

**ESTUDO DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO ALTERNATIVA
RESIDENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA NA REDE DE
DISTRIBUIÇÃO.**

VINICIUS OLIVEIRA GOMES

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Supervisão, Controle e Proteção de SEP, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em 22 de dezembro de 2015

**José Luiz Silvino - Dr.
Supervisor**

**Silvério Visacro Filho - Dr.
Coordenador do CESEP**

**ESTUDO DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO ALTERNATIVA
RESIDENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA NA REDE DE
DISTRIBUIÇÃO.**

VINICIUS OLIVEIRA GOMES

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Supervisão, Controle e Proteção de SEP, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em 22 de dezembro de 2015

**José Luiz Silvino - Dr.
Supervisor**

G633i

Gomes, Vinícius Oliveira.

Estudo dos impactos da geração alternativa residencial de energia elétrica na rede de distribuição [manuscrito] / Vinícius Oliveira Gomes. - 2015.

iv, 43 f., enc.: il.

Orientador: José Luiz Silvino.

“Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização”

Anexos: f.42-43.

Bibliografia: f. 40-41.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia elétrica Distribuição. 3. Energia eólica. I. Silvino, José Luiz. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA E CONTEXTO DA INVESTIGAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO E METODOLOGIA.....	1
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	1
2. GERAÇÃO ALTERNATIVA	3
2.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	3
2.2 MÉTODOS DE GERAÇÃO ALTERNATIVA MAIS USUAIS	4
2.2.1 <i>Microcentrais Hidrelétricas (mCH)</i>	4
2.2.2 <i>Painéis Solares Fotovoltaicos</i>	5
2.2.3 <i>Usinas Heliotérmicas</i>	9
2.2.4 <i>Microturbinas</i>	11
2.2.5 <i>Aerogeradores de Pequeno Porte</i>	13
3. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	16
3.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	16
3.2 DISTÚRBIOS ELETROMAGNÉTICOS.....	17
3.2.1 <i>Transitórios</i>	18
3.2.2 <i>Variações de Tensão de Curta Duração</i>	19
3.2.3 <i>Variações de Tensão de Longa Duração</i>	21
3.2.4 <i>Harmônicos</i>	22
3.2.4.1 <i>Mitigação de Harmônicos</i>	25
4. ESTUDO DE CASO - GERADOR EÓLICO	26
4.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	26
4.2 DETERMINAÇÃO DO CASO DE INTERESSE PRÁTICO.....	26
4.2.1 <i>Proteção Contra Descargas Atmosféricas</i>	30
4.2.2 <i>Inversor de Frequência</i>	32
4.2.3 <i>Proteção Contra Faltas</i>	34
5. CONCLUSÕES	38

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

40

ANEXO

42

RESUMO

O presente trabalho dedica-se ao estudo dos impactos da geração de energia elétrica advinda de fontes alternativas na rede de distribuição, com base nos conhecimentos adquiridos nas disciplinas de estabilidade de tensão e análise de redes no domínio do tempo. Através de uma análise a respeito da qualidade energética inerente aos sistemas de geração eólica, é feita uma qualificação dos impactos deste tipo de geração na rede de distribuição elétrica. Este trabalho engloba em seu referencial teórico os tópicos relacionados à qualidade de energia, geração eólica e solar, entre outros. Como estudo de caso, é avaliada uma situação específica envolvendo geradores eólicos, onde os problemas inerentes à variação na velocidade dos ventos e consequente geração não uniforme de energia elétrica será estudada a fim de obter soluções que mitiguem estes efeitos, concentradas no sistema de conversão de energia. O objetivo deste trabalho é definir padrões aceitáveis de qualidade de energia para facilitar a especificação de equipamentos e propor soluções práticas tanto para instalações existentes quanto futuras instalações baseadas em fontes de energia alternativa.

ABSTRACT

This work is dedicated to the study of the impacts of electricity generation arising from alternative sources in the distribution network, based on the knowledge acquired in the voltage stability and network analysis in the time domain disciplines. Through an analysis about the energy quality inherent in wind generation systems, a qualification of the impacts of this type of generation in the electrical distribution network is done. This work includes in its theoretical topics related to power quality, wind and solar generation, among others. As a case study, a specific situation involving wind turbines, where the problems of variation in wind speed and resulting non-uniform power generation is studied in order to get solutions to mitigate these effects, concentrated in the power conversion system. The objective of this work is to define acceptable standards of quality power to facilitate the equipment specification and propose practical solutions for both existing installations and future alternative energy sources-based installations.

1 Introdução

1.1 Relevância e Contexto da Investigação

A geração residencial de energia elétrica tem avançado substancialmente no Brasil após a aprovação da resolução normativa ANEEL nº482/2012, que permite a inserção da mesma na rede de distribuição de baixa tensão (até 13,8 kV). Esta norma permite que microgeradores (até 100 kW) e minigeradores (de 101 kW a 1 MW) baseados em fontes renováveis de energia elétrica sejam inseridos na rede de distribuição, em troca de descontos na tarifa de energia elétrica do consumidor ou mesmo recebimento em dinheiro pela energia gerada.

Este tipo de geração é conhecido como Geração Distribuída (GD) que é abordada neste trabalho com enfoque na geração residencial de energia eólica, através de um estudo de caso desenvolvido com base nos geradores mais comuns utilizados para este fim.

1.2 Objetivo e Metodologia

O presente trabalho dedica-se ao estudo de qualidade energética inserido no contexto de geração distribuída, focando-se na geração eólica residencial com o objetivo de introduzir os problemas inerentes a este tipo de geração e propor soluções para os mesmos.

Para implementar tal objetivo adotou-se como metodologia o estudo de caso, onde serão abordados dados práticos relacionados aos geradores eólicos para melhor compreender os problemas apresentados pelos mesmos e definir estratégias de mitigação destes.

1.3 Organização do texto

Nesta monografia, procurou-se apresentar um desenvolvimento teórico para contextualizar o leitor acerca dos diferentes métodos de geração distribuída bem como fatores

que interferem na qualidade energética desta geração, para logo após apresentar um estudo de caso que demonstre os problemas inerentes à GD e finalmente apresentar possíveis soluções para estes problemas e por fim dissertar sobre as conclusões obtidas neste estudo.

Nesta perspectiva, o texto desta dissertação foi distribuído em 6 capítulos, incluindo a presente *Introdução*.

No *Capítulo 2* realizou-se uma revisão bibliográfica acerca dos métodos de geração alternativa mais utilizados no sistema elétrico brasileiro, focando principalmente nos métodos de geração eólica e solar fotovoltaica.

No *Capítulo 3* realizou-se uma revisão bibliográfica acerca dos fundamentos inerentes ao estudo de qualidade de energia elétrica, a fim de estudar os possíveis métodos a serem utilizados na mitigação dos efeitos negativos da geração alternativa na rede de distribuição elétrica.

No *Capítulo 4* apresentou-se um caso específico de gerador eólico, a fim de determinar as principais fontes de problemas relacionados à qualidade de energia e apresentar soluções para os mesmos, embasadas na revisão bibliográfica sobre qualidade de energia elétrica.

As conclusões finais desta monografia, embasadas no estudo de caso, bem como propostas para estudos futuros, são apresentadas no *Capítulo 5*.

Ao final do texto são apresentadas as *Referências Bibliográficas* utilizadas.

2 Geração Alternativa de Energia

2.1 Considerações Preliminares

Neste capítulo são especificados os diferentes métodos de Geração Distribuída segundo a Resolução Normativa da ANEEL 482/12 [ANEEL, 2012a], para logo em seguida dissertar sobre os métodos mais usuais de geração residencial de energia elétrica, que se dão por meio da geração de energia solar fotovoltaica e energia eólica.

Segundo o artigo 2º [ANEEL, 2012a], fica definida como microgeração distribuída uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e como minigeração distribuída uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW, ambas para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

O artigo 2º [ANEEL, 2012a], também trata do sistema de compensação de energia elétrica, onde a energia gerada é cedida à distribuidora local e posteriormente compensada na com o consumo da unidade geradora.

Quanto aos níveis de tensão, a Resolução Normativa da ANEEL 482/12 [ANEEL, 2012b] definiu os patamares exibidos na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Níveis de tensão de conexão em função da potência

Fonte: [ANEEL, 2012b]

Potência instalada	Nível de tensão de conexão
< 10 kW	BT (mono, bi ou trifásico)
10 a 100 kW	BT (trifásico)
101 a 500 kW ^(*)	BT(trifásico)/MT
501 a 1 MW	MT

(*) o nível da conexão da central geradora é definido pela distribuidora em função das limitações técnicas da rede.

Em suma um cidadão comum pode se utilizar das fontes citadas acima para gerar energia em uma residência ou prédio comercial e, através do sistema de distribuição de energia elétrica, fornecer a energia gerada para a companhia de distribuição responsável e obter através disto uma compensação em sua conta de energia.

2.2 Métodos de Geração Alternativa Mais Usuais

As formas de geração alternativa (ou geração distribuída) que melhor atendem as já citadas resoluções da ANEEL, ou seja com base em fontes de energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada são as Microcentrais Hidrelétricas, Painéis Solares Fotovoltaicos, Usinas Heliotérmicas, Aerogeradores de pequeno porte e Microturbinas.

A seguir são apresentados cada um destes métodos, sendo que uma maior ênfase será dedicada à geração fotovoltaica e à geração eólica.

2.2.1 Microcentrais Hidrelétricas (mCH)

A obtenção de energia elétrica através de hidrelétricas é responsável pela maior parte da energia elétrica gerada no Brasil, aproveitando os expressivos recursos hídricos do país para a geração de energia. As Microcentrais Hidrelétricas (mCH) são definidas como usinas hidrelétricas com potências instalada de até 100 kW [ANEEL, 2003].

Estas centrais são instaladas em áreas que possuem uma fonte de água corrente, sendo indicada portanto para propriedades rurais onde se encontra uma queda d'água proveniente de

um córrego, rio ou igarapé [Alterima, 2015]. Por operarem a partir de uma pequena quantidade de água, não precisam de reservatórios e são utilizadas para alimentar pequenas cargas não conectadas à rede de distribuição, embora esta conexão possa ser feita.

O princípio de operação das mCHs é similar ao das PCHs (pequenas centrais hidrelétricas) e consiste em transformar energia potencial da água represada em cinética (ou em pressão), ou até mesmo utilizar a própria energia cinética dos rios para mover uma turbina hidráulica e gerar energia elétrica. A escolha do tipo de turbina depende das condições de geração, tais como vazão da água, queda líquida, entre outras [Eli, 2014].

Para a conexão deste tipo de geração à rede elétrica é necessário providir reguladores automáticos de velocidade e tensão, além de um sistema de proteção adequado [Eli, 2014].

A figura 2.1 abaixo mostra um esquema de instalação de uma mCH em uma propriedade rural.

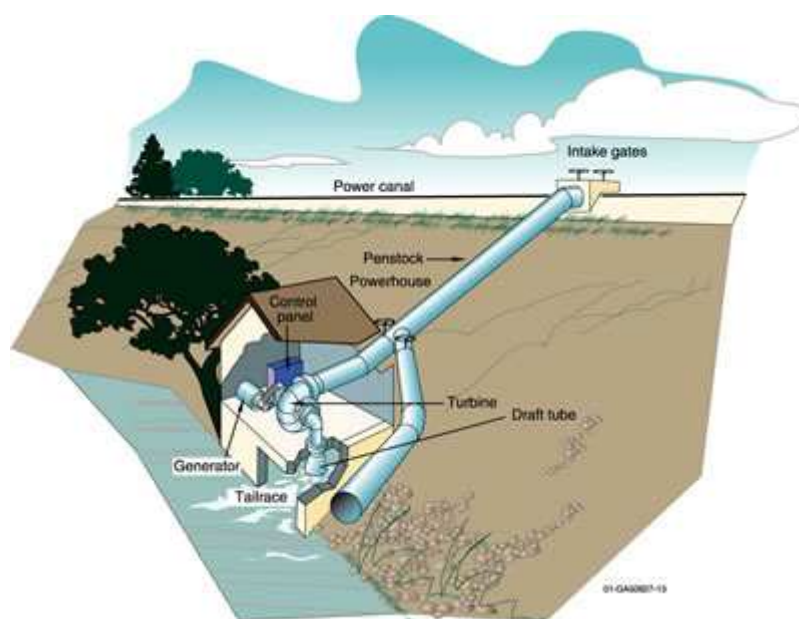


Figura 2.1- Esquema de instalação de uma mCH [Engiobra, 2015].

