



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

MATHEUS ROCHA ALVES



Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

RELATÓRIO DE ESTÁGIO INTEGRADO

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O ESTÁGIO INTEGRADO NA  
CARPE VIE ENGENHARIA LTDA



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande - PB  
2021

MATHEUS ROCHA ALVES

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O ESTÁGIO INTEGRADO NA  
CARPE VIE ENGENHARIA LTDA

Relatório de estágio integrado apresentado à Coordenadoria do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**George Rossany Soares de Lira, D.Sc.**  
Orientador

Campina Grande  
2021

MATHEUS ROCHA ALVES

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O ESTÁGIO INTEGRADO  
NA CARPE VIE ENGENHARIA LTDA.

Relatório de estágio integrado apresentado à Coordenadoria do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 24 /09 /2021

**Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador, UFCG

**Professor George Rossany Soares de Lira, D.Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pela minha existência, por ter me dado serenidade, paciência e coragem para lidar com os desafios.

Aos meus pais, irmã e namorada, por terem me apoiado em todos os momentos da minha trajetória, me incentivando e acreditando no meu potencial.

Ao grande amigo que a vida me deu, Matheus Araújo, por ter me recebido e tratado tão bem em sua casa. Aos meus colegas de trabalho Mabelle Sousa, Tarcísio Lopes, Renato Alencar e José Renato por todos os momentos de descontração e aprendizado

Ao professor doutor George Lira pela orientação na elaboração desse trabalho, e ao engenheiro e doutor Alecio Barreto pela coorientação e oportunidade de estagiar na Carpe Vie Engenharia.

*“A vida é muito curta para ser  
pequena.”*  
Benjamin Disraeli

# RESUMO

Este relatório apresenta de modo detalhado as atividades desenvolvidas por Matheus Rocha Alves, durante o período de 08/03/2021 a 13/08/2021, como estagiário de Engenharia Elétrica na empresa Carpe Vie Engenharia na cidade de Recife – PE. Tudo aqui descrito foi supervisionado por Alecio Barreto Fernandes, CEO da empresa. Dentre estas atividades, foram realizados estudos elétricos de: fluxo de carga, curto-circuito; qualidade da energia elétrica; Implementação de modelos computacionais; linhas de transmissão, subestações, rede de média tensão (RMT), dentre outros.

**Palavras-chave:** Estudos elétricos, fluxo de carga, curto-circuito, qualidade da energia elétrica.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Áreas de atuação da Carpe Vie Engenharia. ....	13
Figura 2 – Rede Básica do Sistema Interligado Nacional. ....	17
Figura 3 – Representação das etapas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. ....	18
Figura 4 - Representação dos agentes reguladores do sistema elétrico brasileiro. ....	19
Figura 5 – Representação da modelagem da rede externa, rede interna e correntes harmônicas observadas a partir do PAC. ....	23
Figura 6 – Representação do Método do Lugar Geométrico (a) Setor anular; (b) Polígono de “n” lados. ....	24
Figura 7 – Fluxograma das etapas referentes aos estudos necessários para inserção de uma fonte de energia ao SIN. ....	26
Figura 8 - Localização da SE 500/230 kV Gilbués II – Horizonte operacional 2026. ....	27
Figura 9 - Carregamento (em %) dos circuitos 500 kV, 230 kV – Sistema íntegro, horizonte janeiro/2025 – Geração a partir da SE 500 kV Gilbués II de 1.280,0 MWac. ....	28
Figura 9 – Contingência do ATR 500/230 kV da SE São João do Piauí, carregamento (em %) dos circuitos 500 kV e 230 kV – Horizonte janeiro/2025. ....	30
Figura 10- Contingência da LT 500 kV Barreiras II – Rio das Éguas, fluxos (em MVA) dos circuitos 500 kV e 230 kV – Horizonte janeiro/2025. ....	30
Figura 11 - Diagrama Unifilar – Rede Básica do SIN – Complexo Solar Fictício, com conexão na SE 230/34,5 kV Coletora Fictícia, tendo conexão com a Rede Básica na em 230 kV na SE 500/230 kV Gilbués II – Horizonte operacional Verão 2024-2025 – Sistema Nordeste. ....	32
Figura 12 – Contingência do ATR 500/230 kV da SE Gilbués II carregamento (em %) dos circuitos 500 kV e 230 kV – Horizonte janeiro/2025. ....	34
Figura 13- Contingência da LT 500 kV Barreiras II – Rio das Éguas, Fluxos (em MVA) dos circuitos 500 kV e 230 kV – Horizonte janeiro/2025. ....	34
Figura 14 – Contingência do ATR 500/230 kV da SE Gilbués II carregamento (em %) dos circuitos 500 kV e 230 kV – Horizonte janeiro/2025. ....	35
Figura 15 - Requisito para atendimento ao fator de potência na faixa operativa de tensão não nominal no ponto de conexão – Submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede [ONS, 2021]. ....	38
Figura 16 - Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN) – Horizonte operacional 2026 – Região região próxima da SE 500 kV Santa Luzia II [ECOTx, 2021]. ....	40
Figura 17 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 120 Hz. ....	42
Figura 18 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 180 Hz. ....	42
Figura 19 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 240 Hz. ....	43
Figura 20 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 300 Hz. ....	43
Figura 21 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 360 Hz. ....	44
Figura 22 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 420 Hz. ....	44
Figura 23 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 480 Hz. ....	45
Figura 24 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 540 Hz. ....	45
Figura 25 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 600 Hz. ....	46

