

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELLE ZATONI DE OLIVEIRA – GRR20136255

MAYARA KETHLIN SILVA DOS REIS – GRR20135815

**UMA INVESTIGAÇÃO SOBRE O IMPACTO DE DIFERENTES  
MODELOS DE LINHAS E CABOS ELÉTRICOS PARA A QUALIDADE  
DA ENERGIA APLICADOS EM UM PARQUE EÓLICO**

CURITIBA

2019

MARCELLE ZATONI DE OLIVEIRA

MAYARA KETHLIN SILVA DOS REIS

**UMA INVESTIGAÇÃO SOBRE O IMPACTO DE DIFERENTES  
MODELOS DE LINHAS E CABOS ELÉTRICOS PARA A QUALIDADE  
DA ENERGIA APLICADOS EM UM PARQUE EÓLICO**

Projeto de trabalho de conclusão de curso apresentada à banca avaliadora da Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, como requisito parcial para a obtenção do diploma de engenheiras eletricistas.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Duarte Teixeira.

CURITIBA

2019

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à natureza, criadora de todo o universo.

Aos professores que fizeram parte de toda a minha vida escolar. Sem eles eu não teria me desenvolvido intelectualmente. E àqueles da faculdade que fizeram a diferença, além da UFPR como um todo.

Aos familiares que se fizeram presentes e mostraram interesse pela minha formação acadêmica e profissional.

À Alexandra, Ana Flávia, Daniela, Juliana, Lais, Karyna e Maia, amigas que me acompanham desde o colégio e me ensinaram a força da amizade.

À Andressa, Bruna, Gabriele, Juliana, Luísa, Mariana, Matheus, Mayara, Morgana, Schueda e Thaís. Por serem o melhor de toda a faculdade.

Ao Henrique, Helloísa, Letícia e Lucas, por terem sido meus primeiros amigos dentro da UFPR e dividirem tantos momentos incríveis comigo.

À Sharlene e Stephanni, pela amizade, apoio e motivação incondicional. Eu não estaria aqui sem vocês.

À Amanda, Bianca, Danielle, Hellen, Natália e Rebecca. Vocês me fazem uma pessoa melhor.

À Gislaine, Jackson, Karita e Luana, por toda a amizade e companheirismo.

A todos aqueles que fizeram parte dos 4,5 anos em que participei do DAEL, por me mostrarem que a universidade não é só sala de aula.

Novamente à Mayara, por toda a sintonia nesse trabalho, não poderia ter dupla mais incrível.

Ao professor Mateus, por suas orientações, conselhos e atenção.

A tantos outros que acompanharam meu dia a dia ao longo do curso e, de alguma forma, me impactaram.

Ao meu pai, Marcelo, por suas palavras de incentivo e carinho, e por ser um dos meus pilares de sustentação.

À Isabelle, minha irmã, por, mesmo longe, estar presente, me acompanhando sempre.

E, por último e mais importante, à minha mãe Sonia, por minha existência. A grande responsável por tudo o que sou.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, primeiramente, por ter cuidado de cada detalhe da minha vida e sempre realizar sonhos maiores dos que os meus.

Aos meus pais, Eduardo e Ivanete, que não mediram esforços para que eu me tornasse quem eu sou hoje, sempre me apoiando e ajudando.

A minha irmã, Maria Eduarda, por ser sempre minha torcedora fiel e me lembrar sempre do quão longe já fui.

Aos meus familiares, por todas as orações e palavras de sabedoria.

A minha dupla de TCC, Marcelle, por ter sido uma amiga incrível e maravilhosa nesses anos de faculdade e a melhor pessoa para se ter como dupla.

Aos meus amigos da faculdade, por terem me acompanhado nessa trajetória, sendo possível, assim, dividirmos nossos fardos.

Aos meus amigos, por terem sido maravilhosos em todos os momentos e não terem desistido de mim nos dias maus.

Ao professor Mateus, por ter sido o melhor orientador e professor.

A UFPR, pela oportunidade incrível de ter realizado meu sonho pessoal de me graduar em uma universidade pública tão renomada.

## RESUMO

O estudo dos harmônicos tem se tornado a cada dia mais essencial para uma completa avaliação da qualidade da energia, isso pois sua magnitude afeta diretamente o fornecimento de energia, bem como pode ocasionar danos à vida humana e à natureza. Para que seja possível fazer um estudo que não seja superficial do impacto dos harmônicos, escolheu-se verificar o comportamento, em um parque eólico, quando se tem alterado seu cabeamento e tipos de instalações, avaliando, dessa forma, sua resposta em frequência, para ser possível desenvolver teorias e projetos sobre como resolvê-los ou amenizá-los. Esse estudo será feito através de modelagens e simulações de um parque no software HarmZs (estudos de comportamento harmônicos e análise modal de redes elétricas), tendo seus cabos modificados, para que, assim, seja possível verificar o impacto dos parâmetros de cada cabo em seu desempenho na qualidade de energia, principalmente quanto a distorções harmônicas. O objetivo do projeto não é dar um estudo genérico para todo e qualquer parque eólico, visto que cada parque tem suas particularidades que interferem no resultado individual, mas através de um parque, mostrar como esse tipo de estudo é importante para cada caso de modo a garantir que sejam evitados alguns tipos de perda que impactem no desempenho do parque.

Palavras chave: Energia Elétrica; Parque Eólico; Qualidade de Energia Elétrica; Linhas Aéreas; Linhas Subterrâneas; Cabos; Interferência Harmônica.

## **ABSTRACT**

The harmonics' study has become more and more essential for a complete evaluation of the energy's quality, since its magnitude affects directly the supply of energy and it also can cause damage to human life and nature. In order to make a good study about the impact of harmonics, it was decided to verify its behavior in a wind farm, when its cabling and types of installations have been modified, evaluating the frequency's response, and after that, it will be possible to develop theories and projects on how to solve this problem. This evaluation will be done through modeling and simulating a wind farm in a software called HarmZs (study of harmonic effects and modal analysis of electrical networks), when its cables' parameters are modified, so it will be possible to verify the impact of this change in its performance in the energy's quality, mainly regarding harmonic distortions. This project's objective is not to have a generic study to any kind of wind farm, since each one has its peculiarities that interfere in the individual result, but as an example, showing how much this study is important in order to ensure that the performance of the wind farm does not have much loss.

Key words: Electric Energy; Wind Farm; Power Quality; Overhead Lines; Underground Lines; Cables; Harmonic Interference.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito RLC série .....	23
Figura 2 - Defasagem entre correntes.....	24
Figura 3 - Método das imagens.....	27
Figura 4 - Gráfico dos países com maior capacidade instalada 2017 .....	31
Figura 5 - Estados brasileiros com maior capacidade instalada 2017.....	33
Figura 6 - Sistema eólico isolado .....	34
Figura 7 - Partes de um aerogerador .....	35
Figura 8 - Série de Fourier .....	36
Figura 9 - Gráfico da variação da resistência conforme a temperatura.....	41
Figura 10 - Cabo isolado e suas camadas .....	44
Figura 11 - Cabo de alumínio de alma de aço (CAA).....	45
Figura 12 - Circuito Equivalente Monofásico de Linha de Transmissão com Parâmetros distribuídos .....	47
Figura 13 - Circuito Pi em uma linha de transmissão .....	47
Figura 14 - Esquema de rede de distribuição aérea.....	50
Figura 15 - Esquema de rede de distribuição subterrânea .....	50
Figura 16 - Circuitos equivalentes de Norton .....	53
Figura 17 - Cabo Eprotenax .....	54
Figura 18 - Cabo Voltalene.....	55
Figura 19 - Cabo Eprotenax Compact.....	55
Figura 20 - Cabo Eprotenax Compact 105.....	56
Figura 21 - Cabo Flexonax.....	56
Figura 22 - Cabo Forex .....	57
Figura 23 - Dados gerais no HarmZs .....	58
Figura 24 - Tensões no HarmZs.....	58
Figura 25 - Áreas do sistema no HarmZs.....	59
Figura 26 - Dados de barras utilizados no HarmZs .....	59
Figura 27 - Dados do transformador utilizado no HarmZs.....	60
Figura 28 - Diagrama unifilar do parque .....	60
Figura 29 - Rede montada no HarmZs.....	61
Figura 30 - Dados de linha .....	62

Figura 31 - Parâmetros para resposta em frequência .....	63
Figura 32 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax e Voltalene .....	64
Figura 33 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact nú .....	64
Figura 34 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax e Voltalene .....	65
Figura 35 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax e Voltalene. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem. ....	65
Figura 36 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact.....	66
Figura 37 - Resposta em frequência para cabo Flexonax Cobre .....	66
Figura 38- Resposta em frequência para cabo Forex Alumínio .....	67
Figura 39 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact.....	67
Figura 40 - Resposta em frequência para cabo Flexonax cobre .....	68
Figura 41 - Resposta em frequência para cabo Forex alumínio.....	68
Figura 42 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem. ....	69
Figura 43 - Resposta em frequência para cabo Flexonax cobre. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem. ....	69
Figura 44 - Resposta em frequência para cabo Forex alumínio. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem. ....	70
Figura 45 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact 105.....	70
Figura 46 - Resposta em frequência para cabo Flexonax Alumínio .....	71
Figura 47 - Resposta em frequência para cabo Forex Cobre.....	71
Figura 48 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact 105.....	72
Figura 49 - Resposta em frequência para cabo Flexonax alumínio .....	72
Figura 50 - Resposta em frequência para cabo Forex Cobre.....	73
Figura 51 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact 105. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem. .	73
Figura 52 - Resposta em frequência para cabo Flexonax alumínio. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem. ....	74
Figura 53 - Resposta em frequência para cabo Forex cobre. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem. ....	74
Figura 54 - Comparação da resposta em frequência dos cabos para instalação s=2d .....	76
Figura 55 - Comparação da resposta em frequência dos cabos para instalação em trifólio.....	77

Figura 56 - Comparação da resposta em frequência dos cabos para instalação subterrânea, em banco de dutos..... 77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distorções harmônicas totais de tensão.....	38
Tabela 2 - Distorções harmônicas individuais de tensão .....	38
Tabela 3 - Valores de resistência para diferentes temperaturas .....	41
Tabela 4 – Dados obtidos com banco e sem banco de capacitores .....	78

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CEMIG: Companhia Energética de Minas Gerais

CEPEL: Centro de pesquisas de energia elétrica

COPEL: Companhia Paranaense de Energia

DEC: Duração equivalente por consumidor

DEV: Duração equivalente de violação de tensão

DHI: Distorção harmônica de corrente

DTHT ou DHT:

DHV: Distorção harmônica de tensão

DIC: Duração de interrupção do consumidor

DHT ou DTHT: Ddistorção harmônica total

EIA: Estudo de Impacto Ambiental

EPR: Borracha etileno-propileno

FEC: Frequência equivalente e interrupção

FEV: Frequência equivalente de violação de tensão

FIC: Frequência de interrupção do consumidor

GWEC: Conselho global de energia eólica

LT: Linha de transmissão

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico

PAC: Ponto de acoplamento comum

PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PROINFA: Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

PVC: Policloreto de vinila

RIMA: Relatório de Impacto Ambiental

SEP: Sistema Elétrico de Potência

SI: Sistema Internacional

SIN: Sistema Interligado Nacional

VEV: Variação equivalente de violação de tensão

XLPE: Composto termofixo à base de polietileno reticulado

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	CONTEXTO.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA .....	15
1.3	OBJETIVO.....	15
1.4	METODOLOGIA.....	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
2.1	ACOPLAMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO.....	19
2.2	ENERGIA E POTÊNCIA.....	20
2.3	CONTROLE DE FREQUÊNCIA E TENSÃO .....	21
2.4	IMPEDÂNCIA .....	22
2.5	IMPEDÂNCIA DE LINHA.....	24
2.6	CAPACITÂNCIA .....	25
2.7	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	27
2.8	TERMOS RELACIONADOS AO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO.....	28
3.	ENERGIA EÓLICA .....	30
3.1	ENERGIA EÓLICA NO BRASIL .....	31
3.1.1	Energia Eólica no Paraná	33
3.2	PARQUE EÓLICO.....	33
3.2.1	Funcionamento de um Aerogerador	34
4.	MODELOS ELÉTRICOS DE CABOS E LINHAS.....	40
4.1	CABOS TÍPICOS EM REDES SUBTERRÂNEAS.....	43
4.2	CABOS TÍPICOS EM REDES AÉREAS .....	44

4.3	LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	46
4.4	LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO .....	49
5.	MATERIAIS E MODELAGENS.....	52
5.1	HARMZS - ESTUDO DE COMPORTAMENTO HARMÔNICO E ANÁLISE MODAL DE REDES ELÉTRICAS (VERSÃO ESTUDANTIL) .....	52
5.2	CABEAMENTO UTILIZADO.....	53
5.3	CÁLCULO DOS PARÂMETROS DOS CABOS.....	57
5.4	PARQUE SIMULADO.....	58
5.4.1	SIMULAÇÃO	COM
S=2D	63	
5.4.2	SIMULAÇÃO	EM
TRIFÓLIO	66	
5.4.3	SIMULAÇÃO	EM BANCO DE
DUTOS	70	
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	75
7.	CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE .....	80
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	82

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho de conclusão de curso se iniciou ao ser observado a importância que o cabeamento tem nos custos da instalação, bem como sua influência e impacto elétrico no funcionamento de um parque eólico, seja através das perdas, da ressonância harmônica, entre outros. Nesse sentido, decidiu-se verificar qual impacto os cabos trazem para a qualidade de energia dentro do parque, visto que existem diversos estudos que mostram sua influência para fora do parque, contudo poucos relatam sobre as influências para parte interna do parque.

### 1.1 CONTEXTO

Até o início dos anos 90, os motores tinham, em grande maioria, sua partida acionada por meio de sistemas eletromecânicos, como a partida direta e a estrela-triângulo. Entretanto, esses sistemas apresentavam desvantagens, pois criavam gargalos nas indústrias, afetando negativamente o processo e atrasando a produção. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, surgiram as partidas estáticas, através de soft-start e inversores de frequência, que, por sua vez, melhoraram o panorama geral das indústrias.

Contudo, apesar das vantagens obtidas, os dispositivos eletrônicos possuem uma natureza não linear e, portanto, desenvolvem correntes harmônicas que geram perdas de energia através de suas frequências proporcionais à fundamental.

Os componentes eletrônicos tiveram grande abrangência nos sistemas elétricos, sendo parte importante não só na entrega, mas na geração e distribuição da energia. Atualmente, todas as formas de geração renováveis, estão, de alguma forma, acopladas a sistemas eletrônicos, principalmente fontes alternativas, como a fotovoltaica e a eólica.

Além de toda essa demanda não linear dos sistemas, ainda existe uma grande variedade de cabos elétricos, com características distintas que também alteram a qualidade da energia distribuída. Entre as opções, existem cabos isolados, que possuem apenas uma camada de proteção, ou seja, a capa que envolve o condutor; unipolares, com uma camada isolante além da capa; e os multipolares, que é, basicamente, um conjunto de vários cabos isolados, envoltos em nova camada isolante.

Portanto, na avaliação da qualidade da energia, o estudo dos harmônicos é essencial, pois sua magnitude afeta o fornecimento de energia para os consumidores, além de poder causar danos à vida humana e à natureza. No âmbito da distribuição de energia elétrica, é preciso, também, fazer o estudo do comportamento de modelos de cabos, a fim de avaliar sua resposta em frequência, obtendo, assim, informações sobre os harmônicos para, enfim, desenvolver teorias e projetos sobre como resolvê-los.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, problemas relacionados a distorções harmônicas em parques eólicos são consideravelmente críticos, por conta de muitos equipamentos não lineares ligados ao sistema (Aerogeradores), sendo preciso, portanto, desenvolver novas tecnologias para evitar os harmônicos gerados. Para isso, verifica-se a necessidade de um estudo prévio o qual possibilite a descoberta de seus efeitos devido à influência dos cabos, evitando assim, falhas e comprometimento do sistema, bem como propiciar que menores perdas elétricas e custos. O conhecimento e resolução desses efeitos acarretam em, visando um cenário positivo, maior qualidade de energia.

## 1.3 OBJETIVO

Diante das situações citadas, este trabalho tem como objetivo a investigação de diferentes modelos de linhas e cabos de energia, bem como

seus impactos para a qualidade de energia elétrica, especialmente as distorções harmônicas em parques eólicos. Para isso, utilizar-se-á métodos de simulação para avaliar seus parâmetros de capacitância e indutância. Será utilizado como base um caso prático de um parque eólico para as simulações computacionais.

- Levantar as referências bibliográficas sobre a influência de linhas e cabos de energia para distúrbios elétricos;
- Estudar a influência dos parâmetros dos cabos em estudos envolvendo qualidade de energia;
- Modelar computacionalmente um parque eólico no software HarmZs;
- Propor diferentes cenários no parque modelado com diferentes cabos e instalações;
- Analisar as simulações computacionais e investigar os resultados obtidos através de curvas que apresentem o comportamento da impedância em função da frequência.

#### 1.4 METODOLOGIA

Em um primeiro momento, no capítulo 2, será realizada uma pesquisa da bibliografia do tema para uma maior fundamentação teórica e um melhor domínio sobre o assunto. Para isso, serão utilizados livros, artigos científicos, trabalhos de conclusão já realizados por outros autores e pesquisa pela internet.

No capítulo 3, por sua vez, tem-se uma parte introdutória sobre energia eólica e o funcionamento de um parque eólico, visto que o presente trabalho se realiza em torno desse assunto.

Para o capítulo 4, verificou-se a importância de obter informações que introduzissem ao cabeamento e sobre a influência que as harmônicas possuem nesse meio, verificando, dessa forma, a qualidade da energia.

No capítulo 5, tem-se um estudo mais aprofundado sobre os tipos de cabos, tipos de linhas e a influência dos parâmetros como resistência, reatância e susceptância já visando introduzir como se dará, no capítulo 6, as modelagens

Em paralelo, será dedicado tempo para aprendizagem do software HarmZs a ser utilizado para as simulações e, tão logo, serão efetuadas as devidas modelagens do parque eólico e obtenção das curvas desejadas, com o uso de catálogos de fabricantes de cabos, obtendo informações que serão demonstradas no capítulo 7.

O capítulo 8, por fim, será composto pelas conclusões efetuadas durante e após as modelagens e simulações.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia elétrica pode ser definida, atualmente, como o portão de acesso a serviços básicos e primordiais ao ser humano, elevando, dessa forma, a qualidade de vida. Para que a população tenha acesso a ela, um sistema de energia elétrica foi desenvolvido. Este, por sua vez, é formado pelos seguintes subsistemas: geração, transmissão e distribuição, cada qual com suas particularidades e considerações.

Na geração, a fonte da energia pode ser de origem renovável, que agrega a solar, hidrelétrica, eólica e biomassa, por exemplo, ou de origem fóssil, como o carvão e o gás natural. Após sua geração, a energia é transmitida para os usuários que estão conectados na carga, através dos sistemas de transmissão e distribuição, ambos formados por subestações e quilômetros de cabos, dada a grande distância entre o local de geração até os centros de consumo. O produto final, após ter sua tensão reduzida da transmissão, é distribuído para o consumidor, seja residencial, industrial ou comercial (ALDABÓ, 2001).

Esse processo, que é longo, geograficamente falando, está sujeito a ter sua qualidade afetada devido a falhas decorrentes de variações no clima, acidentes, bem como interferências no próprio sistema. Sabendo disso, é preciso que o projeto as considere e faça o uso de filtros e limitantes para manter os padrões estabelecidos de qualidade.

Na geração, os principais controles realizados no quesito qualidade são:

- Tensão: forma de onda, nível e simetria;
- Variação de frequência:  $60 \text{ Hz} \pm 0,5 \text{ Hz}$ .

Já na transmissão, os níveis de tensão devem estar dentro de parâmetros estabelecidos previamente, porém variações são inevitáveis, por motivos como:

- Mudança nas características dos condutores, como a temperatura externa, aquecimento do condutor;
- Problemas na rede como curto circuito ou descargas na atmosfera.

Na distribuição, os níveis de tensão também precisam se manter dentro de parâmetros, os quais são fiscalizados por órgãos responsáveis, de modo a garantir os seguintes requisitos:

- Continuidade de serviço;
- DEC (duração equivalente por consumidor): tempo médio que o consumidor fica sem energia no período considerado;
- FEC (frequência equivalente de interrupção): média da quantidade de interrupções no consumidor considerado;
- Simetria do sistema;
- Forma de onda.

Em linhas de transmissão sem carga, quando se tem o chaveamento do sistema de potência ao efetuar uma manobra, um transiente é gerado. Nas seccionadoras, arcos ocorrem e criam campos irradiados de alta frequência, os quais podem prejudicar equipamentos eletrônicos sensíveis de subestações automatizadas. Em casos assim, é preciso fazer uso de cabos de fibra ótica ou com blindagem, para diminuir os efeitos dos transientes (ALDABÓ, 2001).

Em uma subestação, além dos transientes citados acima, tem-se, também, como fonte de emissão eletromagnética os seguintes pontos:

- Manobra de linha de transmissão ou distribuição com carga indutiva;
- Corrente de falta monopolar circulando pela terra e ocasionando uma diferença de potencial de até 30 kV;
- Abertura de disjuntor durante falta monopolar, gerando altas tensões em um amplo espectro de frequências;
- Descarga atmosférica na região da subestação ou nas linhas, ocasionando tensões induzidas e transferência de potenciais;
- Abertura de seccionadoras;

## 2.1 ACOPLAMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO

Os acoplamentos no sistema de transmissão e no de distribuição geram interferências magnéticas, como, por exemplo, o acoplamento indutivo (magnético), que é formado por um sistema no qual se induz tensões proporcionais à taxa de variação da corrente e à indutância mútua entre os circuitos em uma instalação. Assim, são formadas correntes, que circulam entre o equipamento e a terra, e diferenças de potencial, tanto em circuitos aéreos como em subterrâneos, gerando, portanto, campos eletromagnéticos (ALDABÓ, 2001). O afastamento entre os sistemas emissor e receptor é diretamente proporcional à intensidade das forças induzidas, bem como o comprimento dos condutores paralelos entre os sistemas. Além desses pontos, outra condição que afeta a intensidade é a blindagem do sistema receptor.

