



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica

**CAMILA RODRIGUES CARDOSO**

**PROPOSIÇÃO DE FILTROS SINTONIZADOS PARA UMA  
PLANTA EÓLICA EM OPERAÇÃO NO NORDESTE  
BRASILEIRO A PARTIR DE ESTUDOS COMPUTACIONAIS E  
ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS.**

Uberlândia  
2018

**CAMILA RODRIGUES CARDOSO**

**PROPOSIÇÃO DE FILTROS SINTONIZADOS PARA UMA  
PLANTA EÓLICA EM OPERAÇÃO NO NORDESTE  
BRASILEIRO A PARTIR DE ESTUDOS COMPUTACIONAIS E  
ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS.**

Trabalho apresentado como requisito parcial de  
avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de  
Curso do Curso de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Ivan Nunes Santos

Uberlândia, 10 de dezembro de 2018.

**Banca Examinadora**

---

Prof. Me. Arthur Costa de Souza

---

Prof. Me. Arthur Fernando Bonelli

---

Prof. Dr. Ivan Nunes Santos

Uberlândia  
2018



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades concedidas e pelo apoio proporcionado em tempos difíceis.

Aos meus pais, Helton e Maria de Fátima pelo apoio financeiro e amoroso durante toda a graduação, juntamente com meu irmão Fabrício e toda minha família.

Ao Prof. Ivan Nunes Santos, pelos ensinamentos valiosos desde o início da graduação até o último instante.

Aos colaboradores do contrato AFLUENTE T – EAPSA – NARANDIBA – COELBA – COSERN – GE – UFU/FAU, identificado na ANEEL por meio do código PD-7284-0001/2016, por possibilitarem a realização do trabalho fundamentado em dados sistêmicos reais.

Aos grandes amigos, companheiros de estudos durante a graduação, pelo apoio e amizade durante esses 5 anos.

Ao meu amigo e companheiro Filipe e sua família, pela paciência e apoio nos momentos difíceis e intempestuosos.

## RESUMO

O crescimento do uso da energia eólica no Brasil e no mundo vem ocorrendo de maneira rápida, o qual recebeu fortes incentivos governamentais e privados, tornando-se uma fonte de energia cada vez mais competitiva e atrativa. Por consequência, a interação entre os parques eólicos e as redes de conexão se mostra uma área de fortes interesses investigativos em virtude das características operacionais desses complexos, os quais, em consonância com as propriedades da fonte primária de energia, se mostram de forma intermitente e com emprego de conversores eletrônicos. De acordo com tais características operativas, embora haja reconhecimento de que a função básica dos parques eólicos esteja relacionada ao suprimento de potência ativa na frequência fundamental, a operação dessas instalações está vinculada com fenômenos associados com a área da qualidade da energia elétrica, a exemplo das distorções harmônicas de tensão/corrente, que podem interagir e causar impactos nas redes elétricas de conexão. Diante disso, no contexto das interligações ora tratadas, o tema se apresenta com grandes desafios de maneira a motivar os desenvolvimentos aqui realizados, os quais estão focados em estudos acerca dos métodos mitigatórios das distorções harmônicas no sistema. Assim, o presente trabalho, realiza uma análise de um parque que se encontra conectado no sistema interligado no nordeste brasileiro, apresentando soluções mitigatórias, por meio de estudos e análise dos harmônicos presentes no ponto de conexão.

**Palavras-chave:** energia eólica, distorções harmônicas, filtros harmônicos, qualidade da energia.

## ABSTRACT

The growth in the use of wind energy in Brazil and in the world has been occurring rapidly, the gain of energy encouraged and private, becoming an increasingly competitive and attractive source of energy. Consequently, a change between wind farms and the connection networks that are found as sources of data of primary energy, are shown intermittently and using electronic converters. According to the operational functionalities, although there is recognition of a fundamental function of the wind works, it is related to the performance of a fundamental frequency, or the installation of the installations accompanied by a category of electric energy quality, harmonic distortions of voltage / current, which can interact and receive impacts in the electrical connection networks. In the context of the interconnections discussed here, the topic presents major challenges in order to motivate the developments carried out here, which are focused on studies on the mitigation methods of harmonic distortions in the system. Thus, the present work performs an analysis of a park that is connected in the interconnected system in northeastern Brazil, presenting mitigating solutions, through studies and analysis of the harmonics present at the point of connection.

**Keywords:** wind energy, harmonic distortions, harmonic filters, power quality.

## Lista de Figuras

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Diagrama elétrico das CGE's ligadas na subestação LN II .....                                           | 16 |
| Figura 2 - Diagrama unifilar CGE's Calango 1 ao 5.....                                                             | 16 |
| Figura 3 - Subestação do Calango 01 - Mapa dinâmico ONS.....                                                       | 17 |
| Figura 4 - Linha de transmissão subestações Calango 1 e Lagoa Nova II.....                                         | 17 |
| Figura 5 - Subestação da Lagoa Nova II.....                                                                        | 18 |
| Figura 6 - Foto da subestação da Lagoa Nova II em construção .....                                                 | 18 |
| Figura 7 - Fonte de alimentação e bloco de impedância equivalente do circuito utilizado na simulação. ....         | 19 |
| Figura 8 - Circuito simulado para obter nível de curto circuito na barra de 34,5kV da SE Calango 1,3. ....         | 21 |
| Figura 9 - Parametrização do bloco de Indutância. ....                                                             | 23 |
| Figura 10 - Arranjo da subestação da Lagoa Nova II. ....                                                           | 24 |
| Figura 11 - Circuito simulador entre a barra da LN II e Calango 1,3.....                                           | 25 |
| Figura 12 - Circuito simulador entre a barra da LN II e Calango 2,4 e 5.....                                       | 26 |
| Figura 13 - Circuito simulado conforme Calango 1. ....                                                             | 27 |
| Figura 14 - Circuito simulado conforme Calango 3. ....                                                             | 27 |
| Figura 15 - FFT de tensão da barra de 34,5kV na subestação Calangos 1,3.....                                       | 29 |
| Figura 16 - Sinal de tensão da barra de 34,5kV da subestação do Calangos 1,3. ....                                 | 29 |
| Figura 17 - Lista de distorções harmônicas individuais de tensão do sistema.....                                   | 30 |
| Figura 18 - THD de corrente na barra de 34,5kV da subestação Calangos 1,3. ....                                    | 31 |
| Figura 19 - Lista de percentual de distorção individual de corrente do sistema.....                                | 32 |
| Figura 20 - THD barra de 34,5kV sem a subestação Calangos 2,4 e 5.....                                             | 33 |
| Figura 21 - Lista de THD na barra de 34,5kV da subestação Calango 1,3 sem SE do Calango 2,4 e 5. ....              | 34 |
| Figura 22 - Filtro passivo sintonizado em 5ª ordem harmônica . ....                                                | 39 |
| Figura 23 - Filtro passivo sintonizado em 7ª ordem harmônica. ....                                                 | 41 |
| Figura 24 – FFT de tensão após a implementação do filtro de 5ª ordem .....                                         | 42 |
| Figura 25 - Lista de percentuais individuais de tensão após instalação do filtro de 5ª ordem .....                 | 43 |
| Figura 26 - FFT de corrente da barra instalada o filtro de 5ª ordem .....                                          | 44 |
| Figura 27 - Lista das distorções individuais de corrente após instalação do filtro de 5ª ordem harmônica.....      | 45 |
| Figura 28 - Ondas de tensão e corrente na barra da subestação após a instalação do filtro de 5ª ordem. ....        | 46 |
| Figura 29 - FFT de tensão na barra de 34,5kV da Subestação do Calango 1,3 com o filtro de 7ª ordem harmônica ..... | 47 |
| Figura 30 - Valores individuais de distorção de tensão após instalação do filtro de 7ª ordem harmônica.....        | 47 |
| Figura 31 - FFT de corrente da barra de 34,5kV onde será instalado o filtro de 7ª ordem harmônica.....             | 48 |
| Figura 32 - FFT da barra de 34,5kV da Subestação do Calangos 1,3 com os 2 filtros de 5ª e 7ª ordens.....           | 49 |
| Figura 33 - Lista de distorções harmônicas individuais de tensão após a implementação dos 2 filtros .....          | 50 |
| Figura 34 - FFT de corrente na barra após a implementação dos filtros de 5ª e 7ª ordens harmônicas.....            | 51 |
| Figura 35 - Tensão e corrente na barra de 34,5kV após a implementação dos filtros harmônicos projetados.....       | 51 |
| Figura 36 - Resposta do sistema sem banco de capacitores e sem filtros .....                                       | 53 |
| Figura 37 - Ângulo da impedância do sistema sem BC's e sem filtros .....                                           | 53 |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 38 - Resposta do sistema sem BC do Calangos 1,3 .....                            | 54 |
| Figura 39 - Resposta do ângulo da impedância do sistema sem BC do Calangos 1,3.54       |    |
| Figura 40 - Resposta em frequência sem o BC da subestação do Calangos 2,4 e 5 ..        | 55 |
| Figura 41 - THD de corrente na barra de 34,5kV sem BC da SUB Calangos 2,4 e 5..         | 55 |
| Figura 42 - Ângulo da impedância sem a BC da subestação do Calangos 2,4 e 5 .....       | 56 |
| Figura 43 - Resposta em frequência do sistema completo sem carga .....                  | 57 |
| Figura 44 - Ângulo da impedância da resposta em frequência do sistema completo ..       | 57 |
| Figura 45 - Resposta em frequência referente ao caso 5.....                             | 58 |
| Figura 46 - Ângulo da impedância referente ao caso 5.....                               | 58 |
| Figura 47 - Resposta em frequência referente ao caso 6.....                             | 59 |
| Figura 48 - Ângulos das impedâncias referentes ao caso 6 .....                          | 60 |
| Figura 49 - Resposta em frequência correspondente ao caso 7 .....                       | 61 |
| Figura 50 - Ângulos das respostas em frequência referentes ao caso 7 .....              | 61 |
| Figura 51 - Resposta em frequência referente ao caso 8.....                             | 62 |
| Figura 52 - Lista de distorção de corrente harmônica individual para o caso 8 .....     | 62 |
| Figura 53 - Ângulo da impedância do sistema equivalente ao caso 8 .....                 | 63 |
| Figura 54 - Resposta em frequência referente ao caso 9.....                             | 63 |
| Figura 55 - Lista de distorções harmônicas ocorridas após a instalação dos filtros..... | 64 |
| Figura 56 - Ângulo da resposta em frequência do sistema para o caso 9 .....             | 65 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela I - Capacidade conexão subestação Lagoa Nova II em 2016.....                                    | 14 |
| Tabela II - Parâmetros dos transformadores (Valores base: 100 MVA, tensão nominal do equipamento)..... | 20 |
| Tabela III - Linhas e cabos (Base: 100 MVA e tensão nominal).....                                      | 20 |
| Tabela IV - Nível de curto em Lagoa Nova 230 kV .....                                                  | 22 |
| Tabela V - Equivalentes elétricos – Lagoa Nova 230 kV.....                                             | 22 |
| Tabela VI - Nível de curto máximo no barramento de 34,5 kV da sub Calango 1,3.....                     | 23 |
| Tabela VII - Nível de curto mínimo no barramento de 34,5 kV da sub Calango 1,3. ...                    | 23 |
| Tabela VIII - Valores utilizados no cálculo os parâmetros do filtro de 5ª ordem .....                  | 38 |
| Tabela IX - Parâmetros especificados para filtro sintonizado em 294 Hz. ....                           | 39 |
| Tabela X - Valores utilizados no cálculo os parâmetros do filtro de 7ª ordem. ....                     | 40 |
| Tabela XI - Parâmetros especificados para filtro sintonizado em 414 Hz. ....                           | 41 |
| Tabela XII – Situações simuladas as respostas em frequência do sistema.....                            | 51 |

## **Siglas**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BIG – Banco de Informações de Geração

BC – Banco de Capacitores

BDCC – Base de Dados para Curto Circuito

CGE's – Centrais Geradoras Eólicas

DHT – Distorção Harmônica Total

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FFT – Fast Fourier Transformer

ICG – Instalação de transmissão de interesse exclusivo de Centrais de Geração para conexão compartilhada.

LER – Leilão de Energia de Reserva

LFA – Leilão de Fontes Alternativas

MME – Ministério de Minas e Energia

NBR – Norma Brasileira

ONS – Operador Nacional do Sistema elétrico

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica

SE – Subestação

SIN – Sistema Interligado Nacional

THD – Total Harmonic Distortion

## Sumário

|        |                                                                                                                                  |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | INTRODUÇÃO.....                                                                                                                  | 13 |
| 2.     | DESCRIPTIVO DO EMPREENDIMENTO EÓLICO A SER ANALISADO .....                                                                       | 14 |
| 2.1.   | Complexo do Calango 1, 2, 3, 4 e 5 .....                                                                                         | 15 |
| 2.2.   | Subestação do Calango 1 .....                                                                                                    | 17 |
| 3.     | IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE E ESTUDOS<br>PERTINENTES .....                                                        | 19 |
| 3.1.   | Fonte de Alimentação e circuito equivalente .....                                                                                | 19 |
| 3.1.1. | Nível de CC na barra de 34,5kV da SE do Calango 1,3 .....                                                                        | 19 |
| 3.2.   | Subestação Lagoa Nova II – 230/69kV .....                                                                                        | 24 |
| 3.3.   | Subestação Calango 1,3 – SE 69/34,5kV .....                                                                                      | 25 |
| 3.4.   | Subestação Calango 2,4 e 5 – SE 69/34,5kV .....                                                                                  | 25 |
| 3.5.   | Parques Eólicos Calangos 1 ao 5.....                                                                                             | 26 |
| 4.     | RESULTADOS PRIMÁRIOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....                                                                          | 28 |
| 4.1.   | Análise do sistema a plena carga.....                                                                                            | 28 |
| 4.2.   | Análise do sistema operando apenas com os Paques Calangos 1 e 3<br>conectados.....                                               | 33 |
| 5.     | ESPECIFICAÇÃO DE FILTROS HARMÔNICOS SINTONIZADOS EM UMA<br>FREQUÊNCIA.....                                                       | 35 |
| 5.1.   | Cálculos realizados para especificação dos filtros.....                                                                          | 35 |
| 5.1.1. | Especificação do filtro de 5ª ordem .....                                                                                        | 36 |
| 5.1.2. | Especificação do filtro de 7ª ordem .....                                                                                        | 39 |
| 5.2.   | Resultados das simulações após a implementação dos filtros .....                                                                 | 41 |
| 5.2.1. | Caso implementando o filtro de 5ª ordem harmônica.....                                                                           | 41 |
| 5.2.2. | Caso implementando o filtro de 7ª ordem harmônica.....                                                                           | 45 |
| 5.2.3. | Caso implementando os dois filtros de 5ª e 7ª ordem harmônica ...                                                                | 48 |
| 6.     | ESTUDOS ADICIONAIS: ANÁLISE DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DO<br>SISTEMA.....                                                       | 51 |
| 6.1.   | Caso 1 – Sistema sem BC's e filtros.....                                                                                         | 52 |
| 6.2.   | Caso 2 – Sistema apenas com banco de capacitores da Subestação dos<br>Calangos 2,4 e 5.....                                      | 53 |
| 6.3.   | Caso 3 - Sistema apenas com banco de capacitores da Subestação dos<br>Calangos 1 e 3.....                                        | 54 |
| 6.4.   | Caso 4 – Sistema operando com os BC's das subestações do Calangos<br>1,3 e Calangos 2,4 e 5.....                                 | 55 |
| 6.5.   | Caso 5 - Sistema operando com filtro de 5ª ordem, sem BC de 6MVar em<br>Calangos 1,3 e com BC de 18MVar em Calangos 2,4 e 5..... | 56 |
| 6.6.   | Caso 5 - Sistema operando com filtro de 7ª ordem, sem BC de 6MVar em<br>Calangos 1,3 e com BC de 18MVar em Calangos 2,4 e 5..... | 58 |

|      |                                                                                                                     |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.7. | Caso 7 - Sistema operando com filtro de 5ª ordem, com BC de 6MVar em Calangos 1,3 e 18MVar em Calangos 2,4 e 5..... | 59 |
| 6.8. | Caso 8 - Sistema operando com filtro de 7ª ordem, com BC de 6MVar em Calangos 1,3 e 18MVar em Calangos 2,4 e 5..... | 61 |
| 6.9. | Caso 9 – Sistema operando com filtros de 5ª e 7ª ordens e BC de 18MVar em Calangos 2,4 e 5.....                     | 62 |
| 7.   | CONCLUSÃO .....                                                                                                     | 65 |
| 8.   | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                                                                     | 66 |

# 1. INTRODUÇÃO

Mediante a busca de fontes alternativas de energia, visando atender as necessidades da matriz energética brasileira, altos investimentos vêm sendo realizados pela iniciativa privada e por agentes governamentais. Neste contexto, várias empresas vêm investindo constantemente no nordeste brasileiro. A região já comporta cerca de mais de 7% da detenção da geração de energia elétrica no Brasil, conforme o relatório do plano decenal de aumento da geração de energia elétrica do EPE (Empresa de Pesquisa Energética). A energia eólica já não é considerada uma fonte marginal no Brasil, a mesma é responsável por 12GW de potência instalada, havendo mais 4 GW entre já contratados e em construção até 2020 [1 - 3].

Com o aumento dessa categoria de geração no Brasil, faz-se necessário estudos relacionados aos impactos à qualidade da energia mediante as inserções desses parques eólicos ao sistema interligado nacional brasileiro.

Após a concessão de um parque, por meio de um leilão, a concessionária ganhadora prossegue com os recursos necessários para que o mesmo esteja em operação no prazo estipulado pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Nos estudos de acessos dos parques eólicos, são requeridas simulações computacionais, principalmente no que se refere às distorções harmônicas e flutuação de tensão a fim de identificar possíveis problemas futuros. Nos mesmos, devem ser avaliados diversos casos de operação com e sem contingências da rede em que o sistema será conectado. Conforme a avaliação de tais estudos de acesso, conclui-se as necessidades pendentes para a conexão do parque eólicos no ponto de acoplamento comum ao sistema interligado. Diante das conclusões apresentadas nos estudos, medidas para mitigações de possíveis problemas são propostas e devem ser implementadas a partir da conexão do parque.

Neste trabalho, são realizadas simulações onde o parque em estudo já se encontra em operação, serão analisados possíveis problemas de distorções harmônicas na barra de conexão, logo, o intuito deste trabalho é oferecer uma solução mitigatória para eventuais problemas de qualidade da energia, mais precisamente focada na temática das distorções harmônicas.

## 2. DESCRITIVO DO EMPREENDIMENTO EÓLICO A SER ANALISADO

Em agosto de 2010, a Neoenergia ingressou no segmento de fontes alternativas e, em conjunto com a Iberdrola Renováveis do Brasil, conquistou no 2º Leilão de Fontes Alternativas promovido pela ANEEL, os contratos de venda de energia de nove parques eólicos (capacidade instalada total de 258 MW). Os parques foram construídos na região Nordeste, sendo dois no estado da Bahia (Caetité 2 e Caetité 3) e sete no estado do Rio Grande do Norte (Arizona 1, Calango 1, Calango 2, Calango 3, Calango 4, Calango 5 e Mel 2). Também em parceria com a Iberdrola, a Neoenergia, construiu na Bahia seu décimo Parque Eólico (Caetité 1) com capacidade de 30 MW, totalizando 288 MW de capacidade instalada em recursos eólicos.

Com base no Relatório de Demonstrações Financeiras da Neoenergia [4], em setembro de 2013 os Parques Eólicos Calango 1, Calango 2, Calango 3, Calango 4 e Calango 5 tiveram suas obras concluídas e estavam “Aptos a Operação Comercial” desde 01 de setembro de 2013 através dos Despachos ANEEL nº 3313, 3314, 3315, 3316, 3317/2013. Estes empreendimentos continuaram sem poder iniciar o estado operacional comercial imediato devido a atrasos na construção dos sistemas de transmissão. A disponibilidade da conexão estava prevista para o segundo semestre de 2015, porém só foram concluídas as obras referentes a linha de transmissão em 230kV para conexão dos parques subestação da Lagoa Nova II em abril de 2016. Segue na Tabela I os parques conectados a subestação que tinha capacidade de 300MW em 2016.

Tabela I - Capacidade conexão subestação Lagoa Nova II em 2016.

|    | USINA                | POTENCIA     | MUNICÍPIO      | CONEXÃO       |
|----|----------------------|--------------|----------------|---------------|
| 01 | CALANGO I            | 30,00        | BODÓ           | SE LAGOA NOVA |
| 02 | CALANGO II           | 30,00        | BODÓ           | SE LAGOA NOVA |
| 03 | CALANGO III          | 30,00        | BODÓ           | SE LAGOA NOVA |
| 04 | CALANGO IV           | 30,00        | BODÓ           | SE LAGOA NOVA |
| 05 | CALANGO V            | 30,00        | BODÓ           | SE LAGOA NOVA |
| 06 | PELADO               | 20,00        | BODÓ           | SE LAGOA NOVA |
| 07 | SERRA DE SANTANA III | 29,00        | BODÓ           | SE LAGOA NOVA |
| 08 | SERRA DE SANTANA I   | 19,8         | LAGOA NOVA     | SE LAGOA NOVA |
| 09 | SERRA DE SANTANA II  | 28,8         | LAGOA NOVA     | SE LAGOA NOVA |
| 10 | LANCHINHA            | 28,8         | TEN LAURENTINO | SE LAGOA NOVA |
|    | <b>TOTAL</b>         | <b>275,4</b> |                |               |

A análise de distorções harmônicas do sistema ocorrerá na barra de baixa tensão da subestação do Calango 1 que interliga os complexos do CLG 1 e 3, detentores de 30 aerogeradores de 2MW cada, gerando 60MW no total.

## **2.1. Complexo Eólico de Calango 1, 2, 3, 4 e 5.**

O complexo do Calango é formado por 5 parques eólicos, sendo formados por 15 aerogeradores cada. As CGE's – Centrais Geradores Eólicas do Calango 1, 2 e 5 são formadas por aerogeradores G87 da Gamesa, cada uma com potência de 2MW. As CGE's do Calango 3 e 4 são formados por aerogeradores G90 da Gamesa com potência de 2MW também. No total, são 150MW de potência nominal produzidas pelo complexo do Calango 1 ao 5.

No diagrama unifilar da Figura 1, retirado do estudo para dimensionamento das ICG's - Instalação de transmissão de interesse exclusivo de centrais de geração para conexão compartilhada, referentes ao LFA – Leilão de fontes alternativas e LER – Leilão de Energia de Reserva de 2010, nos estados do Ceará, Rio Grande de Norte e Bahia [5] disponibilizado no EPE pelo MME – Ministério de Minas e Energia, são pertinentes todos os dados de expansão até 2020. De acordo com a Figura 1, na saída do aerogerador em 690V é elevada a tensão em uma subestação elevadora para 34,5kV e transmitadas para outra subestação elevadora contemplando primeiramente os CGE's do Calango 2,4 e 5 e outra subestação elevadora contemplando os CGE's 1 e 3, onde serão analisados o fluxo das distorções harmônicas.

