

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA**

VALDINEI SALVADOR MARTINS DE ARAÚJO

**ANÁLISE COM AUXÍLIO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL DA
GERAÇÃO DE HARMÔNICOS PROVOCADOS POR UM
AEROGERADOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

VALDINEI SALVADOR MARTINS DE ARAÚJO

**ANÁLISE COM AUXÍLIO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL DA
GERAÇÃO DE HARMÔNICOS PROVOCADOS POR UM
AEROGERADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Eloi Rufato Junior

CURITIBA

2016

Valdinei Salvador Martins de Araújo

Análise com auxílio de programa computacional da geração de harmônicos provocados por um aerogerador

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 26 de agosto de 2016.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Eloi Rufato Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Eloi Rufato Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gilberto Manoel Alves, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

Dedico este trabalho aos meus pais
Joaquim (in memoriam) e Pêdra, e à
minha irmã Valdeci (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças, saúde e sabedoria no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus familiares pela compreensão nos momentos de minha ausência.

A Ana meu amor pelas várias palavras de incentivos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eloi Rufato Junior, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus amigos e colegas de sala que de alguma forma me ajudaram na realização de pesquisas.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

Eu não posso mudar a direção do vento,
mas eu posso ajustar as minhas velas
para sempre alcançar o meu destino.
(DEAN, Jimmy Ray)

RESUMO

ARAÚJO, Valdinei S. M. **Análise com auxílio de programa computacional da geração de harmônicos provocados por um aerogerador**. 2016. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a geração de energia elétrica proveniente da geração eólica. O estudo teve enfoque na geração de harmônicos provocados pelos sistemas de controle de frequência dos aerogeradores. Para tanto, foi necessário um estudo preliminar sobre a situação atual da geração de energia por fonte eólica no Brasil e os processos de transformação de energia envolvidos no funcionamento de um aerogerador, também foi necessário à simulação de um aerogerador alimentando cargas puramente resistivas. As simulações foram desenvolvidas com o programa ATP (Alternative Transients Program) no domínio do tempo. No programa ATP foram modelados os principais componentes do aerogerador e a carga. Os valores das correntes de frequências harmônicas utilizadas nas simulações foram obtidos junto a um fabricante de aerogerador nacional. Assim, através dos resultados encontrados foi possível obter a DHT_v (Distorção Harmônica Total de tensão) e a DHT_i (Distorção Harmônica Total de Corrente) e com isso determinar se o modelo de aerogerador analisado neste trabalho atende à norma NBR IEC 61400-21, norma nacional que avalia a qualidade da energia de aerogeradores.

Palavras-chave: Aerogerador. Geração Eólica. Harmônicos. Programa ATP.

ABSTRACT

ARAÚJO, Valdinei S. M. **Analysis using the computer program generating harmonics caused by a wind turbine**. 2016. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Federal Technology University - Parana. Curitiba, 2016.

This paper presents a study on the generation of electricity from wind generation. The study had focused on the generation of harmonics caused by frequency control systems of wind turbines. To this end, it was necessary a preliminary study on the current situation of power generation by wind source in Brazil and energy transformation processes involved in the operation of a wind turbine, was also necessary for the simulation of a wind turbine feeding purely resistive loads. The simulations were developed with the ATP program (Alternative Transients Program) in the time domain. The ATP program were modeled the main components and the load. The values of the harmonic frequency currents used in the simulations were obtained from the national wind turbine maker. Thus, through the results found get the DHTv (Total harmonic distortion of voltage) and DHTi (Total harmonic distortion) and determine if the wind turbine model analyzed in this work meets the standard NBR IEC 61400-21, national standard that evaluates the quality of the energy of wind turbines.

Keywords: Wind Turbine. Wind Generation. Harmonics. Software ATP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira.....	15
Figura 2 – Mapa do Potencial Eólico Brasileiro	19
Figura 3 – Distribuição Geral dos Ventos pelo Mundo	23
Figura 4 – Velocidade do Vento e Distribuição dos Parques Eólicos em Operação no Brasil	27
Figura 5 – Esquema de Funcionamento de um Aerogerador.....	31
Figura 6 – Aerogerador de <i>Darrieus</i>	33
Figura 7 – Aerogerador de <i>Savonius</i>	34
Figura 8 – Aerogeradores com Rotor de Eixo Horizontal	35
Figura 9 – Componentes de um Aerogerador	36
Figura 10 – Esquema de Funcionamento de um Gerador Elementar	39
Figura 11 – Visão em Corte de um Gerador de Pólos Lisos	40
Figura 12 – Visão em Corte de um Gerador Bipolar de Pólos Salientes	41
Figura 13 – Aerogerador com GSRB	44
Figura 14 – Aerogerador com GIGE.....	45
Figura 15 – Aerogerador com GIDA.....	46
Figura 16 – Formas de Ondas Típicas para Diversas Composições Harmônicas	48
Figura 17 – Componentes de um Conversor de Frequência.....	50
Figura 18 – Principais Tipos e Formas de Conexão de Turbinas Eólicas.	52
Figura 19 – Conexão Estrela-Estrela Equilibrada.....	61
Figura 20 – Configuração da Simulação do ATP.	64
Figura 21 – Fonte de Tensão AC que Representa um Gerador Trifásico.	65
Figura 22 – Fonte de Corrente AC que Representa a Injeção de Corrente Harmônica de Ordem $h=2$	66
Figura 23 – Carga Trifásica.....	69
Figura 24 – Sistema que Representa o Aerogerador Alimentando uma Carga.....	70
Figura 25 – Medidor de Corrente (A) e Medidor de Tensão (B).	70
Figura 26 – Aerogerador Individual sem Injeção de Correntes de Frequência Harmônicas.	71
Figura 27 – Injeções de Correntes de Frequências Harmônicas na Carga por um Aerogerador Individual.	74
Figura 28 – Aerogerador Individual Completo com as Injeções de Correntes Harmônicas.	77
Gráfico 1 – Formas de ondas das tensões trifásicas sem harmônicos de um aerogerador individual.....	72
Gráfico 2 – Formas de ondas das correntes drenadas pela carga de um aerogerador individual sem harmônicos.	73
Gráfico 3 – Sobreposição das formas de ondas das tensões e das correntes usando um aerogerador individual sem harmônicos.....	73

Gráfico 4 – Formas de ondas das tensões de frequências harmônicas na carga utilizado um aerogerador individual.....	75
Gráfico 5 – Formas de ondas das correntes de frequências harmônicas na carga utilizando um aerogerador individual.....	76
Gráfico 6 – Formas de ondas das tensões entreguem pelo aerogerador individual à carga.....	78
Gráfico 7 – Formas de ondas das correntes entreguem pelo aerogerador individual à carga.....	79
Gráfico 8 – Sobreposição das formas de ondas das tensões com e sem a presença de harmônicos usando um aerogerador individual.....	80
Gráfico 9 – Sobreposição das formas de ondas das correntes com e sem a presença de harmônicos usando um aerogerador individual.....	81
Gráfico 10 – Níveis de tensões por ordem utilizando um aerogerador individual.....	84
Gráfico 11 – Níveis de correntes por ordem utilizando um aerogerador individual. ..	87
Gráfico 12 – Sobreposição das formas de ondas das tensões com e sem a presença de harmônicos utilizando 5 aerogeradores em paralelo.....	88
Gráfico 13 – Níveis de tensões por ordem utilizando 5 aerogerador.....	91
Gráfico 14 – Sobreposição das formas de ondas das correntes com e sem a presença de harmônicos utilizando 5 aerogeradores em paralelo.....	92
Gráfico 15 – Níveis de correntes por ordem utilizando 5 aerogeradores.....	95
Gráfico 16 – Sobreposição das formas de ondas das tensões de 5 aerogeradores com o ângulo das correntes harmônicas iguais e diferentes.....	98
Gráfico 18 – Sobreposição das formas de ondas das correntes de 5 aerogeradores com o ângulo das correntes harmônicas iguais e diferentes.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução da Geração Eólica	16
Tabela 2 – Valores de Referência Globais das Distorções Harmônicas Totais (em Porcentagem da Tensão Fundamental)	54
Tabela 3 – Níveis de Referência para Distorções Individuais de Tensão (em Porcentagem da Tensão Fundamental)	55
Tabela 4 – Limites Globais Inferiores de Tensão em Porcetagem da Tensão Fundamental	56
Tabela 5 – Limites Individuais em Porcetagem da Tensão Fundamental	57
Tabela 6 – Limites de Distorção Individual e Total de Tensão.	58
Tabela 7 – Limites em % da Distorção Harmônica de Corrente para Tensão entre 120 V e 69 kV.....	58
Tabela 8 – Distorção Harmônica de Corrente Injetadas pelo Aerogerador.....	59
Tabela 9 – Valores de Corrente e de Frequência das Fontes de Correntes de Frequências.....	66
Tabela 10 – Tensões de Frequências Harmônica na Carga Utilizando um Aerogerador Individual.	81
Tabela 11 – Correntes de Frequências Harmônica Utilizando um Aerogerador Individual.	84
Tabela 12 – Tensões por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo.	88
Tabela 13 – Correntes por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo.....	92
Tabela 14 – Tabela Resumo com os Valores de Tensões e Correntes por Ordem h com 1 e com 5 Aerogeradores.	95
Tabela 15 – Tensões por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo e com as Correntes Harmônicas Defasadas.	99
Tabela 16 – Correntes por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo e com as Correntes Harmônicas Defasadas.	101
Tabela 17 – Tabela Resumo com os Valores de Tensões e Correntes por ordem h Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo e com as Correntes Harmônicas em Fase e Defasadas.	104

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE SIGLAS

E-LEE	E-Learning Tools For Electrical Engineering
GIDA	Geradores de Indução Duplamente Alimentados
GIRB	Geradores de Indução com Rotor Bobinado
GIRGE	Geradores de Indução com Rotor Gaiola de Esquilo
GSRB	Geradores Síncronos com Rotor Bobinado
GSRIP	Geradores Síncronos com Rotor de Imãs Permanentes
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequenas Centrais Hidroelétricas
QEE	Qualidade de Energia Elétrica

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BIG	Banco de Informações da Geração
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
Cresesb	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
DHI	Distorção Harmônica Individual
DTH	Distorção Harmônica Total
Eletrobrás	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Proinfa	Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica
Prodist	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SIN	Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 TEMA DE PESQUISA.....	15
1.1.1 Delimitação do Tema	16
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	17
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 JUSTIFICATIVA.....	18
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	20
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2 O ESTADO DA ARTE	23
2.1 INTRODUÇÃO.....	23
2.2 O VENTO.....	23
2.3 OS AEROGERADORES.....	28
2.3.1 Aproveitamento da Energia Cinética do Vento Pelos Aerogeradores.....	29
2.3.2 Princípio Básico de Funcionamento dos aerogeradores.....	30
2.3.3 Posição do Eixo do Rotor no Aerogerador.....	31
2.3.3.1 Rotor de eixo vertical	32
2.3.3.2 Rotor de eixo horizontal	34
2.3.4 Componentes de um Aerogerador com Rotor de Eixo Horizontal	36
2.3.5 Caixa de Transmissão	38
2.3.6 Geradores	38
2.3.6.1 Geradores síncronos.....	39
2.3.6.2 Geradores assíncronos ou de indução	42
2.3.7 Principais Tecnologias Utilizadas nos Aerogeradores	42
2.3.7.1 Gerador síncrono com rotor bobinado (GSRB).....	43
2.3.7.2 Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo (GIRGE).....	44
2.3.7.3 Gerador de indução com dupla alimentação (GIDA).....	45
2.4 DISTORÇÕES HARMÔNICAS	46
2.5 FONTES DE GERAÇÃO DE HARMÔNICOS DOS AEROGERADORES	50
2.6 LEGISLAÇÕES SOBRE DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	52
2.6.1 Norma Técnica ABNT NBR IEC 61400-21	53
2.6.2 ANEEL - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist).....	54
2.6.3 ONS - Procedimentos de Rede.....	55
2.6.4 Norma IEEE 519	57
3 ANÁLISE COMPUTACIONAL	59
3.1 DADOS DO AEROGERADOR.....	59
3.2 MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA NO ATP.....	63

3.3 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
3.3.1 Análise de Um Sistema Composto por 1 Aerogerador Individual Alimentando Uma Carga Puramente Resistiva	71
3.3.2 Análise de Um Sistema composto por 5 Aerogeradores Alimentando Uma Carga Puramente Resistiva.....	87
3.3.3 Análise de Um Sistema Composto por 5 Aerogeradores com o Ângulo das Correntes Harmônicas Defasados	97
4 CONCLUSÃO.....	107
REFERÊNCIAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA DE PESQUISA

A energia elétrica é de fundamental importância para o avanço e desenvolvimento sustentável da sociedade moderna, pois seu uso está sempre presente na produção, na preparação e na conservação de nossos alimentos, na limpeza das nossas casas, na higiene e saneamento, na transmissão de informação, e em quase todas as atividades desenvolvidas pelo ser humano no dia a dia. Aparelhos como o chuveiro elétrico, televisão, geladeira, computador, aquecedor, celular e outros tantos só funcionam devido à energia elétrica.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2016, a oferta total de energia elétrica no Brasil no ano de 2015 foi de 615,9 TWh, houve um decréscimo de 1,3% em relação ao ano de 2014, onde a oferta total foi de 624,3 TWh. No ano de 2015 as fontes renováveis foram responsáveis por 75,5% de toda energia elétrica disponível no Brasil, com destaque maior para a geração hidráulica com 64% da oferta total, conforme mostrado na Figura 1.

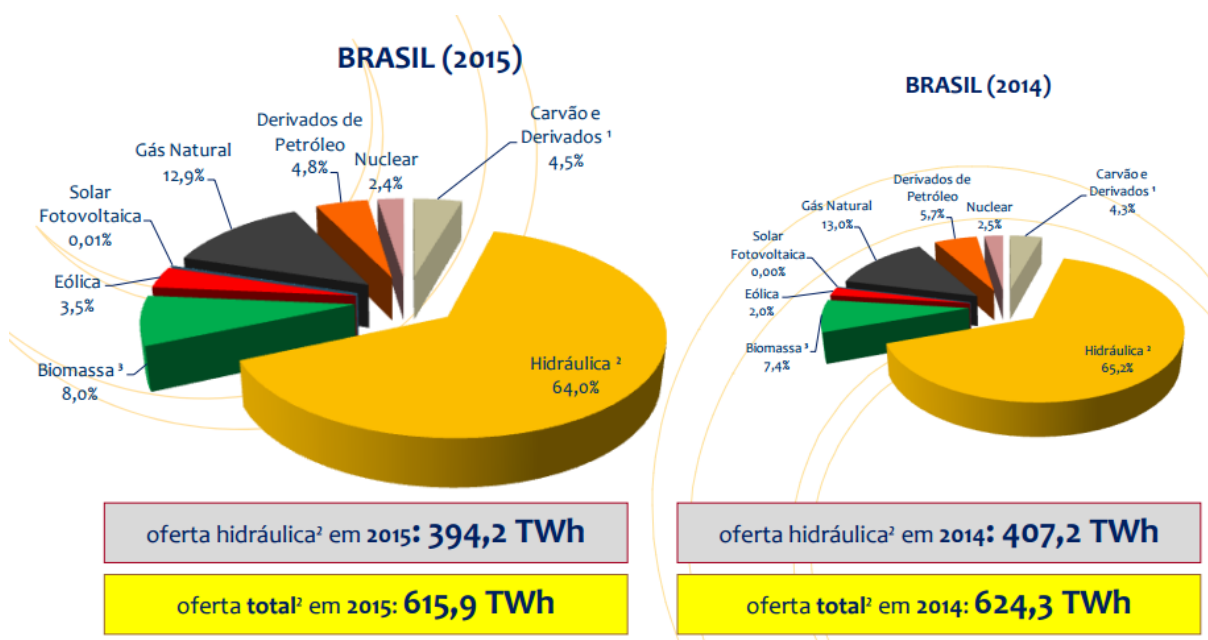


Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira
 Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2016, p. 34).

Tendo em vista que a capacidade de crescimento na produção de energia elétrica das hidrelétricas esteja se esgotando e que cada vez mais diminui o nível médio de água nos reservatórios, as chamadas fontes alternativas de energia

surgem como solução para suprir as futuras demandas. O governo federal por meio do programa de incentivo as fontes alternativas de energia elétrica (Proinfa) financia a implantação de novas usinas eólicas, pequenas centrais hidroelétricas (PCH) e de biomassa que estão sendo incorporadas ao sistema interligado nacional (SIN).

O Proinfa é um programa elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), foi criado através do decreto nº 5.025, de 2004, as Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobrás) é o agente responsável pela celebração de contratos de compra e venda de energia. O Proinfa tem como objetivo o aumento da participação das novas fontes renováveis de energia na matriz elétrica brasileira (MME, 2015).

Neste contexto, apresenta-se a geração de energia eólica. A energia eólica nada mais é que do que “a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento), seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação” (ANEEL, 2005, p. 93). As turbinas eólicas ou aerogeradores aproveitam a força do vento e produzem eletricidade de origem limpa e renovável.

A energia eólica vem sendo aproveitada pelo homem há vários séculos, inicialmente na navegação, e posteriormente na agricultura para o movimento dos moinhos e bombeamento de água, mas somente no século XIX que teve início o seu aproveitamento para a produção de energia elétrica (SCHWANZ, 2013).

Conforme demonstrado na Figura 1, a produção de eletricidade a partir da fonte eólica respondeu por 3,5% de toda energia elétrica gerada no Brasil no ano 2015, totalizando 21.625 GWh, um aumento de 77,11% em relação ao ano anterior, quando se atingiu 12.210 GWh, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Evolução da Geração Eólica

Ano	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Geração Total (GWh)	663	1.183	1.238	2.177	2.705	5.050	6.578	12.210	21.625

Fonte: Balanço Energético Nacional 2015 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

1.1.1 Delimitação do Tema

As tecnologias mais modernas de aerogeradores são fabricadas com componentes advindos da eletrônica de potência, que são fontes conhecidas de harmônicos. Este trabalho tem a finalidade de descrever e apresentar o sistema de

conversão da energia cinética contida no vento em energia elétrica realizado pelos aerogeradores e a partir disso analisar, com a ajuda do programa computacional ATP (Alternative Transients Program), as distorções harmônicas geradas pelos componentes eletrônicos presente em um aerogerador.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os aerogeradores convertem parte da energia cinética dos ventos nas pás do rotor da turbina em energia elétrica de forma limpa, renovável e barata, somado a isso o fato dos custos com a manutenção dos geradores eólicos serem relativamente baixos, conclui-se que depois de instalados e estando em operação o sistema trará poucas despesas.

Porém, apesar dos inúmeros estudos na área de geração eólica, dos grandes investimentos do governo federal por meio Proinfa e dos incentivos fiscais, os gastos iniciais para construção de um parque eólico ainda são relativamente altos. Quanto à qualidade da energia de origem eólica, para obtenção de energia elétrica de boa qualidade e livre de distorções é necessário muitas vezes à utilização de filtros de harmônicos que assim como os aerogeradores possui preços ainda bastantes elevados.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal analisar com o auxílio do programa computacional ATP as distorções harmônicas geradas por um modelo de aerogerador ao entregar 100% da sua potência a uma carga.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Entender os processos de transformação de energia envolvidos no funcionamento de um aerogerador;
- interpretar corretamente os dados de um aerogerador;

- criar uma modelagem e uma simulação no ATP que reproduza um aerogerador em funcionamento fornecendo 100% da sua potência e injetando correntes de frequências harmônicas em uma carga resistiva;
- criar uma simulação no ATP que reproduza 5 aerogeradores em paralelo com as correntes de frequências harmônicas em fase alimentando uma carga;
- criar uma simulação no ATP que reproduza 5 aerogeradores em paralelo com as correntes de frequências harmônicas defasadas alimentando uma carga;
- analisar os resultados gerados pelo ATP;
- calcular de forma algébrica a distorção harmônica total (DHT) de corrente e de tensão;
- analisar se as distorções harmônicas geradas pelo modelo de aerogerador estudado estão dentro do esperado pela norma técnica NBR IEC 61400-21.

1.4 JUSTIFICATIVA

Devido o potencial de crescimento da geração de energia elétrica provenientes das usinas hidrelétricas está chegando ao seu limite no Brasil, e à diminuição do nível médio dos reservatórios dessas usinas, causados pela falta de chuvas em algumas regiões e pelo consumo excessivo das reservas de água, somadas a crise mundial do petróleo e a preocupação cada vez maior dos profissionais da área de energia, da sociedade, dos órgãos técnicos e ambientais no intuito de gerar energia elétrica de forma limpa e renovável para suprir as necessidades da população e das indústrias, inúmeros estudos vem sendo desenvolvidos ao longo dos últimos anos relacionados às fontes alternativas de energia.

A geração eólica vem recebendo maior atenção pela sua capacidade de geração, por causar menores impactos ambientais, necessitar de menores mudanças estruturais e por usar para movimentar as turbinas apenas a energia cinética contida nos ventos, que é um recurso natural, gratuito e bastante abundante em quase todas as regiões do planeta.

Segundo Rufato (2006), nos períodos de poucas chuvas e com os reservatórios das hidrelétricas baixos, as usinas térmicas são ligadas visando à continuidade do suprimento de energia elétrica aos consumidores.

As usinas térmicas utilizam o carvão e seus derivados, gás natural e diesel para gerar energia elétrica. O valor do kWh da energia de origem térmica é muito superior ao valor cobrado pelo kWh da energia elétrica de origem hidráulica e eólica.

Como pode ser verificado no mapa da Figura 2, o potencial eólico total brasileiro é de 143,4 GW, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) 2016, por meio do banco de informações da geração (BIG), o Brasil possui 377 parques eólicos em operação com potência instalada de 9,2 GW, dados de julho de 2016, o que representa apenas 6,4% de aproveitamento do total disponível. Segundo esse mesmo órgão, 125 novos parques eólicos estão em construção com potência associada de 2,8 GW e mais 262 empreendimentos previstos com potencial de 6,3 GW.

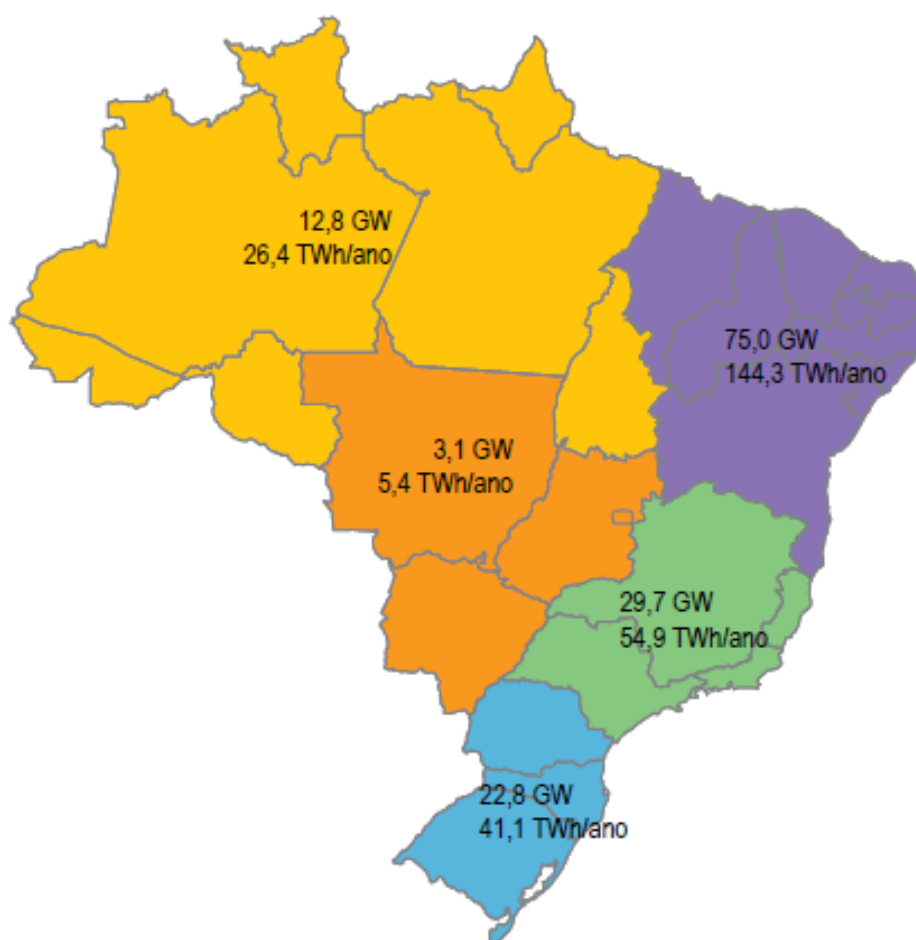


Figura 2 – Mapa do Potencial Eólico Brasileiro
Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2008, p. 81).

Dessa forma, a quantidade de usinas eólicas e de geração de energia por meio destas, devem crescer substancialmente nos próximos anos, com previsão de aumento de 98,9% do potencial instalado.

No entanto, surge uma questão importante relacionada à qualidade da energia caso esse tipo de geração seja implantada em grande escala na matriz energética brasileira, que é a interferências elétricas provocadas pela geração de harmônicos (LIMA, 2013).

A maioria dos aerogeradores modernos utilizam conversores (inversores) de frequência para a conexão dos geradores à rede elétrica. Os conversores são constituídos por diodos e IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) que são componentes eletrônicos que geram correntes de frequências harmônicas.

O uso de conversores de frequência na conexão de aerogeradores à rede elétrica podem provocar distúrbios, pois estes equipamentos injetam correntes de frequências harmônicas em um sistema elétrico (SCHWANZ, 2013).

Os harmônicos são fenômenos contínuos que causam distorções na forma da onda senoidal da tensão e da corrente, e devido a isso provocam aumento na circulação de correntes nos condutores, perdas nos enrolamentos dos transformadores, aquecimentos dos enrolamentos dos motores, disparos intempestivos em disjuntores e etc.

Por isso, é muito importante que se façam estudos e verificações dessas distorções, e que se busquem maneiras e formas de amenizá-las ou até mesmo eliminá-las.

A simulação computacional é uma ferramenta importante para auxiliar na análise das distorções harmônicas em um sistema elétrico. Existem diversos programas computacionais no mercado com essas características, neste trabalho foi utilizado o programa ATP por ser um programa mundialmente utilizado na área de sistemas de potência e por disponibilizar licença gratuita.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No desenvolvimento deste trabalho foram realizadas pesquisas bibliográficas e leituras em publicações de referência nacional e internacional, como por exemplo:

teses de doutorado, dissertações de mestrado, livros, revistas, sites de universidades e de órgãos da área de energia, normas e etc.

Depois de adquirido uma base sólida de conhecimentos técnicos e científicos foi desenvolvido o capítulo 2, o estado da arte, onde consta todo referencial bibliográfico relacionado com o tema deste trabalho.

Posteriormente foi adquirido junto a um fabricante de aerogerador nacional os níveis de correntes harmônicas geradas por um dos seus modelos de aerogerador ao fornecer 100% da sua potência ativa a carga, de posse desses dados na sequência foram feitas no programa ATP a modelagem e as simulações do aerogerador fornecendo toda a sua potência e injetando correntes de frequências harmônicas à carga.

