aerogeradores. Para além de se apresentar os principais conceitos de qualidade de energia aplicáveis aos aerogeradores, eles são classificados com relação à sua tecnologia e adicionalmente são apresentados os principais problemas de estabilidade também relacionados com as tecnologias eólicas.

No capítulo 4 apresenta-se uma rede real de BT com uma topologia radial, mista e constituída por cabos aéreos (troçada) e enterrados.

Descreve-se o software utilizado para a análise, o software IPSA Power onde foram introduzidos os dados da rede e respectivo diagrama. Faz-se uma pequena descrição das potencialidades do referido software.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados das simulações efectuadas no IPSA Power para os diferentes cenários devidamente caracterizados segundo os pressupostos.

No capítulo 6 é efectuado uma abordagem no que diz respeito às perspectivas futuras do trabalho e as conclusões relativas aos capítulos que se estudou.

Capítulo 2

Microgeração Eólica

2.1 - Recurso eólico

Os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre, podemos afirmar que a energia eólica provém da radiação solar. Uma estimativa da energia total dos ventos disponível em redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos (vulgarmente designada por energia eólica). Este valor percentual, embora pareça pequeno, representa cerca de uma centena de vezes a potência anual instalada de todas as centrais eléctricas do Mundo. O vento revela-se, desta forma, como detentor de um enorme potencial energético que pode e deve ser aproveitado.

Os ventos que se movem a uma escala global e aqueles que se fazem sentir de forma mais localizada são influenciados por diferentes aspectos, entre os quais se salientam a altitude, a rugosidade da superfície terrestre, os obstáculos e o relevo.

Os ventos mais fortes, mais constantes e mais persistentes ocorrem em bandas situadas a cerca de 10 km da superfície da terra. Como não é possível colocar os conversores eólicos nessas zonas, o espaço de interesse encontra-se limitado a algumas dezenas de metros na atmosfera. A estas alturas, o vento é directamente afectado pela fricção na superfície, o que provoca uma diminuição na sua velocidade [7].

A velocidade do vento é um elemento de extrema importância para a quantificação da energia mecânica que um aerogerador pode transformar em energia eléctrica: a quantidade de energia contida no vento varia com o cubo da sua velocidade. É necessário a escolha do local e caracterizar o recurso eólico existente, pelo que se torna imprescindível instalar equipamentos de recolha de dados do vento durante um período mínimo de um ano.

A energia dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos os lugares. A utilização desta fonte energética para a geração de electricidade, em escala comercial, teve início há pouco mais de 30 anos e através de conhecimentos da

indústria aeronáutica os equipamentos para geração eólica evoluíram rapidamente em termos de ideias e conceitos preliminares para produtos de alta tecnologia.

No passado, utilizava-se esta fonte de energia para bombear água, ou para moer o milho para obtermos a farinha. Hoje em dia, ainda serve para bombear água, mas é principalmente utilizada para gerar electricidade, e sendo o vento uma fonte de energia renovável a produção de energia eléctrica a partir do vento praticamente não tem efeitos nocivos para o ambiente [8].

No início da década de 70, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de electricidade que ajudassem a diminuir a dependência do petróleo e carvão.

Mais de 50.000 novos empregos foram criados e uma sólida indústria de componentes e equipamentos foi desenvolvida. Actualmente, a indústria de turbinas eólicas tem acumulado crescimentos anuais acima de 30% e movimentado cerca de 2 biliões de dólares em vendas por ano [8].

No presente a continuada subida dos preços das energias convencionais e as pressões ambientais pressionaram os investigadores, os industriais e os reguladores começando-se a assistir a um efeito de aceleração para a penetração desta tecnologia no mercado o que permitiu à tecnologia eólica passar a ser muito mais competitiva, sendo no entanto uma tecnologia com potencial de aperfeiçoamento portanto ainda não completamente madura.

A tecnologia foi sendo desenvolvida à custa de incentivos e à medida que se ia desenvolvendo ia-se tornando mais competitiva. Acontece que neste momento o desenvolvimento tecnológico e o efeito escada tornaram o custo de energia eólico muito próximo do mercado convencional. Em Portugal já há parques eólicos a serem remunerados sem incentivos na tarifa.

Existem, basicamente, dois tipos de turbinas eólicas modernas: Os sistemas de eixo horizontal são os mais conhecidos. Consistem numa estrutura sólida elevada, tipo torre, com duas ou três pás aerodinâmicas que podem ser orientadas de acordo com a direcção do vento; e os sistemas de eixo vertical são menos comuns, mas apresentam a vantagem de captarem vento de qualquer direcção [9].

Como já se referiu a ideia da utilização das máquinas movidas a vento para gerar energia não é nova, basta lembrarmo-nos dos moinhos de vento para bombear água ou para moer farinha, mas a partir de 1980 a energia produzida pelo vento tem vindo a aumentar gradualmente. A energia produzida por cada unidade aerogeradora não aumentou muito nos últimos anos, mas o número de unidades aumentou 100 vezes em pouco mais de uma década. Presentemente, existem grandes aerogeradores com uma potência superior a 2MW, e há também um mercado especializado em micro sistemas com potências a partir de 100 W [9].

A energia eólica pode ser explorada em toda a parte e a qualquer escala desde que exista recurso natural. Os grandes parques eólicos tem capacidade para alimentar dezenas de milhares de lares, já um pequeno aerogerador é suficiente para responder às necessidades de

uma família ou de uma pequena exploração agrícola situada num local isolado. Mesmo os sistemas de potências muito reduzidos (100 a 500 W) podem responder a uma grande variedade de necessidades, como sejam estações meteorológicas e sistemas de comunicações instalados em locais inóspitos, iluminação de um edifício isolado ou até mesmo alimentação eléctrica para um veleiro.

Numerosas habitações isoladas são alimentadas por pequenos sistemas de geração eólicos, que fornecem energia eléctrica sempre que não é tecnicamente possível ou economicamente viável estarem ligados à rede de distribuição pública de energia eléctrica. Estes tipos de instalações são constituídos por pequenos aerogeradores de potências da ordem dos 1 a 5 KW, munidos de sistemas de armazenamento de energia (bancos de baterias) e, por vezes combinados com pequenos sistemas fotovoltaicos ou, até mesmo, um pequeno grupo diesel de emergência.

O mercado já se encarregou de tornar a produção de energia eólica e uma das tecnologias mais sensata e económica, actualmente disponível, para nos fornecer energia no futuro.

A habilidade da produção de energia a partir do vento depende da existência do recurso natural, sem vento não há produção de energia. Assim os países investiram em campanhas de rentabilidade do potencial do vento. Estas campanhas implicam um trabalho de campo muito intensivo uma vez que o objectivo é o mapeamento dos países em função dos dados do vento.

Em Portugal como em muitos países do espaço europeu este trabalho já foi concluído e está disponível o atlas eólico de Portugal (Figura 1) que permite aos investidores e legisladores identificar regiões de potencial investimento neste tipo de tecnologia.

A energia eólica e o seu aproveitamento surgiram para a sociedade como um benefício ao nível económico ambiental e social, isto é um contributo para o desenvolvimento sustentável.

2.2 - Tecnologia eólica

As turbinas eólicas, também conhecidas por aerogeradores, têm por função transformar a energia cinética do vento em energia mecânica e consequentemente em energia eléctrica. Uma condição necessária para a apropriação da energia contida no vento é a existência de um fluxo permanente e razoavelmente forte de vento [10].

A energia disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante v_0 (m/s).

Na unidade de tempo, aquela coluna de ar, ao atravessar a secção plana transversal A (m^2) do rotor da turbina, desloca uma massa ρAu (kg/s), em que ρ é a massa específica do ar ($\rho = 1,225$ kg/ m^3 , em condições de pressão e temperatura normais).

A potência mecânica disponível pelo veio da turbina (W) é, então, proporcional ao cubo da velocidade do vento e pode ser calculada pela seguinte expressão retirada de [11]:

$$P = \frac{1}{2} C_p (\rho * A * v_0) v_0^2 = \frac{1}{2} C_p * \rho * A * v_0^3 \quad (\text{Eq. 1})$$

A equação 1 indica a potência que pode ser extraída do vento por uma turbina moderna. A variável (C_p) representa o coeficiente de forma da turbina (coeficiente de Betz), este traduz a quantidade de energia mecânica disponível, (A) representa a área de varrimento das pás da turbina, durante o seu movimento de rotação, (ρ) refere-se à densidade do ar do local em causa e (v_0) representa a velocidade instantânea do vento.

Da equação 1 conclui-se que a potência disponível é fortemente dependente da velocidade do vento: quando esta duplica, a potência aumenta oito vezes, mas duplicando a área varrida pelas pás da turbina, o aumento é só de duas vezes. Por outro lado, se a velocidade do vento desce para metade, a potência reduz-se a 12,5%. Tudo isto explica a importância crítica da colocação das turbinas em locais com velocidades do vento elevadas para o sucesso económico dos projectos de energia eólica [7].

O rendimento efectivo da conversão numa turbina eólica depende da velocidade do vento e é dado por:

$$C_p(v_0) = \frac{P}{P_{disp}} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que P_{disp} é a potência disponível pelo acção do vento.

O binário mecânico induzido nas pás, T , pode ser calculado a partir da potência extraída pela turbina, dividindo esta pela velocidade de rotação:

$$T = \frac{P}{\omega_R} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde, ω_R é a velocidade angular do rotor (rad/s); T é o binário mecânico induzido nas pás (N.m); e P_{disp} é a potência que o vento transfere à turbina (W) [12].

Se o rotor rodar devagar, é pequena a perturbação induzida no escoamento pelo movimento do rotor; ao contrário, se o rotor rodar muito depressa, o vento encara-o como uma parede. Daqui resulta que a velocidade de rotação deverá ser compatibilizada com a velocidade do vento, de forma a obter a máxima eficiência da conversão, isto é, um coeficiente de potência CP máximo [13].

A relação entre a velocidade linear (m/s) da extremidade da pá da turbina de raio R (m), rodando à velocidade ωR (rad/s), e a velocidade do vento v (m/s) é caracterizada por um factor adimensional, conhecido por razão de velocidades na pá ou velocidade específica na ponta da pá - λ^2 [7].

$$\lambda = \frac{\omega_R * R}{v} \quad (\text{Eq. 4})$$

² λ - Tip Speed Ratio

As turbinas eólicas são projectadas para gerarem a máxima potência a uma determinada velocidade de vento. Esta potência é denominada potência nominal e a velocidade do vento a que ela é atingida é designada velocidade nominal do vento [14].

Área de varrimento da turbina: A área de varrimento da turbina determina a maior ou menor capacidade de receber energia do vento. Quanto maior a área de varrimento de uma turbina, maior será a sua capacidade de capturar energia do vento. A comprovar isto, o gráfico da Figura 2 foi construído com base numa recolha de características técnicas de micro-aerogeradores existentes no mercado:

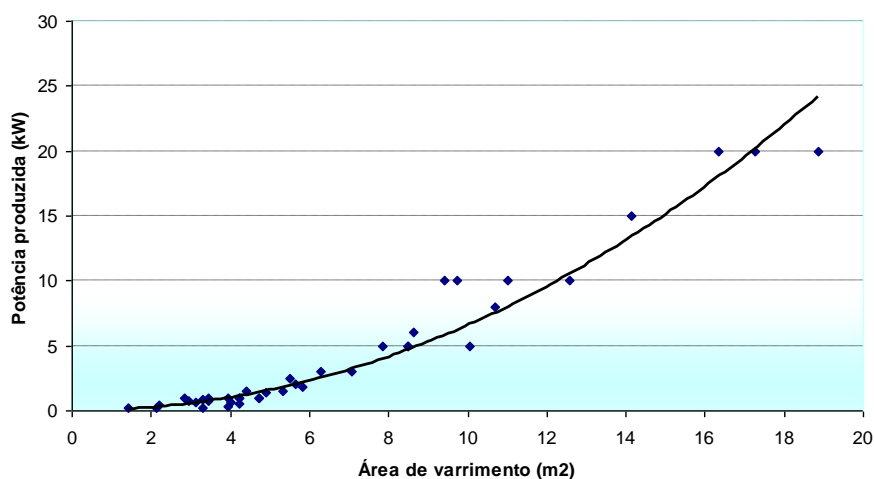


Figura 2- Potência produzida em função da Área de varrimento da turbina

Densidade do ar no local de instalação do aerogerador: A energia cinética de um corpo em movimento é proporcional à sua massa. Da mesma forma, a energia cinética do vento depende da densidade do ar, ou seja, da sua massa por unidade de volume. Poder-se-á, então, concluir que quanto maior a densidade do ar, maior será a energia cinética fornecida à turbina. A pressão atmosférica média a 15°C é cerca de 1,225 kg/m³, no entanto, a densidade do ar diminui com o aumento da altitude e humidade.

Rugosidade do terreno: refere-se à influência exercida pelos obstáculos à passagem do vento. A superfície do solo, em altitudes elevadas (da ordem da grandeza do quilómetro) exerce uma pequena influência sobre o vento. No entanto, nas camadas mais baixas da atmosfera, a velocidade do vento é afectada pela fricção com superfície terrestre. Quanto maior a rugosidade do terreno, maior será a perda da energia do vento, ou seja, em grandes aglomerados habitacionais e zonas densamente arborizadas há um maior entrave à passagem do vento. Pelo contrário, em zonas mais abertas, como áreas agrícolas, vales, planícies, a influência sobre a passagem do vento é menor [14].

Todos estes factores que acabamos de identificar permitem concluir que não basta haver vento para o sucesso de um investimento em turbinas eólicas é necessário que após a identificação do potencial a nível macro sejam elaborados estudos mais detalhados tendo em

conta as características específicas do local efectuando análises mais finas recorrendo a estudos sobre a previsão da velocidade do vento gerados por modelos meteorológicos de mesoescala. Na micro-éolica ainda há muito a fazer neste tipo de estudos de pormenor.

2.3 - Turbinas eólicas

Os componentes integrantes deste tipo de equipamentos para, a microgeração eólica, são apresentados nos pontos que se seguem:

O aerogerador utiliza a energia cinética do vento para movimentar o veio do rotor, convertendo-a, assim, em energia mecânica que, posteriormente, é convertida em energia eléctrica por um gerador electromagnético acoplado à turbina eólica. Este acoplamento mecânico pode ser feito directamente se a turbina e o gerador tiverem velocidades semelhantes, ou por intermédio de uma caixa de velocidades (multiplicador), caso contrário. A energia eléctrica assim produzida pode ter diversas aplicações: pode ser armazenada em acumuladores, pode ser distribuída aos consumidores através da rede eléctrica ou pode, ainda, ir alimentar cargas isoladas. Este sistema de conversão de energia também produz perdas. A título informativo, pode indicar-se um rendimento de 59 % para o rotor da turbina e 96% para a caixa de velocidades. Há ainda que contabilizar as perdas do gerador e de outros eventuais sistemas de conversão existentes (conversores electrónicos de potência) [10].

Um aerogerador ocupa uma reduzida superfície de solo, o que constitui uma vantagem para a sua instalação uma vez que pouco perturba as actividades industriais e agrícolas das proximidades.

Pode encontrar-se um aerogerador individual instalado num local isolado. O aerogerador não se encontra ligado à rede de energia eléctrica nem ligado a outros aerogeradores. Podem também encontrar-se conjuntos de aerogeradores constituindo um parque eólico.

A turbina é responsável por captar a energia cinética do vento, sendo a sua configuração directamente influenciada ao rendimento global do sistema. As turbinas eólicas podem ser classificadas segundo orientação do seu eixo:

2.3.1- Aerogerador de eixo vertical

As torres das turbinas eólicas de eixo vertical são baixas; entre 0,1 e 0,5 vezes a altura do próprio rotor, o que permite a colocação de todo o dispositivo de conversão de energia (gerador, caixa de velocidades, etc.) na base do aproveitamento, facilitando assim as operações de manutenção. Além disso, neste tipo de aerogeradores, não é necessário o dispositivo de orientação da turbina face ao vento, tal como acontece nos aerogeradores de eixo horizontal. Por outro lado, o vento junto ao solo é de mais fraca intensidade o que implica um menor rendimento deste tipo de aerogeradores e a torre fica sujeita a elevados esforços mecânicos [10].

É por estas razões que, actualmente, os construtores privilegiam os aerogeradores de eixo horizontal.

Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação (lift) e por forças de arrasto (drag). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus, Savonius e turbinas com torre de vórtices [15], como apresentadas abaixo.

- **O rotor de Savonius** baseia-se no princípio do accionamento diferencial. Os esforços exercidos pelo vento em cada uma das faces do corpo oco, são de intensidades diferentes, resultando um binário responsável pelo movimento rotativo do conjunto [16].

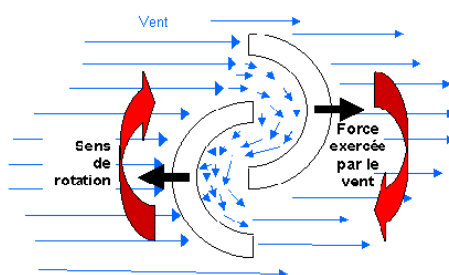


Figura 3- Esquema do princípio de funcionamento do rotor de Savonius

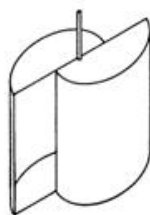


Figura 4- Esquema do rotor de Savonius

- **O rotor de Darrieus** baseia-se no princípio da variação cíclica de incidência. Um perfil colocado ao vento segundo diferentes ângulos, fica submetido a forças de intensidade e direcção variáveis; a resultante destas forças gera um binário motor responsável pela rotação do dispositivo [16].

As turbinas deste tipo são movidos por forças de sustentação e constituídas por lâminas (duas ou três) com a forma de uma parábola, fixas nas duas extremidades ao eixo vertical [15].



Figura 5 - Esquema do rotor de Darrieus

O eixo principal de uma turbina vertical é perpendicular à superfície da terra. As pás, que podem ser curvas ou rectas, giram em torno do eixo vertical. A configuração mais comum para este tipo de turbina é o projecto de Darrieus. Os principais elementos desse tipo de projecto são:

- Pás do rotor e tubo de binário
- Cabos de suportação e mancais
- Estrutura de suportação e fundação

Rotor coluna ou eixo de rotação: o rotor de uma turbina vertical   constituído habitualmente por duas pás, são acopladas directamente ao rotor coluna ou através de tirantes. Por sua vez, o tubo de binário por sua vez encontra-se acoplado à caixa de engrenagens e ao gerador [17].

Cabos de aço e mancais: os cabos de aço são utilizados para suportar o tubo de binário e mantê-lo na posição vertical. Os cabos são ligados na parte superior do tubo de binário a um mancal, e estendem-se até ao solo onde são fixos através de conexões em aço a uma fundação. Na parte inferior, o rotor coluna é suportado por um outro mancal [18].

Estrutura de suportação e fundação: com excepção do tubo de binário, todos os outros elementos do trem de accionamento situam-se no solo e são montados numa única estrutura de suporte. Uma das vantagens dos sistemas de configuração vertical é que a maioria das actividades de manutenção é realizada no solo [15].

Vantagens das turbinas de eixo Vertical

- Não necessitam de mecanismos de acompanhamento para variações da direcção do vento [15]
- A maquinaria, isto é, o gerador e outros elementos mecânicos   localizada no solo, sendo que as actividades de manutenção são realizadas no solo [15]
- Ideias para locais onde as leis não permitem a colocação de estruturas altas nos edifícios

Desvantagens das turbinas de eixo Vertical

- No fabrico destas turbinas existe a necessidade de maiores quantidades de material comparativamente a uma turbina de eixo horizontal que produza a mesma potência
- Normalmente, as turbinas de eixo vertical encontram-se muito perto do solo, onde os ventos são mais fracos [19]
- O vento próximo da superfície é turbulento o que aumenta a instabilidade nos apoios e p s da turbina [19]
- Aquando da existência de ventos fortes terá que ser realizado um controlo de potência no sentido de proteger o gerador. Contudo, este controlo não pode ser efectuado reduzindo o aproveitamento do vento como se verifica nas turbinas em eixo horizontal. Neste caso, este controlo terá que ser realizado pelos conversores electrónicos de potência [18]

- A turbina do tipo *Darrieus* necessita de um sistema de arranque auxiliar (por vezes são acopladas a turbinas do tipo *Savonius*) [15]
- As turbinas do tipo *Darrieus* têm uma eficiência superior às turbinas do tipo *Savonius*, no entanto, as primeiras apenas atingem 75% da eficiência das turbinas com eixo horizontal
- As turbinas do tipo *Darrieus* necessitam de cabos de amarração no topo do eixo da turbina, de forma a suportar a força que o vento exerce sobre a estrutura de suporte da turbina. Esta necessidade limita a aplicação deste tipo de turbinas em locais *offshore*, já que aumenta a área de ocupação [18]

2.3.2- Aero gerador de eixo horizontal

Os aerogeradores de eixo horizontal baseiam-se no princípio de funcionamento dos moinhos de vento. São constituídos por turbinas de uma a três pás com um perfil aerodinâmico. A turbina de 3 pás é a mais comum pois constitui um bom compromisso entre coeficiente de potência, custo, velocidade de rotação bem como uma melhor estética relativamente às turbinas de 2 pás [16].