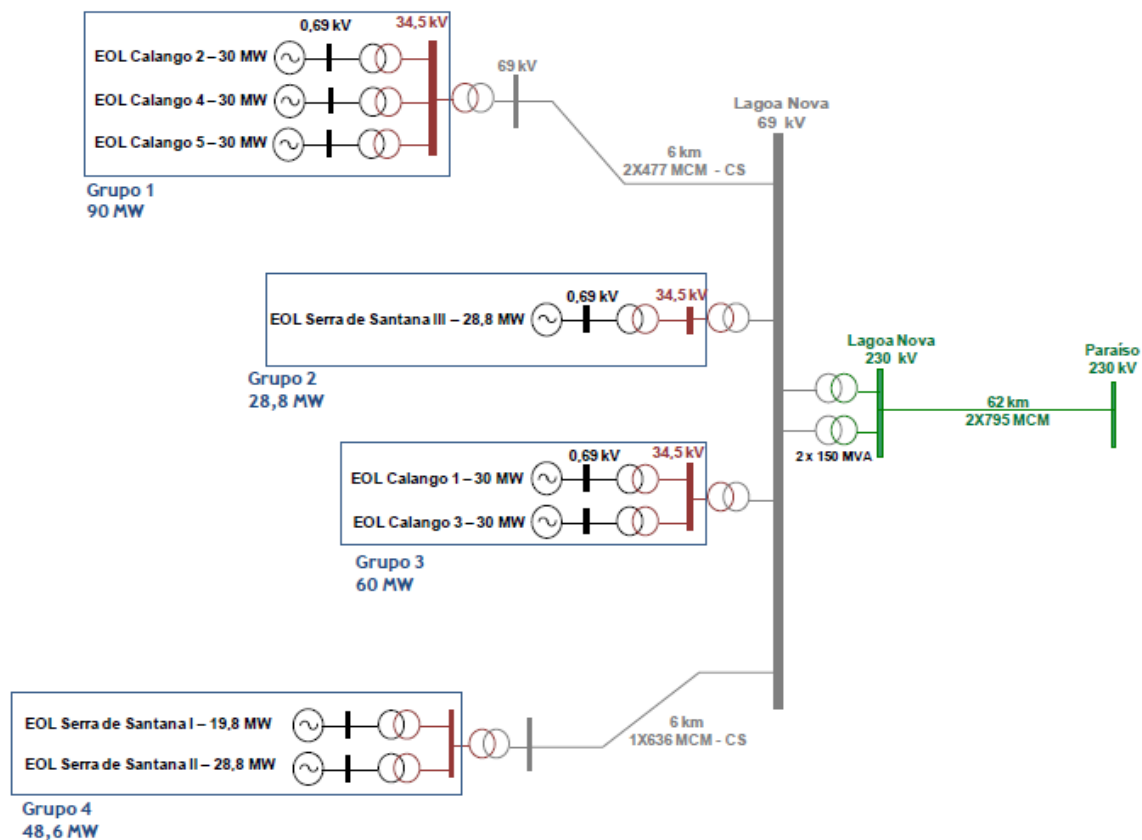


Figura 1 - Diagrama elétrico das CGE's ligadas na subestação LN II

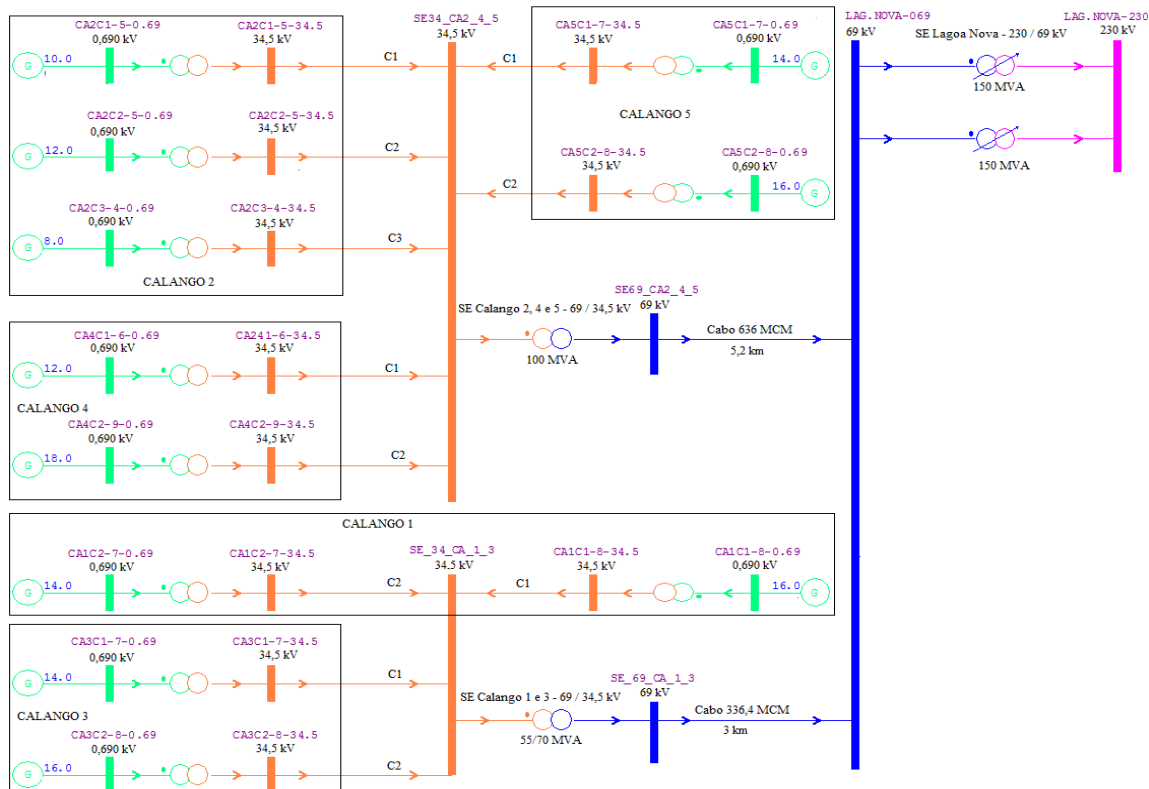


Figura 2 - Diagrama unifilar CGE's Calango 1 ao 5.

## 2.2. Subestação de Calango 1

Na subestação do Calango 1 estão conectados os complexos do Calango 1 e 3, conforme relatado anteriormente, a análise das distorções harmônicas ocorrerá na barra de baixa tensão da subestação que conforme a Figura 3 abaixo, pelo mapa dinâmico do SIN disponível no site da ONS, tem potência instalada de 70MW.

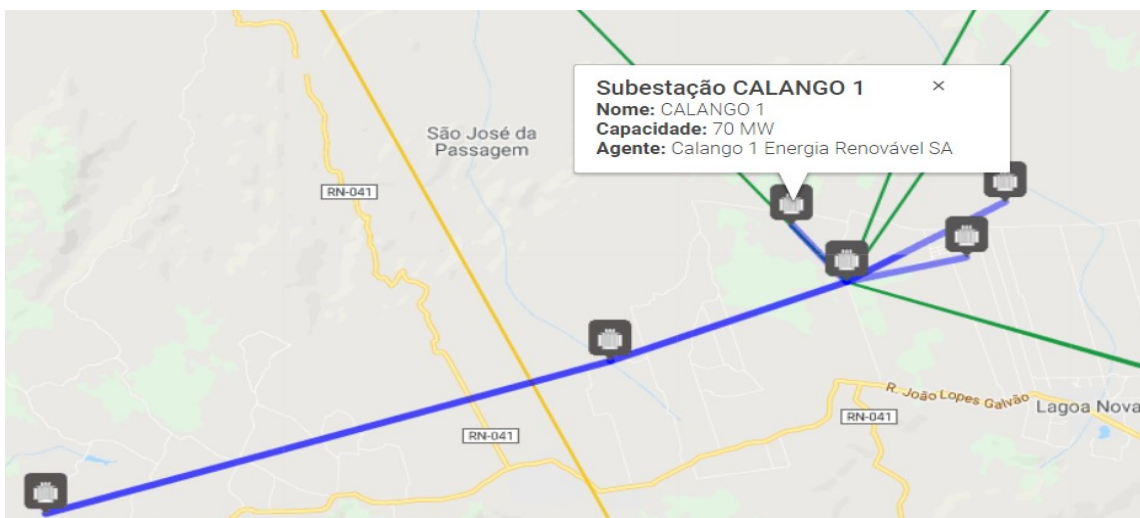


Figura 3 - Subestação do Calango 01 - Mapa dinâmico ONS

A subestação do Calango 1 é conectada a subestação da Lagoa Nova II por meio de uma linha de transmissão de 3km conforme Figura 4, a subestação da Lagoa Nova II atualmente possui capacidade de 450MW conforme a Figura 5, ambas retiradas do site da ONS.



Figura 4 - Linha de transmissão subestações Calango 1 e Lagoa Nova II

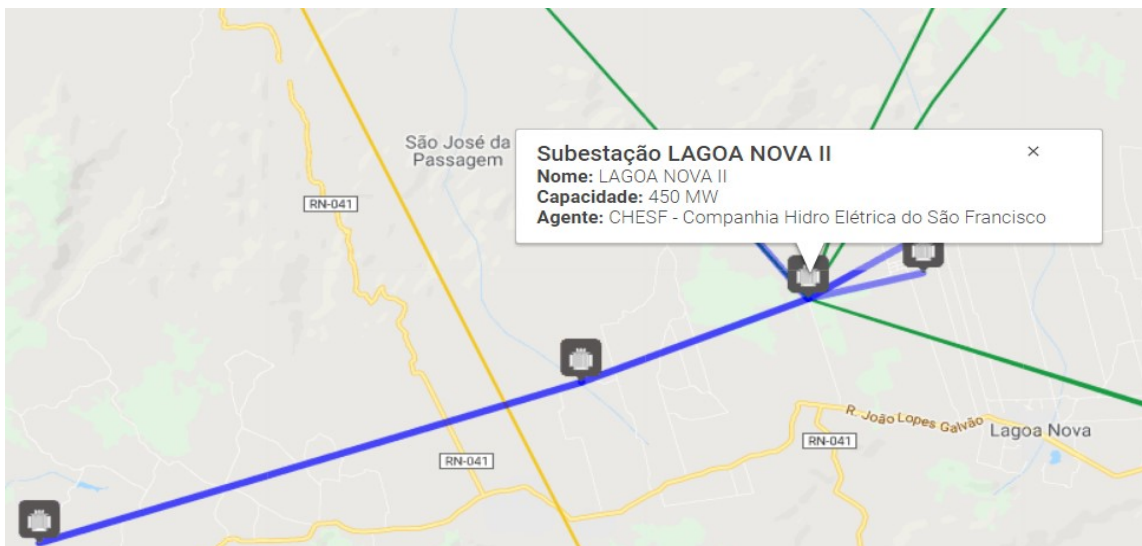


*Figura 5 - Subestação da Lagoa Nova II*

Houve um aumento da capacidade da subestação da Lagoa Nova II, conforme exposto anteriormente em 2016 a capacidade da mesma era de 300MW. No site da empresa Taesa responsável pela ampliação, foram encontradas a Figura 6 que segue da subestação em construção.



*Figura 6 - Foto da subestação da Lagoa Nova II em construção*

### 3. IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE E ESTUDOS PERTINENTES

#### 3.1. Representação do circuito equivalente

Afim de não influenciar nas simulações, foi utilizada uma fonte ideal com impedância representativa de curto circuito para simulação conforme a Figura 7, com tensão de 230kV/60Hz, obter-se a o valor da impedância equivalente vista da barra de 230kV da SE da Lagoa Nova II.

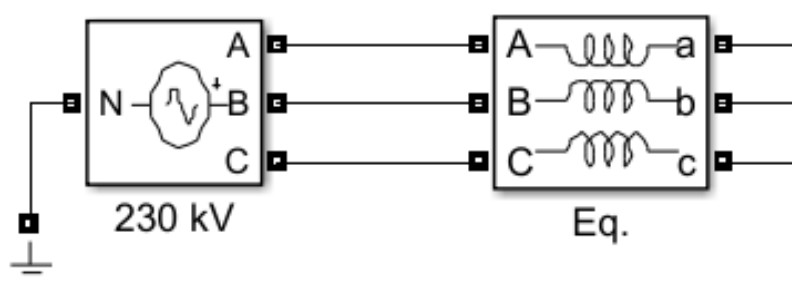


Figura 7 - Fonte de alimentação e bloco de impedância equivalente do circuito utilizados na simulação.

Para obter o valor da impedância vista da barra de 230kV, foram considerados os equivalentes elétricos do sistema de transmissão obtidos por meio do *software* ANAFAS (Programa de Análise de Faltas Simultâneas), versão 6.5, do CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

##### 3.1.1. Nível de CC na barra de 34,5kV da SE do Calango 1,3

A base de dados utilizada para a obtenção dos equivalentes elétricos conectados ao barramento da subestação da Lagoa Nova 230 kV é a “Base de Dados para Estudos de Curto Circuito – BDCC” [6], a qual foi disponibilizada pela EPE em 15 de setembro de 2017, relativa ao período 2018-2026.

De acordo com a Base de Dados do EPE, obter-se a os valores na barra de 230kV. De posse dos mesmos, em consonância com todos os dados do sistema até as subestações dos parques, obter-se a o nível de curto circuito na barra de 34,5kV da subestação do Calango 1,3. Vale ressaltar que para aferição

de tais valores, foi considerado que os aerogeradores existentes no parque eólico não contribuem para correntes de curto no sistema, estando, portanto, desligados nas simulações computacionais como segue na Figura 8 o circuito simulado.

Fundamentado nos dados de [6], conforme a Tabela II, seguem os valores das impedâncias dos transformadores das subestações do sistema. Na Tabela III, seguem os dados das linhas de transmissão e dos cabos de distribuição do sistema que foram utilizadas na simulação conforme a Figura 8.

*Tabela II - Parâmetros dos transformadores (Valores base: 100 MVA e tensão nominal do equipamento)*

| <b>Transformador</b>        | <b>T1</b> | <b>T2</b> | <b>T3</b> | <b>T4</b>  | <b>T5</b>  | <b>Ta</b>    |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|--------------|
| <b>Potência nominal</b>     | 150 MVA   | 150 MVA   | 150 MVA   | 100 MVA    | 70 MVA     | 2,35 MVA     |
| <b>Tensão nominal</b>       | 230/69 kV | 230/69 kV | 230/69 kV | 69/34,5 kV | 69/34,5 kV | 34,5/0,69 kV |
| <b>Reatância percentual</b> | 8,8%      | 8,8%      | 8,8%      | 12,5%      | 12,5%      | 493,61%      |
| <b>Conexão</b>              | DYn       | DYn       | DYn       | DYn        | DYn        | DYn          |

*Tabela III - Linhas e cabos (Base: 100 MVA e tensão nominal)*

| <b>Linha/cabo</b> | <b>Tensão nominal (kV)</b> | <b>R1(%)</b> | <b>X1(%)</b> | <b>B1(%)</b> | <b>R0(%)</b> | <b>X0(%)</b> | <b>B0(%)</b> |
|-------------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| LT1               | 69                         | 1,113        | 4,882        | 0,092        | 3,054        | 18,557       | 0,051        |
| LT2               | 69                         | 1,198        | 2,906        | 0,051        | 2,318        | 10,795       | 0,029        |
| C1                | 34,5                       | 3,053        | 4,562        | 0,633        | -            | -            | -            |
| C2                | 34,5                       | 1,139        | 2,000        | 0,324        | -            | -            | -            |
| C3                | 34,5                       | 0,657        | 1,153        | 0,187        | -            | -            | -            |
| C4                | 34,5                       | 0,228        | 0,400        | 0,065        | -            | -            | -            |
| C5                | 34,5                       | 2,978        | 3,539        | 0,491        | -            | -            | -            |
| C6                | 34,5                       | 1,842        | 2,752        | 0,382        | -            | -            | -            |
| C7                | 34,5                       | 2,681        | 3,186        | 0,442        | -            | -            | -            |
| C8                | 34,5                       | 0,901        | 1,581        | 0,256        | -            | -            | -            |
| C9                | 34,5                       | 1,493        | 2,621        | 0,425        | -            | -            | -            |
| C10               | 34,5                       | 0,874        | 1,543        | 0,249        | -            | -            | -            |
| C11               | 34,5                       | 0,201        | 0,353        | 0,057        | -            | -            | -            |

Vale ressaltar que a resistência percentual dos transformadores fora considerada como 2% da sua reatância percentual. E para os casos em que não apresentaram informações das impedâncias percentuais de sequência zero dos cabos, adotou-se este parâmetro como sendo cinco vezes os valores de sequência positiva.

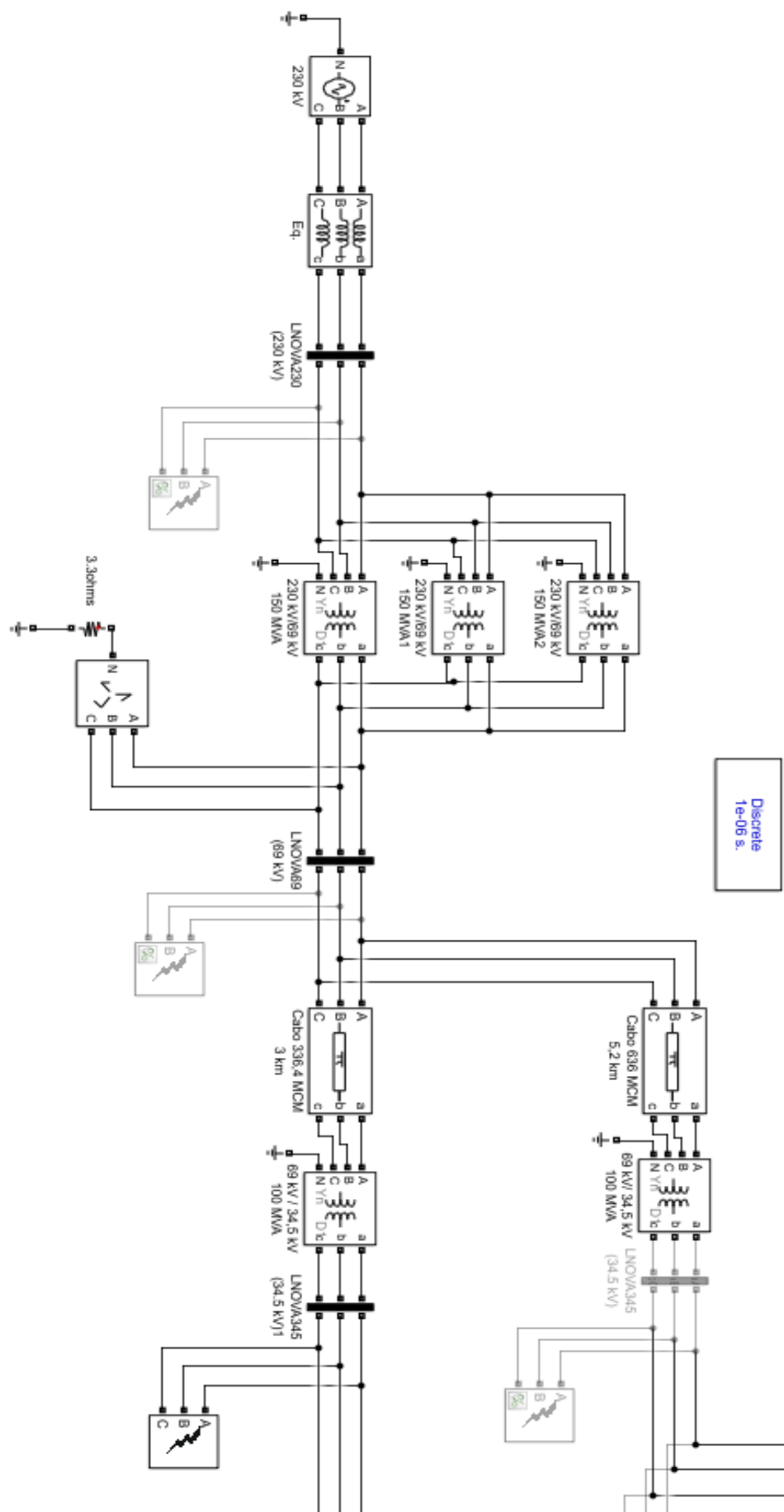


Figura 8 - Circuito simulado para obtenção da potência de curto circuito na barra de 34,5kV da SE Calango 1,3.

Mediante os dados do ANAFAS, considerando os níveis de curtos máximos e mínimos, tais dados são obtidos mediante contingências no sistema e/ou variações de carregamento do sistema. Conforme as simulações e/ou modificações do sistema, como aumento das subestações e das usinas geradoras, os valores se alteram. Para análise do sistema, foram considerados os níveis máximos e mínimos como seguem nas Tabelas IV e V.

*Tabela IV - Nível de curto em Lagoa Nova 230 kV*

| Nível de curto | Ano  | Trifásico (kA)       | Monofásico (kA)      | Bifásico-terra (kA) |
|----------------|------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Máximo         | 2019 | 8,77 $\angle$ -82,75 | 9,98 $\angle$ -83,93 | 9,76 $\angle$ 43,55 |
| Mínimo         | 2018 | 2,94 $\angle$ -80,91 | 3,96 $\angle$ -81,70 | 4,04 $\angle$ 57,73 |

*Tabela V - Equivalentes elétricos – Lagoa Nova 230 kV*

| Nível de curto | Ano  | Impedância de sequência positiva (pu) | Impedância de sequência negativa (pu) |
|----------------|------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Máximo         | 2019 | 0,0286 $\angle$ 82,75                 | 0,0183 $\angle$ 87,62                 |
| Mínimo         | 2018 | 0,0854 $\angle$ 80,94                 | 0,0194 $\angle$ 88,38                 |

Os valores obtidos nas Tabelas IV e V são considerados com uma base de potência de 100MVA e tensão base de 230kV. De posse dessas informações, foram realizadas as simulações, como já ressaltado, com os parques eólicos desconectados do sistema. Mediante os valores de Impedâncias de sequência positiva e negativa, foram realizadas as simulações de acordo com o bloco de impedância equivalente. Os valores de entrada, como apresentado pela Figura 9 são unidades de medidas em  $\Omega$  (Ohms) e H(Henry), para tal transformação, mediante os dados modulares e angulares, com os valores em pu, foram realizados os cálculos das equações 1 a 4.

De acordo com as equações 1 e 2 apresentadas a seguir, em conforme com os valores da Tabela V, é possível obter os valores das resistências e indutâncias equivalentes do sistema para simulação dos casos de curto mínimo e máximo, tanto para sequência positiva, conforme equações 1 e 2, quanto para sequência zero, nas equações 3 e 4.

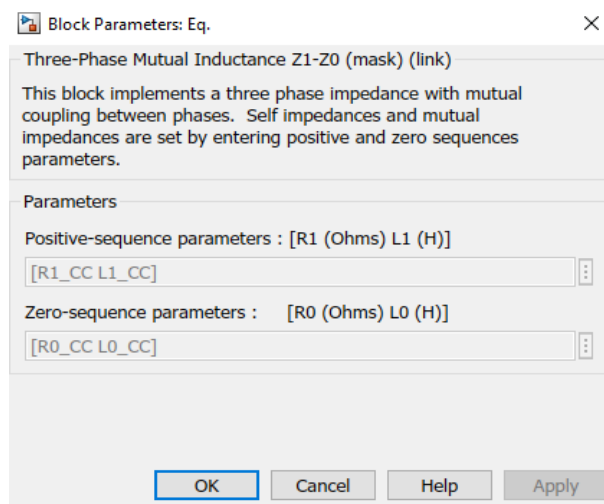


Figura 9 - Parametrização do bloco de Indutância.

$$R_{1CC} = \left( Z_{mod_{1cc}} * \cos\left(\frac{2\pi}{180} * Z_{ang_{1cc}}\right) \right) * Z_{base} \quad (1)$$

$$L_{1CC} = \frac{\left( Z_{mod_{1cc}} * \sin\left(\frac{2\pi}{180} * Z_{ang_{1cc}}\right) \right) * Z_{base}}{2\pi * 60} \quad (2)$$

$$R_{0CC} = \left( Z_{mod_{0cc}} * \cos\left(\frac{2\pi}{180} * Z_{ang_{0cc}}\right) \right) * Z_{base} \quad (3)$$

$$L_{0CC} = \frac{\left( Z_{mod_{0cc}} * \sin\left(\frac{2\pi}{180} * Z_{ang_{0cc}}\right) \right) * Z_{base}}{2\pi * 60} \quad (4)$$

De posse dessas informações, as Tabelas VI e VII apresentam, respectivamente, os resultados de simulações computacionais para as correntes de curto máximo e mínimo no barramento de 34,5 kV da subestação Calango 1,3 69/34,5 kV.

Tabela VI - Nível de curto máximo no barramento de 34,5 kV da subestação Calango 1,3.

| Tipo de curto  | Corrente (A) | Potência (MVA) |
|----------------|--------------|----------------|
| Trifásico      | 14.290,00    | 853,91         |
| Monofásico (A) | -            |                |

Tabela VII - Nível de curto mínimo no barramento de 34,5 kV da subestação Calango 1,3.

| Tipo de curto  | Corrente (A) | Potência (MVA) |
|----------------|--------------|----------------|
| Trifásico      | 5.821,00     | 347,84         |
| Monofásico (A) | -            |                |

Com base nos dados relatados nas Tabelas VI e VII, podemos verificar a importância dos mesmos, para a realização dos estudos característicos as análises do FFT - Fast Fourier Transformer nas simulações para verificação do THD - Total Harmonic Distortion afim de identificar a necessidade de instalação de filtros harmônicos.