Subsequentemente foi desenvolvido o capítulo 3, análise computacional, nesse capítulo inicialmente foi apresentado os dados obtidos do fabricante, em seguida foram calculados o valor máximo de corrente que esse aerogerador consegue fornecer, o valor da carga resistiva que drena a corrente máxima e o valor da DHT de corrente, depois foram apresentados os dados de saídas gerados pelo programa ATP, e por fim foi avaliado se os níveis de distorções harmônicas desse aerogerador estão dentro do esperado pela norma NBR IEC 61400-21.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 4 capítulos, onde:

- O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho no qual está contido o tema de pesquisa, problemas e premissas, objetivo geral e específicos, procedimentos metodológicos e por fim a estrutura do trabalho;
- o capítulo 2 encontra-se o estado da arte, no qual está compreendido toda a revisão bibliográfica referente ao tema deste trabalho. Os seguintes assuntos são abordados: O vento, os aerogeradores, as distorções harmônicas, as fontes de geração de harmônicos dos aerogeradores e por fim a legislação sobre distorções harmônicas;
- o capítulo 3 aborda a análise computacional, onde são apresentados os resultados obtidos nos cálculos algébricos e nas simulações, por fim foram

feitas análises desses resultados obtidos e comparado com o esperado pela norma NBR IEC 61400-21;

- o capítulo 4 trata das conclusões.

2 O ESTADO DA ARTE

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os seguintes assuntos: o vento, os aerogeradores, as distorções harmônicas, as fontes de geração de harmônicos dos aerogeradores e por fim as principais normas sobre as distorções harmônicas na geração de energia elétrica.

2.2 O VENTO

Os ventos consistem do movimento do ar das regiões de alta pressão para as regiões de baixa pressão, essas diferenças de pressões são causadas pelo aquecimento desigual da superfície da terra pelo sol. Os ventos são de fundamental importância para a vida de boa parte dos seres vivos, pois são eles que levam o ar impuro para longe e buscam para perto o ar puro, rico em oxigênio, tão importante para o organismo desses seres (FIOCRUZ, 2016).

A Figura 3 mostra a distribuição geral dos ventos pelo mundo, analisando a Figura 3 nota-se a predominância dos ventos alísios e dos ventos de oeste no território brasileiro.

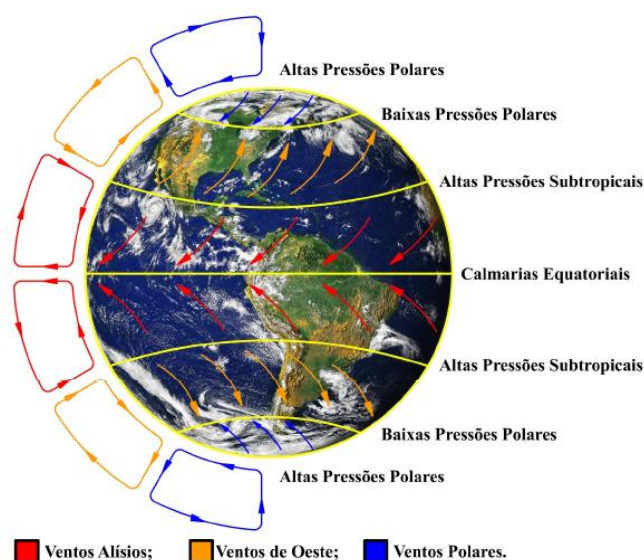


Figura 3 – Distribuição Geral dos Ventos pelo Mundo
 Fonte: AMÊNDOLA (2007, p. 52).

Os ventos podem ser classificados em constantes, periódicos, locais e variáveis.

Os ventos constantes ou planetários são produzidos devido ao “aquecimento no equador e resfriamento nos pólos” (CRESESB, 2008, p. 19).

Segundo Varejão (2006), os ventos constantes sopram durante o ano inteiro e são divididos em:

- ventos alísios: são os ventos que se deslocam dos trópicos para o equador. São ventos úmidos.
- ventos contra alísios: são os ventos que se deslocam do equador para os trópicos. São ventos secos.
- ventos de oeste: são os ventos que se deslocam dos trópicos para os polos.
- ventos de leste polares: são os ventos que se deslocam dos polos para as zonas temperadas. São ventos frios.

Segundo Varejão (2006), os ventos periódicos são ventos que alteram a sua direção em intervalos regulares de tempo, podendo ter periodicidade sazonais ou diárias, e podem ser classificados em:

- monções marítimas: são ventos que se deslocam do oceano Índico para a Ásia Meridional durante o verão. Esses ventos causam fortes chuvas na Ásia Meridional.
- monções continentais: são ventos que se deslocam da Ásia Meridional para o oceano Índico durante o inverno. Esses ventos causam secas no sul da Ásia.
- brisas: são ventos que se deslocam do mar para os continentes durante o dia e dos continentes para o mar durante a noite.

Os ventos locais são os ventos que se deslocam em determinadas regiões do planeta e em certas épocas do ano. No Brasil, a massa de ar noroeste é um exemplo de vento local, ela parte do estado do Amazonas e chega ao estado de São Paulo entre agosto e outubro. Outro exemplo de vento local é o Simum, vento muito forte que provoca grandes tempestades de areia no deserto do Saara. Já os ventos variáveis são ventos irregulares que destroem certos locais de forma inesperada. (FIOCRUZ, 2016).

Para simplificação de estudo, os ventos podem ser considerados “como uma corrente contínua de parcelas de ar” (GRIMM, 2016, p.1). As forças atuantes sobre as parcelas de ar são classificadas em:

- força do gradiente de pressão: força existente quando a pressão do ar varia de um local para o outro. Essa variação produzirá uma força resultante da região de maior pressão para região de menor pressão (GRIMM, 2016).
- Força de gravidade: força que faz os corpos serem atraídos para o centro da terra. Essa força se baseia na lei da gravitação universal de Newton e altera apenas a componente vertical dos ventos no sentido de cima para baixo (IAG USP, 2016).
- força de Coriolis: força que atua sobre as parcelas de ar em movimento em relação ao sistema de coordenadas fixo da terra (ordenada e abscissa), se trata de uma força “fictícia”. A força de Coriolis atua sempre em direção perpendicular ao movimento da terra (GRIMM, 2016).
- força centrífuga: força que altera a força de atração gravitacional entre a terra e o ar.
- força de atrito: força atuante de uma superfície rugosa sobre o vento, essa força faz o vento parar após certo tempo.

Em resumo a força da gravidade empurra o vento para baixo sem alterar a sua componente vertical; a força de gradiente de pressão empurra o vento das regiões de maior pressão para as regiões de menor pressão; a força de *Coriolis* no hemisfério sul desloca o vento para esquerda da direção natural enquanto no hemisfério norte desloca para direita; e por fim a força de atrito cessa os ventos nas proximidades da superfície terrestre (IAG USP, 2016).

Segundo Tolmasquim (2016 apud Tester, 2005), a velocidade do vento aumenta na medida em que aumenta a altitude. A velocidade do vento pode ser calculada pela equação 2.1, onde v_1 e v_2 são as velocidades encontradas respectivamente nas alturas h_1 e h_2 e n é o coeficiente que depende da estabilidade da atmosfera, para locais planos com estabilidade zero n é igual a 1/7.

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^n \quad (2.1)$$

Analisando a Figura 4 nota-se que o território brasileiro apresenta grandes variações na velocidade do vento, segundo Tolmasquim (2016 apud Amarante, 2001), isso ocorre devido as diferentes altitude e geometria do terreno e aos tipos de

vegetação e distribuição das superfícies de água e terra ao longo desse imenso território.

Os locais de cores verdes do mapa da Figura 4 possuem grande concentração de floresta densa, nesses locais os ventos apresentam baixas velocidades, na região amazônica, por exemplo, as velocidades médias do vento são bastante reduzidas chegando à zero na altitude de 50 m.

As maiores velocidades dos ventos são encontradas numa imensa e larga faixa de cores amarela e vermelha do mapa da Figura 4, que parte do nordeste brasileiro, passando pelo centro-oeste, sudeste e sul do Brasil, e também em uma pequena área no extremo norte da Amazônia brasileira na divisa com a Venezuela.

No mapa da Figura 4 nota-se também que no nordeste brasileiro especialmente nas zonas costeiras são os locais onde se concentram as maiores quantidades de parques eólicos. Concessionárias de energia elétricas de outras regiões brasileiras têm explorado esse maior potencial eólico, um exemplo disso é a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) no estado do Ceará e a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) no Rio Grande do Norte.

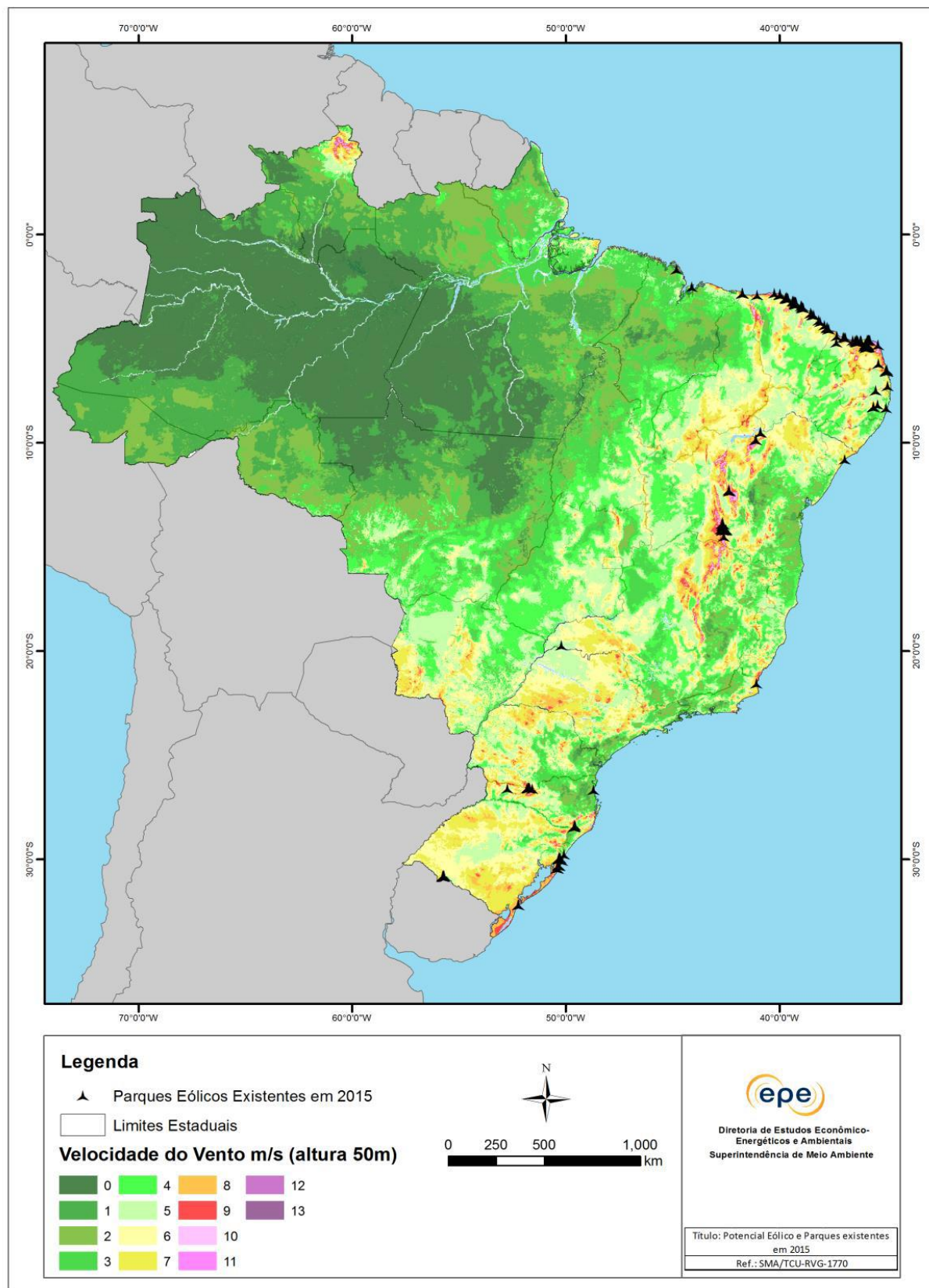


Figura 4 – Velocidade do Vento e Distribuição dos Parques Eólicos em Operação no Brasil
Fonte: TOLMASQUIM (2016, p. 249).

De acordo com Tolmasquim (2016), na região norte-nordeste em uma faixa costeira de 100 km de largura que vai do Cabo de São Roque no Rio Grande do Norte ao extremo norte do Amapá os ventos são intensos e são provocados pela mistura das brisas marinhas e terrestres com os alísios de leste, nessa região se destaca com maiores velocidades do vento o litoral do Ceará e do Rio Grande do Norte. Na região com distância aproximada de 1.000 km que vai do Rio Grande do Norte ao Rio de Janeiro são providas de áreas com elevações como serras e chapadas, nessa região são encontradas velocidades altas de ventos devido a altitude do terreno. No Planalto Central que vai da Bacia do Rio São Francisco até as fronteiras com Paraguai e Bolívia, e ao sul da Amazônia os ventos possuem velocidades moderadas devido ao escoamento leste-sudeste em volta do Anticiclone Subtropical Atlântico. O Planalto do Sul que vai de São Paulo até o extremo sul do Rio Grande do Sul é uma região de baixas pressões, os ventos são moderados devidos o escoamento atmosférico que sofre influência do Anticiclone Subtropical Atlântico e da Depressão do Norte da Argentina, a região dos Andes bloqueia a circulação dos ventos para o Brasil. No Planalto Sul os locais onde se encontra altas velocidades dos ventos são nas regiões com elevações montanhosas, nos campos de Palmas, por exemplo, e no litoral do sul devido às brisas.

Por todos esses aspectos, nota-se que a ocorrência de ventos depende de fenômenos atmosféricos e físicos que varia conforme o local ou época do ano, podendo acontecer do vento não está disponível no momento em que necessita da energia elétrica. O vento é então um recurso de natureza não estocável em grandes quantidades, variável e não controlável (TOLMASQUIM, 2016).

2.3 OS AEROGERADORES

O aerogerador, ou turbina eólica, é um aparelho que converte parte da energia cinética contida nos ventos numa primeira fase em torque mecânico, e esta, posteriormente em energia elétrica. A quantidade de energia elétrica convertida por um aerogerador depende da velocidade do vento, do diâmetro do rotor e do rendimento do sistema de geração eólico (CE EÓLICA, 2016).

Nesta seção, são descritos os seguintes assuntos: o aproveitamento da energia cinética do vento pelos aerogeradores, o princípio básico de funcionamento

dos aerogeradores, os tipos de eixos dos rotores eólicos, os componentes de um aerogerador moderno, a caixa de transmissão e por fim os tipos de geradores usados nos modelos de aerogeradores disponíveis no mercado.

2.3.1 Aproveitamento da Energia Cinética do Vento Pelos Aerogeradores

A energia cinética contida em um determinado volume de vento e expressa em Joule por metro cúbico (J/m^3), pode ser calculada pela equação 2.2.

$$E_c = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.2)$$

Onde V é a velocidade do vento (em m/s) e ρ é a massa específica do ar (aproximadamente $1,2 \text{ kg/m}^3$).

A taxa de variação dessa energia cinética é a potência da turbina eólica teoricamente disponível, que é calculada através da equação 2.3.

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.3)$$

Onde A é a área varrida pelas pás do rotor. A potência é expressa em Watts (W).

Porém, apenas parte da energia cinética contida nos ventos é realmente aproveitada para fins eólicos, uma vez que para o funcionamento do aerogerador deve haver uma distância entre as pás, este espaço vago entre as pás deixa passar parte da energia cinética do vento que não será aproveitada para produzir potência eólica (ROCHA, 2013).

Segundo Tolmasquim (2016 apud Bergéy, 1979), a melhor conversão teórica de energia aceita é encontrada pelo limite de Betz, desenvolvido pelo físico alemão Albert Betz em 1909. Segundo o limite de Betz, o aproveitamento da energia cinética do vento nunca ultrapassa 59,3%.

No entanto, na prática os aerogeradores modernos em campos foram capazes de obter eficiência de conversão (coeficiente de performance C_p) na faixa de 0,3 a 0,45.

Assim, a energia potencial de saída do aerogerador, pode ser obtida pela equação 2.4.

$$P_e = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (2.4)$$

Analisando a equação 2.4, percebe-se que a potência do aerogerador é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento, dessa forma se a velocidade do vento triplicar a energia potencial de saída do aerogerador é multiplicada por 27.

2.3.2 Princípio Básico de Funcionamento dos aerogeradores

A Figura 5 apresenta um esquema simplificado do funcionamento dos aerogeradores. Nesse processo, parte da energia cinética contida nos ventos faz girar as pás do aerogerador, criando um conjugado mecânico que faz rodar o eixo que está conectado a um multiplicador mecânico, o multiplicador mecânico amplia o número de rotações por minuto, ou seja, aumenta a velocidade de rotação, e transmite essa energia cinética de rotação amplificada para o eixo do gerador e assim coloca em funcionamento o gerador, no gerador os campos magnéticos convertem a energia cinética de rotação em energia elétrica devido à criação de uma força motriz induzida (tensão) nos terminais de saída do gerador. Depois de transformada, a energia elétrica passa pelo sistema de conversores eletrônicos para o controle da frequência, passando depois pelo transformador onde ocorrerá o controle da tensão, e por fim será enviada até a rede elétrica para a transmissão.

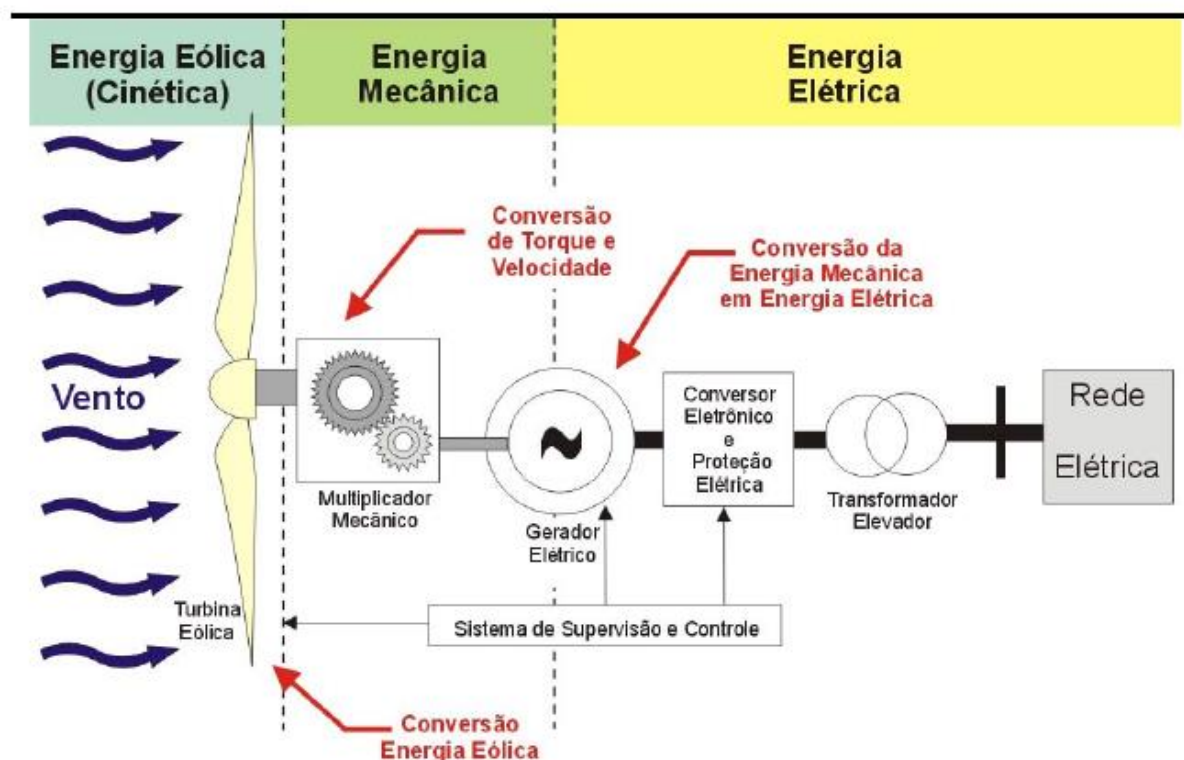


Figura 5 – Esquema de Funcionamento de um Aerogerador
 Fonte: PAVINATTO (2005, p. 33).

Os aerogeradores possuem restrições técnicas para o seu correto funcionamento, além das perdas no aproveitamento da energia cinética, conforme explicado no tópico 2.3.1 deste trabalho, há também a exigência de uma velocidade mínima (*cut-in*) e uma velocidade máxima (*cut-on*) do vento para a sua operação. Caso a velocidade do vento seja menor que a velocidade mínima exigida o gerador do aerogerador não irá entrar em operação, por outro lado, caso a velocidade do vento seja maior do que a velocidade máxima suportada o aerogerador é travado por medida de segurança. Sendo assim a conversão mecânica-eletrônica de energia só ocorre se a velocidade do vento estiver no intervalo entre a velocidade mínima e a velocidade máxima (TOLMASQUIM, 2016).

2.3.3 Posição do Eixo do Rotor no Aerogerador

Na formação de um sistema eólico, o rotor é a peça que executa a conversão da energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação (MOREIRA, 2008).

O rotor de um aerogerador pode ser fabricado de dois tipos: rotor de eixo vertical e rotor de eixo horizontal. Esses dois tipos são descritos a seguir.

2.3.3.1 Rotor de eixo vertical

Os rotores de eixo vertical apresentam alinhamento vertical do eixo, podendo ser movidos pela força de sustentação (*lift*), onde a força motriz é a sustentação aerodinâmica, e pela força de arrasto (*drag*), onde a força motriz é a resistência aerodinâmica. Esses rotores têm como principais vantagens o fato de não necessitarem de dispositivo de acompanhamento das variações da direção dos ventos e a redução dos esforços causados pelas forças de Coriolis (CRESESB, 2008).

As turbinas com rotores de eixo vertical mais conhecidas e utilizadas são a *Darrieus* e a *Savonius*.

Os aerogeradores do tipo *Darrieus* foi patenteado em 1931 pelo engenheiro aeronáutico francês Georges Darrieus, esse aerogerador apresenta turbina do tipo *lift* baseada no princípio da variação cíclica de incidência. Esse aerogerador fica sujeito a forças de intensidade e direções variáveis, o resultado dessas forças é a geração de um binário motor responsável pelo giro do rotor (E-LEARNING, 2016). A Figura 6 mostra um exemplo de um aerogerador do tipo *Darrieus*.



Figura 6 – Aerogerador de *Darrieus*
Fonte: Evolução Energia Eólica (2016).

Os aerogeradores do tipo *Savonius*, foi inventado pelo engenheiro finlandês Sigurd Johannes Savonius em 1922, esse aerogerador possui turbina do tipo *drag*, esse tipo de aerogerador é basicamente constituído por duas meias canas posicionadas em sentido inverso e fixadas em um eixo vertical. Com intuito de se obter partida a baixas velocidades o aerogerador *Savonius* pode ser usado em conjunto com outros tipos de aerogeradores (SILVA, 2011). A Figura 7 mostra um exemplo de um aerogerador do tipo *Savonius*.

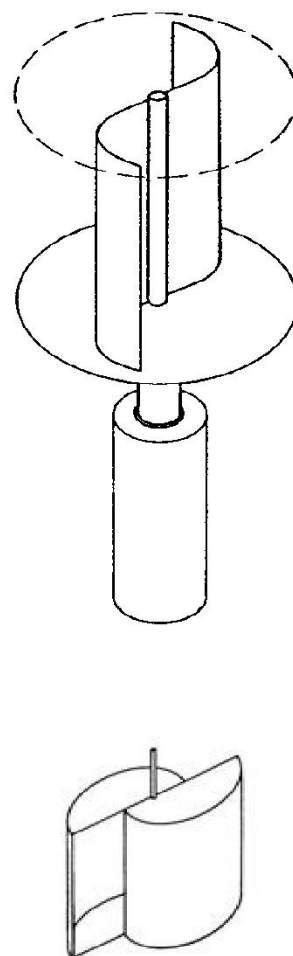


Figura 7 – Aerogerador de Savonius
Fonte: Evolução Energia Eólica (2016).

2.3.3.2 Rotor de eixo horizontal

Os aerogeradores com rotor de eixo horizontal, mostrado na Figura 8, são os mais utilizados atualmente em aplicações comerciais, tais rotores podem ser fabricados com uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou várias pás. Os rotores desses aerogeradores são movimentados em conjunto pelas forças aerodinâmicas de arrasto (*drag*) e de sustentação (*lift*) (CRESESB, 2008).



Figura 8 – Aeroogeradores com Rotor de Eixo Horizontal
Fonte: Engquímica (2016).

As turbinas de três pás são as que apresentam a melhor relação custo x benefício e menores oscilações no eixo. Em comparação com os aeroogeradores com rotores de eixo vertical, os de eixo horizontal apresentam melhores rendimentos aerodinâmicos e menores exposição aos esforços mecânicos.

Os aeroogeradores de eixo horizontal são enquadrados nas seguintes categorias:

- frontais (*upwind*): são indicados quando o vento sopra pela parte da frente do aeroogerador, nesse caso as pás devem ser rígidas e o rotor orientado conforme a direção do vento (CRESESB, 2008).
- retaguarda (*downwind*): são indicados quando o vento sopra pela parte de trás das pás, o rotor deve ser flexível e possuir orientação automática (CRESESB, 2008).

2.3.4 Componentes de um Aerogerador com Rotor de Eixo Horizontal

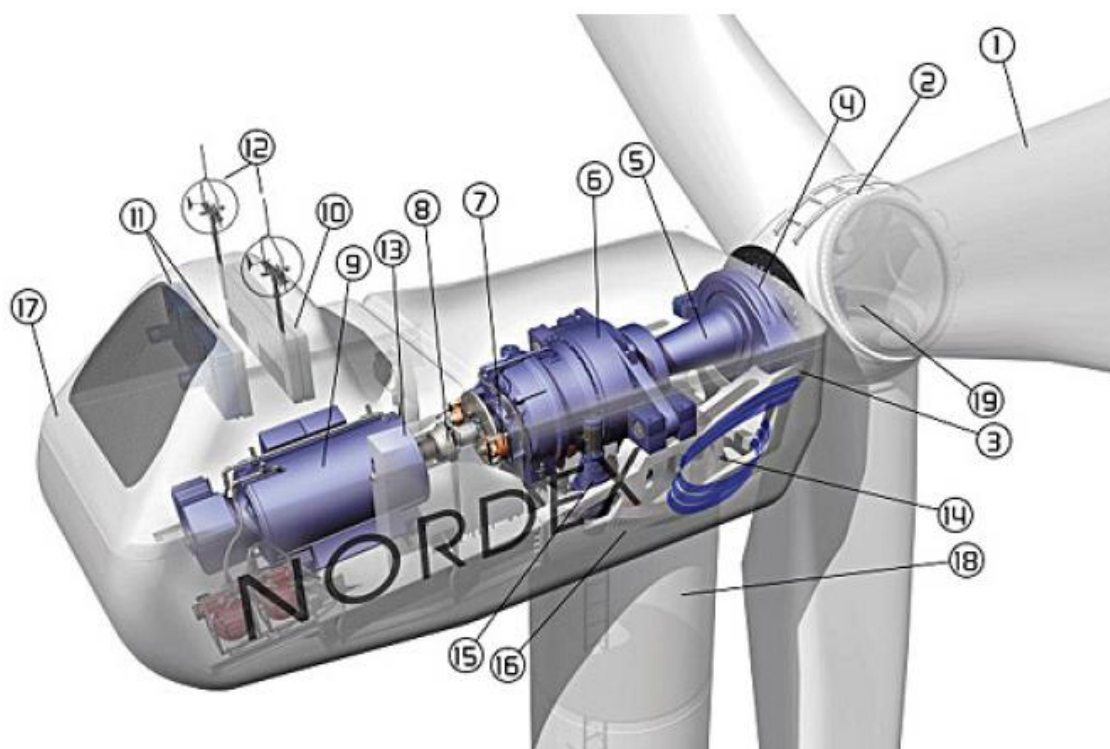


Figura 9 – Componentes de um Aerogerador

Fonte: AMÊNDOLA (2007, p. 97).