2.2.2 Painéis solares fotovoltaicos

Através do efeito fotovoltaico, células solares convertem diretamente a energia do sol em energia elétrica de forma estática, silenciosa, não-poluente e renovável [Rüther, 2004]. Os painéis fotovoltaicos representam a maneira mais usual de se gerar energia elétrica

em uma residência ou estabelecimento comercial, cuja fonte de energia é a inesgotável, abundante e gratuita luz solar.

Os painéis fotovoltaicos são constituídos de material semicondutor (geralmente diodos de silício de junção PN). Quando exposta à luz do sol, parte dos elétrons do material da placa absorve fótons. Os elétrons livres são então transportados pelo semicondutor até serem atraídos por um campo elétrico. Este campo elétrico é formado na área de junção dos materiais, por uma diferença de potencial entre os materiais semicondutores. Os elétrons livres então são compelidos para o exterior da placa através de um cabo conectado à ela e alimentam a rede de energia elétrica.

Na figura 2.2 a seguir é exibido um esquema de funcionamento de uma placa solar fotovoltaica. É importante salientar que quanto maior a placa, maior será a área incidência da luz solar e conseqüentemente maior será a quantidade de energia gerada.

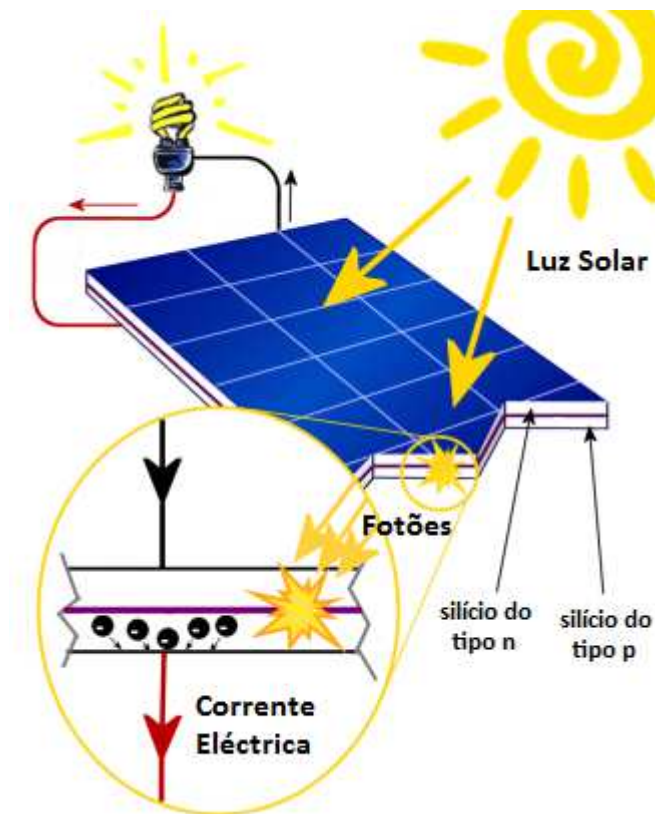


Figura 2.2- Esquema de funcionamento de uma placa solar fotovoltaica [Central Elétrica, 2015].

A energia elétrica gerada neste processo é de baixa tensão e contínua, sendo preciso convertê-la em energia alternada para posterior inserção na rede de distribuição elétrica, processo este realizado através do uso de inversores de frequência.

Como a geração de energia não é constante durante o dia, já que depende da luminosidade e portando de fatores climáticos que possam diminuir a incidência da luz do sol, além do fato de que a geração é interrompida durante a noite, o uso de bancos de bateria pode ser o mais indicado para mitigar parte destes efeitos e evitar variações bruscas de tensão durante o dia, mantendo a geração constante.

A imprevisibilidade de sua fonte geradora e seu cessar ao anoitecer são pois desvantagens deste tipo de geração, além da baixa eficiência das placas encontradas no mercado. A eficiência do painel solar está ligada à quantidade de energia solar que é efetivamente convertida em energia elétrica, e gira em torno de 13 a 16% nos painéis comerciais, sendo que painéis que apresentam eficiência maior que 16% são classificados como Premium e consequentemente possuem um custo elevado [Solar, 2015].

A figura 2.3 a seguir mostra um exemplo de painéis solares fotovoltaicos.



Figura 2.3- Placas solares fotovoltaicas [Colletta, 2015].

Pode-se sumarizar as vantagens desta modalidade de geração elétrica nos seguintes tópicos, segundo [Eli, 2014].

Fonte de energia ilimitada e gratuita;

Não apresenta nenhuma forma de ruído;

Baixa necessidade e custo de manutenção (resumindo-se à eventual limpeza das placas);

Geração livre de poluentes;

Potência modular que pode variar de watts a kilowatts;

Por outro lado, suas desvantagens segundo [Eli, 2014] são:

Custo elevado de implementação;

Processo de fabricação eletro intensivo do módulo fotovoltaico (embora a fabricação das placas polua de certa forma o ambiente, a geração de energia é isenta de poluentes).

As aplicações deste método de geração de energia são diversas, como na construção de pequenas usinas solares, carregadores para celular e principalmente telhados solares, que são uma das aplicações mais utilizadas recentemente ao ponto de empresas especializadas neste tipo de aplicação já atuarem no mercado.

Os telhados solares são a melhor alternativa para quem deseja produzir energia elétrica em sua residência ou estabelecimento comercial utilizando-se do método fotovoltaico. Placas solares são posicionadas sobre o telhado preferencialmente viradas para o norte geográfico, de forma a captar a maior quantidade possível de luz solar. A inclinação natural do telhado auxilia também no rendimento das placas solares.

Após a colocação das placas em quantidade que atenda à potência desejada e interligado o sistema aos inversores de frequência, é possível enviar esta energia gerada para a rede de distribuição de energia elétrica.

A figura 2.4 a seguir mostra a aplicação de telhados solares no estágio Governador Magalhães Pinto (Mineirão).

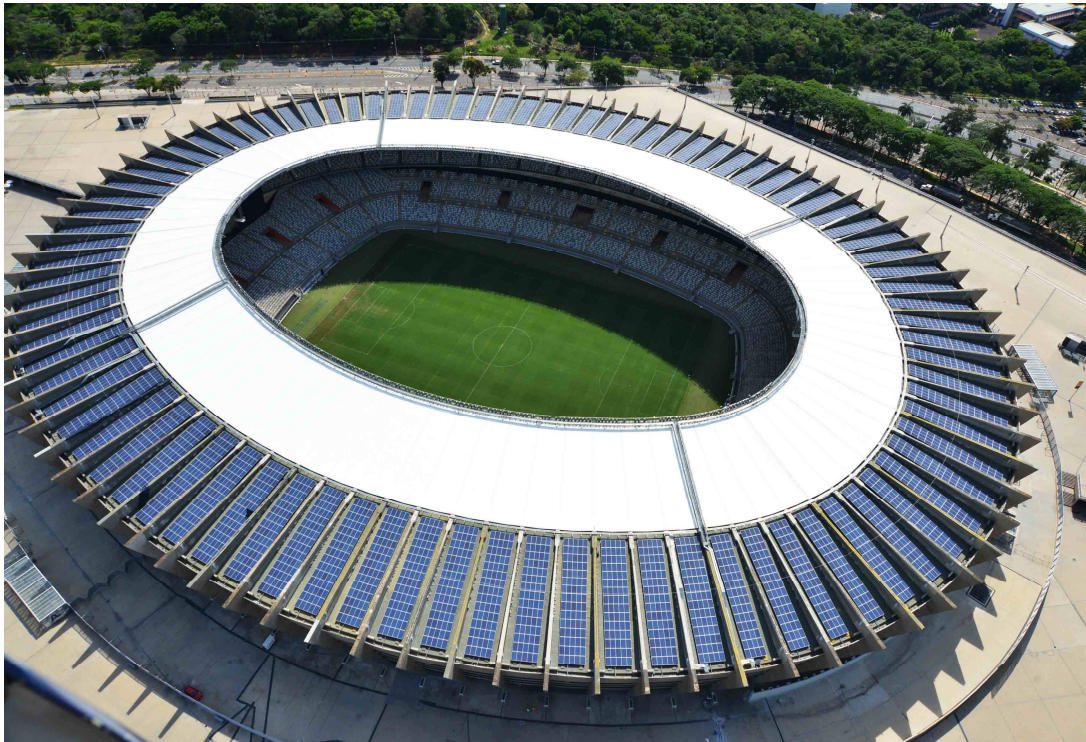


Figura 2.4- Telhado solar construído no Mineirão [Sede, 2015].

2.2.3 Usinas Heliotérmicas

Assim como os painéis solares fotovoltaicos, as usinas heliotérmicas tem como a luz do sol sua fonte de energia, mas seu processo de geração, ao contrário da geração direta das células fotovoltaicas, se dá de modo indireto a partir do aquecimento da água para posterior movimentação das turbinas e geração de energia.

Segundo [Heliotérmica, 2015], este tipo de usina segue um processo dividido em duas etapas.

Concentração de energia térmica por meio de um campo solar;

Geração de energia elétrica num processo praticamente convencional.

A figura 2.5 a seguir mostra o esquema de funcionamento de uma usina heliotérmica.

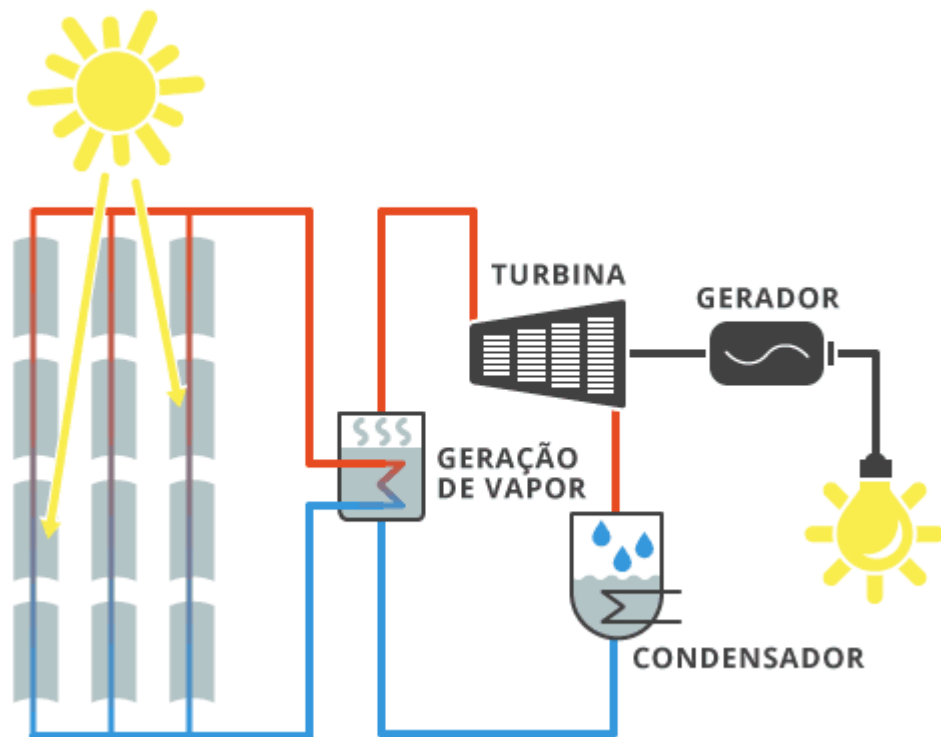


Figura 2.5- Esquema de funcionamento de uma usina heliotérmica [Heliotérmica, 2015].