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produtos oferecidos pela Carpe Vie Engenharia.....	14
Tabela 2 – Tipos de barras no fluxo de carga.....	20
Tabela 3: Correntes de curto-circuito e relação X/R na região de influência da SE 500/230 kV Gilbués II (PAC), considerando a situação inicial, SEM a geração solar.....	36
Tabela 4 - Correntes de curto-circuito e relação X/R na região de influência da SE 500/230 kV Gilbués II (PAC), COM máxima geração no Complexo Solar Fictício. ....	37
Tabela 5: Evolução (em %) dos níveis de curto-circuito na região de influência da SE 500/230 kV Gilbués II (PAC). Configuração 1 = SEM geração solar / Configuração 2 = COM máxima geração no Complexo Solar Fictício. ....	37
Tabela 6 - Limites globais inferiores para os indicadores DTHI e DTHTS95% [ONS, 2021]. ....	41
Tabela 7 - Limites individuais inferiores para os indicadores DTHI e DTHTS95% [ONS, 2021]. ....	41
Tabela 8: Síntese dos resultados -Distorção harmônica – Polígono de “n” lados (plano GB) – Horizonte 2023/2024/2025/2026, carga PESADA, MÉDIA e LEVE, INVERNO e VERÃO – Sistema integro + degradado – Complexo Eólico Fictício em operação, com máxima geração. ....	47
Tabela 9 – Ordem harmônica acima do limite estabelecido pelo ONS. ....	49
Tabela 10: Síntese dos resultados -Distorção harmônica – Polígono de “n” lados (plano GB) – Horizonte 2023/2024/2025/2026, carga PESADA, MÉDIA e LEVE, INVERNO e VERÃO – Sistema integro + degradado – Complexo Eólico Fictício, com máxima geração + filtros de harmônicos. ....	50



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATR	Autotransformador
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
DHI	Distorção Harmônica Individual
DHT	Distorção Harmônica Total
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
LT	Linha de Transmissão
MLG	Método do Lugar Geométrico
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
SE	Subestação Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMT	Rede de Média Tensão

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	11
1.1	Objetivos .....	11
1.2	Estrutura do texto .....	12
2	A empresa.....	13
3	Fundamentação teórica.....	16
3.1	Sistema elétrico de potência.....	16
3.2	Entidades setoriais do sistema elétrico brasileiro .....	18
3.3	Fluxo de carga.....	20
3.4	Curto circuito .....	21
3.5	Qualidade da energia elétrica .....	22
4	Atividades desenvolvidas .....	25
4.1	Estudo de “Margem” .....	26
4.2	Estudo de Informação de Acesso .....	31
4.2.1	Fluxo de carga.....	31
4.2.2	Curto-circuito.....	35
4.3	Parecer de Acesso .....	38
4.3.1	Qualidade da energia elétrica.....	39
5	Considerações finais.....	52
	Referências .....	53

# 1 INTRODUÇÃO

O curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) apresenta, dentre os requisitos de conclusão, a disciplina de Estágio Integrado. Esta disciplina permite que o graduando tenha o primeiro contato com o mercado de trabalho com todo apoio do orientador e do supervisor, podendo colocar em prática uma parte expressiva dos conhecimentos adquiridos durante a graduação, bem como a aplicação prática destes.