A Figura 9 ilustra os principais componentes de um aerogerador moderno. A seguir são descritos esses componentes em ordem numérica.

- (1) pás: tem a função de converter parte da energia cinética contida no vento em trabalho mecânico. A maioria das pás são construídas com fibra de vidro altamente resistente e epóxi.
- (2) cubo: une as pás ao eixo da turbina. Pode ser fabricado com aço, ferro fundido ou ligas de alta resistência.
- (3) nacela: é a carcaça posicionada em cima da torre. Por necessitar de suportar as vibrações e os esforços mecânicos a nacela são fabricadas com ferro fundido de qualidade superior. A nacela envolve e protege o gerador, as engrenagens e todo o sistema de controle.
- (4) rolamento do eixo: rolamento de esferas feitas de ferro fundido.
- (5) eixo: transfere o trabalho mecânico para a transmissão. O eixo gira em baixa velocidade e é fabricado com aço ou ligas metálicas.

- (6) caixa de transmissão: se trata de uma caixa de engrenagem que tem a função de aumentar em várias vezes a velocidade de rotação vinda do eixo e transferir maiores velocidades de rotação para o gerador.
- (7) freio do eixo do gerador: trava o eixo da turbina. O freio do eixo interrompe o funcionamento do gerador, sendo de fundamental importância para as ocasiões de emergência e manutenção do aerogerador.
- (8) acoplamento entre transmissão e gerador: impede o aparecimento de tensões mecânicas desnecessárias nos mancais de rolamento da caixa de transmissão e do gerador.
- (9) gerador: converte o trabalho mecânico vindo da caixa de transmissão em energia elétrica. O gerador pode ser de vários tipos e tecnologias que são apresentados posteriormente.
- (10) radiador de calor da transmissão: é responsável pela refrigeração da caixa de transmissão.
- (11) radiador de calor do gerador: é responsável pela refrigeração do gerador.
- (12) sensores de direção e velocidade do vento: esses sensores obtêm as variáveis direção e velocidade do vento e envia para o sistema de controle.
- (13) sistema de controle: opera automaticamente colhendo as diversas variáveis e enviando comandos de ajustes para que o sistema tenha o melhor funcionamento possível.
- (14) sistema hidráulico: ajusta a posição da nacele e a pressão do óleo utilizado no freio.
- (15) sistema de posicionamento da nacele: tem a função de manter as pás de frente com a direção dos ventos de forma automática.
- (16) rolamento da nacele: situada entre a torre e a nacele esse rolamento possibilita a rotação da nacele sobre a torre.
- (17) carenagem da nacele: encontra-se sobre a nacele e tem a função de proporcionar um formato aerodinâmico e de proteção dos componentes que estão no interior da nacele.
- (18) torre: é um item estrutural que tem a função de sustentar a massa de todo os componentes instalados sobre si em certa altura e ainda suportar sejam quais forem as condições climáticas. São construídas com aço e concreto.

- (19) sistema de controle do ângulo de passo da turbina: sistema que controla o ângulo de passo do aerogerador.

2.3.5 Caixa de Transmissão

As pás de um aerogerador giram com velocidades de 50 a 110 m/s, assim os rotores conseguem alcançar velocidades angulares de 15 a 220 rpm. Um gerador síncrono, por exemplo, opera na faixa de 1200 a 1800 rpm (LIMA, 2013).

A velocidade angular obtida pelo rotor é insuficiente para colocar em funcionamento o gerador síncrono citado acima. Para resolver esse problema entre o eixo das pás e o eixo do gerador das turbinas eólicas se encontra a caixa de transmissão. A caixa de transmissão é composta por um sistema de engrenagem que amplia a velocidade de rotação do eixo do rotor e assim atende a velocidade requerida pelo eixo do gerador.

2.3.6 Geradores

A função principal de qualquer gerador é a conversão mecânica-elétrica de energia. A Figura 10 apresenta um esquema simplificado do funcionamento de um gerador elementar, onde a espira devido ao campo magnético gira entre os pólos de um ímã e corta linhas de forças, ao cortar as linhas de força é criada uma força eletromotriz (f.e.m) induzida entre dois condutores (saída da tensão CA).

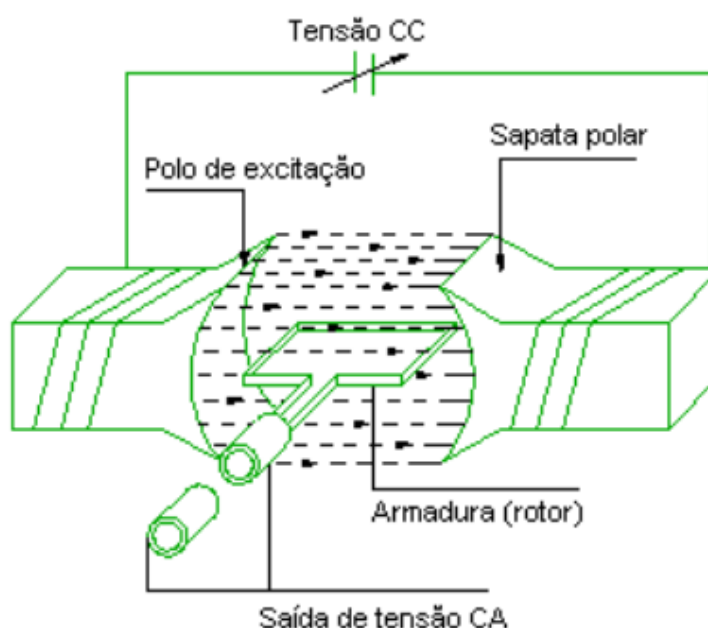


Figura 10 – Esquema de Funcionamento de um Gerador Elementar
Fonte: WEG (2016, p. 5).

No enrolamento de campo de um gerador é fornecida energia elétrica em corrente contínua, e como resultado no enrolamento de armadura é obtida energia elétrica em corrente alternada (SIMONE, 2000).

Em um aerogerador a conversão do trabalho mecânico vindo da caixa de engrenagem em energia elétrica é realizada por geradores de corrente alternada.

O gerador pode ser conectado diretamente a uma rede elétrica através de um transformador ou conectado ao transformador por meio de inversores estáticos de frequência (SCHWANZ, 2013).

Nas turbinas eólicas podem ser utilizados geradores síncronos (alternadores) ou geradores assíncronos (indução). Esses dois tipos de geradores são descritos a seguir.

2.3.6.1 Geradores síncronos

Os geradores síncronos ou alternadores são aparelhos que operam com a velocidade angular do rotor (N_R) em sincronismo com a velocidade angular do campo de translação (N_S). Esses geradores são constituídos por duas partes fundamentais: Uma fixa chamada de estator onde fica o enrolamento de armadura e uma parte móvel chamada de rotor onde fica o enrolamento de campo.

De acordo com Simone (2000), o estator de um gerador síncrono tem como principal função a condução de fluxo magnético, ele é composto pela carcaça externa, por chapas de aço-silício ranhurado e pelo enrolamento de armadura. O rotor é composto basicamente por um enrolamento que ao passar uma corrente contínua por ele é gerado um campo magnético. Os rotores podem ser classificados em pólos lisos e pólos salientes.

O gerador síncrono com rotor de pólos liso ou rotor cilíndrico possui o entreferro uniforme ao longo da periferia do núcleo. Esse rotor é utilizado para geradores velozes com velocidades tangenciais entre 20 m/s e 25 m/s, são conhecidos como turbogeradores (SIMONE, 2000). Na Figura 11 é representado a visão de corte de um gerador de polos lisos.

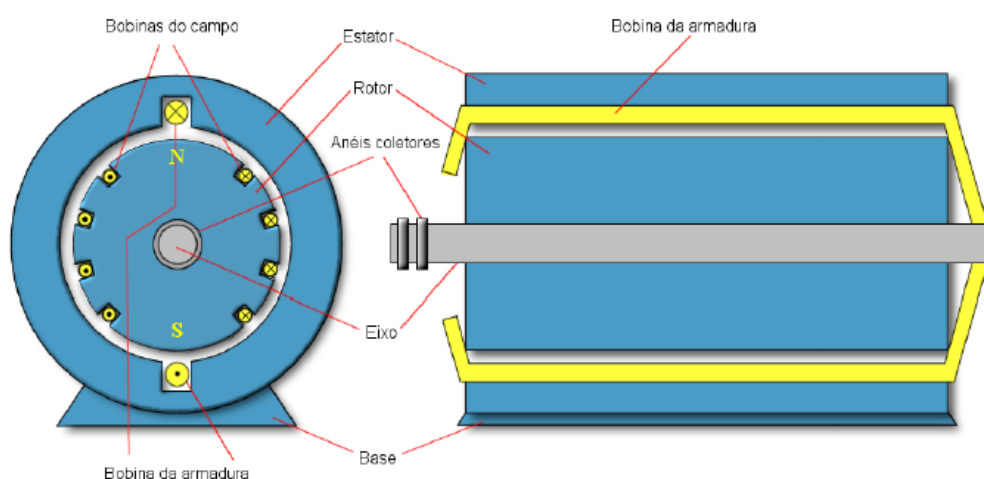


Figura 11 – Visão em Corte de um Gerador de Pólos Lisos
Fonte: Almeida (2015).

O gerador síncrono com rotor de pólos salientes tem o entreferro não uniforme ao longo da periferia do núcleo. Esse rotor é utilizado para geradores com velocidades tangenciais abaixo de 20 m/s (SIMONE, 2000). Na Figura 12 é representado a visão em corte de um gerador de pólos salientes.

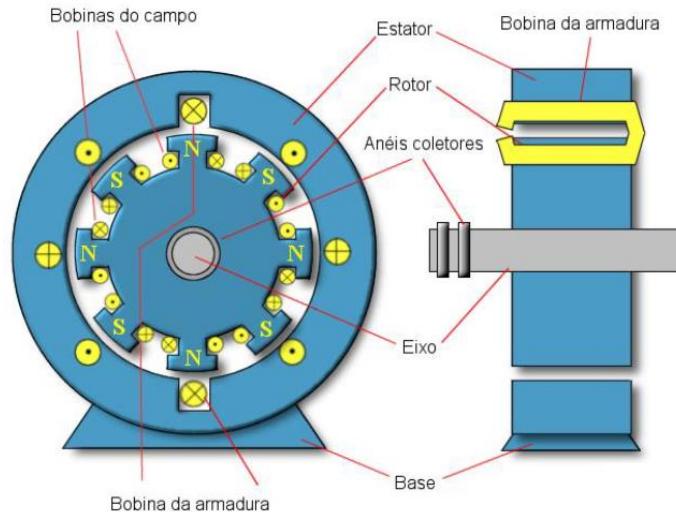


Figura 12 – Visão em Corte de um Gerador Bipolar de Pólos Salientes
Fonte: Almeida (2015).

A velocidade síncrona em rpm, de um gerador de p pólos, com a frequência em Hz é calculada através da equação 2.5:

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2.5)$$

Segundo Lima (2013), as vantagens dos geradores síncronos são:

- não possuem limitações de potência para ser fabricados;
- possuem alta eficiência,
- podem ser conectados diretamente à rede e são mais fáceis de controlar o fator de potência da carga.

Enquanto as desvantagens são:

- requer regulador de tensão anexado ao campo;
- produzem harmônicos devido o controle eletrônico de excitação;
- quando conectados diretamente a rede não devem alterar a velocidade de giro para se evitar instabilidade.

2.3.6.2 Geradores assíncronos ou de indução

Os geradores assíncronos diferentemente dos geradores síncronos nunca operam em sincronismo, e assim a velocidade angular do rotor (N_R) não é igual à velocidade angular do campo de translação (N_S).

O escorregamento (s) entre o campo magnético girante e o rotor de um gerador pode ser obtido em porcentual através da equação 2.6:

$$s = \frac{N_S - N_R}{N_S} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

Analisando a equação 2.6 nota-se que o gerador assíncrono por possuir N_S diferente de N_R , sempre vai ter escorregamento.

Assim como os geradores síncronos, os geradores assíncronos são constituídos basicamente pelo rotor e o estator.

Nos geradores assíncronos o rotor é fabricado com barras em curto circuito e o estator possui dois enrolamentos, um para alimentação das cargas e outro ligados a capacitores para a excitação (SIMONE, 2000).

Segundo Lima (2013), as vantagens dos geradores assíncronos são:

- custo baixo de compra e manutenção;
- não necessita de equipamentos para a sincronização;
- possuem maiores amortecimentos eletromecânicos.

Enquanto as desvantagens são:

- corrente de partida elevada;
- para o seu funcionamento necessitam de uma fonte externa de excitação;
- não fornece um bom controle de frequência e tensão;
- geram harmônicos devido o controle eletrônico de frequência e tensão.

2.3.7 Principais Tecnologias Utilizadas nos Aerogeradores

A maioria dos aerogeradores disponíveis no mercado de geração eólica normalmente utiliza uma das seguintes tecnologias:

- gerador síncrono com rotor bobinado (GSRB);
- gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo (GIRGE);
- gerador de indução com dupla alimentação (GIDA).

A seguir são descritas essas tecnologias.

2.3.7.1 Gerador síncrono com rotor bobinado (GSRB)

Os aerogeradores com GSRB utiliza um gerador síncrono de pólos salientes, com grande quantidade de números de pólos e o rotor bobinado. Os geradores síncronos de pólos salientes vêm recebendo maiores atenção dos fabricantes principalmente pela eliminação da caixa de engrenagem, isso só é possível devido à utilização de geradores síncronos com grande quantidade de pares de pólos (32 pares de pólos normalmente), esse gerador opera com baixas velocidades de rotação, na faixa de 17 rpm e 36 rpm, que é a mesma faixa de velocidade fornecida pelo rotor da turbina eólica. Assim há a conexão direta do rotor da turbina eólica ao rotor do gerador sem a necessidade da caixa de engrenagem para o aumento da velocidade vinda do eixo da turbina eólica (MOREIRA, 2008).

Na configuração da Figura 13, o circuito de excitação é responsável pela regulação do torque eletromagnético do gerador enquanto o inversor é responsável pelo ajuste da potência ativa e potência reativa enviada a rede elétrica. O gerador é conectado à rede através de um sistema de conversão CA/CC/CA (MARQUES, 2004).

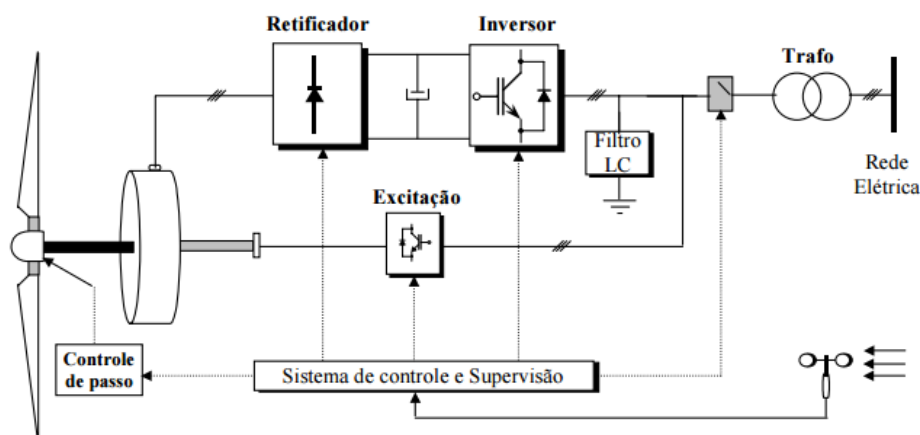


Figura 13 – Aerogerador com GSRB
 Fonte: Marques (2004, p. 69).

Segundo Marques (2004), as principais vantagens do GSRB são:

- operam em baixas velocidades e com faixa de velocidade variável maior;
- diminuição de custos por não utilizar a caixa de engrenagem;
- o conversor de frequência desacopla o aerogerador da rede elétrica (conexão mais suave);

Enquanto as desvantagens são:

- diâmetro enorme do gerador devido à utilização de muitos pólos;
- o gerador necessita de excitação independente;
- tanto o gerador quanto o conversor de potência apresentam preços bastantes elevados.

2.3.7.2 Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo (GIRGE)

O rotor do gerador de indução em gaiola de esquilo recebe esse nome por dispor de barras condutoras curto circuitadas pelos anéis condutores, formando um objeto parecido com uma gaiola de esquilo. Na configuração da Figura 14, o sistema de supervisão tem como função a proteção da turbina eólica, especialmente quando ocorre falta de energia na rede elétrica. O banco de capacitores é utilizado para compensar o fator de potência do GIRGE. E os *Spoilers* protege a turbina contra as altas velocidades (MARQUES, 2004).

O sistema da Figura 14 dispensa o uso de controles eletrônicos de frequência, assim não ocorre à injeção de harmônicos na rede elétrica.

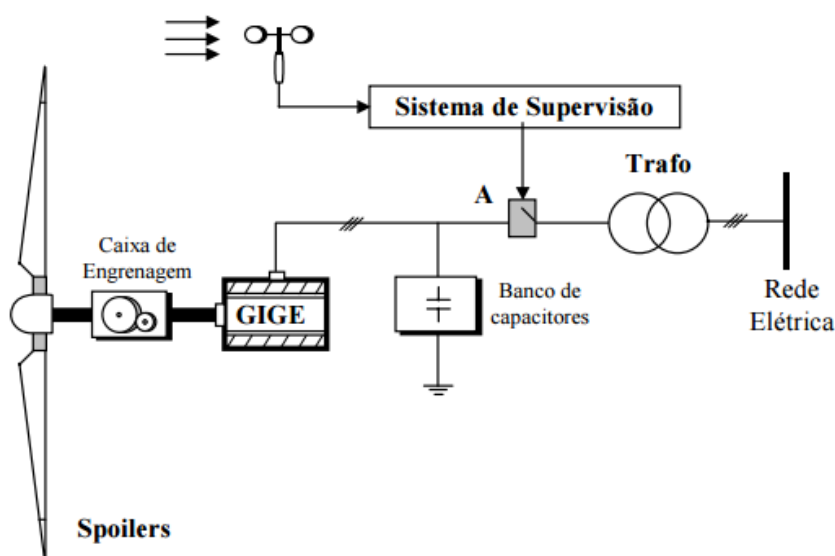


Figura 14 – Aerogerador com GIGE
Fonte: Marques (2004, p. 66).

Segundo Marques (2004), as principais vantagens do GIGE são:

- simplicidade;
- custo baixo;
- robustez.

Enquanto as desvantagens são:

- cargas mecânicas muito altas no rotor e na caixa de engrenagem;
- menor geração de energia elétrica.

2.3.7.3 Gerador de indução com dupla alimentação (GIDA)

O GIDA é um gerador de indução com o rotor bobinado, seu funcionamento é baseado no controle da velocidade de rotação pela variação da resistência do rotor. Nesse tipo de sistema o estator do gerador é conectado diretamente à rede elétrica com a alimentação do rotor vinda de dois conversores de potência e de um transformador elevador (MOREIRA, 2008).

Na configuração da Figura 15, o conversor 1 regula a potência ativa e reativa do circuito estático, já o conversor 2 controla o barramento CC e o fator de potência entre o circuito rotórico e a rede elétrica. O *Crowbar* é um circuito de proteção contra sobretensão no circuito rotórico. Os conversores CA/CC/CA aumenta o coeficiente C_p da turbina (MARQUES, 2004).

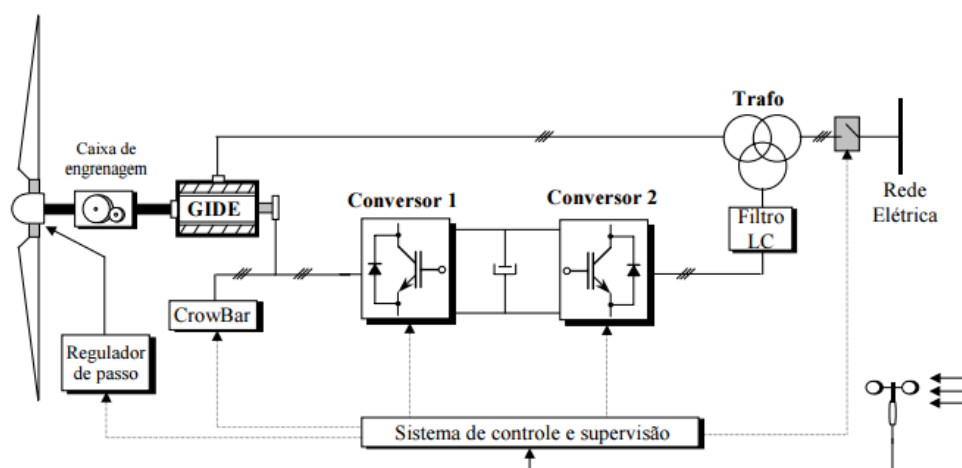


Figura 15 – Aerogerador com GIDA
Fonte: Marques (2004, p. 70).

Segundo Marques (2004), as principais vantagens do GIDA são:

- redução no custo do aerogerador devido à reduzida potência dos conversores de potência do circuito rotórico;
- eficiência elevada decorrente das baixas perdas do conversor.

Enquanto as desvantagens são:

- necessita de manutenção constantemente principalmente para troca das escovas;
- a operação do sistema depende das características da rede.

2.4 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As distorções harmônicas são fenômenos contínuos que causam deformações nas formas de onda da corrente e da tensão de frequência fundamental, no caso do sistema elétrico brasileiro a frequência é de 60 Hz e tanto a corrente como a tensão são senoidais. Essas alterações são causadas pelas cargas com características não lineares conectadas ao sistema elétrico, como por exemplo, máquinas de solda, lâmpadas de descargas, inversores de frequência, computadores, controle eletrônico de frequência dos aerogeradores e demais aparelhos que são constituídos por componentes advindos da eletrônica de potência.

As distorções harmônicas de correntes são provocadas por cargas com características não lineares. Enquanto as distorções de tensão ocorrem devido à

passagem das correntes harmônicas pelas impedâncias de um sistema elétrico (MAGALHÃES, 2010).

Para encontrar a quantidade de distorções presente na tensão ou na corrente pode se utilizar uma poderosa ferramenta matemática conhecida por série de Fourier. A série de Fourier é calculada pela equação 2.7.

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_n \text{sen}(h\omega t) + B_n \text{cos}(h\omega t)] \quad (2.7)$$

Analisando a expressão da série de Fourier da equação 2.7, percebe-se que se trata de uma somatória de expressões compostas por uma componente contínua (A_0), uma expressão senoidal de frequência fundamental (ordem $n = 1$) e por várias expressões senoidais de frequências múltiplas inteiros da frequência fundamental com ordens $h = 2, 3, 4, \dots$. Essa última expressão citada se refere aos harmônicos e eles causam distorções na forma de onda da corrente e da tensão.

No caso do sistema elétrico brasileiro, a frequência fundamental $n=1$ é de 60 Hz, e as múltiplas inteiras são $n=2$ 120 Hz, $n=3$ 180 Hz, $n=4$ 240 Hz, $n=5$ 300 Hz e assim sucessivamente.

Na prática apenas as distorções harmônicas de ordem ímpares são responsáveis pela geração das perturbações. As distribuidoras brasileiras de energia elétrica monitora as distorções harmônicas de ordem 3, 5, 7, 11 e 13 (SCHNEIDER ELECTRIC, 2003).

Na Figura 16 há a representação das formas de ondas obtidas pela série de Fourier, a primeira forma de onda se refere à onda da componente da frequência fundamental ($n=1$), essa onda é uma senoide pura e livre de distorções, a segunda forma de onda é composta pela frequência fundamental ($n=1$) somada com a frequência de ordem $n=3$, ou seja, fundamental mais o terceiro harmônico. A terceira forma de onda é composta pela somatória da fundamental mais o terceiro e quinto harmônico. A quarta forma de onda é composta pela fundamental mais o terceiro, quinto e sétimo harmônico, e assim sucessivamente.



Figura 16 – Formas de Ondas Típicas para Diversas Composições Harmônicas
Fonte: Magalhães (2010, p. 25).

Segundo Paulilo e Teixeira (2010), os efeitos causados pelos harmônicos em um sistema elétrico são:

- alteração de diversos parâmetros elétricos: as presenças de harmônicos causam alteração no valor médio, eficaz e de pico da tensão e da corrente; no valor do fator de potência e no fator de crista;
- em condutores: aumento da circulação de corrente (sobrecorrentes) causando o aquecimento. Aumento da tensão (sobretensões) causando o rompimento da isolação;
- em transformadores: perdas causadas pelo efeito Joule nos enrolamentos, perdas no núcleo e maiores perdas por correntes parasitas nos enrolamentos. Causa ressonâncias entre os enrolamentos e as capacitâncias das linhas ou banco de capacitores. Geram componentes continua de corrente que leva o transformador a sobreaquecer e também a saturação do núcleo rapidamente
- em motores de indução: aquecimento de seus enrolamentos;
- em máquinas síncronas: aquecimento das sapatas polares, torques pulsantes no eixo e tensões harmônicas no circuito de campo;
- em banco de capacitores: aquecimento e rompimento do isolamento, podendo causar a explosão de capacitores;
- em disjuntores: disparos intempestivos de disjuntores;
- em relés: atuação indevida dos relés;
- em aparelhos em geral: alterações no funcionamento dos aparelhos, podendo até danificá-los;
- em sistemas de comunicações: interferências em sistemas de comunicação.

Segundo Martinho (2013), as formas mais conhecidas para a redução da circulação de harmônicos em sistema elétrico são:

- instalação de filtros de harmônicos: os filtros têm a função de reduzir ou eliminar a circulação de harmônicos em um sistema elétrico;
- redistribuição de cargas em outras fontes: nesse caso, as cargas não lineares, que são geradoras de harmônicos, são relocadas no circuito alimentados por outro transformador de uma forma que se reduza os níveis de distorções.
- aumento da potência das fontes: o aumento da potência do transformador resulta na diminuição da impedância de curto circuito próximo da carga, assim diminui as distorções de tensão nos barramentos.

Os filtros podem ser de três tipos: ativo, passivo e híbrido. O passivo é um filtro RLC passa faixa, atua nas menores frequências e possuem preços razoavelmente acessíveis, enquanto o filtro ativo é dinâmico e atua normalmente nas frequências de ordem $n=2$ a $n=51$ esse filtro injeta uma forma de onda contrária que elimina os harmônicos presentes no sistema permanecendo somente a onda da frequência fundamental, possui preços bastante elevados. O filtro híbrido é a junção do ativo e do passivo.

Para o cálculo da distorção harmônica individual de corrente (DHI_i), da distorção harmônica individual de tensão (DHI_v), da distorção harmônica total de corrente (DHT_i) e da distorção harmônica total de tensão (DHT_v) utilizam-se respectivamente as equações (2.8), (2.9), (2.10) e (2.11).

$$DHI_i\% = \frac{100I_h}{I_1} \quad (2.8)$$

$$DHI_v\% = \frac{100V_h}{V_1} \quad (2.9)$$

$$DHT_i\% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \quad (10)$$

$$DHT_v\% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \quad (11)$$

Onde h é a ordem do harmônico, I_h é a componente harmônica de corrente de ordem h , I_1 é a componente da corrente de frequência fundamental, V_h é a componente harmônica de tensão de ordem h e V_1 é a componente da tensão de frequência fundamental.