### 3.2. Subestação Lagoa Nova II – 230/69kV

A subestação da Lagoa Nova II é formada por 3 transformadores idênticos em paralelo com potência de 150MVA cada. A subestação elevadora, possui uma barra de alta conexão de 230kV e na barra de baixa 69kV. As impedâncias percentuais foram retiradas do relatório do BDCC do EPE [6], conforme foram citadas na Tabela II, com a designação de T1, T2 e T3. Os transformadores são idênticos com reatâncias percentuais de 8%.

De acordo com a Figura 8 e a Tabela I, conseguimos verificar no gráfico do SIN – Sistema Interligado Nacional, a potência instalada atualmente. Na Tabela I, estão consideradas as instalações até 2017. Conforme a demanda aumenta serão adicionados novos transformadores, de acordo com o estudo de ampliação da EPE, será adicionado um novo transformador de 150MVA para operar em paralelo com T1, T2 e T3. Na Figura 10 é verificado o arranjo da subestação da Lagoa Nova II utilizado para as simulações. Os mesmos possuem conexão delta-estrela aterrado com a reatância percentual já mencionada de 8%.

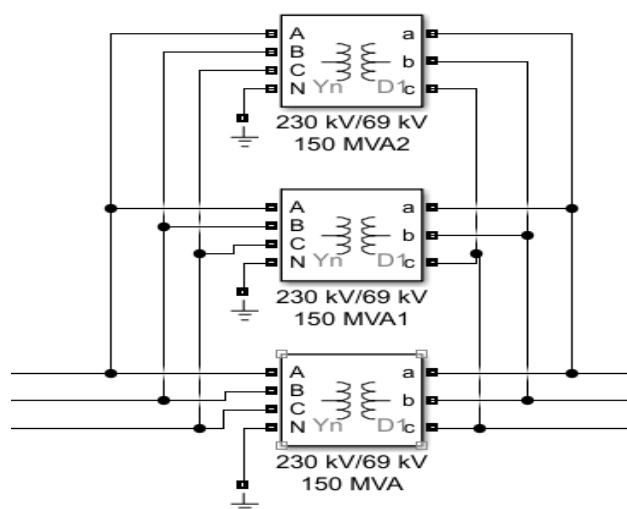


Figura 10 - Arranjo da subestação da Lagoa Nova II.

### 3.3. Subestação Calango 1,3 – 69/34,5kV

Na Figura 11 é verificado o arranjo do sistema da barra de baixa de 69kV da subestação da Lagoa Nova II até a subestação do Calango 1,3, onde se encontram os parâmetros do cabo de 336,4MCM de 3 km que conecta a alta do transformador. Considerando os dados do estudo da BDCC da EPE [6] já citado na Tabela III, o cabo é designado de C8 e o transformador de T5.

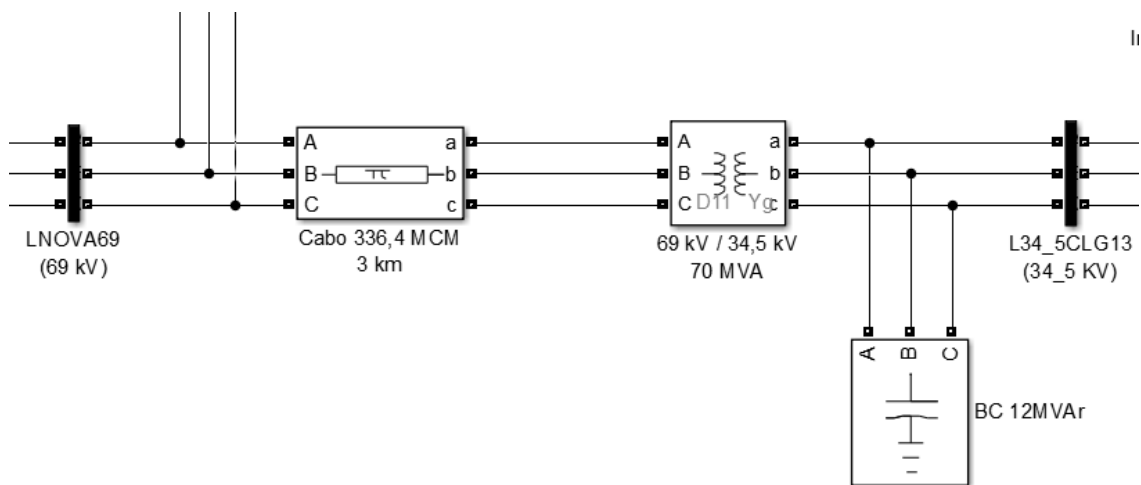


Figura 11 - Circuito simulador entre a barra da LN II e Calango 1,3.

Na Tabela III verifica-se o valor referente a impedância percentual do transformador, ora informado igual a 12,5%. Assim como, os valores da resistência, reatância indutiva e susceptância percentual do cabo de sequência positiva, como dito anteriormente, os valores de sequência zero foram considerados cinco vezes de sequência positiva.

Conforme verificado na Figura 11, o banco de capacitores se encontra instalado atualmente na barra da subestação, com potência reativa de 12MVar.

### 3.4. Subestação Calango 2,4 e 5 – 69/34,5kV

Na Figura 12 é verificado o arranjo do sistema da barra de baixa de 69kV da subestação da Lagoa Nova II até a subestação do Calango 2,4 e 5, onde se encontram os parâmetros do cabo de 636MCM de 5,2 km que conecta a alta do

transformador. Contudo os dados constam no estudo da BDCC da EPE [6], conforme a Tabela III, o cabo é designado de C4 e o transformador de T4.

Na Tabela III verificamos os valores referentes a impedância percentual do transformador, ora informado 12,5%. Assim como, os valores da resistência, reatância indutiva e susceptância percentual de sequência positiva do cabo C4, como dito anteriormente, os valores de sequência zero foram considerados cinco vezes de sequência positiva.

O banco de capacitores que se encontra instalado na barra de baixa da subestação do Calango 2,4 e 5 possui potência reativa de 18MVar.

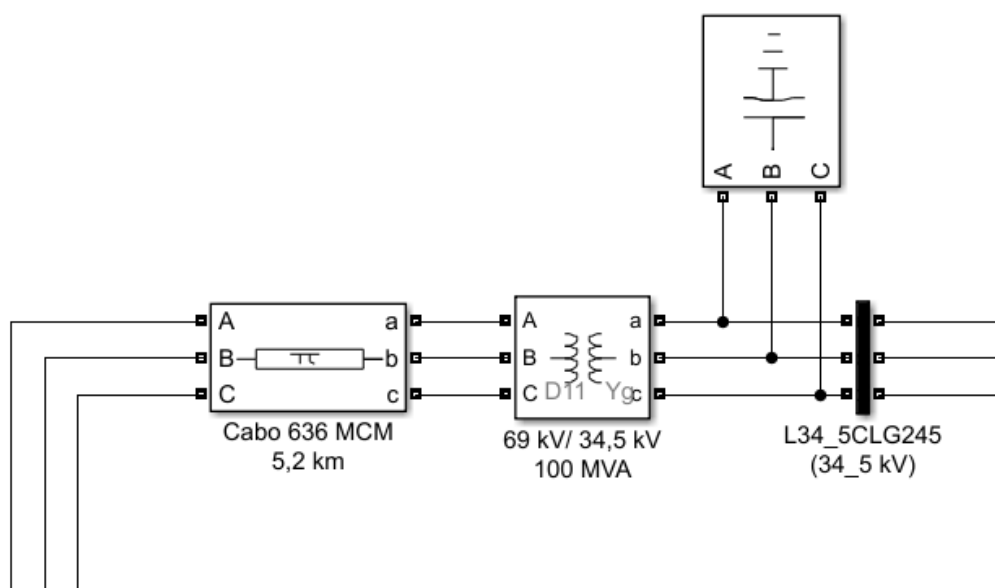


Figura 12 - Circuito simulador entre a barra da LN II e Calango 2,4 e 5.

### 3.5. Complexo Eólico de Calangos 1 ao 5

De acordo com as Figuras 13 e 14 verificamos os arranjos dos parques eólicos, sendo conforme relatado na seção 2.1 deste trabalho as características e o diagrama das usinas de geração eólica.

Conforme a Figura 13, foram utilizadas as informações da Tabela III para parametrização do sistema todo. Conforme os cabos de conexão, das subestações de 34,5/690kV dos parques, a reatância percentual adotada dos transformadores de todas CGE's é de 11,6%.

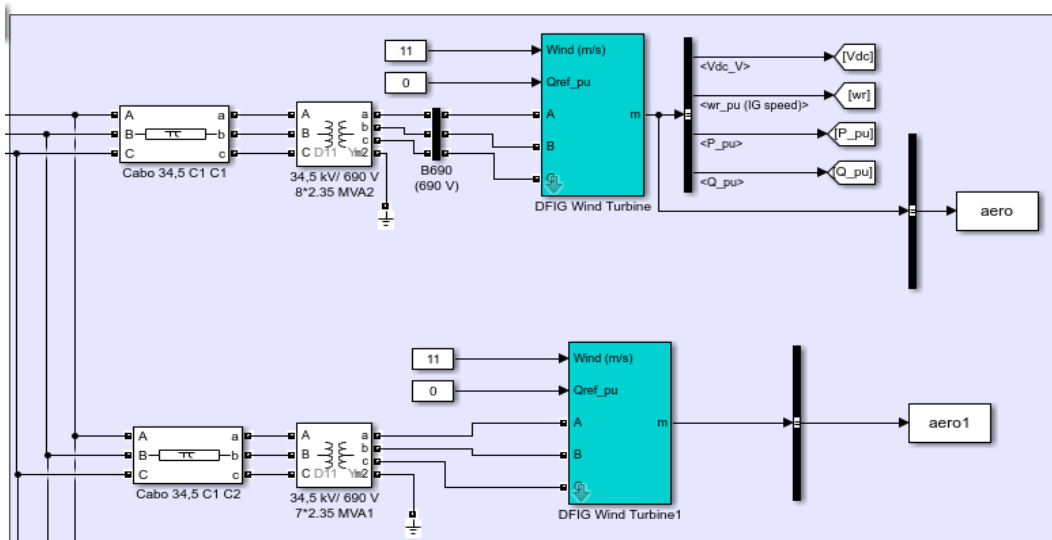


Figura 13 - Circuito simulado conforme Calango 1.

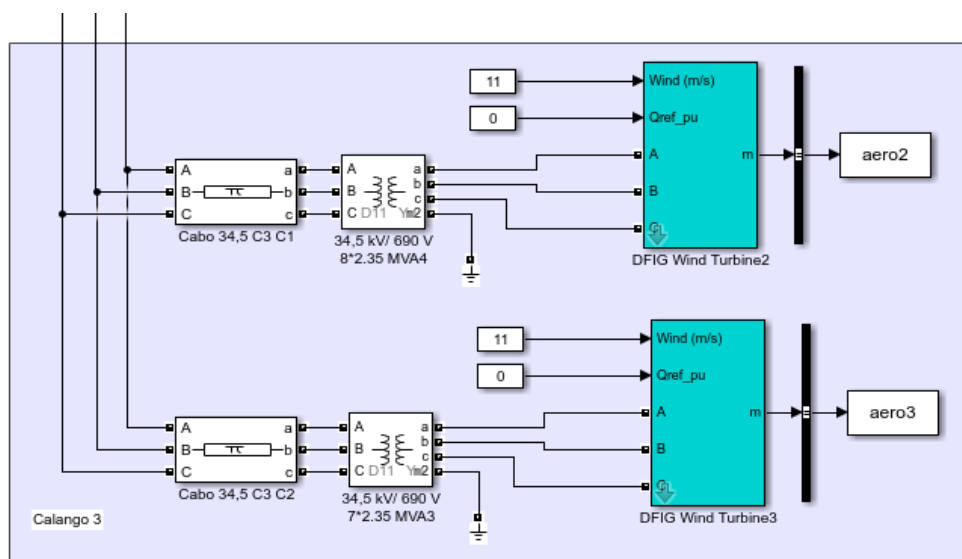


Figura 14 - Circuito simulado conforme Calango 3.

Vale ressaltar que os emuladores de aerogeradores, são do tipo DFIG (*Doubly-Fed Induction Generator*), ou seja, são geradores de indução duplamente excitados. Outra ressalva importante é considerar que os mesmos possuem em suas turbinas a velocidade constante de 11m/s do vento. Como trabalho futuro e afim de estreitar os resultados obtidos com os dados reais, seria interessante realizar as simulações aplicando diferentes velocidades de vento sob as turbinas, pois suas distâncias são consideráveis, logo, as velocidades aplicadas nas turbinas são diferentes, portanto circularam diferentes harmônicos no sistema, ocasionando diferentes resultados.

De maneira sucinta, visto que não é o objetivo deste trabalho, consideremos que o DFIG consiste em uma conexão da turbina por meio de engrenagens a uma máquina de indução com rotor bobinado alimentado por um conversor de potência de 6 pulsos, onde um conversor atua como retificador e o outro como um inversor. Logo, nas simulações as fontes de correntes são provenientes do chaveamento dos conversores, não sendo necessárias simulações inserindo fontes harmônicas, aproximando se da prática.

Os demais parques dos calangos 2,4 e 5 foram simulados de modo semelhante aos apresentados nas Figuras 13 e 14, sendo que os parâmetros modificados, foram apenas os referentes aos cabos de conexão das subestações de 34,5/0,69kV até a barra de 34,5kV da subestação do Calango 2,4 e 5. De modo que os valores dos cabos se encontram na Tabela III.

## **4. RESULTADOS PRIMÁRIOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS**

A princípio fez-se necessários estudos relacionados com a barra de conexão dos parques dos Calangos 1,3, que como fora passado anteriormente, se encontram conectados na barra de 34,5kV da subestação do Calango 1,3, conforme já descrito no tópico 2.2, complementarmente a Figura 3, que fora retirada do site da ONS. A detentora da subestação é a Calango 1 Energias Renováveis que por sua vez é de posse da Força Eólica do Brasil.

Para realização dos estudos, as simulações computacionais foram realizadas pelo *Matlab* como segue descrito no capítulo anterior. De modo a obtermos o DHT através da análise de FFT – *Fast Fourier Transform*, de modo a serem comparados com os valores limites dos Procedimentos de Rede [7 – 8].

### **4.1. Análise do sistema a plena carga**

A análise com o Complexo do Parque dos Calangos inteiro conectado, parte do ponto de operação real do sistema, onde atualmente, os mesmos se encontram em operação com capacidade de 150MW de potência nominal.

É possível observar pelo histograma apresentado na Figura 15, pela transformada rápida de Fourier, a barra possui uma distorção harmônica total de tensão de 4,23%, ou seja, conforme os limites individuais de distorção estabelecidos pelos Procedimentos de Rede através do submódulo 2.8 [7], o valor se encontra 1,23% acima do limite individual que é de 3%, utilizado para simulações.

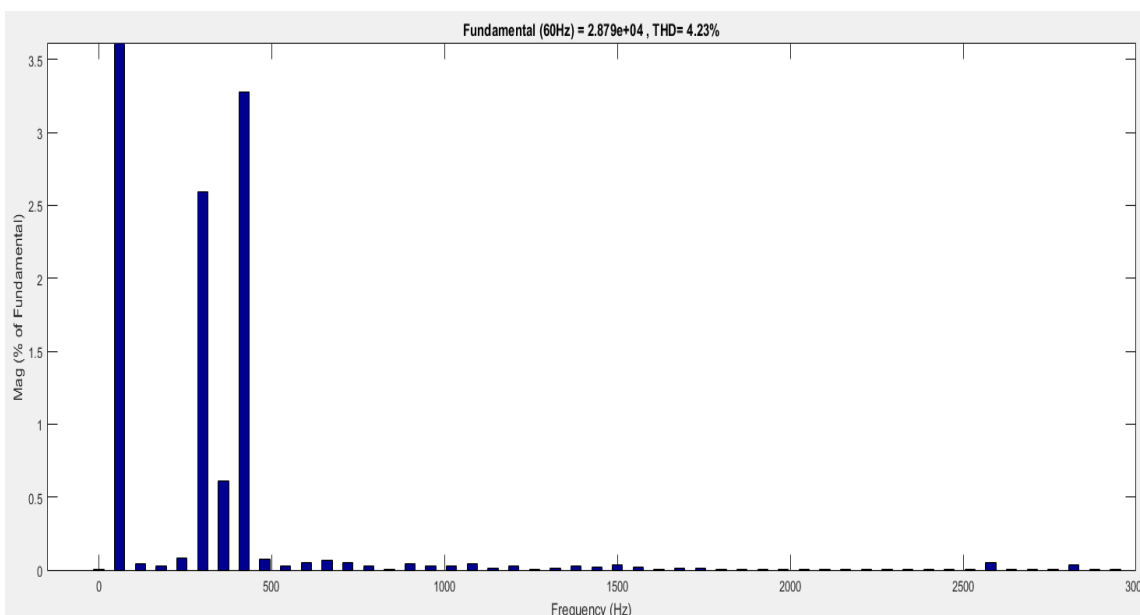


Figura 15 - FFT de tensão da barra de 34,5kV na subestação Calangos 1,3.

As simulações foram realizadas pelo período de 3 segundos, afim de passado o período transitório anteriormente aos 0,5 segundos. Vale a ressalva de que conforme ilustrado na Figura 16, se encontra em vermelho o período avaliado, sendo por um ciclo iniciando-se em 2,5 segundos, de modo a garantir que as medidas sejam realizadas em regime permanente, desconsiderando o período de energização dos transformadores e linhas do sistema.

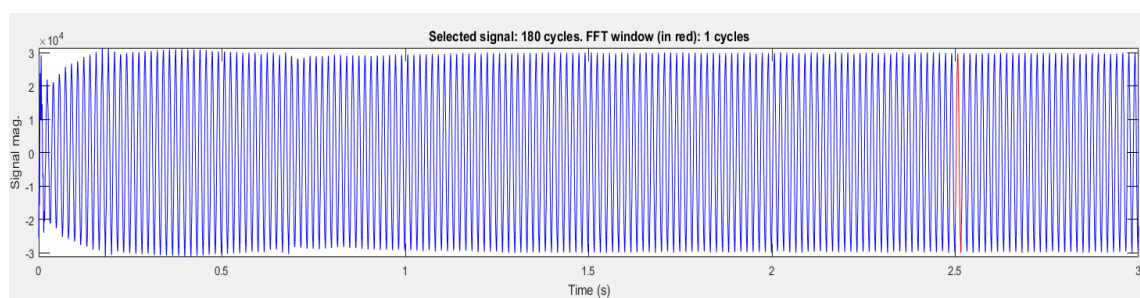


Figura 16 - Sinal de tensão da barra de 34,5kV da barra da subestação do Calangos 1,3.

Observando o gráfico da Figura 15, os valores de distorções individuais nas ordens 5ª e 7ª harmônicas se encontram consideravelmente altos. Conforme podemos aferir na Figura 17, a 5ª ordem harmônica possui tensão em 2,59% da tensão nominal da barra, e a 7ª ordem harmônica 3,28% de distorção, gerando assim, basicamente, visto que as demais contribuições são muito pequenas, uma sobretensão distorcida no sistema de 4,23% na barra considerada na simulação do sistema.

|                   |                                  |        |
|-------------------|----------------------------------|--------|
| Sampling time     | = 1e-06 s                        |        |
| Samples per cycle | = 16667                          |        |
| DC component      | = 0.2553                         |        |
| Fundamental       | = 2.879e+04 peak (2.036e+04 rms) |        |
| THD               | = 4.23%                          |        |
|                   |                                  |        |
| 0 Hz (DC):        | 0.00%                            | 90.0°  |
| 60 Hz (Fnd):      | 100.00%                          | -53.8° |
| 120 Hz (h2):      | 0.04%                            | 240.6° |
| 180 Hz (h3):      | 0.03%                            | 162.7° |
| 240 Hz (h4):      | 0.08%                            | 154.3° |
| 300 Hz (h5):      | 2.59%                            | 68.2°  |
| 360 Hz (h6):      | 0.61%                            | 133.7° |
| 420 Hz (h7):      | 3.28%                            | 58.4°  |
| 480 Hz (h8):      | 0.08%                            | 128.8° |
| 540 Hz (h9):      | 0.03%                            | 104.9° |
| 600 Hz (h10):     | 0.05%                            | 264.2° |
| 660 Hz (h11):     | 0.06%                            | -50.1° |
| 720 Hz (h12):     | 0.05%                            | -35.5° |
| 780 Hz (h13):     | 0.03%                            | 46.6°  |
| 840 Hz (h14):     | 0.00%                            | -35.2° |
| 900 Hz (h15):     | 0.04%                            | 229.0° |
| 960 Hz (h16):     | 0.03%                            | 98.2°  |
| 1020 Hz (h17):    | 0.03%                            | -26.9° |
| 1080 Hz (h18):    | 0.04%                            | -5.3°  |
| 1140 Hz (h19):    | 0.01%                            | -9.1°  |
| 1200 Hz (h20):    | 0.03%                            | -8.1°  |
| 1260 Hz (h21):    | 0.01%                            | -25.7° |
| 1320 Hz (h22):    | 0.01%                            | -5.3°  |
| 1380 Hz (h23):    | 0.03%                            | -18.8° |
| 1440 Hz (h24):    | 0.02%                            | -12.0° |
| 1500 Hz (h25):    | 0.04%                            | -4.0°  |
| 1560 Hz (h26):    | 0.02%                            | 171.3° |
| 1620 Hz (h27):    | 0.01%                            | 170.4° |
| 1680 Hz (h28):    | 0.01%                            | -47.2° |
| 1740 Hz (h29):    | 0.02%                            | 109.1° |
| 1800 Hz (h30):    | 0.01%                            | 95.3°  |
| 1860 Hz (h31):    | 0.00%                            | 102.5° |
| 1920 Hz (h32):    | 0.00%                            | 53.2°  |
| 1980 Hz (h33):    | 0.00%                            | 41.3°  |
| 2040 Hz (h34):    | 0.00%                            | 50.2°  |
| 2100 Hz (h35):    | 0.00%                            | 86.3°  |
| 2160 Hz (h36):    | 0.00%                            | 45.3°  |
| 2220 Hz (h37):    | 0.00%                            | 128.6° |
| 2280 Hz (h38):    | 0.00%                            | 35.1°  |
| 2340 Hz (h39):    | 0.00%                            | 23.4°  |
| 2400 Hz (h40):    | 0.00%                            | 37.3°  |
| 2460 Hz (h41):    | 0.01%                            | 186.8° |
| 2520 Hz (h42):    | 0.00%                            | 25.8°  |
| 2580 Hz (h43):    | 0.05%                            | 56.6°  |
| 2640 Hz (h44):    | 0.00%                            | 17.8°  |
| 2700 Hz (h45):    | 0.00%                            | 17.9°  |
| 2760 Hz (h46):    | 0.00%                            | 17.6°  |
| 2820 Hz (h47):    | 0.04%                            | 45.3°  |
| 2880 Hz (h48):    | 0.00%                            | 14.6°  |
| 2940 Hz (h49):    | 0.00%                            | -52.3° |

Figura 17 - Lista de distorções harmônicas individuais de tensão do sistema.

Analisando o THD de corrente, de acordo com a Figura 18, confirmamos o alto percentual em relação a fundamental de corrente de 5ª e 7ª ordens harmônicas na barra analisada.

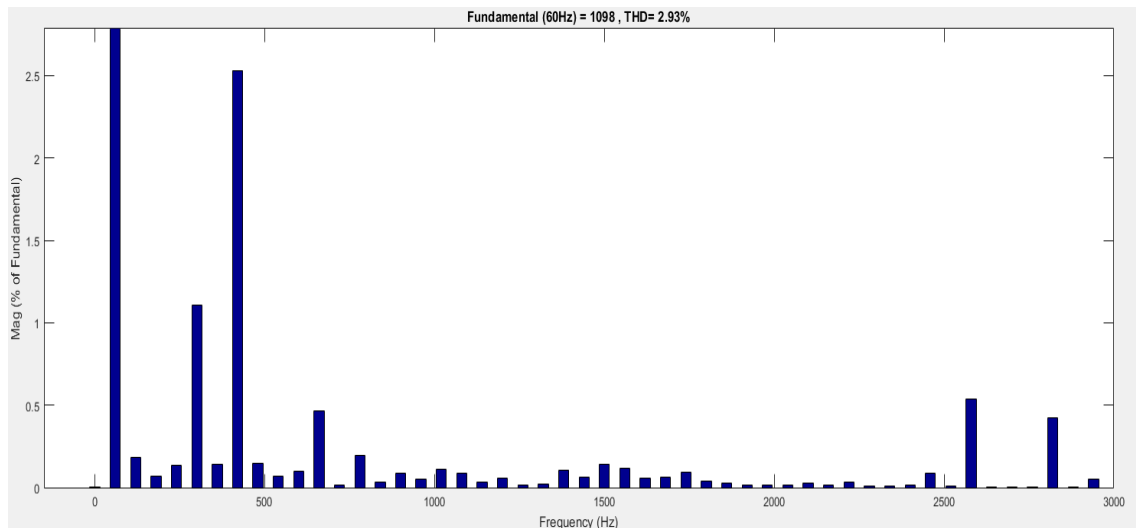


Figura 18 - THD de corrente na barra de 34,5kV da subestação Calangos 1,3.