O processo heliotérmico tem início com a reflexão dos raios solares diretos utilizando um sistema de espelhos, chamados de coletores ou heliostatos. Esses espelhos acompanham a posição do Sol ao longo do dia e refletem os raios solares para um foco, onde se encontra um receptor. Dessa forma, o calor é transmitido para um líquido, o Fluido Térmico, que se mantém em alta temperatura [Heliotérmica, 2015].

Existem diversos tipos de fluidos que podem servir para transportar o calor do Sol na usina heliotérmica: sais fundidos, óleos térmicos, água e ar – estes são os mais utilizados até hoje [Heliotérmica, 2015].

A grande vantagem deste processo em relação à geração fotovoltaica é a possibilidade de armazenar energia na forma de calor, que possibilita a geração de energia elétrica na ausência de luz do sol.

Este processo de geração de energia elétrica demanda porém uma área considerável para sua instalação, tornando-se inviável a instalação do mesmo em residências, além de sua eficiência energética ser ainda mais baixa que a da geração fotovoltaica.

A figura 2.6 a seguir mostra a instalação deste sistema para fins didáticos no Campus II do CEFET-MG.



Figura 2.6- Usina Heliotérmica [CEFET, 2015].

2.2.4 Microturbinas

As microturbinas consistem de pequenas turbinas de combustão na faixa de 20 a 250 kW. Estas turbinas podem ser utilizadas em sistemas de cogeração ou mesmo na geração de energia a partir da biomassa, utilizando-se de combustíveis como o biodiesel [Eli, 2014].

Os sistemas de cogeração são construídos com o objetivo de converter parte da energia previamente perdida no processo produtivo em energia elétrica através de microturbinas. Tipicamente, de metade a um terço de toda energia despendida num processo de geração de energia elétrica ou mecânica não é utilizada e é liberada no meio ambiente na forma de energia térmica [De Bona, 2004].

Já os sistemas a base de biomassa operam a base da combustão de material biodegradável, sendo assim similares aos sistemas a base de combustíveis fósseis, com o diferencial de não emitirem grande quantidade de poluentes para a atmosfera.

A figura 2.7 a seguir mostra o esquema de funcionamento de uma microturbina ligada à um sistema de cogeração.

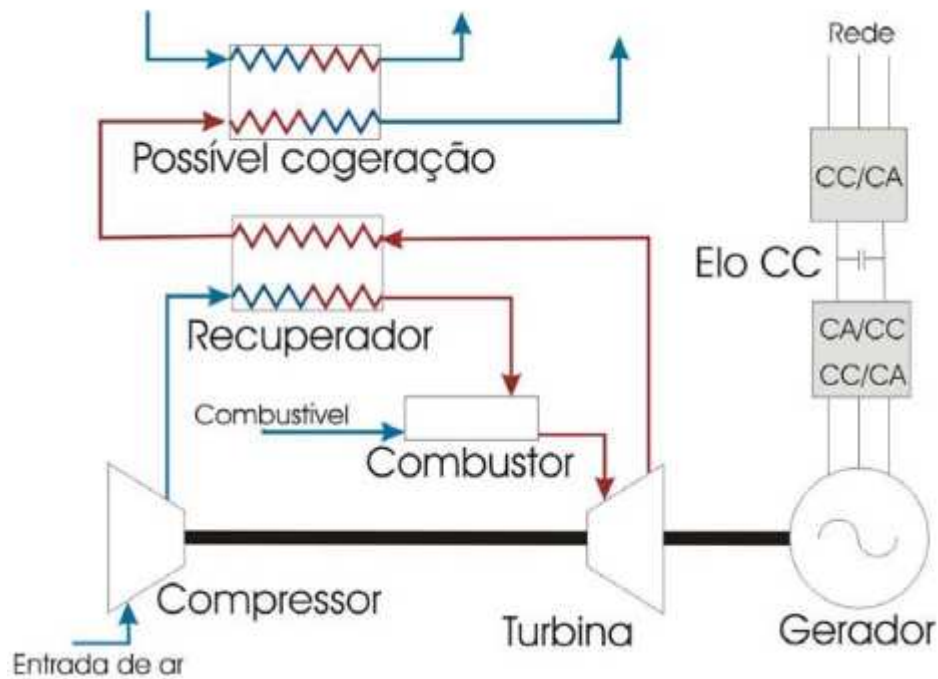


Figura 2.7- Esquema de uma microturbina [De Bona, 2004].

Durante o processo de geração, parte da energia gerada pela turbina é utilizada para mover o compressor, já que ambos são conectados ao mesmo eixo. O compressor pressiona o ar para dentro da câmara de combustão na qual se forma uma mistura de ar comprimido e combustível que alimenta um processo de combustão contínua. O gás quente e pressurizado advindo do compressor se expande na turbina, transformando energia térmica em mecânica. Ao eixo da turbina são conectados um gerador síncrono e um ímã permanente (outros geradores como geradores de corrente contínua ou geradores de indução também podem ser utilizados), que gera uma tensão à alta frequência (até 1600 Hz). Para se obter a frequência de 50 ou 60 Hz da rede, utiliza-se um conversor CA/CC para retificar a onda de tensão e subsequentemente um inversor de frequência [De Bona, 2004].

A figura 2.8 a seguir mostra detalhes de uma microturbina.

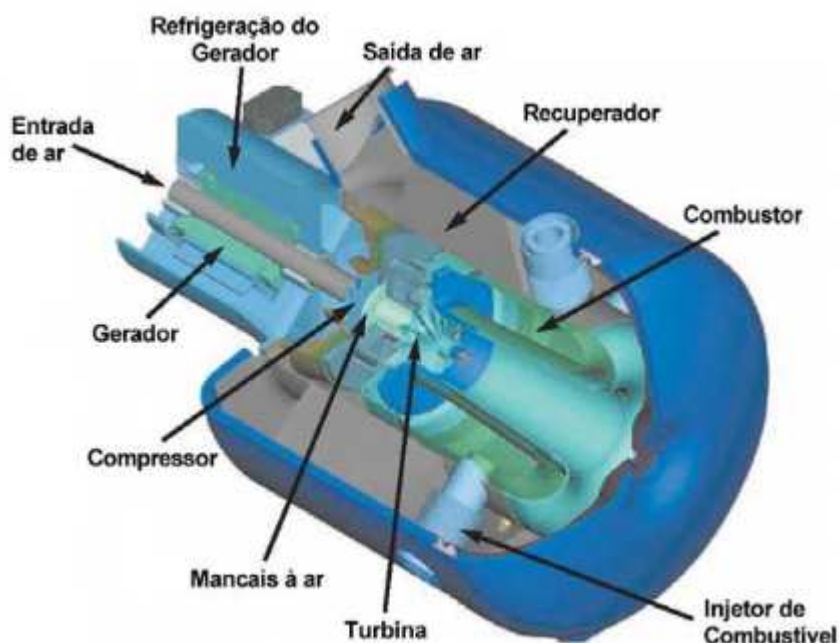


Figura 2.8- Microturbina de 30 kW [De Bona, 2004].

2.2.5 Aerogeradores de Pequeno Porte

Operando a partir da conversão da energia cinética presente nos ventos em energia mecânica e finalmente energia elétrica, os aerogeradores de pequeno porte podem ser instalados em áreas residenciais e comerciais para aproveitar esta energia e fornecê-la para a rede. Estes geradores possuem um processo de geração similar ao dos aerogeradores de grande porte, mas não precisam necessariamente ser instalados em áreas de vento constante e uniforme.

O processo de geração eólica consiste na movimentação das pás da hélice do aerogerador, que conectada ao mesmo eixo do gerador, movimenta-o produzindo a partir deste energia elétrica. Dependendo do porte do aerogerador, seu gerador elétrico pode ser um gerador de corrente contínua (pequeno porte) ou corrente alternada (grande porte). A quantidade de energia gerada é proporcional à densidade do ar, área coberta pela rotação das pás e velocidade dos ventos [Eli, 2014].

A figura 2.9 a seguir mostra um esquema construtivo de um aerogerador de pequeno porte.

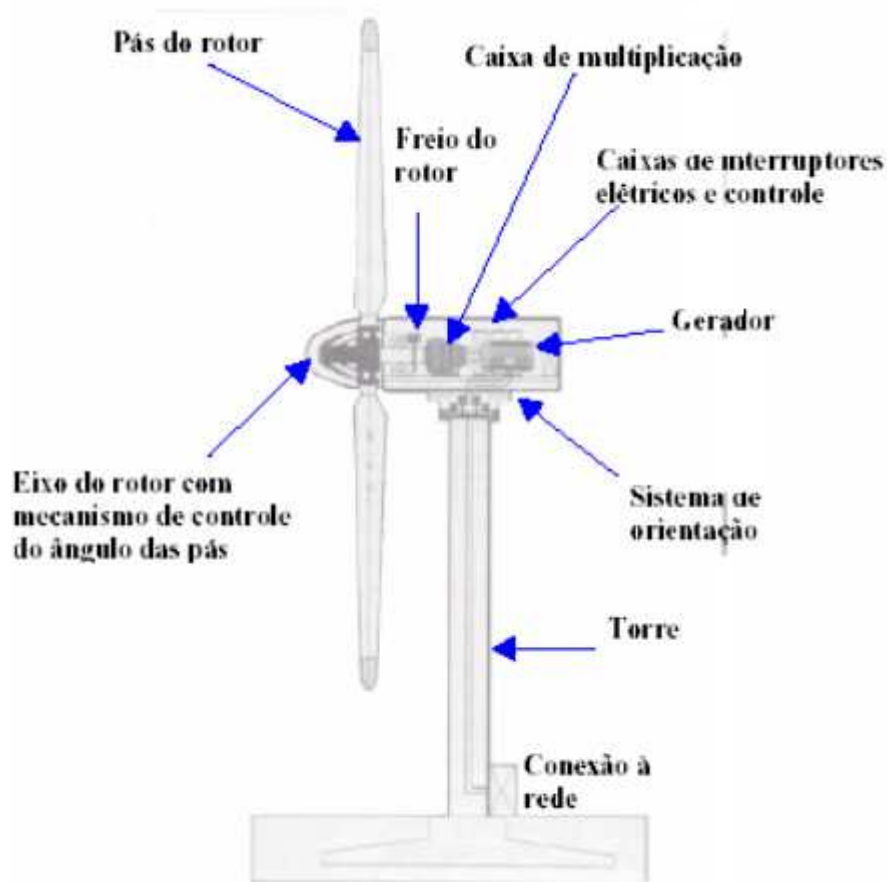


Figura 2.9- Esquema construtivo de um aerogerador [Junior, 2006].

As condições climáticas da região onde se deseja instalar um aerogerador influenciam drasticamente em sua eficiência energética, sendo que regiões de vento constante e uniforme são as ideais para a instalação do mesmo. Se por outro lado a região apresentar deslocamentos de ar de velocidade muito elevada e que poderiam comprometer a estrutura do aerogerador, ou ocorrência muito baixa destes deslocamentos, este método de geração se torna pouco recomendável.

A turbina do aerogerador pode ser do tipo vertical ou horizontal, sendo que as de eixo horizontal, mais comumente utilizadas, são predominantemente movidas por forças de sustentação e devem possuir mecanismos que façam com que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Já as turbinas de eixo vertical captam a energia dos ventos sem precisar alterar a posição do rotor com a mudança na direção dos ventos. Podem ser movidos por forças de sustentação e por forças de arrasto, porém sua eficiência e capacidade de geração são geralmente inferiores em relação à turbina horizontal [Rossi, 2015].

Rotores de 3 pás são os mais comuns, pois constituem um bom compromisso entre coeficiente de potência, custo e velocidade de rotação, bem como uma melhor estética comparada às turbinas de 2 pás. Apesar dos rotores com 2 pás serem mais eficientes, são mais instáveis e propensos a turbulências, trazendo risco a sua estrutura, o que não acontece nos rotores de 3 pás que são muito mais estáveis, barateando seu custo e possibilitando a construção de aerogeradores de mais de 100 metros de altura e com capacidade de geração de energia que pode chegar a 5 MW (megawatts). Seu pico de geração de energia é atingido com ventos fortes e contínuos [Eólica, 2015].