2.5 FONTES DE GERAÇÃO DE HARMÔNICOS DOS AEROGERADORES

Além da geração de harmônicos provocados pelas cargas, as fontes geradoras de energia também podem injetar distorções harmônicas em um sistema elétrico.

No caso dos aerogeradores, o seu sistema de controle de frequência (conversores de frequência), usado para garantir o sincronismo com o sistema elétrico, são os responsáveis pela geração de harmônicos (LIMA, 2013).

Os conversores de frequência conforme Figura 17, são constituídos por um retificador, um link DC e um inversor.

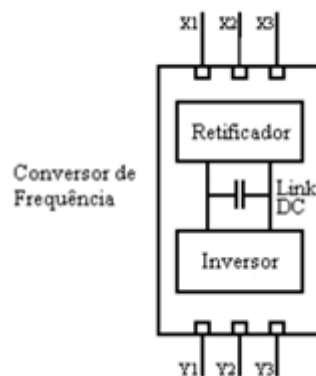


Figura 17 – Componentes de um Conversor de Frequência
Fonte: Magalhães (2010, p. 29).

O retificador e o inversor de um conversor de frequência são compostos por diodos e IGBT. Esses dois componentes eletrônicos dão origem as correntes de frequências harmônicas em um sistema elétrico.

Existem basicamente duas formas de se conectar os aerogeradores nas redes elétricas: conexão direta ou através de conversores eletrônicos de frequência, conforme Figura 18.

A conexão direta por não possuir na sua constituição um sistema de controle eletrônico da frequência, se caracteriza por não gerar correntes harmônicas, porém se torna muito severa para a rede elétrica pelo fato de não dispor de um sistema de controle da frequência, com isso os efeitos causados pela variação dos ventos no eixo mecânico são transmitidos para a rede elétrica, assim são permitidas apenas pequenas variações na velocidade do eixo (ROSAS, ESTANQUEIRO, 2003).

Na conexão direta pode se utilizar geradores síncronos com circuito de excitação, geradores assíncronos com rotores gaiola ou rotores bobinados, conforme Figura 18.

A conexão através de conversores eletrônicos de frequência se caracteriza por fornecer uma maior flexibilidade ao sistema mecânico, permitindo o controle da velocidade de giro do eixo mecânico, assim ocorre à eliminação dos picos de potência e variações repentinas de torque. As variações na velocidade do vento não são transmitidas para a rede elétrica, em contrapartida o sistema de controle eletrônico da frequência injeta corrente harmônicas na rede elétrica (ROSAS, ESTANQUEIRO, 2003).

Na conexão com conversores eletrônicos de frequência pode se utilizar geradores síncronos com circuito de excitação independente, geradores síncronos sem o uso do multiplicador de velocidade, geradores síncronos com excitação com ímãs permanente sem multiplicador de velocidade e geradores assíncronos com rotores gaiola, conforme Figura 18.

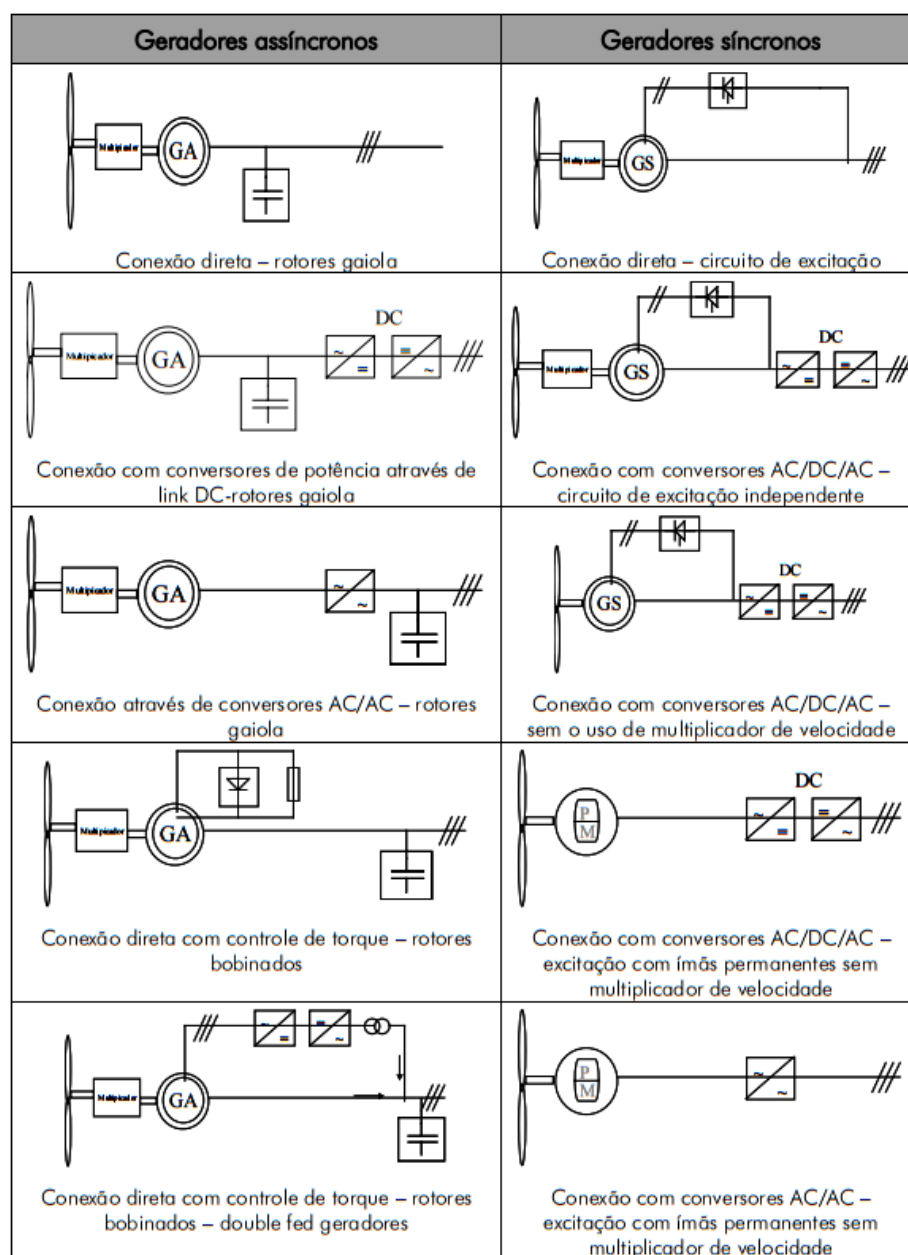


Figura 18 – Principais Tipos e Formas de Conexão de Turbinas Eólicas.
 Fonte: Rosas e Estanqueiro (2003, p. 41).

2.6 LEGISLAÇÕES SOBRE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Como este trabalho tem por finalidade a análise das distorções harmônicas provocadas pelos sistemas de controle de frequência dos aerogeradores, a seguir são descritas as principais normas relacionadas aos harmônicos na geração de energia elétrica.

2.6.1 Norma Técnica ABNT NBR IEC 61400-21

A norma técnica brasileira NBR IEC 61400-21 de 2010, cujo título é turbinas eólicas: medição e avaliação das características da qualidade da energia elétrica (QEE) de aerogeradores conectados à rede tem por finalidade “oferecer uma metodologia uniforme que assegure a consistência e exatidão na apresentação, ensaios e na avaliação da qualidade da energia elétrica de aerogeradores” (ABNT, 2010, p. 7).

A NBR IEC 61400-21 se aplica a aerogeradores individuais com conexão trifásica à redes de média ou alta tensão e com variação de frequência de ± 1 Hz (ABNT, 2010).

Segundo a NBR IEC 61400-21 (ABNT, 2010), essa norma foi escrita visando atender os seguintes públicos:

Fabricantes de aerogeradores que estejam procurando atender às características da qualidade da qualidade da energia elétrica claramente definidas; compradores de aerogeradores, ao especificar essas características da qualidade da energia elétrica; operadores de aerogeradores que possam ser solicitados a verificar se as características divulgadas ou exigidas para a qualidade da energia elétrica estão sendo atendidas; acessantes que devem ser capazes de determinar, com exatidão e de forma justa, o impacto de um aerogerador na qualidade da tensão, para assegurar que a instalação tenha sido projetada de forma a respeitar as exigências para a qualidade da tensão; autoridades de certificação de aerogeradores, ou organização de ensaio componente, na avaliação das características da qualidade da energia elétrica gerada por um dado tipo de aerogerador; agentes de planejamento, de regulação e de operação da rede elétrica, que devem ser capazes de determinar os requisitos de conexão à rede exigidos para um aerogerador.

A NBR IEC 61400-21 estabelece que a distorção harmônica total de tensão, incluindo todos os harmônicos até 50ª ordem deve ser menor que 5%, essa medição deve ser feita em valores médios nos terminais de saída do aerogerador pelo tempo de 10 minutos em cada intervalo de 10% da potência ativa nominal (P_n) do aerogerador, ou seja, 0, 10, 20, ..., 100% da P_n (ABNT, 2010).

2.6.2 ANEEL - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist)

A ANEEL por meio de documentos intitulados de procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (Prodist) padroniza e normaliza as atividades técnicas relacionadas à distribuição de energia elétrica no Brasil.

Segundo o Prodist (ANEEL, 2016), o módulo 8 do Prodist se refere à qualidade da energia elétrica e tem como objetivos:

Estabelecer os procedimentos relativos QEE abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado; para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia, caracterizam os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE; para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões de responsabilidades.

Segundo a Prodist (ANEEL, 2016), as recomendações expressas no módulo 8, relacionadas com a QEE devem ser seguidas por:

Consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição; produtores de energia; distribuidoras; agentes importadores ou exportadores de energia elétrica; transmissoras detentoras de demais instalações de transmissão (DIT) e ONS.

Tabela 2 – Valores de Referência Globais das Distorções Harmônicas Totais (em Porcentagem da Tensão Fundamental)

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (%)
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13.8 \text{ kV}$	8
$13.8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N \leq 230 \text{ kV}$	3

Fonte: Prodist (ANEEL, 2016).

A Tabela 2 e a Tabela 3, cujos dados foram retirados do Prodist, mostram respectivamente os valores de referência para a distorção harmônica total de tensão e para a distorção individual de tensão.

Tabela 3 – Níveis de Referência para Distorções Individuais de Tensão (em Porcentagem da Tensão Fundamental)

Ordem Harmônica	Distorções Harmônica Individual de Tensão (%)				
	$V_N \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} \leq V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} \leq V_N \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_N \leq 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	> 25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	> 21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	> 12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: Prodist (ANEEL, 2016).

2.6.3 ONS - Procedimentos de Rede

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) através de documentos intitulados de procedimentos de rede no submódulo 2.8 (gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores

de fronteira, e de seus componentes), estabelece fronteiras relacionadas à QEE e valores limites de referência para as distorções harmônicas que devem ser seguidos pelas transmissoras de energia elétrica.

Segundo os procedimentos de rede (ONS, 2010), os objetivos do submódulo 2.8 são:

Balizar as ações do ONS relativas ao Plano de Ampliações e Reforços na Rede Básica (PAR) elaborado pelo ONS com a participação dos agentes; subsidiar os estudos de planejamento e programação da operação, bem como a própria operação em tempo real do sistema de transmissão; subsidiar os usuários conectados ou que requeiram conexão à rede básica ou aos barramentos dos transformadores de fronteira com as informações necessárias sobre a QEE nos pontos de conexão; subsidiar os agentes transmissores com as informações sobre a QEE necessárias ao dimensionamento de suas instalações; fornecer aos usuários, acessantes e concessionárias de transmissão, informações sobre os limites de perturbação individual relativos aos indicadores de QEE; permitir ao ONS a verificação da conformidade do desempenho das funções transmissão da rede básica em relação aos requisitos mínimos estabelecidos nos procedimentos de rede e nos editais de licitação das instalações de transmissão.

Tabela 4 – Limites Globais Inferiores de Tensão em Porcetagem da Tensão Fundamental

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3, 5, 7	5%	2, 4, 6	2%	3, 5, 7	2%	2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%	≥ 8	1%	9, 11, 13	1,5%	≥ 8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥ 27	1%			≥ 27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Fonte: Procedimentos de Rede (ONS, 2010).

A Tabela 4 e a Tabela 5, mostram respectivamente os limites globais inferiores de tensão em porcentagem da tensão fundamental e os limites individuais

em porcentagem da tensão fundamental. Esses limites são cobrados das transmissoras de energia elétrica pelo ONS.

Tabela 5 – Limites Individuais em Porcetagem da Tensão Fundamental

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3 a 25	1,5%	todos	0,6%	3 a 25	0,6%	todos	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95% = 1,5%			

Fonte: Procedimentos de Rede (ONS, 2010).

No Brasil a ABNT, a ANEEL, o ONS e os demais órgão regulamentadores ainda não têm indicado valores limites para a injeção de correntes harmônicos no sistema elétrico.

2.6.4 Norma IEEE 519

Diferentemente dos agentes regulamentadores brasileiros, que se preocupam e cobram das geradoras e transmissoras de energia elétrica apenas os limites de distorções harmônicas de tensão, muitos agentes de outros países têm se preocupado e exigido das geradoras e transmissoras de energia elétrica também o controle dos níveis de distorções harmônicas de correntes.

O Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), nos Estados Unidos por meio da norma IEEE 519 de 2014 *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* (Prática e Requisitos para Controle de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência Recomendado) define os limites de tensões harmônicas e também os limites de correntes harmônicas aceitas e que podem ser injetados em uma rede elétrica.

Tabela 6 – Limites de Distorção Individual e Total de Tensão.

Tensão no Barramento	Harmônica Individual (%)	Distorção Harmônica Total THD (%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5

Fonte: IEEE 519 2014 (IEEE, 2014).

Os dados da Tabela 6 e a Tabela 7 foram retirados da norma IEEE 519 2014 e demonstram respectivamente os limites de distorção harmônica individual e total de tensão e os limites de distorção harmônica de corrente para tensão entre 120 V e 69 kV.

Tabela 7 – Limites em % da Distorção Harmônica de Corrente para Tensão entre 120 V e 69 kV.

I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	THD (%)
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	6,0	1,4	20,0

Fonte: IEEE 519 2014 (IEEE, 2014).

Na Tabela 7 o h se refere à ordem do harmônico, I_{sc} é a máxima corrente de curto circuito no ponto de conexão comum, I_L é a corrente máxima demandada pela carga no ponto de conexão comum.

O ponto de conexão comum em uma rede elétrica é o ponto eletricamente mais próximo de uma determinada carga, ele se situa entre a concessionária de energia e o consumidor, é o ponto mais próximo do lado da concessionária do consumidor, é neste ponto que as concessionárias devem medir as distorções harmônicas (ABNT, 2010).

3 ANÁLISE COMPUTACIONAL

3.1 DADOS DO AEROGERADOR

Nas simulações foram utilizados dados de um aerogerador com GSRB obtidos junto a um fabricante de aerogerador nacional. Esse aerogerador usa um gerador com potência nominal de 2.000 kW, tensão por fase de 400 V e as medições de distorções harmônicas foram feitas de acordo com norma técnica NBR IEC 61400-21.

A Tabela 8 apresenta os níveis de distorções harmônicas individuais de corrente (DHI_i) e as correntes eficazes de frequências harmônicas desse aerogerador fornecendo 100% de sua potência a uma carga puramente resistiva. O fabricante não forneceu o ângulo das correntes de frequências harmônicas.

Tabela 8 – Distorção Harmônica de Corrente Injetadas pelo Aerogerador.

(continua)

Ordem (h)	Frequência (Hz)	DHI (%)	Corrente harmônica eficaz (A)
2	120	0,27	7,79423
3	180	0,18	5,19615
4	240	0,12	3,46410
5	300	0,58	16,74316
6	360	0,06	1,73205
7	420	0,58	16,74316
8	480	0,05	1,44338
9	540	0,08	2,30940
10	600	0,05	1,44338
11	660	0,38	10,96966
12	720	0,05	1,44338
13	780	0,33	9,52628
14	840	0,06	1,73205

Tabela 8 – Distorção Harmônica de Corrente Injetadas por um Aerogerador.
(continuação)

15	900	0,09	2,59808
16	960	0,05	1,44338
17	1020	0,23	6,63953
18	1080	0,04	1,15470
19	1140	0,13	3,75278
20	1200	0,03	0,86603
21	1260	0,03	0,86603
22	1320	0,03	0,86603
23	1380	0,09	2,59808
24	1440	0,03	0,86603
25	1500	0,05	1,44338
26	1560	0,03	0,86603
27	1620	0,16	4,61880
28	1680	0,02	0,57735
29	1740	0,05	1,44338
30	1800	0,02	0,57735
31	1860	0,03	0,86603
32	1920	0,02	0,57735
33	1980	0,02	0,57735
34	2040	0,01	0,28868
35	2100	0,02	0,57735
36	2160	0,01	0,28868
37	2220	0,02	0,57735
38	2280	0,01	0,28868
39	2340	0,01	0,28868
40	2400	0,01	0,28868
41	2460	0,02	0,57735
42	2520	0,01	0,28868

Tabela 8 – Distorção Harmônica de Corrente Injetadas por um Aerogerador.
(conclusão)

43	2580	0,01	0,28868
44	2640	0,01	0,28868
45	2700	0,01	0,28868
46	2760	0,01	0,28868
47	2820	0,01	0,28868
48	2880	0,01	0,28868
49	2940	0,01	0,28868
50	3000	0,01	0,28868

Fonte: Dados fornecidos por um fabricante de aerogerador.

Na medição o fabricante usou a conexão estrela-estrela aterrado, onde o gerador trifásico foi conectado em estrela aterrado a uma carga trifásica em estrela aterrado, devido a isso nos cálculos a seguir foram considerados a conexão do aerogerador à carga em estrela-estrela equilibrada conforme Figura 19.

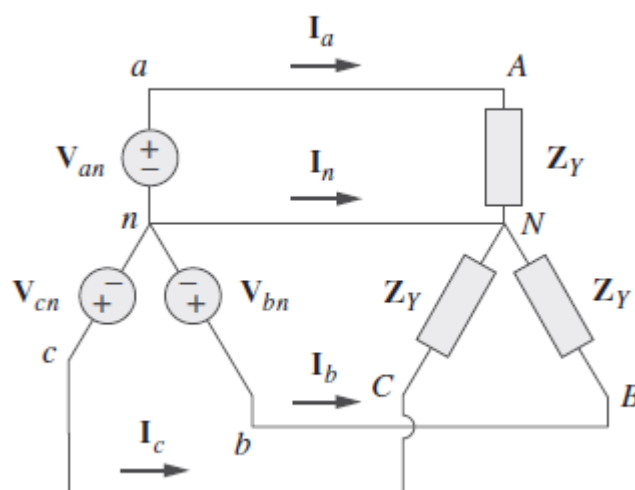


Figura 19 – Conexão Estrela-Estrela Equilibrada.
Fonte: Alexander e Sadiku (2013).

Com se trata de uma conexão em estrela-estrela equilibrada as tensões das 3 fases do aerogerador ao longo do tempo t considerando a Figura 19 podem ser representadas por:

$$V_{an} = \sqrt{2} \cdot 400 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 60t) \quad (3.1)$$

$$V_{bn} = \sqrt{2} \cdot 400 \cdot \text{sen}\left(2\pi \cdot 60t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.2)$$

$$V_{cn} = \sqrt{2} \cdot 400 \cdot \text{sen}\left(2\pi \cdot 60t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.3)$$

Para o cálculo da corrente drenada da fase A (I_a) foi utilizado a equação 3.4, onde P_n é a potência trifásica ativa nominal do gerador (2.000 kW) e V_{an} é a tensão da fase A do gerador (400 V). Foi obtida uma corrente drenada da fase A de 2.887 A, que é a máxima corrente que o aerogerador pode entregar à carga. As correntes drenadas da fase B (I_b) e da fase C (I_c) também possuem módulo de corrente igual a 2.887 A, porém estão defasadas de 120° e -120° em relação a I_a .

$$I_a = \frac{P_n}{\sqrt{3}V_{an}} \quad (3.4)$$

Para encontrar o valor da resistência trifásica que drena uma corrente de 2.887 A foi utilizada a equação 3.5, sendo obtida uma resistência trifásica em estrela aterrada composta por 3 resistências monofásica de 0.13856 Ω .

$$R = \frac{\sqrt{3}V_n^2}{P_n} \quad (3.5)$$

A distorção harmônica total de corrente (DHT_i) foi calculada pela equação 3.6, onde foi feita a somatória das correntes harmônicas eficazes da Tabela 8 ao quadrado, depois foi calculado a raiz quadrada dessa somatória dividido pela corrente nominal do aerogerador (2.887 A). Para converter esse valor para porcentagem, ele foi multiplicado por 100. Dessa forma foi obtida uma DHT_i igual a 1,0941 %.

$$DHT_i = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=50} I_h^2}}{I_n} \quad (3.6)$$

3.2 MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA NO ATP

A modelagem e a simulação do fluxo de potência e das injeções de correntes harmônicas do aerogerador foram realizadas no programa ATP.

O ATP é um programa mundialmente utilizado na simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas através do método da matriz de admitância de barras. A formulação matemática do ATP é fundamentada na regra da integração trapezoidal (TAVARES; CAMPOS; PRADO, 2003).

O ATP é capaz de simular e encontrar solução para problemas em circuitos monofásicos e polifásicos, também é capaz de medir tensões e correntes de frequências harmônicas de um sistema de potência.

As modelagens dos componentes utilizados no programa ATP para simulação do fluxo de potência e das injeções de correntes harmônicas do aerogerador para a carga são descritos a seguir.

Inicialmente foi feita a configuração da simulação do programa ATP, conforme a Figura 20, a simulação foi feita no domínio do tempo, o delta T (0.000001 s) é o passo da integração no qual a simulação irá integrar o tempo de simulação, Tmax (0,5 s) é o tempo máximo da simulação, Xopt igual a 0 significa que as indutâncias dos componentes devem ser informadas em mH e Copt igual a 0 significa que as capacitâncias devem ser informadas em μF .

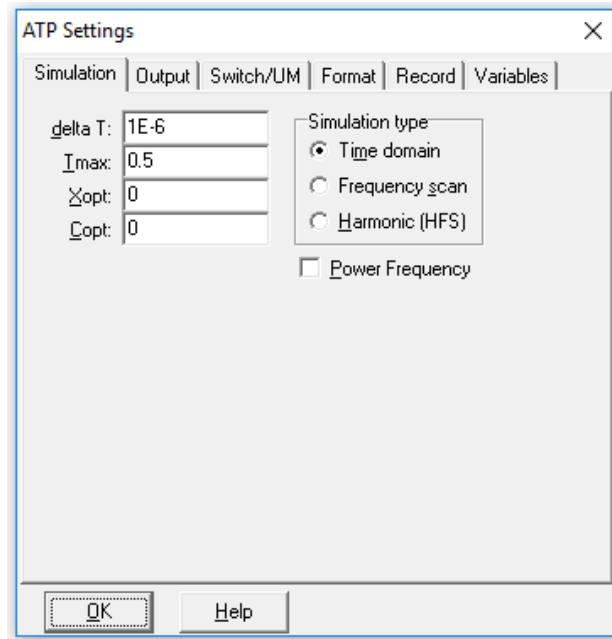


Figura 20 – Configuração da Simulação do ATP.
Fonte: Autoria própria gerada pelo programa ATP.

No programa ATP o gerador pode ser representado pela fonte trifásica de tensão AC conectada em estrela equilibrada da Figura 21, onde Amp. é a amplitude da fonte de tensão (566 V), esse valor foi calculado pela equação 3.7 sendo V_n a tensão nominal do aerogerador (400 V); f é a frequência elétrica padrão da rede (60 Hz); T_{start} igual a -1 é o tempo do início do funcionamento da fonte, foi escolhido o valor -1 para que a fonte já esteja em funcionando quando for iniciada a simulação (em $t = 0$ s); T_{stop} é o tempo do fim do funcionamento da fonte, foi escolhido o valor 1 para que a fonte seja desligado só depois de encerradas as simulações (em $T_{max} = 0,5$ s); Pha (0°) é o ângulo da tensão da fase A; $A1$ (0°) é defasagem angular da tensão da fase A.

$$V_p = \sqrt{2}V_n \quad (3.7)$$

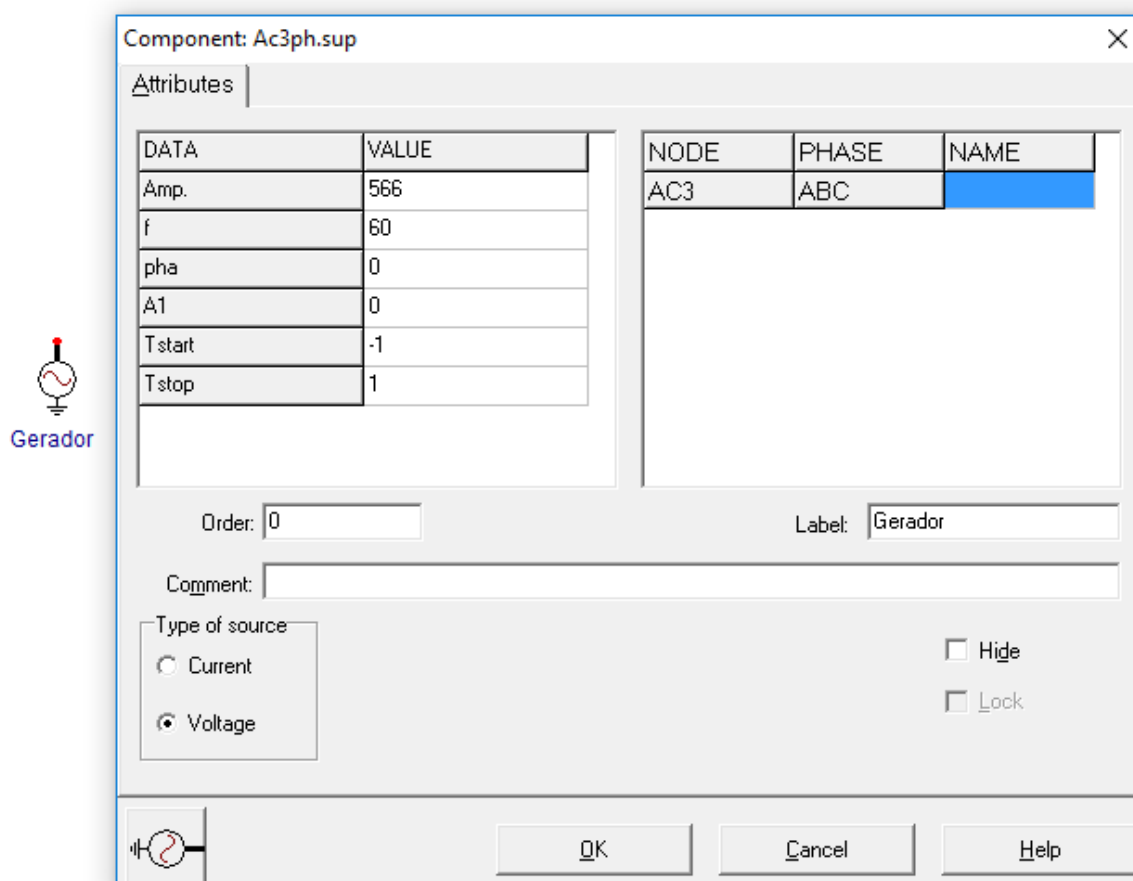


Figura 21 – Fonte de Tensão AC que Representa um Gerador Trifásico.
Fonte: Autoria própria gerada pelo programa ATP.