Outro tipo de acoplamento é o capacitivo, no qual ocorre a transferência de energia do emissor para uma instalação em sua vizinhança, através de suas capacitâncias próprias e mútuas, sendo diretamente proporcional à taxa de variação de tensão, além da impedância entre ambos os circuitos. Como consequência desse tipo de acoplamento, tem-se:

- Corrente elétrica que flui através da conexão à terra do sistema receptor aterrado;
- Diferença de potencial induzida entre o sistema receptor e a terra, caso o receptor não esteja aterrado.

## 2.2 ENERGIA E POTÊNCIA

Por definição, a energia é a quantidade de trabalho que um sistema é capaz de realizar, logo, ela não pode ser criada ou destruída, apenas convertida ou transferida para outras formas, como a cinética, elétrica, mecânica, etc (ALDABÓ, 2001). As perdas ocasionais ocorrem no processo de conversão, resultando em calor. O trabalho, por sua vez, é a força necessária a ser aplicada em um corpo, para deslocá-lo.

$$T = F * \Delta x \quad (1)$$

Sendo:

T: o trabalho realizado;

F: a força aplicada;

$\Delta x$ : o deslocamento sofrido pelo corpo.

A potência, cuja unidade de medida no Sistema Internacional é o Watt (W), é a energia transferida por unidade de tempo. A energia é medida em um período de tempo, enquanto a potência pode ser medida em um instante de tempo (ALDABÓ, 2001). Por exemplo, se uma turbina tem a potência nominal igual a 600 kWh, isso significa que ela produz 600 kW de energia em cada hora de operação. Agora, um local que tenha uma potência instalada de 1000 MW, esse valor não traduz a quantidade de energia a ser produzida.

$$p(t) = \frac{d e(t)}{dt} \quad (2)$$

Onde:

$e(t)$ : é a energia absorvida ou fornecida, em função do tempo;

$p(t)$ : a potência absorvida ou fornecida.

## 2.3 CONTROLE DE FREQUÊNCIA E TENSÃO

A ANEEL, no Brasil, define que a frequência do sistema interligado, para instalações conectadas à rede de distribuição, esteja na faixa de 59,9 e 60,1 Hz (ALDABÓ, 2001). Em casos de distúrbios, a frequência tem até 30 segundos para voltar à faixa de 59,5 e 60,5 Hz para que ocorra o reequilíbrio da carga-geração (ALDABÓ, 2001).

O controle de tensão está ligado à capacidade de absorver potência reativa. O ONS exige, através dos Procedimentos de Rede, os seguintes pontos para a tensão:

- Operação entre 0,90 pu e 1,10 pu da tensão nominal sem atuação dos relés de subtensão ou sobretensão;

- Operação entre 0,85 pu e 0,90 pu da tensão nominal por até 5 segundos;
- Componente fundamental da sobretensão não pode exceder 1,25 pu (ALDABÓ, 2001).

Por unidade (pu) é a porcentagem resultante da divisão entre o valor indicado pelo nominal.

$$A_{PU} = \frac{A}{A_{BASE}} \quad (3)$$

Esses critérios de controle e frequência visam a excelência no transporte da energia elétrica da geração até a carga, por isso a necessidade de seus valores serem mantidos próximos aos nominais.

O controle de tensão é necessário devido à indutância (impedâncias), capacitância (susceptâncias) e resistência de cabos e linhas, além de transformadores (ALDABÓ, 2001). Esses parâmetros induzem uma diferença de tensão entre os nós do sistema, que precisa se manter dentro do permitido para evitar qualquer desvio do valor nominal.

A resistência de uma rede de transmissão é muito pequena se comparada à reatância indutiva, quando verificado a diferença de tensão entre os terminais de uma linha, a qual é muito afetada pelo fluxo de potência reativo da linha (ALDABÓ, 2001). Portanto, as tensões de nó são controladas pela correção da potência reativa gerada (ou consumida) por geradores de grande porte que estão conectados ao sistema. Uma das maneiras de corrigir a potência reativa é fazendo uso de bancos de capacitores, por exemplo.

Na rede de distribuição, por sua vez, a resistência tem seu papel e não pode simplesmente ser desprezada quando comparada à indutância, visto que a relação R/X é muito maior do que na transmissão. Com base nisso, o impacto da potência reativa na tensão de nó é menos significativo quando comparado ao da rede de transmissão.

## 2.4 IMPEDÂNCIA

Em um circuito eletrônico básico de tensão contínua, o resistor é o que se tem como resistência à passagem de corrente elétrica, enquanto em circuitos de tensão alternada, além da resistência, há, também, a reatância indutiva, provinda de um indutor, como uma bobina, por exemplo, e a capacitiva, proveniente de um capacitor (ALDABÓ, 2001).

Como capacitores e indutores só funcionam em circuitos de corrente alternada, em corrente contínua, o capacitor funciona como um circuito aberto e o indutor como um circuito fechado. A reatância é medida, no SI, em ohms e abreviada pela letra  $X$ , logo a reatância capacitiva é abreviada por  $X_C$  e a indutiva por  $X_L$ .

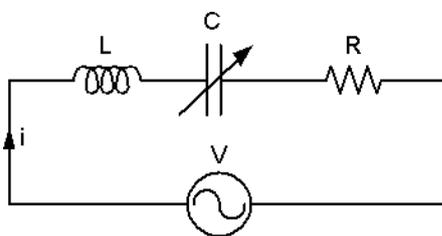


Figura 1 - Circuito RLC série

Fonte: Museu das Comunicações

A impedância é formada pela soma vetorial da resistência e da reatância capacitiva e indutiva, simbolizada pela letra  $Z$ . Em um circuito de corrente contínua, a impedância é a própria resistência.

a) Reatância indutiva

A reatância indutiva pode ser calculada conforme abaixo:

$$X_L = 2\pi fL \quad (4)$$

Sendo:

$f$  : frequência da tensão alternada, em Hz;

$L$  : indutância da bobina, em H;

b) Reatância capacitiva

A reatância capacitiva pode ser calculada conforme abaixo:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5)$$

Sendo:

$f$ : frequência da tensão alternada, em Hz;

$C$ : capacitância do capacitor, em F.

A corrente no resistor está em fase, a do capacitor está  $90^\circ$  adiantada, enquanto a do indutor está  $90^\circ$  atrasada, portanto, a defasagem entre ambos é de  $180^\circ$  (ALDABÓ, 2001), conforme Figura 2.

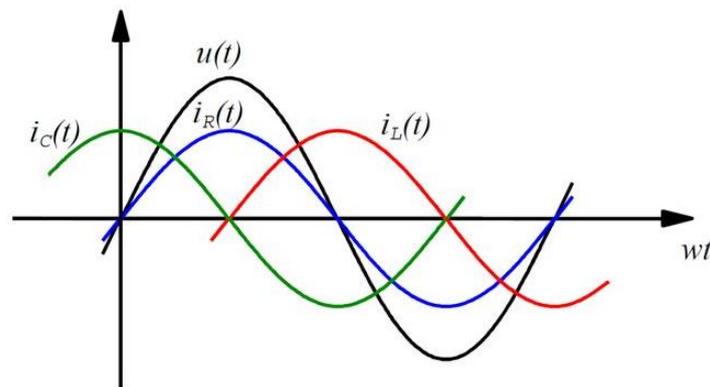


Figura 2 - Defasagem entre correntes

Fonte: Adaptado de slideplayer

### III) Cálculo da impedância

A impedância pode ser calculada da seguinte forma, levando em conta a resistência e a reatância, a letra  $j$  indica uma defasagem de  $90^\circ$  de  $X$  em relação a  $R$ , representando, assim, um número imaginário.

$$Z = R + jX \quad (6)$$

## 2.5 IMPEDÂNCIA DE LINHA

Muitos distúrbios que ocorrem em um sistema elétrico são resultados da interação da impedância de linha com a corrente de carga. Em uma linha, a tensão, nos pontos de alimentação, acaba divergindo da nominal devido principalmente à variação na capacidade e à utilização da eletricidade na instalação, o que é chamado de regulação de linha e, também, da variação da carga no interior da instalação, sendo chamada de regulação de carga (ALDABÓ, 2001).

A impedância de linha é o resultado da soma da resistência, indutância e capacitância de todos os dispositivos elétricos, sejam transformadores, condutores, fusíveis, entre outros. Um valor em excesso nessa impedância causa flutuações na tensão, distorções harmônicas e transientes, quando as cargas estão energizadas (ALDABÓ, 2001). Essas considerações fazem com que seja necessária uma atenção especial na elaboração do projeto de uma instalação elétrica.

Abaixo, têm-se algumas considerações a serem feitas no cálculo de impedância de linha:

- Impedância da fonte, a qual é informada pela concessionária de energia;
- Impedância do transformador de distribuição, que vem do fabricante;
- Impedância dos condutores, que consta em tabelas e catálogos de condutores elétricos;
- Impedância de contatos, chaves, fusíveis, que são informados pelo fabricante;
- Medidor de impedância.

## 2.6 CAPACITÂNCIA

A capacitância de linha resulta da diferença de potencial elétrico entre os cabos e depende das dimensões e distância entre os condutores, sendo a relação entre a carga ( $q$ ) e a diferença de potencial ( $V$ ) e sua unidade no Sistema Internacional é F/m.

$$C = \frac{q}{V} \quad (7)$$

Para linhas curtas, o efeito da capacitância é pequeno, o qual pode ser desprezado em cálculos. Em linhas longas de tensões elevadas, o efeito capacitivo tem poder para afetar o transporte da energia elétrica, sendo de extrema importância seu cálculo (BENEDITO,2015). Desse modo, assim como o campo magnético é essencial na determinação da indutância, a análise do campo elétrico é importante no cálculo da capacitância de linhas de transmissão.

Em uma linha de transmissão, os parâmetros como a resistência e a indutância podem ser calculados com o uso das equações de Maxwell, levando-se em conta as condições como fronteira com os condutores vizinhos, solo e local onde estão inseridos, sendo o ar, para linhas aéreas. Por outro lado, a capacitância e a condutância simbolizam a diferença de potencial entre os condutores e a corrente de fuga entre os condutores, ambos em relação ao solo, respectivamente (PINEDA, ARAÚJO, KUROKAWA, COSTA, PISSOLATO, 2017).

Um ponto que tem um grande impacto na capacitância é o espaçamento entre condutores que depende da tensão da linha e de seu comprimento, conforme fórmula a seguir:

$$C_{ab} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (8)$$

Sabe-se que  $\epsilon$  é o valor resultante da permissividade do material multiplicada pela permissividade do meio ( $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ ). A reatância capacitiva e a susceptância capacitiva são dadas, respectivamente, por:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_{ab}} \quad (9)$$

$$B_c = \frac{1}{X_c} \quad (10)$$

Geralmente, a capacitância entre fases é maior que a capacitância fase-terra, o que faz com que, na maioria dos casos, o efeito terra não provoque alterações de grande significância no valor da capacitância, contudo é possível determinar essa componente através do método das imagens, abaixo:

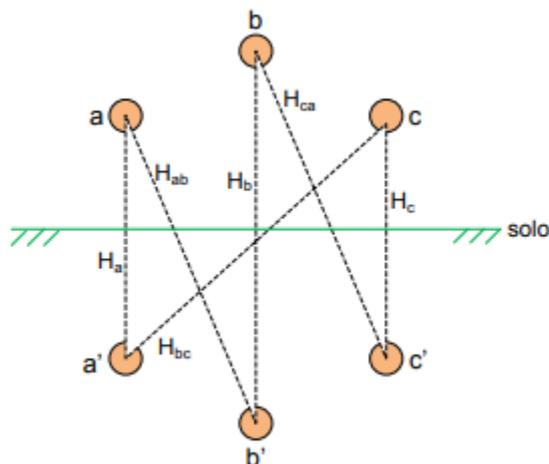


Figura 3 - Método das imagens

Fonte: retirado de (26)

Considerando a figura acima, chega-se no resultado de que a capacitância média em relação ao neutro é:

$$C_{aN} = C_{bN} = C_{cN} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r} \frac{\sqrt[3]{H_a H_b H_c}}{\sqrt[3]{H_{ab} H_{bc} H_{ca}}}\right)} \quad (11)$$

## 2.7 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Esse tipo de geração é caracterizado por todo tipo de geração elétrica, seja de pequeno ou grande porte, conectada ao sistema elétrico, de maior proximidade ao usuário final, pertencente a um produtor autônomo ou a uma concessionária.

A geração distribuída pode aumentar a confiabilidade e reduzir custos do sistema, além de aumentar a flexibilidade. O uso da interface eletrônica aumenta a qualidade do fornecimento, através da filtragem de harmônicas e suporte durante faltas. Contudo, esse tipo de geração acaba sendo refém de aspectos

geográficos, disponibilidade do vento, inserção na estrutura da rede elétrica, dentre outras (ALDABÓ, 2001).

Como benefícios, têm-se: a capacidade de fornecimento que aumenta; a redução que se tem nas perdas do sistema, diminuindo, conseqüentemente, o congestionamento na transmissão; além do aumento na confiabilidade da distribuição e melhora da qualidade da energia.

## 2.8 TERMOS RELACIONADOS AO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Alta tensão: valor, entre fases, igual ou maior do que 69 kV. Tensões superiores a 230 kV são consideradas Extra-Alta Tensão (EAT) e acima de 800 kV são Ultra-Alta Tensão (UAT).

Média tensão: valor, entre fases, maior que 1 kV, porém menor que 69kV.

Baixa tensão: valor, entre fases, abaixo de 1 kV, em corrente alternada, e abaixo de 1,5 kV em corrente contínua.

Confiabilidade do sistema: capacidade do sistema em atender os requisitos do consumidor geral quanto a determinados padrões técnico-operativos. Pode ser medido pela frequência, magnitude e duração de efeitos inadequados sobre o fornecimento de energia elétrica.

Desequilíbrio de tensão: desvio máximo médio das três fases de tensão dividido pela média das três fases de tensão, em porcentagem.

Energia primária: a qual não foi submetida a nenhum processo de conversão, por exemplo: hidráulica, nuclear, solar, eólica, geotérmica, etc.

Fator de carga: relação entre o consumo, em um intervalo de tempo determinado, e o consumo que resultaria da utilização contínua da carga máxima durante o período em questão.

Fator de potência: razão entre potência real e aparente, podendo ser em “atraso” (carga indutiva) ou “avanço” (carga capacitiva), dependendo da relação entre as fases da corrente e da tensão.

Potência nominal: capacidade instalada, potência máxima em regime contínuo.

Potência útil: potência elétrica na saída.

Rede Básica: instalações de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), que são das concessionárias de serviço público.

Rede elétrica: conjunto de linhas e equipamentos e instalações elétricas interligados.

### 3. ENERGIA EÓLICA

Há muitos anos a energia cinética proveniente do vento é utilizada pelas civilizações em moinhos, para o bombeamento de água e até para impulsionar embarcações. Estima-se que os primeiros moinhos de vento surgiram na Pérsia, 200 a. C.. Porém, o estudo e a aplicação dessa movimentação de massas de ar para a geração de eletricidade surgiu apenas no final do século XIX, na Escócia, com uma torre de 10 metros que gerava energia para alimentar uma pequena casa de campo. Concomitantemente, projetos similares foram desenvolvidos nos EUA e Dinamarca. Todos abandonados, pouco tempo depois, devido, principalmente, a dificuldades financeiras.

Só na década de 1940 surgiu um aerogerador de maior potência, capaz de alimentar até mil residências. E, nos anos seguintes, outros modelos de aerogeradores foram comercialmente difundidos para aplicação quase que exclusiva em fazendas isoladas (HERMES, 2011). Mesmo assim, o desenvolvimento dessa tecnologia permanecia estagnado, e apenas mais tarde, com a crise do petróleo na década de 70, os investimentos na energia eólica voltaram, aliados a preocupação com sustentabilidade e aquecimento global. O crescimento da tecnologia e implementação se deu de maneira exponencial, sendo o primeiro aerogerador instalado à rede elétrica na Dinamarca, em 1976 e, apenas 26 anos depois, já existiam mais de 30 mil aerogeradores em operação no mundo (PEREIRA, 2004).

Consequentemente, a capacidade mundial instalada multiplicou-se. Em 1990, estava a um patamar inferior a 2 GW, e, segundo as estatísticas de mercado divulgadas pelo GWEC (2018) (conselho global de energia eólica), em 2017, foram 52,57 GW de potência instalada, totalizando 539,58 GW de capacidade [20]. Dentre os países com maior capacidade instalada, destacam-se a China, com 188 GW, seguida por EUA (89 GW), Alemanha (56,1 GW), Índia (32,8 GW) e Espanha (23,2 GW).

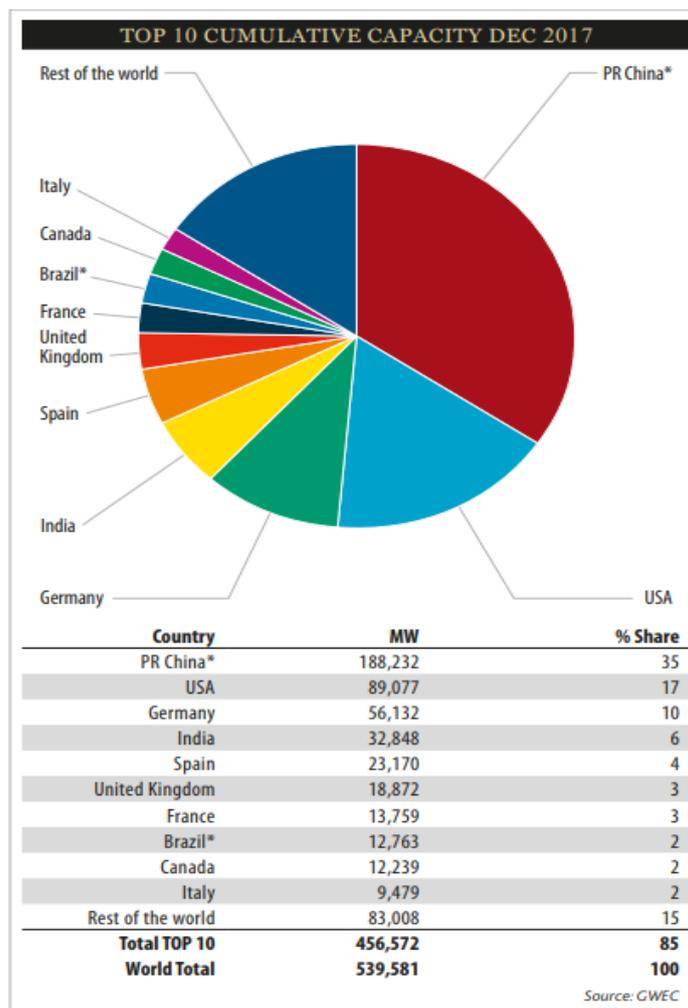


Figura 4 - Gráfico dos países com maior capacidade instalada 2017

Fonte: GWEC

Apesar das desvantagens, principalmente em relação ao transporte dos componentes do aerogerador, que são grandes e pesados, e leve poluição tanto visual quanto auditiva, atualmente a energia eólica é a forma de geração de eletricidade mais viável economicamente, e, estima-se que com um desenvolvimento ainda maior da tecnologia, seu crescimento continue ascendente, principalmente em países da América e Ásia, onde ainda há grandes áreas para serem exploradas.

### 3.1 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Apesar do primeiro aerogerador no Brasil ter sido instalado em 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha, incentivou-se a contratação de geração eólica no Brasil somente em 2001, durante a crise energética, através do PROEÓLICA (Programa emergencial de Energia Eólica) (BRASIL, 2001). Era esperado que o programa contratasse 1050 MW no período de dois anos, entretanto, os resultados se mostraram diferentes e, no ano seguinte, entrou em vigor o PROINFA, instituído pela Lei nº 10.438 (BRASIL, 2002). O qual determina, entre outros, que as tarifas dos sistemas de transmissão e distribuição fossem reduzidas 50%. Este incentivo viabilizou o investimento em energia eólica no país, e, em anos subsequentes, Leilões de Fontes Alternativas continuaram a fomentar a indústria.

Com as regras locais estabelecidas no PROINFA, a energia eólica expandiu, dado que, somente entre 2009 e 2015, 14,62 MW foram contratados. Os incentivos e leilões levaram o Brasil a um destaque mundial, mantendo-se em 10º lugar no ranking de capacidade acumulada em 2014, com 5,9 GW (GWEC, 2015).

As crises política e econômica reduziram os investimentos em 2015 e 2016, fato que acabará impactando negativamente o crescimento nos anos de 2020 e 2021 (ABEEólica, 2017). Ainda assim, atualmente o país ocupa o 8º lugar no ranking, com 12,7 GW de capacidade acumulada, tendo instalado 2,02 GW no ano de 2017 (GWEC, 2018).

Dessa maneira, segundo relatório anual divulgado pela ABEEólica, em 2017 a energia eólica compreendeu 8,1% da matriz energética brasileira, atrás apenas da hidrelétrica (60,4%), biomassa (9,2%) e gás natural (8,3%). Os estados que mais cresceram em capacidade instalada foram o Piauí e a Bahia, abrangendo mais da metade de todas as instalações realizadas no ano.

### NOVA CAPACIDADE INSTALADA EM 2017 (MW)

UF	Potência (MW)	Nº de Parques
PI	528,20	19
BA	517,10	20
RN	259,30	10
MA	220,80	8
CE	147,00	6
PE	131,10	5
RS	129,00	8
PB	94,50	3
<b>Total Geral</b>	<b>2.027,00</b>	<b>79</b>

Figura 5 - Estados brasileiros com maior capacidade instalada 2017

Fonte: ANEEL/ABEEólica

Com 508 parques no total, o crescimento brasileiro, entre 2016 e 2017 foi de 18,87%.

#### 3.1.1 Energia Eólica no Paraná

Apesar de todo o avanço do Brasil na energia eólica, o estado do Paraná não apresenta grandes resultados, sendo o segundo estado com menor fator de capacidade, a frente somente de Santa Catarina (ABEEólica, 2017), e possuindo a menor geração, uma média de 0,41 MW/ano. Contudo, em 2019, deu-se início a construção de Palmas II, que será o maior complexo eólico do sul do Brasil, projetado para uma geração de 200 MW, 80 vezes maior que a capacidade de Palmas I, operante desde 1999.