As eólicas de eixo horizontal são as mais utilizadas, também porque o seu rendimento aerodinâmico é superior às de eixo vertical, estão menos expostas aos esforços mecânicos e o seu custo é mais baixo.

Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem adquirir mais potência do que aqueles que giram sob efeito de forças de arrasto, para a mesma velocidade de vento.

Um corpo que obstrui a passagem do vento sofre a acção de forças que actuam segundo uma direcção perpendicular ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que actuam segundo a direcção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Estes mecanismos são detalhados em [20] e [15].

Existem duas categorias de eólicas de eixo horizontal:

- **Frontais** ("*upwind*") : o vento sopra pela parte frontal. As pás são rígidas e o rotor é orientado segundo a direcção do vento através de um dispositivo motor.

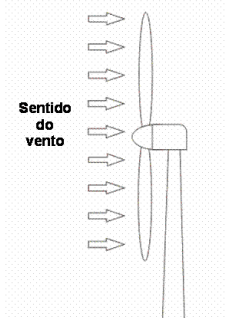


Figura 6- Esquema de uma eólica de eixo horizontal "upwind"

- **Retaguarda** ("downwind") : o vento sopra pela retaguarda das pás. O rotor é flexível e auto-orientável.

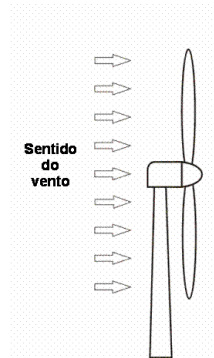


Figura 7- Esquema de uma eólica de eixo horizontal "downwind"

A colocação da turbina no topo é a forma mais utilizada por ser a mais simples e a que conduz a melhores resultados para grandes potências; são menores os esforços de manobra e melhor a estabilidade.

As pás da turbina devem sempre ser orientadas segundo a direcção do vento, para o que existem dispositivos mecânicos de orientação.

Actualmente, as eólicas de eixo horizontal com um rotor do tipo hélice representam um interesse importante para a produção de electricidade em grande escala.

Os principais elementos que compõem o sistema com turbinas horizontais são:

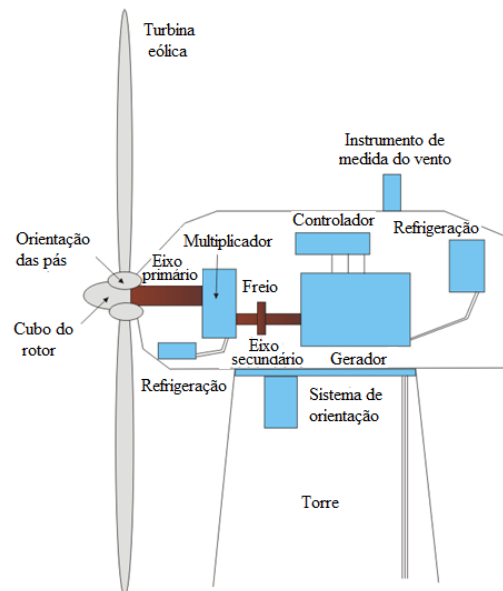


Figura 8- componentes de uma turbina eólica

As pás ou captor de energia são feitas de uma mistura de fibra de vidro e materiais compósitos. A sua função é captar a energia do vento e transferi-la para o rotor. O seu perfil é fruto de complexos estudos aerodinâmicos pois dele depende o rendimento da turbina. Assim:

O diâmetro das pás (ou a área varrida pelas pás) é função da potência desejada:

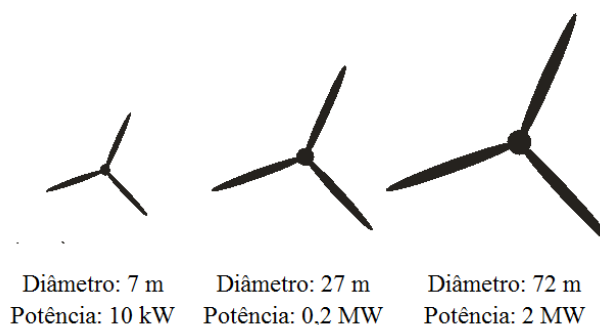


Figura 9-diâmetro das pás e sua potência

O número de pás pode variar consoante os aerogeradores. Actualmente, o sistema de três pás é o mais utilizado pois permite limitar as vibrações, o barulho e o desgaste do rotor, relativamente aos sistemas de duas e uma pá. Na realidade, o coeficiente de potência aumenta 10% quando se passa de uma para duas pás e aumenta de 3% quando se passa de duas a três pás. Adicionalmente, existe um bom compromisso entre o custo e a velocidade de rotação do captor eólico, bem como vantagens estéticas do sistema a três pás relativamente aos outros.

O **cubo do rotor** está equipado com um sistema passivo (aerodinâmico), activo (actuador hidráulico) ou misto ("active stall") que permite a orientação das pás de forma a regular a velocidade de rotação da turbina.

Regulação activa por actuadores hidráulicos, também denominada "pitch control". Este sistema permite a regulação do ângulo das pás de forma a extrair a máxima potência do vento e também limitá-la para velocidades de vento superiores à nominal; a cada alteração da velocidade do vento, o ângulo das pás é regulado para que, a cada instante, a sua orientação seja a óptima para extrair a máxima potência. Este sistema permite a limitação da potência em caso de ventos fortes.

Regulação aerodinâmica passiva, também denominada "stall control". As pás da turbina estão fixas relativamente ao cubo do rotor e são concebidas de forma a entrar, progressivamente em perda quando o vento passa a forte. Este tipo de regulação é o utilizado na maior parte das eólicas pois não implica a existência de peças móveis e de sistemas de regulação no rotor.

Um último tipo de regulação, faz uma simbiose da regulação passiva e da regulação activa, de forma a controlar de forma mais precisa a produção de electricidade. Este sistema é conhecido por regulação activa através de perda aerodinâmica, ou "active stall". É utilizado para eólicas de elevada potência.

Eixo primário: é o eixo do rotor da turbina eólica. Denomina-se por "eixo lento", uma vez que roda a velocidades compreendidas entre 20 - 40 rpm; está interligado ao eixo secundário através do multiplicador.

A caixa de velocidades ou multiplicador mecânico de velocidade permite converter uma potência de elevado binário e baixa velocidade, numa potência de baixo binário e elevada velocidade; a rotação das pás é demasiado lenta e o binário demasiado elevado para serem utilizados pelo gerador. A caixa de velocidades liga o eixo (primário) da turbina eólica, ao eixo (secundário) do gerador eléctrico [17].

Existem diversos tipos de caixas de velocidades, por exemplo:

- As caixas com um ou vários sistemas de rodas dentadas permitem converter a frequência de rotação de 19-30 r.p.m. em 1500 r.p.m.. Os eixos de rotação das rodas estão fixos relativamente à estrutura.

- As caixas de rodas planetárias permitem obter uma elevada multiplicação de velocidade, com uma reduzida ocupação de espaço. Nestes sistemas planetários, os eixos das rodas denominados satélites não estão fixos relativamente à estrutura; rodam uns relativamente aos outros.

Existe, também, a possibilidade de fazer um acoplamento directo, sem caixa de velocidades [17].

Sistema de refrigeração, existem sistemas de refrigeração para o multiplicador de velocidade que suporta os esforços mecânicos entre os dois eixos e para o gerador. Trata-se de ventiladores ou de radiadores a água ou óleo. Na caixa de velocidades utiliza-se refrigeração a óleo.

Eixo secundário ou eixo do gerador (normalmente de um ou dois pares de pólos). Está equipado de um travão mecânico de disco (dispositivo de segurança) que limita a velocidade em caso de vento violento; podem existir mais dispositivos de segurança.

O gerador eléctrico é responsável pela produção de electricidade. A sua potência pode atingir 4,5 MW no caso das grandes eólicas. As pesquisas actuais apontam para eólicas cada vez mais potentes (ex: 5 MW).

O gerador pode ser quer um dínamo (produção em corrente contínua) quer um alternador (produção em corrente alternada).

O alternador é uma máquina síncrona ou uma máquina assíncrona, funcionando a velocidade constante ou variável.

Vantagens das turbinas de eixo horizontal

- Possui a capacidade de ajustar o ângulo de ataque das pás da turbina, fornecendo um controlo de potência mais rigoroso

- Em situações atmosféricamente severas os mecanismos de controlo inerentes às turbinas em eixo horizontal permitem minimizar o risco de danos na turbina
- As turbinas de eixo horizontal, normalmente situadas em locais mais altos que as turbinas de eixo vertical, dispõem de ventos com maior velocidade, o que lhes permite um aumento substancial na produção de energia

Desvantagens das turbinas de eixo horizontal

- A instalação e manutenção são complexas, devido à altura da torre e pelo facto da maquinaria situar-se no topo da torre, sendo necessários mais meios físicos e, conseqüentemente, financeiros para transporte/instalação/manutenção [19]
- As turbinas que operam a jusante do vento (*Downwind*) sofrem maiores vibrações nas suas estruturas

2.4 - Gerador

2.4.1 - Gerador síncrono

O gerador síncrono é uma máquina síncrona (MS) e pode ser utilizada no caso de acoplamento directo, isto é, quando a ligação mecânica entre a turbina eólica e o gerador é directa, sem utilizar a caixa de velocidades (multiplicador). Contudo, será forçosamente necessário que este gerador seja ligado à rede através de um conversor de frequência. Se o gerador for de ímanes permanentes, pode funcionar em modo autónomo, uma vez que não tem necessidade de excitação exterior.

Electroímans: As bobinas dos electroímans são alimentadas em corrente contínua através de um sistema de alimentação que pode, por exemplo, ser feito através da rectificação da tensão da rede. Existem diversos métodos para implementar esta alimentação. O gerador a electroímans é a solução mais utilizada actualmente.

Ímanes permanentes ou MSIP: Contrariamente à MS a electroímans a MSIP não necessita de ser excitada através da rede. Este tipo de máquina tende a ser cada vez mais utilizada pelos construtores de eólicas uma vez que pode funcionar em modo autónomo.

2.4.2 - Gerador assíncrono

Um grande número de aproveitamentos eólicos utiliza a máquina assíncrona (MAS) que pode suportar ligeiras variações de velocidade (em torno da velocidade de sincronismo) o que é uma vantagem para estes sistemas uma vez que a velocidade do vento pode alterar-se rapidamente aquando de uma rajada. As rajadas podem provocar solicitações mecânicas consideráveis que serão mais reduzidas no caso de um gerador assíncrono do que de um gerador síncrono que funciona, normalmente, a velocidade constante. A máquina assíncrona é pouco utilizada em aproveitamentos eólicos não ligados à rede, uma vez que necessitará, nesse caso, de baterias de condensadores que forneçam energia reactiva.

De rotor bobinado: Os enrolamentos do rotor estão ligados em estrela e, no caso de controlo através do rotor, os seus terminais são ligados a um conversor electrónico de potência.

Em curto-circuito ou gaiola de esquilo: O rotor é constituído por barras curto-circuitadas por dois anéis nas duas extremidades; assim sendo, não existe qualquer acesso ao rotor.

2.4.3- Sistema de controlo

O sistema de controlo electrónico do funcionamento geral da eólica e do seu mecanismo de orientação. É este sistema que gere o arranque da turbina, a orientação das pás, a paragem, bem como a orientação do conjunto face à direcção do vento [17].

2.4.4- Medição do vento

Os instrumentos para medição do vento são de dois tipos: um catavento para avaliar a direcção e um anemómetro para medir a velocidade. Os dados são transmitidos à unidade de controlo que efectua a regulação do aerogerador de forma automática [7].

O sistema de orientação da turbina é composto por uma roda dentada (cremalheira) equipada de um motor. Permite a orientação da turbina face à direcção do vento e a sua « fixação » através de um travão.

2.5 - Características dos principais tipos de aerogeradores

2.5.1- Aerogerador de indução convencional

Os aerogeradores de indução convencionais são máquinas assíncronas compostas por um rotor em gaiola de esquilo e um estator com três enrolamentos que estão directamente acoplados à rede. São, deste modo, simples e robustos, apresentando um baixo custo de investimento e oferecendo uma reduzida controlabilidade. As estratégias de controlo que em geral, são adoptadas neste tipo de tecnologia, consistem apenas em estratégias aerodinâmicas que exploram [21]:

Os perfis das pás da turbina eólica através do controlo por stall-passivo visando proteger o aerogerador durante velocidades extremas de vento. Este controlo, é aplicado a aerogeradores convencionais com potências nominais inferiores a 1MW.

A orientação das pás da turbina através do controlo por stall-activo ou controlo de pitch de forma a compensar variações da velocidade do rotor, bem como de proteger a integridade física do sistema eólico em elevadas velocidades de vento. Em comum, ambos os controlos são utilizados em aerogeradores com potências iguais ou superiores a 1MW.

Operam numa estreita margem de velocidade angular, que é definida consoante o deslizeamento do gerador assíncrono que, em geral, varia de 1 a 2 % em relação ao deslizeamento nominal de operação (fornecido pelo fabricante). Por esta razão, são denominados como aerogeradores de velocidade fixa.

Um dos principais problemas que advêm da utilização deste tipo de aerogeradores em parques eólicos, é o significativo consumo de potência reactiva que existe durante o funcionamento normal e nomeadamente na fase de recuperação que se segue a um curto-circuito. Usualmente, são utilizadas baterias de condensadores, que compensam a solicitação de potência reactiva do circuito magnético da máquina [22].

Porém, contribuem muito pouco para atenuar o elevado consumo existente após a eliminação de um defeito, devido à redução da tensão aos terminais do gerador. Tal queda, resulta numa perda de eficiência do gerador que se traduz numa redução abrupta da potência activa injectada no sistema eléctrico. Deste modo, é compreensível a eventual saída de serviço deste tipo de parques, uma vez que quanto mais aerogeradores de indução estiverem conectados à rede eléctrica mais energia reactiva absorverão da mesma.

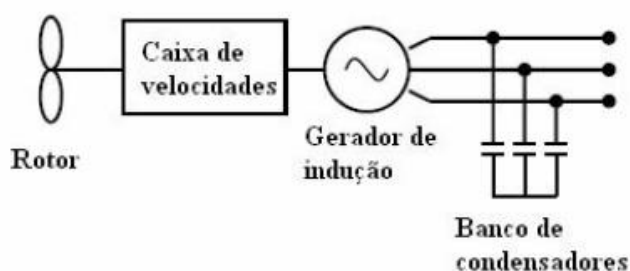


Figura 10- Esquema simplificado de aerogerador de indução convencional e banco de condensadores [22].

Tendo em conta este problema, foi necessário desenvolver tecnologias com níveis de controlo bem mais sofisticados capazes de entregarem à rede eléctrica potência activa e reactiva controladas, beneficiando o sistema em termos de estabilidade e comportamento dinâmico. Assim, o gerador síncrono de íman permanente e o gerador de indução duplamente alimentado, têm ocupado um lugar de especial relevo no campo da exploração eólica, devido à versatilidade de controlo que apresentam, associada aos dispositivos de electrónicos que usam.

2.5.2- Aerogerador Síncrono

As máquinas síncronas pertencem ao grupo das máquinas rotativas de corrente alternada e são assim designadas pelo facto de existir uma relação rígida entre a frequência eléctrica e a velocidade de rotação.

A sua utilização no domínio da energia eólica é feita aquando do seu funcionamento como gerador e tem por objectivo a maximização do aproveitamento energético na exploração

deste tipo de recurso. Assim, uma das soluções mais utilizadas neste grupo de sistemas de conversão é o aerogerador síncrono de ímanes permanentes.

Este tipo de máquinas cujo rotor é excitado por ímanes permanentes, operam a velocidade variável recorrendo ao uso de controlo de pitch ou stall-activo para o ajuste dos ângulos de ataque das pás da turbina, de forma a captar máxima energia do vento. A potência máxima extraída é transferida para o sistema eléctrico a partir de uma configuração CA-CC-CA de conversores electrónicos auto comutados, que interliga o estator do aerogerador à rede eléctrica. O conversor além de proceder à interligação do aerogerador com o sistema eléctrico, fixa a frequência eléctrica de saída consoante a frequência da rede e apresenta também capacidade de fornecer potência reactiva e controle de tensão [23].

Contrariamente ao modelo apresentado anteriormente, esta tecnologia não possui caixa de velocidades entre o gerador eléctrico e a turbina eólica, o que implica que o gerador possua um elevado número de pólos para compensar a baixa velocidade com que opera devido a estar directamente ligado à turbina eólica. A ausência de caixa de velocidades apresenta vários benefícios tais como: melhoria da eficiência, a redução do peso do aerogerador e a redução de níveis de ruído e de custos associados à manutenção regular deste componente [22].

Uma das principais vantagens deste tipo de sistema eólico, consiste no total desacoplamento entre o aerogerador e a rede eléctrica como resultado da presença dos conversores electrónicos. Estes, independentemente das súbitas variações de velocidade que o rotor possa sofrer devido ao aumento ou diminuição da velocidade do vento, continuam praticamente a entregar potência constante à rede. Por outro lado, uma vez que os conversores estão localizados na saída do aerogerador, é necessário dimensioná-los de acordo com a potência nominal do conjunto turbina/gerador o que juntamente com a utilização de cabinas de maior dimensão, dado o elevado número de pólos presentes no gerador, encarece bastante este tipo de tecnologia levando a que o seu uso seja limitado [22].

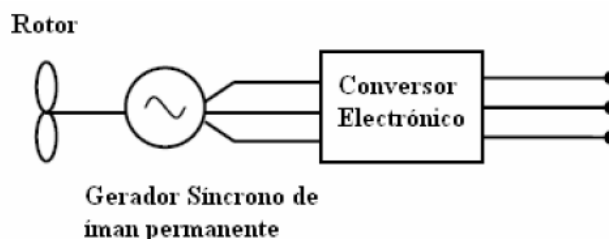


Figura 11- Esquema simplificado de aerogerador síncrono de íman permanente [22].

2.5.3- Aerogerador de indução duplamente alimentado

Neste tipo de máquinas assíncronas, também se utilizam conversores electrónicos de configuração CA-CC-CA, tal como anteriormente, conectados entre o rotor da máquina e a rede eléctrica. O conversor ligado à rede opera com a frequência do sistema eléctrico impondo, assim, um valor de frequência de saída. Por norma, este é controlado para manter a tensão no barramento CC constante, porém pode também ser usado para funcionar como um STATCOM. O conversor ligado ao rotor opera com diferentes frequências de acordo com a

velocidade do aerogerador e injecta tensões ou correntes controladas no rotor da máquina eléctrica a partir de estratégias de controlo pré-definidas, sendo deste modo responsável pelo controlo do DFIG. O principal argumento favorável à utilização desta tecnologia, consiste no facto de operar com velocidade variável recorrendo a conversores electrónicos com capacidades nominais bastante reduzidas - aproximadamente 10-25% da capacidade nominal do conjunto turbina/gerador. No entanto, apesar da melhor relação custo/benefício este aerogerador utiliza caixa de velocidades acarretando assim custos adicionais, o que juntamente com o facto de apresentar desacoplamento parcial com a rede eléctrica (ligado directamente à rede através do estator, originando maior sensibilidade a quaisquer perturbações nela ocorridas) constituem as principais desvantagens [21].