As injeções das correntes de frequências harmônicas (h) de 2ª até a 50ª ordem, podem ser representadas por 49 fontes trifásicas de corrente AC, onde cada fonte de corrente representa uma injeção de corrente de frequência harmônica de ordem h .

A Figura 22 mostra a fonte de corrente AC conectada em estrela equilibrada que representa a injeção de corrente de frequência harmônica de ordem $h = 2$, no qual a amplitude da fonte de corrente é de 11,0227 A (raiz de 2 multiplicado por 7,79423 A); a frequência é 120 Hz (h igual a 2 multiplicado por 60 Hz) e demais entradas de dados conforme a fonte de tensão que representa o gerador. Devido ao fato do fabricante não ter fornecido o ângulo das correntes de frequências harmônicas foram considerados ângulo 0° para todas as fontes.

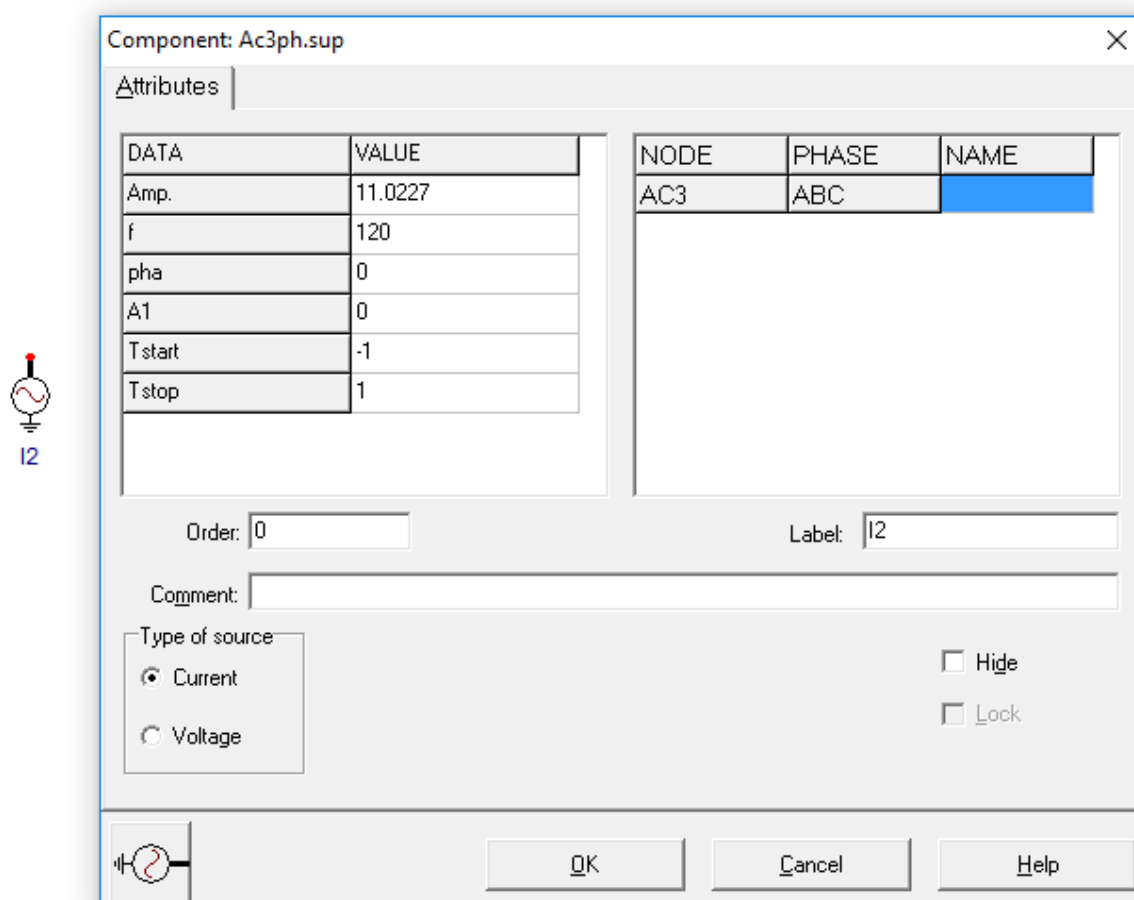


Figura 22 – Fonte de Corrente AC que Representa a Injeção de Corrente Harmônica de Ordem h=2.

Fonte: Autoria própria gerada pelo programa ATP.

As outras fontes de correntes de frequências harmônicas foram adicionadas conforme a Figura 22, alterando o valor da amplitude e da frequência da fonte pelos valores da Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de Corrente e de Frequência das Fontes de Correntes de Frequências Harmônicas.

(continua)

Fonte de corrente de frequência harmônicas (h)	Frequência (Hz)	Corrente de pico de frequência harmônica (A)
3	180	7,34847
4	240	4,89898
5	300	23,67840
6	360	2,44949
7	420	23,67840

Tabela 9 – Valores de Corrente e de Frequência das Fontes de Correntes de Frequências Harmônicas.**(continuação)**

8	480	2,04124
9	540	3,26599
10	600	2,04124
11	660	15,51344
12	720	2,04124
13	780	13,47219
14	840	2,44949
15	900	3,67423
16	960	2,04124
17	1020	9,38971
18	1080	1,63299
19	1140	5,30723
20	1200	1,22474
21	1260	1,22474
22	1320	1,22474
23	1380	3,67423
24	1440	1,22474
25	1500	2,04124
26	1560	1,22474
27	1620	6,53197
28	1680	0,81650
29	1740	2,04124
30	1800	0,81650
31	1860	1,22474
32	1920	0,81650
33	1980	0,81650
34	2040	0,40825
35	2100	0,81650
36	2160	0,40825
37	2220	0,81650

Tabela 9 – Valores de Corrente e de Frequência das Fontes de Correntes de Frequências Harmônicas.

			(conclusão)
38	2280		0,40825
39	2340		0,40825
40	2400		0,40825
41	2460		0,81650
42	2520		0,40825
43	2580		0,40825
44	2640		0,40825
45	2700		0,40825
46	2760		0,40825
47	2820		0,40825
48	2880		0,40825
49	2940		0,40825
50	3000		0,40825

Fonte: Autoria própria.

A carga trifásica em estrela equilibrada pode ser representada conforme a Figura 23, como as medições das distorções harmônicas feitas pelo fabricante do aerogerador estudado foi usada uma carga trifásica puramente resistiva o valor da indutância (L) e da capacitância (C) é igual a zero. Conforme calculado na seção 3.2 o valor do R é igual a 0,13856 Ω .

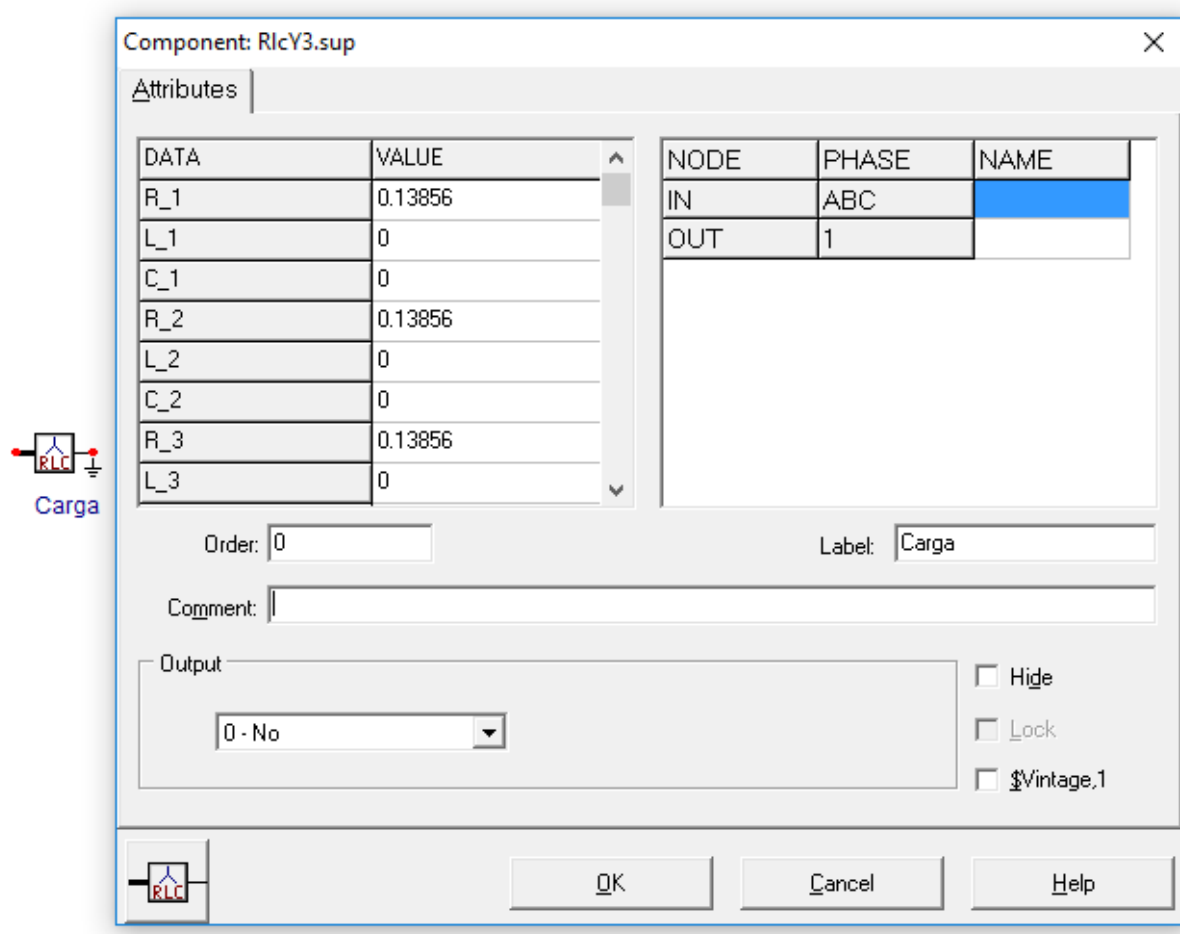


Figura 23 – Carga Trifásica.

Fonte: Autoria própria gerada pelo programa ATP.

O sistema equivalente ao aerogerador e a carga são representados na Figura 24, onde o gerador mais as correntes de frequências harmônicas da 2ª até 50ª ordem representa o aerogerador.

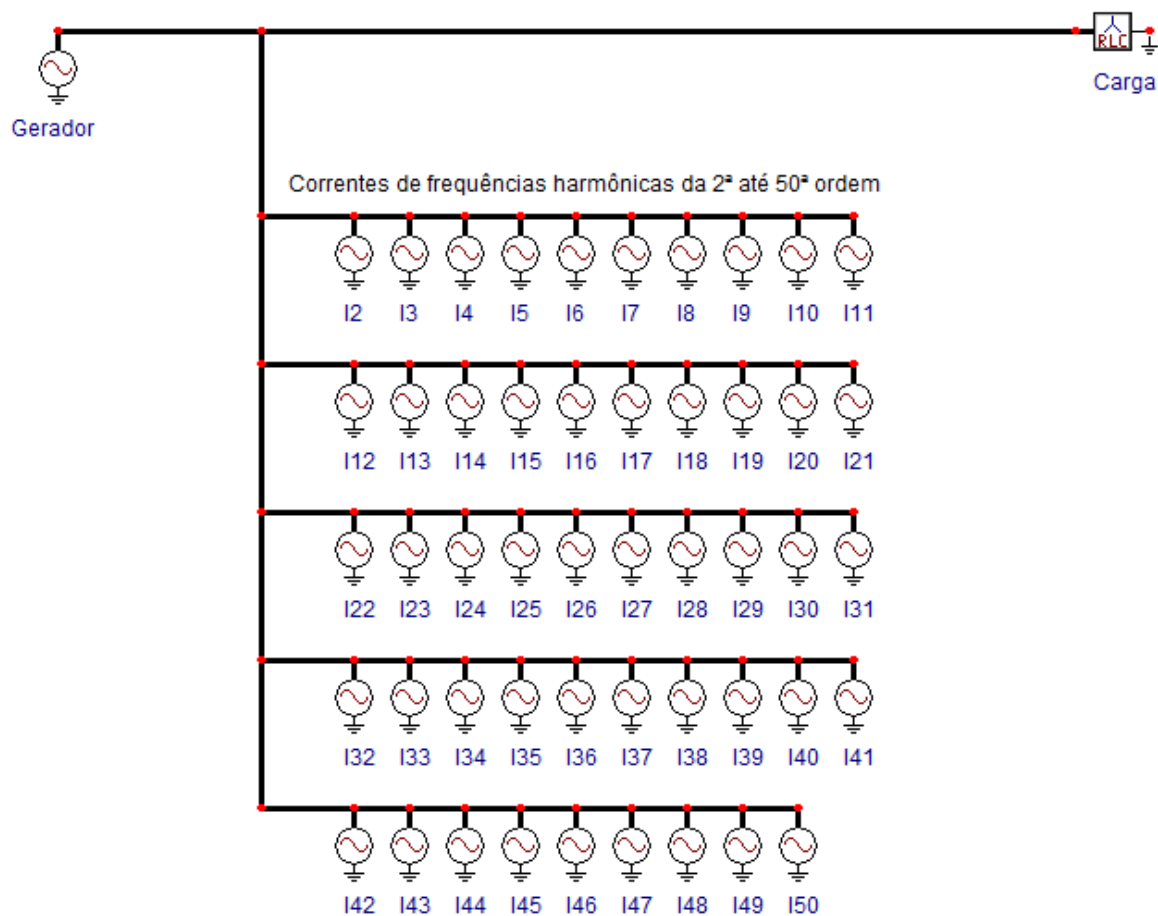


Figura 24 – Sistema que Representa o Aerogerador Alimentando uma Carga.
 Fonte: Autoria própria gerada pelo programa ATP.

Para a aquisição dos dados da corrente e da tensão ao longo do tempo de simulação foram utilizados respectivamente o medidor de corrente (A) e o medidor de tensão (B) da Figura 25.



Figura 25 – Medidor de Corrente (A) e Medidor de Tensão (B).
 Fonte: Autoria própria gerada pelo programa ATP.

3.3 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.3.1 Análise de Um Sistema Composto por 1 Aerogerador Individual Alimentando Uma Carga Puramente Resistiva

O primeiro caso simulado foi de um aerogerador trifásico conectado em estrela equilibrada alimentando uma carga trifásica resistiva conectada em estrela equilibrada com resistência de $0,13856 \Omega$ por fase.

Inicialmente foi simulado o aerogerador sem a injeção de correntes harmônicas, conforme Figura 26. O medidor de tensão obteve os valores das tensões trifásicas ao longo do tempo simulado, enquanto o medidor de corrente obteve os valores das correntes trifásicas ao longo do tempo simulado.

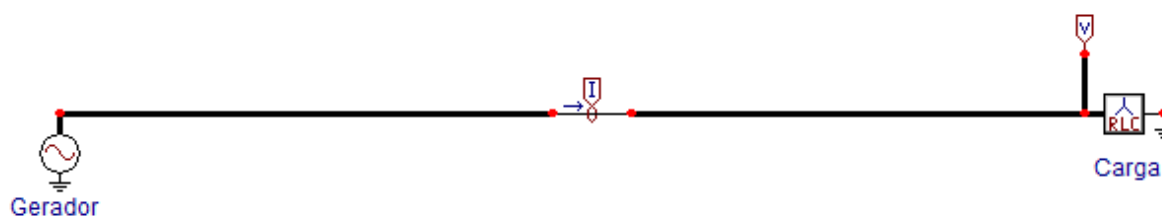


Figura 26 – Aerogerador Individual sem Injeção de Correntes de Frequência Harmônicas.
 Fonte: Autoria própria gerada pelo programa ATP.

O Gráfico 1, gerado com os dados coletados pelo medidor de tensão da Figura 26, mostra as formas de ondas das tensões na carga. Conforme esperado as formas de ondas de tensão da fase A (de cor vermelho), fase B (de cor verde) e fase C (de cor azul) são compostas por senoides puras, defasadas entre si de 120° e livre de distorções harmônicas, a amplitude dessas ondas são de 566 V e os valores eficazes são de 400 V .

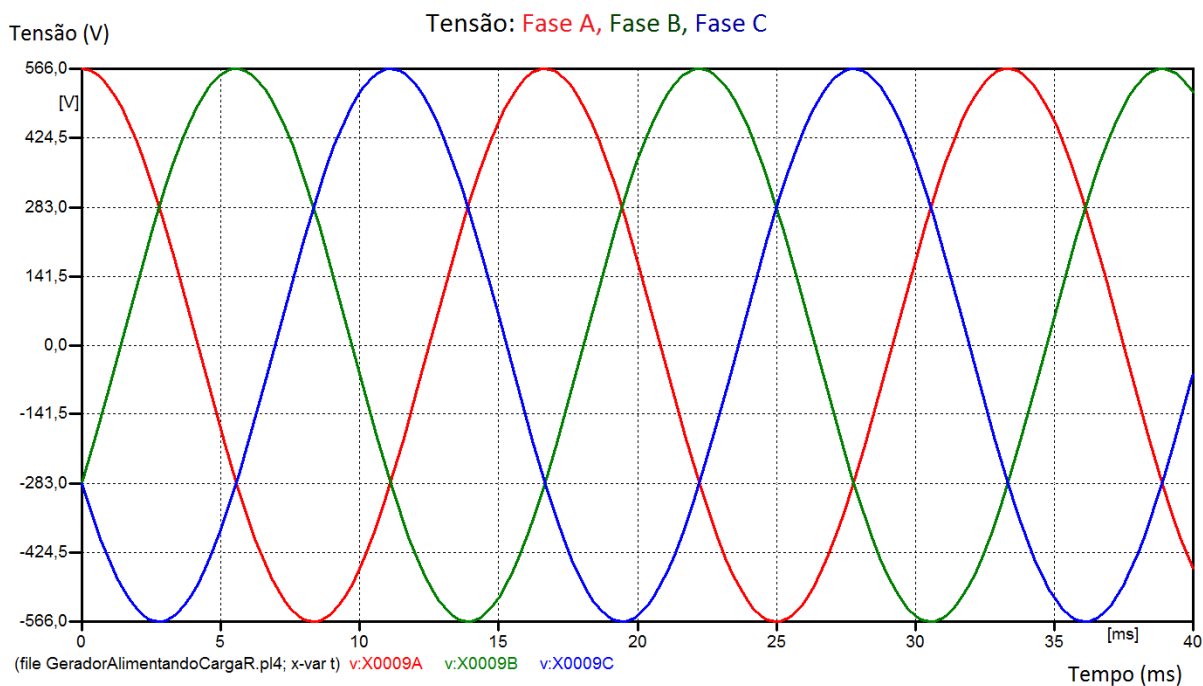


Gráfico 1 – Formas de ondas das tensões trifásicas sem harmônicos de um aerogerador individual.

Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

O Gráfico 2, gerado com os dados coletados pelo medidor de corrente da Figura 26, mostra as formas de ondas das correntes drenadas do aerogerador pela carga. Assim como as formas de ondas das tensões, as formas de ondas das correntes são formadas por senoides puras, defasadas entre si de 120° e livre de distorções harmônicas, a amplitude dessas ondas são de 4.083 A e os valores eficazes são de 2.887 A.

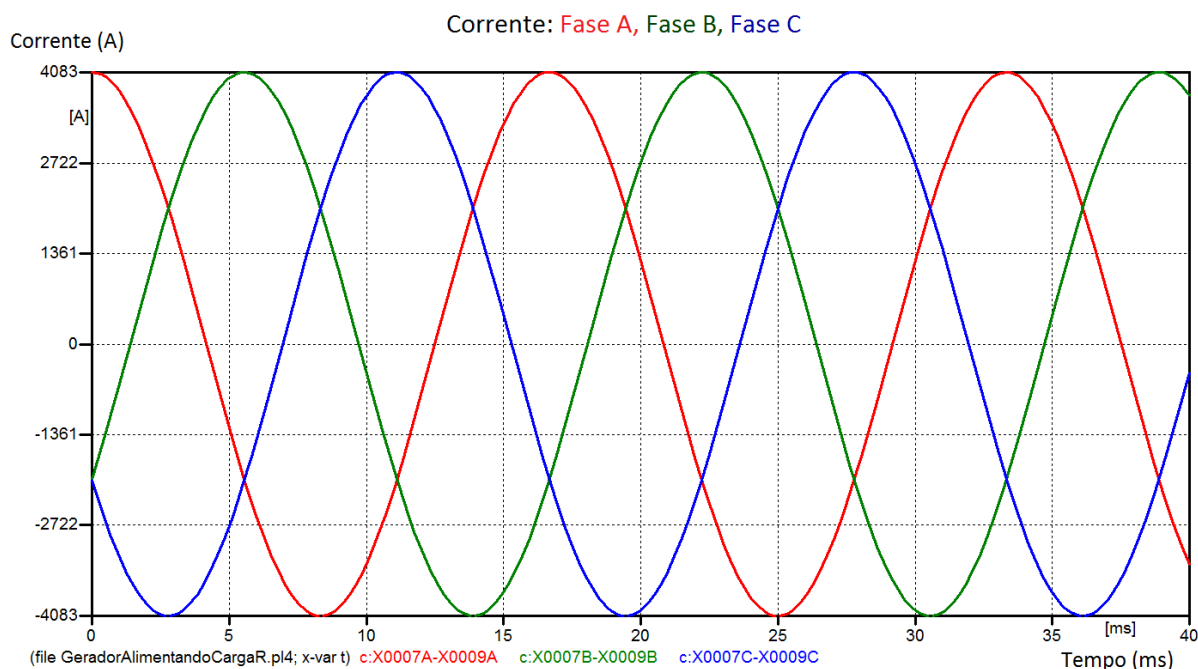


Gráfico 2 – Formas de ondas das correntes drenadas pela carga de um aerogerador individual sem harmônicos.

Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

Por se tratar de uma carga puramente resistiva prevalece a relação de linearidade da lei de ohm $v(t)=Ri(t)$ com R constante, e assim a defasagem entre a tensão e a sua respectiva corrente é zero, conforme Gráfico 3.

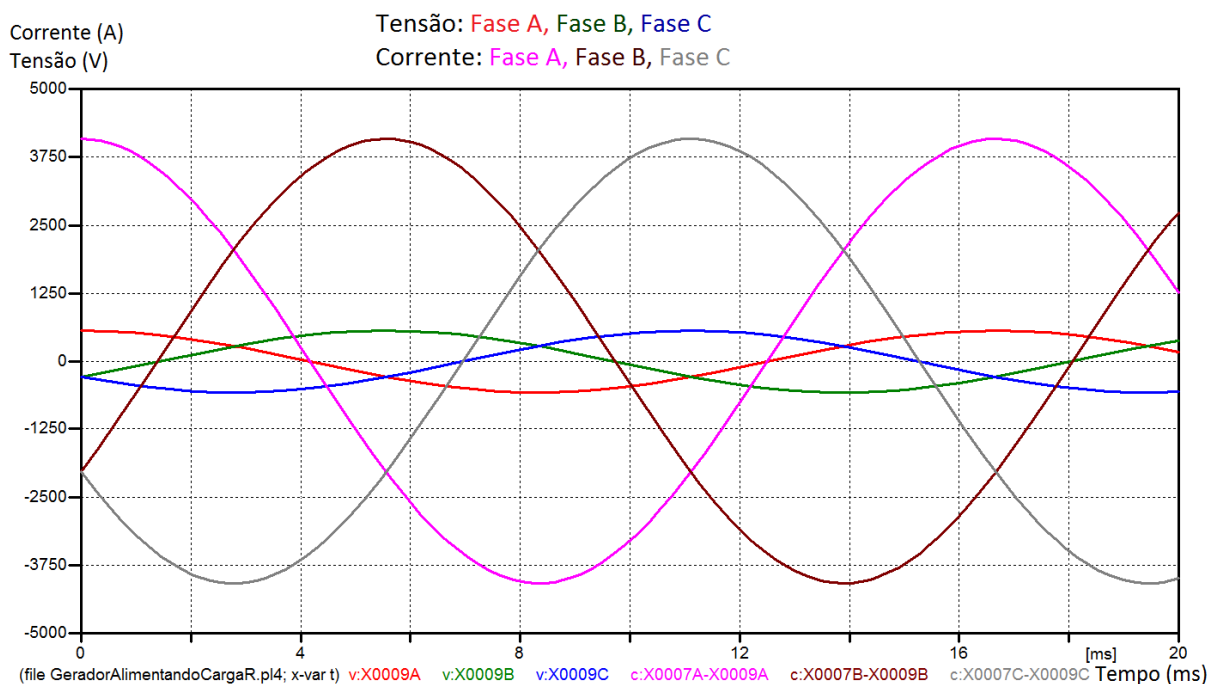


Gráfico 3 – Sobreposição das formas de ondas das tensões e das correntes usando um aerogerador individual sem harmônicos.

Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

As injeções de correntes de frequências harmônicas na carga resistiva trifásica por um aerogerador foram simuladas conforme Figura 27.

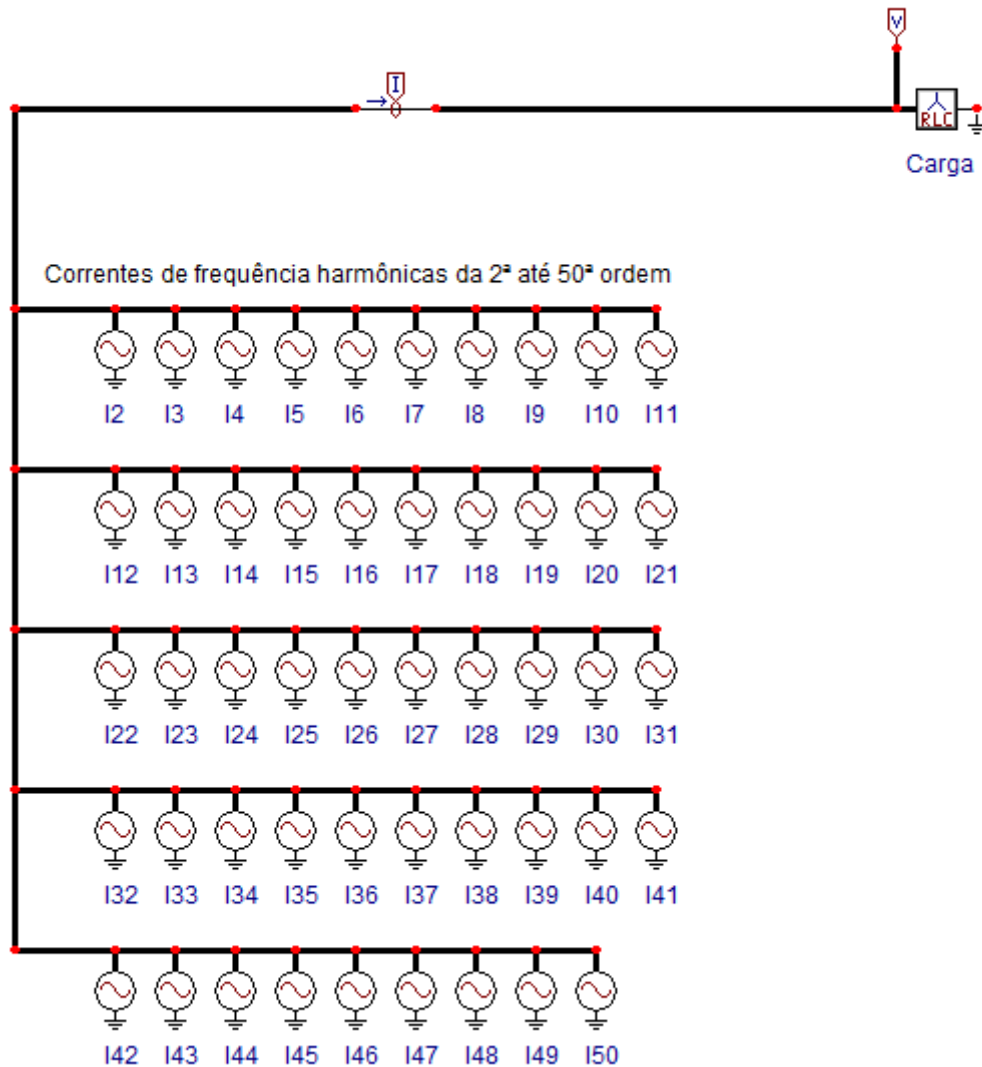


Figura 27 – Injeções de Correntes de Frequências Harmônicas na Carga por um Aerogerador Individual.