### 3.2 PARQUE EÓLICO

O parque eólico é o conjunto de aerogeradores concentrados em um espaço específico, conectados a uma subestação a qual levará a energia até o sistema principal. Existem instalações em terra (*onshore*) e marítimas (*offshore*). A maior vantagem de parques localizados no mar é evitar a poluição visual e sonora, entretanto, seu custo total cresce pela dificuldade de transporte, instalação, principalmente por depender da profundidade e correntes marítimas, e manutenção, devido à humidificação e corrosão (SILVEIRA, 2015).

Há também os parques eólicos que não estão integrados a rede, ou seja, estão isolados, e os híbridos, que mesclam várias fontes alternativas de energia em um único sistema. O sistema isolado, em maioria, está acoplado a baterias que armazenam a energia em caso de diminuição dos ventos, para isso, é necessário um controlador de carga e descarga da bateria, que evita danos pela variação instantânea e de grande amplitude (a mais ou a menos) de energia.

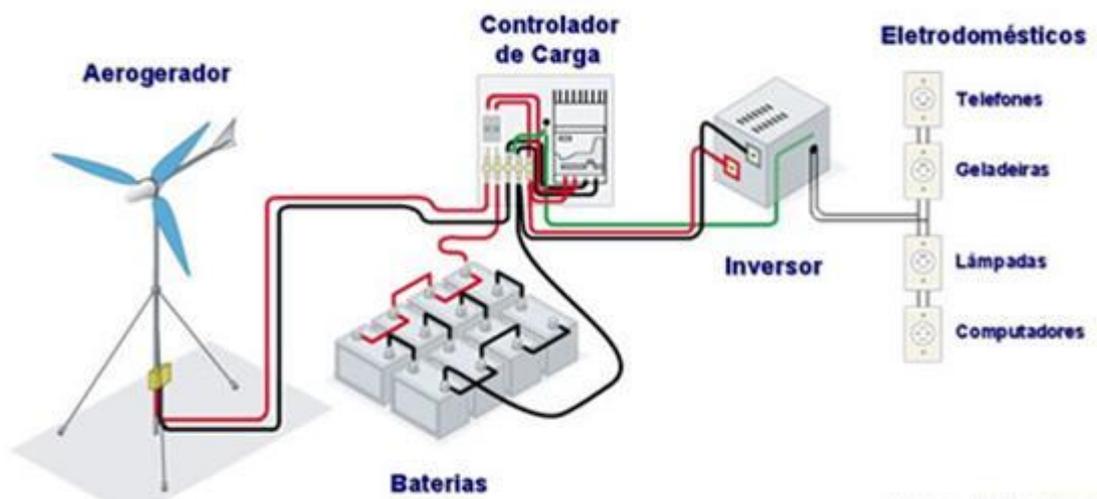
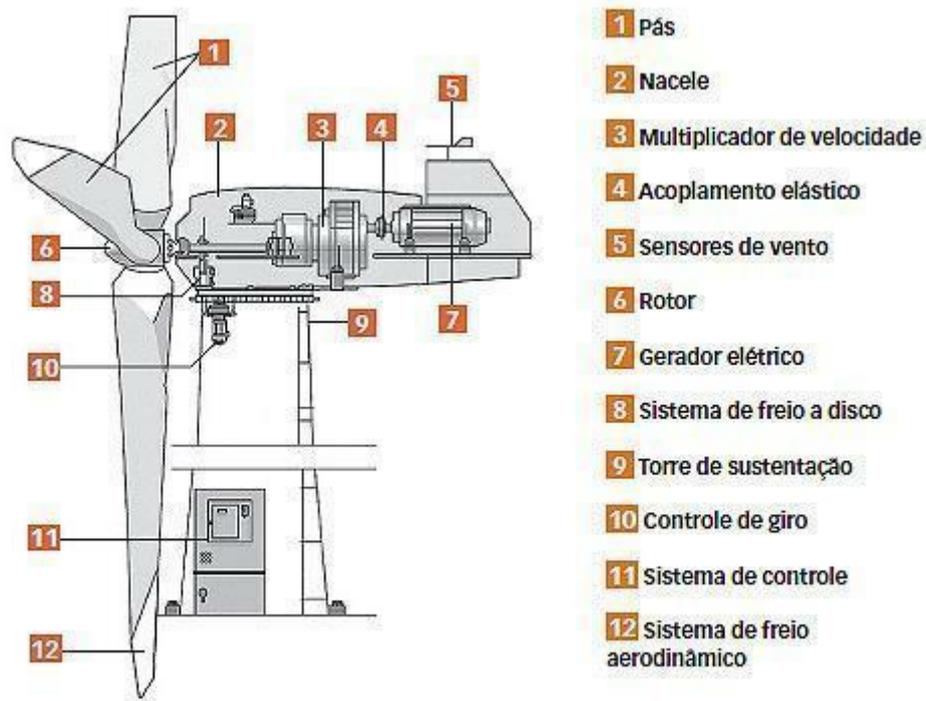


Figura 6 - Sistema eólico isolado

Fonte: CRESESB, 2005

### 3.2.1 Funcionamento de um Aerogerador

Um aerogerador funciona basicamente com a força do vento retirando a inércia das pás que, movimentam com baixa velocidade, o eixo do rotor. Este, está ligado ao gerador através de um multiplicador de velocidade, e faz com que seu movimento de rotação leve energia mecânica, com maior frequência, ao gerador, que a transforma, a partir do eletromagnetismo, em energia elétrica.



Desenho técnico dos sistemas de um aerogerador, responsáveis pela conversão de energia cinética em energia elétrica

Figura 7 - Partes de um aerogerador

Fonte: Infraestrutura urbana

O sistema de controle atua no alinhamento da direção do vento e no desligamento da turbina, caso haja mau funcionamento. A nacele envolve todo o sistema, abrigando-o e o conjunto é sustentado pela torre.

A energia produzida pelo gerador é em corrente alternada, porém, dependendo da tecnologia, Full-converter ou DFIG (Gerador de Indução duplamente alimentado) utiliza-se conversores tipo PWM para gerar tensão senoidal 60 HZ na saída dos mesmos. Tais conversores, por utilizarem chaveamento eletrônico, produzem deformações na forma de onda da tensão e corrente que podem ser traduzidas através de distorções harmônicas.

### 3.3 HARMÔNICOS

Um sistema elétrico ideal possui tensões perfeitamente senoidais, equilibradas, com frequência e amplitude constantes. Contudo, o sistema real está sujeito a variações ocasionais que, quando acima dos limites pré-estabelecidos, significa que a qualidade de energia foi afetada. Isso pode acontecer através de variações do valor eficaz da tensão, superiores ou inferiores a um minuto; variações instantâneas de tensão, como transitórios oscilatórios ou surtos; variações da frequência fundamental das tensões devido a desequilíbrio entre a geração e a demanda solicitada; flutuação de tensão; distorção harmônica total, entre outros (MELO, 2008). Entre os fatores que mais afetam a qualidade da energia fornecida pela usina eólica está a corrente harmônica proveniente dos equipamentos eletrônicos de potência, conforme relatado ao final do item 3.2.

As distorções harmônicas têm sua relação com deformações nas formas de onda de tensão e corrente, quando comparada à onda senoidal da frequência fundamental. Através da Transformada de Fourier, técnica facilitada para análise e cálculos de modo a mensurar a distorção harmônica, uma função periódica pode ser substituída por uma soma de ondas senoidais com frequências múltiplas da fundamental, bem como amplitudes diferentes, de modo a ser possível reconstituir a onda original distorcida. Embora seja falado que existem harmônicas circulando pela rede, isso não ocorre fisicamente, o que acontece é que as ondas são distorcidas.

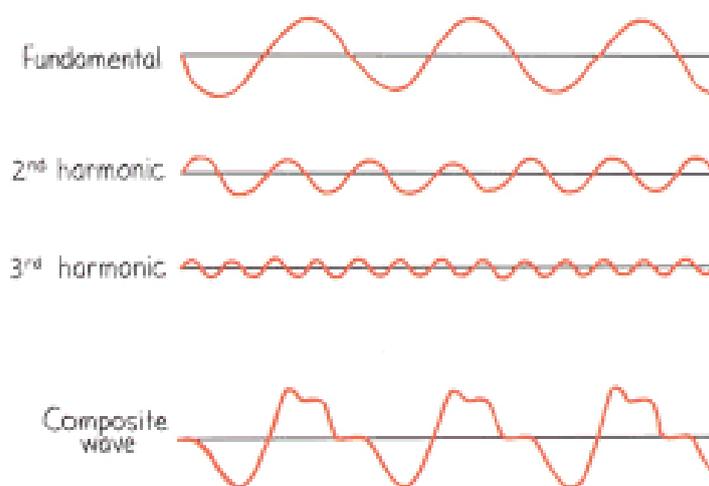


Figura 8 - Série de Fourier

Fonte: e disciplinas USP

Os harmônicos de maiores amplitudes são de ordem ímpar, isso porque as ondas de tensão e de corrente costumam ter simetria ímpar, logo, o semiciclo positivo da onda tem simetria com o semiciclo negativo da onda. Pelo fato de, na prática, a simetria não ser exata, o resultado espectral possui alguns componentes de ordem par, também, porém de amplitude pequena (ROCHA, 2016). A distorção harmônica individual é a relação entre a amplitude da harmônica de ordem “h” e a fundamental, seja corrente ou tensão, conforme as fórmulas abaixo.

$$DHI \% = \frac{I_h}{I_1} * 100 \quad (12)$$

Sendo:

$I_h$ : valor eficaz da componente harmônica de corrente da ordem h;

$I_1$ : valor eficaz da componente fundamental da corrente

$$DHV \% = \frac{V_h}{V_1} * 100 \quad (13)$$

Sendo:

$V_h$ : valor eficaz da componente harmônica de tensão da ordem h;

$V_1$ : valor eficaz da componente fundamental da tensão

O PRODIST, em seu módulo 8, define alguns pontos importantes sobre esse tema quanto à metodologia, terminologia, medição, instrumentação e valores de referência para as distorções de tensão harmônicas (ROCHA, 2016).. O objetivo deste submódulo é conferir responsabilidades e estabelecer princípios e diretrizes para o gerenciamento de indicadores de QEE.

O parâmetro de indicação do conteúdo harmônico de uma onda elétrica é a Distorção Harmônica Total, que pode ser utilizada tanto para tensão quanto para corrente, conforme citado anteriormente. Tal indicador não se aplica a fenômenos de curta duração ou transitórios que resultem em injeção de

correntes harmônicas e o espectro harmônico necessário para o cálculo da DTHT deve respeitar uma faixa de frequência que considere a partir da segunda harmônica até a 50ª ordem.

**Tabela 1 - Distorções harmônicas totais de tensão**

Fonte: PRODIST

Tensão nominal do barramento	Distorção harmônica total de tensão (DTT) [%]
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	3

**Tabela 2 - Distorções harmônicas individuais de tensão**

Fonte: PRODIST

Ordem harmônica	Distorção harmônica individual de tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$		$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
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	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

Tendo em vista que o impacto de uma distorção harmônica pode ser grande, para a instalação de um parque eólico existem algumas regulamentações, como, fazer uma solicitação de acesso ao SIN. Para isso, é necessário que se apresente um requerimento ao ONS, junto com os dados e estudos, envolvendo medições e simulações computacionais, do impacto dessa construção. No documento constarão as condições de acesso, seja à rede básica ou à rede de distribuição, equipamentos e instalações, de modo a realizar esse acesso ao SIN de modo seguro, eficaz e otimizado (ONS, 2018).

#### 4. MODELOS ELÉTRICOS DE CABOS E LINHAS

Um sistema elétrico de potência é, geralmente, formado por barramentos ou barras, chaves e disjuntores, linhas de transmissão, transformadores, geradores, motores, cargas, entre outros (BENEDITO, 2015), dentre os quais, as linhas, transformadores, cargas e geradores tem uma alta importância.

O transporte de energia elétrica pode ser feito através de corrente elétrica ou alternada, além de poder ser realizado com o uso de cabos subterrâneos ou linhas aéreas. Conforme o nível de tensão, o transporte ocorre por linhas de alta, média ou baixa tensão, também conhecidas por linhas de distribuição.

As linhas de transmissão e de distribuição são de extrema importância para o sistema elétrico, devido ao fato de serem o caminho pelo qual flui a energia desde a geração até os consumidores. Por esse motivo, é de alta necessidade que sejam desenvolvidas linhas que solucionem problemas como o de harmônicas, por exemplo, levando em conta a necessidade de um projeto bem elaborado sobre os parâmetros das linhas, como resistências, reatâncias e capacitâncias.

A resistência dos condutores de uma linha, quando não são bem dimensionados, resultam em perdas no transporte de energia, as quais precisam ser as menores possíveis, considerando o número de condutores por fase, material do cabo, influência do ambiente em que o cabo estará, entre outros. A resistência depende do material condutor, isso através da resistividade ( $\rho$ ), das dimensões do condutor (comprimento  $l$ ) e área da seção transversal ( $S$ ), conforme fórmula abaixo:

$$R = \frac{\rho * l}{S} \quad (14)$$

Um ponto que influencia os parâmetros dos cabos é a temperatura, visto que a condutividade dos condutores influencia fortemente os parâmetros do cabo, principalmente os da resistência, e é dependente da temperatura (NUNES,

2007). O valor da condutividade dos condutores é resultado do inverso da resistividade, a qual é dada pela seguinte expressão:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (15)$$

Sendo “alfa” o coeficiente de temperatura. Logo, a condutividade é dada por:

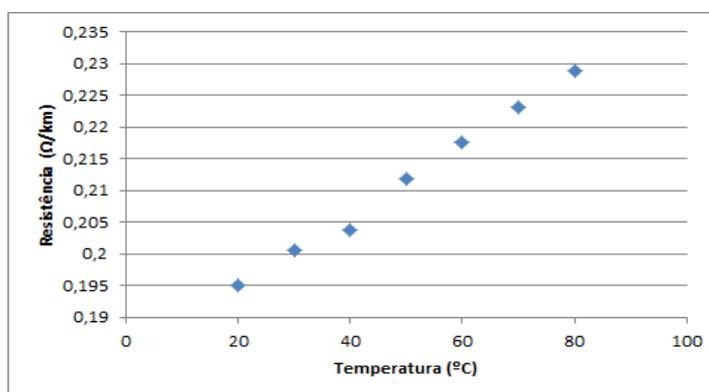
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (16)$$

A Tabela 3 exemplifica como a resistência se comporta com o aumento da temperatura, os dados foram retirados de (NUNES, 2007). A indutância praticamente não varia com a mudança da temperatura, enquanto a da resistência aumenta de forma aproximadamente linear, conforme Figura 6.

**Tabela 3 - Valores de resistência para diferentes temperaturas**

Fonte: As autoras

Temperatura (°C)	Resistência (Ω/km)
20	0,1951
30	0,2005
40	0,2037
50	0,2119
60	0,2177
70	0,2231
80	0,229



**Figura 9 - Gráfico da variação da resistência conforme a temperatura**

Fonte: As autoras

Sobre os condutores, precisam ter alta condutibilidade elétrica, boa resistência mecânica, baixo peso específico e alta resistência à corrosão e oxidação. O espaçamento entre os cabos de uma linha de transmissão depende do seu comprimento e da tensão de linha e tem reflexo na indutância e na capacitância.

Em casos de condutores com tensão de linha maior que 230 kV, pode-se utilizar dois, três ou quatro subcondutores para equivaler a um só, representando uma mesma fase, e a separação entre eles pode ser ajustada conforme a reatância requerida e para evitar o efeito corona (LEÃO, 2019).

Os isoladores, por sua vez, têm a função de separar, fixar e suspender, estando sujeitos a solicitações mecânicas como forças verticais, por conta do peso dos condutores, forças axiais para suspensão e forças horizontais pela ação dos ventos, e elétricas como sobretensões, oscilações de tensão de manobra e transitórios de origem atmosférica (LEÃO, 2019). Os isoladores devem ser resistentes quanto a correntes de fuga e espessos o suficiente para prevenir ruptura, conforme as condições de tensão limite.

Desde o início da transmissão de energia elétrica, o principal material condutor utilizado era o cobre e sua instalação, aérea. Após a primeira guerra mundial, o metal condutor foi substituído pelo alumínio, por esse apresentar maior quantidade disponível na superfície terrestre. Conforme a tecnologia avançou, o alumínio foi incrementado com ligas, constituídas basicamente por magnésio e silício, juntando um bom condutor com material reforçado mecanicamente, a fim de reduzir o peso do cabo e, conseqüentemente, o material metálico das torres de suspensão. Alguns anos depois, o cobre voltou a ser utilizado em determinados modelos de condutores.

Com tantas opções disponíveis, a escolha sobre qual tipo de condutor utilizar nem sempre se dá pelas vantagens oferecidas pelo material, mas sim, pelo seu custo em curto prazo. Entretanto, baixas qualidades de cabos remetem a mais manutenções e reparos, por muitas vezes elevando o custo da instalação à médio e longo prazo, principalmente em instalações aéreas, onde o material está exposto a alterações climáticas, entre outros. A partir desse entendimento,

uma alternativa passou a ser a instalação de cabos subterrâneos. Dentre as vantagens, de manutenção e aumento da vida útil destes cabos é possível citar, ainda, a questão visual da cidade, e a diminuição dos roubos de energia, os famosos “gatos”.

#### 4.1 CABOS TÍPICOS EM REDES SUBTERRÂNEAS

Na distribuição de energia, os cabos subterrâneos têm sua grande importância e podem ter diversas formas e constituições. Geralmente, possuem uma seção circular, camadas condutoras separadas entre si por camadas isolantes, núcleo, o qual é o elemento mais importante do cabo por ser por onde a maior parte de corrente elétrica circula, e um revestimento, para proteger o cabo eletricamente, sendo cada cabo separado entre si por elementos isolantes. Em casos mais específicos, além dos citados, os cabos podem ter uma armadura exterior, para proteção mecânica, e uma camada isolante para separá-la do revestimento (NUNES, 2007). Cada camada do cabo tem por objetivo manter a corrente elétrica circulando dentro de si, por isso têm-se inúmeras camadas isolantes.

Os cabos de uso subterrâneo se tornaram uma opção, mundialmente falando, com o uso de cabos de isolamento a papel impregnado de óleo (CARVALHO, 2017). Essa era alternativa utilizada antes da isolamento polimérica surgir, a qual acabou por diminuir os custos, além de não oferecer tanto impacto ambiental pelo uso de invólucro de chumbo nos cabos com papel impregnado de óleo.

Um cabo isolado geralmente utilizado para casos como esse possuem as seguintes camadas: condutor impermeável (cobre ou alumínio); semicondutora extrudada envolvendo o condutor; isolamento extrudado XLPE (composto termofixo à base de polietileno reticulado); semicondutora extrudada envolvendo o isolamento; fita semicondutora para bloqueio de água; blindagem metálica; fita semicondutora para bloqueio de água; barreira contra umidade (alumínio); armadura externa (polietileno extrudado) (CARVALHO, 2017).



**Figura 10 - Cabo isolado e suas camadas**

Fonte: catálogo Conduspar

Nos sistemas com cabos subterrâneos, geralmente, tem-se mais do que um cabo sendo utilizado, mesmo se o cabo escolhido for unipolar, fazem-se uso de três cabos subterrâneos unipolares, então, isso para cada cabo corresponder a uma fase diferente. O acoplamento entre os cabos influencia nos seus parâmetros, o que é conhecido por Efeito de Proximidade (NUNES, 2007).

O Efeito de Proximidade é semelhante ao Efeito Pelicular, o qual ocorre quando o campo magnético, criado pela corrente que flui no condutor, induz correntes de Foucault, que se sobrepõe à primeira corrente e faz com que ocorra uma redistribuição nas correntes, com concentração maior próxima à superfície. No caso do Efeito de Proximidade, ele ocorre quando dois ou mais condutores estão próximos entre si, o que fará com que as correntes de Foucault induzidas em um dos condutores se originem não somente através da variação do campo magnético do próprio condutor, mas com a variação do campo magnético gerado pelos condutores vizinhos, também (BERLEZE, 1988).

O acoplamento entre as fases depende da distância entre os cabos, materiais que constituem os elementos do cabo, resistividade do solo, disposição geométrica e tipo de ligação à terra de cada um.

Nesse tipo de sistema, os cabos podem ser instalados enterrados de forma direta ou protegidos por uma estrutura civil feita de banco de dutos, caixa de passagem e câmaras subterrâneas (HERMES, 2011).

## 4.2 CABOS TÍPICOS EM REDES AÉREAS

Quanto às redes aéreas, precisa-se de cuidado durante o planejamento por conta da exposição que os cabos terão, seja através do contato com galhos de árvores, chuva, sol ou outros. Tem-se a seguinte divisão de cabos, no Brasil:

- Rede comum: a mais utilizada, é composta por cabos de alumínio nu, sendo bem suscetível a danos;
- Aérea compacta: possuem fio condutor de alumínio com isolamento de XLPE;
- Aérea isolada: cabos revestidos e trançados.



**Figura 11 - Cabo de alumínio de alma de aço (CAA)**

Fonte: catálogo Nexans

Condutores ideais possuem as seguintes características: alta condutividade elétrica; baixo custo; alta resistência mecânica; baixo peso específico; alta resistência à oxidação e corrosão (ELEFIO, 1998). Essas características, infelizmente, não são sempre encontradas nos cabos reais, sendo preciso fazer uma avaliação de qual possui uma boa relação entre elas.

Um ponto que precisa ser observado é a questão de efeitos que surgem nas LTs, como o efeito corona, por exemplo, que surge de um processo de ionização de um material isolante, com um campo elétrico ao redor, com intensidade além do nível crítico (WEDY, 2009), e que se torna mais rigoroso em linhas entre 230 kV e 750 kV (TEIXEIRA, 2011). De modo a manter a LT em níveis aceitáveis, é preciso avaliar os seguintes itens: distância entre os condutores e posicionamento; número de condutores e seu espaçamento no feixe; seção transversal do condutor.