Devido à natureza inconstante de sua fonte geradora, a geração de energia não é contínua e conseqüentemente podem ser observados comportamentos nocivos à rede de distribuição que precisam ser mitigados antes da conexão com a rede. A figura 2.10 abaixo mostra um aerogerador em construção.



Figura 2.10- Aerogerador em construção [Portal, 2015].

No capítulo 4 desta dissertação o assunto dos aerogeradores será retomado através de um estudo de caso dedicado a mitigar os efeitos negativos da geração distribuída.

3 Qualidade de Energia Elétrica

3.1 *Considerações Preliminares*

Neste capítulo são apresentados os aspectos inerentes à qualidade de energia, no que tange a sua aplicabilidade em se tratando de geração distribuída, de forma a esclarecer os possíveis problemas advindos deste tipo de geração que por sua vez poderiam levar a problemas de estabilidade de tensão dadas as devidas proporções.

A preocupação com a qualidade de energia elétrica surgiu no século XIX, sendo que no Brasil a primeira legislação a incorporar indicadores para a melhoria da qualidade de energia datam de 1934 no Código de Águas e seus objetivos eram focados na minimização de horas de interrupção sustentada de energia. A partir das décadas de 70 e 80, a preocupação com fatores como distorções harmônicas e cintilação luminosa (flicker) levaram a criação de procedimentos impostos pelas concessionárias para novas cargas industriais e, na década de 90, a ANEEL criou o Grupo de Trabalho Especial – Qualidade de Energia Elétrica, encarregado de realizar uma revisão na qualidade de energia elétrica segundo os fatores apresentados na tabela 3.1 a seguir [Alves, 2009].

Tabela 3.1 – Fatores levados em consideração na qualidade de energia

Fonte: [Alves, 2009]

Objetivos Tradicionais	Novos Objetivos
Minimizar horas de interrupção sustentada	Minimizar horas de interrupção sustentada
	Ausência de sub-tensões (*)
	Ausência de afundamentos e saltos de tensão (*)
	Ausência de transientes impulsivos e oscilatórios
	Ausência de problemas de regime permanente, tais como harmônicos, desequilíbrios, cortes de flicker(*)

(*) fora de limites aceitáveis.

No decorrer deste capítulo são apresentados os pontos apresentados acima, que por sua vez serão relacionados à geração distribuída para determinação de fatores de risco, onde uma intervenção no sentido de evitar a ocorrência destes problemas deverá ser tomada no âmbito da construção dos geradores de energia elétrica alternativa.

Vale frisar que os fenômenos relacionados à qualidade de energia elétrica são um subconjunto dos fenômenos eletromagnéticos que integram o tópico de compatibilidade eletromagnética [Alves, 2009].

3.2 *Distúrbios Eletromagnéticos*

Neste capítulo são abordados os três principais distúrbios eletromagnéticos que se relacionam com a qualidade de energia elétrica. São eles os transitórios, as variações de tensão e os harmônicos. Através do estudo dos três, é possível cobrir a quase totalidade dos problemas relacionados à qualidade de energia elétrica.

As variações de tensão e os harmônicos são fenômenos de baixa frequência, os transitórios impulsivos são fenômenos irradiados de alta frequência e os transitórios oscilatórios são fenômenos conduzidos de alta frequência, como mostra a figura 3.1 a seguir [Alves, 2009].

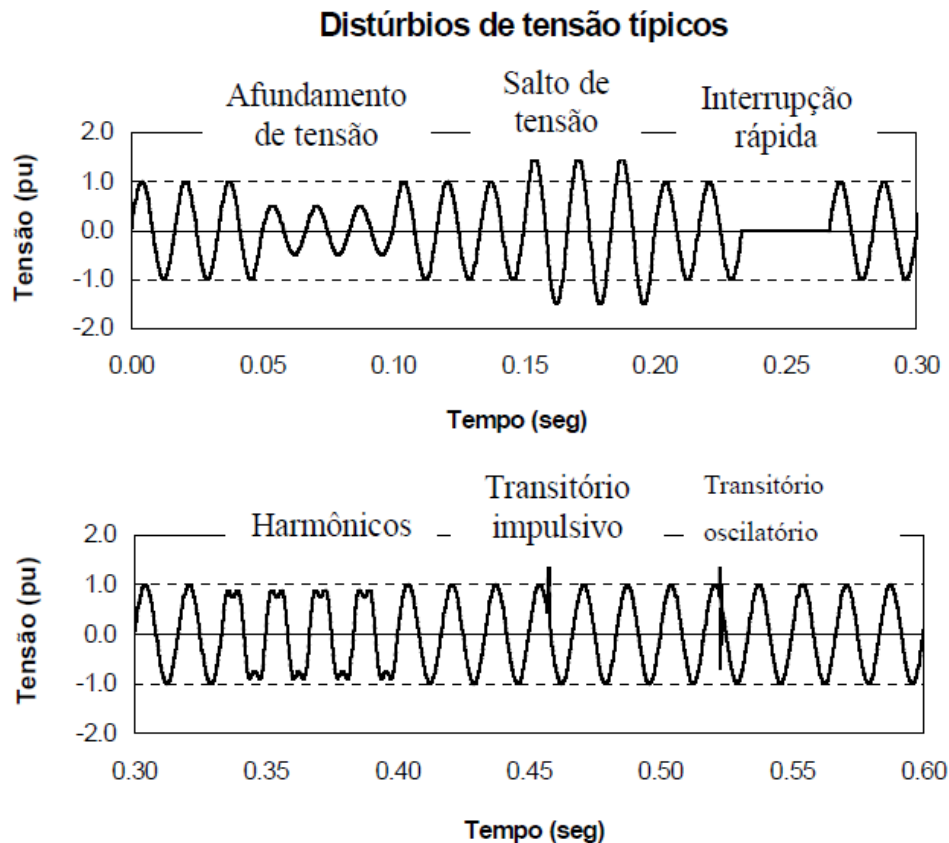


Figura 3.1- Distúrbios de tensão típicos, idealizados [Alves, 2009].

As Variações de tensão podem ser classificadas como de curta duração (que vão de meio ciclo até um minuto) e variações de longa duração, que excedem um minuto, sendo tratadas no decorrer deste trabalho de acordo com esta definição.

3.2.1 Transitórios

Os transitórios são fenômenos de curta duração que podem ser do tipo impulsivo, onde se caracterizam por repentinas variações no regime permanente de tensão ou corrente, ou oscilatórios, os quais consistem em tensões ou correntes cuja polaridade de seus valores instantâneos muda repentinamente. Os transitórios oscilatórios podem ser produzidos a partir dos impulsivos através da excitação de circuitos ressonantes do sistema elétrico, ou através da comutação e chaveamento de circuitos elétricos [Alves, 2009].

As figuras 3.2 e 3.3 a seguir exemplificam um transitório impulsivo e um oscilatório, respectivamente.

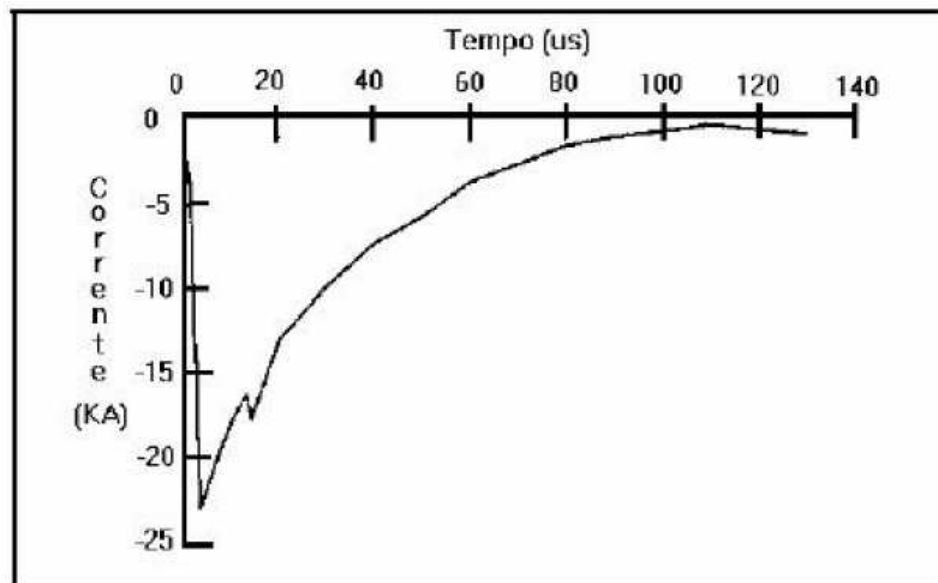


Figura 3.2- Corrente transitória impulsiva devido a uma descarga atmosférica [Alves, 2009].

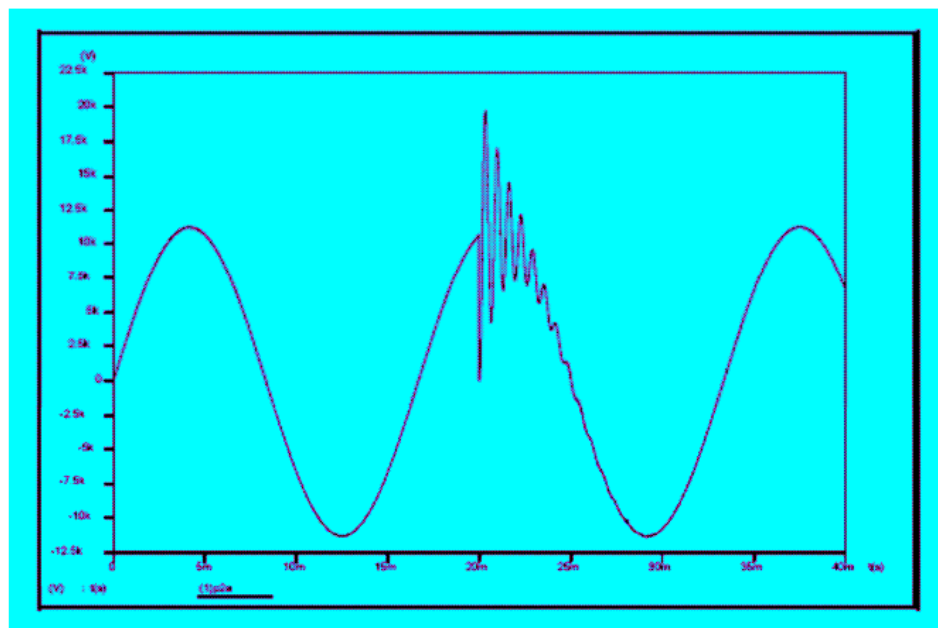


Figura 3.3- Transiente oscilatório devido ao chaveamento de um banco de capacitores [Alves, 2009].

3.2.2 Variações de tensão de curta duração

Conforme dito anteriormente, variações de tensão se classificam como de curta duração se estas duram entre meio ciclo e um minuto. Estas variações são geralmente causadas por faltas no sistema, energização de cargas com grande corrente de partida ou perdas de

conexão. Dependendo da localização da falta, podem ocorrer afundamentos de tensão, interrupções ou saltos de tensão [Alves, 2009].

Um interrupção rápida ocorre quando a tensão eficaz do sistema decresce a menos que 0.1 pu. Estas interrupções resultam de faltas no sistema, falhas em equipamentos e mal funcionamento de dispositivos de controle.

Já os afundamentos de tensão consistem no decaimento da tensão eficaz entre 0.9 e 0.1 pu, sendo classificados de acordo com sua duração em instantâneos, momentâneos e temporários [Alves, 2009]. A principal causa de afundamento de tensão é o curto-circuito em qualquer ponto de fornecimento de energia. O curto-circuito provoca uma grande elevação da corrente, e esta, por sua vez, ocasiona grandes quedas de tensão nas impedâncias do sistema.