Fonte: Autoria própria gerada pelo programa ATP.

O Gráfico 4, gerado com os dados coletados pelo medidor de tensão da Figura 27, mostra as formas de ondas das tensões de frequências harmônicas na carga resistiva, foram encontrados picos de tensões harmônicas na fase A de 23,409 V no semiciclo positivo e -11,860 V no semiciclo negativo (em vermelho), na fase B picos de 10,445 V no semiciclo positivo e -18,921 V no semiciclo negativo (em verde) e na fase C picos de 10,450 V no semiciclo positivo e -18,924 V no semiciclo negativo (em azul).

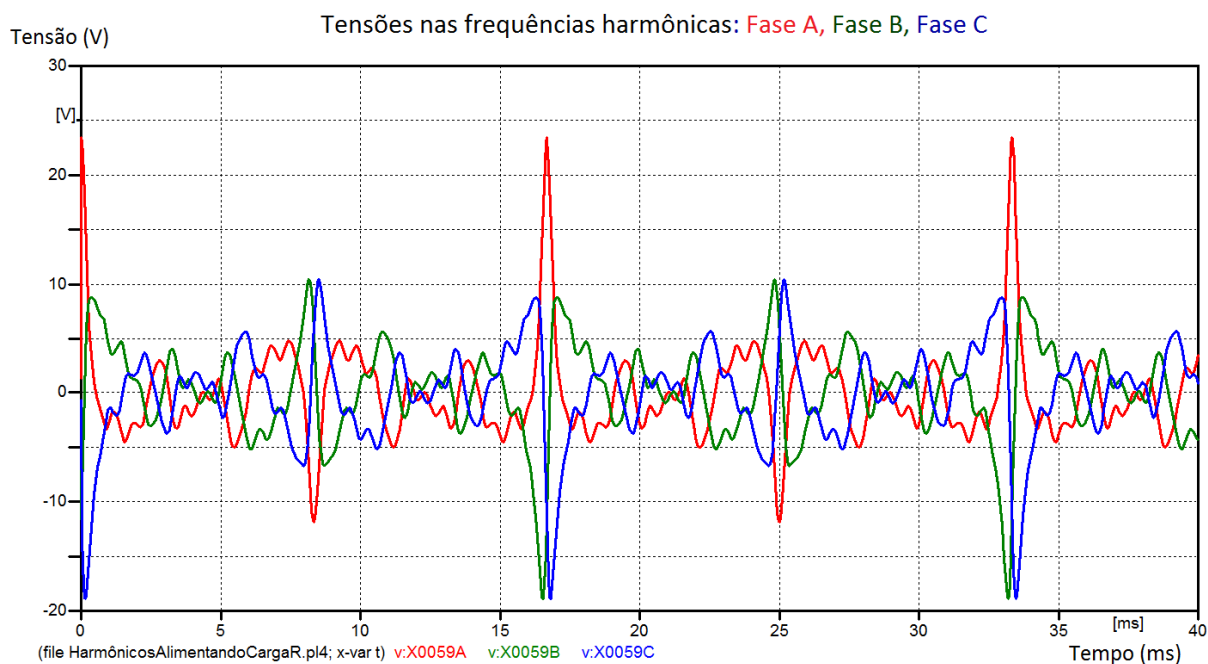


Gráfico 4 – Formas de ondas das tensões de frequências harmônicas na carga utilizado um aerogerador individual.
Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

O Gráfico 5, gerado com os dados coletados pelo medidor de corrente da Figura 27, mostra as formas de ondas das correntes de frequências harmônicas injetadas na carga resistiva, foram encontrados picos de correntes harmônicas na fase A de 168,99 A no semiciclo positivo e -85,73 A no semiciclo negativo (em vermelho), na fase B picos de 75,433 A no semiciclo positivo e -136,58 A no semiciclo negativo (em verde) e na fase C picos de 75,432 A no semiciclo positivo e -136,63 A no semiciclo negativo (em azul).

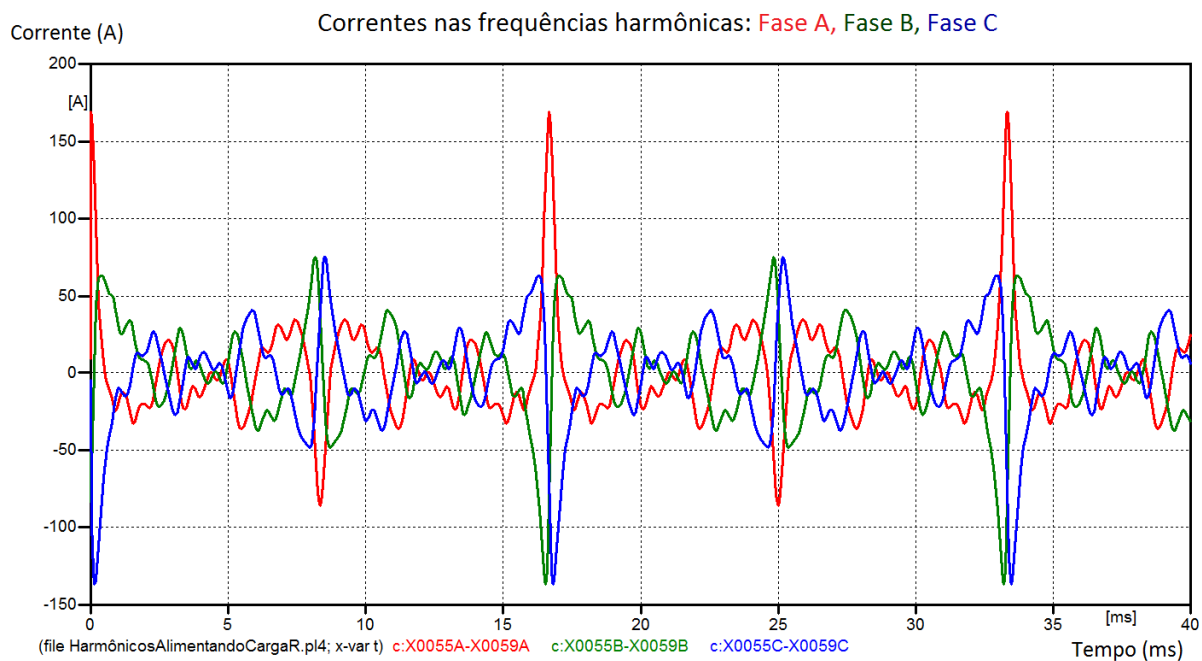


Gráfico 5 – Formas de ondas das correntes de frequências harmônicas na carga utilizando um aerogerador individual.
Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

O aerogerador completo foi simulado conforme a Figura 28.

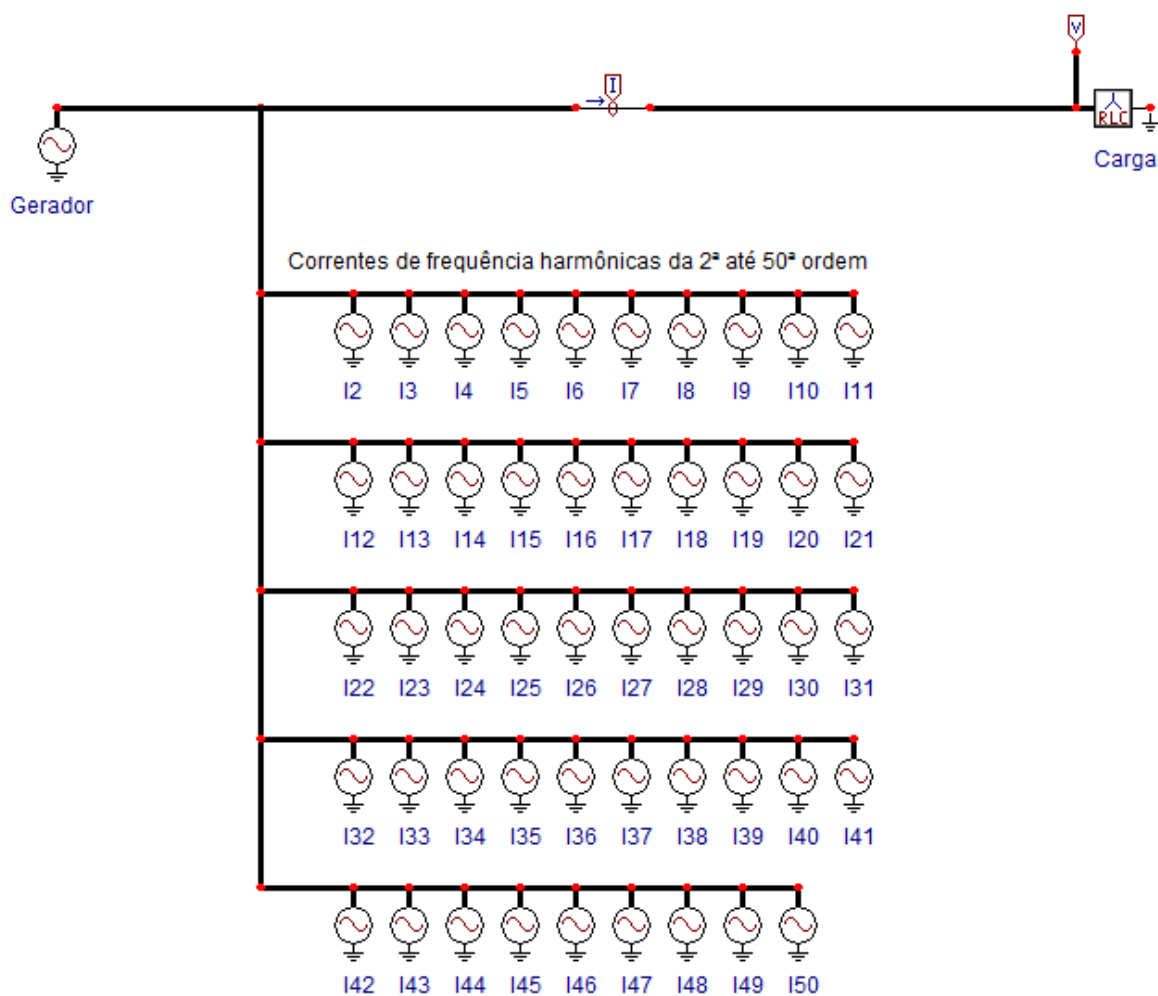


Figura 28 – Aerogerador Individual Completo com as Injeções de Correntes Harmônicas.
 Fonte: Autoria própria gerada pelo programa ATP.

O Gráfico 6, gerado com os dados do medidor de tensão da Figura 28, mostra as formas de ondas das tensões entregues pelo aerogerador à carga, foram medidos picos de tensões de 589,08 V e -577,55 V na fase A (em vermelho), 567,58 V e -567,74 V na fase B (em verde) e 567,58 V e -567,74 V na fase C (em azul). Dessa forma o aumento da tensão de pico na fase A foi de 23,08 V no semiciclo positivo e 11,55 V no semiciclo negativo, na fase B foi de 1,58 V no semiciclo positivo e 1,74 V no semiciclo negativo, na fase C foi de 1,58 V no semiciclo positivo e 1,74 V no semiciclo negativo.

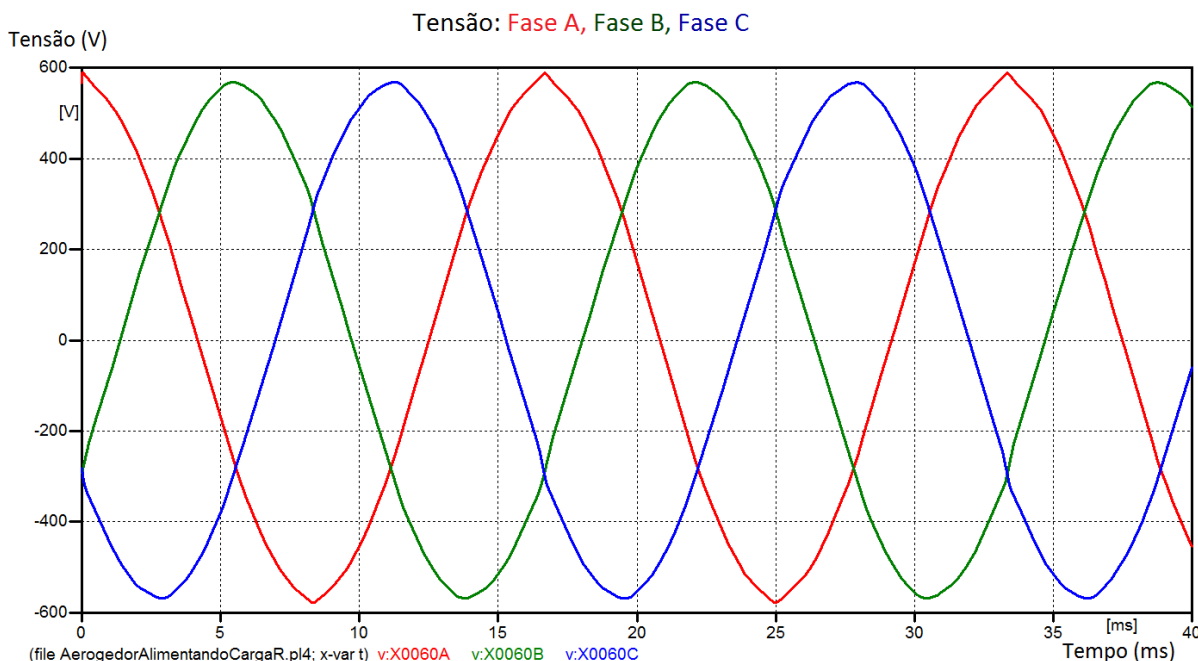


Gráfico 6 – Formas de ondas das tensões entregues pelo aerogerador individual à carga.
Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

O Gráfico 7, gerado com os dados coletados pelo medidor de corrente da Figura 28, mostra as formas de ondas das correntes entregues pelo aerogerador à carga, foram medidos picos de correntes de 4251,5 A e -4168,1 A na fase A (em vermelho), 4096,3 A e -4097,5 A na fase B (em verde) e 4096,3 A e -4097,5 A na fase C (em azul). Com isso o aumento da corrente de pico na fase A foi de 168,5 A no semiciclo positivo e 85,1 A no semiciclo negativo, na fase B foi de 13,3 A no semiciclo positivo e 14,5 A no semiciclo negativo e na fase C foi de 13,3 A no semiciclo positivo e 14,5 A no semiciclo negativo.

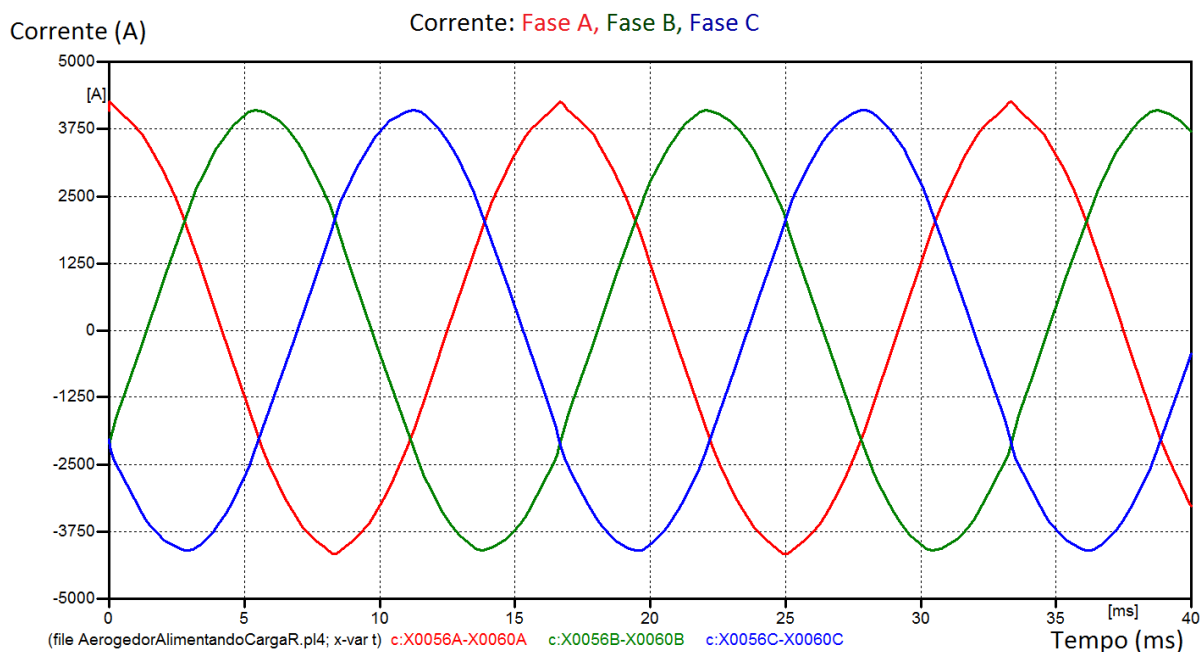


Gráfico 7 – Formas de ondas das correntes entregues pelo aerogerador individual à carga. Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

O Gráfico 8 mostra a sobreposição das formas de ondas das tensões com a presença de harmônicos e sem a presença de harmônicos. Conforme mostrado anteriormente é notório no Gráfico 8 o aumento da tensão de pico da fase A (vermelho com harmônicos e em rosa sem harmônicos). Também da análise do Gráfico 8 é possível perceber leves deformações na fase B (verde com harmônicos e marrom sem harmônicos) e na fase C (azul com harmônicos e cinza sem harmônicos).

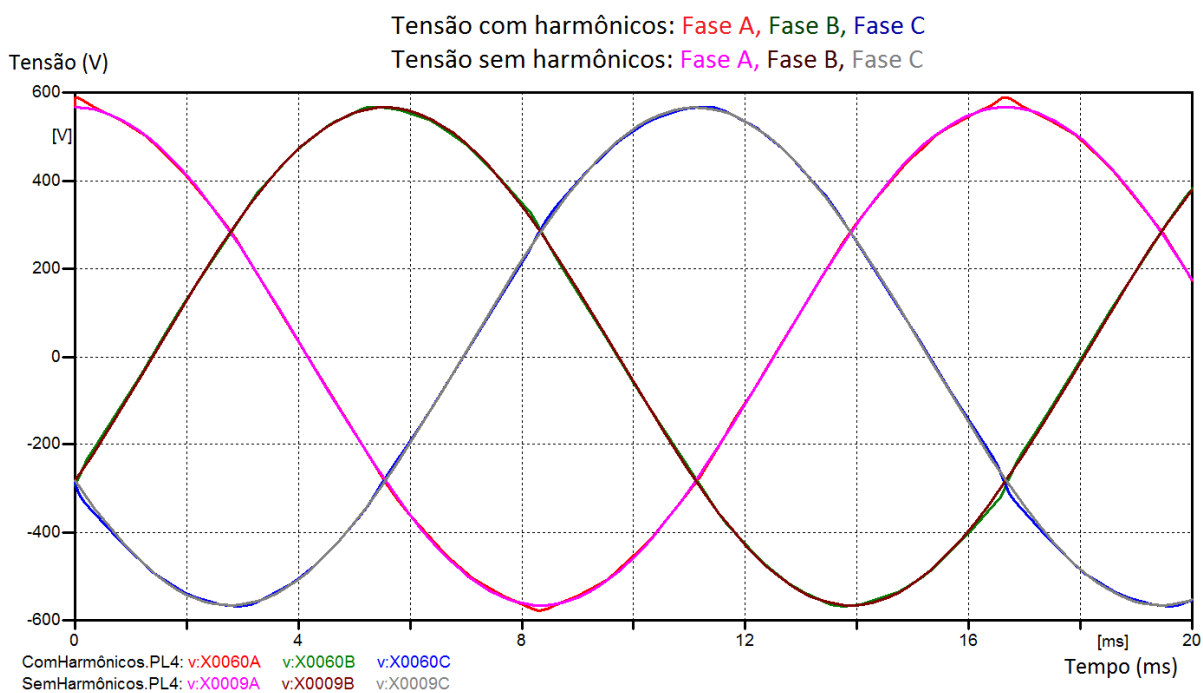


Gráfico 8 – Sobreposição das formas de ondas das tensões com e sem a presença de harmônicos usando um aerogerador individual.
Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

O Gráfico 9 mostra a sobreposição das formas de ondas das correntes com a presença de harmônicos e sem a presença de harmônicos, devido à linearidade da carga a mesma análise feita para as formas de ondas das tensões se aplica as formas de ondas das correntes.

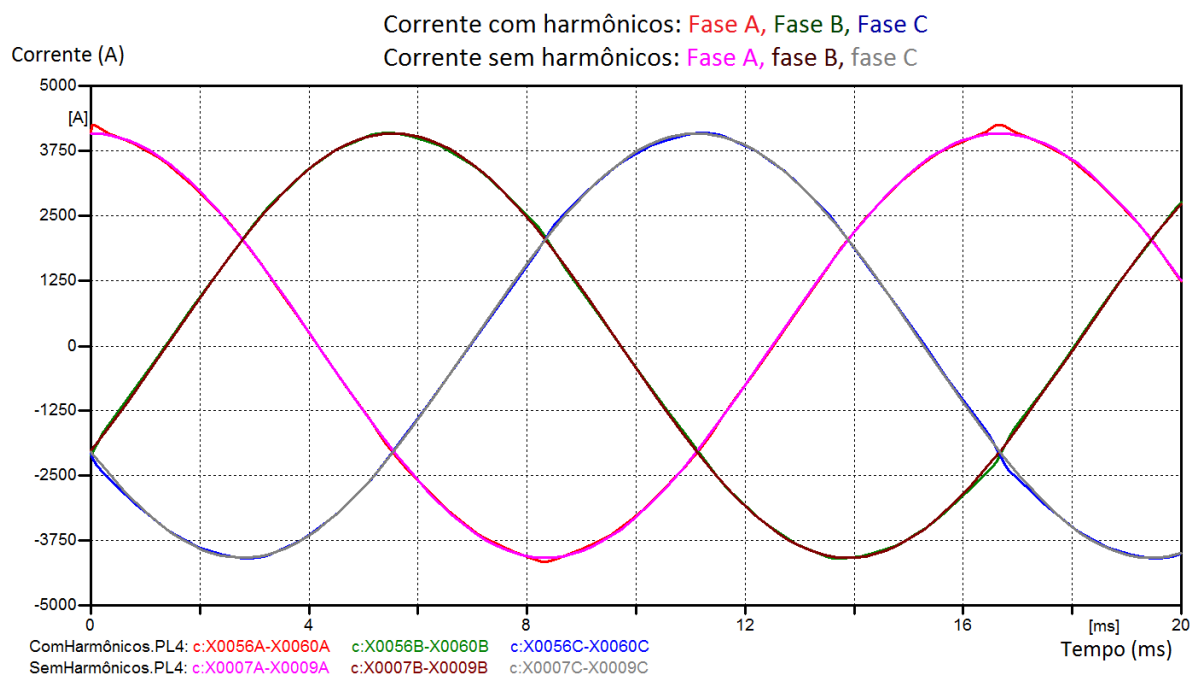


Gráfico 9 – Sobreposição das formas de ondas das correntes com e sem a presença de harmônicos usando um aerogerador individual.
Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

As tensões eficazes de frequências harmônicas, os ângulos das tensões de frequências harmônicas e a DHT_v da Tabela 10 foram medidas na fase A pelo medidor de tensão da Figura 28.

Tabela 10 – Tensões de Frequências Harmônica na Carga Utilizando um Aerogerador Individual.

(continua)

Ordem (h)	Frequência (Hz)	Tensão de frequência harmônica eficaz (V_h)	Ângulo ($^\circ$)
2	120	1,04750	89,95
3	180	0,71076	89,924
4	240	0,47796	89,899
5	300	2,31960	89,874
6	360	0,24084	89,849
7	420	2,32050	89,824
8	480	0,19958	89,798
9	540	0,32141	89,773

Tabela 10 – Tensões de Frequências Harmônica na Carga Utilizando um Aerogerador Individual.

(continuação)

10	600	0,20313	89,748
11	660	1,52190	89,723
12	720	0,20130	89,698
13	780	1,32060	89,672
14	840	0,23930	89,647
15	900	0,36044	89,622
16	960	0,20152	89,597
17	1020	0,92027	89,572
18	1080	0,15926	89,546
19	1140	0,51932	89,521
20	1200	0,11888	89,496
21	1260	0,11986	89,471
22	1320	0,12066	89,446
23	1380	0,36021	89,42
24	1440	0,11985	89,395
25	1500	0,20034	89,37
26	1560	0,12118	89,345
27	1620	0,63935	89,32
28	1680	0,07775	89,295
29	1740	0,19846	89,269
30	1800	0,07847	89,244
31	1860	0,11873	89,219
32	1920	0,07872	89,194
33	1980	0,07879	89,169
34	2040	0,03902	89,144
35	2100	0,07912	89,118
36	2160	0,03918	89,093
37	2220	0,07917	89,068

Tabela 10 – Tensões de Frequências Harmônica na Carga Utilizando um Aerogerador Individual.

(conclusão)			
38	2280	0,03908	89,043
39	2340	0,03929	89,018
40	2400	0,03947	88,993
41	2460	0,07928	88,967
42	2520	0,03908	88,942
43	2580	0,03920	88,917
44	2640	0,03923	88,892
45	2700	0,03923	88,867
46	2760	0,03921	88,842
47	2820	0,03916	88,817
48	2880	0,03908	88,791
49	2940	0,03895	88,766
50	3000	0,03867	88,741
DHT _v =1,0918%			

Fonte: Autoria própria dados gerados pelo programa ATP.

No ATP a tensão eficaz medida na frequência de 60 Hz, h igual 1, foi de $V_1 = 400$ V e ângulo de $89,98^\circ$. Assim ao substituir os valores das tensões de frequências harmônicas (V_h) da Tabela 10 e o valor da tensão eficaz (V_1) na equação 3.8 é calculado o valor de DHT_v igual a 1,0918% que é exatamente o mesmo medido pelo ATP.

$$DHT_v = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=50} V_h^2}}{V_1} \quad (3.8)$$

A NBR IEC 61400-21 estabelece que a DHT de tensão incluindo todos os harmônicos até 50ª ordem de um aerogerador individual deve ser menor que 5%, com isso esse modelo de aerogerador por apresentar uma DHT de tensão igual a 1,0918 % atende a essa norma.