A variação da frequência ocasiona mudança nos parâmetros, principalmente na resistência série, a qual aumenta de forma diretamente proporcional. A indutância série, por sua vez, é inversamente proporcional à frequência, porém é quase imperceptível sua variação. Outro parâmetro que tem influência na resistência série de uma linha aérea é a condutividade, a qual varia conforme a alteração da temperatura, sendo ambas inversamente proporcionais. Portanto, conforme a temperatura aumentar, a condutividade diminui, a resistência série aumenta e a corrente que atravessa o condutor diminui (UMARJI, 2007).

A condutância entre os cabos ou entre cabos e a terra considera a corrente de fuga que ocorre nos isoladores de linhas aéreas ou através da isolação dos condutores. Se a fuga nos isoladores for desprezível, a condutância será zero, nesse caso. Sobre as perdas nos isoladores, é possível citar que são resultados da má qualidade do material, condições superficiais do isolador, bem como sua geometria, frequência da tensão aplicada, condições meteorológicas e tensão na linha (BENEDITO, 2015).

Como já citado anteriormente, quando o valor do gradiente de uma linha aérea supera o valor do gradiente crítico disruptivo do ar, acontece o Efeito Corona, o que resulta em um campo elétrico não uniforme em torno do condutor, fazendo com que qualquer partícula contaminadora se transforme em fonte pontual de descargas elétricas.

#### 4.3 LINHAS DE TRANSMISSÃO

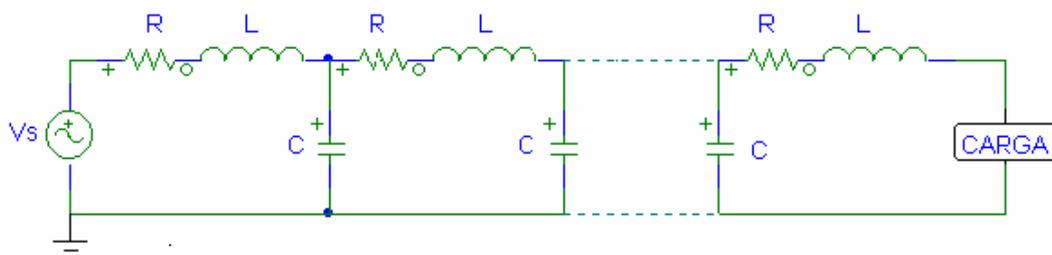
As linhas de transmissão (LTs) são o caminho pelo qual a energia elétrica é transportada de um ponto inicial a um terminal receptor. Comumente, existem os seguintes tipos de linhas de transmissão:

- Linha aérea, seja com corrente alternada ou contínua, com condutores separados por um dielétrico;
- Linha subterrânea com cabo coaxial com um fio central condutor, isolado de um condutor externo;

Cada tipo de linha possui suas propriedades individuais que dependem dos seguintes pontos:

- Frequência;
- Nível de tensão;
- Potência a ser transmitida;
- Modo de transmissão (aéreo ou subterrâneo);
- Distância entre os terminais.

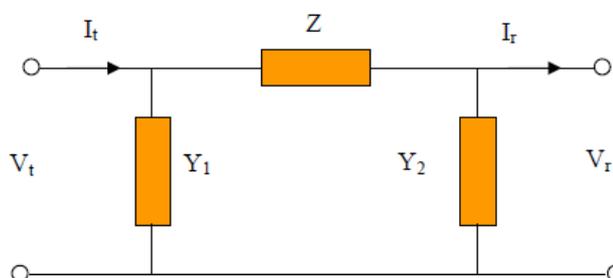
Toda linha de transmissão possui os seguintes parâmetros que afetam o transporte de energia: resistência, indutância, condutância e capacitância, sendo a resistência o maior causador de perda de potência em uma linha, enquanto a indutância armazena energia no campo magnético, em consequência da circulação de corrente, e a capacitância armazena no campo elétrico, por causa da diferença de potencial (LEÃO, 2019).



**Figura 12 - Circuito Equivalente Monofásico de Linha de Transmissão com Parâmetros distribuídos**

Fonte: retirado do (14)

Abaixo, segue a representação de uma LT representada por parâmetros concentrados segundo o modelo Pi.



**Figura 13 - Circuito Pi em uma linha de transmissão**

Fonte: retirado do (14)

Nesse circuito, é preciso aplicar a Lei de Kirchhoff para as tensões e correntes, conforme a seguir:

$$V_t = V_r + Z(I_r + Y_2 V_r) = (1 + ZY_2)V_r + ZI_r \quad (17)$$

$$\begin{aligned} I_t &= Y_1 V_t + (Y_2 V_r + I_r) = Y_1 [V_r + Z(I_r + Y_2 V_r)] + Y_2 V_r + I_r \\ &= [Y_1(1 + ZY_2) + Y_2]V_r + (1 + ZY_1)I_r \end{aligned} \quad (18)$$

Dessa forma, os parâmetros genéricos do circuito PI são:

$$A = 1 + ZY_2 \quad (19)$$

$$B = Z \quad (20)$$

$$C = Y_1(1 + ZY_2) + Y_2 \quad (21)$$

$$D = 1 + ZY_1 \quad (22)$$

Considerando essa linha como de transmissão simétrica, da Figura 5, tem-se que  $Y_1 = Y_2$  e ambos são iguais à metade da admitância *shunt* total, portanto, (17) e (18) se transformam em:

$$V_t = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_r + ZI_r \quad (23)$$

$$I_t = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) V_r + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_r \quad (24)$$

Os novos parâmetros genéricos do circuito Pi são:

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} \text{ (PU)} \quad (25)$$

$$B = Z \text{ (}\Omega\text{)} \quad (26)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) \text{ (S)} \quad (27)$$

Para linhas de comprimento médio de  $100 \text{ km} < l < 250 \text{ km}$ , os parâmetros da linha  $Z$  e  $Y$  podem ser obtidos pelo produto da impedância  $z$  e da admitância  $y$  pelo comprimento  $l$  da linha, esse tipo de circuito é denominado Pi nominal.

$$Z = z * l \quad (28)$$

$$Y = y * l \quad (29)$$

Para linhas curtas, de comprimento menor que 100 km, a capacitância pode ser desprezada e a linha representada apenas por uma impedância série. Nesse caso, a corrente  $I_t$  será igual a  $I_r$  e a tensão  $V_t$  será igual a soma de  $V_r$  com a multiplicação de  $Z$  e  $I_r$ . A constante A, que é igual a D, valerá 1, B valerá Z e C, zero.

Em termos gerais, a relação X/R costuma valer mais do que 5, para as linhas de transmissão, porém, para valores maiores dessa divisão, a resistência série pode ser desconsiderada. Em circuitos de distribuição, a relação X/R é pequena, o que permite que o X seja desconsiderado quanto ao R.

Para o planejamento de uma linha de transmissão de energia, é necessário fazer uma análise quanto aos cenários de mercado, de geração, quantidade de potência a transmitir, sobre novas tecnologias que estejam disponíveis para uso, sobre o pessoal e maquinário necessário, custo da linha e o meio ambiente, como isso afetará e maneiras de facilitar a instalação e manutenção da linha. Outro fator a considerar é que as linhas causam distúrbios nas áreas em que foram implantadas, portanto, é preciso providenciar o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para conseguir a licença da linha e de modo a avaliar o impacto socioambiental da construção (LEÃO, 2019).

#### 4.4 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

Vários são os tipos de redes de distribuição de energia, por vezes são feitos de forma mista, com combinações entre redes de baixa e média tensão, isso tudo conforme os padrões estabelecidos por cada distribuidora de energia elétrica, além de serem consideradas as condições do local (LMDM, 2014). Em sua maioria, a distribuição no Brasil ocorre através de redes aéreas, porém podem ser subterrâneas, também. A Figura 4 e a Figura 5 mostram os esquemáticos de ambos os tipos.

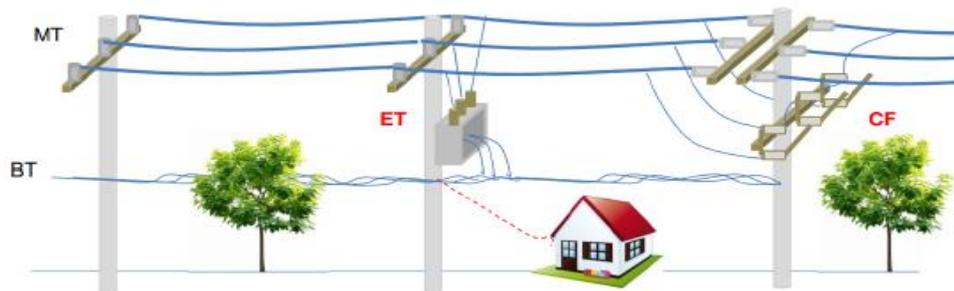


Figura 14 - Esquema de rede de distribuição aérea

Fonte: LMDM Consultoria Empresarial

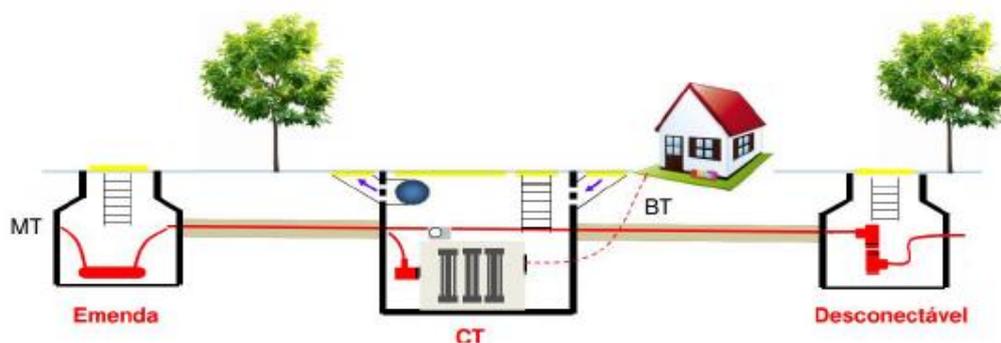


Figura 15 - esquema de rede de distribuição subterrânea

Fonte: LMDM Consultoria Empresarial

O sistema de distribuição é integrante do SEP e se encontra mais próximo dos consumidores, sendo o ponto em que se tem o abaixamento no nível de tensão para transmitir a energia a residências, indústrias e comércios, seja de forma aérea ou subterrânea.

A rede convencional aérea se caracteriza, em sua maioria, por condutores nus, isoladores de porcelana ou vidro, horizontalmente em circuitos de média tensão e verticalmente nos de baixa tensão. Esse tipo de rede está exposta a influências do clima, contato com galhos de árvores, animais, como pássaros, apresentando, portanto, alta taxa de falhas.

No caso das redes aéreas, embora possuam um custo inferior de instalação, os custos por conta das manutenções costumam ser mais altos por conta da exposição a fatores de risco, que geram prejuízos a diversos setores sociais causados por curto-circuito, queima de transformadores, desligamentos na rede, queima de aparelhos domésticos, transtornos em estabelecimentos públicos pela falta de energia, entre outros (HERMES, 2011).

Existem, também, as redes aéreas compactas, as quais surgiram por conta da necessidade de uma melhora na qualidade de distribuição, em Minas Gerais, com estudos feitos pela CEMIG, no ano de 1991. Um ano depois, foi a vez da COPEL iniciar seus estudos nessa área e, em 1994, em Maringá, foram feitas as primeiras instalações, sendo que, atualmente, toda sua rede urbana é feita do sistema compacto (HERMES, 2011). Como vantagem desse tipo de rede se tem a redução de custos operacionais, além dos acidentes e falhas, preservação das árvores, devido à diminuição de poda visto que ocupam menor área se comparada à rede convencional.

Na rede subterrânea, por sua vez, tem-se um sistema mais complexo que permite benefícios como a redução de interrupções do fornecimento de energia devido à diminuição da exposição a fatores externos, maior segurança no quesito acidentes, por exemplo.

Embora o sistema subterrâneo tenha muitos benefícios, seu custo é exacerbado, por isso seu uso é mais indicado em casos de alta concentração de cargas, quando se precisa de uma garantia de baixo índice de interrupção de energia, melhoria no DEC, FEC, além de maiores cuidados na segurança (LMMD, 2014).

Esse tipo de rede pode ser dividido em: semi enterrada ou totalmente enterrada, bem como se apresentar de forma radial, mais simples e suscetível a falhas, ou em um sistema reticulado, cujo ponto forte principal é a manutenção sem interrupção do fornecimento de energia mesmo com a ocorrência de algum integrante. As semi enterradas, em resumo, têm os equipamentos instalados sobre o solo, enquanto todo o cabeamento está enterrado, em contrapartida, o arranjo totalmente enterrado tem, por sua vez, os cabos e equipamentos enterrados (HERMES, 2011).

## 5. MATERIAIS E MODELAGENS

Neste capítulo, serão explicadas as modelagens realizadas para as diferentes simulações, com o intuito de demonstrar como os diferentes tipos de cabos se comportam em um parque eólico.

### 5.1 HARMZS - ESTUDO DE COMPORTAMENTO HARMÔNICO E ANÁLISE MODAL DE REDES ELÉTRICAS (VERSÃO ESTUDANTIL)

Para a modelagem e simulação de um parque eólico, o software escolhido foi o HarmZs, da CEPEL, ferramenta desenvolvida para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas. A análise modal permite a obtenção de informações estruturais do sistema, como ressonâncias naturais, o que é difícil de ser obtido através de métodos convencionais como simulações no tempo ou resposta em frequência. A análise convencional, por sua vez, permite calcular distorções harmônicas de tensão, correntes harmônicas que fluem pelos equipamentos do sistema, respostas em frequência de funções de transferência e lugares geométricos de impedâncias e admitâncias (HARMZS, 2011).

O programa possui uma interface em que se podem colocar os dados do parque, que neste caso, aproximam-se dos de um parque real. O programa permite que sejam criados e/ou alterados todos os dados gerais do complexo eólico. Entretanto, como o intuito do trabalho é demonstrar diferentes situações de cabos, os parâmetros alterados foram: resistência, reatância indutiva e susceptância. Para isso, os modelos de cabos utilizados foram retirados dos catálogos da Prysmian e General Cables.

A modelagem é realizada a partir do princípio do Teorema de Norton, onde o sistema é condensado em uma fonte de corrente equivalente, paralela a uma resistência, também equivalente. Segundo o teorema, a corrente equivalente é encontrada aplicando um curto circuito entre os terminais a e b,

mostrados na figura 15. Já para a resistência, anulam-se as fontes e a medição entre os pontos é realizada.

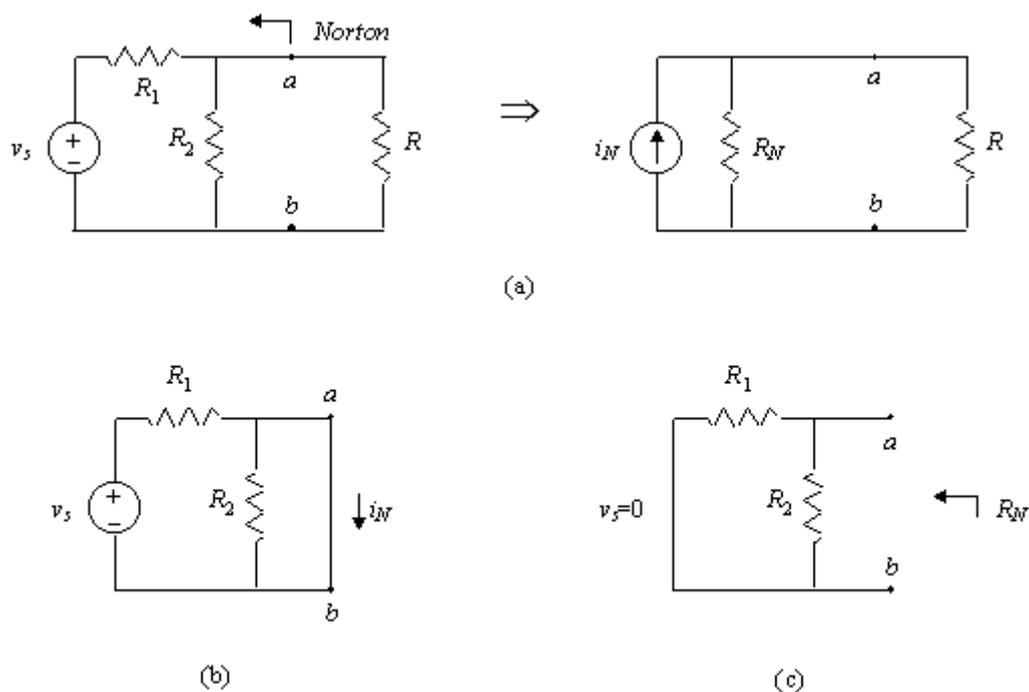


Figura 16 - Circuitos equivalentes de Norton

Fonte: UFRGS

## 5.2 CABEAMENTO UTILIZADO

Para um projeto real desse porte, é necessário se determinar qual a seção do condutor, também chamada de bitola, conforme os seguintes passos: estimativa da bitola através de tabelas e gráficos de capacidade de corrente com valores para os produtos mais comuns nas instalações; calcula-se, então, a espessura isolante, a qual é determinada partindo da seção do condutor, do gradiente do material isolante e da tensão efetiva do sistema; após isso, determinam-se os materiais e dimensões da proteção; o próximo passo é o cálculo da corrente admissível. Se, após esses passos, a bitola estimada não satisfazer essa corrente, precisa-se começar novamente a análise com outro valor de seção nominal, contudo, se a resposta for positiva, calcula-se a queda de tensão e verifica-se, novamente, se o valor é coerente ou não, se não for, é preciso voltar ao primeiro passo. Se o valor satisfazer os critérios, calculam-se

as condições de curto-circuito que, de novo, podem ser as esperadas ou não, se o valor for suficiente, considera-se o cabo como dimensionado e o valor estimado pode ser utilizado.

Para que as análises deste trabalho pudessem ser feitas com veracidade, foram selecionados cabos de catálogos considerando suas respectivas ampacidades, sendo essa, a capacidade máxima de corrente elétrica nos condutores de uma linha, diante do aquecimento dos condutores e as condições ambientais. Abaixo, tem-se a lista dos cabos utilizados:

- a) Eprotenax ou Voltalene;
- b) Eprotenax Compact;
- c) Eprotenax Compact 105;
- d) Flexonax;
- e) Forex.

Uma das características do cabo eprotenax é ser extremamente versátil para redes de distribuição subterrânea em média tensão, sendo a melhor alternativa técnica e econômica. É constituído por condutor de cobre nu ou alumínio, com isolamento em EPR e cobertura termoplástica em PVC, atendendo às normas NBR 7286 e NBR 14039.

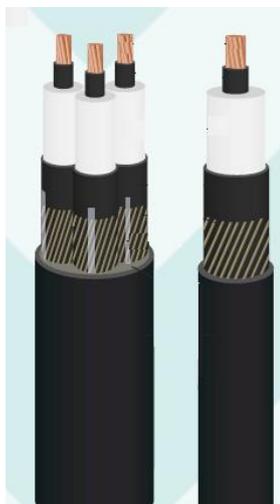


**Figura 17 - Cabo Eprotenax**

Fonte: Catálogo Prysmian

O cabo voltalene é constituído por um fio de cobre nu, possui uma camada de composto termofixo semicondutor, sua isolamento é feita pelo composto

termofixo XLPE e sua cobertura é de termoplástico de PVC sem chumbo, atendendo às normas NBR 7287.



**Figura 18 - Cabo Voltalene**

Fonte: Catálogo Prysmian

O cabo eprotenax compact é recomendado tanto para circuitos ao ar livre quanto para subterrâneos, é mais flexível que o eprotenax tradicional, além de possuir características elétricas melhores, também. Sua isolamento é feita de composto termofixo ERP 105 e atende às mesmas normas que o eprotenax.



**Figura 19 - Cabo Eprotenax Compact**

Fonte: Catálogo Prysmian

Os cabos eprotenax compact 105 possuem fio de cobre nu ou de alumínio nu, camada de composto termofixo semicondutor e outro composto de borracha ERP 105, sua cobertura é de composto termoplástico de polietileno de alta

densidade. Sua resistência térmica e resistência a umidade são ideais para sistemas subterrâneos em parques eólicos.



**Figura 20 - Cabo Eprotenax Compact 105**

Fonte: Catálogo Prysmian

O cabo Flexonax pode ser utilizado em redes subterrâneas ou ao ar livre, possui o condutor de cobre ou de alumínio, camada semicondutora aplicada por extrusão e isolamento de composto termofixo à base de borracha etileno propileno, atendendo à norma NBR 7286.



**Figura 21 - Cabo Flexonax**

Fonte: Catálogo General Cables

O cabo Forex também pode ser utilizado em redes subterrâneas ou ao ar livre, possui o condutor de cobre ou de alumínio com no mínimo 105 MPa, camada semicondutora aplicada por extrusão e isolamento de XLPE, atendendo à norma NBR 7287.



**Figura 22 - Cabo Forex**

Fonte: Catálogo General Cables

Para as simulações, foram selecionados três modelos de linha, sendo dois ao ar livre: cabo unipolar com distância entre os condutores igual ao dobro do seu diâmetro; cabo unipolar instalado em trifólio; e, por fim, o modelo com instalação subterrânea, em banco de dutos.

### 5.3 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DOS CABOS

Após a determinação das seções mínimas dos condutores, o próximo passo se constitui em verificar os valores dos parâmetros como resistência, reatância indutiva, reatância capacitiva para aquela seção, considerando o tipo de instalação. Os parâmetros, nos catálogos, estão em ohms/km, contudo, no programa de simulação, precisa-se dos valores em pu, por isso, é necessário se efetuar os cálculos de ohms para pu, considerando, para isso, a medida para um quilômetro, haja vista que o software faz o cálculo posteriormente para a distância de cada cabo, a qual se encontra no código, como será mostrado posteriormente.

Para a transformação para pu, considera-se a potência do parque como base, a qual é de 100 MVA, e a tensão da área como 34,5 kV, devido às barras e aos aerogeradores estarem conectados à barra de média tensão do parque.

Para o cálculo da susceptância, utilizam-se as reatâncias capacitivas dos catálogos, conforme as equações do capítulo 2.6, para os respectivos cabos e suas seções de condutores, para isso, faz-se uso da frequência igual a 60 Hz, considerando a implementação do parque no Brasil.