Este relatório consiste em descrever o estágio integrado realizado por Matheus Rocha Alves, no setor de engenharia da Carpe Vie Engenharia Ltda, com ênfase na conexão de geração renovável, de fonte eólica e solar, à Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN), executando simulações digitais de sistemas elétricos, em regime permanente e no domínio da frequência. O estágio ocorreu no período de 08/03/2021 a 13/08/2021, com carga horária semanal de 30 horas, totalizando 681 horas cumpridas, sob supervisão do engenheiro Alecio Barreto Fernandes e orientação do professor George Rossany Soares de Lira.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo primordial e geral deste estágio é permitir que o aluno desenvolva experiência e habilidades, colocando em prática uma parte expressiva dos conhecimentos e aprendizados do curso de graduação, com foco na solução de problemas reais.

Os objetivos específicos e de caráter técnico são:

- Participar diretamente nas atividades de rotina da Carpe Vie Engenharia, como imersão no ambiente de consultoria em engenharia.
- Executar estudos: Fluxo de carga, curto-circuito, e qualidade da energia elétrica (QEE).
- Aprofundar os conhecimentos sobre o sistema elétrico brasileiro e as entidades setoriais.
- Desenvolver uma visão sistêmica dos processos e produtos, em diferentes contextos.

## 1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

No Capítulo 1, é apresentada a motivação e os objetivos deste relatório de estágio.

No Capítulo 2, será apresentada a história da Carpe Vie Engenharia, seus setores de atuação, portfólio de produtos, estrutura organizacional e metodologia de gestão.

No Capítulo 3, explicita-se a fundamentação teórica das atividades realizadas no estágio.

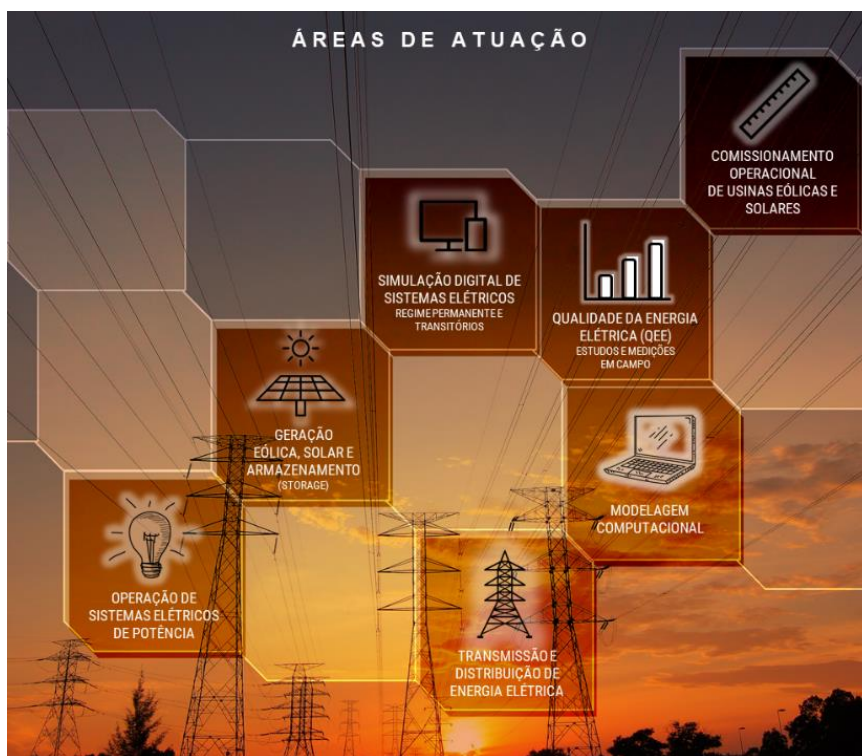
No Capítulo 4, são descritas as atividades realizadas no estágio integrado.

No Capítulo 5, contém as constatações obtidas, destacando as experiências obtidas durante o estágio.