O Gráfico 10 mostra um comparativo entre o valor eficaz da tensão fundamental (1ª ordem) e os valores individuais das tensões de frequências harmônicas de 2ª até a 50ª ordem. Com a análise do Gráfico 10 é possível afirmar que quando comparado com a componente da tensão fundamental as componentes das tensões de frequências harmônicas são muito baixas e até insignificantes.

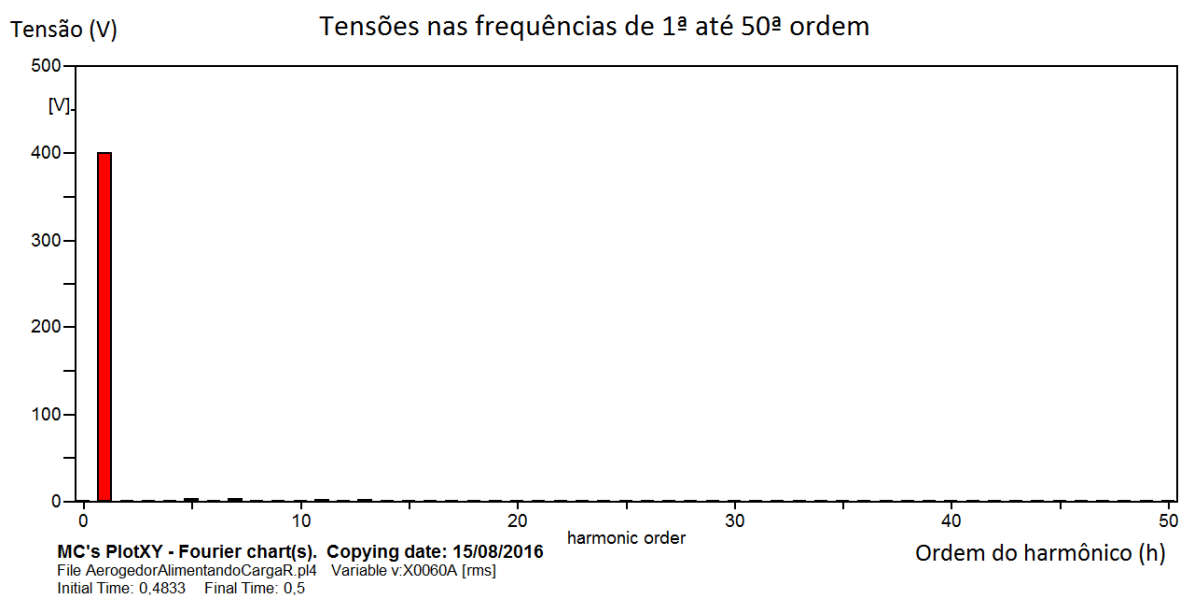


Gráfico 10 – Níveis de tensões por ordem utilizando um aerogerador individual.
Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

As correntes harmônicas eficazes, os ângulos das correntes harmônicas e a DHT_i da Tabela 11 foram medidas na fase A pelo medidor de corrente da Figura 28.

Tabela 11 – Correntes de Frequências Harmônica Utilizando um Aerogerador Individual.
(continua)

Ordem (h)	Frequência (Hz)	Corrente harmônica eficaz (A)	Ângulo (°)
2	120	7,56000	89,95
3	180	5,12970	89,924
4	240	3,44950	89,899
5	300	16,74100	89,874
6	360	1,73820	89,849
7	420	16,74700	89,824
8	480	1,44040	89,798

**Tabela 11 – Correntes de Frequências Harmônica Utilizando um Aerogerador Individual.
(continuação)**

9	540	2,31960	89,773
10	600	1,46600	89,748
11	660	10,98400	89,723
12	720	1,45280	89,698
13	780	9,53090	89,672
14	840	1,72700	89,647
15	900	2,60130	89,622
16	960	1,45440	89,597
17	1020	6,64170	89,572
18	1080	1,14940	89,546
19	1140	3,74800	89,521
20	1200	0,85794	89,496
21	1260	0,86502	89,471
22	1320	0,87082	89,446
23	1380	2,59960	89,42
24	1440	0,86496	89,395
25	1500	1,44580	89,37
26	1560	0,87457	89,345
27	1620	4,61430	89,32
28	1680	0,56113	89,295
29	1740	1,43230	89,269
30	1800	0,56633	89,244
31	1860	0,85688	89,219
32	1920	0,56809	89,194
33	1980	0,56864	89,169
34	2040	0,28162	89,144
35	2100	0,57102	89,118
36	2160	0,28274	89,094

**Tabela 11 – Correntes de Frequências Harmônica Utilizando um Aerogerador Individual.
(conclusão)**

37	2220	0,57138	89,068
38	2280	0,28205	89,043
39	2340	0,28352	89,018
40	2400	0,28488	88,993
41	2460	0,57220	88,967
42	2520	0,28203	88,943
43	2580	0,28291	88,917
44	2640	0,28314	88,892
45	2700	0,28313	88,867
46	2760	0,28296	88,842
47	2820	0,28262	88,817
48	2880	0,28206	88,791
49	2940	0,28111	88,766
50	3000	0,27911	88,741
THD=1,0918%			

Fonte: Aatoria própria dados gerados pelo programa ATP.

No ATP a corrente eficaz medida na frequência de 60 Hz, h igual 1, foi de $I_1 = 2.887$ A e ângulo de $89,98^\circ$. Assim ao substituir os valores das correntes de frequências harmônicas (I_h) da Tabela 11 e o valor da corrente eficaz (I_1) na equação 3.9 é calculado o valor de DHT_i igual a 1,0918% que é exatamente o mesmo valor medido pelo ATP.

$$DHT_i = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=50} I_h^2}}{I_1} \quad (3.9)$$

O Gráfico 11 mostra um comparativo entre o valor eficaz da corrente fundamental (60 Hz e ordem $h = 1$) com os valores individuais das correntes de frequências harmônicas de 2ª até a 50ª ordem. Como se trata de uma carga linear a análise feita para a tensão se aplica a corrente.

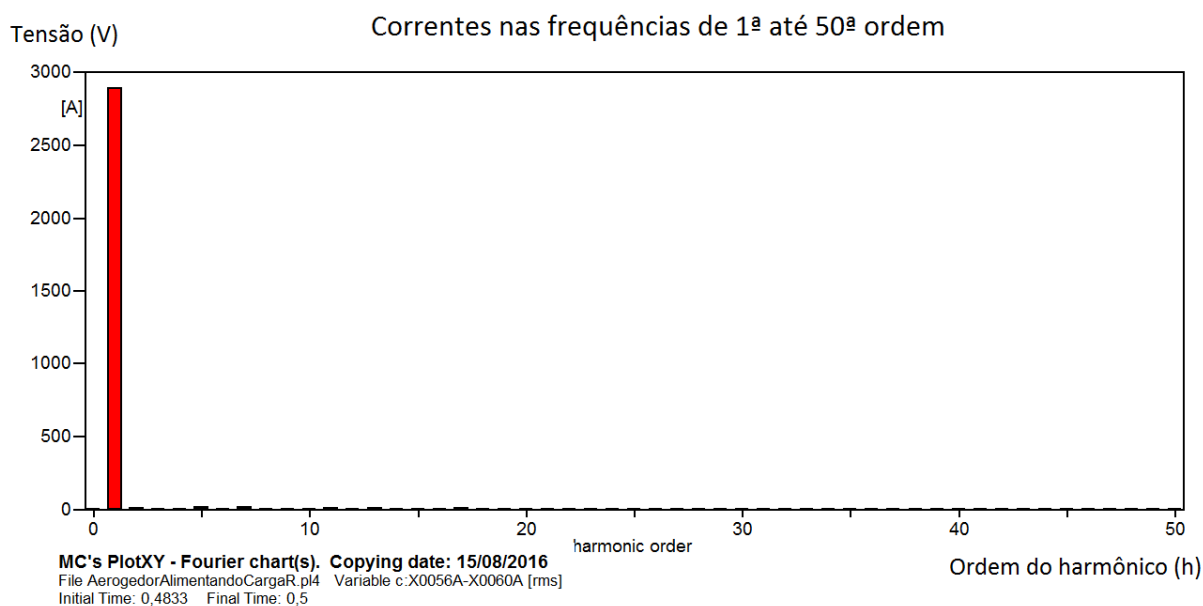


Gráfico 11 – Níveis de correntes por ordem utilizando um aerogerador individual.
Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

3.3.2 Análise de Um Sistema composto por 5 Aerogeradores Alimentando Uma Carga Puramente Resistiva

Nesta seção foi realizada uma análise de um sistema composto por 5 aerogeradores em paralelo alimentando uma carga trifásica puramente resistiva, esse sistema se torna equivalente a um pequeno parque eólico. Se comparado com o aerogerador individual esse sistema tem a capacidade de fornecer 5 vezes mais potência ativa, 5 vezes mais corrente e alimentar uma carga resistiva com resistência 5 vezes menor, dessa forma, como cada aerogerador possui potência ativa trifásica de 2.000 kW, capacidade de entregar 2.887 A de corrente trifásica e alimentar uma carga trifásica com 3 cargas monofásica de 0.13856 Ω , esse sistema tem 10.000 kW de potência ativa trifásica disponível, capacidade de entregar a carga 14.435 A de corrente trifásica e alimentar uma carga trifásica com 3 cargas monofásicas de 0.02771 Ω em estrela.

O Gráfico 12 mostra as formas de ondas das tensões trifásicas na carga quando alimentadas por 5 aerogeradores em paralelo, essas formas de ondas conforme esperado é exatamente as mesmas formas de ondas das tensões na carga alimentada por um aerogerador individual.

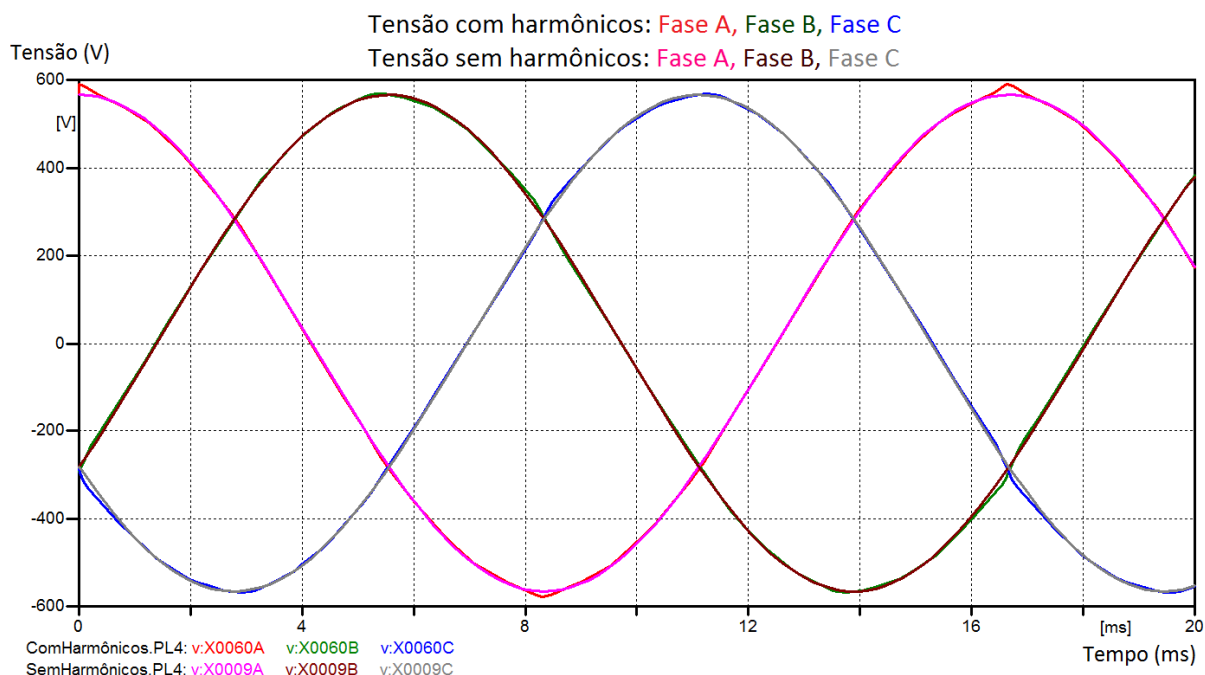


Gráfico 12 – Sobreposição das formas de ondas das tensões com e sem a presença de harmônicos utilizando 5 aerogeradores em paralelo.
Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

A Tabela 12 mostra os valores das tensões e ângulos por ordem de harmônicos, como esperado foi medido o DHT de tensão igual a 1,0918% que é o mesmo valor encontrado na configuração com um único aerogerador.

Tabela 12 – Tensões por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo.

(continua)

Ordem (h)	Frequência (Hz)	Tensão eficaz por ordem (V)	Ângulo (°)
1	60	400	89,975
2	120	1,04750	89,95
3	180	0,71076	89,924
4	240	0,47796	89,899
5	300	2,31960	89,874
6	360	0,24084	89,849
7	420	2,32050	89,824
8	480	0,19958	89,798

Tabela 12 – Tensões por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo.

(continuação)

9	540	0,32141	89,773
10	600	0,20313	89,748
11	660	1,52190	89,723
12	720	0,20130	89,698
13	780	1,32060	89,672
14	840	0,23930	89,647
15	900	0,36044	89,622
16	960	0,20152	89,597
17	1020	0,92027	89,572
18	1080	0,15926	89,546
19	1140	0,51932	89,521
20	1200	0,11888	89,496
21	1260	0,11986	89,471
22	1320	0,12066	89,446
23	1380	0,36021	89,42
24	1440	0,11985	89,395
25	1500	0,20034	89,37
26	1560	0,12118	89,345
27	1620	0,63935	89,32
28	1680	0,07775	89,295
29	1740	0,19846	89,269
30	1800	0,07847	89,244
31	1860	0,11873	89,219
32	1920	0,07872	89,194
33	1980	0,07879	89,169
34	2040	0,03902	89,144
35	2100	0,07912	89,118
36	2160	0,03918	89,093

Tabela 12 – Tensões por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo.

				(conclusão)
37	2220	0,07917	89,068	
38	2280	0,03908	89,043	
39	2340	0,03929	89,018	
40	2400	0,03947	88,993	
41	2460	0,07928	88,967	
42	2520	0,03908	88,942	
43	2580	0,03920	88,917	
44	2640	0,03923	88,892	
45	2700	0,03923	88,867	
46	2760	0,03921	88,842	
47	2820	0,03916	88,817	
48	2880	0,03908	88,791	
49	2940	0,03895	88,766	
50	3000	0,03867	88,741	
THD=1,0918%				

Fonte: Autoria própria dados gerados pelo programa ATP.

Ao substituir os valores das tensões da Tabela 12 na equação 3.8 é calculado o valor de DHT_v igual a 1,0918% que é o mesmo do caso com um aerogerador individual.

O Gráfico 13 mostra o comparativo entre as tensões separadas por ordem, da 1ª até a 50ª ordem, fornecidas à carga por 5 aerogeradores em paralelo.

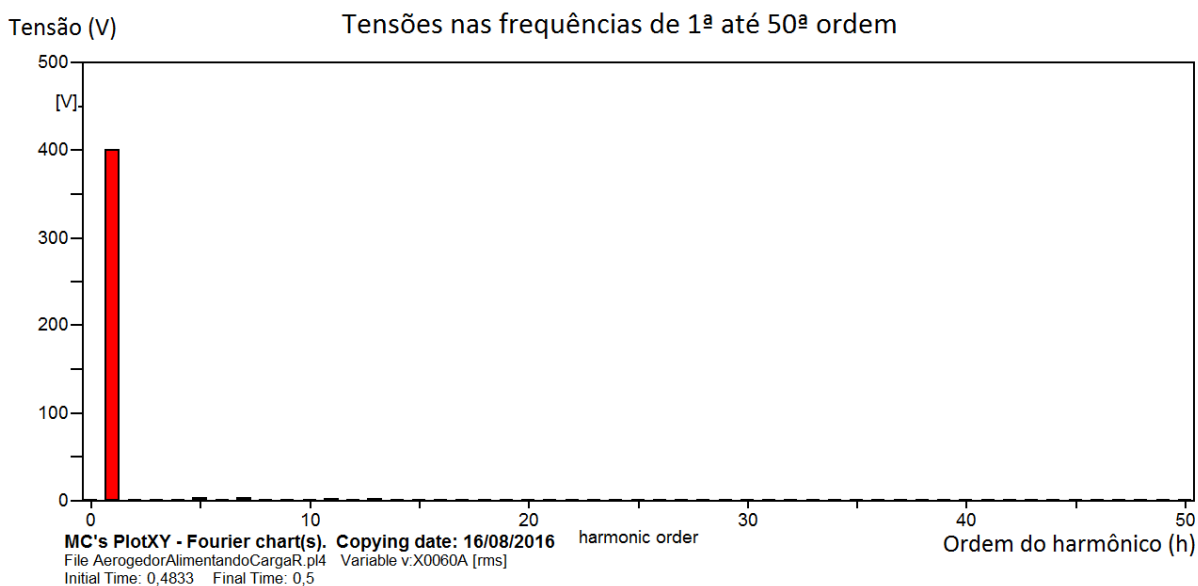


Gráfico 13 – Níveis de tensões por ordem utilizando 5 aerogerador.
Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

O Gráfico 14 mostra as formas de ondas das correntes trifásicas entregue à carga pelos 5 aerogeradores em paralelo, essas formas de ondas conforme esperado possuem valores de correntes 5 vezes maiores ao longo do tempo em comparação com quando é alimentada por um único aerogerador.

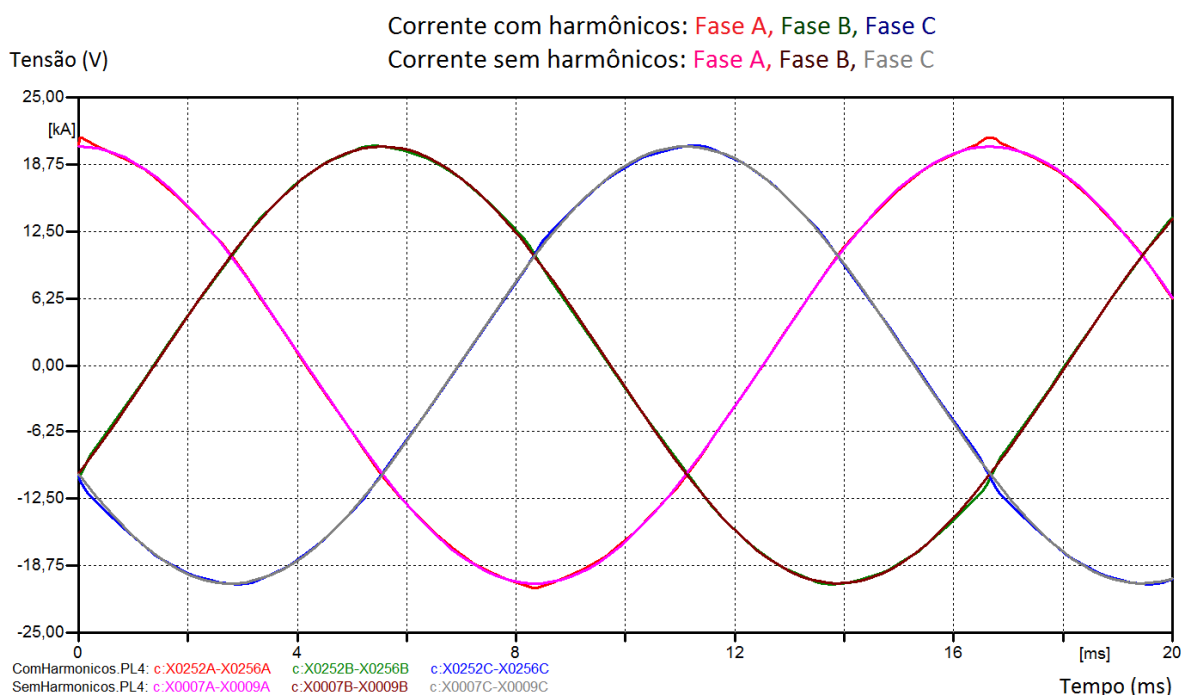


Gráfico 14 – Sobreposição das formas de ondas das correntes com e sem a presença de harmônicos utilizando 5 aerogeradores em paralelo.
Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

A Tabela 13 mostra os valores das correntes e ângulos por ordem de harmônicos, também foi medido o DHTi igual a 1,0918% que é o mesmo valor encontrado na configuração com um único aerogerador.

Tabela 13 – Correntes por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo.

(continua)

Ordem (h)	Frequência (Hz)	Corrente harmônica eficaz (A)	Ângulo (°)
1	60	14435	89,975
2	120	37,80000	89,95
3	180	25,64850	89,924
4	240	17,24750	89,899
5	300	83,70500	89,874
6	360	8,69100	89,849
7	420	83,73500	89,824
8	480	7,20200	89,798

Tabela 13 – Correntes por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo.

(continuação)

9	540	11,59800	89,773
10	600	7,33000	89,748
11	660	54,92000	89,723
12	720	7,26400	89,698
13	780	47,65450	89,672
14	840	8,63500	89,647
15	900	13,00650	89,622
16	960	7,27200	89,597
17	1020	33,20850	89,572
18	1080	5,74700	89,546
19	1140	18,74000	89,521
20	1200	4,28970	89,496
21	1260	4,32510	89,471
22	1320	4,35410	89,446
23	1380	12,99800	89,42
24	1440	4,32480	89,395
25	1500	7,22900	89,37
26	1560	4,37285	89,345
27	1620	23,07150	89,32
28	1680	2,80565	89,295
29	1740	7,16150	89,269
30	1800	2,83165	89,244
31	1860	4,28440	89,219
32	1920	2,84045	89,194
33	1980	2,84320	89,169
34	2040	1,40810	89,144
35	2100	2,85510	89,118
36	2160	1,41370	89,093

Tabela 13 – Correntes por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo.

				(conclusão)
37	2220	2,85690	89,068	
38	2280	1,41025	89,043	
39	2340	1,41760	89,018	
40	2400	1,42440	88,993	
41	2460	2,86100	88,967	
42	2520	1,41015	88,942	
43	2580	1,41455	88,917	
44	2640	1,41570	88,892	
45	2700	1,41565	88,867	
46	2760	1,41480	88,842	
47	2820	1,41310	88,817	
48	2880	1,41030	88,791	
49	2940	1,40555	88,766	
50	3000	1,39555	88,741	
THD=1,0918%				

Fonte: Autoria própria dados gerados pelo programa ATP.

Ao substituir os valores das correntes da Tabela 13 na equação 3.9 é calculado o valor de DHT_i igual a 1,0918% que é o mesmo do caso com um aerogerador individual.

O Gráfico 15 mostra o comparativo entre as correntes separadas por ordem, da 1ª até a 50ª ordem, fornecidas à carga por 5 aerogeradores em paralelo.

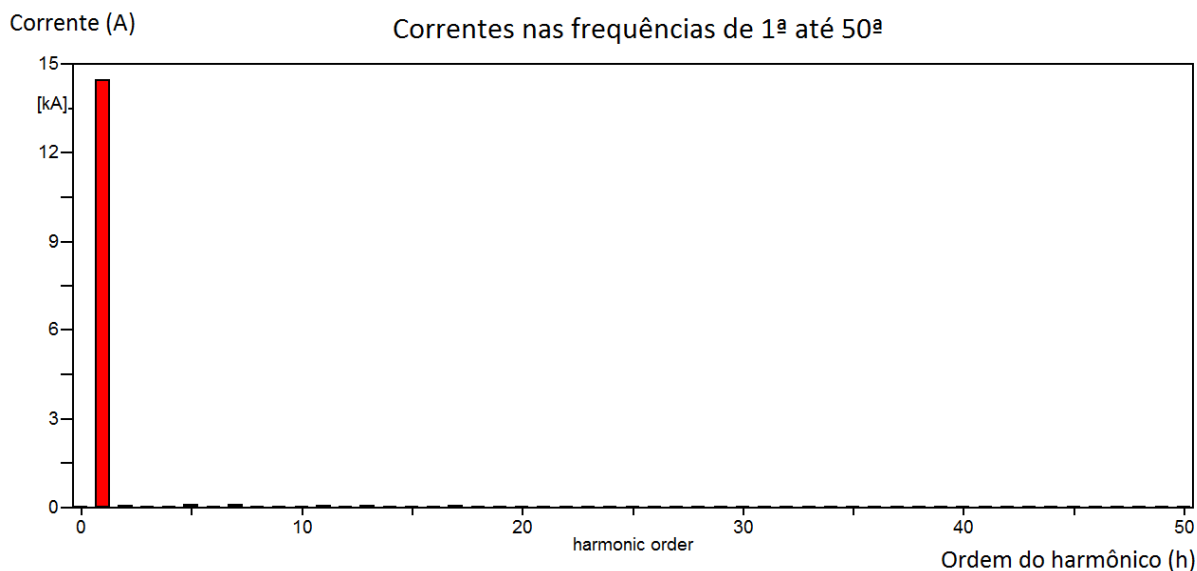


Gráfico 15 – Níveis de correntes por ordem utilizando 5 aerogeradores.
Fonte: Autoria própria dados gerados pelo programa ATP.

A Tabela 14 mostra um comparativo entre as medições de correntes e de tensões por ordem (h) de 1 aerogerador e 5 aerogeradores fornecendo 100% da sua potência, conforme mencionado anteriormente os valores das tensões usando 1 ou 5 aerogeradores são os mesmo, os valores das correntes usando 5 aerogeradores são 5 vezes maiores do que quando se utiliza um único aerogerador e os valores de DHT de tensão e corrente permanecem inalterados.

Tabela 14 – Tabela Resumo com os Valores de Tensões e Correntes por Ordem h com 1 e com 5 Aerogeradores.

(continua)

Ordem (h)	Tensão por ordem (V)			Corrente por ordem (A)		
	1 aerogerador	5 aerogeradores	Variação (%)	1 aerogerador	5 aerogeradores	Variação (%)
1	400	400	0	2887	14435	400
2	1,04750	1,04750	0	7,56000	37,80000	400
3	0,71076	0,71076	0	5,12970	25,64850	400
4	0,47796	0,47796	0	3,44950	17,24750	400
5	2,31960	2,31960	0	16,74100	83,70500	400
6	0,24084	0,24084	0	1,73820	8,69100	400
7	2,32050	2,32050	0	16,74700	83,73500	400
8	0,19958	0,19958	0	1,44040	7,20200	400

Tabela 14 – Tabela Resumo com os Valores de Tensões e Correntes por Ordem h com 1 e com 5 Aerogeradores.

(continuação)

9	0,32141	0,32141	0	2,31960	11,59800	400
10	0,20313	0,20313	0	1,46600	7,33000	400
11	1,52190	1,52190	0	10,98400	54,92000	400
12	0,20130	0,20130	0	1,45280	7,26400	400
13	1,32060	1,32060	0	9,53090	47,65450	400
14	0,23930	0,23930	0	1,72700	8,63500	400
15	0,36044	0,36044	0	2,60130	13,00650	400
16	0,20152	0,20152	0	1,45440	7,27200	400
17	0,92027	0,92027	0	6,64170	33,20850	400
18	0,15926	0,15926	0	1,14940	5,74700	400
19	0,51932	0,51932	0	3,74800	18,74000	400
20	0,11888	0,11888	0	0,85794	4,28970	400
21	0,11986	0,11986	0	0,86502	4,32510	400
22	0,12066	0,12066	0	0,87082	4,35410	400
23	0,36021	0,36021	0	2,59960	12,99800	400
24	0,11985	0,11985	0	0,86496	4,32480	400
25	0,20034	0,20034	0	1,44580	7,22900	400
26	0,12118	0,12118	0	0,87457	4,37285	400
27	0,63935	0,63935	0	4,61430	23,07150	400
28	0,07775	0,07775	0	0,56113	2,80565	400
29	0,19846	0,19846	0	1,43230	7,16150	400
30	0,07847	0,07847	0	0,56633	2,83165	400
31	0,11873	0,11873	0	0,85688	4,28440	400
32	0,07872	0,07872	0	0,56809	2,84045	400
33	0,07879	0,07879	0	0,56864	2,84320	400
34	0,03902	0,03902	0	0,28162	1,40810	400
35	0,07912	0,07912	0	0,57102	2,85510	400
36	0,03918	0,03918	0	0,28274	1,41370	400

Tabela 14 – Tabela Resumo com os Valores de Tensões e Correntes por Ordem h com 1 e com 5 Aerogeradores.