A representação do parque é realizada utilizando um editor de texto no qual são inseridos os códigos de execução do software, além de todos os dados necessários para a construção do modelo. As características gerais citadas do parque se encontram na figura abaixo.

DGERAIS	
FREQUENCIA	60
SBASE	100
DADOS	PU
INTERFACE	PU
METODOLOGIA	YS
TITULO	PARQUE
IDBARRA	NUMERO
FIM	

Figura 23 - Dados gerais no HarmZs

Fonte: As autoras

#### 5.4 PARQUE SIMULADO

O parque eólico utilizado nas simulações possui 26 barras, sendo uma delas a barra principal, que está ligado ao PAC, com tensão de 230 kV. Dessa, partem dois complexos, de 34,5 kV cada, de onde saem as ligações para os aerogeradores, de uma das barras partem 11 aerogeradores e, da outra, 12. As tensões utilizadas no complexo eólico são de 238 kV, 34,5 kV e 0,69 kV, as quais são divididas em grupos base de tensão através do código de execução DGBT.

DGBT		
%	Grupo	Tensão(kV)
	1	230
	2	34.5
	3	0.69
FIM		

Figura 24 - Tensões no HarmZs

Fonte: As autoras

O código de execução DARE é o responsável pela associação de nomes ao sistema, o qual foi dividido em três áreas: AT, áreas de alta tensão, MT, áreas de Média Tensão e BT, áreas de Baixa Tensão.

DARE		
%	Area	Nome
	1	"AT"
	2	"MT"
	3	"BT"
FIM		

Figura 25 - Áreas do sistema no HarmZs

Fonte: As autoras

O parque possui, também, 24 linhas de diversos comprimentos, além de um transformador, conforme pode ser visto nas figuras abaixo.

DBAR						
%	Num	Nome	Tensao	Angulo	Base	Area
	1	"PAC"	1	0	1	1
	95537	"BARRA I"	1	0	1	1
	85537	"BARRA I-MT"	1	0	2	2
	99101	"BAR-I-01-MT"	1	0	2	2
	99102	"BAR-I-02-MT"	1	0	2	2
	99103	"BAR-I-03-MT"	1	0	2	2
	99104	"BAR-I-04-MT"	1	0	2	2
	99105	"BAR-I-05-MT"	1	0	2	2
	99106	"BAR-I-06-MT"	1	0	2	2
	99107	"BAR-I-07-MT"	1	0	2	2
	99108	"BAR-I-08-MT"	1	0	2	2
	99109	"BAR-I-09-MT"	1	0	2	2
	99110	"BAR-I-10-MT"	1	0	2	2
	99111	"BAR-I-11-MT"	1	0	2	2
	99112	"BAR-I-12-MT"	1	0	2	2
	99201	"BAR-II-01-MT"	1	0	2	2
	99202	"BAR-II-02-MT"	1	0	2	2
	99203	"BAR-II-03-MT"	1	0	2	2
	99204	"BAR-II-04-MT"	1	0	2	2
	99205	"BAR-II-05-MT"	1	0	2	2
	99206	"BAR-II-06-MT"	1	0	2	2
	99207	"BAR-II-07-MT"	1	0	2	2
	99208	"BAR-II-08-MT"	1	0	2	2
	99209	"BAR-II-09-MT"	1	0	2	2
	99210	"BAR-II-10-MT"	1	0	2	2
	99211	"BAR-II-11-MT"	1	0	2	2
FIM						

Figura 26 - Dados de barras utilizados no HarmZs

Fonte: As autoras

DTR2												
%	De	Tensao_De	Ang_De	Para	Tensao_Para	Ang_Para	Resistencia	Reatancia	S_Base	Circ	Est	Identificador
95537	1	0	85537	1	-30	0.0024	0.12	60	1	1	0	
FIM												

Figura 27 - Dados do transformador utilizado no HarmZs

Fonte: As autoras

Um ponto negativo do software HarmZs é a falta de visualização do parque, por isso, foi preciso que se fizesse um diagrama unifilar, utilizado nas modelagens e simulações, conforme apresentado na figura abaixo. Logo após, tem-se a figura da representação da rede montada no software, a qual mostra os dados do caso de um modo diferente do apresentado pelo código DBAR.

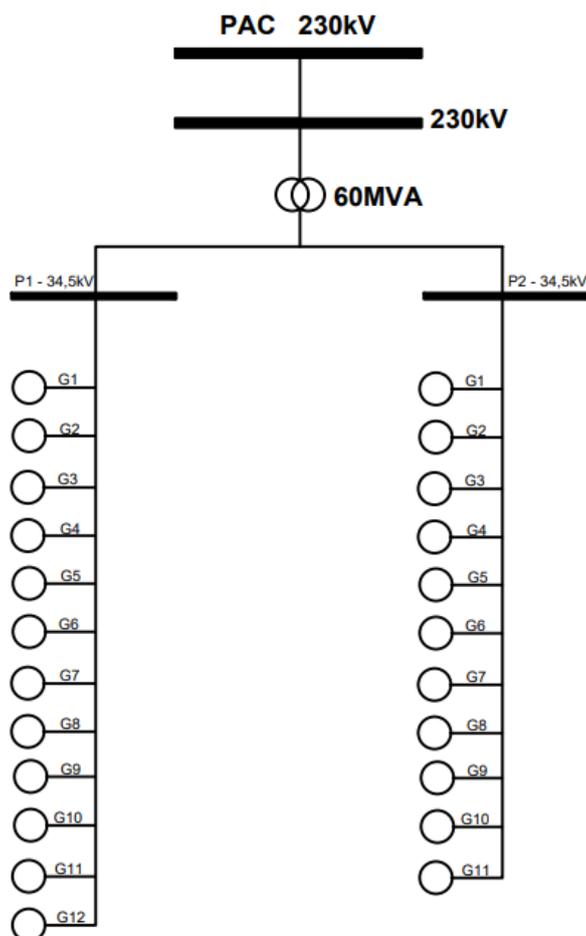


Figura 28 - Diagrama unifilar do parque

Fonte: As autoras

Dados do Caso

Barras	26
Linhas	24
RLC	1
Transformadores(2)	1
Transformadores(3)	0
Cargas	0
Máquinas	0
Motores	0
Shunts de Linha	0
Fontes Harmônicas	23

Nome	Número	Tensão Base (kV)	Ilha
PAC	1	230.000	1
BARRA I-MT	85537	34.500	1
BARRA I	95537	230.000	1
BAR-I-01-MT	99101	34.500	1
BAR-I-02-MT	99102	34.500	1
BAR-I-03-MT	99103	34.500	1
BAR-I-04-MT	99104	34.500	1
BAR-I-05-MT	99105	34.500	1
BAR-I-06-MT	99106	34.500	1
BAR-I-07-MT	99107	34.500	1
BAR-I-08-MT	99108	34.500	1
BAR-I-09-MT	99109	34.500	1
BAR-I-10-MT	99110	34.500	1
BAR-I-11-MT	99111	34.500	1
BAR-I-12-MT	99112	34.500	1
BAR-II-01-MT	99201	34.500	1
BAR-II-02-MT	99202	34.500	1
BAR-II-03-MT	99203	34.500	1

OK

O sistema é conexo e radial.

**Figura 29 - Rede montada no HarmZs**

Fonte: As autoras

Parte dos dados dos parâmetros já modificados se encontram na Figura 29. Já que seria preciso variar os cabos para o estudo, modificando apenas os dados de resistência, reatâncias e susceptância, fez-se necessário repetir esse trecho para todos os cabos utilizados. O complexo eólico utilizado nas simulações possui 24 linhas, as quais têm seus valores variando entre 50, 70, 95, 120 e 185 mm<sup>2</sup> de bitola. Uma tabela com os valores dos parâmetros calculados está no anexo A.

Dados de Linhas

X

Os dados componentes estão em PU.

Nome DE	Barra DE	Nome PARA	Barra PARA	Circ.	Estado	Res/Comp	XL/Comp	B/Comp	Comprimento	PIs	Área DE	Área PARA	Configur:
PAC	1	BARRA I	95537	1	1	0.00121	0.008374	0.007972	1	0	1	1	
BARRA I-MT	85537	BAR-I-12-MT	99112	1	1	0.02184415	0.024784709	0.00069024	1.902	0	2	2	
BAR-I-12-MT	99112	BAR-I-11-MT	99111	1	1	0.02184415	0.024784709	0.00069024	0.324	0	2	2	
BAR-I-11-MT	99111	BAR-I-10-MT	99110	1	1	0.02184415	0.024784709	0.00069024	0.295	0	2	2	
BAR-I-10-MT	99110	BAR-I-09-MT	99109	1	1	0.02184415	0.024784709	0.00069024	0.335	0	2	2	
BAR-I-09-MT	99109	BAR-I-08-MT	99108	1	1	0.02184415	0.024784709	0.00069024	0.302	0	2	2	
BARRA I-MT	85537	BAR-I-01-MT	99101	1	1	0.02184415	0.024784709	0.00069024	1.286	0	2	2	
BARRA I-MT	85537	BAR-I-05-MT	99105	1	1	0.02184415	0.024784709	0.00069024	0.784	0	2	2	
BAR-I-05-MT	99105	BAR-I-06-MT	99106	1	1	0.02184415	0.024784709	0.00069024	0.356	0	2	2	
BAR-I-06-MT	99106	BAR-I-07-MT	99107	1	1	0.02184415	0.024784709	0.00069024	0.281	0	2	2	
BAR-I-05-MT	99105	BAR-I-04-MT	99104	1	1	0.02184415	0.024784709	0.00069024	0.334	0	2	2	

Existem 24 linhas

Adicionar... Remover Procurar...

Barras Linhas Linhas Freq. Cargas Equipamentos Shunts Linhas Motores Máquinas Trafos 2 Trafos 3

OK Cancelar

Figura 30 - Dados de linha

Fonte: As autoras

A principal vantagem da utilização do HarmZs como ferramenta de simulação é permitir a modelagem do parque considerando a dependência que cada parâmetro tem com a frequência, visto que as mudanças nessa, por conta das harmônicas, terão grande impacto na impedância do cabo, por exemplo.

Na aba “Cálculos” do programa, a opção “Resposta em frequência” permite que sejam efetuados gráficos da resposta em frequência, sendo necessário, antes, estabelecer alguns parâmetros, como a faixa de frequência, que deve abranger da segunda harmônica até a número cinquenta para uma análise completa da distorção harmônica, a entrada, se fonte de tensão ou corrente, e a saída, tensão ou corrente. Para as simulações, as medições serão efetuadas na barra 1 em relação à própria 1, para ser possível analisar o parque por completo.

Passo	Freq. Min.	Freq. Max.
60	120	3000

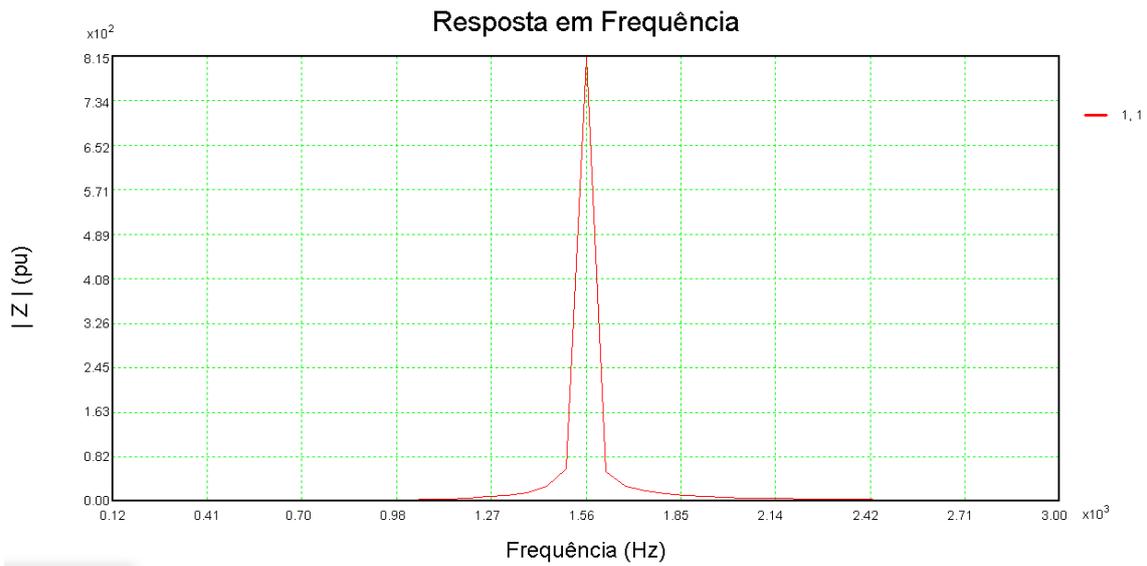
**Figura 31 - Parâmetros para resposta em frequência**

Fonte: As autoras

Abaixo, têm-se alguns dos gráficos obtidos conforme as mudanças nos parâmetros. Os picos das curvas representam um valor alto de impedância para uma determinada frequência, o que pode provocar ressonância paralela nos elementos da rede, gerando sobretensões no sistema.

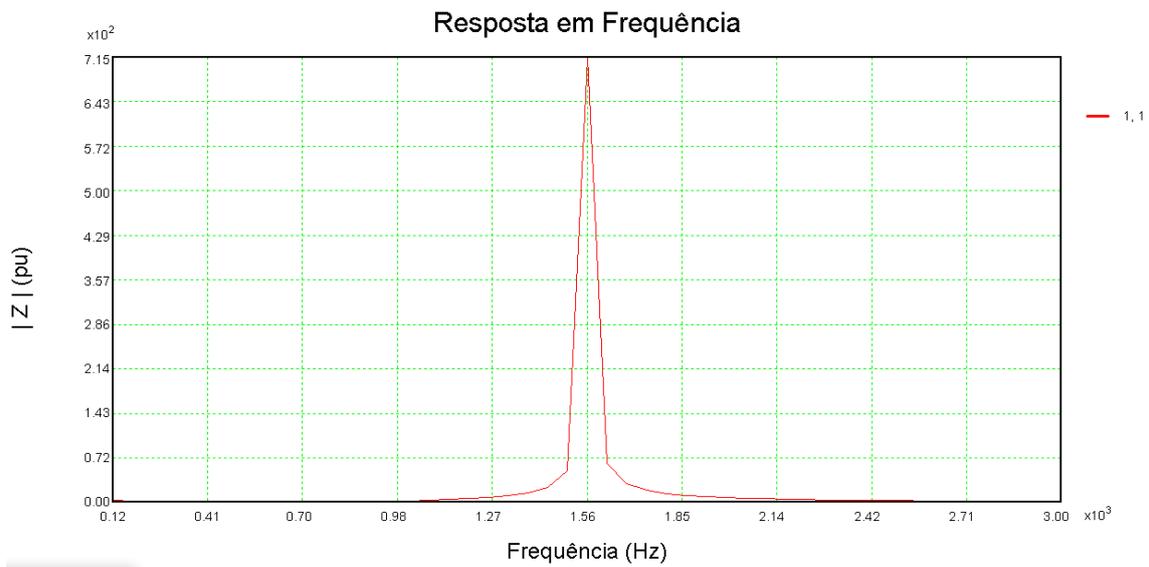
#### 5.4.1 SIMULAÇÃO COM S=2D

### 5.4.1.1 Com banco de capacitores



**Figura 32 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax e Voltalene**

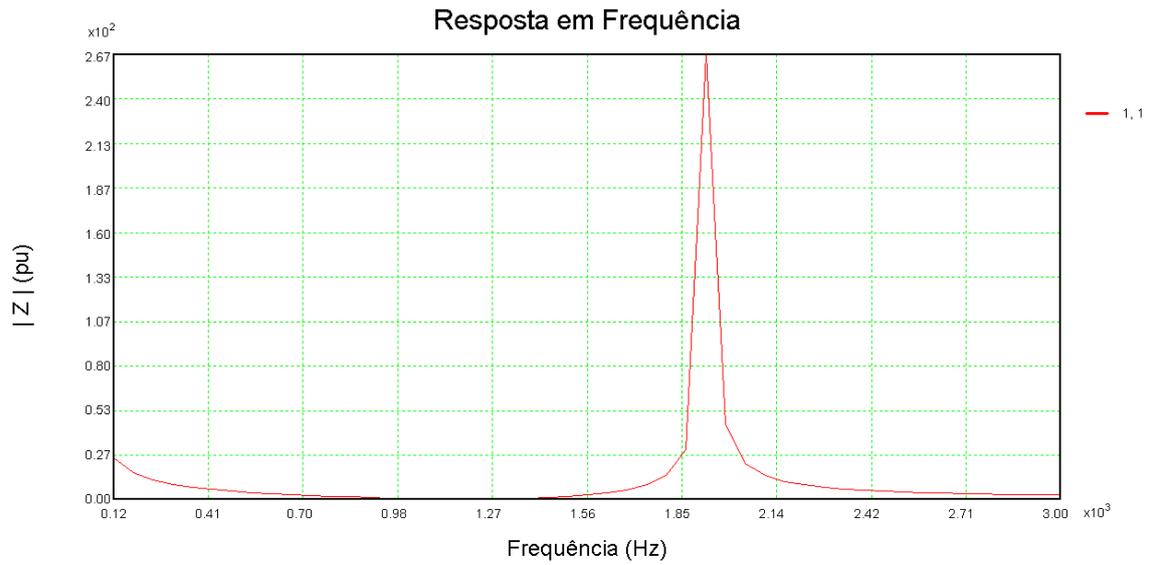
Fonte: As autoras



**Figura 33 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact nú**

Fonte: As autoras

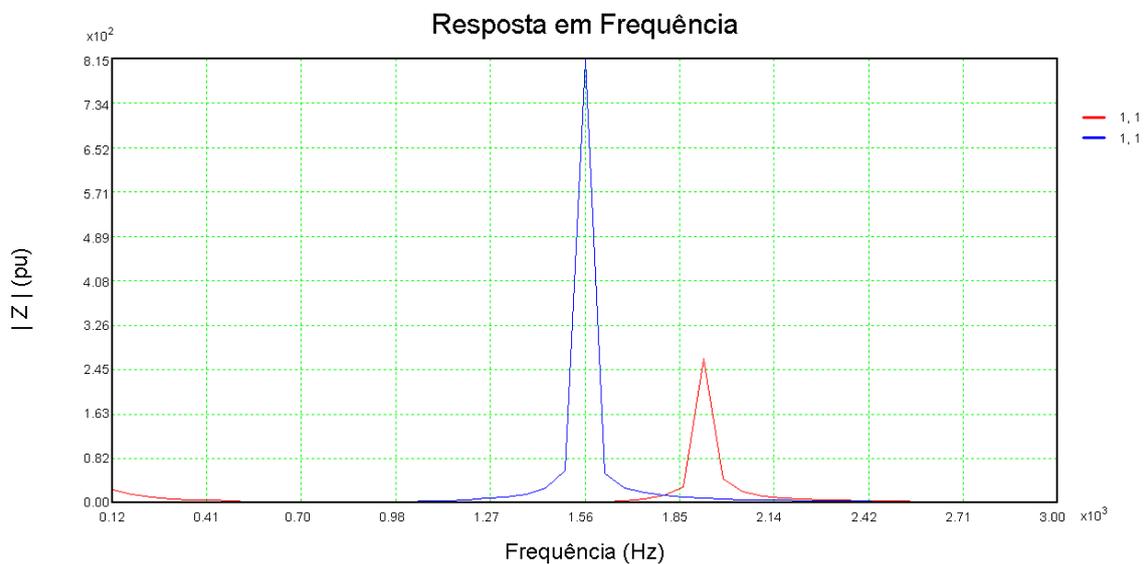
### 5.4.1.2 Sem banco de capacitores



**Figura 34 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax e Voltalene**

Fonte: As autoras

#### 5.4.1.3 Comparação com e sem banco de capacitores

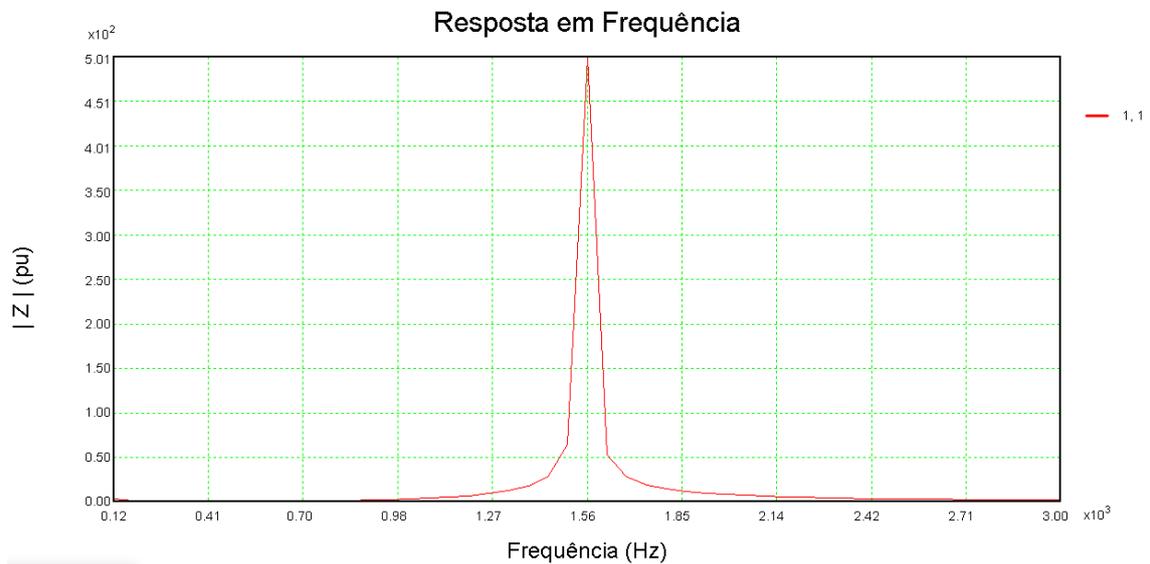


**Figura 35 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax e Voltalene. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem.**