A figura 3.4 abaixo mostra um afundamento de tensão causado por um curto-circuito na rede de distribuição.

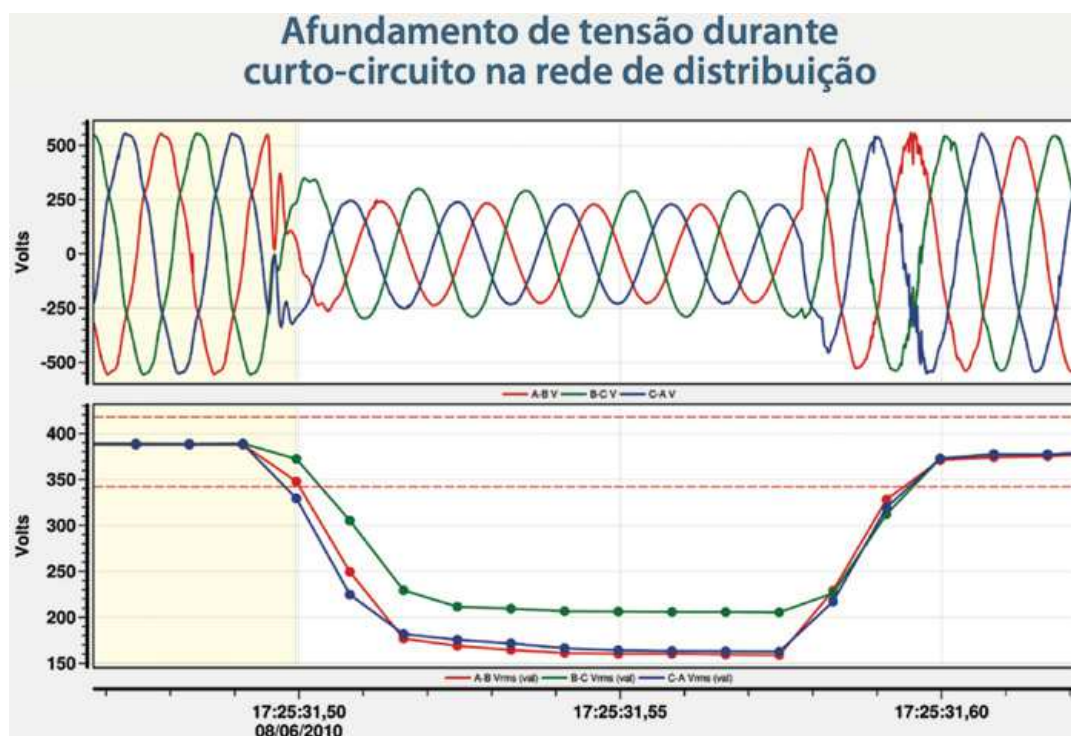


Figura 3.4- Afundamento de tensão devido a um curto-circuito [Service, 2015].

Os saltos de tensão ocorrem, por sua vez, quando um aumento da tensão eficaz para uma faixa entre 1,1 e 1,8 pu é identificado, podendo ser instantâneos, momentâneos ou temporários de acordo com seu tempo de duração. Geralmente ocorrem durante faltas, saída de grandes cargas ou energização de bancos de capacitores.

A figura 3.5 abaixo mostra salto de tensão causado por uma falta fase-terra.

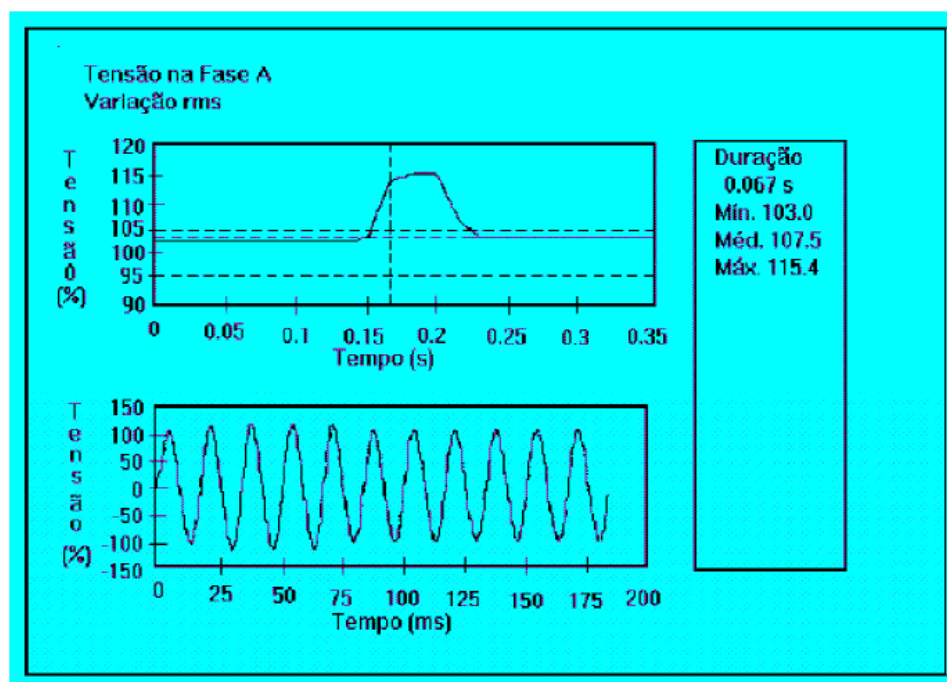


Figura 3.5- Salto de tensão devido a uma falta fase-terra [Alves, 2009].

3.2.3 Variações de tensão de longa duração

As variações de tensão de longa duração envolvem fenômenos de duração superior a um minuto e são geralmente causadas não por faltas no sistema, mas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema. Estas variações podem ser classificadas como sobretensões, sobtensões e interrupções sustentadas.

As sobretensões se caracterizam pelo aumento no valor da tensão eficaz do sistema por um período de tempo superior a um minuto, podendo ser causadas por chaveamentos de cargas, variações na compensação reativa do sistema ou mesmo ajuste incorretos em tensões de transformadores.

As sobtensões se caracterizam pela redução da tensão eficaz entre 0,8 e 0,9 pu, geralmente resultante da inserção de grandes blocos de carga no sistema ou pela saída de bancos de capacitores.

Já as interrupções sustentadas se caracterizam pelo decaimento a zero da tensão eficaz por um período de tempo superior a um minuto. Estas interrupções são geralmente permanentes

e requerem a intervenção humana para solução do problema e retomada do funcionamento do sistema.

3.2.4 Harmônicos

Harmônicos são correntes ou tensões senoidais de frequências múltiplas da frequência em que o sistema deveria operar. Os componentes harmônicos, combinados com a tensão e corrente fundamentais, produzem alterações na forma de onda. Estas distorções ocorrem devido à características não lineares de dispositivos e cargas do sistema elétrico. A distorção de tensão resulta em uma queda de tensão provocada pela passagem de corrente pela impedância do sistema [Alves, 2009]. Os harmônicos são fenômenos de regime permanente.

As figuras 3.6 e 3.7 abaixo representam respectivamente o fluxo de correntes harmônicas através da impedância do sistema e o efeito causado por ela na tensão do sistema.

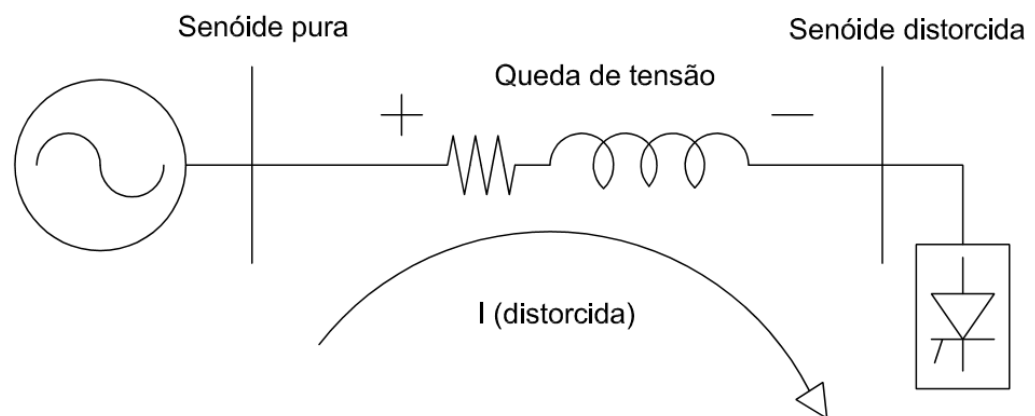


Figura 3.6 – Fluxo de correntes harmônicas através da impedância do sistema [Alves, 2009].

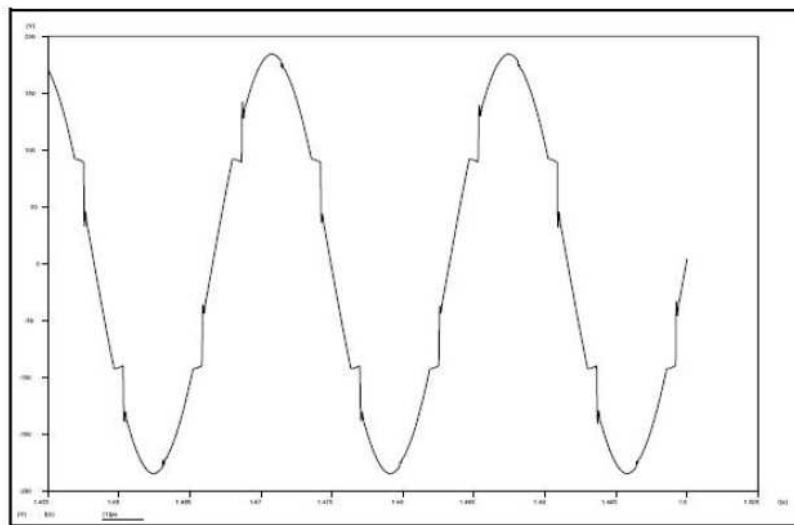


Figura 3.7 – Tensão de alimentação de um conversor CC-CA [Alves, 2009].

As principais fontes de distorção de onda de corrente são os dispositivos eletrônicos, pois fazem uso de componentes a base de semicondutores como diodos e transistores, que sendo não lineares levam a distorção das ondas de corrente e tensão em relação à senoide original. As ondas harmônicas podem ser decompostas em uma série de Fourier, onde a componente senoidal de mesma frequência da onda distorcida original é a componente fundamental e as demais são múltiplas inteiras desta.

A Distorção Harmônica Total (THD) definida pela fórmula
$$\left(\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_h^2}}{Y_1} \right)$$
 onde

Y é um vetor que representa um sinal distorcido, é um valor percentual que relaciona a quantidade de harmônicos e a intensidade da corrente fundamental para informar a influência das correntes harmônicas de uma carga não-linear. A THD influencia diretamente o fator de frequência conforme a equação
$$\left(\text{FP} = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}} \right)$$
, sendo FP o fator de potência e $\cos \varphi$ o

cosseno do ângulo entre tensão e corrente e a corrente de acordo com a equação
$$\left(I_{\text{total}} = I_{\text{fund.}} * \sqrt{1 + \text{THD}^2} \right)$$
, que demonstra a influência da THD sobre a corrente total já que ela multiplica a corrente fundamental.

Abaixo estão listadas as possíveis consequências que podem ser trazidas pela propagação de harmônicos na rede para os diversos equipamentos do sistema elétrico de potência (SEP), de acordo com [Alves, 2009].

Redes elétricas: Sobreaquecimento nos condutores aéreos, cabos isolados e equipamentos principais levando à perdas na expectativa de sua vida útil. Podem também induzir ruídos nas linhas de comunicação próximas e adjacentes

Máquinas rotativas: Sobreaquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre, afetando, principalmente, sua eficiência e o conjugado disponível. A presença de harmônicos no fluxo pode produzir alterações no acionamento, como componentes instantâneos de conjugado que atuam hora no mesmo sentido, hora no sentido oposto ao da fundamental. O efeito cumulativo do aumento das perdas diminui a vida útil da máquina e a sua eficiência.