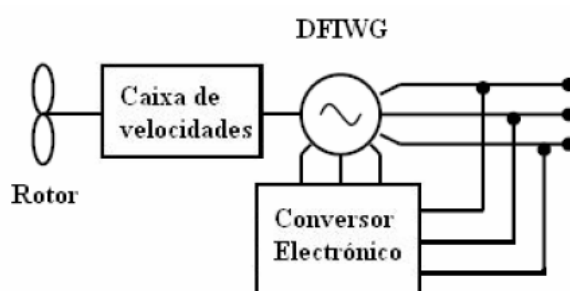


Figura 12- Esquema simplificado de aerogerador com gerador de indução duplamente alimentado [22].

Assim descreveram-se numa primeira fase, as características dos tipos de sistemas de conversão de energia eólica mais usuais como o aerogerador de indução convencional, o aerogerador síncrono de íman permanente e o aerogerador de indução duplamente alimentado.

Na tabela abaixo representada, sumariza as principais características e conclusões dos vários geradores eólicos:

Tabela 2- Características dos aerogeradores [22].

	Aerogerador de indução convencional	Aerogerador síncrono	Aerogerador de indução duplamente alimentado
Controlo de potência gerada e Controlo de frequência	<i>Alternar o estado de funcionamento da turbina (ligado/desligado). Controlo aerodinâmico das pás da turbina.</i>	<i>Alternar o estado de funcionamento da turbina (ligado/desligado). Controlo do ângulo de pitch e controlo do conversor electrónico de potência.</i>	<i>Alternar o estado de funcionamento da turbina (ligado/desligado). Controlo do ângulo de pitch e controlo do conversor electrónico de potência.</i>
Capacidade de geração de potência	<i>Dependência de vento como fonte de energia primária</i>	<i>Dependência de vento como fonte de energia primária</i>	<i>Dependência de vento como fonte de energia primária</i>
Controlo de tensão e potência reactiva	<i>Impossível sem equipamento adicional.</i>	<i>Possível com gestão de controladores electrónicos de potência.</i>	<i>Possível com gestão de controladores electrónicos de potência.</i>

2.6 - Mecanismos de controlo

Os mecanismos de controlo destinam-se à orientação do rotor, ao controle de velocidade, ao controlo da carga, etc. Devido à sua multiplicidade de controlos, existem variados parâmetros que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento da turbina face ao vento) ou electrónicos (controlo da carga).

Os aerogeradores modernos utilizam diversos princípios de controlo aerodinâmico para limitar a extracção de potência. Os mecanismos de controlo são designados de passo fixo (stall) e passo variável (pitch). No passado, a maioria dos aerogeradores utilizava o sistema de passo fixo. Entretanto, com o aumento do tamanho das máquinas, os fabricantes estão a optar pelo sistema de passo variável, por este permitir uma maior flexibilidade na operação das turbinas eólicas.

Os aerogeradores com regulação de potência por stall e pitch, muito embora se comportem de forma muito semelhante, do ponto de vista de ligação à rede eléctrica, estes mecanismos de potência apresentam algumas diferenças no que diz respeito à curva de potência.

2.6.1- Controlo de passo Variável

O controlo de passo variável ou Pitch Control é um sistema activo que normalmente necessita de um sinal de controlo do gerador de potência. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento, as pás da turbina giram em torno do seu eixo longitudinal, ou seja, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque do fluxo do ar. Com esta redução do ângulo de ataque alteram-se as forças actuantes no sentido de uma redução da extracção de potência do vento, por parte da turbina. O ângulo de ataque das pás da turbina é determinado de forma que, para todas as velocidades do vento, a turbina opere à potência nominal [15].

Sob todas as condições de vento, o fluxo de ar em torno do perfil da pá é bem aderente à sua superfície, produzindo sustentação aerodinâmica a pequenas forças de arrasto. Turbinas com controlo de passo variável são mais sofisticadas do que as de passo fixo, controladas por stall, porque estas necessitam de um sistema de variação de passo. As turbinas com controlo de passo variável permitem um maior controlo de potência activa injectada na rede para uma gama maior de velocidades de vento. Para uma descrição detalhada deste tipo de mecanismos consultar [20].

Este sistema para além de ser um sistema mais complexo do que o controlo de passo fixo, possui uma desvantagem para ventos de maior velocidade. Como o tempo de resposta do mecanismo de controlo não é instantâneo, surgem pequenas variações na geração instantânea de potência activa em torno do valor da potência nominal.

Mais recentemente surgiu uma concepção que mistura os mecanismos de controlo de passo fixo e variável, denominado *active stall control*. Para ventos de velocidade reduzida, as pás giram igualmente em torno do seu eixo longitudinal, como se passa no controlo de passo variável, com o objectivo de alcançar a máxima eficiência. Para velocidades de vento elevada as pás da turbina giram suavemente em torno do seu eixo longitudinal, de forma a formarem um dado ângulo com a direcção do vento, que é determinado para velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá, reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto [18].

Este tipo de sistema elimina as pequenas flutuações de potência activa verificadas no controlo de passo variável. As vantagens do sistema *active stall control* são:

- Necessidade de reduzidas mudanças no ângulo do passo
- Possibilidade de controlo da potência sob condições de potência parcial (baixas velocidades de vento)

2.6.2- Controlo de passo fixo

O controlo de passo fixo é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás da turbina são fixas de forma a formarem um dado ângulo com a direcção do vento, não podendo girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é determinado para que as pás, através do seu perfil, provoquem o deslocamento aerodinâmico do fluido que as atravessa originando turbulência. Esta turbulência ir-se-á traduzir por uma diminuição do coeficiente de sustentação e, conseqüentemente, da sua força, e por um aumento do coeficiente de arrasto e força correspondente. Portanto, o binário desenvolvido sofrerá um decréscimo em cada uma das pás [14].

Para evitar que o efeito de perda de velocidade ocorra em todas as posições das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência da turbina, as pás apresentam uma pequena torção longitudinal que as levam a uma atenuação deste efeito.

Os aerogeradores com controlo de passo fixo, em comparação com os aerogeradores com controlo de passo variável, possuem as seguintes vantagens[17]:

- Inexistência de sistema de controlo de passo
- Estrutura de cubo do rotor simples
- Menor manutenção devido a um número menor de peças móveis

A maioria dos fabricantes utiliza esta possibilidade simples de controlo de potência, sendo a mais utilizada na concepção de aerogeradores de potências reduzidas (até aos 5 kW). Este sistema necessita de uma velocidade constante do rotor, geralmente dada pelo gerador de indução directamente ligado à rede [17].

2.7 - Exemplos de microgeradores eólicos

2.7.1- Turbina micro-éolica T.Urban

O Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação (INETI) produziu o primeiro protótipo de uma micro-turbina eólica urbana em Portugal. A T.Urban tem 2,3 metros de diâmetro, uma potência de 2,5 quilowatts e pode diminuir a factura energética de uma habitação, segundo o catálogo cerca de 30 por cento, apresenta uma alta eficiência e baixo custo de turbinas eólicas para ambiente urbano. O preço por unidade de potência é muito similar ao das turbinas de grande porte cuja tecnologia, como se sabe, já atingiu um grande grau de maturidade.

A turbina é equipada com um gerador de ímanes permanentes e a uma velocidade de rotação variável.



Figura 13 - Micro-turbina T.Urban

O seu sistema de controlo foi especificamente concebido para a ligação à rede de operação, esta ligação é monofásica para permitir uma fácil integração em aplicações domésticas. Apresenta um desempenho característico de uma turbina da classe dos Megawatt.

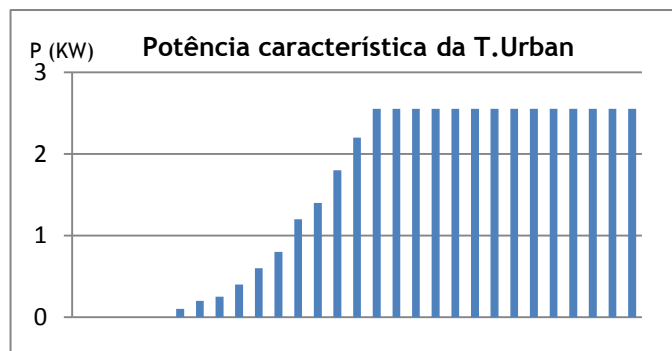


Figura 14 - Potência característica da T.Urban

Tabela 3 - Características da T.Urban

Modelo	T.Urban
Potência nominal	2500 (W)
Velocidade de arranque	3,5 (m/s)
Velocidade de paragem	25 (m/s)
Velocidade nominal	12 (m/s)
Tipo rotor	Horizontal
Diâmetro do rotor	2,5 (m)
Tipo de gerador	PMSG
Tipo de ligação	Monofásico
Velocidade de Rotações	Variável
Tensão	220/240V
Frequência	50 Hz
Arranque	Automático

2.7.2- Turbina micro-éolica Donqi

O desenvolvimento da Turbina Micro-eólica Donqi, foi otimizado para funcionar em ambiente urbano. A produção de energia é maximizada pela aceleração do vento a baixas velocidades, o que permite produzir energia a partir de 2,5 m/s. O moinho de vento Donqi é também suficientemente robusto para produzir energia até velocidades de 30 m/s e resistir a ventos de mais de 200 Km/h.



Figura 15 - Micro-turbina Donqi

Uma característica única desta turbina patenteada é a utilização de um venturi - uma secção horizontal tubular que alinha, canaliza e acelera o vento. É uma vantagem competitiva do desenho que garante uma elevada eficiência apesar do pequeno diâmetro do rotor e da sua altura, produzindo em média 2.400 kWh de energia por ano a uma velocidade média do vento de 5,5 m/s. Do mesmo modo, a sua tecnologia previne os possíveis problemas de ruído, ressonância, vibrações e sombras que têm sido apontados como barreiras ao desenvolvimento desta fonte de produção de energia limpa em edifícios.

Tabela 4 - Característica da Donqi

Modelo	Donqi
Potência AC nominal P _{máx}	1750
Velocidade nominal [m/s]	12,5
Velocidade nominal [rpm]	2500
Velocidade de arranque [m/s]	2,5
Velocidade máxima [m/s]	30
Material	ABS e Inox
Diâmetro máximo [mm]	2000
Diâmetro Rotor [mm]	1500
Nº de Pás	3
Nível de Ruído [db]	35
Material das Pás	Nylon
Comprimento do Mastro [m]	1 a 5
Peso [Kg]	110

Na realidade, esta tecnologia apesar dos protótipos agora a dar os passos para a sua produção industrial vai necessitar ainda de muita monitorização e desenvolvimento resultante dos resultados da monitorização. Existem ainda problemas por dominar, nomeadamente o ruído na Donqi. Acresce que os problemas resultantes do sombreamento, previsível na integração urbana, assim com a distribuição micro dos ventos nas cidades, ainda não foram objecto de estudo aprofundados.

2.7.3- Turbina micro-éolica Proven

A turbina Proven surge nas gamas de 2.5, 6 e 15kW. Trata-se de uma turbina com controlo de pitch, o gerador de ímanes permanentes è trifásico. O controlo permite maximizar a produção de energia e limitar os fenómenos transitórios.

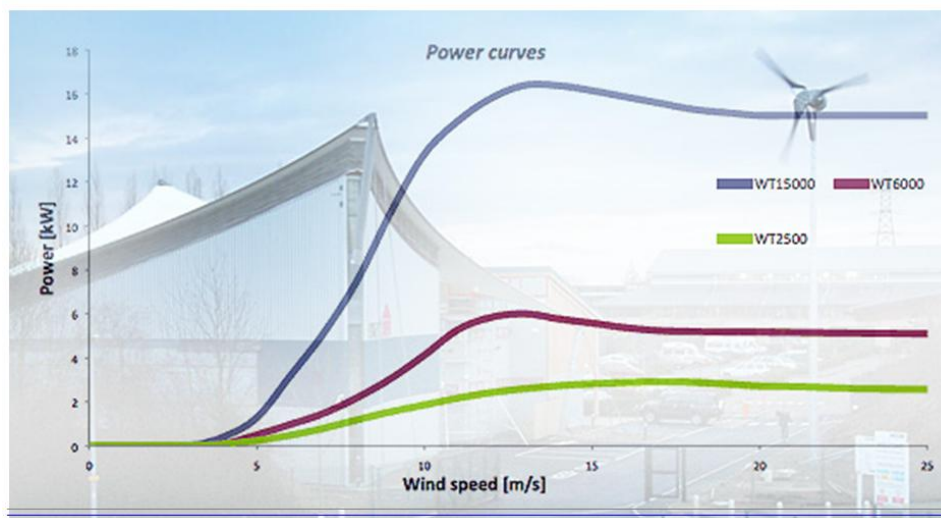


Figura 16 Curva de potência da turbina eólica Proven

A chave do sucesso é o design único do rotor Proven que se adapta ao vento, otimizando performance e segurança mesmo nos ventos mais fortes. O sistema patenteado de rotor flexível Proven permite o funcionamento do aerogerador tanto em ventos fracos como fortes. Este sistema único, uma combinação de design inovador e das mais recentes tecnologias de compósitos, permite ao rotor dobrar e torcer.

Com o aumento da intensidade do vento, as pás do rotor torcem para reduzir a sua eficiência aerodinâmica mantendo assim constante a produção de energia eléctrica. Isto permite ao aerogerador Proven manter uma produção elevada mesmo nas mais violentas tempestades; ao contrário de muitas turbinas que precisam de parar para se protegerem de ventos fortes.

Em caso de desconexão da carga ou falha eléctrica as pás também regulam a sua velocidade, evitando assim danos no aerogerador.

A turbina patenteada da Proven Energy foi submetida a testes rigorosos em todo o mundo, sujeita às mais extremas condições, produzindo energia eléctrica constantemente e requerendo pouca manutenção.

Tabela 5 - Característica da Proven 2,5 kW

Modelo	Proven
Potência AC nominal P _{máx}	
Velocidade nominal [m/s]	12,5
Velocidade nominal [rpm]	2500
Velocidade de arranque [m/s]	2,5
Velocidade máxima [m/s]	30
Material	ABS e Inox
Diâmetro máximo [mm]	2000
Diâmetro Rotor [mm]	1500
Nº de Pás	3
Nível de Ruído [db]	35
Material das Pás	Nylon
Comprimento do Mastro [m]	1 a 5
Peso [Kg]	110

2.8 - Interligação com a rede

Os sistemas MG podem funcionar em vários regimes:

- Em rede isolada. Neste caso, exigem um sistema de armazenamento de energia, para posterior abastecimento em alturas de escassez da fonte de energia primária.
- Ligados à rede de distribuição em BT. Nesta situação, é necessário um sistema de armazenamento de energia cujas necessidades são colmatadas pela rede, e no caso da produção exceder o consumo, o excesso é vendido à rede; no caso contrário, quando o consumo é superior à produção, a energia é fornecida pela rede [24].
- Existe ainda a possibilidade de toda a produção de energia disponível ser totalmente vendida à rede, sendo esta a situação objecto de estudo deste trabalho. Apesar de ser uma opção não enquadrável legalmente, neste momento, pareceu-nos ser a situação que reflecte cenários mais desfavoráveis.

É possível encontrar no mercado diferentes topologias de ligação à rede, sendo as mais comuns, mas não as únicas, as que se encontram representadas na Figura 17.

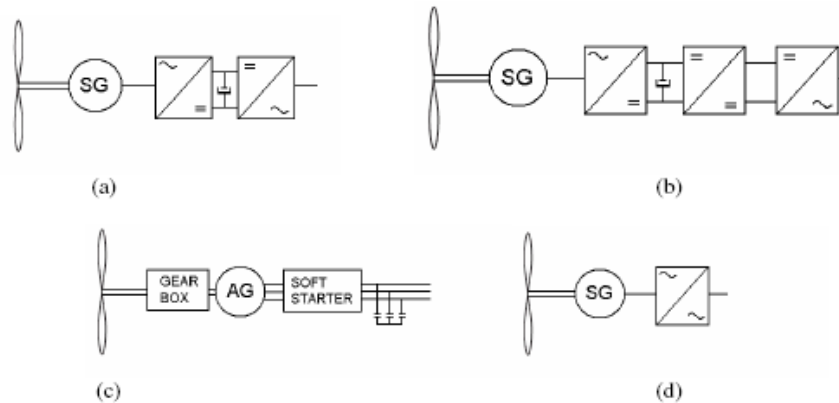


Figura 17 - (a): Micro-turbina eólica com gerador síncrono com rectificador, barramento DC e inversor. (b): Micro turbina eólica com gerador síncrono com rectificador, barramento DC, *chopper* e inversor. (c): Micro turbina eólica com sistema de transmissão, gerador assíncrono com *soft starter* (d): Micro turbina eólica com gerador síncrono com conversor AC/AC [25]

Se um estudo mais profundo for realizado nos sistemas electrónicos de potência, concluir-se-á que é possível encontrar no mercado turbinas com PMSG que utilizam inversores com IGBT e outros com pontes de tiristores, na qual a qualidade de potência injectada na rede não é igual [25].

A utilização do conversor de frequência torna possível o funcionamento do aerogerador a velocidade variável, o que aumenta a conversão de energia e reduz a fadiga mecânica dos elementos mecânicos, permitindo que as variações bruscas de velocidade do vento sejam compensadas por uma variação de velocidade das partes rotóricas. Os sistemas de conversão baseados em electrónica de potência têm a capacidade de controlo rápido de defeitos na rede, não acarretando um aumento significativo do nível de defeitos da instalação [26].

No entanto, a electrónica de potência tem as suas desvantagens, como perdas nos sistemas de conversão (rectificadores, inversores, etc.), custo elevado destes equipamentos e ainda a produção de harmónicos [11]. Na Figura 18 apresentam-se as topologias mais comuns na ligação de turbinas eólicas utilizando PMSG:

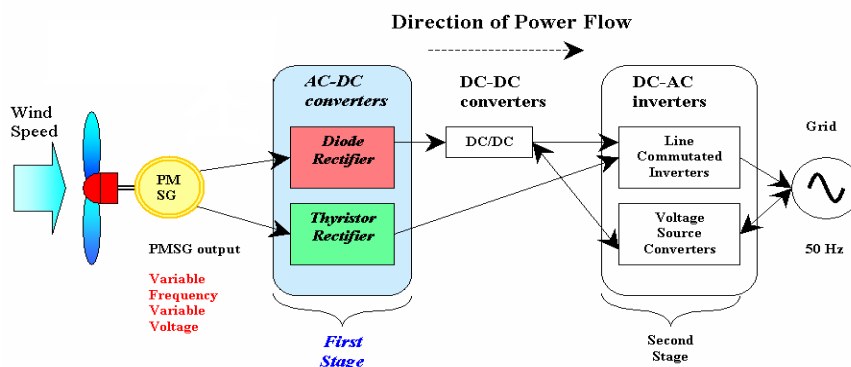


Figura 18 - Diagrama de diferentes tipos de sistema de conversão operando a velocidade variável [11].

Os sistemas de conversão utilizados são baseados na utilização de um rectificador e de um inversor em cascata. Existem duas classes principais de conversores:

- Conversores de comutação natural
- Conversores de comutação forçada

Nos primeiros, a conversão é realizada através de semicondutores que deixam de conduzir corrente eléctrica naturalmente, como os díodos e os tiristores. Este tipo de sistemas distinguem-se pela sua simplicidade e baixo custo [26].

A vantagem deste tipo de rectificador possuir tiristores é de reduzir a complexidade do sistema de conversão de energia eólica porque os conversores CC/CC não são utilizados.

A rectificação através de semicondutores de comutação forçada permite controlar o ângulo de fase entre a força electromotriz interna e a corrente. Estes semicondutores na função de inversão podem garantir uma fonte de tensão alternada independente do fornecimento de energia reactiva. Os conversores de comutação forçada, pela sua natureza, são complexos, caros e o seu tamanho é considerável [26].

Capítulo 3

Impacto da geração eólica na rede eléctrica

Neste capítulo será analisado sob o ponto de vista da rede, o impacto da geração de energia dispersa, particularmente relacionada com os aerogeradores ou geradores eólicos. Para além de se apresentar os principais conceitos de qualidade de energia aplicáveis aos aerogeradores, eles são classificados com relação à sua tecnologia e adicionalmente são apresentados os principais problemas de estabilidade também relacionados com as tecnologias eólicas.