## 2 A EMPRESA

A Carpe Vie é uma empresa de engenharia consultiva especializada em soluções através de estudos, consultoria e assessoria de engenharia. A empresa foi fundada em 2003 com o objetivo de prestar consultoria na área de Transitórios Eletromagnéticos para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e desde então passou a atuar em diversas outras frentes, prestando serviços a vários outros clientes, dos quais destacam-se: Chesf, CEMIG, Siemens, WEG, GE, dentre outros. Vide na Figura 1 as áreas de atuação da Carpe Vie Engenharia.

Figura 1 – Áreas de atuação da Carpe Vie Engenharia.



Fonte: Carpe Vie (2021), adaptado.

Devido a vasta área de atuação da empresa, o portfólio de produtos compreende desde medições em campo, até estudos via simulação computacional. Deste modo, a Tabela 1 apresentada a seguir sintetiza todos os produtos.

Tabela 1 – Produtos oferecidos pela Carpe Vie Engenharia.

Áreas de atuação	Produtos
COMISSIONAMENTO OPERACIONAL DE USINAS EÓLICAS E SOLARES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensaios dos modos de controle das usinas eólicas/solares.</li> <li>• Comissionamento operacional, visando obter a DAPR-D (operação comercial definitiva).</li> <li>• Validação dos modelos dinâmicos (programa ANATEM) com ensaios em campo.</li> </ul>
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE), ESTUDOS E MEDIÇÕES EM CAMPO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Execução de estudos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE).</li> <li>• Execução das campanhas de medição de QEE – pré e pós-operação – conforme padrão ONS.</li> <li>• Medição de correntes harmônicas em aerogeradores e inversores.</li> </ul>
SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS / REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Execução de estudos elétricos.</li> <li>• Fluxo de carga, curto-circuito, qualidade da energia elétrica e transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.</li> <li>• Programas: ANAREDE, ANAFAS, ANATEM, HarmZs e ATP, dentre outros.</li> </ul>
GERAÇÃO EÓLICA, SOLAR E ARMAZENAMENTO (STORAGE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prospecção e “margens” para escoamento de geração eólica e solar.</li> <li>• Informação de Acesso, Parecer de Acesso e estratégias para integração.</li> <li>• Estudos pré-operacionais.</li> <li>• Medições de QEE (Qualidade da Energia Elétrica) – pré e pós-operação.</li> </ul>
MODELAGEM COMPUTACIONAL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementação de modelos computacionais.</li> <li>• Linhas de transmissão, subestações, rede de média tensão (RMT), dentre outros.</li> <li>• Programas: ANAREDE, ANAFAS, ANATEM, HarmZs e ATP, dentre outros.</li> </ul>
OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consultoria na elaboração e avaliação de procedimentos e acordos operativos.</li> <li>• Análise de desempenho de usinas eólicas e solares, aplicando business analytics (business intelligence + data Science).</li> <li>• Análise de Performance Ratio (PR).</li> </ul>

Áreas de atuação	Produtos
TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consultoria e assessoria na integração de instalações de transmissão ao SIN (Sistema Interligado Nacional).</li> <li>• Execução de estudos pré-operacionais.</li> <li>• Modelagem computacional das instalações de transmissão/distribuição.</li> </ul>

Fonte: Carpe Vie (2021), adaptado.

A Carpe Vie Engenharia possui uma estrutura organizacional linear em que o CEO valida os produtos previamente analisados pelos gestores, os quais supervisionam o time de colaboradores (estagiários + engenheiros).

Com relação à metodologia de gestão, a empresa faz uso do gerenciamento ágil de projetos. As atividades foram realizadas utilizando a metodologia de *squads*. Os *squads* focam no desenvolvimento rápido e na entrega contínua de produtos. O objetivo é obter rapidamente o feedback em relação ao que é criado, garantindo a satisfação do cliente e sua participação direta no processo.

Assim, fazendo-se uso da metodologia ágil foram realizadas as atividades no decorrer do estágio. Destaca-as que além do desenvolvimento técnico profissional, a utilização desta metodologia possibilitou uma troca de experiência entre os colaboradores, visto que, os *squads* apresentavam colaboradores com diferentes pontos de vista acerca da mesma temática.

Desta forma, devido a todas as características previamente apresentadas, a Carpe Vie é uma referência na área de engenharia consultiva em energia, trabalhando com excelência, visando alta rentabilidade e indo além das expectativas de clientes e acionistas, a fim de gerar valor e riqueza junto a todos os *players* do mercado.

## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Durante o estágio, as atividades realizadas foram voltadas para as áreas de: estudos elétricos, geração eólica, solar e modelagem computacional. Nesse sentido, as temáticas envolvidas para a realização destas atividades baseiam-se na teoria associada aos conceitos estudados principalmente nas disciplinas de Sistemas Elétricos, Máquinas Elétricas, Análise de Sistemas Elétricos e Operação e Controle de Sistemas Elétricos.

Apresenta-se a seguir uma breve fundamentação teórica sobre Sistema Elétrico de Potência (SEP), entidades setoriais, fluxo de carga, curto-circuito e qualidade da energia elétrica.

### 3.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

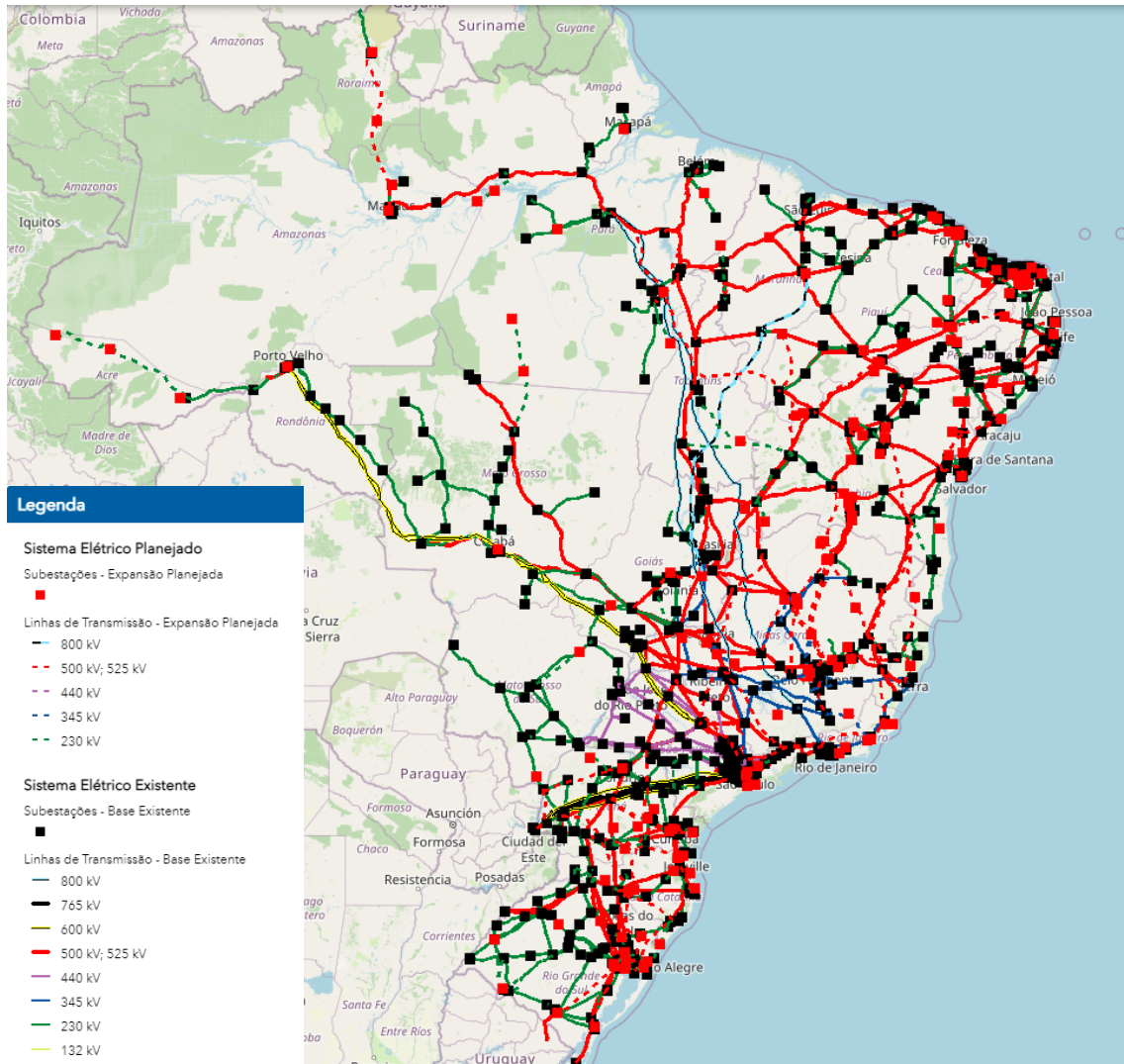
O Sistema Elétrico de Potência (SEP) compreende todo o conjunto de instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