Confirmando tais condições na Figura 19 na lista de percentuais individuais de distorção de corrente, observa-se que o percentual mais preocupante é o de 7ª ordem, devendo também ser analisado a 5ª ordem, de modo a avaliar a distorção total.

Tais sobrecorrentes caracterizadas no sistema devido a distorção harmônica ora apresentada causam grandes problemas no sistema. Geram quedas de tensão, perdas de potência nas linhas e nos cabos por efeito joule, ocasionam o aumento das correntes de energização e maiores perdas nos transformadores do sistema, que são em grandes quantidades no sistema referido, diminuindo consideravelmente a vida útil dos mesmos. Tais distorções trazem grandes problemas no sistema em questão, sendo assim vê-se a necessidade de mitigação das mesmas.

|                   |   |                       |
|-------------------|---|-----------------------|
| Sampling time     | = | 1e-06 s               |
| Samples per cycle | = | 16667                 |
| DC component      | = | 0.05256               |
| Fundamental       | = | 1098 peak (776.4 rms) |
| THD               | = | 2.93%                 |

|         |        |         |        |
|---------|--------|---------|--------|
| 0 Hz    | (DC):  | 0.00%   | 90.0°  |
| 60 Hz   | (Fnd): | 100.00% | 137.6° |
| 120 Hz  | (h2):  | 0.18%   | -39.1° |
| 180 Hz  | (h3):  | 0.07%   | -44.4° |
| 240 Hz  | (h4):  | 0.13%   | 252.7° |
| 300 Hz  | (h5):  | 1.10%   | 165.6° |
| 360 Hz  | (h6):  | 0.14%   | 26.6°  |
| 420 Hz  | (h7):  | 2.53%   | -41.9° |
| 480 Hz  | (h8):  | 0.15%   | -6.8°  |
| 540 Hz  | (h9):  | 0.07%   | -30.1° |
| 600 Hz  | (h10): | 0.10%   | 263.9° |
| 660 Hz  | (h11): | 0.47%   | 184.7° |
| 720 Hz  | (h12): | 0.01%   | 247.5° |
| 780 Hz  | (h13): | 0.20%   | 187.7° |
| 840 Hz  | (h14): | 0.03%   | 142.6° |
| 900 Hz  | (h15): | 0.09%   | 102.0° |
| 960 Hz  | (h16): | 0.05%   | 20.7°  |
| 1020 Hz | (h17): | 0.11%   | 180.0° |
| 1080 Hz | (h18): | 0.09%   | 256.7° |
| 1140 Hz | (h19): | 0.04%   | 195.0° |
| 1200 Hz | (h20): | 0.06%   | 254.3° |
| 1260 Hz | (h21): | 0.02%   | 195.5° |
| 1320 Hz | (h22): | 0.02%   | 254.8° |
| 1380 Hz | (h23): | 0.11%   | 240.6° |
| 1440 Hz | (h24): | 0.06%   | 250.7° |
| 1500 Hz | (h25): | 0.14%   | 262.4° |
| 1560 Hz | (h26): | 0.12%   | 81.7°  |
| 1620 Hz | (h27): | 0.06%   | 82.5°  |
| 1680 Hz | (h28): | 0.06%   | 210.3° |
| 1740 Hz | (h29): | 0.10%   | 34.3°  |
| 1800 Hz | (h30): | 0.04%   | 39.1°  |
| 1860 Hz | (h31): | 0.02%   | 73.8°  |
| 1920 Hz | (h32): | 0.02%   | 48.1°  |
| 1980 Hz | (h33): | 0.01%   | 22.6°  |
| 2040 Hz | (h34): | 0.02%   | 42.0°  |
| 2100 Hz | (h35): | 0.03%   | 58.9°  |
| 2160 Hz | (h36): | 0.02%   | 22.0°  |
| 2220 Hz | (h37): | 0.04%   | 77.0°  |
| 2280 Hz | (h38): | 0.01%   | 43.5°  |
| 2340 Hz | (h39): | 0.01%   | 65.7°  |
| 2400 Hz | (h40): | 0.01%   | 57.8°  |
| 2460 Hz | (h41): | 0.09%   | 97.4°  |
| 2520 Hz | (h42): | 0.01%   | 29.5°  |
| 2580 Hz | (h43): | 0.54%   | -31.2° |
| 2640 Hz | (h44): | 0.00%   | 42.7°  |
| 2700 Hz | (h45): | 0.00%   | 18.2°  |
| 2760 Hz | (h46): | 0.00%   | 33.8°  |
| 2820 Hz | (h47): | 0.42%   | -42.4° |
| 2880 Hz | (h48): | 0.00%   | 45.5°  |
| 2940 Hz | (h49): | 0.05%   | 191.5° |

Figura 19 - Lista de percentual de distorção individual de corrente do sistema

Ora expostas as respostas do sistema conforme as Figuras 15 e 18, exaltando se a necessidade de mitigação de tais ordens harmônicas, faz se necessário o estudo de métodos mitigatórios para o sistema, visando assim a solução do problema, e análise da implementação, de forma que seja viável operacionalmente e economicamente. Para tanto será analisado outra situação possível de operação do sistema, onde se encontra desenergizada a subestação do Calangos 2,4 e 5, visto contingências ou falhas operacionais.

## 4.2. Análise do sistema operando apenas com os parques Calango 1 e 3 conectados

Afim de analisar demais condições de operação do sistema será realizada a simulação do sistema sem a operação dos parques dos Calangos 2,4 e 5 que se encontram conectados na subestação do Calango 2 Energias Renováveis, também de posse da Iberdrola.

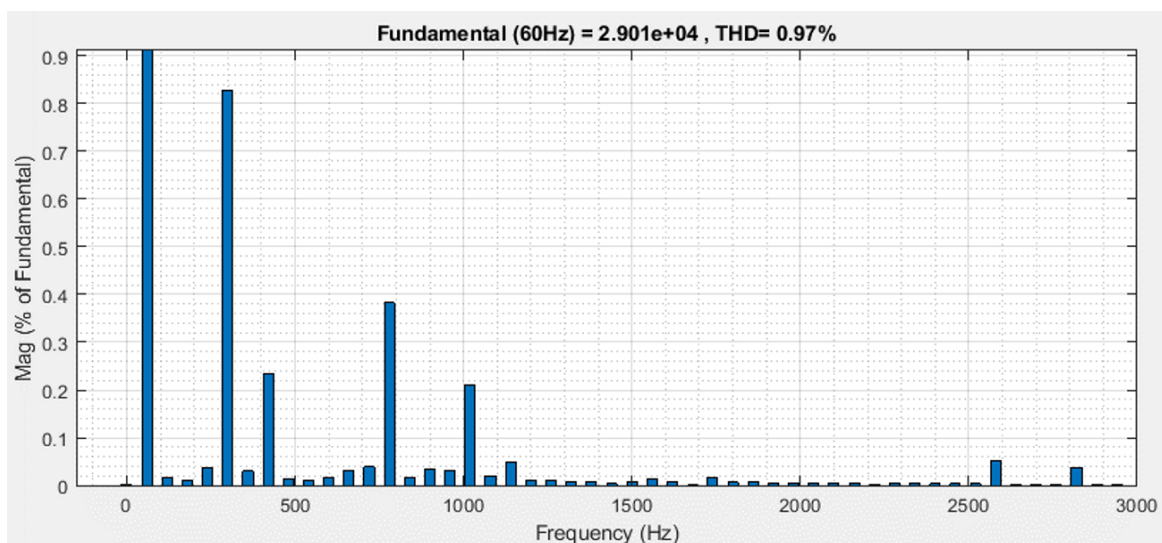


Figura 20 – THD de tensão na barra de 34,5kV sem a subestação Calangos 2,4 e 5.

De acordo com a figura 20, podemos verificar que a distorção da barra de 34,5kV operando somente com os parques 1 e 3 conectados ao sistema é muito menor, sendo nessa operação, parâmetros admissíveis conforme os Procedimentos de Rede do ONS [7], que requerem o limite individual total de 3% como aceitável.

Via de regra, o impacto da inserção de 3 parques eólicos ao sistema já era esperado. Deve se exaltar que tal operação será realizada somente na condição do desligamento dos parques 2,4 e 5 do sistema, podendo ocorrer em situações em que ocorram problemas operacionais ou até mesmo devido a intempéries, como por exemplo descargas atmosféricas ou rompimento de cabos, caindo ao solo ocasionando uma falta no sistema.

Sobretudo, conforme é verificado na Figura 21, é relevante enfatizar os valores percentuais das distorções em 5ª e 7ª ordens, no primeiro momento foi

verificado o percentual maior de 7ª ordem, podemos então relacionar, a priori, a influência dos parques 2,4 e 5 e da subestação, tanto quanto seu banco de capacitores na ordem acima citada.

|                                              |         |        |  |
|----------------------------------------------|---------|--------|--|
| Sampling time = 1e-06 s                      |         |        |  |
| Samples per cycle = 16667                    |         |        |  |
| DC component = 0.5307                        |         |        |  |
| Fundamental = 2.901e+04 peak (2.051e+04 rms) |         |        |  |
| THD = 0.97%                                  |         |        |  |
| 0 Hz (DC):                                   | 0.00%   | 270.0° |  |
| 60 Hz (Fnd):                                 | 100.00% | -57.3° |  |
| 120 Hz (h2):                                 | 0.02%   | -40.9° |  |
| 180 Hz (h3):                                 | 0.01%   | 234.1° |  |
| 240 Hz (h4):                                 | 0.04%   | 268.9° |  |
| 300 Hz (h5):                                 | 0.83%   | -27.1° |  |
| 360 Hz (h6):                                 | 0.03%   | 158.0° |  |
| 420 Hz (h7):                                 | 0.23%   | -23.2° |  |
| 480 Hz (h8):                                 | 0.01%   | 63.2°  |  |
| 540 Hz (h9):                                 | 0.01%   | 88.0°  |  |
| 600 Hz (h10):                                | 0.02%   | 120.7° |  |
| 660 Hz (h11):                                | 0.03%   | -20.8° |  |
| 720 Hz (h12):                                | 0.04%   | 173.0° |  |
| 780 Hz (h13):                                | 0.38%   | 199.3° |  |
| 840 Hz (h14):                                | 0.02%   | 126.8° |  |
| 900 Hz (h15):                                | 0.04%   | 35.4°  |  |
| 960 Hz (h16):                                | 0.03%   | -30.8° |  |
| 1020 Hz (h17):                               | 0.21%   | 89.0°  |  |
| 1080 Hz (h18):                               | 0.02%   | -21.5° |  |
| 1140 Hz (h19):                               | 0.05%   | 104.8° |  |
| 1200 Hz (h20):                               | 0.01%   | -4.1°  |  |
| 1260 Hz (h21):                               | 0.01%   | 31.3°  |  |
| 1320 Hz (h22):                               | 0.01%   | 14.9°  |  |
| 1380 Hz (h23):                               | 0.01%   | 167.5° |  |
| 1440 Hz (h24):                               | 0.00%   | 56.6°  |  |
| 1500 Hz (h25):                               | 0.01%   | 53.6°  |  |
| 1560 Hz (h26):                               | 0.01%   | -52.7° |  |
| 1620 Hz (h27):                               | 0.01%   | -36.7° |  |
| 1680 Hz (h28):                               | 0.00%   | -4.1°  |  |
| 1740 Hz (h29):                               | 0.02%   | -19.2° |  |
| 1800 Hz (h30):                               | 0.01%   | -8.5°  |  |
| 1860 Hz (h31):                               | 0.01%   | 27.2°  |  |
| 1920 Hz (h32):                               | 0.01%   | -12.8° |  |
| 1980 Hz (h33):                               | 0.00%   | -8.0°  |  |
| 2040 Hz (h34):                               | 0.00%   | -12.4° |  |
| 2100 Hz (h35):                               | 0.01%   | -38.5° |  |
| 2160 Hz (h36):                               | 0.00%   | -8.1°  |  |
| 2220 Hz (h37):                               | 0.00%   | -43.3° |  |
| 2280 Hz (h38):                               | 0.00%   | -6.0°  |  |
| 2340 Hz (h39):                               | 0.00%   | -9.9°  |  |
| 2400 Hz (h40):                               | 0.00%   | -7.5°  |  |
| 2460 Hz (h41):                               | 0.00%   | -74.7° |  |
| 2520 Hz (h42):                               | 0.00%   | -6.7°  |  |
| 2580 Hz (h43):                               | 0.05%   | 62.3°  |  |
| 2640 Hz (h44):                               | 0.00%   | -9.5°  |  |
| 2700 Hz (h45):                               | 0.00%   | -9.8°  |  |
| 2760 Hz (h46):                               | 0.00%   | -7.8°  |  |
| 2820 Hz (h47):                               | 0.04%   | 37.0°  |  |
| 2880 Hz (h48):                               | 0.00%   | -6.3°  |  |
| 2940 Hz (h49):                               | 0.00%   | -30.9° |  |

Figura 21 - Lista de THD de tensão na barra de 34,5kV da subestação Calango 1,3 sem Calango 2,4 e 5.

## 5. ESPECIFICAÇÃO DE FILTROS HARMÔNICOS SINTONIZADOS EM UMA FREQUÊNCIA

Visto que as distorções harmônicas da barra analisada, no caso de plena carga, operando com os 5 parques conectados, são superiores aos valores limites, por sua vez explicados no item 4.1, necessitando de métodos mitigatórios para regularidade do sistema.

Conforme exposto, a solução ora proposta para mitigação das distorções harmônicas, será a instalação de filtros passivos sintonizados nas frequências com maiores percentuais de distorção, de tal forma que seja analisada a possibilidade de utilizar o banco de capacitores instalado na barra em questão.

De acordo com a solução proposta, serão especificados filtros para a 5ª e 7ª ordem harmônicas baseados em estudos [9 – 14], visto que são os maiores valores percentuais das distorções, conforme [7] seus valores de distorções individuais foram ultrapassados, logo, necessitam de métodos mitigatórios.

### 5.1. Cálculos realizados para especificação dos filtros

Primeiramente deve se especificar a potência reativa necessária para compensação do sistema na barra, de modo a especificar o capacitor. Diante do banco de capacitores que já se encontra instalado na barra em questão, o valor de compensação reativa será o mesmo do atual, caso possível.

Entretanto, anteriormente a especificação da potência reativa necessária da barra, se faz necessários os estudos de curto circuito, para parametrizar qual a variação máxima de tensão admissível na barra para assim finalizar tal especificação, conforme a equação 5. Vale salientar que uma elevação desta potência reativa capacitiva pode gerar elevações de tensão em frequência fundamental e causar, conseqüentemente, sobretensões no ponto de conexão do filtro, vindo a danificar os elementos ora conectados e superando os limites normativos.

$$\Delta V\% = \frac{\Delta Q_{bc}}{S_{cc}} \quad (5)$$

No item 3.1.1, nas Tabelas IV e V se encontram os valores dos curtos máximos e mínimos da barra onde o filtro será instalado, realizando se o cálculo da potência de curto média entre a máxima e mínima, obter se a 600,8MVARs de curto circuito, mediante a variação máxima aceitável no procedimentos de rede da ONS de 5%, os filtros serão especificados para uma potência de 6MVAR cada, sendo assim, totalizando 12MVAR uma variação de tensão na fundamental da barra de 2%. Os valores foram especificados em 2% devido a sensibilidade dos equipamentos conectados a barra em questão.

### 5.1.1. Especificação do filtro de 5ª ordem

Definida a potência do filtro no item anterior, conforme a máxima variação de tensão admissível na barra, sendo que se encontra, atualmente, instalado um banco de capacitores de 12MVAR, correspondendo a 2% da potência de curto, faz se necessário especificações técnicas de capacitância, indutância e resistência de modo a estabelecer o fator de qualidade e a dessintonia do filtro que será abordado adiante nesse mesmo tópico.

A metodologia padrão será exemplificada para uma fórmula onde seja possível o cálculo direto da capacitância diante de todas as situações ora estabelecidas, de posse do valor direto da capacitância, facilmente teremos o valor da indutância do filtro para diante do fator de qualidade finalizar com a resistência do indutor do conjunto do filtro. Seguem nas equações seguintes a exemplificação:

$$Q_{filtro} = \frac{V_{ff}^2}{X_{C1} - X_{L1}} \quad (6)$$

Sendo  $X_{C1}$  e  $X_{L1}$  expostos nas equações 21 e 22:

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f_1 C} \quad (7)$$

$$X_{L1} = 2\pi f_1 L \quad (8)$$

Na frequência de ressonância teremos:

$$h = \frac{1}{2\pi f_1 \sqrt{LC}} \quad (9)$$

Isolando o L:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 h^2 f_1^2 C} \quad (10)$$

Substituindo 7 e 8 em 6:

$$\frac{1}{2\pi f_1 C} - 2\pi f_1 L = \frac{V_{ff}^2}{Q_{filtro}} \quad (11)$$

Substituindo 10 em 11:

$$\frac{1}{2\pi f_1 C} - \frac{2\pi f_1}{4\pi^2 h^2 f_1^2 C} = \frac{V_{ff}^2}{Q_{filtro}} \quad (12)$$

Simplificando e fatorando a equação :

$$\frac{h^2 - 1}{2\pi h^2 f_1 C} = \frac{V_{ff}^2}{Q_{filtro}} \quad (13)$$

Isolando o C na equação 13 obter-se-á o valor da capacitância do filtro em função da ordem harmônica de ressonância do mesmo, da potência reativa capacitiva necessária na fundamental, da tensão fase-fase da barra de instalação do filtro e da frequência fundamental:

$$C = \frac{(h^2 - 1) * Q_{filtro}}{2\pi h^2 f_1 * V_{ff}^2} \quad (14)$$

A equação 14 nos permite calcular de forma direta o valor da capacitância dos filtros. Sendo prática, de modo a não ser necessário os demais cálculos considerando a queda de tensão da reatância indutiva, de modo a se obter a tensão real sob o filtro. Sendo assim, adicionando a queda de tensão da reatância indutiva fase-neutro a tensão fase-neutro da barra para se obter a reatância capacitiva e posteriormente a capacitância.

Posterior ao cálculo da equação 14, de posse do valor da capacitância, obter-se-á o valor da indutância para frequência de sintonia em projeção, através

da equação 15, que seria o mesmo da equação 10, porém simplificada.

$$L = \frac{1}{(2\pi f_1 h)^2 * C} \quad (15)$$

De posse dos valores de capacitância e indutância do filtro, o próximo passo é o cálculo do máximo valor de resistência do cabo do indutor para obter o fator de qualidade requerido.

O fator de qualidade está diretamente relacionado com a seletividade do filtro e o valor da impedância do filtro na frequência de sintonia, sendo assim, é preferível que o mesmo seja o mínimo possível. Diante da equação 16, referente ao valor do fator de qualidade na frequência de sintonia do filtro, foi adotado um fator de qualidade ( $Q$ ) = 100.

$$Q = \frac{X_{L0}}{R} = \frac{2\pi L f_0}{R} \quad (16)$$

Na prática, após a instalação do filtro, é comum que conforme o envelhecimento dos bancos de capacitores e variações de temperatura em operação do mesmo, mediante sobrecargas ou falta de refrigeração adequada no local de instalação, sua capacitância seja alterada. Afim de evitar problemas futuros, será utilizado nesse projeto a dessintonia de 0,1 para especificação dos parâmetros, ou seja, o filtro será especificado para frequência de sintonia de 294Hz (5ª ordem com dessintonia de 0,1).

A Tabela VIII abaixo representa os valores utilizados para especificação do filtro passivo sintonizado para frequência de 294 Hz.

*Tabela VIII - Valores utilizados no cálculo os parâmetros do filtro de 5ª ordem.*

| $V_{ff} (V)$ | $Q_{filtro}(VAr)$ | $f_1(Hz)$ | $Q$ | $h$ |
|--------------|-------------------|-----------|-----|-----|
| 34500        | 6000000           | 60        | 100 | 4,9 |

De posse dos parâmetros da Tabela VIII, aplicando a equação 14 obter-se-à o valor de capacitância para que seja inserido na equação 15, de modo a resultar na indutância necessária para ressonar com a capacitância na frequência de sintonia de 294 Hz, equivalente a ordem de 4,9. Sendo assim, inserindo o valor da indutância na equação 16, por último teremos o valor da

resistência que o indutor deverá apresentar em seu projeto para um fator de qualidade igual a 100. Contudo, os resultados serão conforme a Figura 22 e a Tabela IX abaixo.

*Tabela IX - Parâmetros especificados para filtro sintonizado em 294 Hz.*

| C (μF)  | L (mH)  | R (mΩ)  |
|---------|---------|---------|
| 12.8146 | 22.8685 | 86.2124 |

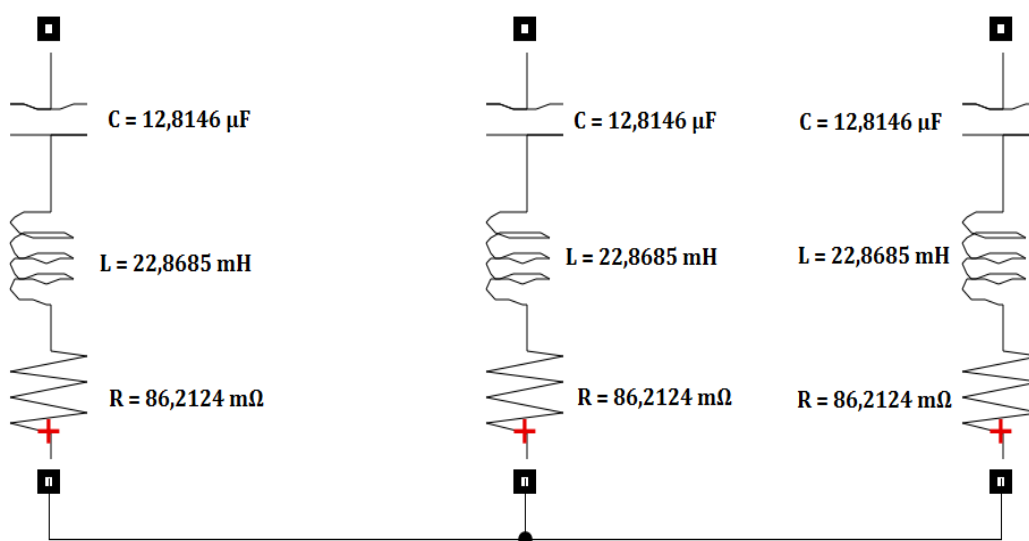


*Figura 22 - Filtro passivo sintonizado em 5ª ordem harmônica com dessintonia de 0,1.*

A ligação do filtro será estruturada em uma conexão trifásica estrela isolado, via de regra, os filtros comerciais são assim conectados afim de evitar o surgimento de correntes de sequência zero na malha de aterramento e/ou retorno das mesmas pelo terra dos transformadores.

Anteriormente a instalação de quaisquer filtro em um sistema interligado, faz se necessário estudos de resposta em frequência da impedância do sistema, visto que, pode ocorrer após a instalação do filtro, uma ressonância paralela do sistema em outra ordem harmônica.

### 5.1.2. Especificação do filtro de 7ª ordem

Os cálculos realizados para projeto do filtro harmônico sintonizado na 7ª

ordem serão idem ao item 5.1.1, visto que, o mesmo terá a mesma potência efetiva. Conforme mencionado no item anterior, o banco de capacitores já existente é de 12 MVar, facilitando a instalação, existem dois bancos de 6MVar, ou seja, serão usados um para a 5ª e 7ª ordens.