3.1 - Impacto em regime dinâmico

Cada aerogerador é composto por uma unidade de conversão eólica-mecânica, transmissão mecânica, gerador eléctrico, sistema de controlo, onde pode ou não estar incluído no mesmo o sistema de conversores de frequência e ou controle de reactivo, e, finalmente, um transformador elevador.

O gerador eléctrico pode ser de dois tipos fundamentais como foi já referido no capítulo 2: gerador síncrono ou gerador de indução. Quanto aos geradores síncronos têm sido usados na configuração de multipolos, podendo ser do tipo com excitação externa ou do tipo íman permanente, no que diz respeito ao gerador de indução pode ser de dois tipos básicos, gaiola e bobinado, este último permite um controle de sua potência através de conversores electrónicos (dupla alimentação).

Em síntese, o aspecto mais relevante para o impacto da operação das centrais eólicas na rede eléctrica reside no aspecto da conexão eléctrica das máquinas. As máquinas directamente conectadas à rede tem características de uma conexão rígida, isto é, os efeitos nas máquinas eólicas são passadas directamente para a rede eléctrica e vice-versa.

As máquinas com conversores electrónicos podem ser de dois tipos: com conversores em série onde toda a potencia passa através dos conversores, em paralelo (dupla alimentação)

onde uma pequena parcela da potência passa através dos conversores. Este último tipo de tecnologia utilizada é usado com geradores assíncronos bobinados. Devido ao desacoplamento electromecânico, nas tecnologias que usam conversores em série, os efeitos causados pelo vento podem ser suavizados na transferência de potência para a rede eléctrica e, como também, os problemas na rede eléctrica, por exemplo, provenientes de faltas podem ser filtrados pelos conversores.

3.1.1 - Qualidade de energia e aerogerador

A relação entre aerogeradores e os desvios nos padrões de qualidade é um fenómeno conhecido [27]. As questões de qualidade classificam-se em problemas relacionados com qualidade de tensão e com a introdução de componentes harmónicas.

Pode-se também realizar a classificação quanto a característica temporal dos fenómenos:

- Lentas - relacionadas com a operação em regime permanente e variações lentas de tensão em termos de minutos;
- Dinâmicas - relacionadas com a operação dos aerogeradores que podem ser do tipo:
 - Variação de tensão de curta duração;
 - Flicker (centilação);
 - Harmónicas - relacionada às máquinas eólicas com conversores electrónicos de frequência.

Os principais problemas de turbinas eólicas na qualidade de energia estão relacionados com a tensão. A tabela 6 apresenta uma relação entre os principais parâmetros de variação de tensão de curta duração e os aerogeradores.

Tabela 6 - Denominação das variações de tensão de curtas durações

Denominação	Duração da variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão nominal	Causados por aerogeradores
Interrupção momentânea de tensão	≤ 3 segundos	$< 0,1$ pu	Não
Afundamento momentâneo de tensão	≥ 1 ciclo e ≤ 3 segundos	$\geq 0,1$ e $< 0,9$ pu	Sim
Elevação momentânea de tensão	≥ 1 ciclo e ≤ 3 segundos	$> 1,1$ pu	Sim
Interrupção temporária de tensão	> 3 segundos e ≤ 1 minuto	$< 0,1$ pu	Não
Afundamento temporário de tensão	> 3 segundos e ≤ 1 minuto	$\geq 0,1$ e $< 0,9$ pu	Sim
Elevação temporária de tensão	> 3 segundos e ≤ 1 minuto	$> 1,1$ pu	Sim

3.1.2 - Fenómenos adicionais relacionados a aerogeradores

Hoje em dia, a operação de grandes centrais eólicas tem apresentado relações com a estabilidade do sistema eléctrico. Devido a larga inserção de centrais eólicas ao sistema eléctrico, os aerogeradores são requisitados a participar no controle de tensão e frequência, assim como permanecerem em operação durante e após faltas no sistema eléctrico [27].

A contribuição para a regulação de tensão e frequência por parte das centrais eólicas tem sido discutido em diversos países. Esta capacidade, a princípio, só está disponível em máquinas de última geração que usam conversores electrónicos mediante alterações no sistema de controlo.

Actualmente, em alguns países já é exigido que os aerogeradores sejam mantidos em operação durante e após faltas.

De uma maneira geral, os operadores de sistemas eléctricos europeus solicitam que as turbinas eólicas mantenham a operação quando submetidas a perfis de tensão de similares ao apresentado na Figura 19.

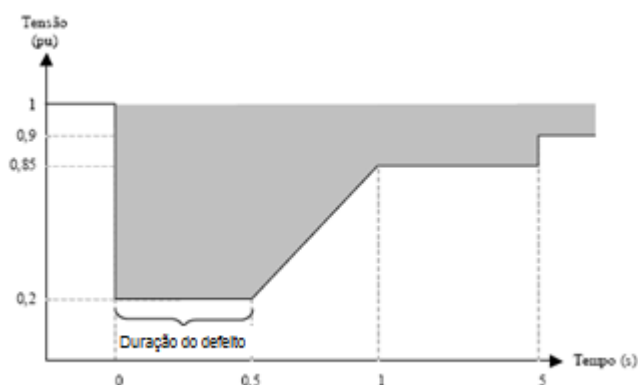


Figura 19 - Comportamento durante curto-circuito

A suportabilidade dos aerogeradores perante o perfil de tensão apresentado na Figura anterior é também conhecido como Ride Through Fault Capability, desde que o defeito seja eliminado em num determinado tempo e se verifique uma recuperação da tensão no ponto de interligação com a rede. Adicionalmente, no caso dos aerogeradores também envolve a garantia de alimentação de servomotores para o controle do ângulo de pitch das pás da turbina e dos sistemas de controlo restantes [27] para manter a operação estável do aerogerador.

Tabela 7 - Relacionamento do impacto de tecnologias de aerogeradores nos parâmetros de qualidade de energia e fenómenos adicionais

Tecnologia X Impactos na rede	Máquina de Indução diretamente acoplada à rede	Máquina de Indução duplamente alimentada com conversores de frequência	Máquina Síncrona com conversores de frequência
Distorção Harmónica	Pouco relevante	Relevante	Muito relevante
Flutuação de tensão (Flicker)	Muito relevante	Relevante	Pouco Relevante
Variação de tensão de curta duração *	Muito relevante	Relevante	Relevante
Regulação de tensão em regime permanente	Não tem	Possível Implementação	Possível Implementação
Compensação de desequilíbrios de tensão	Não tem	Possível Implementação	Possível Implementação
Suportabilidade Durante Faltas	Não tem	Possível Implementação	Possível Implementação
Controle de Potência Ativa (frequência)	Não tem	Possível Implementação	Possível Implementação

* Inclui-se aí: Afundamentos, Elevações e Interrupções Momentânea e Temporárias de tensão.

3.2 - Impacto em regime estacionário

A inclusão da produção distribuída na rede, requer a estruturação e modelização do conjunto de incertezas que lhe estão associadas para que seja possível estimar o modo de funcionamento da rede com o impacto desta produção. Neste aspecto, há uma certa tradição no recurso a modelos probabilísticos, nomeadamente quando existe uma base estatística fiável, como é o caso dos diagramas de carga.

Verifica-se, no entanto, que em muitos casos não estão criadas as condições para a utilização destes modelos de representação da incerteza, ou porque não há suficiente base estatística (caso da energia eólica), ou porque não se conseguem avaliar devidamente as interações entre variáveis não completamente independentes, ou ainda porque as variáveis não apresentam um comportamento estocástico (processos matematicamente caóticos, etc.).

O meio mais vulgar de ultrapassar estas dificuldades é o recurso à construção de um conjunto de cenários futuros, perante os quais é possível realizar uma avaliação de carácter praticamente determinístico.

È recorrendo a cenários que vamos simular os diferentes modos de funcionamento da rede para períodos onde se verificam extremos máximos e mínimos na expectativa de analisar o que acontece nessas situações quer em termos dos limites técnicos das linhas quer em termos do perfil das tensões.

Para a análise utilizamos uma plataforma de simulação onde se correram vários cenários. A análise foi efectuada para todos os cenários identificados que descreveremos no capítulo seguinte. Na impossibilidade de recorrermos a uma ferramenta que permitisse uma análise relativa a sistemas desequilibrados simulamos uma fase apenas para o que consideramos cargas trifásicas equilibradas e produção também equilibrada nas três fases.

Capítulo 4

Plataforma de Simulação da rede BT

4.1 - Introdução

Neste capítulo faz-se uma descrição da plataforma de simulação e uma descrição dos modelos adoptados para os diferentes componentes considerados nas simulações.

A solidez e qualidade de um estudo baseado em simulação, passíveis de serem extrapoladas para a realidade, dependem muito da qualidade dos modelos adoptados e da robustez da plataforma de simulação.

A rede em estudo, está descrita em detalhe neste capítulo e foi transposta para a plataforma de simulação (IPSA Power Ltd 2009) tendo sido introduzido todos os dados disponíveis e utilizando, sempre que possível, os modelos dos componentes disponíveis na biblioteca da plataforma.

4.2 - Ferramenta de simulação

O Interactive Power Systems Analysis (IPSA) é um pacote principal do software que permite que o utilizador obtenha um elevado número de simulações, essencialmente para estudos de transitórios electromagnéticos para energia eléctrica e sistemas de concepção planeamento operacional.

IPSA é um software desenvolvido especificamente para planeamento de sistemas de energia e aplicações de operação da rede. Tem conteúdos avançados, algoritmos coordenados de fluxo de carga, nível de avaria, a coordenação de protecções, penetração de harmónicos, fenómenos transitórios e análise de estudos Óptimos de Fluxo de Potência.

É baseado no trabalho já disponível de sistemas de análise de potência para planeamento e operação e foi desenvolvido na University of Manchester Institute of Science and

Technology (UMIST). Em 1998 foi criada uma empresa independente da Universidade, sob os auspícios da UMIST Ventures Ltd. Para permitir que o software alcançasse um mercado mais amplo.

A versão deste pacote de software que foi utilizada na execução do trabalho foi a versão IPSA+1.6.2. No endereço <https://www.ipsa-power.com/> encontra-se disponível uma versão demo do software IPSA Power Ltd.

4.3- Caracterização da rede de baixa tensão

A rede BT tem uma topologia radial, mista e é constituída por cabos aéreos (troçada) e enterrados. O exemplo de dimensão real que se apresenta tem como base de trabalho os dados de uma região do norte que foram cedidos pela faculdade.

Esta rede possui 48 de nós e 46 linhas e é alimentada por uma subestação 400KVA. Conhecem-se as potências instaladas no posto de transformação e as características eléctricas das linhas. A tabela 8 descreve a rede, cujo esquema unifilar se pode ver representado na figura 20.

Tabela 8- Características das linhas em pu

De	Para	Resistência (pu)	Reactância (pu)
16	26	29.166.670	2.187.500
17	18	24.166.670	1.812.500
17	40	15.476.190	3.250.000
19	46	16.008.770	4.562.500
20	21	35.156.240	1.687.500
20	22	29.583.330	4.437.500
20	32	30.000.000	4.500.000
22	33	15.000.000	2.250.000
23	24	10.416.670	2.187.500
25	35	9.821.430	2.062.500
28	36	20.833.330	4.375.000
29	40	21.428.570	4.500.000
3	17	42.857.140	10.000.000
3	13	6.343.980	2.812.500
4	5	27.622.770	2.062.500
4	31	10.000.000	4.500.000
5	32	15.416.670	2.312.500
6	18	25.000.000	1.875.000
6	9	54.166.660	4.062.500
6	41	13.750.000	2.062.500
8	29	21.428.570	4.500.000
8	36	33.333.330	2.500.000
8	37	25.833.330	1.937.500
10	27	29.166.670	2.187.500
10	28	10.714.280	2.250.000
10	35	10.714.280	2.250.000
11	26	27.500.000	2.062.500
11	27	29.166.670	2.187.500
12	24	10.416.670	2.187.500
12	25	11.011.900	2.312.500
13	30	20.089.280	6.562.500

13	44	47.712.050	3.562.500
14	15	14.166.670	2.125.000
14	34	15.416.670	2.312.500
30	43	8.801.020	2.875.000
31	48	17.222.220	7.750.000
33	34	16.666.670	2.500.000
37	38	50.000.000	3.750.000
38	39	38.333.330	2.875.000
42	43	9.948.980	3.250.000
45	46	7.500.000	3.375.000
45	48	7.916.670	3.562.500
46	47	10.277.780	4.625.000
1	3		0.050000

As características dos ramos estão representadas em sistema por unidade tendo como base a potência de 100MVA.

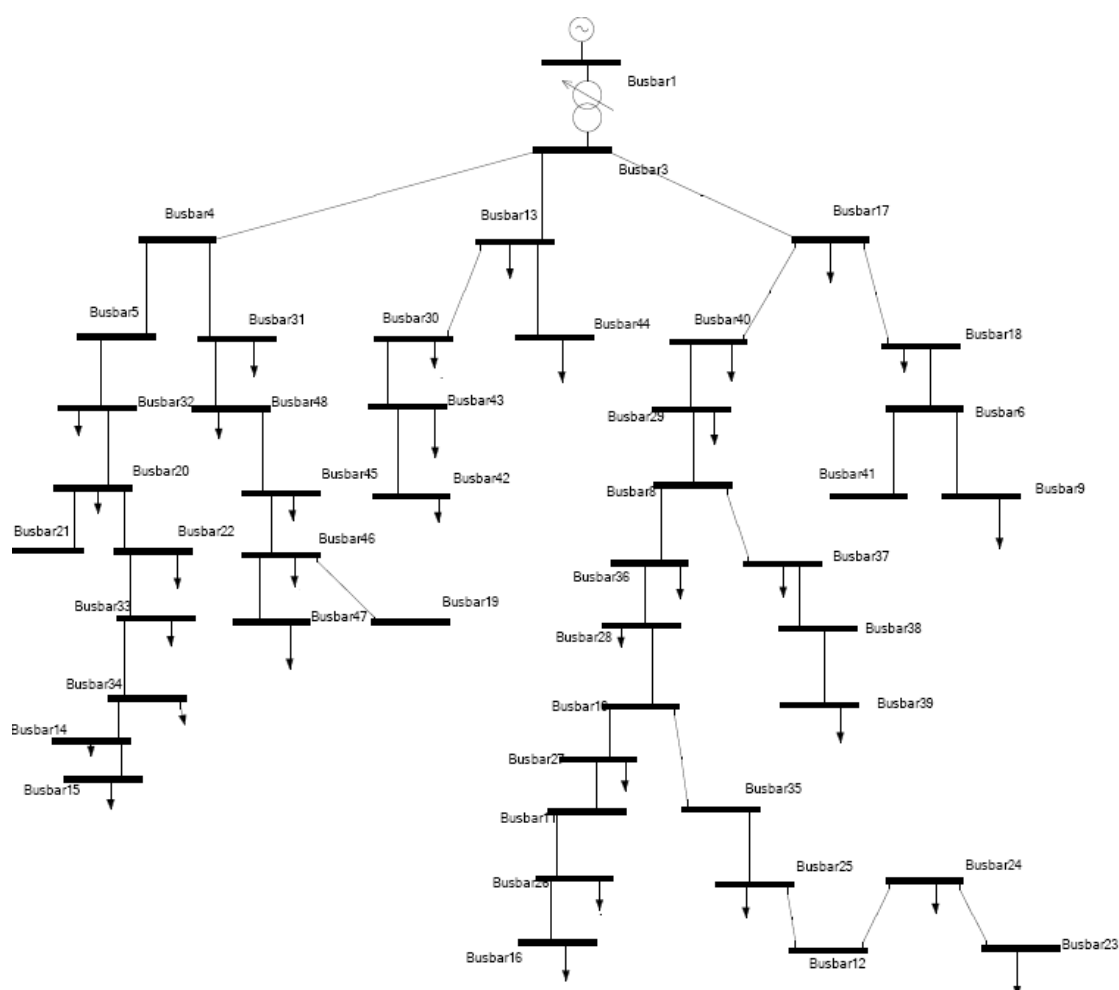


Figura 20 - Traçado da rede em estudo, com 48 nós e 46 linhas

Como se verifica na figura 20, o traçado da rede de 48 nós inclui cargas, que são predominantemente de consumidores domésticos, cerca de 70% da carga total e os restantes refere-se a consumidores de serviços.

Para simular o funcionamento em tempo real da rede fomos utilizar um software que permite, a partir das características do consumo, da potência instalada e do número de consumidores agregados, identificar o diagrama global com base na metodologia descrita no portal da Entidade Reguladora do Sector Energético (ERSE). Este exercício foi feito para cada um dos nós da rede em função das cargas atribuídas a esses mesmos nós.

A determinação dos diagramas de carga dos consumidores em geral, é feito a partir do estudo da energia anual consumida para cada tipo de consumidor multiplicado pelo respectivo factor de simultaneidade e pelo perfil desses mesmos consumidores fornecidos pela ERSE. No presente estudo, foi considerado que iam ser alimentados 4 tipos de consumidores, sendo três deles consumidores domésticos e outro a consumidores de serviços, com potências contratadas representadas na tabela 9.

Tabela 9 - Tipo de habitação em função da potência contratada

Habitação	Pot. Cont. (KVA)
Hab1	27,6
Hab2	17,25
Hab3	13,8
Comércio	34,5

Posteriormente foi considerado que esses consumidores fossem agregados em três tipos de armários de distribuição (nós da rede) e calculado os valores de diagrama de carga para cada tipo de armário de distribuição afectados do factor de simultaneidade a que estão ligados os diferentes consumidores, estes valores estão representados na tabela 10. Os diagramas de carga de cada uma das habitações e dos armários de distribuição estão representadas em anexo 3.

Tabela 10 - Tipo de Armários em função do número de habitações

Armário	Nº de Habitações
A 1	Hab1+HabA3
A2	Hab3+Comércio
A 3	2*Hab2

Quanto à localização dos diferentes tipos de armário na rede baixa tensão, estes forem distribuídos em pontos que se considerou mais aceitáveis, esta distribuição está representada na tabela 11.

Tabela 11 - Localização dos armários para os respectivos barramentos

Armários	Barramentos (Busbar)													
A3	33	34	14	15	47	46	43	42	27	26	16	25	24	23
A2	22	45	13	44	28	39	17	9	-	-	-	-	-	-
A1	20	48	32	31	30	40	29	36	37	18	-	-	-	-

No que diz respeito às limitações de potência das linhas, estas limitações estão representadas na tabela seguinte:

Tabela 12 - Limites das linhas da rede de baixa tensão

De barramento	Para barramento	Limites (MVA)
16	26	0.070
17	18	0.070
17	40	0.130
19	46	0.130
20	21	0.050
20	22	0.100
20	32	0.100
22	33	0.100
23	24	0.130
25	35	0.130
28	36	0.130
29	40	0.130
3	17	0.170
3	13	0.170
4	5	0.070
4	31	0.170
5	32	0.100
6	18	0.070
6	9	0.070
6	41	0.100
8	29	0.130
8	36	0.070
8	37	0.070
10	27	0.070
10	28	0.130
10	35	0.130
11	26	0.070
11	27	0.070
12	24	0.130
12	25	0.130
13	30	0.140
13	44	0.060
14	15	0.100
14	34	0.100
30	43	0.140
31	48	0.170
33	34	0.100
37	38	0.070
38	39	0.070
42	43	0.140
45	46	0.170
45	48	0.170
46	47	0.170

4.4- Modelização do microgerador

A modelização do microgerador eólico foi realizada a partir de uma típica configuração de ligação à rede deste tipo de sistemas. O esquema é baseado na ficha de características técnicas da turbina Proven 2,5 disponível em [28] e que segue no Anexo 2, para representação do aproveitamento da energia primária, neste caso, o vento. Na plataforma de simulação é fundamental conhecer a curva característica de potência do aerogerador. Para a sua implementação no software de simulação, é necessário realizar a linearização da curva como apresentado na Figura 21.