A geração de energia elétrica compreende a etapa de transformação de um determinado tipo de energia em energia elétrica, seja ela solar, eólica, térmica, hidráulica ou nuclear, todas elas por meio de processos e equipamentos são convertidas para a modalidade de energia elétrica. Posteriormente a realização da conversão, a tensão é elevada por meio de uma subestação elevadora e realiza-se a conexão com o sistema de transmissão.

A transmissão de energia elétrica é o intermédio entre geração e consumo. São contemplados nessa etapa as subestações da Rede Básica (subestações com tensão entre 230 kV e 500 kV), linhas de transmissão, transformadores de potência, disjuntores de alta tensão, dentre outros equipamentos, vide na Figura 2, a seguir, a representação da Rede Básica. É importante destacar que a malha elétrica do sistema de transmissão interliga grande parte do país, sendo denominado de Sistema Interligado Nacional (SIN).



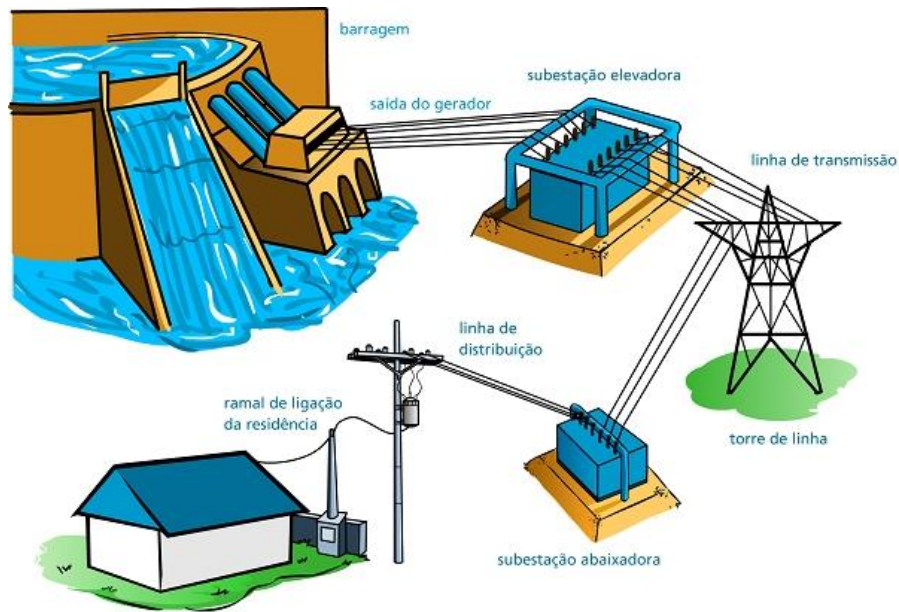
Figura 2 – Rede Básica do Sistema Interligado Nacional.



Fonte: Webmap EPE (2021), adaptado.

Por fim, a distribuição refere-se a etapa final, realiza-se o abaixamento da tensão por meio das subestações abaixadoras e assim torna-se possível o consumidor final fazer uso da energia elétrica para suas atividades cotidianas. A Figura 3, a seguir, apresenta de maneira simplificada as etapas descritas utilizando como fonte de geração uma usina hidrelétrica.

Figura 3 – Representação das etapas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.



Fonte: Mundo da Elétrica (2020), adaptado.

### 3.2 ENTIDADES SETORIAIS DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

No Brasil, a estrutura organizacional que gerencia todo o SEP é complexa e formada por muitas instituições, como o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), Ministério de Minas e Energia (MME), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Apresenta-se na Figura 4, uma estrutura esquemática e hierárquica dos órgãos.

Figura 4 - Representação dos agentes reguladores do sistema elétrico brasileiro.



Fonte: CCEE (2021), adaptado.

Para as atividades desenvolvidas no estágio, foi estudado de maneira mais aprofundada as diretrizes do agente responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica, o ONS.