Fonte: As autoras

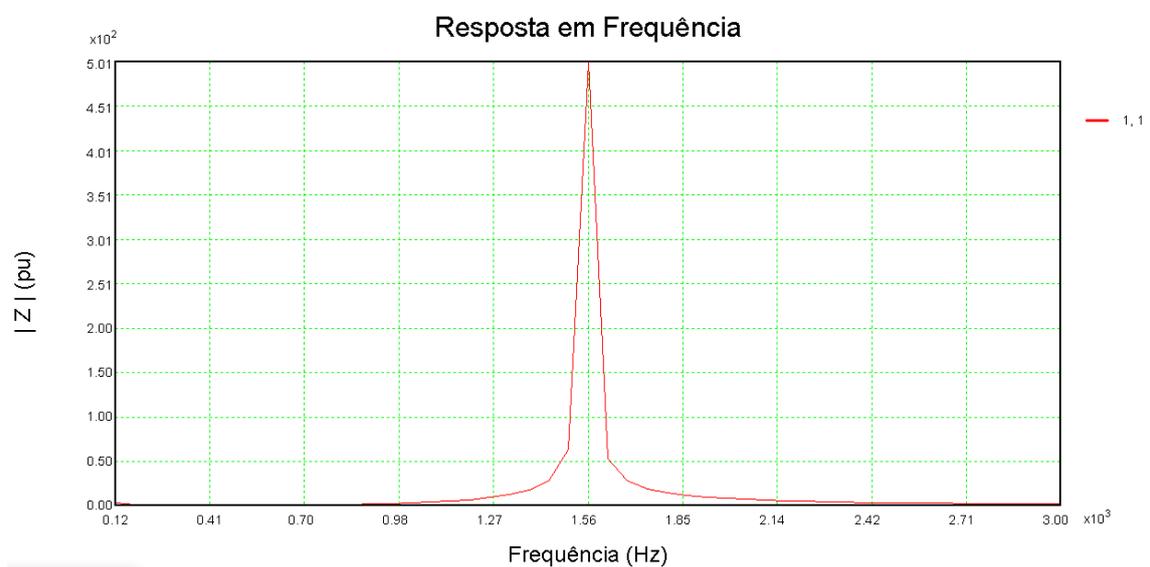
## 5.4.2 SIMULAÇÃO EM TRIFÓLIO

### 5.4.2.1 Com banco de capacitores



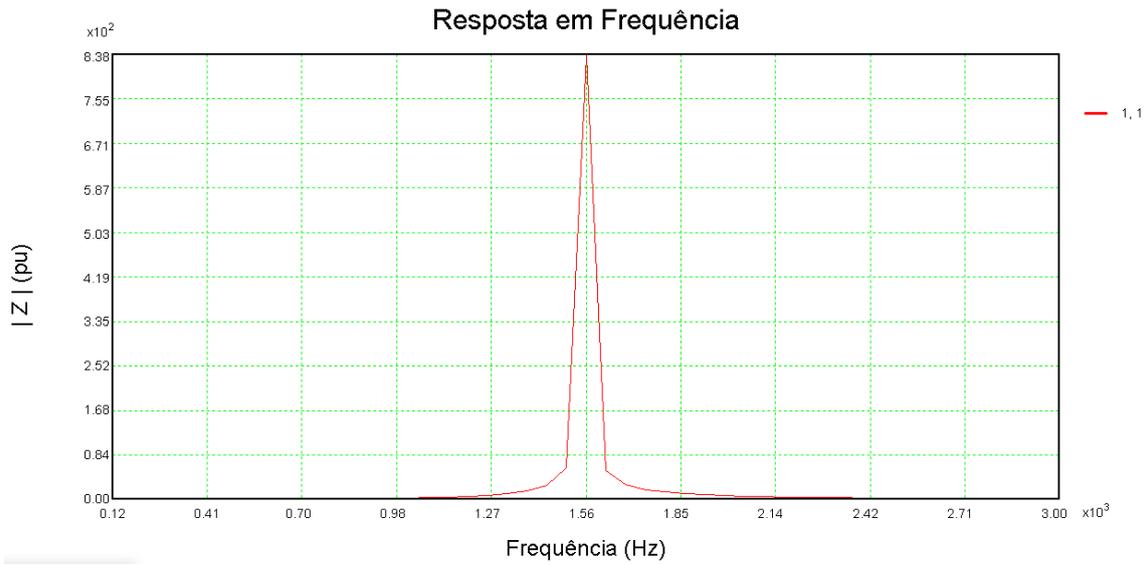
**Figura 36 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact**

Fonte: As autoras



**Figura 37 - Resposta em frequência para cabo Flexonax Cobre**

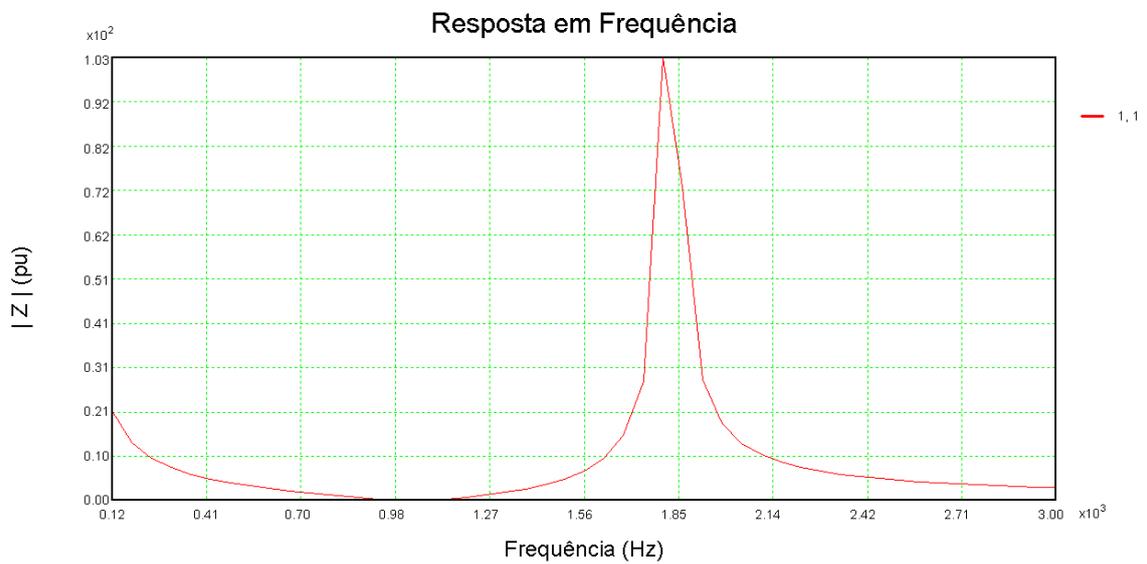
Fonte: As autoras



**Figura 38- Resposta em frequência para cabo Forex Alumínio**

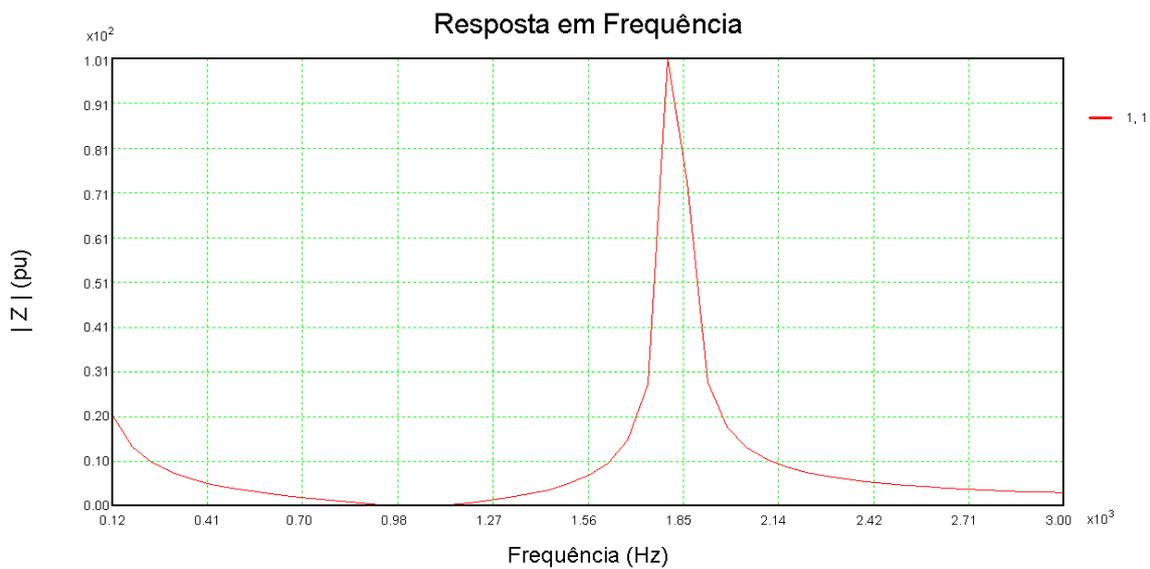
Fonte: As autoras

#### 5.4.2.2 Sem banco de capacitores



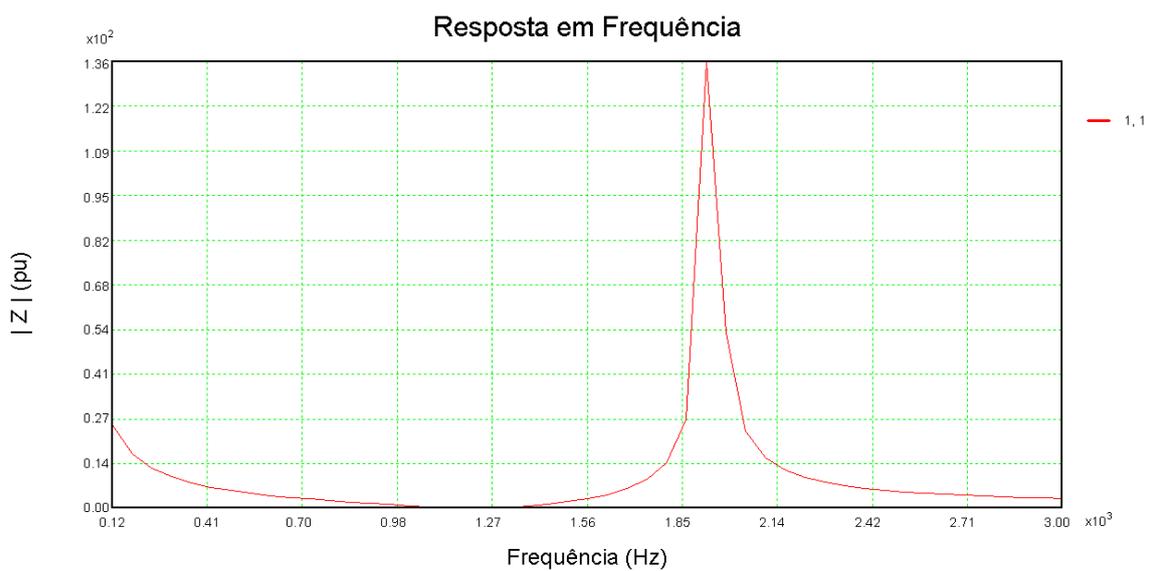
**Figura 39 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact**

Fonte: As autoras



**Figura 40 - Resposta em frequência para cabo Flexonax cobre**

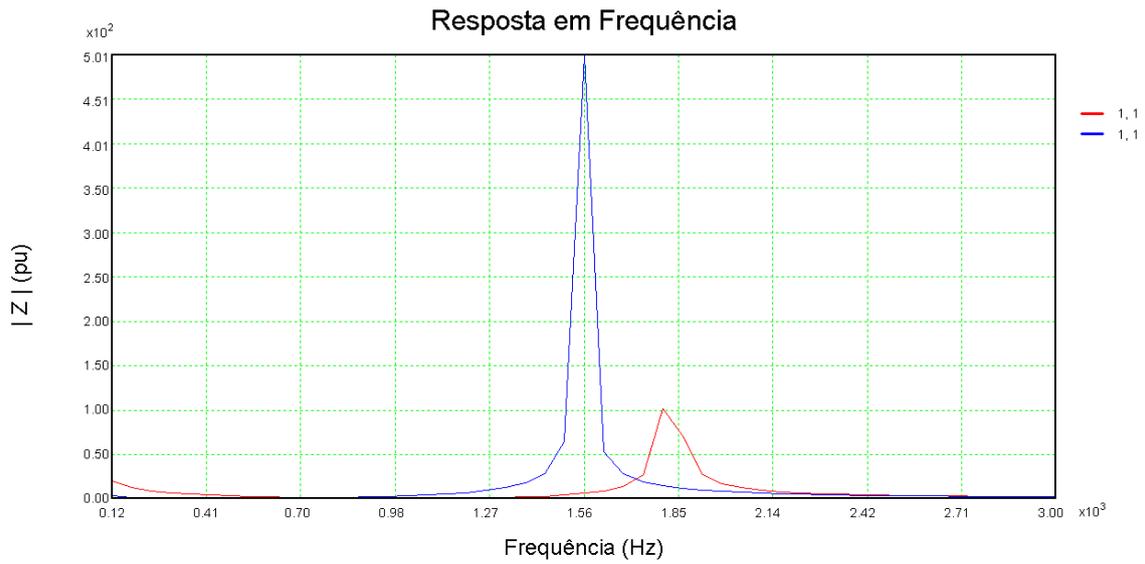
Fonte: As autoras



**Figura 41 - Resposta em frequência para cabo Forex alumínio**

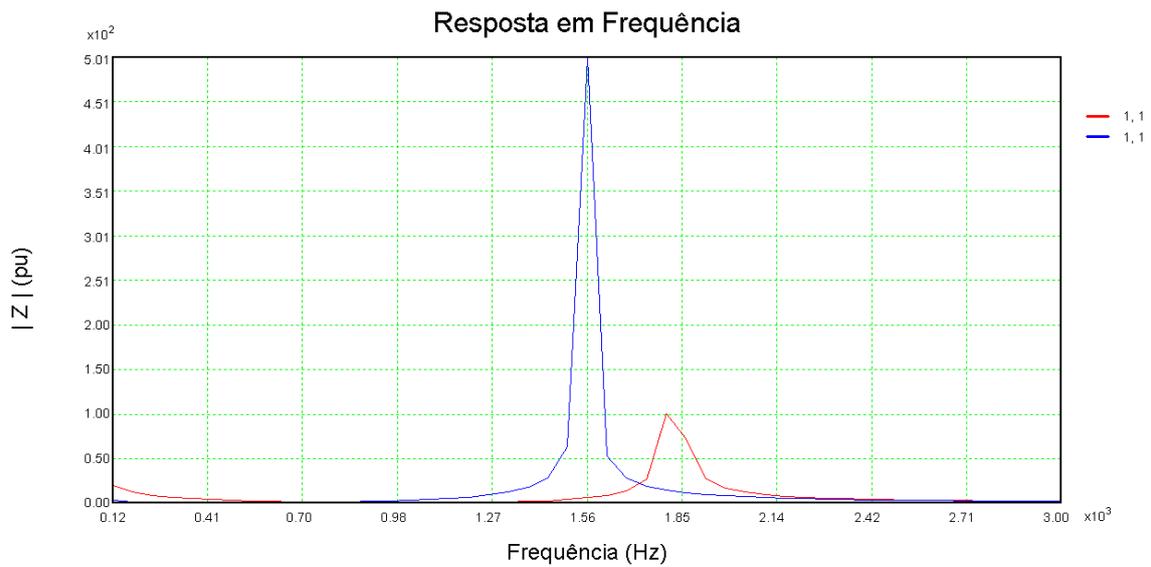
Fonte: As autoras

#### 5.4.2.3 Comparação com e sem banco de capacitores



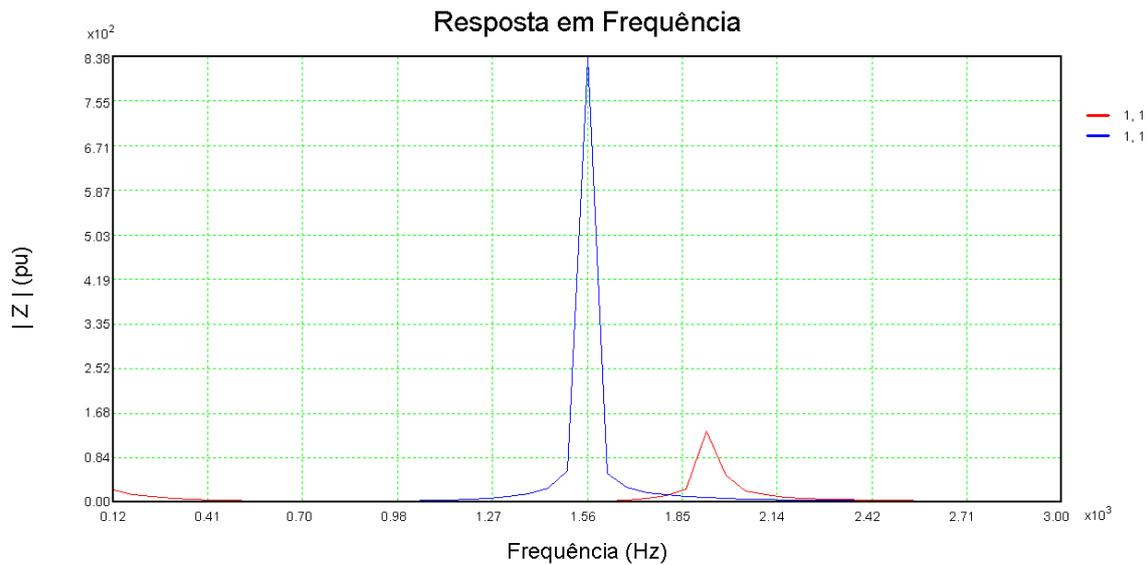
**Figura 42 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem.**

Fonte: As autoras



**Figura 43 - Resposta em frequência para cabo Flexonax cobre. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem.**

Fonte: As autoras

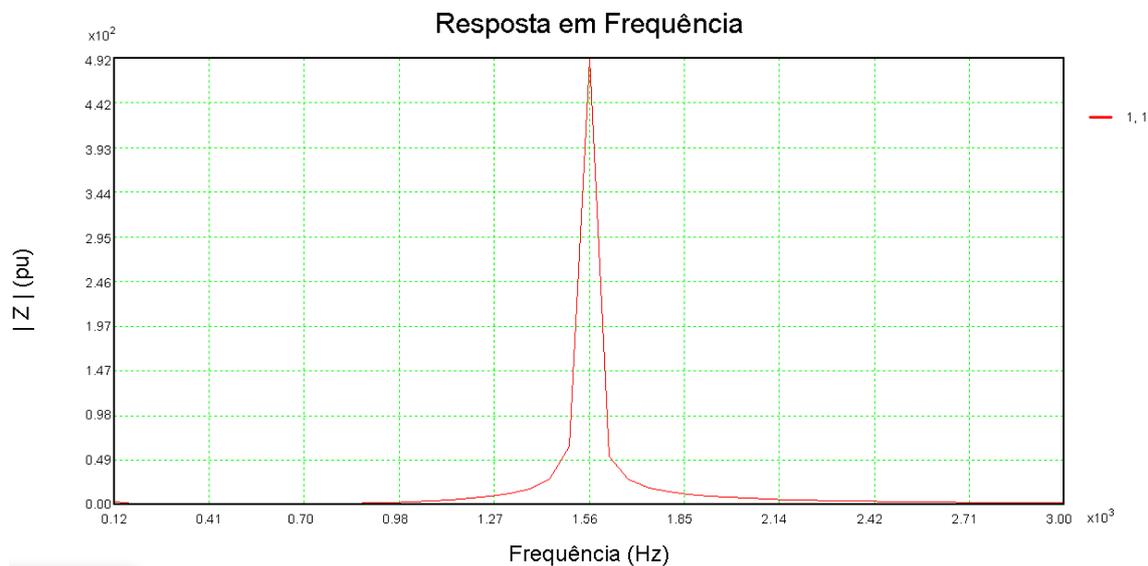


**Figura 44 - Resposta em frequência para cabo Forex alumínio. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem.**

Fonte: As autoras

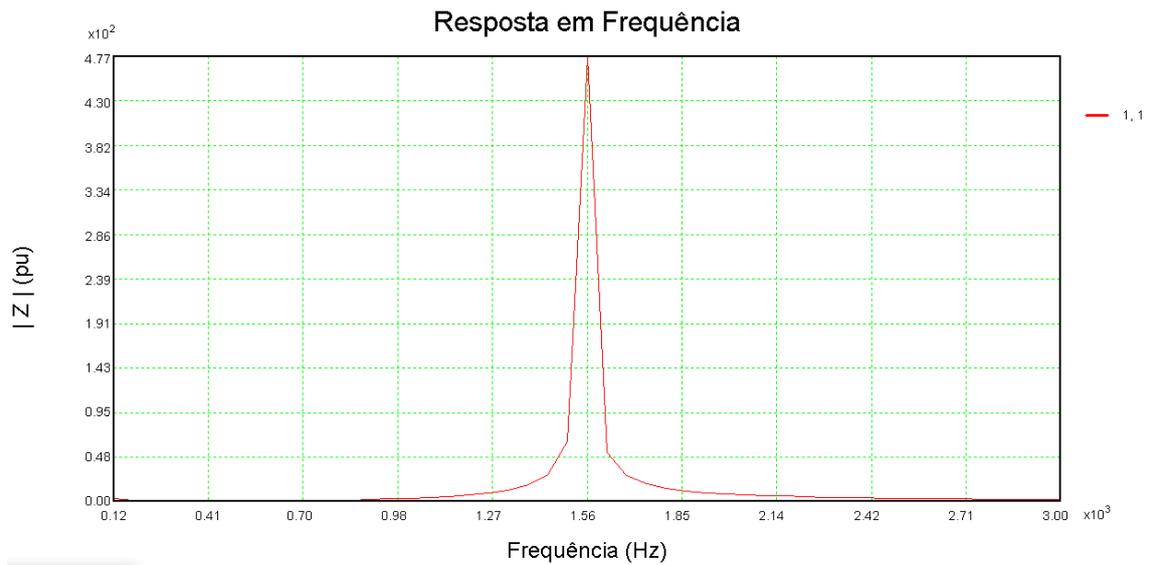
### 5.4.3 SIMULAÇÃO EM BANCO DE DUTOS

#### 5.4.3.1 Com banco de capacitores



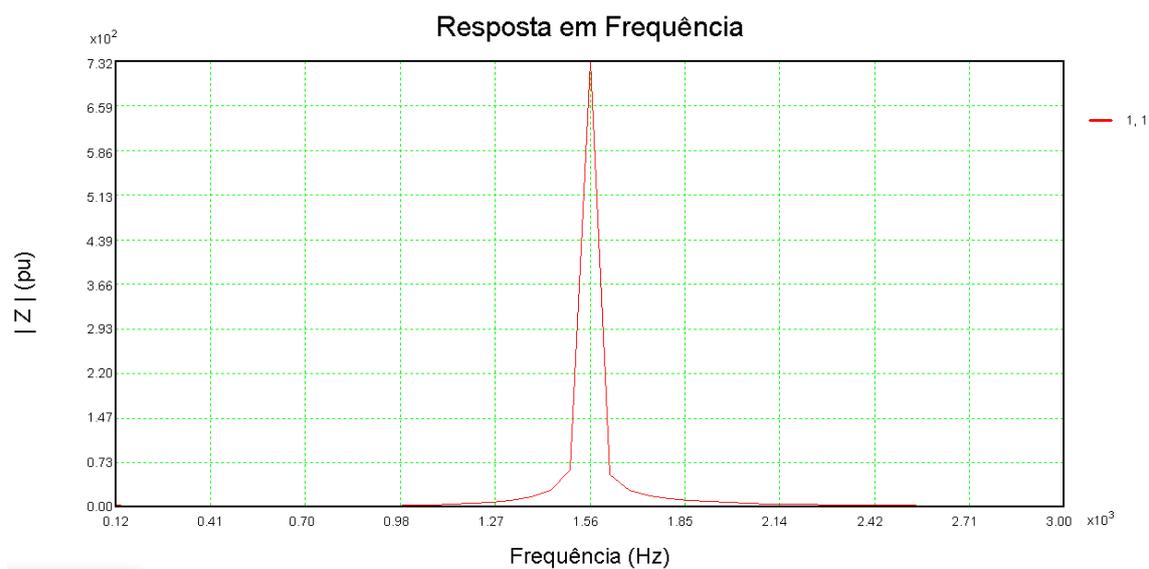
**Figura 45 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact 105**