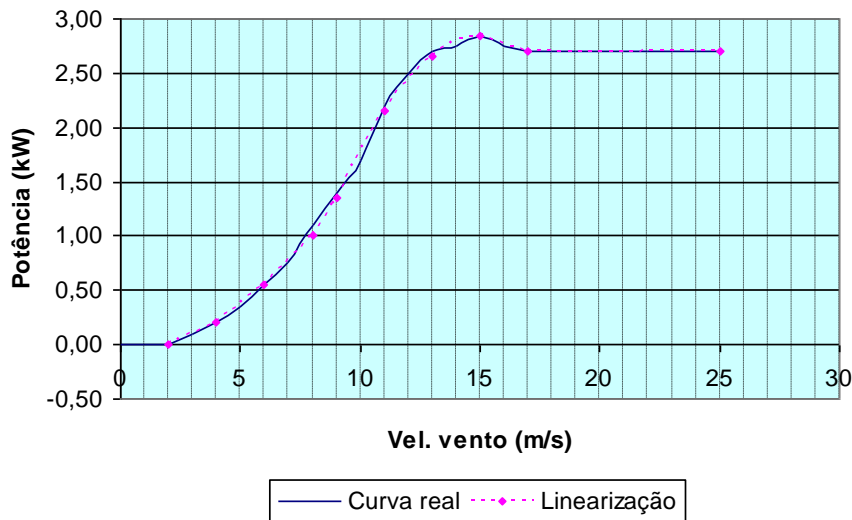


Figura 21 - Linearização da curva de potência do aerogerador Proven 2,5

Tendo isto, pretendemos fazer as simulações no IPSA Software para os dois casos em que as cargas apresentam valores de ponta (período das 13 horas) e o outro caso para as cargas em vazio (período das 3 horas) e conseqüentemente cinco cenários distintos para cada um destes casos:

- Caso em que as cargas apresentam valores de ponta do diagrama de potência, dentro deste foram considerados os seguintes cenários:
 - Cenário 1, Rede de baixa tensão sem microgeradores eólicos (figura 20).
 - Cenário 2, Rede de BT com microgeradores eólicos para potências de injeção de 1000W (por fase), isto é considerando a produção relativa à velocidade do vento de 8 m/s e segundo a distribuição da figura 22.
 - Cenário 3, Rede de BT com microgeradores eólicos para potências de injeção de 2500W (por fase), isto é considerando a produção relativa à velocidade do vento de 12 m/s e segundo a distribuição da figura 22.

- Cenário 4, Rede de BT com microgeradores eólicos para potências de injeção de 1000W (por fase), isto é considerando a produção relativa à velocidade do vento de 8 m/s e segundo a distribuição da figura 23.
 - Cenário 5, Rede de BT com microgeradores eólicos para potências de injeção de 2500W (por fase), isto é considerando a produção relativa à velocidade do vento de 12 m/s e segundo a distribuição da figura 23.
- Caso em que as cargas apresentam valores de vazio do diagrama de potência e dentro deste foi considerado:
 - Cenário 1, Rede de baixa tensão sem microgeradores eólicos (figura 20).
 - Cenário 2, Rede de BT com microgeradores eólicos para potências de injeção de 1000W (por fase), isto é considerando a produção relativa à velocidade do vento de 8 m/s.
 - Cenário 3, Rede de BT com microgeradores eólicos para potências de injeção de 2500W (por fase), isto é considerando a produção relativa à velocidade do vento de 12 m/s.
 - Cenário 4, Rede de BT com microgeradores eólicos para potências de injeção de 1000W (por fase), isto é considerando a produção relativa à velocidade do vento de 8 m/s.
 - Cenário 5, Rede de BT com microgeradores eólicos para potências de injeção de 2500W (por fase), isto é considerando a produção relativa à velocidade do vento de 12 m/s.

Fizemos o estudo apenas para uma fase. Como o sistema apenas permitia modelizar componentes trifásicos distribuímos os geradores de forma equilibrada pelas três fases. E uma vez que a análise é feita recorrendo ao esquema unifilar a potência do microgerador eólico terá de ser 3 vezes a potência monofásica para garantir coerência com a carga.

No que se refere aos cenários 2 e 3 para cada um dos casos em que se liga os microgeradores eólicos na rede baixa tensão a localização destes, está representada e identificada na figura 22.

Nos cenários 4 e 5 a localização dos microgeradores eólicos na rede baixa tensão está representada e identificada na figura 23.

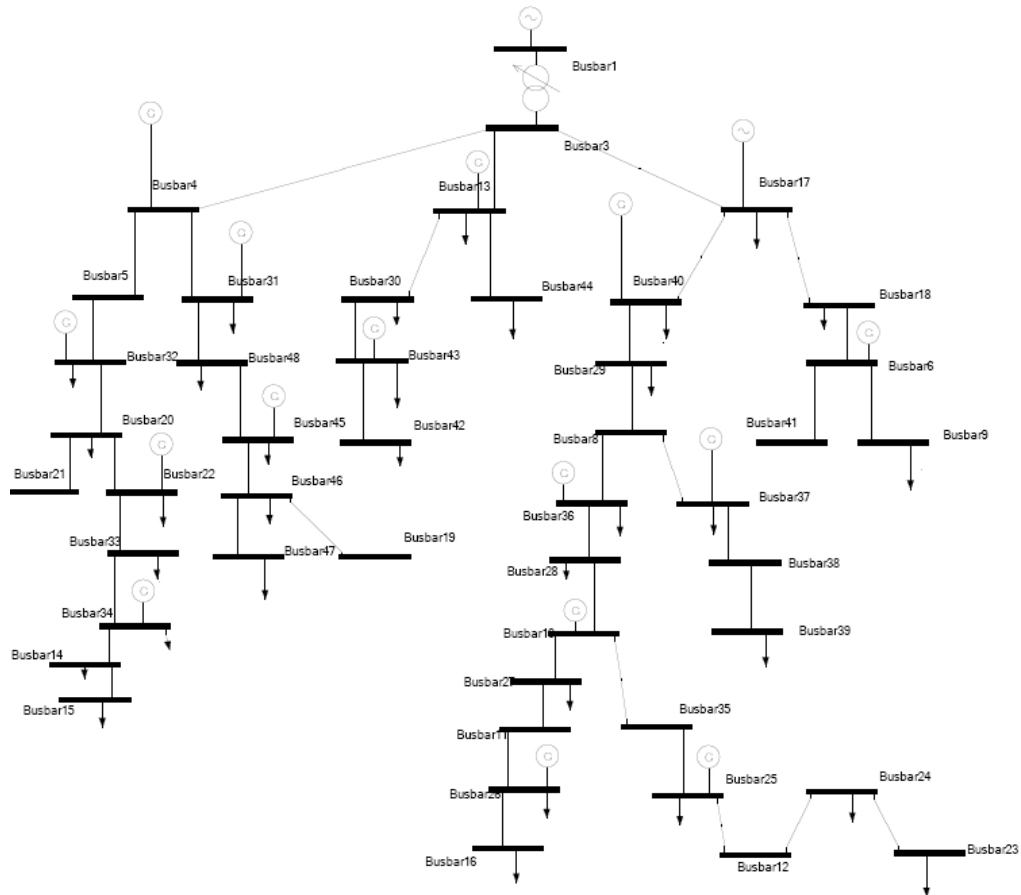


Figura 22- Rede de Baixa tensão com ME distribuídos pelas 3 saídas da subestação

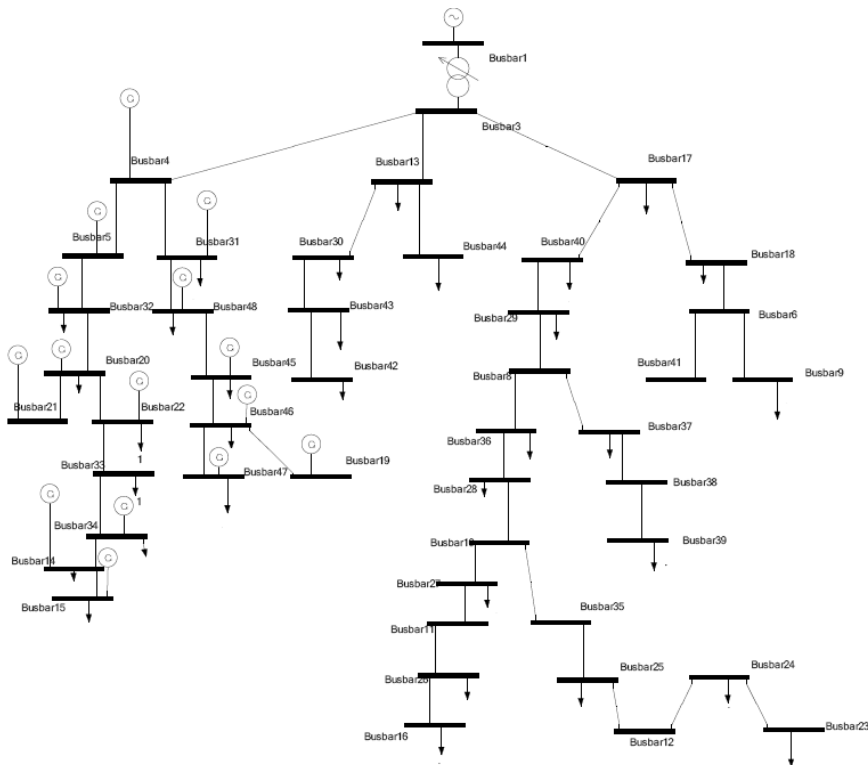


Figura 23 - Rede de Baixa tensão com ME distribuídos só numa saída da subestação

Sendo estas as características da rede de distribuição de BT bem como as características dos microgeradores em que se baseou o estudo, fez-se a simulação no IPSA Power obtendo-se os resultados que estão apresentados e analisados no capítulo 5.

Capítulo 5

Apresentação e Análise de Resultados

5.1 - Apresentação de resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos pelas simulações da rede de baixa tensão, tendo dois casos de estudo já referidos no capítulo anterior e para cada um deles, cinco cenários.

5.2 - Caso em que os consumidores apresentam valores máximos de carga

Neste ponto, pretende-se utilizar os valores máximos dos diagramas de carga verificando que a ponta do diagrama ocorre para o período das 13 horas após análise do diagrama agrupado de cada armário de distribuição. Fez-se a simulação no IPSA Power, com o objectivo de analisar os trânsitos de potência das linhas com os limites técnicos associados às mesmas e também ver o comportamento das tensões, perdas activas e reactivas nas linhas.

Foram simulados os cinco cenários, o primeiro em que a rede não tem penetração de microgeração (figura 20), o segundo e terceiro cenário são caracterizados pela penetração de microgeradores (figura 22) nas três saídas da subestação com potência de 1000W e 2500W, respectivamente.

Os cenários 4 e 5 a penetração dos microgeradores é analisada num cenário de grande concentração aproveitando a rede derivada de uma das saídas da subestação (figura 23).

5.2.1 - Cenário 1 da rede de baixa tensão sem ME's

Tabela 13 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em horas de ponta

De Barramento	Para Barramento	Limites das Linhas (KW)	Despacho Potência Activa (kW)	Despacho Potência Reactiva (kvar)	Potência Activa Recebida (kW)	Potência Reactiva Recebida (kvar)	Perdas Potência Activa (kW)	Perdas Potência Reactiva (kvar)
3	13	170	59,9789	6,154	59,7483	6,0518	0,2306	0,1022
3	17	170	167,11	13,9415	172,022	10,421	15,0881	3,5205
4	5	70	66,9124	4,4347	65,6702	4,3419	1,2422	0,0928
4	31	170	53,2897	5,3014	53,0029	5,1723	0,2868	0,1291
31	48	170	41,3024	4,1723	41,0022	4,0373	0,3001	0,1351
48	45	170	29,3018	3,0373	29,2313	3,0055	0,0705	0,0317
45	46	170	10,6917	2,0055	10,6826	2,0014	0,0092	0,0041
46	47	170	5,3427	1,0014	5,3395	1	0,0031	0,0014
13	30	140	22,4991	4,0392	22,3933	4,0046	0,1058	0,0346
13	44	60	18,7095	1,0126	18,5406	1	0,1688	0,0126
30	43	140	10,6936	3,0046	10,6826	3,001	0,0111	0,0036
17	40	130	129,094	9,4136	126,021	8,7681	3,0735	0,6454
17	18	70	30,7951	1,0459	30,5231	1,0255	0,272	0,0204
18	6	70	18,8581	1,0241	18,7505	1,0161	0,1076	0,0081
6	9	70	18,742	1,0162	18,5091	0,9987	0,2329	0,0175
40	29	130	114,154	7,7841	110,662	7,051	3,4912	0,7332
29	8	130	98,8925	6,0622	96,1053	5,4769	2,7872	0,5853
8	36	70	65,152	4,3862	63,1569	4,2366	1,9951	0,1496
8	37	70	30,8833	1,0593	30,537	1,0333	0,3463	0,026
37	38	70	18,8822	1,031	18,6255	1,0118	0,2567	0,0193
38	39	70	18,6098	1,0121	18,4133	0,9974	0,1965	0,0147
36	28	130	51,5639	3,2757	50,7331	3,1012	0,8308	0,1745
28	10	130	32,3425	2,0928	32,1688	2,0563	0,1737	0,0365
10	27	70	16,0834	1,0136	15,9652	1,0047	0,1182	0,0089
10	35	130	16,0332	1,0325	15,9901	1,0235	0,0432	0,0091
35	25	130	15,993	1,0235	15,9534	1,0152	0,0396	0,0083
25	12	130	10,6402	1,0099	10,6204	1,0058	0,0198	0,0042
12	24	130	10,6216	1,0058	10,6028	1,0019	0,0188	0,0039
24	23	130	5,3208	0,0063	5,3161	0,0053	0,0047	0,001
27	11	70	10,7449	0,0132	10,6915	0,0092	0,0533	0,004
11	26	70	10,7019	0,0089	10,6516	0,0051	0,0504	0,0038
26	16	70	5,3351	0,003	5,3217	0,002	0,0134	0,001
43	42	140	5,3427	1,001	5,3397	1	0,003	0,001
5	32	100	65,6089	4,3424	64,9168	4,2386	0,692	0,1038
22	33	100	21,5138	2,023	21,4348	2,0111	0,079	0,0118
33	34	100	16,0992	2,011	16,0494	2,0035	0,0498	0,0075
34	14	100	10,7158	2,0034	10,6949	2,0002	0,0209	0,0031
14	15	100	5,3495	1,0005	5,3447	0,9997	0,0048	0,0007
20	22	100	40,5803	2,1037	40,0441	2,0233	0,5362	0,0804
20	32	100	-52,297	-3,1034	-53,201	-3,239	0,9039	0,1356
1	3		366,572	29,8532	366,572	29,7856	0	0,0676

Tabela 14 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em horas de ponta

Perdas Globais	
Potência Activa (kW)	Potência Reactiva (kvar)
33,931	6,9539

5.2.2 - Cenário 2 da rede de baixa tensão com ligação dos ME (1000W)

Tabela 15 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em horas de ponta e com introdução de microgeradores eólicos (1000W).

De Barramento	Para Barramento	Limites das Linhas (KW)	Despacho Potência Activa (kW)	Despacho Potência Reactiva (kvar)	Potência Activa Recebida (kW)	Potência Reactiva Recebida (kvar)	Perdas Potência Activa (kW)	Perdas Potência Reactiva (kvar)
3	13	170	53,8975	6,1245	53,7108	6,0417	0,1867	0,0828
3	17	170	157,924	12,3961	147,169	9,8867	10,7547	2,5094
4	5	70	56,693	4,3221	55,8	4,2555	0,893	0,0667
4	31	170	47,1666	5,2483	46,9414	5,1469	0,2252	0,1014
31	48	170	38,2462	4,1469	37,9887	4,0311	0,2574	0,1158
48	45	170	26,2858	3,0311	26,229	3,0055	0,0568	0,0255
45	46	170	10,6938	2,0055	10,6847	2,0014	0,0091	0,0041
46	47	170	5,3402	1,0014	5,3371	1	0,0031	0,0014
13	30	140	19,4674	4,0291	19,3875	4,003	0,08	0,0261
13	44	60	18,707	1,0126	18,5383	1	0,1687	0,0126
30	43	140	7,6899	3,003	7,6838	3,001	0,0061	0,002
17	40	130	111,254	8,8092	109,031	8,3423	2,2233	0,4669
17	18	70	27,8126	1,0393	27,5967	1,0231	0,2159	0,0162
18	6	70	15,8323	1,0249	15,7585	1,0193	0,0737	0,0055
6	9	70	18,7878	1,0187	18,561	1,0017	0,2268	0,017
40	29	130	100,539	7,3266	97,9231	6,7772	2,6162	0,5494
29	8	130	86,3246	5,767	84,2922	5,3401	2,0325	0,4268
8	36	70	55,8402	4,3195	54,45	4,2152	1,3902	0,1043
8	37	70	28,0973	1,0546	27,8258	1,0343	0,2715	0,0204
37	38	70	19,0664	1,0362	18,8192	1,0177	0,2471	0,0185
38	39	70	18,84	1,0173	18,6501	1,0031	0,1899	0,0142
36	28	130	46,0969	3,1736	45,475	3,043	0,622	0,1306
28	10	130	26,7457	2,0525	26,6349	2,0292	0,1108	0,0233
10	27	70	16,372	1,0217	16,2582	1,0132	0,1137	0,0085
10	35	130	13,2472	1,016	13,2198	1,0102	0,0274	0,0058
35	25	130	13,2258	1,0101	13,2006	1,0049	0,0251	0,0053
25	12	130	10,822	1,0076	10,803	1,0036	0,019	0,004
12	24	130	10,8102	1,0035	10,7922	0,9997	0,018	0,0038
24	23	130	5,4101	-0,0055	5,4056	-0,0064	0,0045	0,0009
27	11	70	10,9256	0,0032	10,8744	-0,0006	0,0512	0,0038
11	26	70	10,8736	-0,0004	10,8253	-0,004	0,0482	0,0036
26	16	70	5,4135	-0,0014	5,4007	-0,0024	0,0128	0,001
43	42	140	5,3429	1,001	5,3399	1	0,003	0,001
5	32	100	55,9524	4,2546	55,4513	4,1795	0,5011	0,0752
22	33	100	18,4567	2,0178	18,3994	2,0092	0,0573	0,0086
33	34	100	13,0559	2,0095	13,0235	2,0046	0,0324	0,0049
34	14	100	10,6708	2,0048	10,6504	2,0017	0,0204	0,0031
14	15	100	5,3317	1,0012	5,327	1,0005	0,0047	0,0007
20	22	100	34,4133	2,0744	34,0324	2,0172	0,3809	0,0571
20	32	100	-46,086	-3,0748	-46,779	-3,1788	0,6932	0,104
1	3		313,747	28,1876	313,747	28,138		0,0496

Tabela 16 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em horas de ponta e com introdução de ME (1000W)

Perdas Globais	
Potência Activa (kW)	Potência Reactiva (kvar)
24,8737	5,0818

5.2.3 - Cenário 3 da rede de baixa tensão com ligação de ME (2500W)

Tabela 17 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em horas de ponta e com introdução de microgeradores eólicos (2500W)

De Barramento	Para Barramento	Limites das Linhas (KW)	Despacho Potência Activa (kW)	Despacho Potência Reactiva (kvar)	Potência Activa Recebida (kW)	Potência Reactiva Recebida (kvar)	Perdas Potência Activa (kW)	Perdas Potência Reactiva (kvar)
3	13	170	45,0843	6,088	44,953	6,0298	0,1313	0,0582
3	17	170	119,625	10,1421	113,448	8,7008	6,1772	1,4413
4	5	70	45,792	4,1877	45,2079	4,1441	0,5841	0,0436
4	31	170	38,3977	5,1803	38,2475	5,1127	0,1501	0,0676
31	48	170	33,9568	4,1144	33,7537	4,023	0,2032	0,0914
48	45	170	21,9517	3,0237	21,9121	3,0058	0,0397	0,0179
45	46	170	10,7907	2,0056	10,7815	2,0014	0,0093	0,0042
46	47	170	5,3921	1,0015	5,3889	1	0,0032	0,0014
13	30	140	15,068	4,0173	15,0188	4,0012	0,0492	0,0161
13	44	60	18,9473	1,0127	18,7745	0,9998	0,1728	0,0129
30	43	140	3,2869	3,0011	3,2851	3,0006	0,0018	0,0006
17	40	130	83,1244	7,8009	81,9233	7,5487	1,201	0,2522
17	18	70	24,4114	1,0281	24,2508	1,0161	0,1606	0,012
18	6	70	12,6493	1,0075	12,6039	1,0041	0,0454	0,0034
6	9	70	19,9926	1,0111	19,746	0,9926	0,2466	0,0185
40	29	130	76,1958	6,6203	74,7586	6,3185	1,4372	0,3018
29	8	130	61,6105	5,3643	60,6339	5,1592	0,9766	0,2051
8	36	70	42,9983	3,9962	42,2333	3,9389	0,765	0,0574
8	37	70	25,3398	1,0395	25,1353	1,0241	0,2045	0,0153
37	38	70	20,9529	1,0205	20,6777	0,9999	0,2752	0,0206
38	39	70	20,6305	1,0027	20,4205	0,9869	0,21	0,0158
36	28	130	30,4196	3,0705	30,1712	3,0183	0,2484	0,0522
28	10	130	11,2917	1,9724	11,2734	1,9686	0,0183	0,0038
10	27	70	11,0245	0,9709	10,978	0,9674	0,0465	0,0035
10	35	130	9,2524	1,0086	9,2404	1,006	0,0121	0,0025
35	25	130	9,2434	1,0065	9,2323	1,0042	0,0111	0,0023
25	12	130	11,2474	1,0165	11,2291	1,0126	0,0184	0,0039
12	24	130	11,2312	1,0135	11,2138	1,0098	0,0174	0,0036
24	23	130	5,0769	0,0306	5,0734	0,0299	0,0035	0,0007
27	11	70	3,088	0,0079	3,0844	0,0077	0,0036	0,0003
11	26	70	3,0796	0,0077	3,0762	0,0075	0,0034	0,0003
26	16	70	5,1166	0,0121	5,1066	0,0114	0,0101	0,0008
43	42	140	5,3856	1,001	5,3825	1	0,003	0,001
5	32	100	43,8449	4,1486	43,5381	4,1025	0,3068	0,046
22	33	100	14,8959	2,0047	14,8592	1,9992	0,0368	0,0055
33	34	100	9,5391	1,9962	9,5219	1,9936	0,0173	0,0026
34	14	100	11,6691	1,9946	11,6455	1,9911	0,0236	0,0035
14	15	100	5,8335	0,9959	5,828	0,995	0,0054	0,0008
20	22	100	26,2195	2,0419	26,0013	2,0091	0,2182	0,0327
20	32	100	-38,446	-3,0375	-38,922	-3,1089	0,4759	0,0714
1	3		224,088	25,4561	224,088	25,4307		0,0254

Tabela 18 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em horas de ponta e com introdução de microgeradores (2500W)

Perdas Globais	
Potência Activa (kW)	Potência Reactiva (kvar)
14,5238	2,9202

Dos resultados dos trânsitos de potência da rede para o caso em que os consumos apresentam valores máximos de carga verificou-se que as perdas activas e reactivas totais das linhas vão diminuindo com a introdução de ME, resultados esses que estão representados nas figuras 24 e 25.