Sendo assim, para a realização da integração de novas fontes de geração ao SIN, faz-se necessário apresentar uma série de estudos ao ONS. Nestes estudos são utilizados diretrizes, critérios e premissas estabelecidos nos Procedimentos de Rede do Sistema Interligado Nacional (SIN), documentados nos Submódulos específicos [ONS, 2021], e nas instruções específicas publicadas pelo ONS em 2019. O primeiro estudo a ser apresentado é a Informação de Acesso, uma vez aprovada, o estudo subsequente solicitado é o Parecer de Acesso.

Na Informação de Acesso são realizados estudos de fluxo de carga e curto-circuito. No estudo de fluxo de carga, avalia-se a capacidade instalada do sistema de transmissão (Rede Básica), em regime permanente, quando em operação normal e em contingências simples não simultâneas (critério  $N-1$ ), quantificando os impactos da conexão frente aos requisitos de controle de tensão, fator de potência e carregamento das

linhas de transmissão. Para o estudo de curto-circuito são quantificados os níveis de curto-circuito, monofásico e trifásico anterior e posterior a conexão do empreendimento.

No Parecer de Acesso, além dos estudos de fluxo de carga e curto circuito, também são realizados os estudos de qualidade da energia elétrica e estabilidade dinâmica.

### 3.3 FLUXO DE CARGA

Um estudo de fluxo de carga consiste na determinação do módulo e ângulo das tensões nas barras, fluxos ativos e reativos e perdas nos diversos pontos de uma rede elétrica sob condições reais ou ideais de operação normal ou contingência. Tais estudos são fundamentais para o planejamento e expansão do SEP, pois a operação satisfatória desse sistema depende do conhecimento dos efeitos da interligação com outros sistemas, de novas cargas, de novas centrais geradoras e de novas linhas de transmissão, antecipando as análises antes que elas sejam instaladas (Stevenson, 1986).

Para a formulação deste tipo de análise, utiliza-se um conjunto de equações próprias para implementação computacional e considera-se que a rede trifásica se encontra equilibrada. A rede é representada por um diagrama de sequência positiva com os dados elétricos fornecidos em valores por unidade (pu).

Com relação aos dados, as cargas são representadas em termos de potência e ao invés de impedância, já os geradores são considerados como fontes de potência e não de tensão ou corrente. De acordo com os dados de entrada, as barras do sistema são classificadas em três tipos, vide Tabela 2. As variáveis  $P$ ,  $Q$ ,  $V$  e  $\delta$ , referem-se respectivamente a potência ativa, potência reativa, módulo da tensão e ângulo da barra. O índice “k” refere-se a barra sob análise.

Tabela 2 – Tipos de barras no fluxo de carga

<b>Tipos de barra</b>	<b>Varáveis especificadas</b>	<b>Variáveis a determinar</b>
Carga (PQ)	$P_k$ e $Q_k$	$V_k$ e $\delta_k$
Tensão controlada (PV)	$P_k$ e $V_k$	$Q_k$ e $\delta_k$
Balanço (swing)	$V_k$ e $\delta_k$	$P_k$ e $Q_k$

Fonte: Stevenson (1986), adaptado.

Para solucionar este tipo de problema são utilizados métodos interativos baseados em sistemas de equações lineares, desta forma, são comumente aplicados os métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson (Melo, 2017).

Atualmente, são utilizados *softwares* especializados para execução de estudos de fluxo de carga. No Brasil, conforme determinam os Procedimentos de Rede, utiliza-se o ANAREDE (Análise de Redes Elétricas), desenvolvido e mantido pelo CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica). Nele são reunidos programas de fluxo de potência, equivalentes de redes, análise de contingências, análises de sensibilidade de tensão e de fluxo, e análise de segurança de tensão.

Entre os principais usuários do ANAREDE estão: entidades setoriais, como Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE); Ministério de Minas e Energia (MME); empresas do grupo Eletrobras; agentes de geração, transmissão e distribuição; grandes consumidores industriais; produtores independentes; universidades (versões acadêmicas); empresas de consultoria (CEPEL, 2021).

### 3.4 CURTO CIRCUITO

Curto-circuitos ocorrem nos SEP quando o isolamento do equipamento falha devido às sobretensões atmosféricas (causadas por raios), de manobra (originada a partir de chaveamentos) ou sustentadas (decorrente de perda súbita de carga em geradores, dentre outros).