*Tabela X - Valores utilizados no cálculo os parâmetros do filtro de 7ª ordem.*

| $V_{ff} (V)$ | $Q_{filtro} (VAr)$ | $f_1 (Hz)$ | $Q$ | $h$ |
|--------------|--------------------|------------|-----|-----|
| 34500        | 6000000            | 60         | 100 | 6,9 |

A Tabela X apresenta os valores utilizados para o cálculo do filtro sintonizado em 414 Hz, ou seja, em 7ª ordem com desintonia de 0,1, conforme explicado no item 5.1.1, o mesmo se faz necessário mediante o envelhecimento dos bancos de capacitores e as variações de temperaturas recorrentes.

Portanto, com os parâmetros da Tabela X, aplicando se a equação 14, obter-se-à o valor de capacitância para que seja inserido na equação 15, de modo a resultar na indutância necessária para ressonar com a capacitância na frequência de sintonia de 414 Hz, equivalente a 7ª ordem com dessintonia de 0,1. Sendo assim, inserindo o valor da indutância na equação 16, por último teremos o valor da resistência que o indutor deverá apresentar em seu projeto para um fator de qualidade igual a 100. Logo, os resultados serão conforme a Figura 23 e a Tabela XI abaixo.

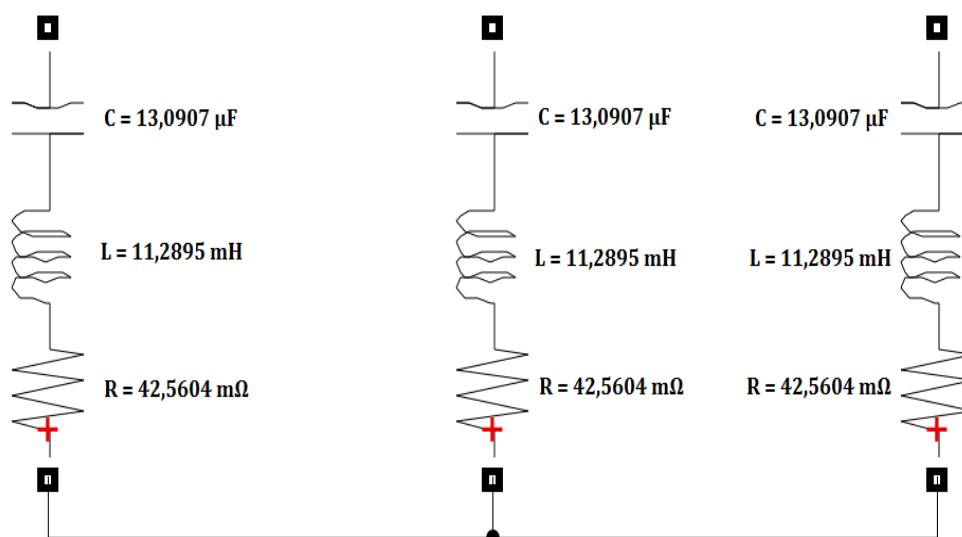


Figura 23 - Filtro passivo sintonizado em 7ª ordem harmônica com dessintonia de 0,1.

Tabela XI - Parâmetros especificados para filtro sintonizado em 414 Hz.

| C (µF)  | L (mH)  | R (mΩ)  |
|---------|---------|---------|
| 13.0907 | 11.2895 | 42.5604 |

Idem ao projeto anterior do item 5.1.1. o filtro será arranjado em conexão estrela isolada afim de evitar o surgimento de correntes de sequência zero na malha de aterramento e/ou retorno das mesmas pelo terra dos transformadores. Logo, também se faz necessária a análise da resposta do sistema após a instalação do filtro de 7ª ordem, operando sozinho e operando com o de 5ª ordem harmônica.

## 5.2. Resultados das simulações após a implementação dos filtros com os parques conectados

Dispondo dos resultados ora apresentados no item 5.1, considerando todas as ressalvas apresentadas no item, o próximo passo é implementar o mesmo computacionalmente e aferir os resultados obtidos.

Vale a ressalva que, geralmente na prática, não se faz a instalação de ambos os filtros em concomitância, logo, serão apresentadas simulações de modo a analisar qual a melhor hipótese a ser implementada. Desfazer a conexão do banco de capacitores para se conectar o filtro de 5ª ou 7ª ordem em primeiro

lugar. Nos estudos adicionais serão abordadas as simulações das respostas em frequência da impedância do sistema, afim de verificar a possibilidade de ocorrência da ressonância paralela em alguma ordem, podendo gerar sobretensão de modo a queimar ou danificar o mesmo.

### 5.2.1. Caso com a implementação do filtro de 5ª ordem

No primeiro momento será realizada a simulação computacional da implementação do filtro projetado no item 5.1.1 em paralelo com o banco de capacitores de 6 MVar de modo a suprir a potência reativa necessária na barra de 34,5kV da subestação do Calango 1 e 3.

Na Figura 24 seguem os resultados da *FFT* do sistema simulado com o filtro especificado para a 5ª ordem. Percebe-se na Figura 25, que o valor da distorção harmônica total de tensão aumentou consideravelmente, maior até mesmo que na situação sem nenhum filtro, chegando a 5,27%, ou seja, maior em 2,27% que o admissível nos procedimentos de rede.

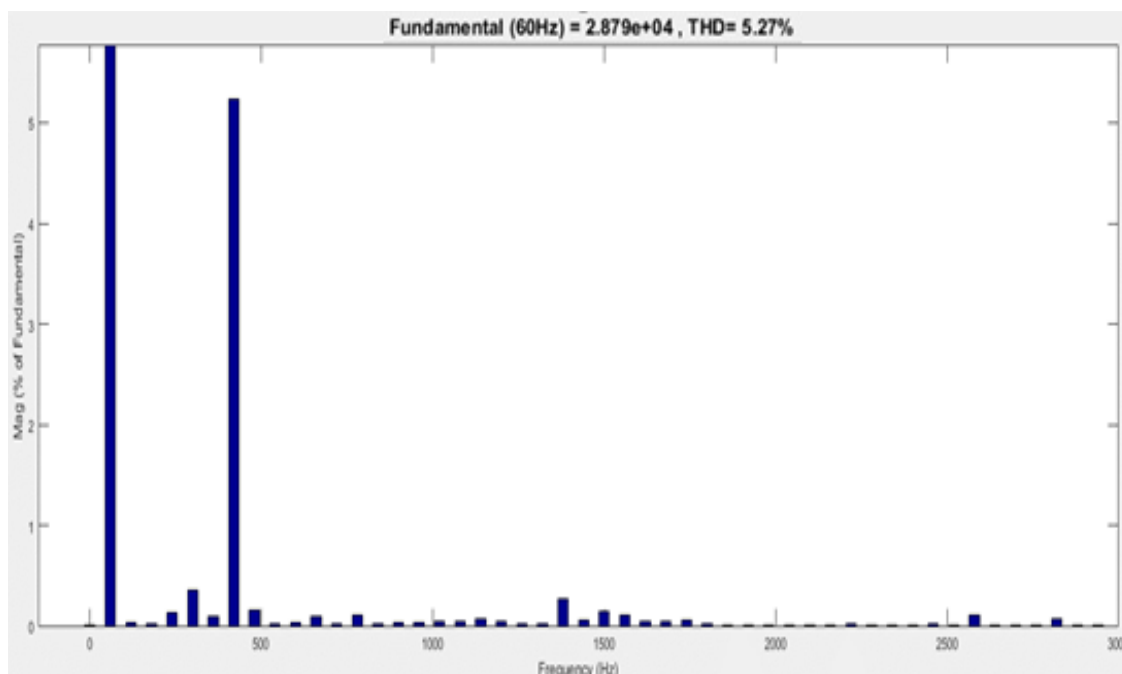


Figura 24 – FFT de tensão após a implementação do filtro de 5ª ordem na barra de 34,5kV da SUB 1,3

De acordo com a Figura 25, percebemos que a ordem de distorção individual dominante é a 7ª ordem. Uma possível hipótese para tal ocorrência é

o fato de que a impedância do filtro instalado entrou em ressonância com o sistema e o banco de capacitores instalado na barra, ocorrendo a ressonância paralela na sétima ordem harmônica, os estudos adicionais poderam confirmar ou não, tal hipótese. As demais ordens harmônicas de 40 a 50, não foram inseridas mediante sua colaboração insignificativa.

O percentual de corrente em 5ª ordem, como já esperado, é alto como é verificado na Figura 26, porém o percentual de sétima ordem é próximo ao de quinta, como podemos verificar na Figura 27.

|                                              |         |        |  |
|----------------------------------------------|---------|--------|--|
| Sampling time = 1e-06 s                      |         |        |  |
| Samples per cycle = 16667                    |         |        |  |
| DC component = 0.9722                        |         |        |  |
| Fundamental = 2.879e+04 peak (2.036e+04 rms) |         |        |  |
| THD = 5.27%                                  |         |        |  |
| 0 Hz (DC) :                                  | 0.00%   | 270.0° |  |
| 60 Hz (Fnd) :                                | 100.00% | -53.8° |  |
| 120 Hz (h2) :                                | 0.03%   | 249.0° |  |
| 180 Hz (h3) :                                | 0.03%   | 150.3° |  |
| 240 Hz (h4) :                                | 0.13%   | 221.0° |  |
| 300 Hz (h5) :                                | 0.36%   | 88.7°  |  |
| 360 Hz (h6) :                                | 0.09%   | 68.5°  |  |
| 420 Hz (h7) :                                | 5.24%   | 128.6° |  |
| 480 Hz (h8) :                                | 0.15%   | -39.5° |  |
| 540 Hz (h9) :                                | 0.02%   | -26.1° |  |
| 600 Hz (h10) :                               | 0.03%   | -57.8° |  |
| 660 Hz (h11) :                               | 0.09%   | -67.5° |  |
| 720 Hz (h12) :                               | 0.02%   | -50.8° |  |
| 780 Hz (h13) :                               | 0.11%   | -34.6° |  |
| 840 Hz (h14) :                               | 0.02%   | -85.8° |  |
| 900 Hz (h15) :                               | 0.03%   | -42.5° |  |
| 960 Hz (h16) :                               | 0.04%   | 167.0° |  |
| 1020 Hz (h17) :                              | 0.04%   | 10.8°  |  |
| 1080 Hz (h18) :                              | 0.04%   | 60.2°  |  |
| 1140 Hz (h19) :                              | 0.07%   | 95.8°  |  |
| 1200 Hz (h20) :                              | 0.05%   | 103.3° |  |
| 1260 Hz (h21) :                              | 0.02%   | 199.6° |  |
| 1320 Hz (h22) :                              | 0.03%   | 122.4° |  |
| 1380 Hz (h23) :                              | 0.27%   | -7.5°  |  |
| 1440 Hz (h24) :                              | 0.05%   | -21.7° |  |
| 1500 Hz (h25) :                              | 0.15%   | 11.6°  |  |
| 1560 Hz (h26) :                              | 0.11%   | 192.0° |  |
| 1620 Hz (h27) :                              | 0.04%   | 197.3° |  |
| 1680 Hz (h28) :                              | 0.04%   | -78.8° |  |
| 1740 Hz (h29) :                              | 0.06%   | 132.2° |  |
| 1800 Hz (h30) :                              | 0.02%   | 146.4° |  |
| 1860 Hz (h31) :                              | 0.01%   | 199.8° |  |
| 1920 Hz (h32) :                              | 0.01%   | 142.1° |  |
| 1980 Hz (h33) :                              | 0.01%   | 159.8° |  |
| 2040 Hz (h34) :                              | 0.01%   | 156.6° |  |
| 2100 Hz (h35) :                              | 0.01%   | 168.6° |  |
| 2160 Hz (h36) :                              | 0.00%   | 165.0° |  |
| 2220 Hz (h37) :                              | 0.02%   | 196.0° |  |
| 2280 Hz (h38) :                              | 0.00%   | 179.4° |  |
| 2340 Hz (h39) :                              | 0.00%   | 174.8° |  |
| 2400 Hz (h40) :                              | 0.00%   | 175.1° |  |

Figura 25 - Lista de percentuais individuais de tensão após a implementação do filtro de 5ª ordem

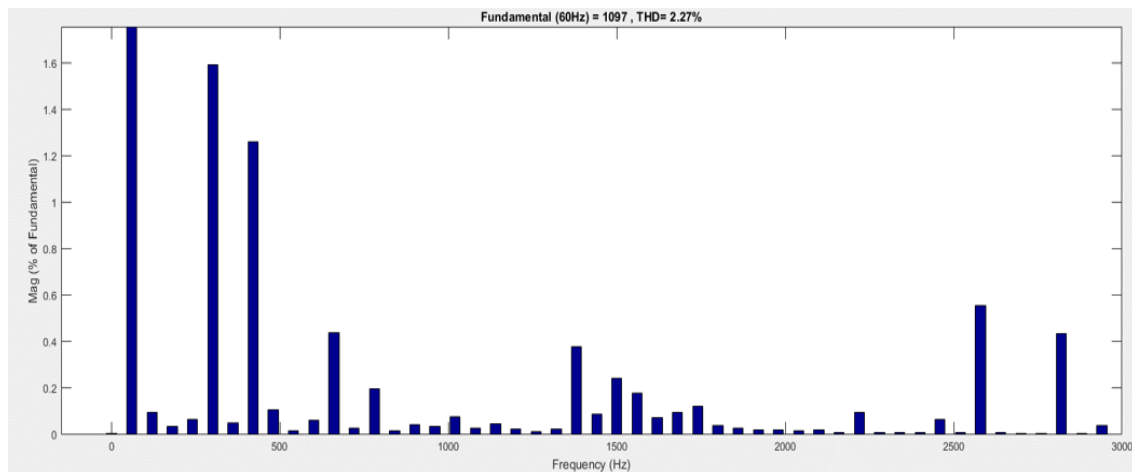


Figura 26 - FFT de corrente da barra instalada o filtro de 5ª ordem na barra de 34,5kV da SUB 1,3

Diante dos altos percentuais expostos, segue na Figura 28 abaixo a imagem de como a onda de tensão da barra, mostrando scope superior a tensão e inferior a corrente, se encontra distorcida com a implementação do filtro de 5ª e o alto nível de ruído devido a ressonância.

|                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| Sampling time     | = 1e-06 s               |
| Samples per cycle | = 16667                 |
| DC component      | = 0.02963               |
| Fundamental       | = 1097 peak (775.6 rms) |
| THD               | = 2.27%                 |

|         |        |         |        |
|---------|--------|---------|--------|
| 0 Hz    | (DC):  | 0.00%   | 270.0° |
| 60 Hz   | (Fnd): | 100.00% | 137.6° |
| 120 Hz  | (h2):  | 0.09%   | -50.3° |
| 180 Hz  | (h3):  | 0.03%   | 170.0° |
| 240 Hz  | (h4):  | 0.06%   | 165.0° |
| 300 Hz  | (h5):  | 1.59%   | 182.4° |
| 360 Hz  | (h6):  | 0.05%   | 41.8°  |
| 420 Hz  | (h7):  | 1.26%   | -4.6°  |
| 480 Hz  | (h8):  | 0.11%   | 248.2° |
| 540 Hz  | (h9):  | 0.01%   | 187.4° |
| 600 Hz  | (h10): | 0.06%   | -61.9° |
| 660 Hz  | (h11): | 0.44%   | 197.7° |
| 720 Hz  | (h12): | 0.03%   | -12.7° |
| 780 Hz  | (h13): | 0.20%   | 162.6° |
| 840 Hz  | (h14): | 0.01%   | 117.3° |
| 900 Hz  | (h15): | 0.04%   | 15.1°  |
| 960 Hz  | (h16): | 0.03%   | -57.8° |
| 1020 Hz | (h17): | 0.07%   | 140.7° |
| 1080 Hz | (h18): | 0.03%   | 269.6° |
| 1140 Hz | (h19): | 0.04%   | -35.6° |
| 1200 Hz | (h20): | 0.02%   | -48.8° |
| 1260 Hz | (h21): | 0.01%   | 141.3° |
| 1320 Hz | (h22): | 0.02%   | -22.1° |
| 1380 Hz | (h23): | 0.37%   | 260.9° |
| 1440 Hz | (h24): | 0.08%   | 248.4° |
| 1500 Hz | (h25): | 0.24%   | -77.4° |
| 1560 Hz | (h26): | 0.17%   | 101.4° |
| 1620 Hz | (h27): | 0.07%   | 105.0° |
| 1680 Hz | (h28): | 0.09%   | 199.5° |
| 1740 Hz | (h29): | 0.12%   | 40.4°  |
| 1800 Hz | (h30): | 0.04%   | 45.4°  |
| 1860 Hz | (h31): | 0.03%   | 129.1° |
| 1920 Hz | (h32): | 0.02%   | 34.1°  |
| 1980 Hz | (h33): | 0.02%   | 55.4°  |
| 2040 Hz | (h34): | 0.01%   | 48.0°  |
| 2100 Hz | (h35): | 0.02%   | 71.7°  |
| 2160 Hz | (h36): | 0.01%   | 53.9°  |
| 2220 Hz | (h37): | 0.09%   | 109.7° |
| 2280 Hz | (h38): | 0.00%   | 84.1°  |
| 2340 Hz | (h39): | 0.01%   | 73.0°  |
| 2400 Hz | (h40): | 0.00%   | 71.5°  |
| 2460 Hz | (h41): | 0.06%   | 84.2°  |
| 2520 Hz | (h42): | 0.00%   | 54.4°  |
| 2580 Hz | (h43): | 0.55%   | -31.3° |
| 2640 Hz | (h44): | 0.00%   | 76.8°  |
| 2700 Hz | (h45): | 0.00%   | 39.7°  |
| 2760 Hz | (h46): | 0.00%   | 72.4°  |
| 2820 Hz | (h47): | 0.43%   | -41.5° |
| 2880 Hz | (h48): | 0.00%   | 76.5°  |
| 2940 Hz | (h49): | 0.04%   | 213.5° |

Figura 27 - Lista das distorções individuais de corrente com implementação do filtro de 5ª ordem.

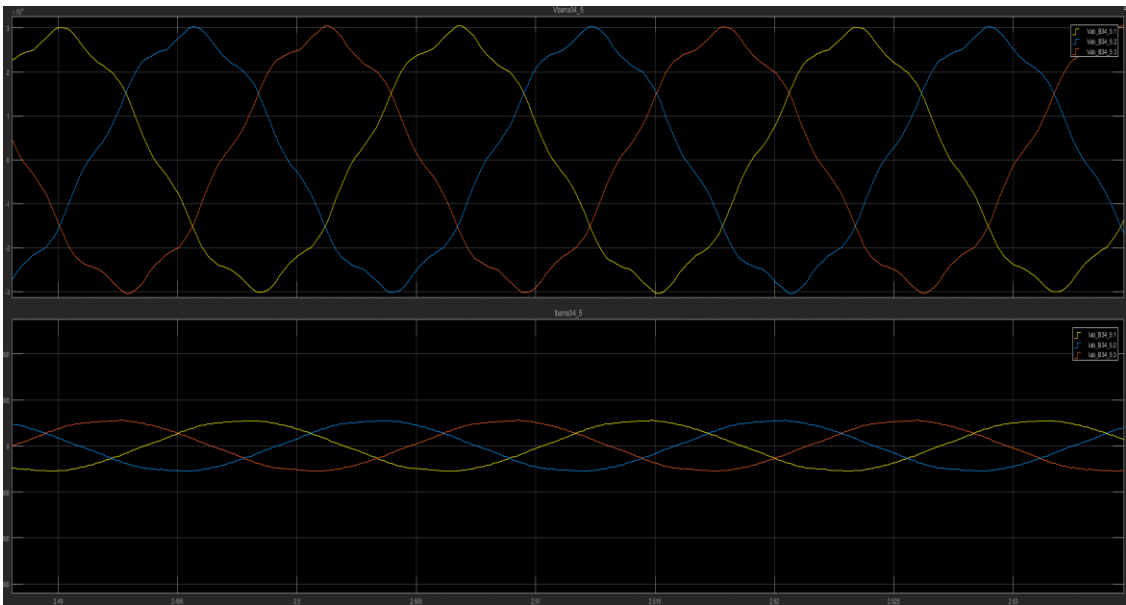


Figura 28 - Ondas de tensão e corrente na barra da subestação implementada o filtro 5ª ordem.

Sendo assim, conclui-se que não se deve ser implementado o filtro de 5ª ordem antes do filtro de 7ª ordem, pois o mesmo pode aumentar a distorção harmônica total de tensão e corrente.

### 5.2.2 Caso com a implementação do filtro de 7ª ordem

Conforme atestado no item anterior, a implementação do filtro de 5ª ordem está fora de cogitação, sendo assim, serão aferidas as simulações do sistema implementando o filtro de 7ª ordem em paralelo com o banco de capacitores de 6MVAR, de modo a continuar suprindo a potência reativa necessária da barra em questão.

A Figura 29 representa o *FFT* de tensão do sistema simulado implementando somente o filtro 7ª ordem em paralelo com o banco de capacitores de 6MVAR. É válido ressaltar que a distorção total diminuiu para um valor aceitável conforme os Procedimentos de Rede da ONS [7], sendo que a mesma se encontra em 2,9% com um limite de 3%.

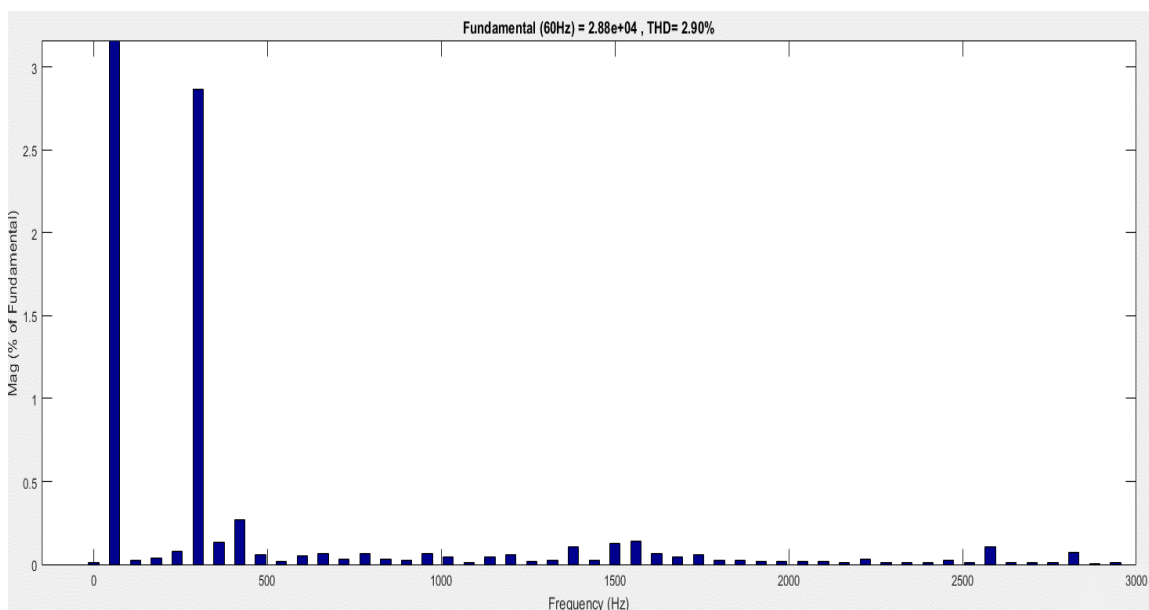


Figura 29 - FFT de tensão na barra de 34,5kV da Subestação do Calango 1,3 com o filtro de 7ª ordem

```

Sampling time      = 1e-06 s
Samples per cycle  = 16667
DC component       = 2.352
Fundamental        = 2.88e+04 peak (2.036e+04 rms)
THD                = 2.90%
  
```

|                 |         |        |
|-----------------|---------|--------|
| 0 Hz (DC) :     | 0.01%   | 270.0° |
| 60 Hz (Fnd) :   | 100.00% | -53.8° |
| 120 Hz (h2) :   | 0.02%   | 208.7° |
| 180 Hz (h3) :   | 0.04%   | -51.5° |
| 240 Hz (h4) :   | 0.08%   | 228.4° |
| 300 Hz (h5) :   | 2.87%   | 52.9°  |
| 360 Hz (h6) :   | 0.14%   | 167.3° |
| 420 Hz (h7) :   | 0.27%   | 195.0° |
| 480 Hz (h8) :   | 0.06%   | 102.7° |
| 540 Hz (h9) :   | 0.02%   | 219.8° |
| 600 Hz (h10) :  | 0.05%   | 144.4° |
| 660 Hz (h11) :  | 0.06%   | -38.5° |
| 720 Hz (h12) :  | 0.03%   | 244.9° |
| 780 Hz (h13) :  | 0.07%   | -36.0° |
| 840 Hz (h14) :  | 0.03%   | 38.3°  |
| 900 Hz (h15) :  | 0.02%   | -68.4° |
| 960 Hz (h16) :  | 0.06%   | 168.1° |
| 1020 Hz (h17) : | 0.05%   | -3.4°  |
| 1080 Hz (h18) : | 0.01%   | 37.0°  |
| 1140 Hz (h19) : | 0.04%   | 43.6°  |
| 1200 Hz (h20) : | 0.06%   | 75.9°  |
| 1260 Hz (h21) : | 0.02%   | -80.5° |
| 1320 Hz (h22) : | 0.02%   | 225.1° |
| 1380 Hz (h23) : | 0.11%   | -0.9°  |
| 1440 Hz (h24) : | 0.03%   | -1.2°  |
| 1500 Hz (h25) : | 0.12%   | 10.0°  |
| 1560 Hz (h26) : | 0.14%   | 192.3° |
| 1620 Hz (h27) : | 0.06%   | 190.0° |
| 1680 Hz (h28) : | 0.04%   | 256.5° |
| 1740 Hz (h29) : | 0.06%   | 128.7° |
| 1800 Hz (h30) : | 0.03%   | 151.0° |
| 1860 Hz (h31) : | 0.03%   | 155.1° |
| 1920 Hz (h32) : | 0.02%   | 157.2° |
| 1980 Hz (h33) : | 0.02%   | 166.0° |
| 2040 Hz (h34) : | 0.02%   | 168.0° |
| 2100 Hz (h35) : | 0.02%   | 162.2° |
| 2160 Hz (h36) : | 0.01%   | 157.0° |
| 2220 Hz (h37) : | 0.03%   | 155.2° |
| 2280 Hz (h38) : | 0.01%   | 173.1° |
| 2340 Hz (h39) : | 0.01%   | 166.7° |
| 2400 Hz (h40) : | 0.01%   | 165.3° |

Figura 30 - Lista dos valores individuais de distorção de tensão na barra após instalação do filtro de 7ª ordem

O valor de tensão percentual que se encontra na sétima ordem, é devido ao fato de que o mesmo foi projetado para ressonar na frequência de 6,9 e não em 7ª devido a dessintonia, logo, em sétima ordem o valor da reatância do mesmo será um valor pequeno somado a resistência especificada para o filtro mediante o fator de qualidade. Sobretudo, o valor de corrente a ser drenada pelo filtro é alto devido a frequência próxima de sintonia do mesmo, ocasionando assim a queda visível na figura acima. Porém o valor é muito pequeno, conforme a Figura 30, da ordem de 0,27%.