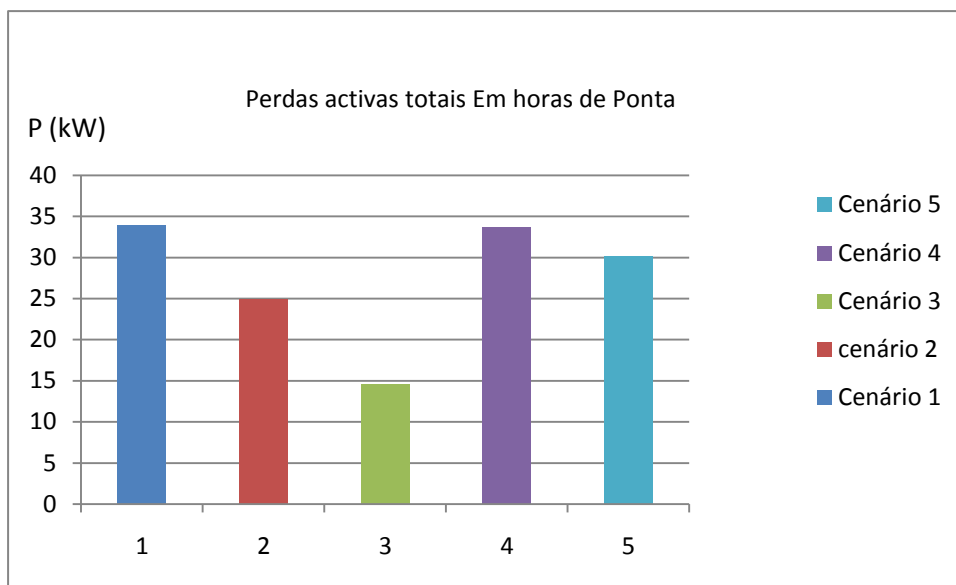


Figura 24 - Resultados das perdas activas totais em horas de ponta para os cinco cenários

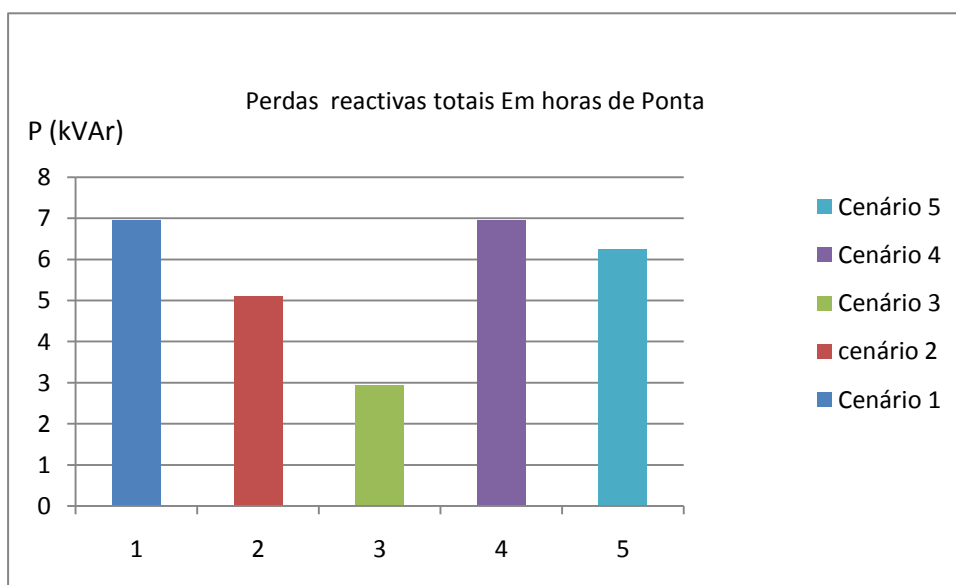


Figura 25 - Resultados das perdas reactivas totais em horas de ponta para os três tipos de cenários

Relativamente às características das tensões nos barramentos no caso de horas de ponta (período 13h) verifica-se (figura 26 e 27) que com a ligação de microgeradores eólicos e com o aumento da potência produzida pelos microgeradores na rede as tensões nos barramentos ficam mais equilibradas e próximas do valor nominal (400V). Esta verificação está coerente com a redução de perdas.

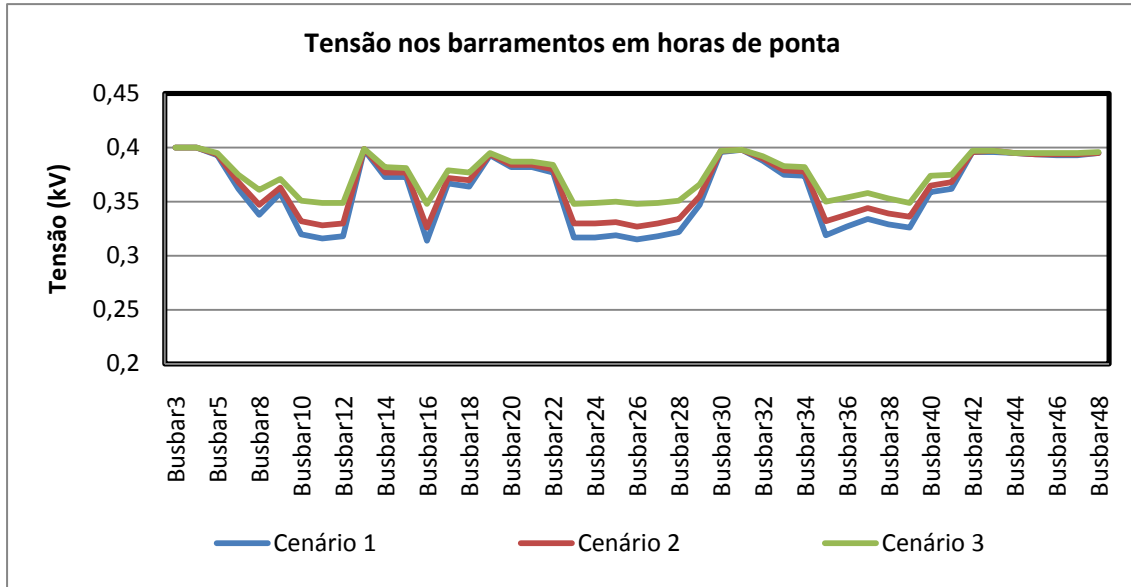


Figura 26 - Características das tensões nos barramentos em horas de ponta nos cenários 1, 2 e 3

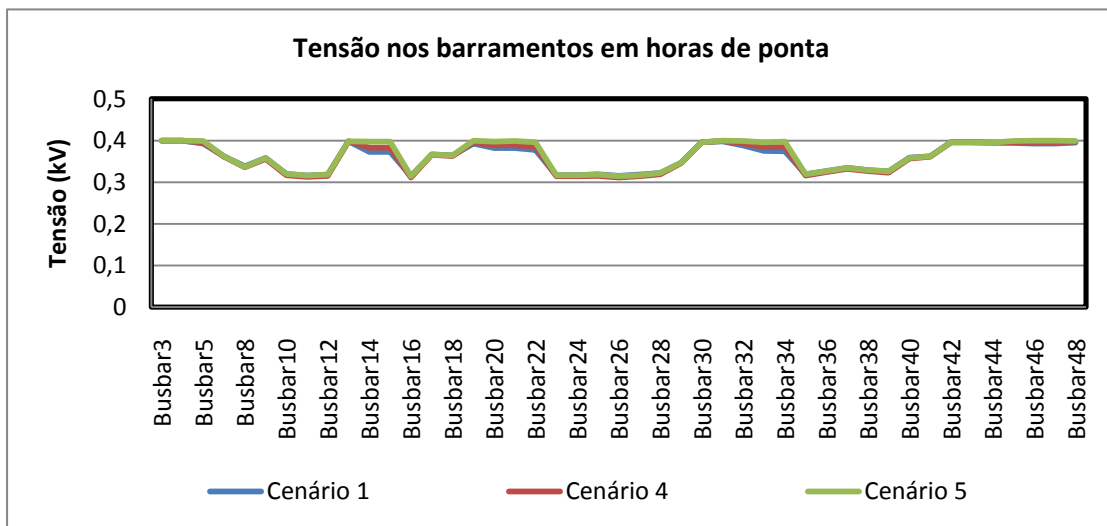


Figura 27 - Características das tensões nos barramentos em horas de ponta nos cenários 1, 4 e 5

Estes resultados primeiros conduzem à conclusão que neste caso a produção distribuída traz benefícios para a rede. As perdas baixam à medida que a penetração da produção aumenta e o perfil das tensões tende a nivelar.

5.3 - Caso em que os consumidores apresentam valores de vazio de carga

Neste caso consideramos que sendo um período nocturno o vento seria mais forte conduzindo a uma maior penetração de produção face às necessidades da carga.

5.3.1 - Cenário 1 da rede de baixa tensão sem ME

Tabela 19- Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em vazio

De Barramento	Para Barramento	Limites das Linhas (KW)	Despacho Potência Activa (kW)	Despacho Potência Reactiva (kvar)	Potência Activa Recebida (kW)	Potência Reactiva Recebida (kvar)	Perdas Potência Activa (kW)	Perdas Potência Reactiva (kvar)
3	13	170	26,0609	6,0351	26,0155	6,015	0,0454	0,0201
3	17	170	66,5077	8,7181	64,5794	8,2682	1,9283	0,4499
4	5	70	25,538	4,0619	25,3533	4,0481	0,1847	0,0138
4	31	170	20,1652	5,0458	20,122	5,0263	0,0432	0,0194
31	48	170	15,7709	4,0264	15,7251	4,0058	0,0458	0,0206
48	45	170	11,3516	3,0059	11,3405	3,0009	0,011	0,005
45	46	170	4,2965	2,0009	4,2948	2,0002	0,0017	0,0008
46	47	170	2,1406	1,0002	2,14	0,9999	0,0006	0,0003
13	30	140	11,9302	4,0132	11,8982	4,0027	0,0319	0,0104
13	44	60	7,129	1,0018	7,1042	0,9999	0,0248	0,0019
30	43	140	7,5287	3,0027	7,5229	3,0008	0,0058	0,0019
17	40	130	48,6236	7,2736	48,2265	7,1903	0,3971	0,0834
17	18	70	12,0619	1,0033	12,0243	1,0005	0,0376	0,0028
18	6	70	7,6823	0,9996	7,6662	0,9984	0,016	0,0012
6	9	70	7,7094	0,998	7,6743	0,9954	0,0351	0,0026
40	29	130	43,664	6,1993	43,2142	6,1049	0,4498	0,0945
29	8	130	38,561	5,1158	38,2037	5,0408	0,3573	0,075
8	36	70	29,4409	4,0119	29,1104	3,9871	0,3305	0,0248
8	37	70	12,592	1,0012	12,5457	0,9977	0,0463	0,0035
37	38	70	8,2326	0,9954	8,1937	0,9924	0,0389	0,0029
38	39	70	8,2527	0,9918	8,2224	0,9895	0,0302	0,0023
36	28	130	21,3416	3,0178	21,2305	2,9944	0,1111	0,0233
28	10	130	13,7609	1,9997	13,7369	1,9946	0,024	0,005
10	27	70	7,79	0,9889	7,769	0,9874	0,0209	0,0016
10	35	130	6,8627	0,998	6,8567	0,9967	0,006	0,0013
35	25	130	6,8534	0,9968	6,8479	0,9957	0,0055	0,0012
25	12	130	4,7332	0,9917	4,7302	0,9911	0,003	0,0006
12	24	130	4,7266	0,9911	4,7237	0,9905	0,0028	0,0006
24	23	130	2,1158	0,0042	2,1153	0,0041	0,0005	0,0001
27	11	70	4,2592	0,0041	4,253	0,0036	0,0062	0,0005
11	26	70	4,2425	0,0037	4,2367	0,0033	0,0058	0,0004
26	16	70	2,1193	0,0017	2,1177	0,0016	0,0015	0,0001
43	42	140	5,3728	1,001	5,3698	1	0,003	0,001
5	32	100	25,17	4,048	25,0684	4,0328	0,1016	0,0152
22	33	100	8,9532	2,0013	8,94	1,9993	0,0132	0,002
33	34	100	6,8243	1,9988	6,8154	1,9975	0,0088	0,0013
34	14	100	4,6939	1,9969	4,6897	1,9963	0,0042	0,0006
14	15	100	2,3445	0,9981	2,3435	0,998	0,001	0,0001
20	22	100	16,0774	2,0142	15,9969	2,0022	0,0805	0,0121
20	32	100	-20,54	-3,0132	-20,674	-3,0333	0,134	0,0201
1	3		133,998	23,8555	133,998	23,8462		0,0093

Tabela 20 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em vazio

Perdas Globais	
Potência Activa (kW)	Potência Reactiva (kvar)
4,596	0,9336

5.3.2 - Cenário 2 da rede de baixa tensão com ligação de ME (1000W)

Tabela 21 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em vazio com ligação de microgeradores (1000W)

De Barramento	Para Barramento	Límites das Linhas (KW)	Despacho Potência Activa (kW)	Despacho Potência Reactiva (kvar)	Potência Activa Recebida (kW)	Potência Reactiva Recebida (kvar)	Perdas Potência Activa (kW)	Perdas Potência Reactiva (kvar)
3	13	170	20,0183	6,0221	19,9905	6,0098	0,0277	0,0123
3	17	170	42,754	8,3117	41,941	8,122	0,813	0,1897
4	5	70	16,1073	4,0266	16,0311	4,021	0,0761	0,0057
4	31	170	14,11	5,0276	14,0876	5,0175	0,0224	0,0101
31	48	170	12,7403	4,0176	12,7094	4,0037	0,0308	0,0139
48	45	170	8,3446	3,0037	8,3383	3,0009	0,0063	0,0028
45	46	170	4,2932	2,0009	4,2915	2,0002	0,0017	0,0008
46	47	170	2,1389	1,0002	2,1383	1	0,0006	0,0003
13	30	140	8,9063	4,008	8,8871	4,0017	0,0192	0,0063
13	44	60	7,1268	1,0018	7,102	0,9999	0,0248	0,0019
30	43	140	4,5222	3,0017	4,5196	3,0008	0,0026	0,0009
17	40	130	32,1277	7,1188	31,9535	7,0822	0,1742	0,0366
17	18	70	8,9376	1,0018	8,9173	1,0003	0,0203	0,0015
18	6	70	4,5993	0,9995	4,5935	0,9991	0,0058	0,0004
6	9	70	7,6213	0,9993	7,5878	0,9967	0,0335	0,0025
40	29	130	30,4619	6,0858	30,2446	6,0402	0,2173	0,0456
29	8	130	25,6888	5,0438	25,5322	5,0109	0,1566	0,0329
8	36	70	19,5232	3,9939	19,3804	3,9831	0,1428	0,0107
8	37	70	9,4072	1,0007	9,3823	0,9988	0,0249	0,0019
37	38	70	8,0743	0,998	8,0384	0,9953	0,0359	0,0027
38	39	70	8,0912	0,9948	8,0633	0,9927	0,0279	0,0021
36	28	130	15,0486	2,9989	14,9949	2,9876	0,0537	0,0113
28	10	130	7,6277	1,9905	7,6204	1,989	0,0073	0,0015
10	27	70	7,5969	0,9929	7,578	0,9915	0,0189	0,0014
10	35	130	3,7995	0,9943	3,7976	0,9939	0,0018	0,0004
35	25	130	3,7928	0,9938	3,7911	0,9935	0,0017	0,0004
25	12	130	4,6553	0,9946	4,6525	0,994	0,0028	0,0006
12	24	130	4,646	0,994	4,6434	0,9935	0,0026	0,0005
24	23	130	2,1169	0,0029	2,1163	0,0028	0,0005	0,0001
27	11	70	4,2354	0,0031	4,2296	0,0026	0,0058	0,0004
11	26	70	4,222	0,0027	4,2166	0,0023	0,0055	0,0004
26	16	70	2,1093	0,0012	2,1079	0,0011	0,0014	0,0001
43	42	140	5,3627	1,001	5,3597	1	0,003	0,001
5	32	100	15,865	4,0204	15,8233	4,0142	0,0417	0,0063
22	33	100	5,888	1,9997	5,8821	1,9988	0,006	0,0009
33	34	100	3,7781	1,9984	3,775	1,9979	0,0031	0,0005
34	14	100	4,6538	1,9978	4,6497	1,9972	0,0041	0,0006
14	15	100	2,3282	0,9986	2,3273	0,9984	0,0009	0,0001
20	22	100	9,9368	2,0049	9,9057	2,0003	0,0311	0,0047
20	32	100	-14,38	-3,0045	-14,446	-3,0144	0,0663	0,0099
1	3		86,8731	23,3902	86,8731	23,3861		0,004

Tabela 22 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em vazio com microgeradores eólicos (1000W)

Perdas Globais	
Potência Activa (kW)	Potência Reactiva (kvar)
2,1228	0,4266

5.3.3 - Cenário 3 da rede de baixa tensão com ligação de ME (2500W)

Tabela 23 - Resultados do trânsito de potências para o caso de cargas em vazio com ligação de microgeradores (2500W)