Fonte: As autoras



**Figura 46 - Resposta em frequência para cabo Flexonax Alumínio**

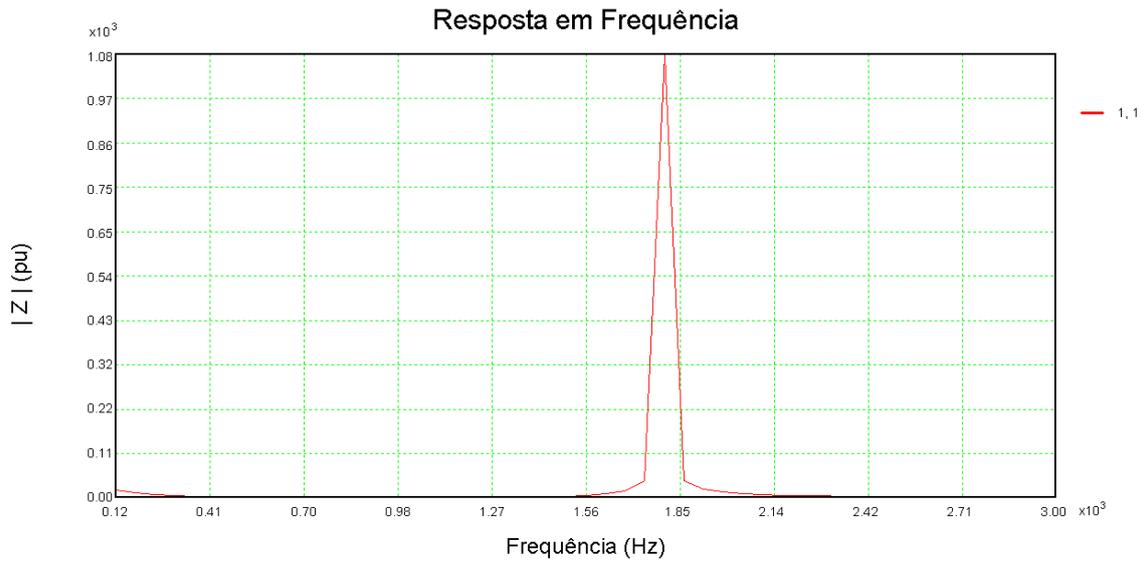
Fonte: As autoras



**Figura 47 - Resposta em frequência para cabo Forex Cobre**

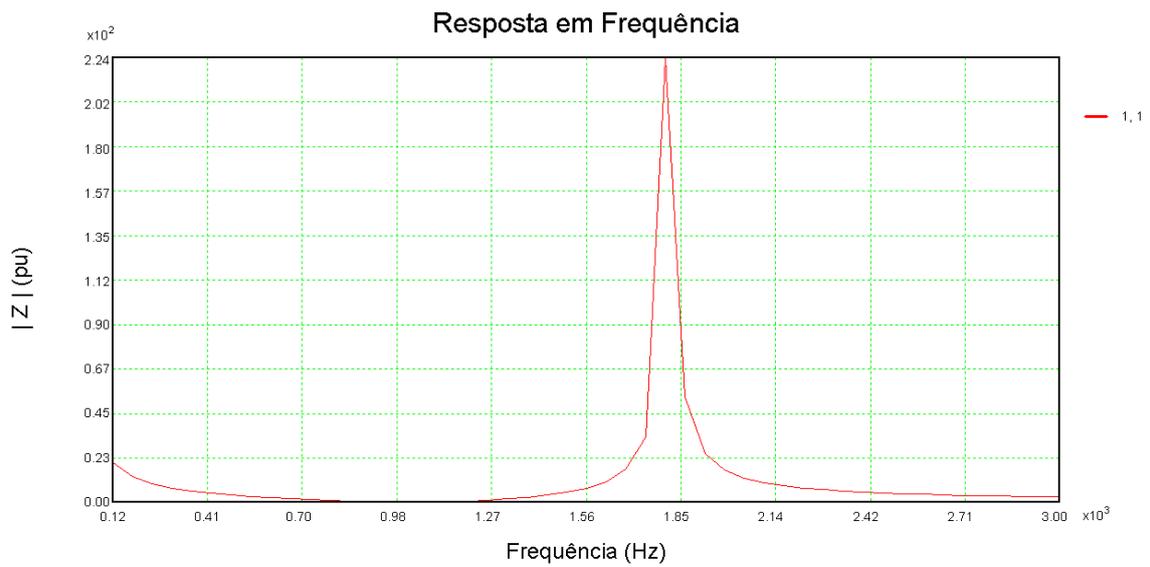
Fonte: As autoras

#### 5.4.3.2 Sem banco de capacitores



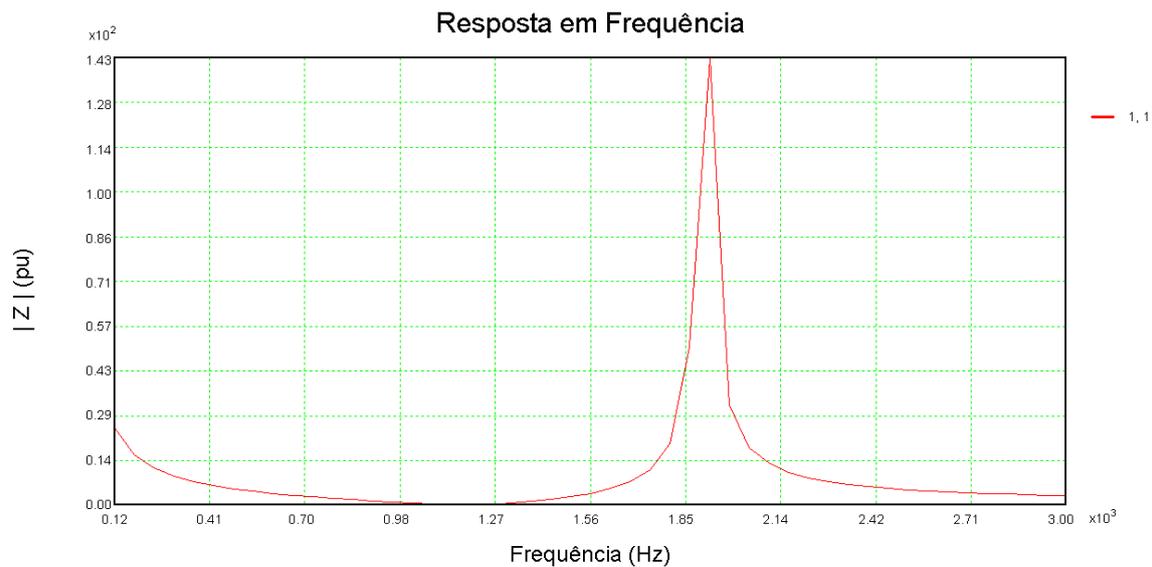
**Figura 48 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact 105**

Fonte: As autoras



**Figura 49 - Resposta em frequência para cabo Flexonax alumínio**

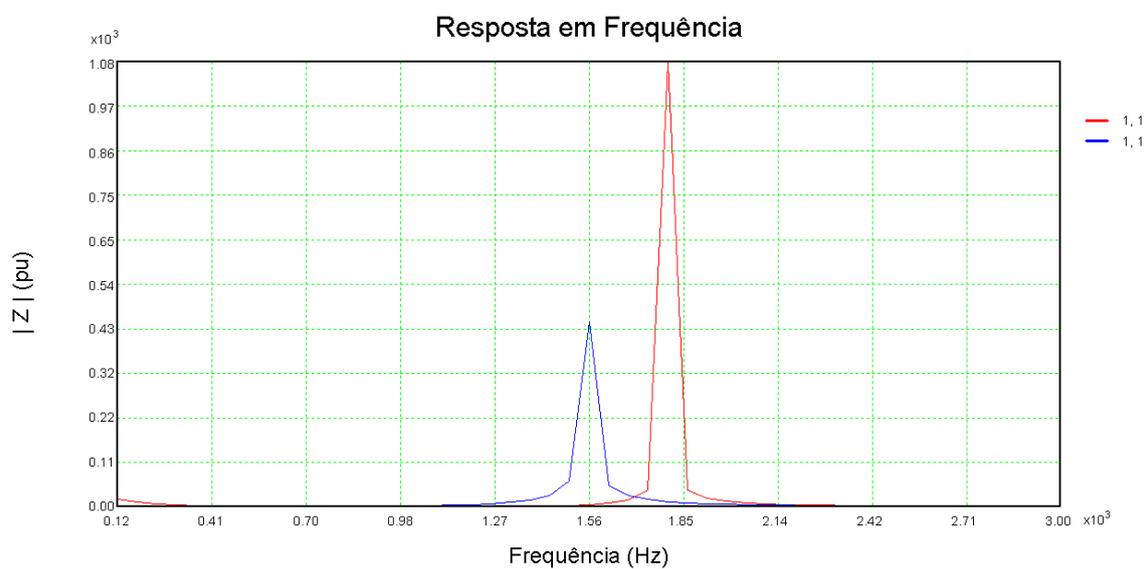
Fonte: As autoras



**Figura 50 - Resposta em frequência para cabo Forex Cobre**

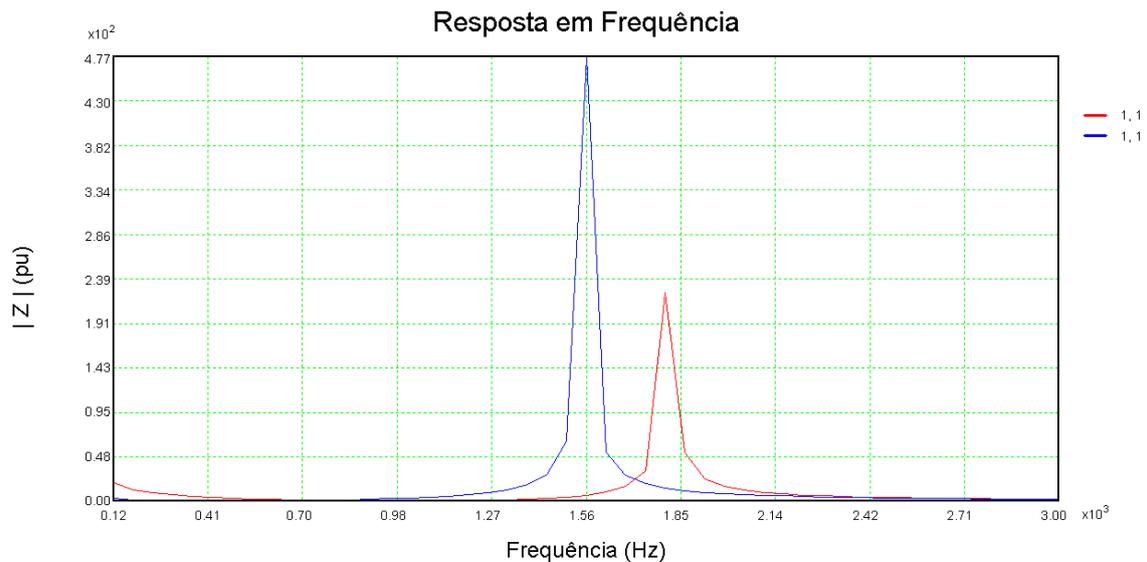
Fonte: As autoras

#### 5.4.3.3 Comparação com e sem banco de capacitores



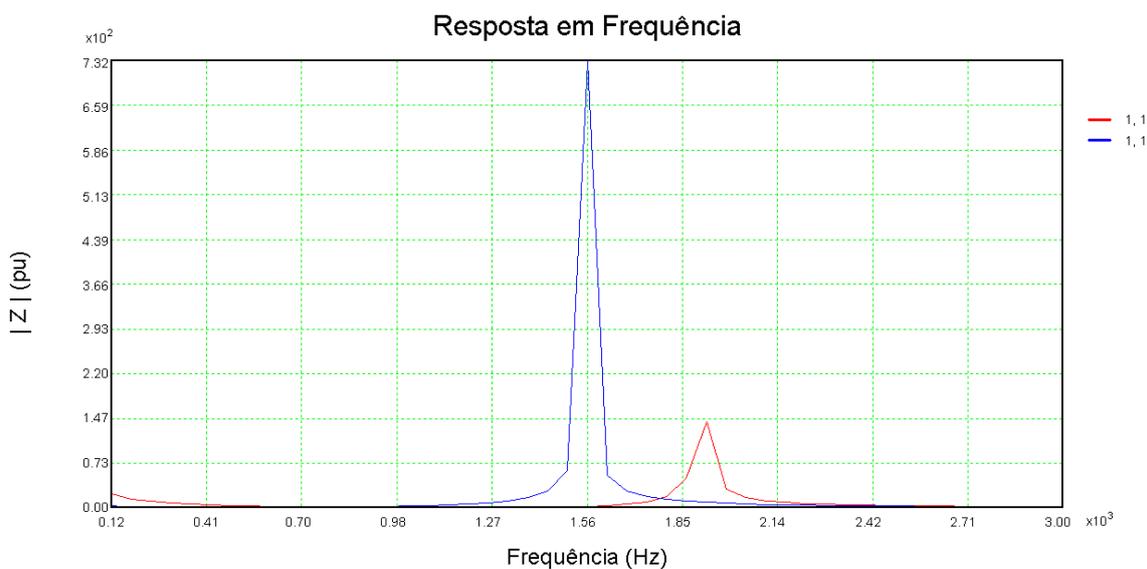
**Figura 51 - Resposta em frequência para cabo Eprotenax Compact 105. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem.**

Fonte: As autoras



**Figura 52 - Resposta em frequência para cabo Flexonax alumínio. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem.**

Fonte: As autoras



**Figura 53 - Resposta em frequência para cabo Forex cobre. Sendo a curva a esquerda a simulação com banco de capacitores e a direita, sem.**

Fonte: As autoras

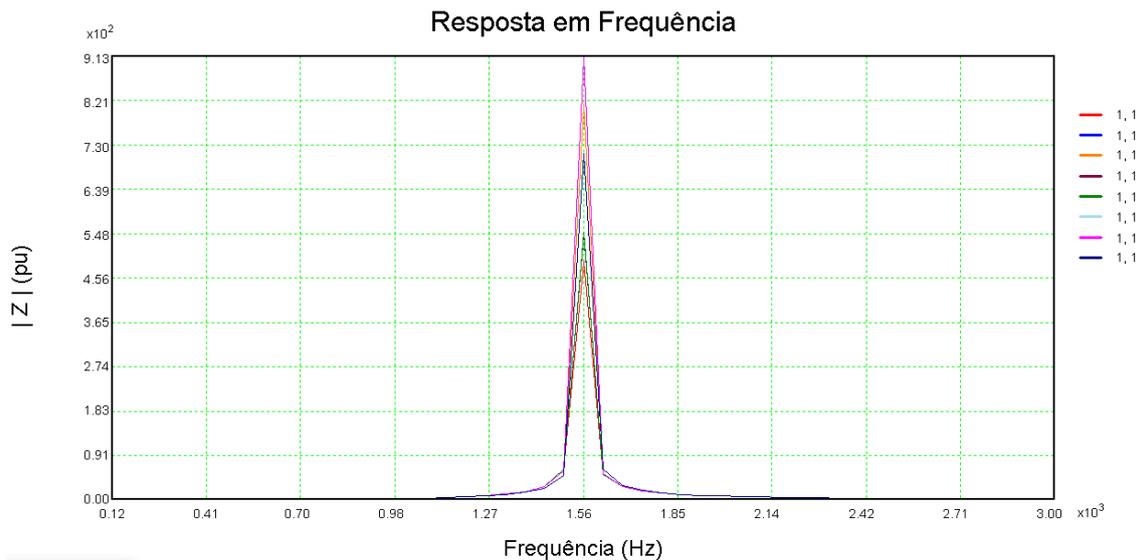
## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão realizadas comparações entre os resultados obtidos nas simulações, bem como serão apresentadas análises da influência da modelagem das linhas aéreas e dos cabos subterrâneos presentes no parque eólico.

Seguindo a lei de Ohm, com uma alta impedância, para uma mesma corrente, tem-se uma alta tensão. Quando esta se sobrepõe à tensão da rede elétrica, em frequências iguais, ocorre a sobretensão do sistema. Ou seja, o valor de tensão aumenta drasticamente, trazendo diversas consequências para todo o sistema. Nesse estudo, a frequência de ressonância encontrada foi a 26ª harmônica, alcançando 1560 Hz, quando se tem o banco de capacitor. No cenário sem o banco, a frequência foi para aproximadamente 1900 Hz.

Isso significa que, por exemplo, para uma corrente de 1 A, com a frequência encontrada de 1560 Hz, aplicada à uma impedância de 1300 pu, resulta em um aumento de 1300V na tensão para a mesma frequência. Por isso, a escolha do cabo com melhores características é de fundamental importância.

Portanto, com a comparação dos cabos, para a mesma instalação, percebeu-se que para a aérea, com distância entre condutores igual a  $2d$ , o cabo com maior impedância é o Forex, sua versão em cobre alcançando 911 pu, enquanto a em alumínio chegou a 838 pu. Por sua vez, o Eprotenax Compact 105, possui menor valor (492 pu). Dessa forma, sabendo que uma maior impedância implica em maior tensão, para esse tipo de instalação, o cabo Eprotenax Compact 105 é preferível, pois caso aconteça um surto de sobretensão, a tendência é que a amplitude desta seja menor.

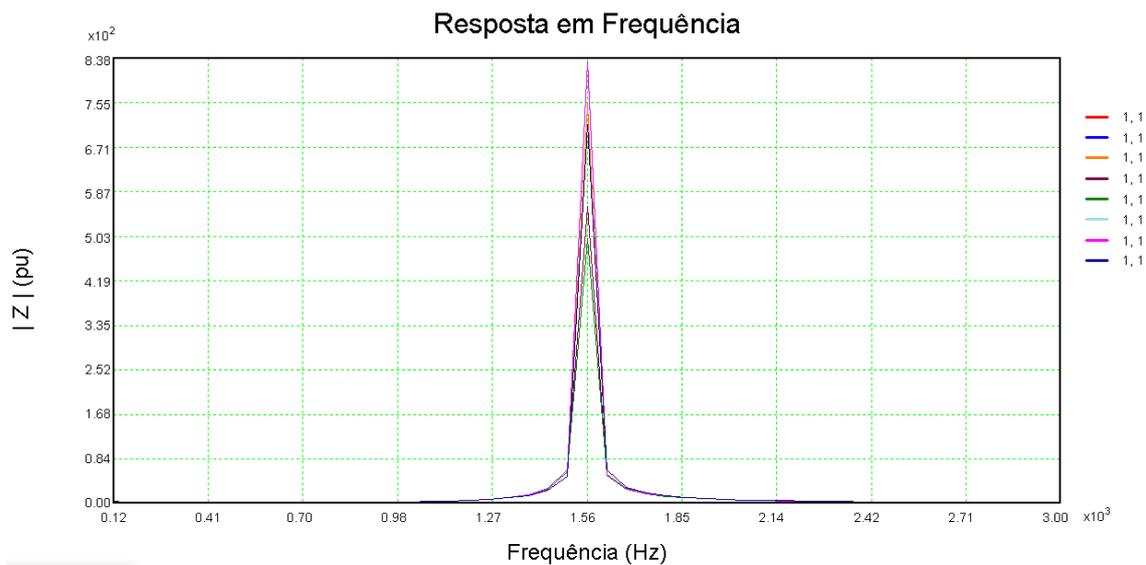


**Figura 54 - Comparação da resposta em frequência dos cabos para instalação  $s=2d$**

Fonte: As autoras

Para esse tipo de instalação, os valores simulados para os cabos Eprotenax Compact e Flexonax (alumínio ou cobre), são próximas, com média de 550,7 pu.