Na Figura 30 se encontram as distorções individuais de tensão da barra após a instalação do filtro. É importante a verificação de que o limite total se encontra muito próximo do limite estabelecido pelos Procedimentos de Rede [7], logo, a indicação é que seja instalado juntamente com o filtro de 7ª, o filtro de 5ª ordem, que possui sua contribuição ainda nessa situação de 2,87%, maior que seu valor de limite individual que é de 1,5%.

A distorção individual de corrente em 2,27% da nominal se encontra na Figura 31, afim de confirmamos o valor alto drenado em 7ª ordem, e o valor considerável de corrente que circula de 5ª ordem harmônica no sistema.

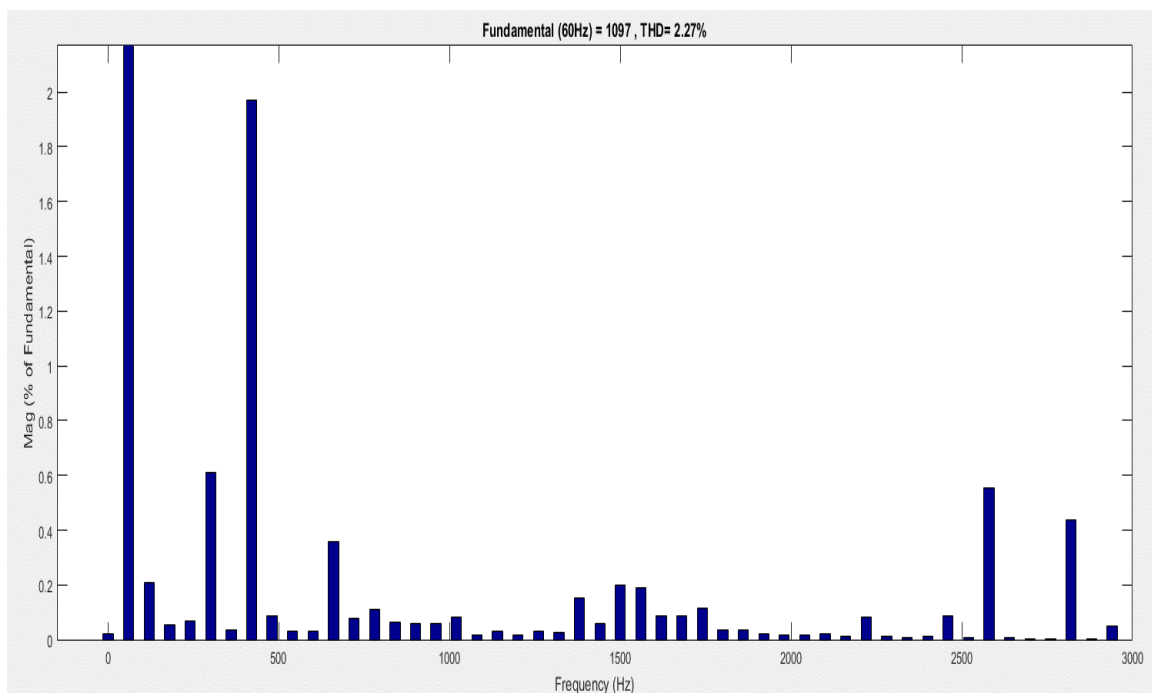


Figura 31 - FFT de corrente da barra de 34,5kV onde será instalado o filtro de 7ª ordem harmônica

### 5.2.3.Caso com a implementação dos filtros de 5ª e 7ª ordens

Finalizando os casos, a análise dos dois filtros instalados na barra de 34,5kV da subestação do Calangos 1,3, de modo a mitigar as distorções harmônicas existentes atualmente na mesma. As simulações foram realizadas com os dois filtros instalados em paralelo na barra, fornecendo assim, juntos a potência reativa necessária na barra.

A distorção total de tensão após a implementação dos 2 filtros se encontra na Figura 32, sendo a mesma de 1%, ou seja, mediante o limite dos Procedimentos de Rede da ONS [7], o valor é satisfatório. Na Figura 33, segue a lista das distorções individuais de tensão de cada ordem harmônica.

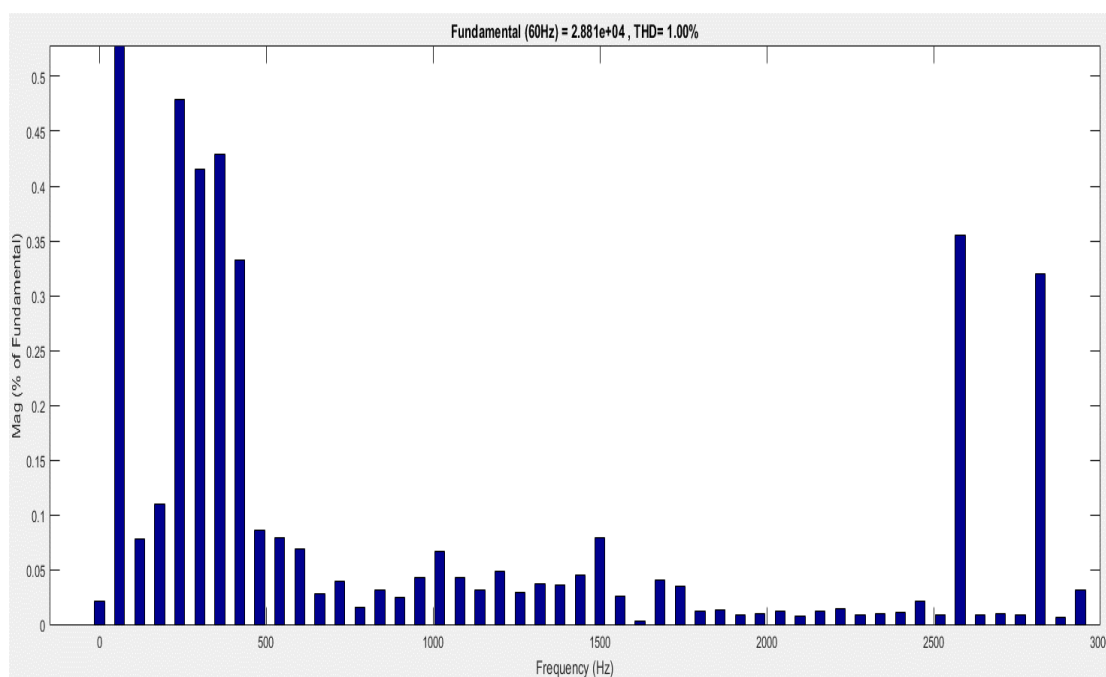


Figura 32 - FFT da barra de 34,5kV da Subestação do Calangos 1,3 com os 2 filtros de 5ª e 7ª ordens instalados

|                   |                                  |
|-------------------|----------------------------------|
| Sampling time     | = 1e-06 s                        |
| Samples per cycle | = 16667                          |
| DC component      | = 6.141                          |
| Fundamental       | = 2.881e+04 peak (2.037e+04 rms) |
| THD               | = 1.00%                          |

|                |         |        |
|----------------|---------|--------|
| 0 Hz (DC):     | 0.02%   | 270.0° |
| 60 Hz (Fnd):   | 100.00% | -53.8° |
| 120 Hz (h2):   | 0.08%   | -77.9° |
| 180 Hz (h3):   | 0.11%   | -40.6° |
| 240 Hz (h4):   | 0.48%   | -27.0° |
| 300 Hz (h5):   | 0.41%   | 123.7° |
| 360 Hz (h6):   | 0.43%   | 143.4° |
| 420 Hz (h7):   | 0.33%   | 183.2° |
| 480 Hz (h8):   | 0.09%   | 175.8° |
| 540 Hz (h9):   | 0.08%   | 151.0° |
| 600 Hz (h10):  | 0.07%   | 192.7° |
| 660 Hz (h11):  | 0.03%   | 41.6°  |
| 720 Hz (h12):  | 0.04%   | 162.3° |
| 780 Hz (h13):  | 0.02%   | 168.6° |
| 840 Hz (h14):  | 0.03%   | 167.3° |
| 900 Hz (h15):  | 0.02%   | 175.4° |
| 960 Hz (h16):  | 0.04%   | 178.0° |
| 1020 Hz (h17): | 0.07%   | 147.7° |
| 1080 Hz (h18): | 0.04%   | 142.1° |
| 1140 Hz (h19): | 0.03%   | 182.6° |
| 1200 Hz (h20): | 0.05%   | 166.8° |
| 1260 Hz (h21): | 0.03%   | 167.8° |
| 1320 Hz (h22): | 0.04%   | 165.4° |
| 1380 Hz (h23): | 0.04%   | 146.5° |
| 1440 Hz (h24): | 0.05%   | 164.8° |
| 1500 Hz (h25): | 0.08%   | 163.9° |
| 1560 Hz (h26): | 0.03%   | -5.6°  |
| 1620 Hz (h27): | 0.00%   | 68.1°  |
| 1680 Hz (h28): | 0.04%   | 128.0° |
| 1740 Hz (h29): | 0.04%   | 258.6° |
| 1800 Hz (h30): | 0.01%   | 239.9° |
| 1860 Hz (h31): | 0.01%   | 217.4° |
| 1920 Hz (h32): | 0.01%   | 190.4° |
| 1980 Hz (h33): | 0.01%   | 191.9° |
| 2040 Hz (h34): | 0.01%   | 192.7° |
| 2100 Hz (h35): | 0.01%   | 2.0°   |
| 2160 Hz (h36): | 0.01%   | 182.1° |
| 2220 Hz (h37): | 0.01%   | -6.5°  |
| 2280 Hz (h38): | 0.01%   | 190.0° |
| 2340 Hz (h39): | 0.01%   | 185.0° |
| 2400 Hz (h40): | 0.01%   | 211.6° |

Figura 33 - Lista de distorções harmônicas individuais de tensão após a implementação dos 2 filtros

Como atestado na Figura 33, não existem valores de distorções harmônicas individuais superiores aos 0,5%. Sendo assim, não há valores que ultrapassem os limites inferiores individuais do Procedimentos de Redes [7]. Contudo, conclui-se que, a implementação dos dois filtros de 5ª e 7ª ordens, na barra de 34,5kV da subestação do Calangos 1,3 é satisfatório, mitigando consideravelmente os problemas considerados. Os valores de 40ª a 49ª ordens não se encontram pois são desprezíveis.

Analisando a distorção da corrente na barra, se espera que os valores de 5ª e 7ª ordens sejam consideráveis, como representado pela Figura 34, a distorção total se encontra em 2,25% da nominal, um valor consideravelmente razoável para a grandeza do sistema e as cargas em si existentes. Por ora, encontra-se na Figura 35, os gráficos de tensão e corrente na barra após a implementação dos filtros.

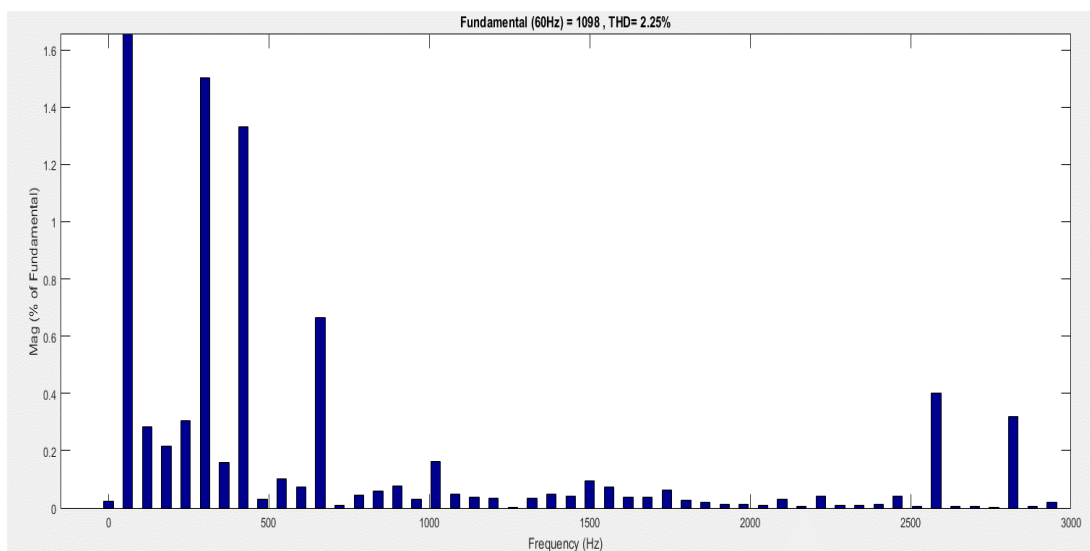


Figura 34 - FFT de corrente na barra após a implementação dos filtros de 5ª e 7ª ordens harmônicas

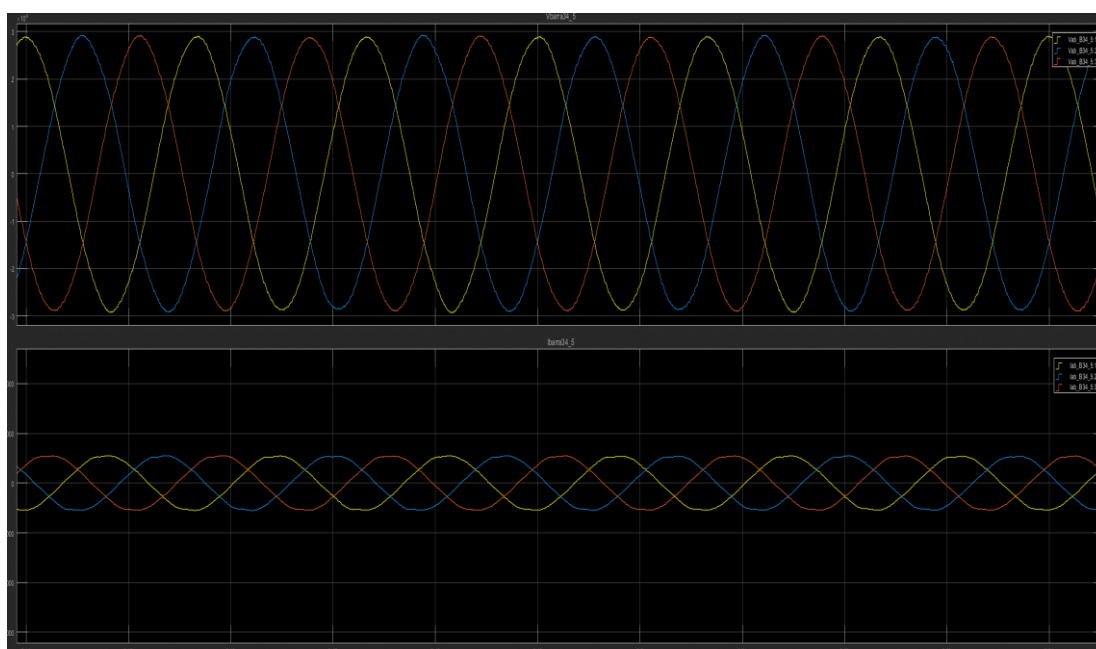


Figura 35 - Tensão e corrente na barra de 34,5kV após a implementação dos filtros harmônicos projetados

Contudo, na Figura 35, se torna visível a melhoria do aspecto da onda de tensão, ora exposto sua distorção em apenas 1%, a onda se encontra basicamente senoidal. Reforçando assim o contentamento dos resultados dos projetos propostos neste trabalho, contudo faz se necessário um novo prógnostico após a transferência dos valores aos comerciais, de modo a sempre superar se ou igualar se aos resultados ora apresentados. Logo, como trabalho futuro, podemos citar as especificações comerciais dos filtros.

## 6. ESTUDOS ADICIONAIS: ANÁLISE DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DO SISTEMA

No que tange as avaliações das distorções harmônicas do sistema, ora realizados os estudos, constam nos capítulos anteriores os valores aferidos e os problemas encontrados através da análise de *FFT*. Após a identificação do problema foram propostas duas soluções, como estudos adicionais serão analisadas as respostas em frequência do sistema para diversos casos, vistos da barra de 34,5kV da subestação do Calangos 1 e 3 onde serão instalados os filtros projetados, afim de melhor discernimento correlacionando as situações encontradas anteriormente. Seguem na Tabela XII os casos a serem analisados suas respostas em frequência.

*Tabela XII - Situações simuladas as respostas em frequência do sistema.*

| Nº<br>Casos | BC Calango 1,3<br>[12MVar] | BC Calango 1,3<br>[6MVar] | BC Calango 2,4 e 5<br>[18MVar] | Filtro 5ª ordem<br>harmônica | Filtro 7ª ordem<br>harmônica |
|-------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1           | -                          | -                         | -                              | -                            | -                            |
| 2           | -                          | -                         | X                              | -                            | -                            |
| 3           | X                          | -                         | -                              | -                            | -                            |
| 4           | X                          | -                         | X                              | -                            | -                            |
| 5           | -                          | -                         | X                              | X                            | -                            |
| 6           | -                          | -                         | X                              | -                            | X                            |
| 7           | -                          | X                         | X                              | X                            | -                            |
| 8           | -                          | X                         | X                              | -                            | X                            |
| 9           | -                          | -                         | X                              | X                            | X                            |

Subsequentemente, se encontram os casos simulados e os resultados encontrados, de modo a respectiva comparação aos resultados encontrados nas análises das distorções. Vale ressaltar que dentre os casos simulados, os aerogeradores se encontram desconectados do sistema devido ao bloco de impedância do Matlab não considerar máquinas rotativas em seus cálculos de impedância, sendo assim, os mesmos serão desconsiderados. Tal ocorrência não será problema visto que a impedância dominante da rede é muito superior a das instalações do complexo.

## 6.1. Caso 1 – Sistema sem BC's e filtros

No primeiro caso o sistema será analisado sem a instalação do banco de capacitores e sem nenhum filtro instalado. Como não há nenhum banco de capacitores, sendo existentes no sistema os transformadores, cabos e as linhas, logo, o esperado é uma resposta indutiva, onde a impedância aumente com o aumento da frequência conforme a equação 7, exposta no item 5.1.1.

Nas Figuras 36 e 37 podemos verificar, conseqüentemente, a resposta em frequência da impedância do sistema e do ângulo da impedância conforme sua frequência. Conforme mencionado anteriormente, a resposta é coerente com o esperado, visto que o sistema se encontra sem banco de capacitores, sem os filtros e sem carga. Logo, a resposta esperada é puramente indutiva, em vista dos transformadores, linhas e cabos serem detentores de impedâncias predominantemente indutivas.

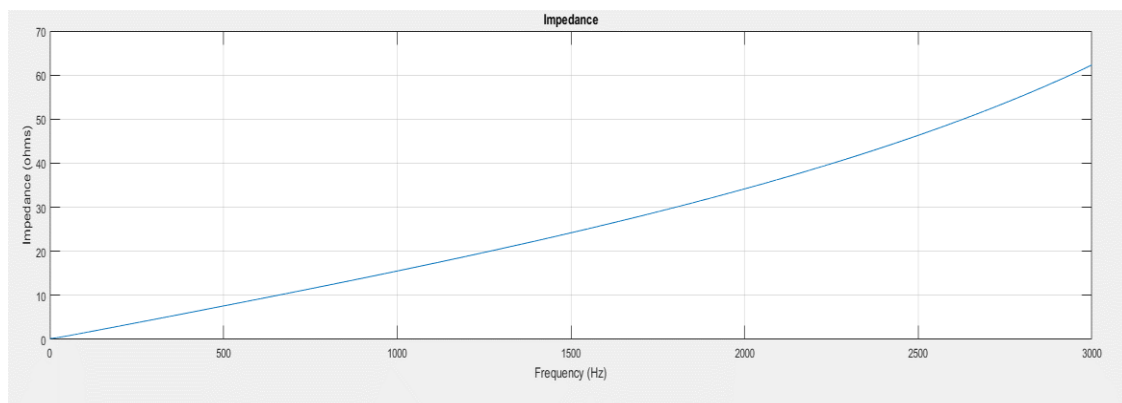


Figura 36 - Resposta do sistema sem banco de capacitores e sem filtros

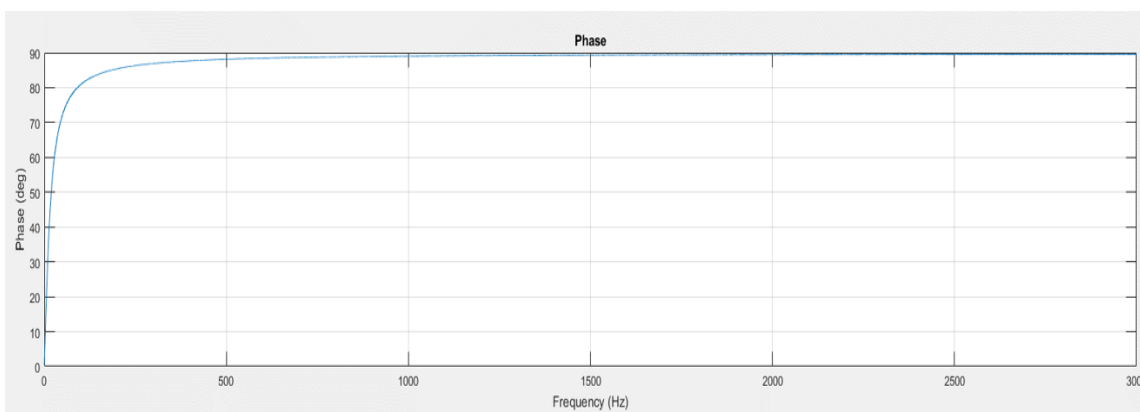


Figura 37 - Resposta do ângulo da impedância do sistema sem banco de capacitores e sem filtros

## 6.2. Caso 2 – Sistema apenas com banco de capacitores da Subestação dos Calangos 2,4 e 5.

Para finalidade de estudos, será simulada a situação em que a subestação do Calangos 1,3 esteja operando sem o BC, por motivos operacionais ou intempéries do sistema onde o mesmo esteja danificado.