De Barramento	Para Barramento	Limites das Linhas (KW)	Despacho Potência Activa (kW)	Despacho Potência Reactiva (kvar)	Potência Activa Recebida (kW)	Potência Reactiva Recebida (kvar)	Perdas Potência Activa (kW)	Perdas Potência Reactiva (kvar)
3	13	170	10,9235	6,0074	10,9137	6,003	0,0099	0,0044
3	17	170	0,1776	8,035	0,1499	8,0285	0,0277	0,0065
4	5	70	1,7712	4,0046	1,7659	4,0042	0,0053	0,0004
4	31	170	5,017	5,0115	5,012	5,0093	0,005	0,0023
31	48	170	8,1558	4,0092	8,1416	4,0028	0,0142	0,0064
48	45	170	3,7906	3,0028	3,7888	3,002	0,0019	0,0008
45	46	170	4,2574	2,0015	4,2558	2,0008	0,0017	0,0008
46	47	170	2,1295	1,0005	2,129	1,0003	0,0006	0,0003
13	30	140	4,3261	3,9997	4,3191	3,9974	0,007	0,0023
13	44	60	7,0571	1,0018	7,0328	1	0,0243	0,0018
30	43	140	-0,037	2,9957	-0,0378	2,9954	0,0008	0,0003
17	40	130	-0,6334	7,0333	-0,6411	7,0316	0,0077	0,0016
17	18	70	3,9194	1,0044	3,9155	1,0041	0,004	0,0003
18	6	70	-0,4533	1,0042	-0,4536	1,0041	0,0003	0
6	9	70	7,0426	1,0032	7,0151	1,0011	0,0275	0,0021
40	29	130	2,4709	6,0258	2,4618	6,0239	0,0091	0,0019
29	8	130	-1,9539	5,0183	-1,9601	5,017	0,0062	0,0013
8	36	70	-6,3079	3,9988	-6,3265	3,9974	0,0187	0,0014
8	37	70	3,844	1,0031	3,8399	1,0028	0,0041	0,0003
37	38	70	6,9714	1,0022	6,9465	1,0003	0,0249	0,0019
38	39	70	6,919	0,9997	6,9	0,9983	0,019	0,0014
36	28	130	-2,8724	2,988	-2,876	2,9873	0,0036	0,0008
28	10	130	-9,8856	1,9855	-9,8965	1,9832	0,0109	0,0023
10	27	70	-1,3535	0,9929	-1,3543	0,9928	0,0008	0,0001
10	35	130	-1,2222	0,9934	-1,2225	0,9934	0,0003	0,0001
35	25	130	-1,2439	0,9931	-1,2441	0,993	0,0002	0,0001
25	12	130	4,2023	0,9968	4,2002	0,9964	0,002	0,0004
12	24	130	4,1852	0,9963	4,1832	0,9959	0,0019	0,0004
24	23	130	2,1949	0,0018	2,1944	0,0017	0,0005	0,0001
27	11	70	-3,2509	-0,0004	-3,254	-0,0007	0,0031	0,0002
11	26	70	-3,276	-0,0007	-3,2789	-0,001	0,0029	0,0002
26	16	70	2,1226	0,0008	2,1213	0,0007	0,0013	0,0001
43	42	140	5,3266	1,0003	5,3237	0,9993	0,0029	0,001
5	32	100	1,7664	4,0056	1,7635	4,0051	0,003	0,0004
22	33	100	0,9872	2,0018	0,9865	2,0017	0,0008	0,0001
33	34	100	-1,1423	2,0013	-1,1432	2,0012	0,0009	0,0001
34	14	100	4,2343	2,0007	4,2309	2,0002	0,0034	0,0005
14	15	100	2,1129	1,0001	2,1122	0,9999	0,0008	0,0001
20	22	100	0,5325	2,0024	0,5312	2,0022	0,0013	0,0002
20	32	100	-4,8959	-3,003	-4,9059	-3,0045	0,0099	0,0015
1	3		10,3641	23,0475	10,3641	23,0472		0,0003

Tabela 24 - Total das perdas da Rede de baixa tensão com cargas em vazio com microgeradores eólicos (2500W)

Perdas Globais	
Potência Activa (kW)	Potência Reactiva (kvar)
0,2703	0,0473

Os resultados dos trânsitos de potência da rede para o caso em que os consumos apresentam valores mínimos de carga, estão representados na figura 28 e 29.

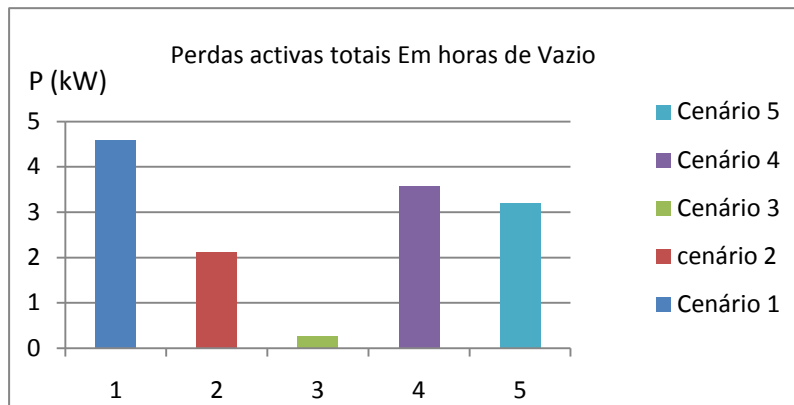


Figura 28 - Resultados das perdas activas totais em horas de vazio para os cinco tipos de cenários

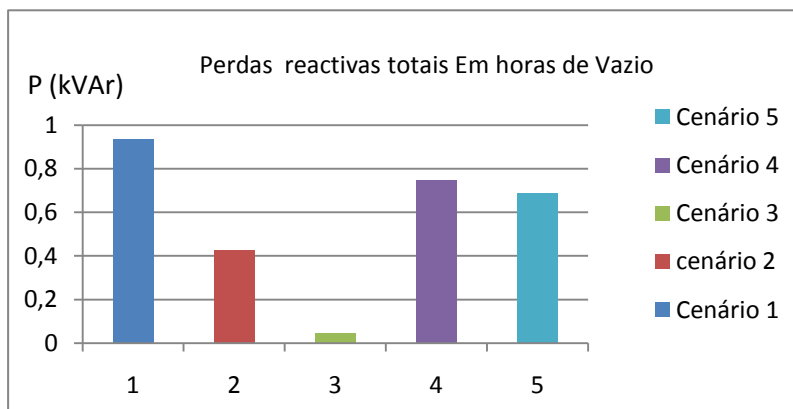


Figura 29 - Resultados das perdas reactivas totais em horas de vazio para os cinco tipos de cenários

Desses resultados apresentados podemos concluir que a introdução de microgeradores na rede BT tanto as perdas activas como reactivas vão diminuindo com o aumento da potência de produção dos microgeradores.

Conclui-se também que as perdas do sistema, com o mesmo número de geradores eólicos distribuídos pelas três saídas da subestação (figura 21) estas não sofrem alteração (praticamente iguais) comparativamente quando estes geradores são colocados em igual número apenas numa das saídas da subestação (figura 22).

No que diz respeito às características das tensões nos barramentos no caso de horas de vazio de consumos, verifica-se através da figura 30 que a penetração de microgeradores eólicos na rede, contribui positivamente para a qualidade da tensão.

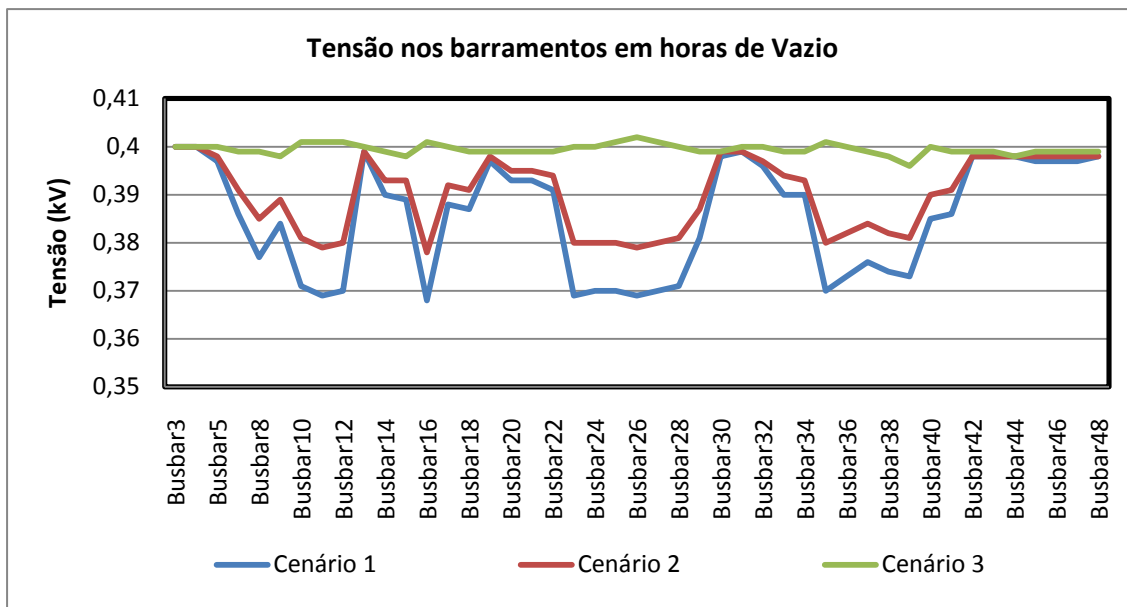


Figura 30 - Característica das tensões nos barramentos em horas de vazio nos cenários 1, 2 e 3

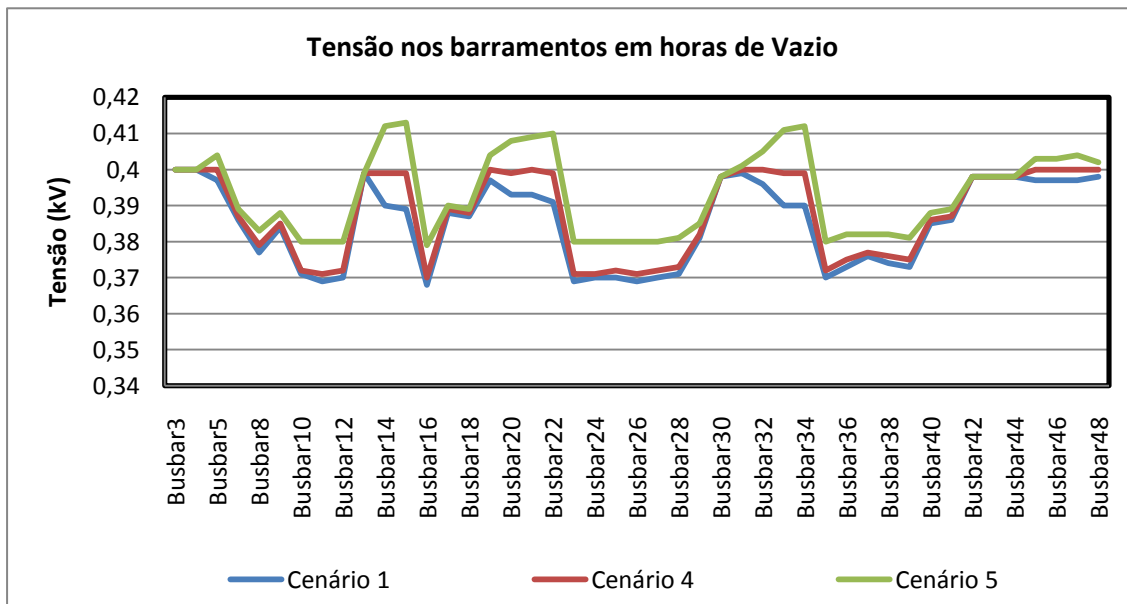


Figura 31 - Característica das tensões nos barramentos em horas de vazio nos cenários 1, 4 e 5

Já na figura 31 se verifica que a tensão tende a subir acima da tensão nominal nalguns pontos da rede, nós 12, 14, 20, 22, 32 e 34. Esta situação tem que ser analisada em mais detalhe pois pode provocar impacto negativos nomeadamente ao nível da coordenação das protecções.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas Futuras

6.1 - Conclusões

Com o trabalho desenvolvido nesta dissertação foi possível chegar às seguintes conclusões:

Em relação ao estado da arte do sistema ME (Capítulo 2):

- As micro-turbinas eólicas de rotor em eixo vertical ocupam uma parcela significativa das ME existentes no mercado (27%)
- Cerca de 80% das micro-turbinas eólicas existentes no mercado possuem PMSG

Em relação aos impactos da geração eólica na rede eléctrica (capítulo 3):

- Em regime dinâmicos há problemas com a qualidade da tensão e introdução de componentes harmónicos.
- Quanto à característica temporal dos fenómenos, estas podem ser Lentas, relacionadas com a operação em regime permanente e variações lentas de tensão, ou podem ser dinâmicas relacionadas com a operação dos aerogeradores que podem ser do tipo: variação de tensão de curta duração, flicker (centilação) e por último podem ser harmónicas, relacionadas às máquinas eólicas com conversores electrónicos de frequência.

Em relação à apresentação e Análise de resultados (capítulo 5)

- Os resultados obtidos para os diferentes casos e conseqüentemente para os diferentes cenários já apresentados nesse capítulo, chegamos à conclusão que com a introdução de microgeradores eólicos pelos diferentes pontos de

consumos vai existir uma diminuição das perdas totais nas linhas e os trânsitos de potência entre as linhas vão diminuindo com o aumento da potência de produção, uma vez que com a injeção de potência por parte dos microgeradores eólicos vai reflectir numa redução de potência nas linhas.

- Relativamente às perdas do sistema conclui-se que, com o mesmo número de geradores eólicos distribuídos pelas três saídas da subestação (figura 22) estas não sofrem alteração (praticamente iguais) comparativamente quando estes geradores são colocados em igual número apenas numa das saídas dessa subestação (figura 23).
- Apesar das tensões nos nós equilibrarem com o aumento da potencia de penetração do microgerador na rede, a qualidade das tensões são melhores quando distribuídas por todos as saídas da subestação em vez de uma só saída, isto para o mesmo número de microgeradores de potência igual.
- No que diz respeito às tensões nos nós da rede verificou-se que existem pequenas variações de tensão e nos casos onde é feito a ligação de ME's as tensões tendem a equilibra-se e aproximar-se dos valores nominais, melhorando em geral o valor das tensões. Os períodos de vazio merecem no entanto uma atenção mais detalhada e garantir que tecnicamente a rede mantém o seu comportamento nos padrões de qualidade de serviço impostos.
- A redução em termos de pressão sobre a rede, reduzindo os impactos térmicos, as perdas e garantindo em geral um perfil nivelado de tensões. Esta situação permite ainda reduzir ou mesmo evitar novos investimentos na rede.

6.2 - Perspectivas futuras

Os resultados do presente trabalho podem ser o ponto de partida para outros estudos. Deste modo algumas sugestões para esses estudos são apresentadas nos próximos pontos:

- Solucionar o problema de selectividade existente na implementação de sistemas de MG na rede de distribuição em BT
- Desde a entrada em vigor do recente DL 363/2007, existe um mercado emergente para a MG, mais concretamente, para sistemas de produção de energia que utilizem recursos renováveis como energia primária, podendo produzir, combinadamente, electricidade e calor. De entre todos os aproveitamentos renováveis, prevê-se que num futuro próximo, as tecnologias fotovoltaicas e microeólicas desempenharão um papel de destaque nos sistemas de MG. No sentido de representar um esquema ilustrativo do cenário em questão, um projecto a ser desenvolvido futuramente é analisar uma rede real que tivesse uma forte penetração de sistemas de MG, quer em termos de recurso primário, quer em termos de tecnologia, e avaliar os problemas de regulação de tensão e frequência, em modo isolado ou ligado à rede.
- Analisar uma rede real com forte penetração de sistemas de MG em regime dinâmico e desequilibrador.

Referências

- [1] **MEI.** Ministério da Economia e da Inovação, Energia e alterações Climáticas.
<http://www.min-economia.pt/innerPage.aspx?idCat=30&idMasterCat=14&idLang=1>.
[Online] Publicação do MEI, 2007 a1.
- [2] **Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi.** *Wind Energy Handbook*.
s.l. : John Wiley & Sons, ISBN 0-471-48997-2, 2001.
- [3] **PNALE.** *Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão de CO2 2008-2012*.
Lisboa : Instituto do Ambiente / Governo Português Environment Institute / Portuguese
Government, 2006.
- [4] **DGEG.** Direcção-Geral de Energia e Geologia, *Política Energética-Characterização
Energética*. <http://www.dgge.pt/>. [Online] 2009.
- [5] **João Peças Lopes, João Tomé Saravia, N. Hatzigiorgiou, N. Jenkins.** *Management
of MicroGrids*. <http://www.microgrids.eu/micro2000/presentations/6.pdf>. [Online]
2003.
- [6] **Decreto-Lei383/2007.** Decreto-Lei 383/2007. 2 de Novembro de 2007.
- [7] **Castro, Rui.** *Introdução à Energia Eólica, Publicação Pedagógica*. [Online] 2007.
https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/106889/1/eolica_ed3.pdf.
- [8] **Carrapeto, Cristina.** *Educação Ambiental. Lisboa: Universidade Aberta.* 1998.
- [9] **Ramage, Janet.** *Guia da energia : um guia prático para os aspectos mais importantes
da energia* . Lisboa : s.n., 2003.
- [10] **CEEETA.** *Centro de Estudos em Economia da Energia, dos Transportes e do Ambiente,
"Tecnologias de Sistemas Periféricos"*. [Online] Dezembro de 2001.
<http://www.ceeeta.pt/>.
- [11] **Ackermann, Thomas.** *Wind Power in Power Systems*. s.l. : Chichester : John Wiley &
Sons, cop.2005, ISBN 0-470-85508-8, 2005.

- [12] **Lopes, João Abel Peças.** *Produção Distribuída. Disponível em:*. s.l. : http://paginas.fe.up.pt/~jpl/textos/PDER_eolica2.pdf, 2005.
- [13] **Muller, S., Deicke, M. and Doncker R.** *Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines.* s.l. : IEEE Industry Applications Magazine, 2002.
- [14] **Costa, Paulo Jorge Campos.** *Optimização da produção de energia em sistemas eólicos.* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto : s.n., 2005. Vol. Tese de mestrado.
- [15] **Quaschnig, Volker.** *Understanding Renewable Energy Systems, Earthscan.* 2005.
- [16] **Zamora, I., San Martín, J.I., Mazón, A.J., San Martín, JJ., Aperrribay, V.** *Emergent Technologies In Electrical.* International Journal of Emerging. 2005, Vol. 3, Iss.2, art.1092.
- [17] **CRESESB.** *Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.* [Online] <http://www.cepel.br/crese/cresebs.htm>.
- [18] **Patel, Mukund R.** *Wind and solar power systems : design, analysis, and operation .* ISBN 0-8493-1570-0 : Taylor & Francis, 2006.
- [19] **Master, Gilbert M.** *Renewable and efficient electric power system.* ISBN 0471280607 : John Wiley & Sons, 2004.
- [20] **J. F. Manwel, McGowan, J. G., Rogers A. L.** *Wind energy explained : theory, design and application .* ISBN 0-471-49972-2 : John Wiley & Sons, 2002.
- [21] **Pereira, Marcello Monticelli.** *Um estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e sua Aplicação para Fornecimento de potência Eléctrica Constante, Tese Mestrado.* 2004.
- [22] **Chompoo-inwai, chain et al.** *Reactive compensation techniques to improve the Ride-through of induction Generators during Disturbance.* s.l. : Disponível em: <Http://www.ieee.org>, 2004.
- [23] **Lopes, João Abel Peças.** *Tipos de Aerogeradores: Modelização, Controlo e Protecções, disponível em:*. s.l. : http://paginas.fe.up.pt/~jpl/textos_apoio.htm, 2005.
- [24] **Zenit.** Zenti-Energies. [Online] [Citação: 23 de Março de 2009.] <http://www.zenit-energies.com/eole.php>.