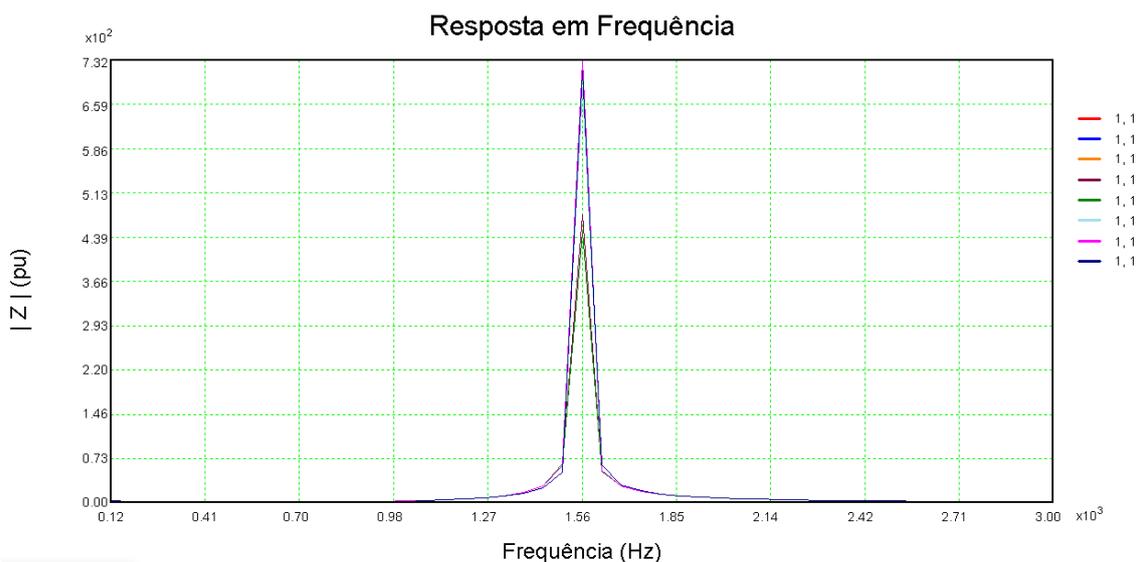
Em trifólio, os cabos Eprotenax Compact, Eprotenax Compact 105 e Flexonax (cobre) possuem comportamento extremamente semelhante, com pico de impedância em 501 pu, sendo os valores mais baixos, portanto, as melhores opções. Inversamente, com 838 pu e 834 pu, está o cabo Forex nas suas versões em alumínio e cobre, respectivamente.



**Figura 55 - Comparação da resposta em frequência dos cabos para instalação em trifólio**

Fonte: As autoras

Já para configurações subterrâneas, em banco de dutos, observou-se que os cabos com menor amplitude foram: Flexonax de cobre e Eprotenax Compact, ambos com pico de 449 pu. O pior cabo para este caso é o Forex cobre, com 732 pu.



**Figura 56 - Comparação da resposta em frequência dos cabos para instalação subterrânea, em banco de dutos**

Fonte: As autoras

Os cabos Eprotenax Compact 105 e Eprotenax Compact, apresentaram resultados semelhantes para instalação subterrânea ou ao ar livre, em trifólio. Suas diferenças são interessantes, nesse estudo, quando instalados a distância  $s=2d$ . Para os cabos Forex, cobre ou alumínio, quando instalados em trifólio, pode-se considerar um comportamento idêntico.

Somente pelas comparações entre os cabos, sabe-se que, de maneira geral, o cabo menos indicado, para todas as instalações, é o Forex. De maneira a compreender melhor qual cabo seria mais adequado para cada instalação, a Tabela 4 traz um resumo dos dados obtidos.

Depois de desligado o banco de capacitores, os resultados sofreram alterações consideráveis. É possível observar o deslocamento da frequência de ressonância, agora próxima de 1850 Hz - 30ª harmônica -, e alterações no valor da impedância. Isso significa que o banco de capacitores também altera o valor da frequência de ressonância, para que não haja coincidência e a sobretensão seja evitada.

**Tabela 4 – Dados obtidos com banco e sem banco de capacitores**

Fonte: As autoras

Instalação	Cabo (nome comercial)	Com banco de capacitores		Sem banco de capacitores	
		Impedância (pu)	Frequência (Hz)	Impedância (pu)	Frequência (Hz)
<b>BANCO DE DUTOS</b>	Eprotenax e Voltalene	728,86	1560	135,44	1920
	Eprotenax Compact	449,22	1560	1078,54	1800
	Eprotenax Compact - Cobre nú	714,61	1560	-	-
	Eprotenax Compact 105	449,21	1560	1075,39	1800
	Flexonax Alumínio	477,34	1560	224,5	1800
	Flexonax Cobre	449,09	1560	1098,55	1800
	Forex Alumínio	687,12	1560	79,76	1920
	Forex Cobre	732,21	1560	142,71	1920
<b>TRIFÓLIO</b>	Eprotenax e Voltalene	751,83	1560	323,11	1920
	Eprotenax Compact	500,68	1560	102,75	1800
	Eprotenax Compact - Cobre nú	714,61	1560	-	-
	Eprotenax Compact 105	500,67	1560	102,74	1800
	Flexonax Alumínio	561,26	1560	233,05	1860

Instalação	Cabo (nome comercial)	Com banco de capacitores		Sem banco de capacitores	
		Impedância (pu)	Frequência (Hz)	Impedância (pu)	Frequência (Hz)
	Flexonax Cobre	501,19	1560	101,4	1800
	Forex Alumínio	838,5	1560	135,88	1920
	Forex Cobre	833,72	1560	147,68	1920
<b>S=2D</b>	Eprotenax e Voltalene	815,11	1560	266,67	1920
	Eprotenax Compact	548,5	1560	143,57	1860
	Eprotenax Compact - Cobre nú	714,61	1560	-	-
	Eprotenax Compact 105	491,54	1560	133,51	1800
	Flexonax Alumínio	550,25	1560	149,03	1860
	Flexonax Cobre	552,69	1560	157,48	1860
	Forex Alumínio	912,59	1560	81,21	1980
	Forex Cobre	911,19	1560	80,28	1980

## 7. CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Por fim, é entendido que existe uma diferença considerável para os tipos de rede e, para um melhor adequamento do projeto em desenvolvimento, uma avaliação das vantagens e desvantagens de cada modelo é interessante, principalmente porque muitas vezes, o fator determinante para a escolha entre rede aérea ou rede subterrânea é a burocracia, embora economicamente falando, linhas aéreas ganhem mais pontos (PLOTKIN, SCHULZ, HANITSCH, 2006). Contudo, o fator que mais deveria ser levado em conta é a qualidade da energia oferecida em ambos os casos, visto que, dessa forma, perdas poderiam ser atenuadas.

A abordagem de comparações qualitativas de diferentes cabos no interior do parque ainda é um tema de poucos estudos na literatura, contudo sua importância é extrema por conta da necessidade da análise dos harmônicos, a fim de evitar sobretensões no sistema, as quais provocam surtos, que podem levar a falhas no sistema, queima de equipamentos, entre outros. Uma das soluções para esse problema é a implementação de um banco de capacitores que alteram a frequência harmônica, evitando assim, que haja a sobreposição das tensões. A escolha do fabricante e do tipo de cabo também é fator essencial, pois suas características e valores de parâmetros podem causar diferentes efeitos nas linhas, dependendo de qual for a instalação. Ou seja, a medição do conteúdo harmônico é imprescindível na análise da qualidade da energia elétrica distribuída.

Para este projeto, utilizou-se um modelo real de um parque eólico específico, contudo, cada parque tem suas particularidades, não sendo possível generalizar que o cabo que teve melhor desempenho para um parque, funcione da mesma maneira para todo e qualquer outro. Isso porque o número de barra, potência, tensão, número de cargas não lineares podem impactar diretamente no desempenho. O que se pode considerar como genérico para todos os parques como modo de amenizar as harmônicas, entre outros pontos, é a importância de uso de filtros para as cargas não lineares, o uso de bancos de

capacitores para redução da compensação da potência reativa e consequente correção do fator de potência.

Como proposta para uma continuidade do projeto futuramente, a próxima análise a ser realizada é a de sensibilidade, que é possível ser efetuada dentro do próprio software HarmZs, a qual trará maior conhecimento da maneira como funciona a composição dos cabos, por meio dos polos e zeros. Outras propostas, também, podem vir a surgir para outros trabalhos quanto ao estudo de harmônicas em parques eólicos devido ao grande espectro de possibilidades ainda pouco conhecidas na literatura.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEólica. **Boletim Anual de Geração Eólica 2017**. ABEEólica, 2018. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>> Acesso em: 2 de maio de 2019.

ALDABÓ, R. **Qualidade na energia elétrica**. São Paulo: Artliber, 2001.

ALMEIDA, Geraldo R. de. **Cabos Aéreos Para Linhas de Transmissão de Energia Elétrica**. Disponível em: <[http://www.intelli.com.br/uploads/artigos/artigo\\_cabos\\_aereos\\_al.pdf](http://www.intelli.com.br/uploads/artigos/artigo_cabos_aereos_al.pdf)> Acesso em: 23 mar 2019.

BENEDITO, R. A. S. **Elementos de Sistemas Elétricos de Potência**. UTFPR. Disponível em: <[http://paginapessoal.utfpr.edu.br/raphaelbenedito/sistemas-eletricos-de-potencia-i/aulas/SEP%201%20-%20Cap%203%20Resistencia%20e%20Condutancia%20de%20dispersao.pdf/at\\_download/file](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/raphaelbenedito/sistemas-eletricos-de-potencia-i/aulas/SEP%201%20-%20Cap%203%20Resistencia%20e%20Condutancia%20de%20dispersao.pdf/at_download/file)>. Acesso em: 07 de abril de 2019.

BENEDITO, R. A. S. **Elementos de Sistemas Elétricos de Potência: Capacitância e Susceptância Capacitiva de Linhas de Transmissão**. UTFPR. Disponível em: <[http://paginapessoal.utfpr.edu.br/raphaelbenedito/sistemas-eletricos-de-potencia-i/aulas/SEP%201%20-%20Cap%203%20item%203.1-4%20-%20Capacitancia%20e%20Susceptancia%20Capacitiva.pdf/at\\_download/file](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/raphaelbenedito/sistemas-eletricos-de-potencia-i/aulas/SEP%201%20-%20Cap%203%20item%203.1-4%20-%20Capacitancia%20e%20Susceptancia%20Capacitiva.pdf/at_download/file)>. Acesso em: 07 de abril de 2019.

BERLEZE, S. L. M. **Efeitos pelicular e de proximidade em condutores não magnéticos**. Dissertação de Pós Graduação de Física. Universidade Federal do Paraná. 1988.

BRASIL - Lei no 10.438, de 26 de Abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis no 9.427, de 26 de dezembro de 1996, no 9.648, de 27 de maio de 1998, no 3.890-A, de 25 de abril de 1961, no 5.655, de 20 de maio de 1971, no 5.899, de 5 de julho de 1973, no 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. De Abril de 2002, Sec. 1, p. 2.

BRASIL - Resolução nº 24, de 5 de Julho de 2001. Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica. Fica criado o Programa Emergencial de Energia Eólica - PROEÓLICA no território nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. 6 jul. 2001, Sec. 1, p. 5.

CARVALHO, D. S. J; ALMEIDA, J. H. M; LIMA, S. F. F. **Estudos para a expansão da transmissão: simulação de cabos subterrâneos**. Empresa de Pesquisa Energética. Fev 2017. Disponível em: <

276/topico-348/EPE-DEE-NT-004-2017-rev0.pdf> Acesso: 23 de março de 2019.

**Catálogo Elefio - cabos elétricos.** São Paulo. Disponível em: <<http://www.elefio.com.br/cabos-eletricos-redes-aereas>>. Acesso em: 24 de março de 2019.

**Catálogo Prysmian - Guia Dimensionamento média tensão.** Disponível em: <[https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Guia\\_Dimensionamento\\_Media\\_Tensao.pdf](https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Guia_Dimensionamento_Media_Tensao.pdf)>. Acesso em: 2 de maio de 2019.

**Catálogo - Cabos de média tensão.** Disponível em: <<https://www.generalcable.com/assets/documents/LATAM%20Documents/Brazil%20Site/Catalogo-Cabos-de-Media-Tensao.pdf?ext=.pdf>>. Acesso em: 4 de maio de 2019.

COSTA, C. O. **Programa para Estudos de Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas.** Curso HarmZs. Jun 2018.

FREITAS, S. **Módulo III: Linhas de Transmissão.** Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica – UEMG. Disponível em: <<https://profgandhiferrari.files.wordpress.com/2013/05/mc3b3dulo-iii.pdf>>. Acesso em: 06 de maio de 2019.

GHIJSELEN, J. A; RYCKAERT W. R.; MELKEBEEK, J. A. **Influence of Distribution Feeder Design on Resonances.** Jul 2003. **IEEE Power Engineering Society General Meeting.** Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1270506>> Acesso em: 7 fev 2019.

GWEC. **Estatística Mundial dos Ventos 2017.** GWEC, 2018. Disponível em: <[https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC\\_PRstats2017\\_EN-003\\_FINAL.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf)>. Acesso em: 02 de maio de 2019.

GWEC. **Relatório mundial dos ventos de 2014.** GWEC, 2015. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/293121527\\_Global\\_Wind\\_Report\\_-\\_Annual\\_Market\\_Update\\_2014](https://www.researchgate.net/publication/293121527_Global_Wind_Report_-_Annual_Market_Update_2014)>. Acesso em 02 de maio de 2019.

**HarmZs: Estudos de comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas.** CEPEL. Disponível em: <[http://www.cepel.br/pt\\_br/produtos/harmzs-estudos-de-comportamento-harmonico-e-analise-modal-de-redes-eletricas.htm](http://www.cepel.br/pt_br/produtos/harmzs-estudos-de-comportamento-harmonico-e-analise-modal-de-redes-eletricas.htm)>. Acesso em: 06 de maio de 2019.

HERMES, P. D; NAKAGUISHI, M. I. **Estudo comparativo técnico/financeiro para implantação de redes de distribuição subterrâneas.** Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica - UFPR. 2011. Disponível em: <<http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/199.pdf>>. Acesso em: 27 de abril de 2019.

LEÃO, R. **Linhas de Transmissão de Energia Elétrica.** UFC. Disponível em: <[http://joinville.ifsc.edu.br/~edsonh/Repositorio/PIP-Projeto\\_e\\_Instalacoes\\_Eletricas\\_Prediais/Material%20de%20Aula/Parte\\_I\\_GT\\_D/Complemento/IIITransmissao.pdf](http://joinville.ifsc.edu.br/~edsonh/Repositorio/PIP-Projeto_e_Instalacoes_Eletricas_Prediais/Material%20de%20Aula/Parte_I_GT_D/Complemento/IIITransmissao.pdf)>. Acesso em: 07 de abril de 2019.

LMDM Consultoria Empresarial. **A Transformação das Redes de Distribuição de Energia Aéreas em Subterrâneas.** Paraná. Disponível em: <<http://www.lmdm.com.br/wp-content/uploads/2014/10/Estudo-Redes-A%C3%A9reas-x-Subterr%C3%A2neas.pdf>>. Acesso em: 30 de abril de 2019.

MELO, M. O. B. C. **Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: proposta de metodologia.** Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFPB. 2008. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/ProdutoProducao/article/download/4092/3870>>. Acesso em: 10 de maio de 2019.

MENDONÇA, G. A. **Avaliação das Abordagens Empregadas em Estudos de Propagação Harmônica em Sistemas Elétricos.** UEMG. 2012. Disponível em: <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-B8QMNV/ppgengeletrica\\_gabrielalvesmendonca\\_dissertacaomestrado.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-B8QMNV/ppgengeletrica_gabrielalvesmendonca_dissertacaomestrado.pdf?sequence=1)>. Acesso em 4 de junho de 2019.

Ministério de Minas e Energia. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/15+-+Energia+E%C3%B3lica+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29+-+NOVO/f63a15ea-9d2c-4d27-9400-5d7c3fd97b22?version=1.4>> Acesso em: 01 de maio de 2019.

NUNES, N. S. **Cálculo de Parâmetros de Cabos Subterrâneos para Redes de Distribuição.** Dissertação mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Universidade Técnica de Lisboa. 2007.

ONS. **Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos acessos à rede básica ou nos barramentos de fronteira com a rede básica para parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras.** 2018. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/ONSNT0009-2016\\_Rev2-InstrEstudos-Medicao\\_QEE\\_Acesso\\_RB.pdf](http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/ONSNT0009-2016_Rev2-InstrEstudos-Medicao_QEE_Acesso_RB.pdf)>. Acesso em: 12 de junho de 2019.

PEREIRA, M. M. **Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante.** UFJF- Minas Gerais, 2004. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ppee/files/2008/12/211037.pdf>> Acesso em: 02 de maio de 2019.

PINEDA, J. T. R; de ARAÚJO, A. R. J; KUROKAWA, S; COSTA, E. C. M; PISSOLATO, J. **Método de Estimação de Parâmetros de Linhas de Transmissão baseado em Dados de Faltas.** Disponível em: <<https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/SBSE2016-0086.pdf>>. Acesso em: 06 de maio de 2019.

PLOTKIN, J; SCHULZ, D; HANITSCH, R. **Influence of Long High Voltage Cables on Total Harmonic Distortion of Currents in Wind Farms.** Berlin University of Technology, Helmut-Schmidt University Hamburg – Alemanha.

ROCHA, J. E. **Qualidade da Energia Elétrica.** UTFPR. 2016. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidade-da-energia>>

eletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Eletrica%20\_%20Apostila.pdf/at\_download/file>. Acesso em 13 de maio de 2019.

SILVEIRA, K. C. P. **Análise de uma configuração de parque eólico baseada em sistema de transmissão multiterminal cc com conversores multinível modular**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - UFRJ. 2015. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2015-1/2015062904-2015062904/file>>. Acesso em: 08 de maio de 2019.

TEIXEIRA, D. A. **Linha de Transmissão Aérea Compacta: Seleção dos Cabos e Posicionamento Ótimo dos Feixes de Condutores**. Tese de pós-graduação em Engenharia Elétrica UFMG. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1169D.PDF>>. Acesso em: 24 de março de 2019.

UMARJI, H. **Cálculo de Parâmetros de Linhas Aéreas para Redes de Distribuição**. Dissertação mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Universidade Técnica de Lisboa.

WEDY, G.F; **Inclusão do Efeito Corona em Modelos de Linhas de Transmissão Bifásica Utilizando a Técnica de Variáveis de Estado**. Tese de pós-graduação em Engenharia Elétrica UEP. Disponível em: <[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/249-dissertacao\\_germano\\_wedy.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/249-dissertacao_germano_wedy.pdf)>. Acesso em: 24 de março de 2019.

## ANEXO A - Parâmetros utilizados nas simulações

Fonte: As autoras

Instalação	Nome comercial	Seção nominal (mm <sup>2</sup> )	Resistência (pu)	Reatância Indutiva (pu)	Susceptância (pu)
<b>BANCO DE DUTOS</b>	Eprotenax e Voltalene	95	0,02184415	0,024784709	0,000759088
	Eprotenax e Voltalene	185	0,012182315	0,022600294	0,000931265
	Eprotenax Compact	95	0,021592102	0,025036757	0,000932725
	Eprotenax Compact	185	0,011594203	0,022936358	0,001287174
	Eprotenax Compact - Cobre nú	95	0,021592102	0,025036757	0
	Eprotenax Compact - Cobre nú	185	0,011594203	0,022936358	0
	Eprotenax Compact 105	95	0,022600294	0,025036757	0,000932725
	Eprotenax Compact 106	185	0,012014283	0,022936358	0,001287174
	Flexonax Alumínio	70	0,046880907	0,019861374	0,000848179
	Flexonax Alumínio	185	0,017408108	0,022507876	0,001314322
	Flexonax Cobre	95	0,017206469	0,025019954	0,000927492
	Flexonax Cobre	185	0,00857803	0,0226339	0,001298407
	Forex Alumínio	120	0,026742281	0,024129385	0,000762883
	Forex Alumínio	185	0,017391304	0,022717916	0,000881406
	Forex Cobre	95	0,020718336	0,024801512	0,000714822
	Forex Cobre	185	0,010695232	0,02268431	0,000884352
<b>TRIFÓLIO</b>	Eprotenax e Voltalene	70	0,041587902	0,015038857	0,00069024
	Eprotenax e Voltalene	185	0,010922075	0,012182315	0,000931265
	Eprotenax Compact	70	0,028817475	0,013610586	0,000848179
	Eprotenax Compact	185	0,010838059	0,011258139	0,001287174
	Eprotenax Compact - Cobre nú	70	0,028817475	0,013610586	0

	Eprotenax Compact - Cobre nú	185	0,010838059	0,011258139	0
	Eprotenax Compact 105	70	0,030161731	0,013610586	0,000848179
	Eprotenax Compact 105	185	0,011342155	0,011258139	0,001287174
	Flexonax Aluminio	50	0,067658055	0,014803613	0,000710809
	Flexonax Aluminio	185	0,017408108	0,010695232	0,001314322
	Flexonax Cobre	70	0,021676118	0,013467759	0,000841761
	Flexonax Cobre	185	0,00857803	0,010812854	0,001298407
	Forex Aluminio	70	0,046880907	0,014694392	0,000646489
	Forex Aluminio	185	0,017416509	0,012694812	0,000881406
	Forex Cobre	70	0,028750263	0,014744802	0,000648426
	Forex Cobre	185	0,01073724	0,012678009	0,000884352
<b>S=2D</b>	Eprotenax e Voltalene	50	0,041923966	0,020835959	0,000624377
	Eprotenax e Voltalene	185	0,011426171	0,017979416	0,000931265
	Eprotenax Compact	50	0,041923966	0,020415879	0,000730753
	Eprotenax Compact	185	0,011174123	0,017139256	0,001287174
	Eprotenax Compact - Cobre nú	50	0,041923966	0,020415879	0
	Eprotenax Compact - Cobre nú	185	0,011174123	0,017139256	0
	Eprotenax Compact 105	70	0,030497795	0,019407687	0,000848179
	Eprotenax Compact 105	185	0,011594203	0,017139256	0,001287174
	Flexonax Aluminio	50	0,067658055	0,021289645	0,000710809
	Flexonax Aluminio	185	0,017408108	0,017172863	0,001314322
	Flexonax Cobre	50	0,030069313	0,021197227	0,000715811
	Flexonax Cobre	185	0,00857803	0,017290485	0,001298407
	Forex Aluminio	50	0,067658055	0,021415669	0,000585609
	Forex Aluminio	185	0,017399706	0,018542323	0,000881406
	Forex Cobre	50	0,041478681	0,021432472	0,000584832
	Forex Cobre	185	0,010703634	0,01852552	0,000884352