Transformadores: Aumento das perdas no ferro pelos harmônicos de tensão e perdas no cobre pelos harmônicos de corrente, devido ao efeito pelicular, implicando numa redução da área efetivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente.

Cabos: Em razão do efeito pelicular, que restringe a seção condutora para componentes de frequência elevada, os cabos de alimentação tem um aumento de perdas devido às correntes harmônicas. Além disso, o chamado efeito de proximidade, corresponde a um aumento na resistência do condutor, em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados na vizinhança.

Aparelhos-medição: Aparelhos de medição e instrumentação em geral são afetados por harmônicos, especialmente se ocorrerem ressonâncias que afetam as grandezas medidas.

Capacitores: Nos capacitores o maior problema é a possibilidade de ocorrência de ressonância entre este equipamento e a impedância da rede (tipicamente indutiva), excitada pelos harmônicos, podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou tensão. As correntes de alta frequência encontrarão um caminho de menor impedância pelos capacitores, elevando assim suas perdas ôhmicas. O aumento no seu aquecimento encurta a vida útil do capacitor, podendo até mesmo destruí-lo. Além disto, as sobretensões de regime permanente, associadas às sobretensões resultantes da distorção harmônica, causam a diminuição da vida útil por ação do efeito corona, além de poder causar a queima instantânea do equipamento, por rompimento do isolamento.

Relés de proteção e elos fusíveis: Para os relés de proteção não é possível definir completamente suas respostas, devido à variedade de distorções possíveis e aos diferentes tipos de dispositivos existentes. Um aumento da corrente eficaz devido à distorção harmônica sempre provocará um maior aquecimento, ocasionando uma redução em sua vida útil e, eventualmente, sua operação inadequada.

Equipamentos eletrônicos e de informática: Alguns equipamentos podem ser muito sensíveis à distorção na forma de onda de tensão. Caso as distorções harmônicas sejam elevadas no seu circuito de alimentação, o seu funcionamento pode ser alterado, levando-os a ações indevidas nos sistemas de controle ou a erros e paradas em dispositivos microprocessados.

3.2.4.1 Mitigação de Harmônicos

Através do parâmetro de THD é possível determinar a quantidade de harmônicos na rede, e a partir desta os seguintes métodos podem ser aplicados para a resolução do problema, de acordo com [Alves, 2009].

Aumento da potência de curto circuito no ponto de instalação da carga poluidora ou no ponto de acoplamento comum;

Aumento do número de pulsos dos conversores (cargas de maior porte);

Alteração da frequência f_h de ressonância para outro valor não presente na rede;

Instalação de filtros passivos.

Para o caso proposto neste trabalho a ação mais indicada é a instalação de filtros passivos, que são constituídos de indutores e capacitores e de fácil construção e cujo custo é geralmente baixo, dependendo no entanto dos valores de corrente total prevista e isolamento.

Os filtros podem ser do tipo série ou shunt, sendo os filtros shunt os mais utilizados por fornecerem reativo à rede além de filtrarem harmônicos.

O fator de qualidade (q) do filtro é a relação entre sua reatância na frequência de ressonância e a sua resistência, e determina a banda passante do filtro, de acordo com a equação ($q = X_L / R$), onde X_L é a reatância indutiva do filtro na frequência de ressonância (f_h), em ohms e R é a resistência do filtro em ohms.

Os filtros sintonizados shunt são projetados com fator de qualidade (q) tipicamente na faixa de 30 a 60, o que determina a seletividade e, portanto, a banda passante do filtro. O valor da resistência deve ser baixo o suficiente para resultar em baixas perdas, e alto o suficiente para não tornar o filtro seletivo demais. Para um dimensionamento preliminar, pode-se desprezar a resistência no cálculo do filtro. A influência da resistência na frequência de sintonia do filtro é desprezível.

A figura 3.8 a seguir mostra o esquema de instalação de um filtro passivo shunt, instalado entre o transformador e a carga.

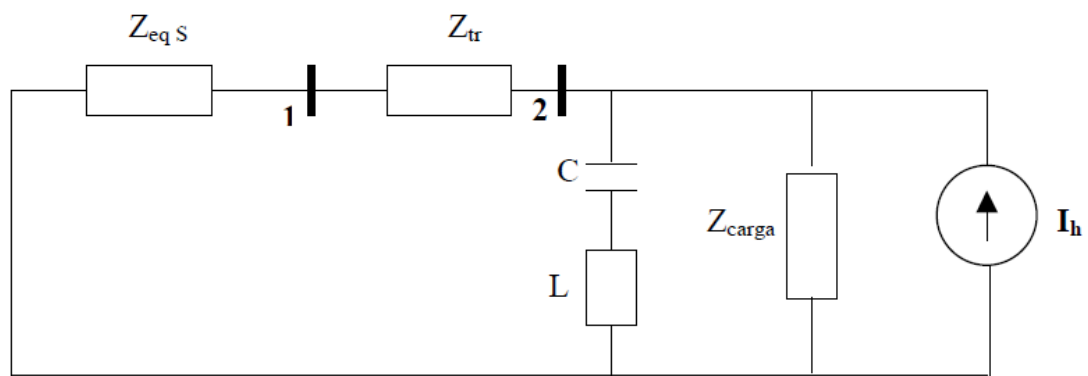


Figura 3.8 – Filtro shunt instalado [Alves, 2009].

No capítulo seguinte serão apresentados dados referentes a um aerogerador a partir dos quais será tecido um estudo com base nos conceitos apresentados neste capítulo, indicando os possíveis problemas que este apresenta no que tange a qualidade de energia elétrica e apresentando concomitantemente as possíveis soluções para estes problemas. Sendo assim, o assunto qualidade de energia elétrica será retomado no capítulo 4 desta dissertação.

4 Estudo de Caso – Aerogerador

4.1 Considerações Preliminares

Neste capítulo é apresentado um exemplo de um aerogerador residencial disponível para compra no mercado e que pode ser utilizado tanto para suprir uma demanda residencial de energia elétrica em paralelo com a energia fornecida para a rede ou fornecer a energia gerada diretamente para a rede, que é a situação alvo desta dissertação e portanto a aplicação para a qual esta análise foi feita.

4.2 Determinação do caso de estudo prático

O modelo escolhido para o desenvolvimento deste trabalho foi o aerogerador Air 40. Este aerogerador foi projetado para operar sob condições de vento fraco e não necessita de manutenção. Suas especificações estão listadas abaixo de acordo com [Energia pura, 2015].

Diâmetro do rotor: 1.17m

Peso: 5.9 kg

Vento para início de geração: 2.68m/s

Potência nominal: 160 watts a 12.5 m/s (300 W pico)

Tensão nominal: 12 V e 24 V (selecionado de fábrica)

Controlador da turbina: Microprocessador regulador interno inteligente

Corpo: Alumínio reforçado de altíssima qualidade

Hélices: Plástico

Proteção de sobrecarga: Controle eletrônico de torque

Kilowatt Hora por Mês: 40 kWh/mês a 5.8 m/s

Vento limite: 49.2 m/s (177 km/h)

Outras informações a respeito deste produto podem ser obtidas através de seu catálogo, o qual se encontra no anexo deste trabalho.

As figuras 4.1 e 4.2 a seguir mostram o aerogerador e sua curva de geração mensal de energia elétrica, respectivamente.



Figura 4.1 – Aerogerador Air 40 [Energia pura, 2015].

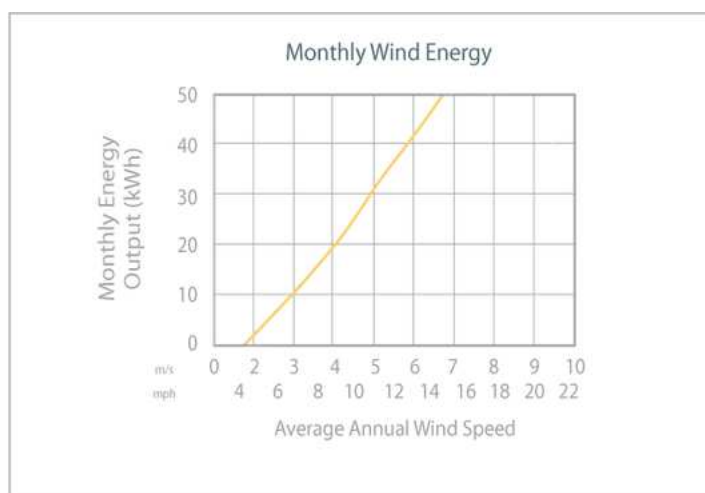


Figura 4.2 – Energia mensal gerada [Energia pura, 2015].

Este gerador possui um motor de corrente contínua acoplado à sua hélice, cuja energia gerada deve ser conectada a um inversor de frequência para o fornecimento de tensão alternada a 60 Hz para a rede de distribuição. O site sugere o uso de bancos de bateria para a alimentação do inversor quando o sistema é aplicado ao consumo residencial direto, mas para o fornecimento para a rede é possível obter um resultado satisfatório através do uso de capacitores para manter a tensão sobre o inversor a um valor constante de 12 V ou 24 V.

Aliado ao conjunto hélice-gerador, este também conta com um regulador de velocidade, que faz com que a rotação no eixo do gerador seja a mais constante possível, tentando sempre manter a sua velocidade nominal e também evitando que ventos muito fortes danifiquem o aparelho.

Em suma, a geração a partir deste aparelho é satisfatória ainda que de baixa potência, mas sua instalação conectado à rede de distribuição demanda um projeto cauteloso de forma fornecer uma energia de qualidade.

A seguir são apontados os pontos críticos para este projeto baseados nas informações elucidadas no capítulo 3 desta dissertação e levando em conta as informações disponíveis sobre os equipamentos necessários para a construção do mesmo, sendo eles o para-raio Franklin, o inversor de frequência atrelado a um capacitor ou banco de baterias e o disjuntor para proteção contra curto-circuitos.

4.2.1 Proteção contra descargas atmosféricas

Na maioria das situações o aerogerador é instalado a uma altura superior à das demais construções pertencentes ao seu local de instalação, como casas galpões etc. Isto faz com que este se poste como uma massa metálica susceptível à incidência de descargas atmosféricas e portanto faz-se necessária a instalação de uma proteção contra descargas atmosféricas.

Os três métodos de proteção mais utilizados são a gaiola de faraday, que consiste em dividir o mais vezes possível a corrente resultante de uma descarga atmosférica por meio de uma rede de condutores, o uso de para-raio Franklin, que consiste na instalação de um para-raio acima da estrutura a ser protegida respeitando as distâncias recomendadas de acordo com o ângulo de proteção do mesmo; e o modelo eletrogeométrico, onde uma esfera é projetada sobre a superfície que se deseja proteger e um captor é instalado em cada local onde a esfera toca a

superfície. Considerando-se a posição e tamanho do gerador que se deseja proteger, o método mais indicado é sem dúvidas o para-raio Franklin.

O primeiro passo neste projeto é definir o nível de proteção necessário de acordo com a norma NBR 5419/2015, que será R2 – risco de perda de instalação de serviço ao público.

A figura 4.3 a seguir mostra o ângulo de proteção correspondente à classe de SPDA de acordo com a norma NBR 5419/2015.