De acordo com a Figura 38, verifica se uma ressonância paralela em torno da sétima ordem harmônica, sendo que conforme o “datatip” – leitor de pontos do *Matlab*, o mesmo se encontra em 385,7Hz que está em torno de 6,43ª ordem, sendo que seu valor de impedância está em 83,3  $\Omega$ (ohms), o que dependerá do percentual de corrente que passa no ramo em tal ordem harmônica para se tornar um problema de sobretensão na barra. Porém, como foi verificado nas simulações com os bancos das 2 subestações dos Calangos 2,4 e 5 e dos Calangos 1 e 3, tal resposta tende a ser um problema em 7ª ordem.

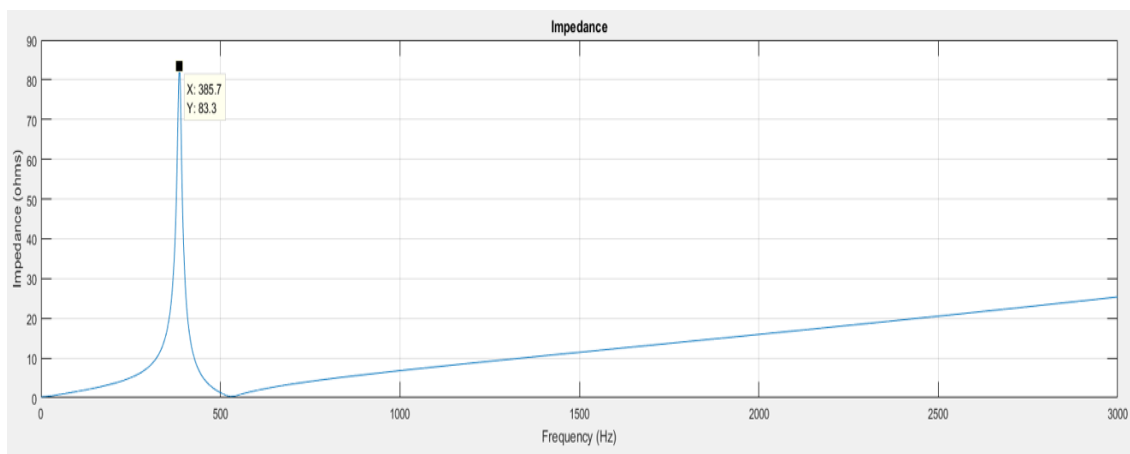


Figura 38 - Resposta do sistema sem BC do Calangos 1,3

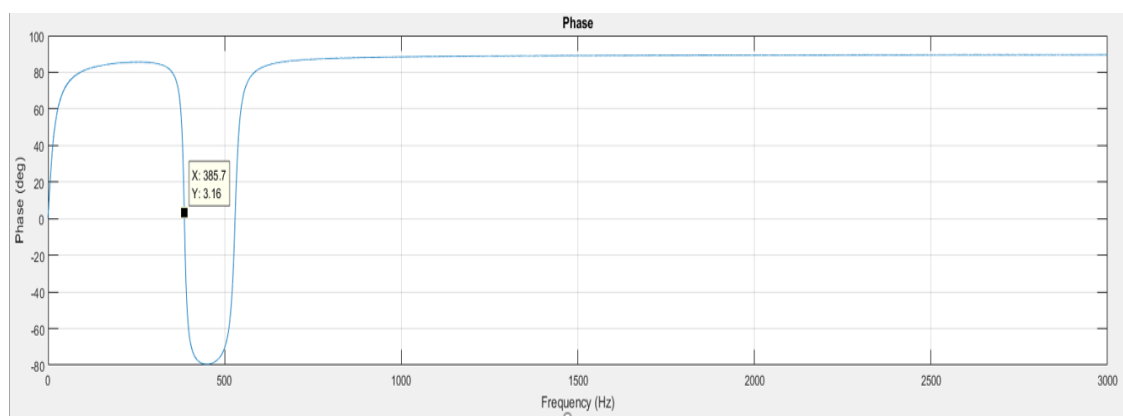


Figura 39 - Resposta do ângulo da impedância do sistema sem BC do Calangos 1,3.

### 6.3. Caso 3 - Sistema apenas com banco de capacitores da Subestação dos Calangos 1 e 3.

Ao contrário do caso 2, nessa situação problema o intuito é investigar a influência da desconexão do banco de capacitores instalado na subestação dos Calangos 2,4 e 5 sob a barra de baixa do Calango 1 e 3 onde todas as análises estão sendo realizadas, visto a necessidade de instalação dos filtros na mesma.

Na Figura 40 abaixo, é possível observar que o valor que se encontra em ressonância paralela é de 511,3Hz que corresponde a 8,52ª ordem. Seu valor de impedância é considerável, sendo de 256,5  $\Omega$ (ohms), contudo, como segue na Figura 41, os valores de correntes harmônicas percentuais em torno da 8ª e 9ª ordem são muito baixos, tornando assim as tensões das mesmas conforme apresentadas anteriormente na Figura 21 no item 4.2 desprezíveis.

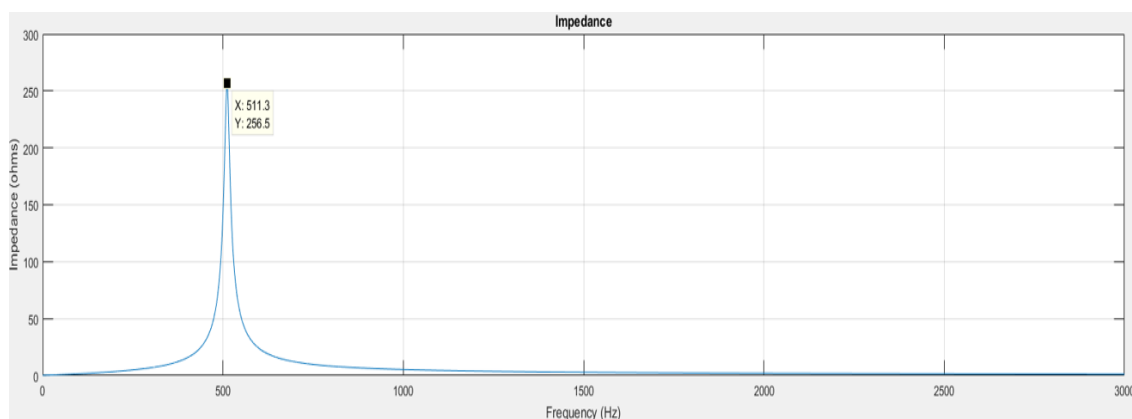


Figura 40 - Resposta em frequência sem o BC da subestação do Calangos 2,4 e 5

|                                     |         |         |        |
|-------------------------------------|---------|---------|--------|
| Sampling time = 1e-06 s             |         |         |        |
| Samples per cycle = 16667           |         |         |        |
| DC component = 0.4814               |         |         |        |
| Fundamental = 1076 peak (761.1 rms) |         |         |        |
| THD = 1.46%                         |         |         |        |
| 0 Hz                                | (DC) :  | 0.04%   | 270.0° |
| 60 Hz                               | (Fnd) : | 100.00% | 136.0° |
| 120 Hz                              | (h2) :  | 0.18%   | 68.6°  |
| 180 Hz                              | (h3) :  | 0.03%   | 14.1°  |
| 240 Hz                              | (h4) :  | 0.09%   | 28.0°  |
| 300 Hz                              | (h5) :  | 0.83%   | 77.1°  |
| 360 Hz                              | (h6) :  | 0.06%   | 110.3° |
| 420 Hz                              | (h7) :  | 0.77%   | 236.2° |
| 480 Hz                              | (h8) :  | 0.03%   | 221.2° |
| 540 Hz                              | (h9) :  | 0.04%   | 72.0°  |
| 600 Hz                              | (h10) : | 0.04%   | 265.2° |
| 660 Hz                              | (h11) : | 0.15%   | 62.2°  |
| 720 Hz                              | (h12) : | 0.05%   | -38.3° |
| 780 Hz                              | (h13) : | 0.20%   | -39.0° |
| 840 Hz                              | (h14) : | 0.04%   | 50.3°  |
| 900 Hz                              | (h15) : | 0.04%   | 2.2°   |
| 960 Hz                              | (h16) : | 0.01%   | 218.6° |

Figura 41 - THD de corrente na barra de 34,5kV sem o BC da subestação Calangos 2,4 e 5.

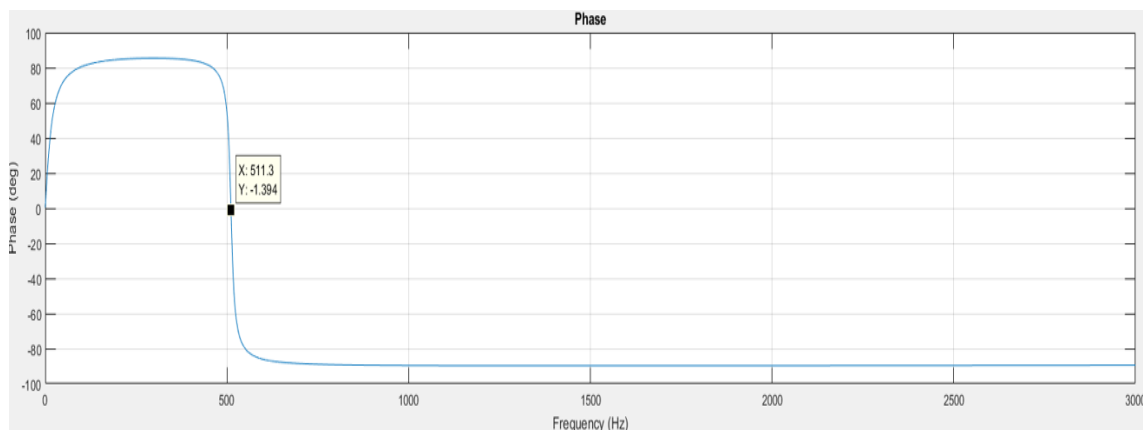


Figura 42 - Resposta do ângulo da impedância sem a BC da subestação do Calangos 2,4 e 5

#### 6.4. Caso 4 – Sistema operando com os BC's das subestações do Calangos 1,3 e Calangos 2,4 e 5

Afim de obter a impedância do sistema antes da instalação do filtro, o caso 4 é o que representa a situação atual do sistema, onde já se encontram em operação as 2 subestações com os 2 bancos de capacitores um de 18MVar instalado na subestação do Calangos 2,4 e 5 e um e 12 MVar instalado na subestação do Calangos 1,3.

Conforme a resposta em frequência expressa na Figura 43, é possível verificar que na frequência de 333Hz ocorre uma ressonância paralela no sistema, visto da barra de 34,5kV da subestação do Calangos 1,3, tal ressonância ocorre em torno da 5,55ª ordem. Verifica-se outra ressonância paralela em torno da 13,63ª ordem harmônica e uma ressonância série em 530Hz, em torno de 8,85ª ordem. De acordo com a Figura 19 que representa o percentual individual de corrente harmônico, é perceptível que as ordens relevantes são de 5ª e 7ª ordens, portanto as demais ordens não representam maiores perigos devido ao baixo percentual de corrente harmônica.

A Figura 44 representa os ângulos das impedâncias ressonantes em destaque, verifica se que em 530,7Hz e 817,9Hz as mesmas possuem dominância capacitiva, enquanto na ordem de 333Hz a mesma é levemente indutiva, próxima de zero a ressonância série.

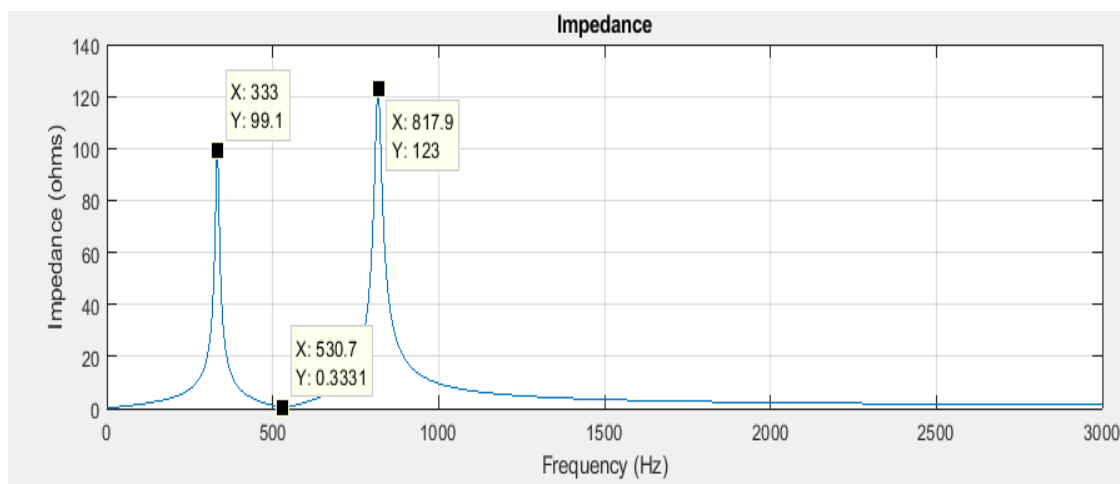


Figura 43 - Resposta em frequência do sistema completo sem carga

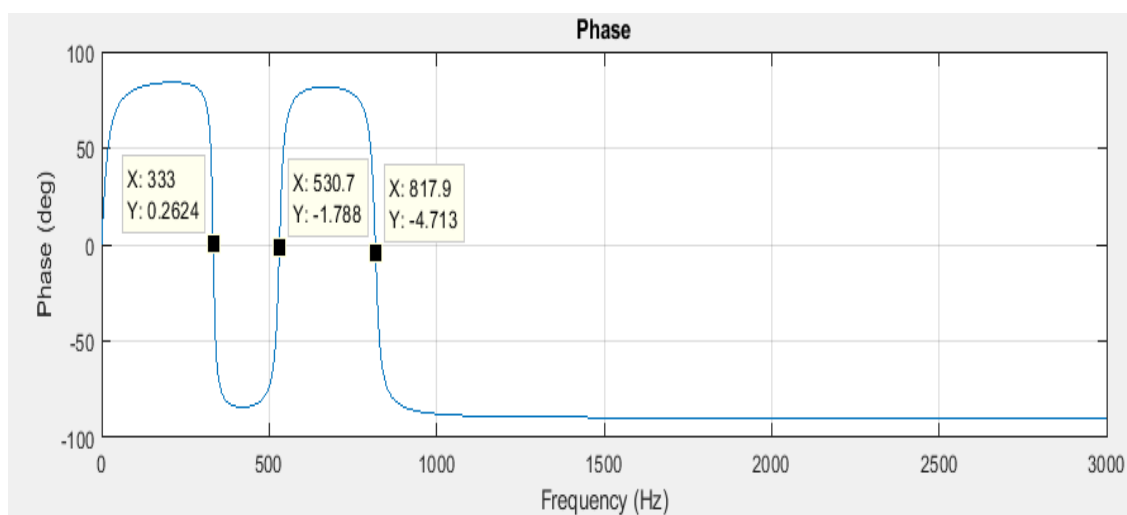


Figura 44 - Ângulo da impedância da resposta em frequência do sistema completo

### 6.5. Caso 5 - Sistema operando com filtro de 5ª ordem, sem BC de 6MVar em Calangos 1,3 e com BC de 18MVar em Calangos 2,4 e 5.

Afim de analisar as hipóteses de instalação dos filtros, será verificada a resposta em frequência do sistema para avaliar a possibilidade da instalação do filtro de 5ª ordem, sem o banco de capacitores de 6MVar complementar da barra analisada. Posteriormente, no caso 7, será analisada a hipótese da instalação do filtro com o banco de capacitores.

Como espera se, há uma ressonância série em 294Hz, devido ao filtro sintonizado em 4,9ª ordem na Figura 45. Outras ressonâncias paralelas em torno

de 4,5ª e 6,85ª ordem, o que já se esperava, pois conforme verificado anteriormente, a instalação do filtro de 5ª ordem acentua a ressonância em 7ª e conforme seu alto percentual individual de corrente, conforme na Figura 27, ocasionará em um alto valor de distorção harmônica de tensão. Na Figura 46 é possível analisar os ângulos das impedâncias em suas respectivas ordens no caso do filtro de 5ª sem o BC da barra.

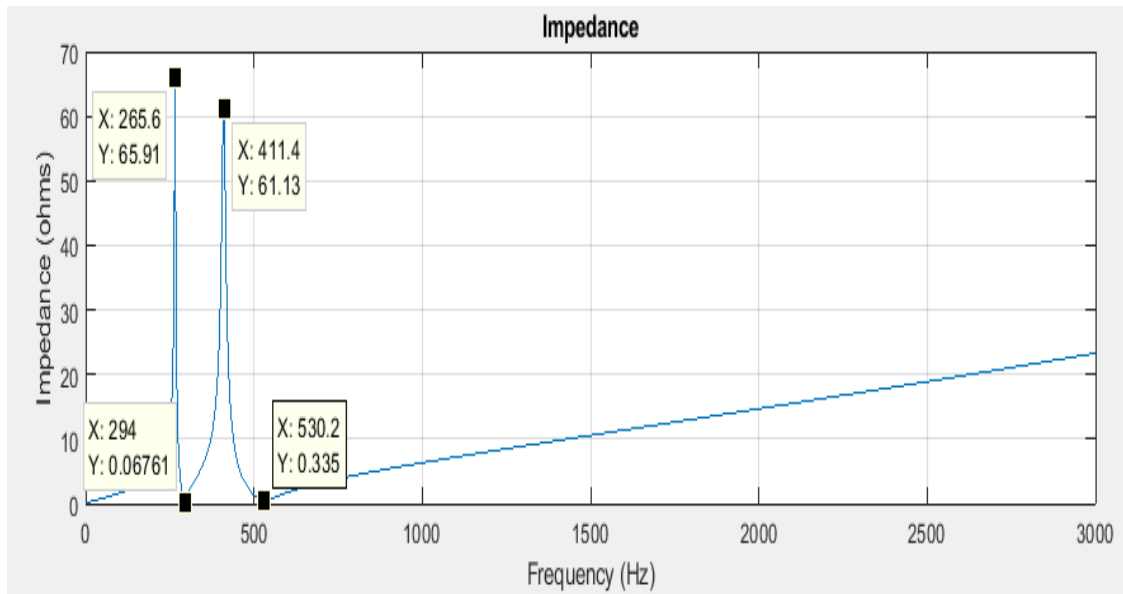


Figura 45 - Resposta em frequência referente ao caso 5

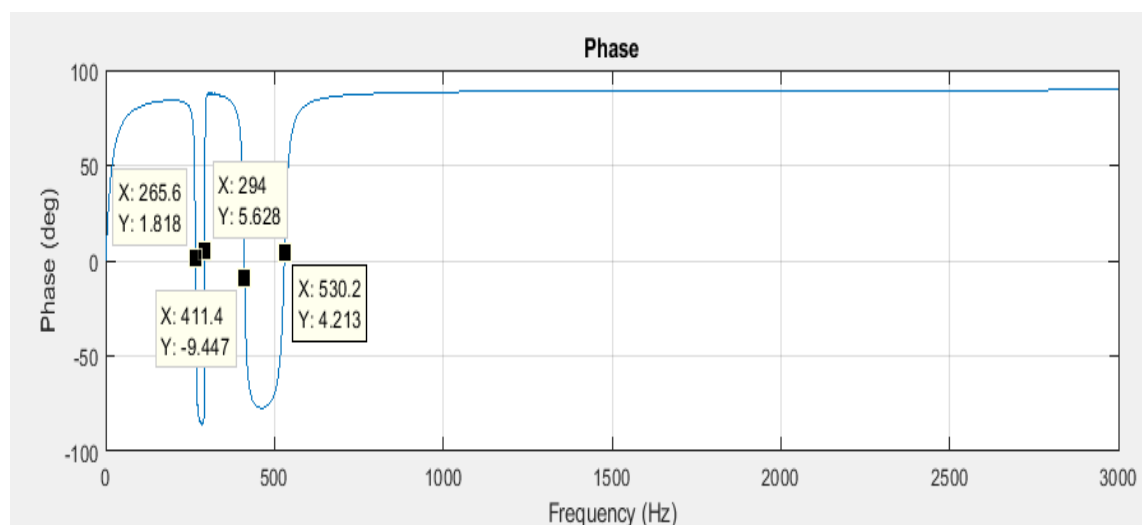


Figura 46 - Ângulo da impedância referente ao caso 5

### 6.6. Caso 6 - Sistema operando com filtro de 7ª ordem, sem BC de 6MVar em Calangos 1,3 e com BC de 18MVar em Calangos 2,4 e 5.

De modo a aferir qual a melhor hipótese de instalação dos filtros, será verificada a resposta em frequência do sistema para avaliar a possibilidade da instalação do filtro de 7ª ordem, sem o banco de capacitores de 6MVar complementar da potência reativa capacitiva necessária na barra analisada. Posteriormente, no caso 8, será analisada a hipótese da instalação do filtro projetado através da potência reativa capacitiva total necessária.

Conforme a Figura 47, verificamos a ressonância série do filtro especificado para a 7ª ordem com dessintonia de 0,1, sendo especificado em 414Hz. Uma ressonância paralela é verificada em 5,35ª ordem harmônica, logo, caso exista um valor considerável de corrente em torno de 5ª ordem, será aumentado o valor da distorção harmônica de tensão. A ressonância paralela ocorrida em 459,9Hz, em torno de 7,66ª ordem pode ser desprezível devido ao seu baixo valor de impedância.

Na Figura 48, verifica se os ângulos das impedâncias analisadas na Figura 47. Observa-se que após a frequência de 531,6Hz o sistema se estabiliza em uma impedância indutiva crescente com a frequência.

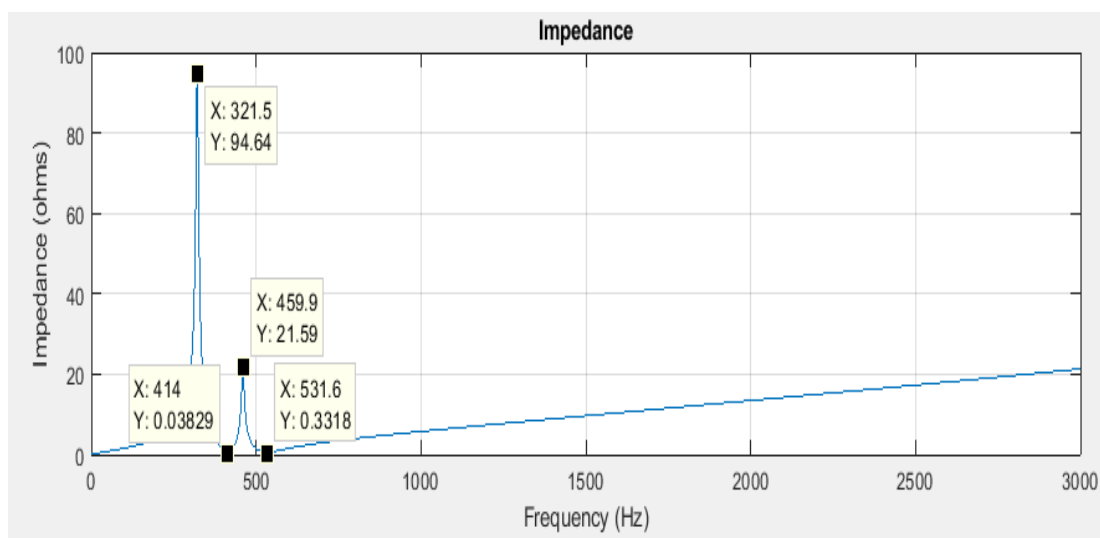


Figura 47 - Resposta em frequência referente ao caso 6

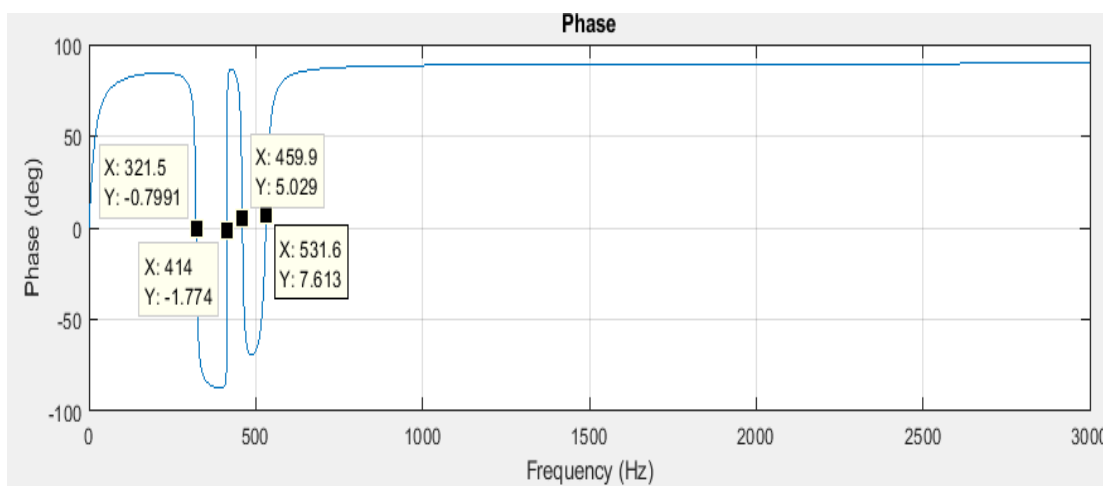


Figura 48 - Ângulos das impedâncias referentes ao caso 6

### 6.7. Caso 7 - Sistema operando com filtro de 5ª ordem, com BC de 6MVAR em Calangos 1,3 e 18MVAR em Calangos 2,4 e 5.

Mediante praticidade, os casos mais favoráveis ao acontecimento são a instalação de um filtro e após o outro sem a remoção do outro banco de capacitores de 6MVAR.