- [25] **Luis Cano, Luis Arribas, Ignacio Cruz, Luis Hernández.** *Analysis and Testing of the Connection of Small Wind Turbines to Weak and Autonomous Grids.* [Online] 2006. [Citação: 19 de Março de 2009.]
http://www.ewec2006proceedings.info/allfiles2/517_Ewec2006fullpaper.pdf.
- [26] **Ferreira, Angela.** *Problemática e perspectivas da utilização do gerador de imanes permanentes na produção de energia eólica, Tese de mestrado.* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto : s.n., 2000.
- [27] **João Peças Lopes e J. A P Marques, P.F.,.** *Procedimentos de rede para Aceitação de Produção Eólica e Especificações de Ride Through Default.* Porto, Portugal : s.n., 2004.
- [28] **Energy, Proven.** Proven Energy. [Online] 2009. [Citação: 10 de Maio de 2009.]
http://www.provenenergy.com.pt/turbinaseolicas_produtos.shtml.
- [29] **Matos, Manuel António.** *Noções de Dimensionamento de Canalizações Eléctricas.*
<http://paginas.fe.up.pt/~man/dimensionamento.pdf>. [Online] 1996. [Citação: 18 de Maio de 2009.]
- [30] **REN.** *Rede Energética Nacional.* [Online] 2009. <http://www.ren.pt/>.
- [31] **ERSE.** *Entidade Reguladora dos serviços Energéticos.* [Online] 2009.
<http://www.erse.pt/>.
- [32] **Labellec-EDP.** *Estudo de impacto numa significativa introdução de unidades de Produção Distribuída nas redes de Média Tensão e baixa Tensão da EDP-Distribuição.* 2003.
- [33] **IEA.** *International Energy Agency (2002), Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets,* França. [Online]
www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/distributed2002.pdf.
- [34] **Driesen, J. De Brabandere, K. Dapos. hulst, R. Belmans, R., Small.** *Small wind turbines in the built environment: opportunities and grid-connection issues.* s.l. : Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE Volume(Issue) Vol. 2, 2005.
- [35] **Sucena Paiva, J.P.** *Redes de energia eléctrica : uma análise sistémica.* s.l. : IST Press, 2005. ISBN 972-8469-34-9.

Anexos

Anexo 1 - Características gerais de alguns modelos de micro-turbinas eólicas

Tabela 25 - Características gerais de alguns modelos de micro-turbinas eólicas

Fabricante / Distribuidor	Modelo	Vel. Min. do vento (m/s)	Vel. Máx. do vento (m/s)	Resistência máxima ao vento (m/s)	Potência (e vel. nominal do vento) (kW - m/s)	Diâmetro (m)	Tipo de gerador	Número de pás
African Winpower	AWP36	2,5			1 (12)	3,6		3
	AWP54	Em desenvolvimento			5			
Amos Technology & projects	Kestrel300	3			0,3 (15)	1,2		6
	Kestrel600	Em desenvolvimento						
Ampair	Ampair Hawk					0,915		6
Bonus	Mk III				300			
Ecotools (Eólica vertical "Rosa do vento")	WR 0.18				0,055 (20)			3
	WR 2				0,6 (20)			3
	WR 7				2,1 (20)			3
	WR 14				4,2 (20)			3
Gen Vind Engineering	(i.n.d)				22			
LM Glasfiber	LM 13.4				300 (13.39)	30,2		
	LM 14.4				400 (14.39)	33,4		
	LM 15.4				400 (15.39)	32,4		
Mitsubishi	MWT E500	3			150 - 490 (12.1)	38	Indução	3
NEG Micon					150			
					200			
					40 - 225			
					300			
					100 - 400			
Nordex	N-27/150				150			
	N-29/250				250			
Northern Power Systems	NW 100/19	4	25	70	0.1 (13)	19	Síncrono	3
Olsen Wings	OLW 340	3			5 - 15	6,72		2 - 3
PitchWind	(i.n.d)					14		2
Shield (Eólica vertical)	Jaspira - Energy				2 - 10			
Solener	Véltor XV	3,5		55	15 (13)	7		3
Ventis	Ventis 05-06	3,5	nenhum		6 (12)	5	Síncrono	2
	Ventis 20-100	3,3	25		20/100 (13)	20	Assíncrono	2
	Ventis V12	4	25		500 (12)	40	Assíncrono	2
Vergnet	GEV 4/2	4,5	60		2 (12,5)	4	Assíncrono	2
	GEV 5/5	4,5	60		5 (15)	5	Assíncrono	2
	GEV 7/10	4	80		10 (12)	7	Assíncrono	2
	GEV 10/15	4,5	60		15 (13)	10	Assíncrono	2
	GEV 10/25	4,5	60		25 (16)	10	Assíncrono	2
	GEV 15/60	5	50		60 (15)	15	Assíncrono	2
	GEV 26/220	5	25		220 (14)	26	Assíncrono	2
Vestas	V 27				225			
	V 29				225			
	V 39				500			
Wincon West Wind	W200/26				200			
	W200/29				250			

Tabela 26 - Características gerais de alguns modelos de micro-turbinas eólicas (cont)

Fabricante / Distribuidor	Modelo	Vel. Min. do vento (m/s)	Vel. Máx. do vento (m/s)	Resistência máxima ao vento (m/s)	Potência (e vel. nominal do vento) (kW - m/s)	Diâmetro (m)	Tipo de gerador	Número de pás
Wind Turbine	Model 23-10 Jacobs	8 (mph)		120 (mph)	10 (25 mph)	23 ft	Síncrono	3
	Model 23-12.5 Jacobs	8 (mph)		120 (mph)	12.5 (27 mph)	23 ft	Síncrono	3
	Model 26-15 Jacobs	8 (mph)		120 (mph)	15 (28 mph)	26 ft	Síncrono	3
	Model 26-17.5 Jacobs	8 (mph)		120 (mph)	17.5 (27 mph)	26 ft	Síncrono	3
	Model 29-20 Jacobs	8 (mph)		120 (mph)	20 (28 mph)	29 ft	Síncrono	3
Windmatic	WM 15 S	3.5	25	50	13 - 68	15.5	Assíncrono	
	WM 17 S	3.5	25	50	95			
Windmission	600 W Windflower	3	>20		0.6 (12)	2	Síncrono	6
	1 kW Winflower	3			1 (10)		Indução	12
	4 kW Winflower	3			4 (13)	3.8	Indução	12
Winside (Eólica vertical)	WS 0.30 C	2.8		30	0.07 (12)			
	WS 0.30 A	3		60	(18)			
	WS 4C	1.5	nenhum	30	0.7 (12)			
	WS 4A	1.9	nenhum	60	0.7 (12)			
	WS 0.15C/B	3.8	nenhum	30 - 40	0.035 (12)			
	WS 2B	2	Nenhum	40	0.35 (12)			
Windstream	Windstream				0.12			2
	Air 403	3			0.4 (12.5)	1.15		3
	Bergey XL 1				1			3
	Whisper H40	2.9			0.9 (12.5)	2.1		3
	Whisper H80	2.8			1 (12.5)	3		3
	Whisper 175	2.7			3.2 (12.5)	4.8		2
	BWC 1500	3.6	nenhum	54	1.5 (12.5)	3		3
BWC Excel	3.1	nenhum	54	10 (12.1)	7		3	
Windworker		3	27	50	10	15		
Wuerth Solergy					0.12 até 0.75			

Tabela 27 - características técnicas de alguns microgeradores existentes no mercado

Fabricante	Modelo	Tipo gerador	Pn(W)	diametro(m)	eixo
AEROSTAR	6 METER	Assíncrono	10	6	Horizontal
AIRDOLPHIN	Z1000	PMSG	1	1,8	Horizontal
BERGEY	XL.1	PMSG	1	2,5	Horizontal
FORTIS	ESPADA	PMSG	0,8	2,2	Horizontal
FORTIS	PASSAAT	PMSG	1,4	3,12	Horizontal
FORTIS	MONTANA	PMSG	5	5	Horizontal
FORTIS	ALIZE	PMSG	10	7	Horizontal
GUAL INDUSTRIE	STATO-EOLIEN GSE4/1,5	PMSG	1,5	4	Vertical
GUA INDUSTRIE	STATO-EOLIEN GSE8/3	Assíncrono	35	8	Vertical
ISKRA	Krestel 1kW	PMSG	1	3	Horizontal
ISKRA	AT5-1	PMSG	5	5,4	Horizontal
JBORNAY	Inclin 250	PMSG	0,25	1,35	Horizontal
JBORNAY	Inclin 600	PMSG	0,6	2	Horizontal
JBORNAY	Inclin 1500	PMSG	1,5	2,8	Horizontal
JBORNAY	Inclin 3000	PMSG	3	3,7	Horizontal
JBORNAY	Inclin 6000	PMSG	6	3,7	Horizontal
PROVEN	WT600	PMSG	0,6	2,55	Horizontal
PROVEN	WT2500	PMSG	2,5	3,5	Horizontal
PROVEN	WT6000	PMSG	6	5,5	Horizontal
PROVEN	WT15000	PMSG	15	9	Horizontal
QUIETREVILUTION	QR5	PMSG	6	3	Vertical
ROPATEC	WRE.007	PMSG	0,75	1,5	Vertical
ROPATEC	WRE.015	PMSG	1,5	1,5	Vertical
ROPATEC	WRE.030	PMSG	3	3,3	Vertical
ROPATEC	WRE.060	PMSG	6	3,3	Vertical
ROPATEC	BIG STAR	PMSG	20	4,3	Vertical
SEGEN	Skystream 3,7	PMSG	1,8	3,7	Horizontal
SEGEN	Westwind 10	PMSG	10	6,2	Horizontal
SEGEN	Westwind 20	PMSG	20	10,4	Horizontal
WindElectric	WE-1000	Assíncrono	1	2,2	Horizontal
WindElectric	WE1500	Assíncrono	1,5	3,4	Horizontal
WindElectric	WE-8000	Assíncrono	8	6,8	Horizontal
WindElectric	WE-20000	Assíncrono	20	11	Horizontal
WINDTRAP	Rutland913		0,25	0,91	Horizontal
WINDTRAP	Rutland FM1803		0,75	1,87	Horizontal
WINDSIDE	WS-0,30C	PMSG	0,108	0,3	Vertical
WINDSIDE	WS-0,30A	PMSG	0,108	0,3	Vertical
WINDSIDE	WS-4C	PMSG	0,24	1,02	Vertical
WINDSIDE	WS-4A	PMSG	0,24	1	Vertical
WINDSIDE	WS-0,15C/B	PMSG	0,108	0,334	Vertical
WINDSIDE	WS-2B	PMSG	0,24	1,02	Vertical
WINDMISSION	1kW WINDFLOWER	Assíncrono	1	2,7	Horizontal
WINDSTREAM	Whisper 100		0,9	2,1	Horizontal
WINDSTREAM	Whisper 200		1	2,7	Horizontal
WINDSTREAM	Whisper 500		3	4,5	Horizontal
TURBY	VAWT2500	PMSG	2,5	2	Vertical
ZENIT	2000	PMSG	2	3,6	Horizontal
ZENIT	5000	PMSG	5	6,4	Horizontal
ZENIT	10000	PMSG	10	8	Horizontal
ZENIT	20000	PMSG	20	12	Horizontal
ZENIT	200	PMSG	0,2	2,1	Horizontal
ZENIT	300	PMSG	0,3	2,5	Horizontal
ZENIT	400	PMSG	0,4	1,4	Horizontal
ZENIT	500	PMSG	0,5	2,7	Horizontal
ZENIT	1000	PMSG	1	3	Horizontal

Anexo 2 - Características técnicas de micro-turbinas eólicas

Tabela 28 - Características da turbina modelizada [28]

Modelo	<i>Proven 2.5</i>
Potência nominal	2500 (W)
Potência máxima	2700 (W)
Velocidade de arranque	2,5 (m/s)
Velocidade de paragem	Não existe
Velocidade máxima (s/ destruição)	70 (m/s)
Velocidade nominal	12 (m/s)
Nº de pás	3
Tipo rotor	<i>Downwind</i>
Diâmetro do rotor	3,5 (m)
Tipo de gerador	PMSG
Ligação á rede através de inversor	230 V _{AC} 50Hz/ 240 V _{AC} 60Hz
Rotações por minuto (nominal)	300 rpm
Energia produzida ³	2500 - 5000 kWh

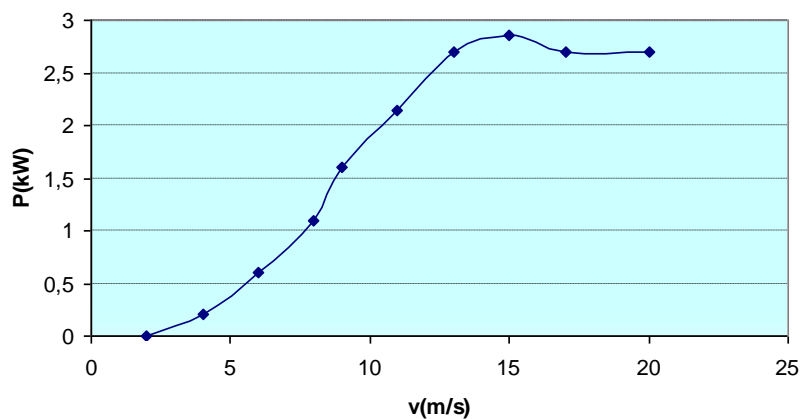


Figura 32 - Curva de potência da turbina eólica

³ Para velocidades médias de vento de 4,5 e 6,5 m/s, respectivamente

Anexo 3 - Diagramas de Carga

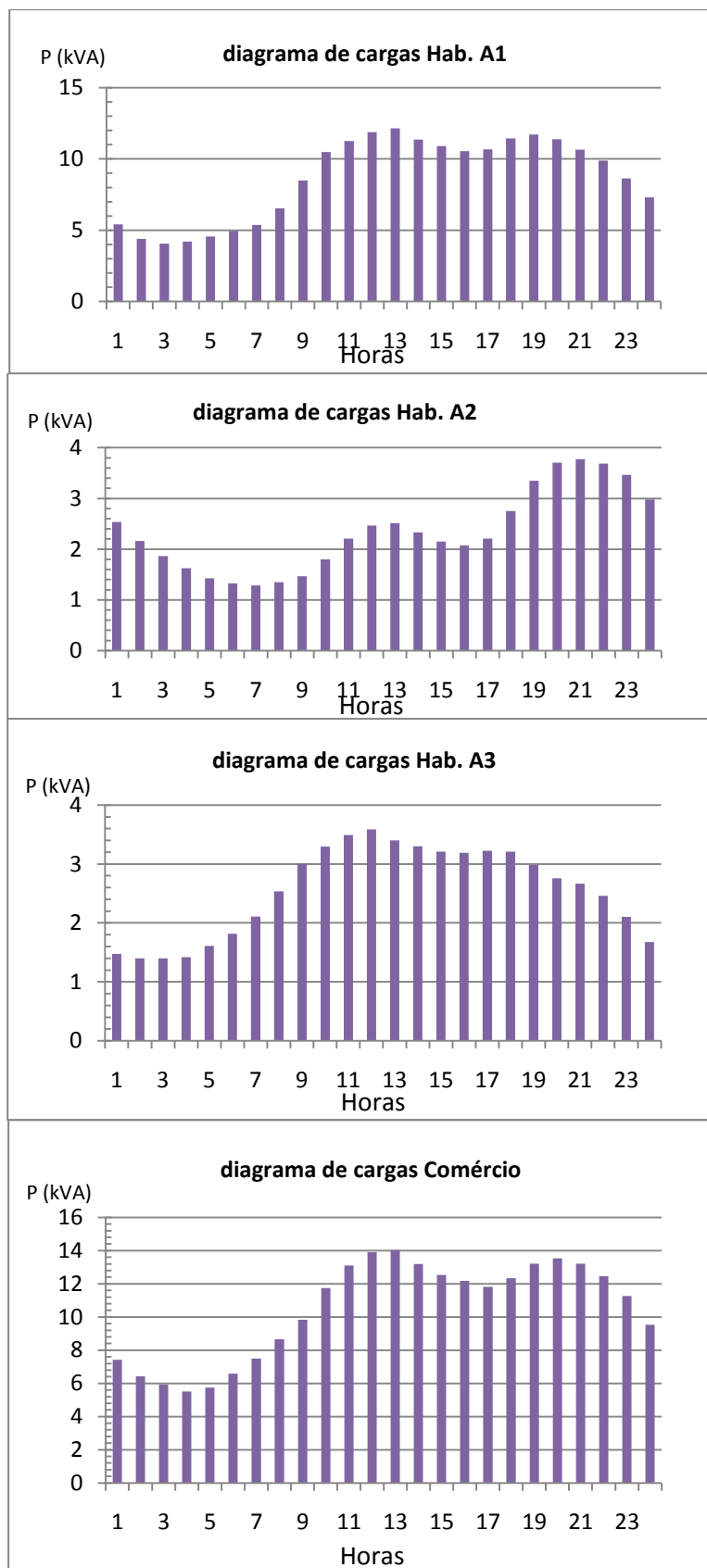


Figura 33- Diagrama de Carga de cada habitação

Sabendo o diagrama de cargas de cada habitação, agregou-se os diagramas para cada barramento da rede de baixa tensão, sendo que apenas se considerou 3 tipos de consumos diferentes, e para esses diagramas apenas foi considerado as horas de ponta, onde o consumo é mais elevado.

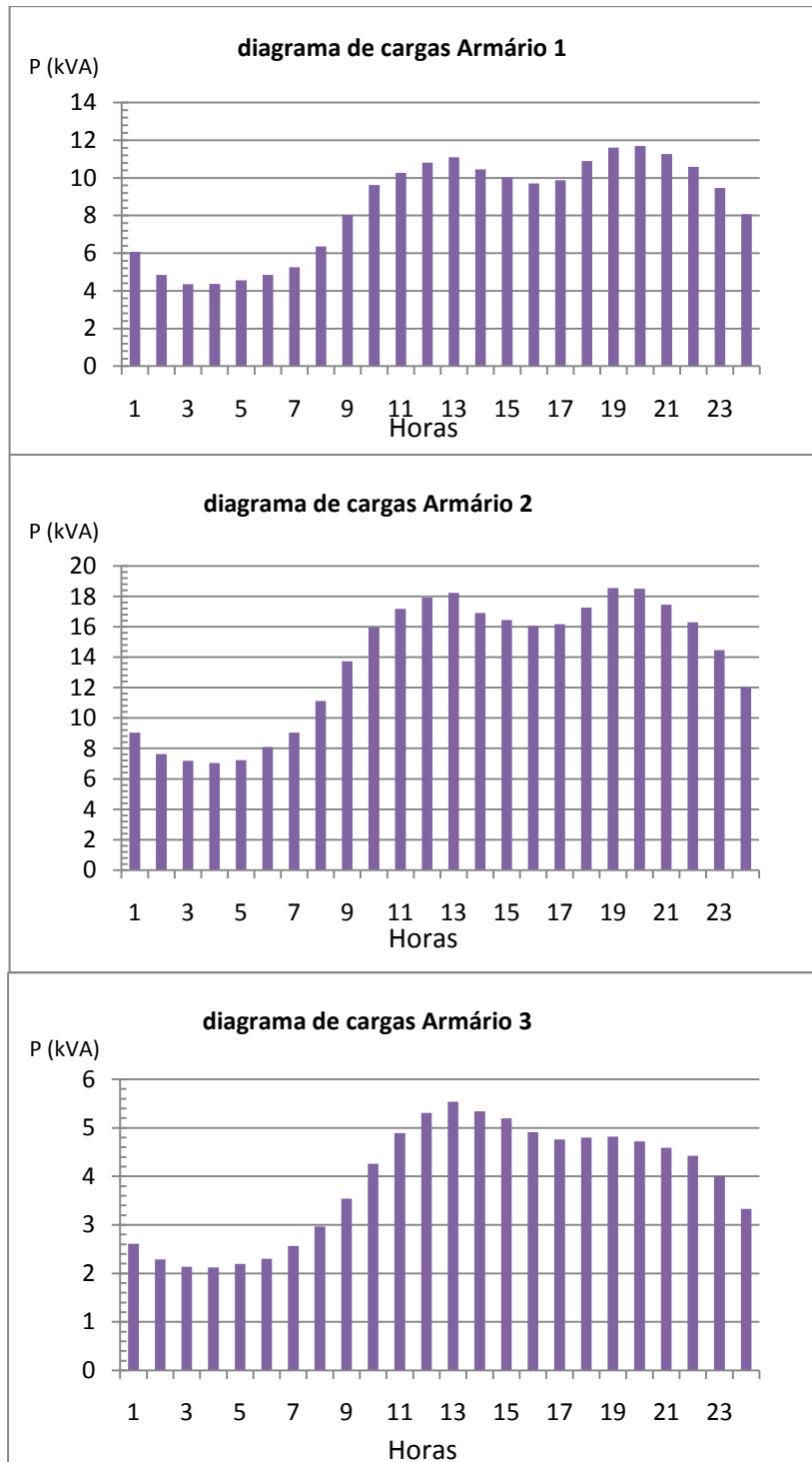


Figura 34 - Diagrama de Carga de cada armário