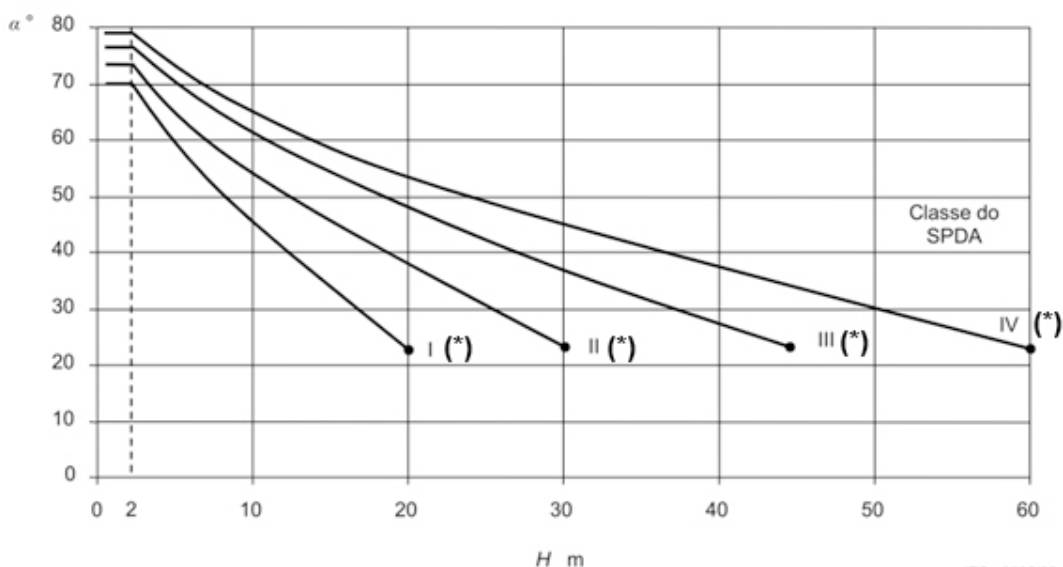


Figura 4.3 – Ângulo de proteção correspondente à classe de SPDA [Tel, 2015a].

Supondo que o aerogerador foi instalado a uma altura acima da maior construção pertencente ao terreno onde este foi instalado, a partir da figura acima é possível concluir que o ângulo de proteção correspondente para o para-raio se instalado 2 metros acima do mesmo será de 74°, projetando uma área de proteção com raio de 1,92 m que é mais que suficiente para proteger o gerador, cujo maior comprimento é de 1,17 m.

A figura 4.4 abaixo mostra um captor tipo Franklin para uma descida.



Figura 4.4 – Para-raio Franklin [Tel, 2015b].

O para-raio deve ser instalado em uma haste metálica paralela à estrutura do gerador e utilizada como descida, que por sua vez deverá ser ligada à uma haste de cobre de 2 metros cravada no solo. Desta forma o aerogerador estará protegido contra descargas atmosféricas.

Como proteção adicional contra surtos advindos tanto do gerador quanto da rede, deve ser instalado um dispositivo de proteção contra surtos (DPS). O VCL Slim Classe II da Clamper atende bem a esta especificação, com capacidade de dreno de corrente de até 90 kA [Clamper, 2015].

A possibilidade de ocorrência de transitórios na rede de distribuição a partir do aerogerador é consideravelmente reduzida tomadas as providências acima, evitando assim os problemas citados no capítulo 3 a respeito deste fenômeno.

A figura 4.5 mostra o dispositivo de proteção contra surtos.



Figura 4.5 – Dispositivo de proteção contra surtos [Clamper, 2015].

4.2.2 Inversor de frequência

O aerogerador estudado gera energia elétrica em corrente contínua, necessitando portanto de um inversor de frequência para converter esta energia em corrente alternada na frequência de 60 Hz. Como a geração eólica não é constante, é salutar instalar um capacitor na entrada do inversor de frequência para manter a tensão no valor nominal de 12 ou 24 V por um tempo maior.

O tipo de inversor que deverá ser utilizado tanto para o aerogerador quanto para outros métodos de geração distribuída como a solar fotovoltaica é o inversor Grid Tie, que transforma corrente contínua em alternada. Este tipo de inversor é desenvolvido especificamente para o propósito de conectar uma fonte geradora residencial à rede de distribuição e possui um custo acessível. Para o caso em questão o inversor deve ser de pelo menos 300 W, que é a potência de pico do gerador.

A figura 4.6 abaixo mostra um inversor de frequência Grid Tie.



Figura 4.5 – Inversor de frequência Grid Tie [Dicas, 2015].

O inversor de frequência é porem uma fonte de harmônicos. Claro que ao considerarmos apenas um pequeno conjunto gerador a impressão é que os harmônicos gerados não trariam danos para a rede de distribuição, mas a geração distribuída está se popularizando e dentro de alguns anos isso pode vir a ser problemático, já que várias casas em uma vizinhança podem vir a injetar harmônicos na rede, além de que a diminuição gradativa do custo de instalação de sistemas eólicos e solares pode levar a instalações de potência cada vez maior e consequentemente o uso de inversores cada vez maiores.

No entanto, o desenvolvimento de um filtro passivo requer um conhecimento prévio acerca dos parâmetros da rede de distribuição, para determinar um valor aproximado de potência reativa consumido pela carga. Como dito anteriormente a geração de apenas um aerogerador ou placa solar fotovoltaica não fornece à rede uma quantidade substancial de harmônicos mas mesmo assim é recomendável um estudo nesta direção para evitar danos à rede de distribuição na ocasião de crescimento demasiado deste tipo de geração.

Para fins didáticos e considerando a potência de geração nominal de 160 W e um fator de potência de 0.97, teremos uma potência reativa de 40 Var, para a qual o seguinte filtro pode ser projetado.

$$\left(\frac{1}{2\pi f C} = \frac{V^2}{Q} \right) \Rightarrow \left(\frac{1}{2\pi f C} = \frac{220^2}{40} \right) \Rightarrow (C = 2,2 \mu F)$$

Onde C é a capacitância a ser instalada, f é a frequência fundamental de 60 Hz, V é a tensão nominal e Q a potência reativa.

Considerando que o filtro atuará no terceiro harmônico teremos $f_3 = 180$ Hz.

$$\left(w_3 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right) \Rightarrow \left(2\pi * 180 = \frac{1}{\sqrt{L * 2,2 \times 10^{-6}}} \right) \Rightarrow (L = 390mH)$$

Onde w_3 é a frequência angular do terceiro harmônico, L é a indutância que se deseja calcular e C a capacitância instalada.

Os inversores Grid Tie se colocam como prontos para conexão à rede, podendo assim já ter incorporados em seus circuitos filtros que mitiguem os harmônicos quando na sua conexão com a rede, embora estes dados não tenham sido encontrados em seus manuais. De qualquer forma a filtragem de harmônicos é um fator importante para a instalação da geração distribuída no que tange a qualidade de energia

4.2.3 Proteção Contra Falhas

Como visto no capítulo 3 as falhas são fator determinante no aparecimento de afundamentos de tensão, saltos de tensão entre outros problemas que afetam diretamente a qualidade de energia elétrica. Visando evitar que estes problemas ocorram, é essencial a instalação de dispositivos de proteção contra falhas em qualquer instalação de geração distribuída.

Os catálogos de inversores de frequência Grid Tie geralmente informam sobre a presença de proteção contra falhas e contra sobrecarga já incorporados nos mesmos, como visto em [Energy, 2015], mas não deve-se assumir que o inversor adquirido para determinado projeto já possui proteção ou que esta proteção esteja corretamente dimensionada para uma aplicação específica.

O primeiro passo é definir quais elementos se fazem necessários proteger na instalação de geração distribuída, sendo no caso do aerogerador o seu conjunto gerador e o inversor de frequência. Caso seja utilizado um banco de baterias o mesmo também deve possuir uma proteção específica.

A proteção deve ser dimensionada de forma seletiva, sendo o primeiro dispositivo destinado a proteger o conjunto gerador contra curto-circuitos, seguido pela proteção do

inversor de frequência e por último a proteção geral e contra falhas advindas da rede de distribuição.

Para esta aplicação são utilizados disjuntores de proteção obedecendo a curva de seletividade, que evita que um curto no aerogerador por exemplo desligue o disjuntor geral e por consequência interrompa todo o sistema. Para apenas um gerador isso não seria um problema já que a geração seria interrompida de toda forma, mas se colocados mais geradores ou placas solares evidencia-se um problema grave de desperdício de energia gerada.

Utilizando-se a potência nominal de 160 W do gerador a considerando a tensão de 24 Vcc, temos uma corrente nominal de 6,67 A. O gerador já possui proteção própria contra sobrecarga, necessitando apenas de um disjuntor bipolar para proteção contra faltas, sendo para tanto indicado um disjuntor monopolar para corrente contínua, como por exemplo o C60H-DC da [Schneider, 2015], cuja corrente nominal é de 10 A e suporta uma corrente de curto de até 20000 A.

A figura 4.6 abaixo mostra o disjuntor monopolar em questão.



Figura 4.6 – Disjuntor monopolar para corrente contínua [Schneider, 2015].

Já o inversor de frequência possui uma potência de 300 W e tensão de saída de 220 V, imprimindo uma corrente de 1,36 A para a qual um disjuntor bipolar de 2 A para corrente alternada seria suficiente para a proteção do inversor.

Outra alternativa interessante é o uso de um disjuntor motor para a proteção do inversor ou mesmo para a proteção geral devido ao seu nível elevado de corrente de curto circuito suportada e de seu ajuste fino. O disjuntor motor pode ser facilmente ajustado para a corrente nominal que circula no circuito e assim garantir uma proteção mais efetiva contra sobrecargas, mas este tipo de disjuntor possui um custo demasiadamente elevado, o que torna sua aplicação neste caso um exagero.

Por fim basta dimensionar a proteção geral para uma corrente acima da corrente para a qual o disjuntor do inversor foi dimensionada, podendo este ser um disjuntor de corrente nominal de 6 A, também bipolar.

A figura 4.7 a seguir mostra um disjuntor bipolar da Schneider para 2 A, modelo C60N.



Figura 4.6 – Disjuntor bipolar C60N [Schneider, 2015].

A figura 4.7 a seguir mostra um disjuntor motor modelo GV2 fabricado pela Schneider.



Figura 4.7 – Disjuntor motor GV2 [Schneider, 2015].

Vale salientar que caso um disjuntor motor seja escolhido para esta aplicação, como em sua construção este é sempre no mínimo tripolar, no ato da instalação um dos cabos deve alimentar dois dos três polos do disjuntor para que os três permaneçam aquecidos durante todo o tempo de operação, evitando assim falhas no momento de uma falha no sistema.

5 Conclusões e Propostas de Continuidade

A resolução da ANEEL citada neste trabalho abriu o caminho para a disseminação da geração distribuída no Brasil, sendo que a partir da pesquisa sobre os diferentes métodos de geração desenvolvida neste trabalho foi possível ter uma boa noção sobre as principais maneiras de se produzir energia elétrica em residências, instalações comerciais e propriedades rurais e fornecê-las para a rede de distribuição.

O estudo sobre qualidade de energia elétrica realizado neste trabalho trouxe informações importantes sobre os possíveis impactos que esta geração pode causar na rede de distribuição, os quais podem vir a ser significativos à medida que a geração distribuída for se popularizando, oferecendo assim um risco à estabilidade de tensão e mesmo à integridade dos equipamentos do SEP.

Através de um estudo de caso desenvolvido a partir de um pequeno gerador eólico, foi possível traçar os principais focos de risco para a qualidade de energia elétrica e propor soluções que ajudem a mitigar possíveis danos causados por este à rede de energia elétrica, através da realização de um projeto de instalação elétrica que englobe proteção contra descargas atmosféricas e surtos, harmônicos e faltas.

Através deste trabalho pode-se concluir que a geração distribuída deve ser acompanhada de uma preocupação em torno da qualidade de energia produzida para que, além de salvaguardar a integridade da rede de distribuição, seja possível aproveitar ao máximo a capacidade de geração instalada.

É possível realizar com mais afinco uma análise da rede de distribuição após a instalação de sistemas de geração distribuída, com o intuito de verificar a eficácia das medidas propostas e comparar sistemas com e sem dispositivos de proteção, além de quantificar os danos causados por instalações existentes hoje no SEP.