Anteriormente, neste trabalho no item 5.2.1, fora concluído que a instalação do filtro de 5ª ordem com desintonia de 0,1 acentua a distorção harmônica em torno da 7ª ordem harmônica, sendo assim, indicou se a instalação do filtro de 7ª antecedente ao de 5ª ordem.

A Figura 49 representa a resposta em frequência correspondente a instalação do filtro de 5ª ordem com dessintonia de 0,1, conforme representado pela Figura 27, anteriormente, o percentual de corrente harmônica circulante no sistema de ordem 7ª é alto, sendo de 1,26%, e seu valor de impedância considerável, em torno de 77,66Ω(ohms) ocorrendo uma sobretensão harmônica de 5,24% na 7ª ordem.

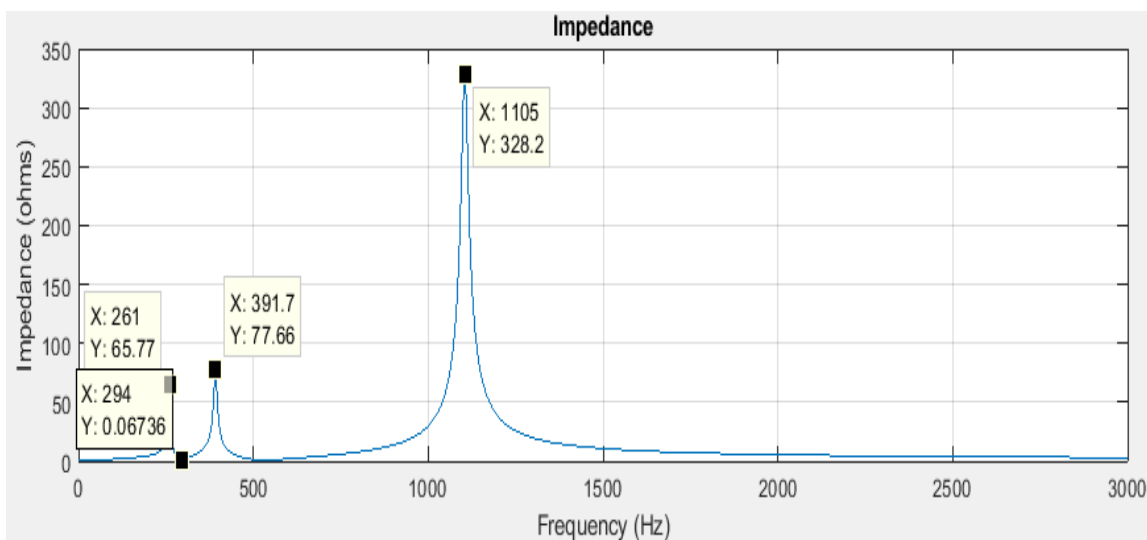


Figura 49 - Resposta em frequência correspondente ao caso 7

O valor da impedância em torno de 1105Hz, sendo entre 18ª e 19ª ordens harmônicas é consideravelmente alto, porém seus respectivos percentuais harmônicas são muito baixos, da ordem de 0,03% e 0,04% conforme a Figura 25 no capítulo 5, não representando assim, perigos de sobretensão harmônicas no sistema devido a tal ressonância paralela.

Na Figura 50 são representados os valores dos ângulos das respectivas impedâncias da Figura 49. Interessante ressaltar que o ângulo da impedância a partir de 1105Hz se torna de caráter capacitivo, apesar de que o mesmo é inversamente proporcional a frequência, considerando que o banco de capacitor é capacitivo o tempo todo e conforme o equivalente do sistema, pode ser que o mesmo em paralelo com a indutância ainda sim seja capacitivo, devido ao seu valor muito pequeno.

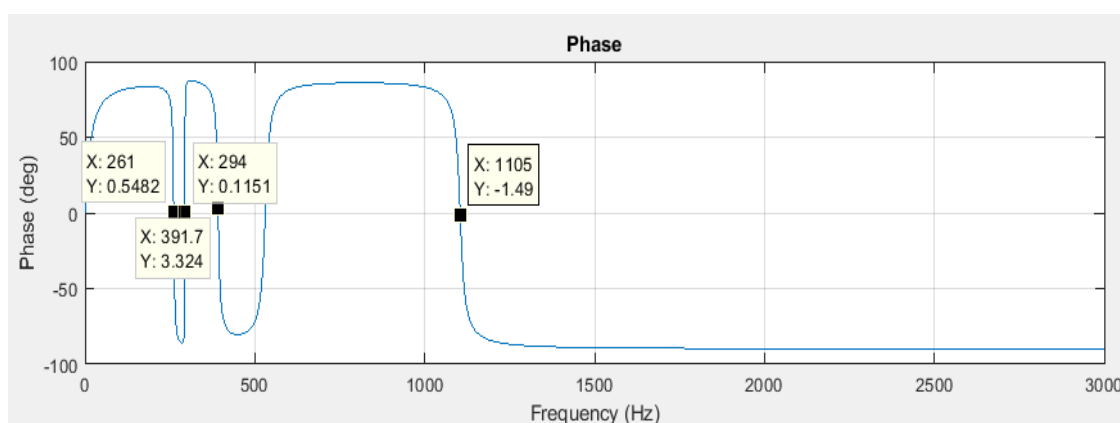


Figura 50 - Ângulos das impedâncias das respostas em frequência referentes ao caso 7

## 6.8. Caso 8 - Sistema operando com filtro de 7ª ordem, com BC de 6MVar em Calangos 1,3 e 18MVar em Calangos 2,4 e 5.

De posse das informações da Figura 51, podemos relacionar as medidas referentes a 7ª com desintonia de 0,1 ser filtrada em 414Hz, ao valor de impedância considerável em aproximadamente na 5ª ordem, na frequência de 305,6Hz. Conforme a Figura 52, o percentual de corrente é de 0,61% apresentando uma tensão harmônica de 5ª ordem de 2,87% da nominal do sistema de acordo com a Figura 30.

O alto valor de impedância referente a frequência de 1145Hz, correspondente a 19ª ordem harmônica, entretanto, não aparenta riscos de sobretensão devido a quantidade de distorção harmônica individual referente a esta ordem no sistema, pois o valor de corrente harmônica individual na ordem, conforme a Figura 52 é de 0,03%.

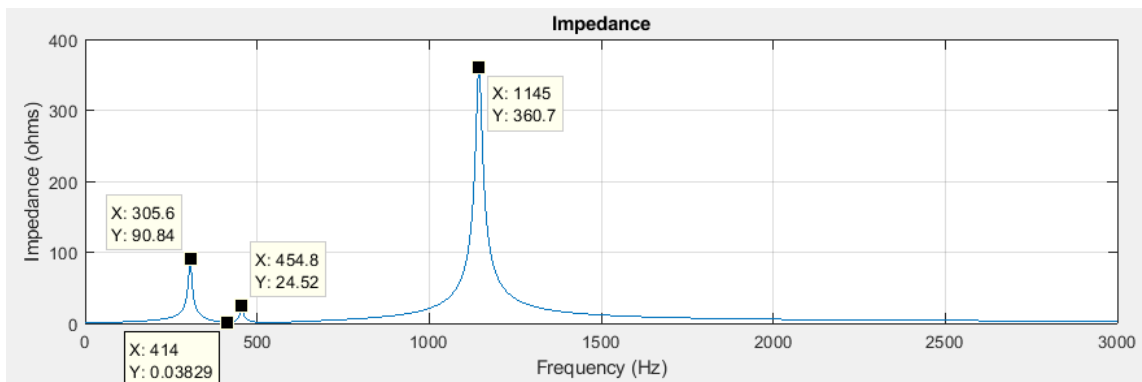


Figura 51 - Resposta em frequência referente ao caso 8

|                                     |        |         |        |
|-------------------------------------|--------|---------|--------|
| Sampling time = 1e-06 s             |        |         |        |
| Samples per cycle = 16667           |        |         |        |
| DC component = 0.2591               |        |         |        |
| Fundamental = 1097 peak (775.5 rms) |        |         |        |
| THD = 2.27%                         |        |         |        |
| 0 Hz                                | (DC):  | 0.02%   | 270.0° |
| 60 Hz                               | (Fnd): | 100.00% | 137.7° |
| 120 Hz                              | (h2):  | 0.21%   | -62.8° |
| 180 Hz                              | (h3):  | 0.06%   | -64.2° |
| 240 Hz                              | (h4):  | 0.07%   | -59.1° |
| 300 Hz                              | (h5):  | 0.61%   | 193.6° |
| 360 Hz                              | (h6):  | 0.03%   | -36.1° |
| 420 Hz                              | (h7):  | 1.97%   | -54.8° |
| 480 Hz                              | (h8):  | 0.09%   | 51.7°  |
| 540 Hz                              | (h9):  | 0.03%   | -87.2° |
| 600 Hz                              | (h10): | 0.03%   | -49.5° |
| 660 Hz                              | (h11): | 0.36%   | 213.0° |
| 720 Hz                              | (h12): | 0.08%   | 6.1°   |
| 780 Hz                              | (h13): | 0.11%   | -13.8° |
| 840 Hz                              | (h14): | 0.06%   | 141.5° |
| 900 Hz                              | (h15): | 0.06%   | 35.1°  |
| 960 Hz                              | (h16): | 0.06%   | -84.5° |
| 1020 Hz                             | (h17): | 0.08%   | 197.0° |
| 1080 Hz                             | (h18): | 0.02%   | 251.7° |
| 1140 Hz                             | (h19): | 0.03%   | -83.3° |
| 1200 Hz                             | (h20): | 0.02%   | 265.2° |

Figura 52 - Lista de percentual de distorção de corrente harmônica individual para o caso 8

Na Figura 53 são representados os valores dos ângulos das respectivas impedâncias da Figura 51. Igualmente ao caso anterior o mesmo se torna de dominância capacitiva após a ordem de 1145Hz, provavelmente pelo equivalente do sistema ser predominantemente capacitivo nessa situação.

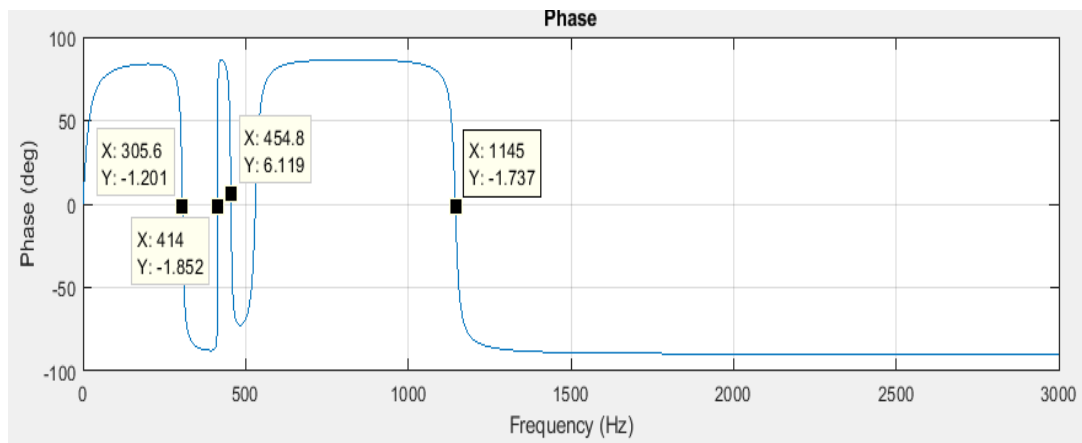


Figura 53 - Ângulo da impedância do sistema equivalente ao caso 8

### 6.9. Caso 9 – Sistema operando com filtros de 5ª e 7ª ordens e BC de 18MVar em Calangos 2,4 e 5.

Por fim, o último caso a ser analisado será o caso solução, onde os dois filtros já estarão instalados em operação. Afim de procurar casos em que o mesmo possa ocasionar problemas ou impactos na rede segue a Figura 54.

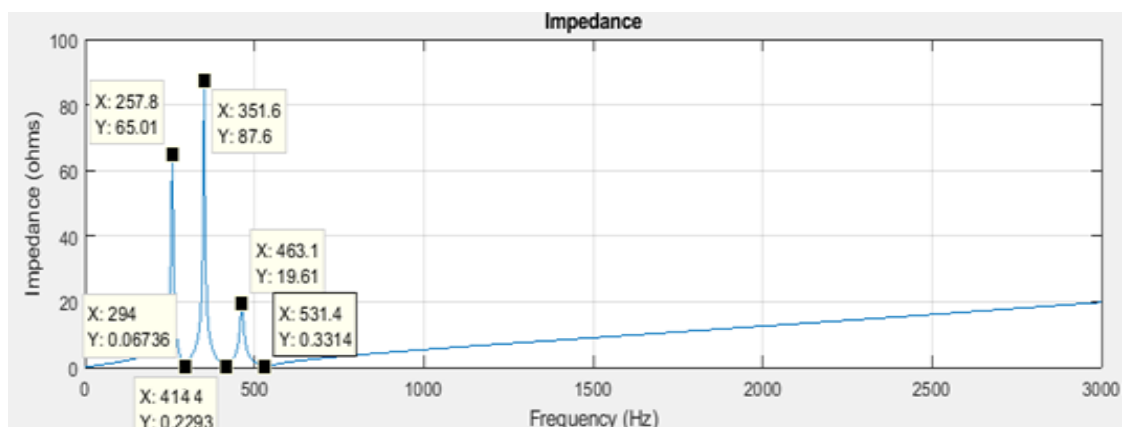


Figura 54 - Resposta em frequência referente ao caso 9

Conforme a Figura 54, são visíveis as ressonâncias paralelas que ocorrem anteriormente as ressonâncias séries projetadas para os filtros de 5ª e 7ª ordens, com suas dessintonias igualitárias de 0,1, correspondentes as frequências de 294Hz e 414Hz. Ocorrem ressonâncias paralelas nas frequências de 257,8Hz sendo referente a 4,3ª ordem harmônica e 351,6Hz referente a 5,86ª ordem harmônica.

Comparando os resultados ora aferidos com a lista de distorções harmônicas individuais de corrente da Figura 55, suas respectivas ordens harmônicas possuem percentuais muito baixos, sendo 0,3% em 4ª ordem e 0,16% em 6ª ordem harmônica, logo, podem ser desprezados os valores de tensão percentuais individuais conforme a Figura 33 relatada. Tais valores não são preocupantes devido aos seus percentuais serem menores de 0,5%, ou seja, estão dentro dos limites dos Procedimentos de Rede da ONS[7].

|                                     |        |         |        |  |
|-------------------------------------|--------|---------|--------|--|
| Sampling time = 1e-06 s             |        |         |        |  |
| Samples per cycle = 16667           |        |         |        |  |
| DC component = 0.2645               |        |         |        |  |
| Fundamental = 1098 peak (776.5 rms) |        |         |        |  |
| THD = 2.25%                         |        |         |        |  |
| 0 Hz                                | (DC):  | 0.02%   | 270.0° |  |
| 60 Hz                               | (Fnd): | 100.00% | 137.6° |  |
| 120 Hz                              | (h2):  | 0.28%   | -73.7° |  |
| 180 Hz                              | (h3):  | 0.22%   | -88.1° |  |
| 240 Hz                              | (h4):  | 0.30%   | 251.8° |  |
| 300 Hz                              | (h5):  | 1.50%   | 145.6° |  |
| 360 Hz                              | (h6):  | 0.16%   | -16.3° |  |
| 420 Hz                              | (h7):  | 1.33%   | -76.6° |  |
| 480 Hz                              | (h8):  | 0.03%   | 109.3° |  |
| 540 Hz                              | (h9):  | 0.10%   | 71.1°  |  |
| 600 Hz                              | (h10): | 0.07%   | 63.1°  |  |
| 660 Hz                              | (h11): | 0.67%   | 172.0° |  |
| 720 Hz                              | (h12): | 0.01%   | 201.1° |  |
| 780 Hz                              | (h13): | 0.05%   | 184.9° |  |
| 840 Hz                              | (h14): | 0.06%   | 74.6°  |  |
| 900 Hz                              | (h15): | 0.08%   | 52.7°  |  |
| 960 Hz                              | (h16): | 0.03%   | -31.5° |  |
| 1020 Hz                             | (h17): | 0.16%   | 216.8° |  |
| 1080 Hz                             | (h18): | 0.05%   | 211.1° |  |
| 1140 Hz                             | (h19): | 0.04%   | -51.4° |  |
| 1200 Hz                             | (h20): | 0.03%   | 263.0° |  |

Figura 55 - Lista de distorções harmônicas de corrente ocorridas após a instalação dos filtros

Logo, os resultados aferidos mostram mais uma vez que são satisfatórios e viabilizam sua aplicação em diversos aspectos. Por ora, como trabalho adicional futuro, seria interessante, refazer as simulações visando diversas contingências do tipo (n - 1) até a 3ª barra do sistema, como também diversos carregamentos diferentes do mesmo.

Na Figura 56, são representados os ângulos referentes as ordens relatadas anteriormente, vale a ressalva de que a resposta do sistema predominante após a frequência de 531,4 Hz referente a 8,86ª ordem harmônica, o sistema possui impedância dominante indutiva, ou seja, aumenta conforme a frequência, podendo ocasionar assim, maiores distorções harmônicas

individuais de tensão conforme o percentual individual de corrente. Entretanto, conforme verificado na Figura 36 anteriormente, os valores são desprezíveis.

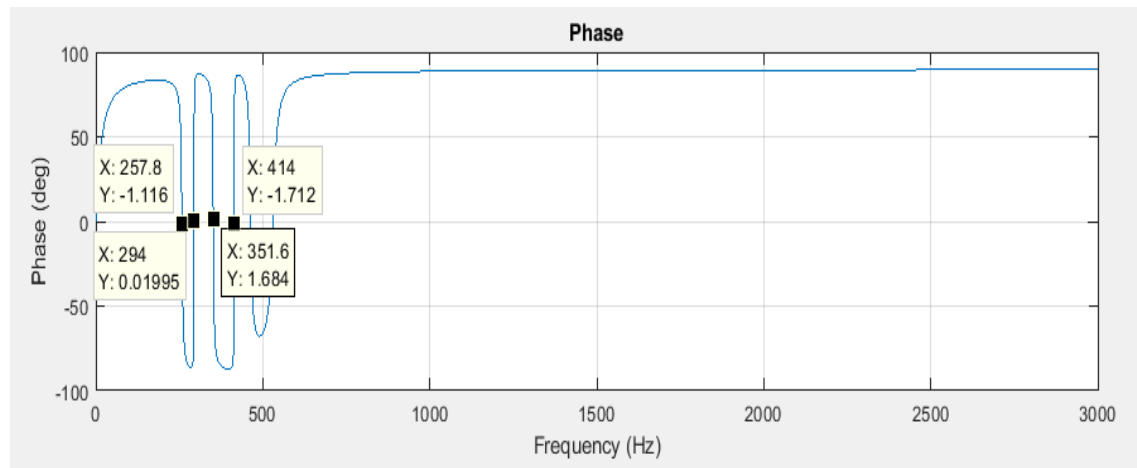


Figura 56 - Ângulo da resposta em frequência do sistema para o caso 9

## 7. CONCLUSÃO

No que tange o intuito deste trabalho, conclui-se que os resultados foram satisfatórios. Mediante as análises das distorções harmônicas relatadas, a necessidade da instalação dos filtros como método mitigatório do problema em questão, o dinamismo do sistema apresentando vários aspectos diferentes para diversos casos de operação, necessitando de muita aplicação teórica para discernimento dos desafios encontrados e solução dos mesmos.

Logo, o exemplo escolhido, conforme relatado, refere-se a um caso real, de uma barra que se encontra em operação no nordeste brasileiro, contudo, a possibilidade de implementação se torna ainda maior, após logicamente, as aferições das medidas do sistema operando conforme os procedimentos recomendados [7], confirmando a necessidade de métodos mitigatórios para os problemas relatados. Sendo assim, encontrada a real necessidade prática do projeto ora apresentado, o próximo passo seria a análise comercial dos filtros.

Contudo, o capítulo 5, no item 5.2.3 são relatados os resultados finais, onde são concluídos que a melhoria do aspecto da onda de tensão se torna inquestionável, sua distorção harmônica total de tensão se encontra em apenas 1%, encontrando-se em um patamar ótimo aos olhos das normas gerenciadoras dos processos [7]. Vale ressaltar que no mesmo capítulo, foi relatado as condições para implementação do mesmo, mediante a inserção dos 2 filtros separadamente, visto que em aplicações práticas, via de regra, serão instalados os filtros gradualmente, sendo o melhor método a inserção primeiramente do filtro de 7ª ordem com dessintonia de 0,1 e posteriormente o de 5ª ordem com a mesma dessintonia. Como prognóstico, se faz necessária a avaliação dos quesitos novamente após a implementação dos valores comerciais dos filtros.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **“Premissas para inserção de energia eólica na expansão do SIN”**. Revista Cenários 2018 AMA EPE. Setembro de 2018.
- [2] **BIG – Banco de Informações de Geração**, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2017.
- [3] **BEN – Balanço Energético Nacional**, Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017. Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- [4] **Relatório de Demonstrações Financeiras da Neoenergia**. LFA E LER 2010.
- [5] **“Estudo para Dimensionamento das ICG’s referentes as centrais geradoras eólicas”**, LFA e LER 2010.
- [6] **Base de Dados para Estudos de Curto Circuito – BDCC**. EPE , Julho de 2018.
- [7] **Procedimentos de Rede do ONS – “Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes.”** Rev. 2.0 de 2011.
- [8] **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. “Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica.” Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Rev. 5 de 2015.

- [9] R. P. Nascimento, **“Propostas de Procedimentos para Projetar Filtros Harmônicos a partir de um Programa de Penetração Harmônica, incluindo Cálculos de Desempenho e de Suportabilidade”**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- [10] **Documento de Estudo de Conexão da CGE Calango 1 a 5 – Qualidade de Energia – Revisão 2**, janeiro de 2016.
- [11] **“Análise de Problemas e Procedimentos na Determinação de Filtros Harmônicos”**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1991 - A. C. B. Alves,.
- [12] L. P. Moura, **“Avaliação Experimental do Desempenho de Unidades Eólicas Quanto à Geração de Distorções Harmônicas”**, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- [13] **“Estudos Computacionais acerca da Implementação do Método da Superposição Modificado e Definição do Arranjo em Escala Reduzida para Aplicação Laboratorial”**. Relatório Entrega 3.1 – Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento: Método Modificado da Superposição para o Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas (PD-7284-0001/2016).
- [14] ONS NT 009/2016 – Rev.01, **“Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE relacionados aos Novos Acesso à Rede Básica para Parques Eólicos, Solares e Consumidores Livre”**. Abril de 2016.