(conclusão)

37	0,07917	0,07917	0	0,57138	2,85690	400
38	0,03908	0,03908	0	0,28205	1,41025	400
39	0,03929	0,03929	0	0,28352	1,41760	400
40	0,03947	0,03947	0	0,28488	1,42440	400
41	0,07928	0,07928	0	0,57220	2,86100	400
42	0,03908	0,03908	0	0,28203	1,41015	400
43	0,03920	0,03920	0	0,28291	1,41455	400
44	0,03923	0,03923	0	0,28314	1,41570	400
45	0,03923	0,03923	0	0,28313	1,41565	400
46	0,03921	0,03921	0	0,28296	1,41480	400
47	0,03916	0,03916	0	0,28262	1,41310	400
48	0,03908	0,03908	0	0,28206	1,41030	400
49	0,03895	0,03895	0	0,28111	1,40555	400
50	0,03867	0,03867	0	0,27911	1,39555	400
DHT _v =1,0918%		DHT _v =1,0918%		DHT _i =1,0918%		DHT _i =1,0918%

Fonte: Autoria própria dados gerados pelo programa ATP.

3.3.3 Análise de Um Sistema Composto por 5 Aerogeradores com o Ângulo das Correntes Harmônicas Defasados

Nesta seção foi realizada uma análise de um sistema composto por 5 aerogeradores em paralelo alimentando uma carga trifásica puramente resistiva, porém com o ângulo das correntes de frequências harmônicas diferentes para cada aerogerador. Na prática é bem provável que os ângulos das correntes de frequências harmônicas sejam diferentes para cada aerogerador, como o fabricante não forneceu os valores desses ângulos, nesta seção foram considerados os seguintes valores:

- 0° para o aerogerador 1;
- 10° para o aerogerador 2;
- 20° para o aerogerador 3;

- 30° para o aerogerador 4;
- 40° para o aerogerador 5.

O Gráfico 16 mostra a sobreposição das formas de ondas das tensões trifásicas na carga quando alimentadas por 5 aerogeradores em paralelo com os ângulos das correntes de frequências harmônicas em fase e defasados. As formas de ondas da fase A (em vermelho), fase B (em azul) e fase C (em rosa) representam a situação onde os 5 aerogeradores foram adicionados com todas as correntes de frequências harmônicas com ângulo igual a 0°; enquanto a fase A (em verde), fase B (em marrom), fase C (em cinza) representam a situação onde as correntes de frequências harmônicas do aerogerador 1 foram adicionadas com ângulo de 0°, aerogerador 2 com ângulo de 10°, aerogerador 3 com ângulo de 20°, aerogerador 4 com ângulos de 30° e aerogerador 5 com ângulo de 40°. Ao observar o Gráfico 16 notam-se pequenas mudanças nas formas de ondas com a defasagem angular.

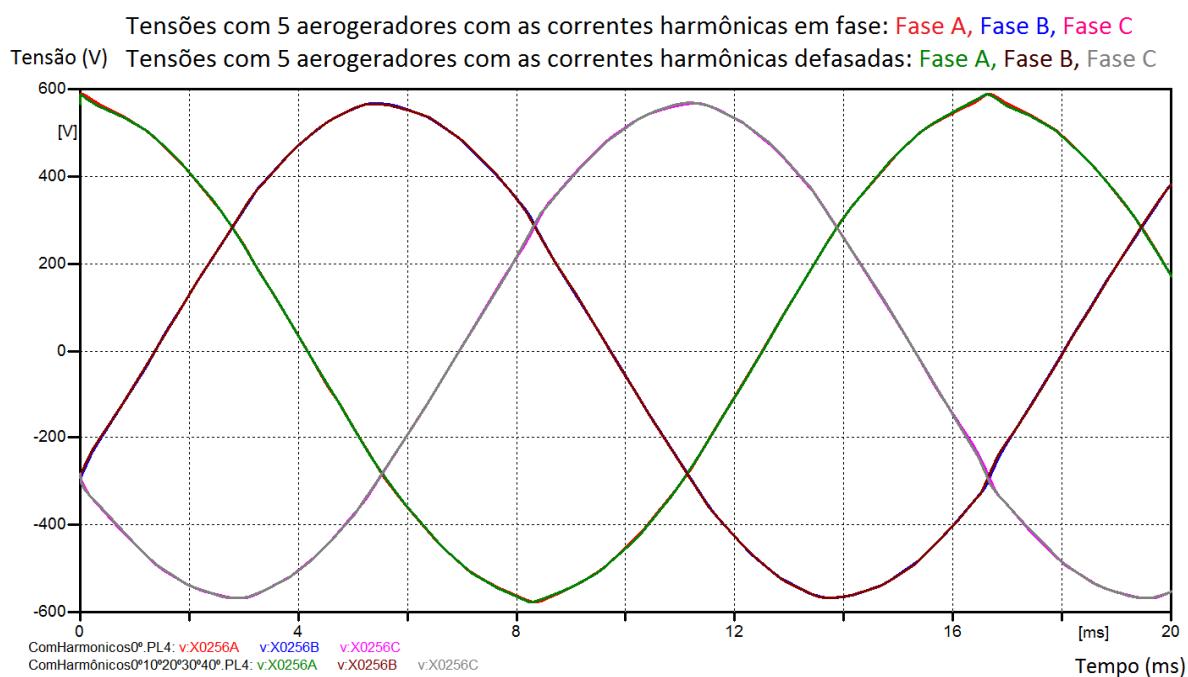


Gráfico 16 – Sobreposição das formas de ondas das tensões de 5 aerogeradores com o ângulo das correntes harmônicas iguais e diferentes.

Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

A Tabela 15 mostra os valores das tensões e ângulos por ordem de harmônicos, o DHT_v medido foi de 1,0588%.

Tabela 15 – Tensões por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo e com as Correntes Harmônicas Defasadas.

(continua)

Ordem (h)	Frequência (Hz)	Tensão eficaz por ordem (V)	Ângulo (°)
1	60	400	89,98
2	120	1,01660	110,60
3	180	0,68931	110,23
4	240	0,46337	110,09
5	300	2,24920	109,89
6	360	0,23334	109,90
7	420	2,25000	109,82
8	480	0,19332	109,74
9	540	0,31146	109,72
10	600	0,19677	109,65
11	660	1,47560	109,71
12	720	0,19501	109,58
13	780	1,28040	109,65
14	840	0,23186	109,54
15	900	0,34934	109,55
16	960	0,19524	109,47
17	1020	0,89224	109,54
18	1080	0,15427	109,39
19	1140	0,50343	109,47
20	1200	0,11512	109,29
21	1260	0,11607	109,27
22	1320	0,11685	109,25
23	1380	0,34915	109,35
24	1440	0,11608	109,20
25	1500	0,19413	109,26
26	1560	0,11737	109,16

Tabela 15 – Tensões por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo e com as Correntes Harmônicas Defasadas.

(conclusão)

27	1620	0,61987	109,28
28	1680	0,07526	109,01
29	1740	0,19232	109,16
30	1800	0,07597	108,97
31	1860	0,11501	109,04
32	1920	0,07621	108,93
33	1980	0,07629	108,91
34	2040	0,03773	108,63
35	2100	0,07661	108,87
36	2160	0,03788	108,60
37	2220	0,07667	108,83
38	2280	0,03779	108,56
39	2340	0,03799	108,54
40	2400	0,03818	108,53
41	2460	0,07678	108,74
42	2520	0,03780	108,49
43	2580	0,03792	108,47
44	2640	0,03795	108,45
45	2700	0,03795	108,43
46	2760	0,03793	108,41
47	2820	0,03788	108,39
48	2880	0,03781	108,37
49	2940	0,03769	108,35
50	3000	0,03742	108,33
THD=1,0588%			

Fonte: Autoria própria dados gerados pelo programa ATP.

O Gráfico 17 mostra a sobreposição das formas de ondas das correntes trifásicas na carga quando alimentadas por 5 aerogeradores em paralelo com os

ângulos das correntes de frequências harmônicas em fase e defasadas. A mesma análise realizada para as tensões se aplica as correntes.

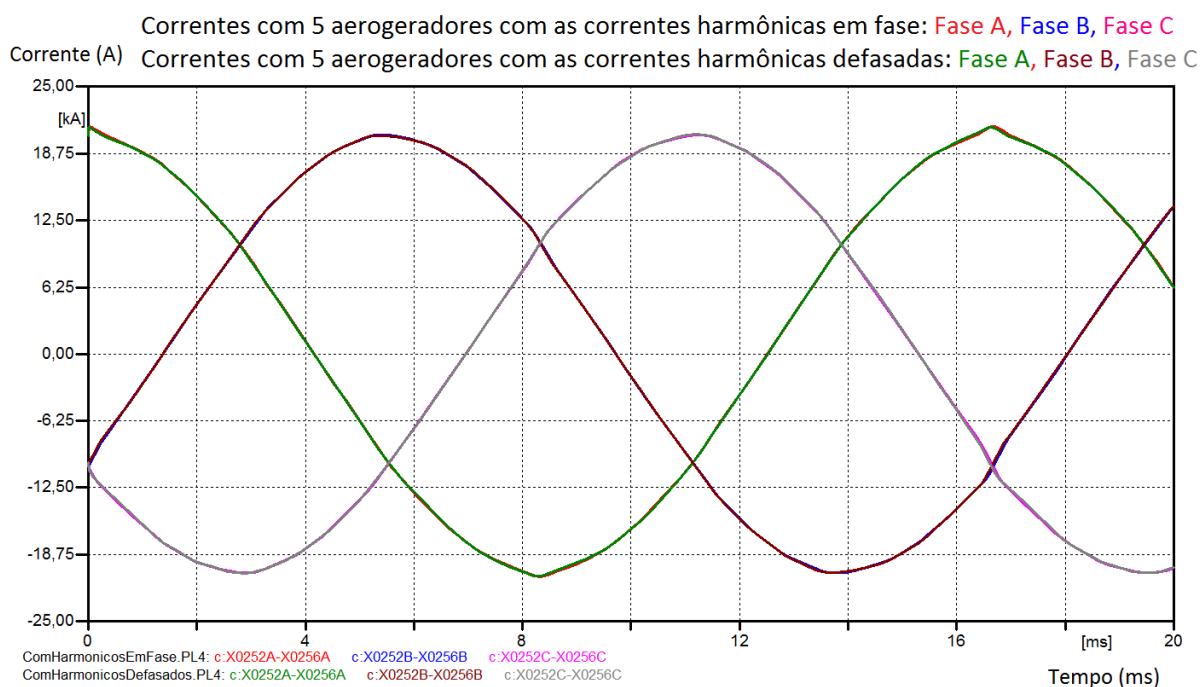


Gráfico 17 – Sobreposição das formas de ondas das correntes de 5 aerogeradores com o ângulo das correntes harmônicas iguais e diferentes.
 Fonte: Autoria própria gerado pelo programa ATP.

A Tabela 16 mostra os valores das correntes e ângulos por ordem de harmônicos, o DHT_i medido foi de 1,0588%.

Tabela 16 – Correntes por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo e com as Correntes Harmônicas Defasadas.

(continua)

Ordem (h)	Frequência (Hz)	Corrente harmônica eficaz (A)	Ângulo (°)
1	60	14435	89,98
2	120	36,687	110,60
3	180	24,876	110,23
4	240	16,722	110,09
5	300	81,169	109,89
6	360	8,421	109,90
7	420	81,198	109,82

Tabela 16 – Correntes por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo e com as Correntes Harmônicas Defasadas.

(continuação)

8	480	6,976	109,74
9	540	11,240	109,72
10	600	7,101	109,65
11	660	53,253	109,71
12	720	7,037	109,58
13	780	46,208	109,65
14	840	8,367	109,54
15	900	12,607	109,55
16	960	7,046	109,47
17	1020	32,199	109,54
18	1080	5,567	109,39
19	1140	18,168	109,47
20	1200	4,154	109,29
21	1260	4,189	109,27
22	1320	4,217	109,25
23	1380	12,600	109,35
24	1440	4,189	109,20
25	1500	7,006	109,25
26	1560	4,236	109,16
27	1620	22,370	109,28
28	1680	2,716	109,01
29	1740	6,941	109,16
30	1800	2,742	108,97
31	1860	4,151	109,04
32	1920	2,750	108,93
33	1980	2,753	108,91
34	2040	1,361	108,63
35	2100	2,765	108,87

Tabela 16 – Correntes por Ordem de Harmônico na Carga Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo e com as Correntes Harmônicas Defasadas.

(conclusão)

36	2160	1,367	108,60
37	2220	2,767	108,83
38	2280	1,364	108,56
39	2340	1,371	108,54
40	2400	1,378	108,53
41	2460	2,771	108,74
42	2520	1,364	108,49
43	2580	1,368	108,47
44	2640	1,370	108,45
45	2700	1,370	108,43
46	2760	1,369	108,41
47	2820	1,367	108,39
48	2880	1,365	108,37
49	2940	1,360	108,35
50	3000	1,350	108,33
THD= 1,0588%			

Fonte: Autoria própria dados gerados pelo programa ATP.

A Tabela 17 mostra um comparativo entre as medições de correntes e de tensões por ordem (h) de 5 aerogeradores com as correntes de frequências harmônicas em fase e defasadas, nota-se uma redução de aproximadamente 3% nas correntes e nas tensões de frequências harmônicas devido a essa defasagem e com isso o DHT de tensão e de corrente passou de 1,0918% para 1,0588%.

Tabela 17 – Tabela Resumo com os Valores de Tensões e Correntes por ordem h Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo e com as Correntes Harmônicas em Fase e Defasadas.

(continua)

Ordem (h)	Tensão por ordem de 5 aerogeradores (V)			Corrente por ordem de 5 aerogeradores (A)		
	Com todas correntes harmônicas em fase	Com correntes harmônicas defasadas	Variação (%)	Com todas correntes harmônicas em fase	Com correntes harmônicas defasadas	Variação (%)
1	400	400	0	14435	14435	0
2	1,04750	1,01660	-2,95	37,80000	36,6870	-2,94
3	0,71076	0,68931	-3,02	25,64850	24,8760	-3,01
4	0,47796	0,46337	-3,05	17,24750	16,7220	-3,05
5	2,31960	2,24920	-3,04	83,70500	81,1690	-3,03
6	0,24084	0,23334	-3,11	8,69100	8,4208	-3,11
7	2,32050	2,25000	-3,04	83,73500	81,1980	-3,03
8	0,19958	0,19332	-3,14	7,20200	6,9764	-3,13
9	0,32141	0,31146	-3,10	11,59800	11,2400	-3,09
10	0,20313	0,19677	-3,13	7,33000	7,1011	-3,12
11	1,52190	1,47560	-3,04	54,92000	53,2530	-3,04
12	0,20130	0,19501	-3,12	7,26400	7,0374	-3,12
13	1,32060	1,28040	-3,04	47,65450	46,2080	-3,04
14	0,23930	0,23186	-3,11	8,63500	8,3673	-3,10
15	0,36044	0,34934	-3,08	13,00650	12,6070	-3,07
16	0,20152	0,19524	-3,12	7,27200	7,0457	-3,11
17	0,92027	0,89224	-3,05	33,20850	32,1990	-3,04
18	0,15926	0,15427	-3,13	5,74700	5,5672	-3,13
19	0,51932	0,50343	-3,06	18,74000	18,1680	-3,05
20	0,11888	0,11512	-3,16	4,28970	4,1543	-3,16
21	0,11986	0,11607	-3,16	4,32510	4,1888	-3,15
22	0,12066	0,11685	-3,16	4,35410	4,2171	-3,15
23	0,36021	0,34915	-3,07	12,99800	12,6000	-3,06
24	0,11985	0,11608	-3,15	4,32480	4,1889	-3,14

Tabela 17 – Tabela Resumo com os Valores de Tensões e Correntes por ordem h Utilizando 5 Aerogeradores em Paralelo e com as Correntes Harmônicas em Fase e Defasadas. (conclusão)

25	0,20034	0,19413	-3,10	7,22900	7,0058	-3,09
26	0,12118	0,11737	-3,14	4,37285	4,2358	-3,13
27	0,63935	0,61987	-3,05	23,07150	22,3700	-3,04
28	0,07775	0,07526	-3,20	2,80565	2,7161	-3,19
29	0,19846	0,19232	-3,09	7,16150	6,9406	-3,08
30	0,07847	0,07597	-3,19	2,83165	2,7416	-3,18
31	0,11873	0,11501	-3,13	4,28440	4,1505	-3,13
32	0,07872	0,07621	-3,18	2,84045	2,7503	-3,17
33	0,07879	0,07629	-3,18	2,84320	2,7531	-3,17
34	0,03902	0,03773	-3,32	1,40810	1,3614	-3,32
35	0,07912	0,07661	-3,17	2,85510	2,7648	-3,16
36	0,03918	0,03788	-3,31	1,41370	1,3670	-3,30
37	0,07917	0,07667	-3,16	2,85690	2,7667	-3,16
38	0,03908	0,03779	-3,30	1,41025	1,3638	-3,29
39	0,03929	0,03799	-3,29	1,41760	1,3710	-3,29
40	0,03947	0,03818	-3,29	1,42440	1,3777	-3,28
41	0,07928	0,07678	-3,15	2,86100	2,7709	-3,15
42	0,03908	0,03780	-3,28	1,41015	1,3640	-3,27
43	0,03920	0,03792	-3,27	1,41455	1,3683	-3,27
44	0,03923	0,03795	-3,27	1,41570	1,3695	-3,26
45	0,03923	0,03795	-3,27	1,41565	1,3695	-3,26
46	0,03921	0,03793	-3,26	1,41480	1,3687	-3,26
47	0,03916	0,03788	-3,26	1,41310	1,3672	-3,25
48	0,03908	0,03781	-3,25	1,41030	1,3645	-3,25
49	0,03895	0,03769	-3,25	1,40555	1,3600	-3,24
50	0,03867	0,03742	-3,25	1,39555	1,3503	-3,24
DHT _v =1,0918%		DHT _v =1,0588%		DHT _i =1,0918%		DHT _i =1,0588%

Fonte: Autoria própria dados gerados pelo programa ATP.

É importante ressaltar que na prática quando se tem 1 aerogerador ou mais de 1 aerogerador em paralelo o indicado é que se realizem as medições de DHT tanto de tensão quanto de corrente in loco, ou seja nos aerogeradores ou parques eólicos, pois a DHT depende de fatores como: potência usada do aerogerador, características da carga e etc.

4 CONCLUSÃO

Estudos sobre a geração de energia elétrica por fonte eólica são importantes sob vários aspectos. Além do crescente aumento dessa forma de geração de energia elétrica no Brasil nos últimos anos, a preservação da natureza e a economia proporcionada por um sistema que usa apenas o vento como matéria prima são de ampla aceitação pela comunidade científica e sociedade em geral. No entanto, problemas relacionados à qualidade da energia elétrica não devem ser descartados, pois o acúmulo de tais problemas pode causar defeitos e até falhas em um sistema elétrico de potência.

Este trabalho produziu informações sobre a geração de energia elétrica através de aerogeradores e também à simulação dos parâmetros elétricos de aerogeradores alimentando cargas puramente resistivas, dessa forma foi reproduzido de maneira simplificada um teste de um aerogerador utilizando os critérios da norma técnica brasileira NBR IEC 61400-21.

A modelagem do sistema foi realizada de forma detalhada e tomando sempre o cuidado de preservar as reais características elétricas de todos os equipamentos necessários para a realização das simulações.

Os resultados obtidos nas simulações foram os esperados, pois correspondem com os resultados obtidos usando cálculos algébricos através de equações matemáticas.

As dificuldades encontradas na realização deste trabalho foram relacionadas a recusa de alguns fabricantes de aerogeradores em fornecer os dados necessários para as simulações, e também na modelagem dos equipamentos e na configuração do programa ATP.

Os objetivos deste trabalho foram alcançados, pois foram compreendidos os processos de transformação de energia realizados pelos aerogeradores, os dados dos aerogeradores foram interpretados corretamente, foram feitas a modelagem e as simulações de 1 e de 5 aerogeradores com as correntes de frequências harmônicas em fase e defasadas, foram medidos e calculados os valores de DHT de tensão e de corrente, e por fim os resultados gerados pelo programa ATP foram

analisados e comparados com os valores estabelecidos pela norma técnica NBR IEC 61400-21.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. Ed. Brasília: ANEEL, 2005. Disponível em: <<http://goo.gl/v6hlku>>. Acesso em: 03 set. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. Ed. Brasília: ANEEL, 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/lak7sQ>>. Acesso em: 03 set. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de informações de geração: Fontes de energia exploradas no Brasil**. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <<http://goo.gl/RaS7Zt>>. Acesso em: 22 jul. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST): Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Rev. 7. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <<http://goo.gl/2xpBqy>>. Acesso em: 03 abr. 2016.

ALEXANDER, Charles K; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de circuitos Elétricos**. 5ª ed. Editora AMGH. Porto Alegre, 2013.

ALMEIDA, Alvaro A. W. **Máquinas síncronas trifásicas**: Slides apresentados em aula. Curitiba, 2015.

AMÊNDOLA, Cesar. A. M. **Contribuição ao estudo de aerogeradores de velocidade e passo variáveis com gerador duplamente alimentado e sistema de controle difuso**. 2007. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://goo.gl/58TQWw>>. Acesso em 22 fev. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 61400 – 21: Turbinas eólicas parte 21: Medição e avaliação das características da qualidade da energia de aerogeradores conectados à rede**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIATION FOR PROMOTION OF E-LEARNING TOOLS FOR ELECTRICAL ENGINEERING (E-LEARNING). **Particularidades**. Disponível em: <<http://goo.gl/aTh0pr>>. Acesso em: 17 mar. 2016.

CENTRO DE ENERGIA EÓLICO DA PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL (CE EÓLICA). **Perguntas frequentes sobre energia eólica**. Rio Grande do Sul: CE EÓLICA, 2016. Disponível em: <<http://goo.gl/MDT3Z4>>. Acesso em: 24 mar. 2016.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Energia eólica princípios e tecnologias**. Rio de Janeiro: CEPEL CRESESB, 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/Lv0Cmh>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 2016**: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/u01qPv>>. Acesso em: 22 jul. 2016.

ENGQUIMICA. **Energia eólica e aerogeradores**. Disponível em: <<http://goo.gl/wxdgRv>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

EVOLUÇÃO ENERGIA EÓLICA. **Energia eólica**. Disponível em: <<https://goo.gl/6h5oUd>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ). **Os ventos**. Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 2016. Disponível em: <<http://goo.gl/EI0fj2>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

GRIMM, Alice M. **Meteorologia básica**: notas de aulas. Disponível em: <<http://goo.gl/2yn2Eh>>. Acesso em: 22 jan. 2016.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE 519**: Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. Nova Iorque-USA, 2014.

INSTITUTO DE ASTRONOMIA GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (IAG USP). **Dinâmica planetária de tempo e clima**. São Paulo: IAG USP, 2016. Disponível em: <<http://goo.gl/U92gbj>>. Acesso em: 03 fev. 2016.

LIMA, Luiz C. M. J. **Avaliação experimental das perturbações causadas pelo sistema de controle de excitação de usinas eólicas e seus impactos no sistema elétrico de potência**. 2013. 159 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/sZThhD>>. Acesso em 19 set. 2015.

MAGALHÃES, Christiane M. S. **Análise do impacto de conversores de frequência na qualidade de energia do sistema de distribuição de uma indústria de petróleo**. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará. Belém, 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/ffWSH3>>. Acesso em 01 mar. 2016.

MARQUES, Jeferson. **Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. 2004. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2004. Disponível em: <<http://goo.gl/8x7v6z>>. Acesso em 17 mar. 2016.

MARTINHO, E. **Distúrbios da energia elétrica**. 3º Ed. Editora Érica. São Paulo, 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Proinfa**. Brasília: MME, 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/bABcEw>>. Acesso em: 20 out. 2015.

MOREIRA, José C. S. **Geradores elétricos para aproveitamentos de energias renováveis**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto. Porto - Portugal, 2008. Disponível em: <<https://goo.gl/ybbYnZ>>. Acesso em 05 abr. 2016.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Procedimentos de Rede**: Submódulo 2.8 – Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes. Rev. 2.0 Brasília: ONS, 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/154In2>>. Acesso em 16 mai. 2016.

PAULILO, Gilson; TEIXEIRA, Mateus D. **Fascículo qualidade da energia: harmônicos**. O Setor Elétrico, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/mCjP86>>. Acesso em 13 abr. 2016.

PAVINATTO, Eduardo F. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. 2013. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://goo.gl/6opQWo>>. Acesso em 19 mar. 2016.

ROSAS, Pedro A. C. ; ESTANQUEIRA, Ana I. **Guia de projetos de centrais eólicas**: Projeto elétrico e impacto de centrais eólicas na rede elétrica. 2003, v. 1.

Recife: Centro Brasileiro de Energia Eólica. Disponível em: <<http://goo.gl/a69kJ>>. Acesso em 29 abr. 2016.

ROCHA, Selênio S. **Curso de especialização em energia eólica**: Apostila tecnologia em aerogeradores. Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.

RUFATO, Eloi J. **Viabilidade técnica e econômica da modernização do sistema de proteção da distribuição**. 2006. 202 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Workshop instalações elétricas de baixa tensão: Qualidade de energia harmônicas: Ano base 2003 / Instituto Brasileiro de Cobre (PROCOBRE)**. 2003. Disponível em: <<http://goo.gl/dXeuKB>>. Acesso em 04 mai. 2016.

SCHWANZ, Daphne. **Análise da distorção harmônica de um parque eólico através da sua modelagem no domínio do tempo e da frequência**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/y6BtCi>>. Acesso em 02 mai. 2016.

SILVA, Guilherme B. O. **Desenvolvimento de uma turbina eólica de eixo vertical**. 2011. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeroespacial) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/ueRxQL>>. Acesso em 05 mai. 2016.

TAVARES, Maria C. D. ; CAMPOS, Paulo G.; PRADO, P. **Guia resumido do ATP – Alternative Transient Program**. Apostila –Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003. Disponível em: < <http://goo.gl/jDR6fs>>. Acesso em 10 ago. 2016.

SIMONE, Gilio A. **Máquinas de indução trifásicas: Teoria e exercícios**. Editora Érica. São Paulo, 2000.

TOLMASQUIM, Mauricio T. **Energia renovável**: Hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <<http://goo.gl/cQKykg>>. Acesso em 18 mai. 2016.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR). **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Curitiba: Editora UTFPR, 2009.

VAREJÃO, Mário A. S. **Meteorologia e climatologia**. v. 2. Recife, 2006.
Disponível em: <<http://goo.gl/Z7mFmV>>. Acesso em 06 mai. 2016.

WEG. **DT – 5**: Características e especificações de geradores. Jaraguá do Sul: Weg.
Disponível em: <<http://goo.gl/z21pUf>>. Acesso em: 19 abr. 2016.