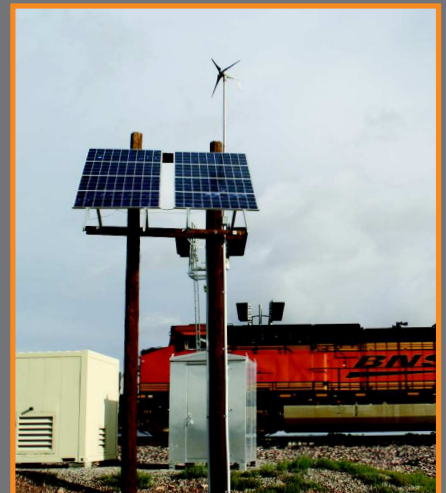
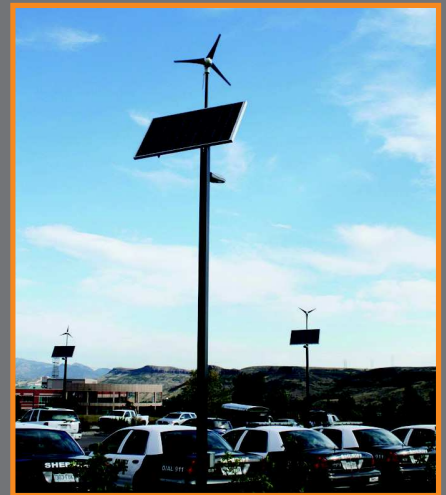
Referências Bibliográficas

- [ANEEL, 2012a] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “**Resolução normativa N° 482/2012**”, Diretoria Geral, Brasília, Brasil, 2012.
- [ANEEL, 2012b] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “**Resolução normativa N° 517/2012**”, Diretoria Geral, Brasília, Brasil, 2012.
- [ANEEL, 2003] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “**Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas**”, Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração - SCG, Brasília, Brasil, 2003.
- [Alterima, 2015] Alterima, “**Micro Usina**”, disponível em: <http://www.alterima.com.br/index.asp?InCdSecao=26> Acesso em: Outubro de 2015.
- [Eli, 2014] Marcio Eli M.S., “**Inserção da Microgeração Distribuída nas Redes de Baixa Tensão: Implantação de Telhados Solares – Estudo de Caso Real**”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2014.
- [Rüther, 2004] Ricardo Rüther, “**Edifícios Solares Fotovoltaicos**”, Florianópolis, Brasil, 2004.
- [Andrade, 2015] Leonardo J. Andrade, “**Energia Solar – Energia Fotovoltaica**”, disponível em: <https://lrandrade.wordpress.com/tag/fotovoltaico/> Acesso em: Outubro de 2015.
- [Solar, 2015] Solar, “**Escolhendo o Pannel Fotovoltaico – 10 Coisas Para Saber**”, disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/escolhendo-o-pannel-fotovoltaico--10-coisas-para-saber.html> Acesso em: Outubro de 2015.
- [Colletta, 2015] Denise D. Colletta, “**Brasil Faz Placa Solar Mais Eficiente a Custos Menores**”, disponível em: <http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EM116820-17770,00-BRASIL+FAZ+PLACA+SOLAR+MAIS+EFICIENTE+A+CUSTOS+MENORES.html> Acesso em: Outubro de 2015.
- [Sede, 2015] Secretaria de Desenvolvimento Econômico, “**Mineirão é o Primeiro Estádio Com Energia Solar da Copa do Mundo**”, disponível em: <http://sede.mg.gov.br/pt/politica-de-privacidade/story/1889-mineirao-e-o-primeiro-estadio-com-energia-solar-da-copa-do-mundo> Acesso em: Outubro de 2015
- [Heliotérmica, 2015] Energia Heliotérmica, “**Energia Heliotérmica – Como Funciona?**”, disponível em: <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/como-funciona> Acesso em: Outubro de 2015.
- [CEFET, 2015] CEFET-MG, “**Projeto de Usina Heliotérmica**”, Belo Horizonte, Brasil, 2015.
- [De Bona, 2004] Felipe S. de Bona, “**As Microturbinas e a Geração Distribuída**”, Artigo desenvolvido na UNICAMP, Campinas, Brasil, 2004.
- [Junior, 2006] Ivoni C. A. Junior, “**Análise do Desempenho de um Aerogerador de Pequeno Porte**”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande, Brasil, 2006.
- [Rossi, 2015] Pedro H. J. Rossi, “**Perguntas Frequentes Sobre Energia Eólica**”, disponível em: <http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=9> Acesso em: Novembro de 2015.
-

- [Eólica, 2015] Evolução E. Eólica, **“Aerogerador de Eixo Horizontal”**, disponível em: <https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/aerogerador-de-eixo-horizontal/custo-comparativo/> Acesso em: Novembro de 2015.
- [Portal, 2015] Portal Energia, **“Como Construir um Aerogerador Doméstico de 1000 W”**, disponível em: <http://www.portal-energia.com/aerogerador-de-1000w/> Acesso em: Novembro de 2015.
- [Alves, 2009] Mário F. Alves, **“Tópicos Avançados em Engenharia Elétrica”**, Belo Horizonte, Brasil, 2009.
- [Service, 2015] Electric Service, **“Afundamento de Tensão Durante Curto-circuito na Rede de Distribuição”**, disponível em: <http://www.electricservice.com.br/images/afundamento.jpg> Acesso em: Novembro de 2015.
- [Energia pura, 2015] Energia Pura, **“Aerogerador Air 40”**, disponível em: <https://www.energiapura.com/content/aerogerador-air-40> Acesso em: Novembro de 2015.
- [Tel, 2015a] Termelétrica, **“Tabela Franklin”**, disponível em: <http://www.tel.com.br/wp-content/uploads/2011/03/Tabela-Franklin3.jpg> Acesso em: Novembro de 2015.
- [Clamper, 2015] Clamper, **“VCL SLIM Classe II”**, disponível em: http://www.clamper.com.br/upload/produtos/250520151058167481_vcl_slim_classe_ii.pdf Acesso em: Dezembro de 2015.
- [Dicas, 2015] Dicas Verdes, **“O que é um Inversor Grid Tie”**, disponível em: <http://www.dicasverdes.com/2013/03/o-que-e-um-inversor-grid-tie/> Acesso em: Dezembro de 2015.
- [Energy, 2015] Solar Energy, **“Manual do Usuário – Inversor Solar”**, disponível em: <http://solarenergy.com.br/wp-content/uploads/2014/12/manual-do-inversor.pdf> Acesso em: Dezembro de 2015.
- [Schneider, 2015] Schneider Electric, **“Catálogo de disjuntores”**, disponível em: <http://www.schneider-electric.com/ww/en/> Acesso em: Dezembro de 2015.
- [Engiobra, 2015] Engiobra, **“Microusinas Hidrelétricas”**, disponível em: <http://engiobra.com/wp-content/uploads/2013/06/microusinashidreletricas.jpg> Acesso em: Dezembro de 2015.
- [Central Elétrica, 2015] Central Elétrica, **“Painéis fotovoltaicos”**, disponível em: <http://files.rd9centraleletrica.webnode.pt/200000021d06edd0ebc/Paineis%20Fotovoltaicos.png> Acesso em: Dezembro de 2015.
- [Backwood, 2015] Backwood Solar, **“Primus air 40 air turbine”**, disponível em: <http://www.backwoodssolar.com/primus-air-40-wind-turbine> Acesso em: Dezembro de 2015.

aiR™ COMPLETES ANY OFF GRID SYSTEM

- ✓ SIMPLE, AFFORDABLE, RELIABLE POWER
- ✓ EASILY INTEGRATES WITH PV
- ✓ MAXIMUM POWER IN WINTER
- ✓ NIGHT TIME POWER PRODUCTION
- ✓ OVER 150,000 UNITS INSTALLED SINCE 1995



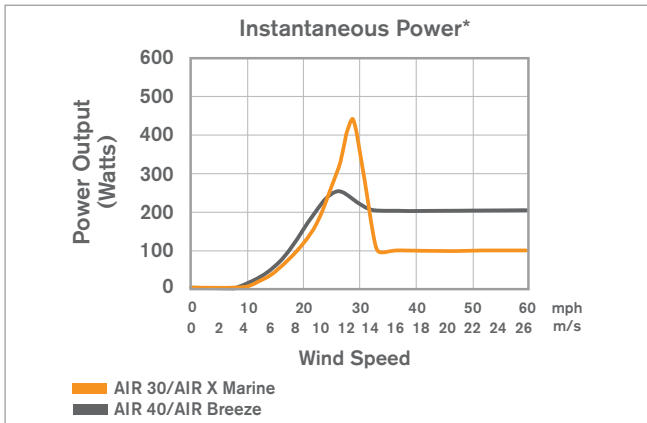
primuswindpower

MANUFACTURED IN COLORADO, USA
www.primuswindpower.com

TURBINE SPECIFICATIONS

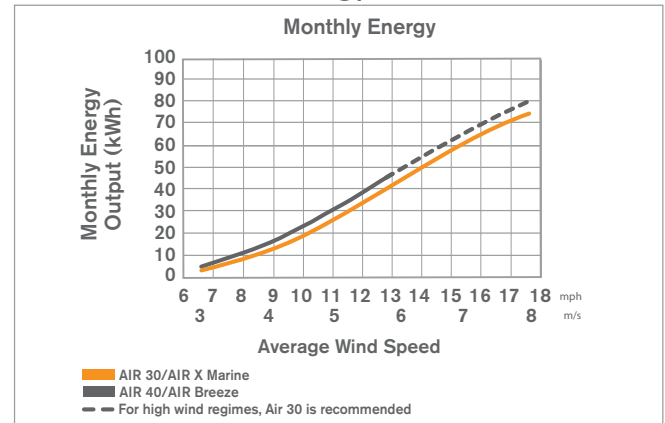


AIR Power Curve



*Factors affecting turbine output include site turbulence, elevation and air temperature

AIR Energy Curve



Technical Specifications

AIR BREEZE/AIR 40/AIR 30/AIR X MARINE	
Energy	AIR 40/AIR Breeze: Approx. 40 kWh/mo at 5.5 m/s (12 mph) AIR 30/AIR X Marine: Approx. 30 kWh/mo at 5.5 m/s (12 mph)
Optimal Operating Environment	AIR 40/AIR Breeze: Quiet operation in low to moderate wind regimes AIR 30/AIR X Marine: Industrial applications in moderate to high wind regimes
Swept Area	1.07 m ² (11.5 ft ²)
Rotor Diameter	1.17 m (46 in)
Weight	5.9 kg (13 lb)
Shipping Dimensions	686 x 318 x 229 mm (27 x 12.5 x 9 in) 7.7 kg (17 lb)
Startup Wind Speed	AIR 40/AIR Breeze: 3.13 m/s (7 mph) AIR 30/AIR X Marine: 3.58 m/s (8 mph)
Voltage	12, 24 and 48 VDC
Turbine Controller	Mircoprocessor-based smart controller
Body	Cast aluminum (AIR Beeze/AIR X Marine: corrosion resistant paint)
Blades	(3) Injection-molded composite
Alternator	Permanent magnet brushless
Overspeed Protection	Electronic torque control
Survival Wind Speed	49.2 m/s (110 mph)
Mount	1.5 in schedule 40 pipe 48 mm (1.9 in) outer diameter
Warranty	5 year limited warranty
Certifications	CE, RoHS (AIR 30/AIR 40 only)

Applications	AIR 30 AIR X Marine	AIR 40 AIR Breeze
REMOTE HOMES		✓
MARINE AND SAILBOATS		✓
RECREATIONAL VEHICLES		✓
RAILROAD	✓	
TELECOMM	✓	
OIL AND GAS	✓	
SCADA SYSTEMS	✓	
LIGHTING SYSTEMS		✓
CATHODIC PROTECTION	✓	
COASTAL APPLICATIONS	✓	

Towers and Accessories
29' EZ TOWER KIT (PIPE INCLUDED)
27' GUYED TOWER KIT (PIPE NOT INCLUDED)
45' GUYED TOWER KIT (PIPE NOT INCLUDED)
30' MONOPOLE TOWER
36" AND 48" GALVANIZED AUGERS
9' MARINE TOWER KIT
MARINE TOWER HARDWARE KIT