O curto-circuito resultante é determinado pelas tensões internas das máquinas síncronas e pelas impedâncias do sistema entre as tensões da máquina e a falha. As correntes de curto-circuito podem ser várias ordens de magnitude maiores do que as correntes normais de operação e, se permitido persistir, pode causar danos térmicos ao equipamento, e danos mecânicos aos enrolamentos e barramentos devido a altas forças magnéticas durante as falhas (Glover, 2012).

De acordo com a literatura existem várias classificações para os curtos-circuitos, das quais destacam-se duas: simétricos e assimétricos. Os curtos-circuitos simétricos ocorrem quando há o contato entre as três fases do sistema com uma impedância igual em todas as fases. Por outro lado, os curtos-circuitos assimétricos envolvem apenas uma fase (fase-terra) ou duas fases (fase-fase e fase-fase-terra). Para a modalidade assimétrica,

faz-se necessário considerar os diagramas de sequência (positiva, negativa e zero) (Moreira, 2010).

Nos estudos de curto-circuito realizados são considerados os curtos-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos. Sendo necessário avaliar se a magnitude das correntes está dentro dos limites de suportabilidade dos disjuntores.

Para a execução dos estudos de curto-circuito, conforme determinam os Procedimentos de Rede, o *software* utilizado no Brasil é o ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas) desenvolvido e mantido pelo CEPEL. Nele é possível executar automaticamente um grande número de simulações de curto-circuito orientadas a pontos de monitoração. Além disso, também é possível realizar estudos automáticos de superação de disjuntores, obtenção de equivalentes e cálculo automático de evolução dos níveis de curto-circuito.

Entre os principais usuários do ANAFAS estão: entidades setoriais, como Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE); Ministério de Minas e Energia (MME); empresas Eletrobras; agentes de geração, transmissão e distribuição; grandes consumidores industriais; produtores independentes; universidades (versões acadêmicas); empresas de consultoria (CEPEL, 2021).

### 3.5 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

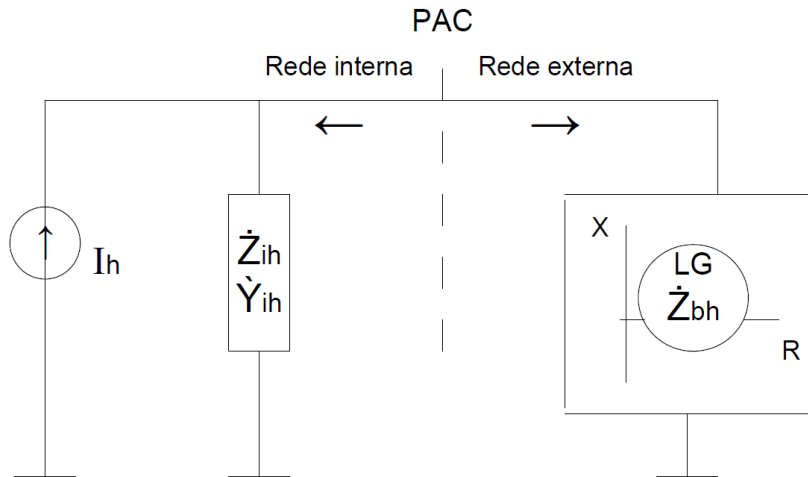
O termo “Qualidade da Energia Elétrica” pode incluir uma gama de fenômenos, abrangendo áreas de interesse de sistemas da energia elétrica, até problemas relacionados com a comunicação em redes de transmissão de dados, a depender do país e órgão normatizador que regulamenta o assunto (Teixeira, 2020).

No Brasil, o PRODIST (ANEEL) e o Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede do SIN (ONS), tratam a qualidade da energia elétrica como o produto entregue ao consumidor pela concessionária, ou seja, tratam exclusivamente dos desvios da tensão, considerando que distorções da corrente elétrica são causadas por características da carga.

Nesse sentido, a execução dos estudos de QEE visa avaliar o comportamento harmônico do sistema no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) a partir da análise da rede externa (equivalente do SIN), rede interna (modelagem do empreendimento de geração renovável) e a fonte geradora de perturbações (inversores ou aerogeradores). A

Figura 5 apresenta de maneira simplificada o circuito representativo que contempla a rede externa, rede interna e a fonte geradora de perturbações.

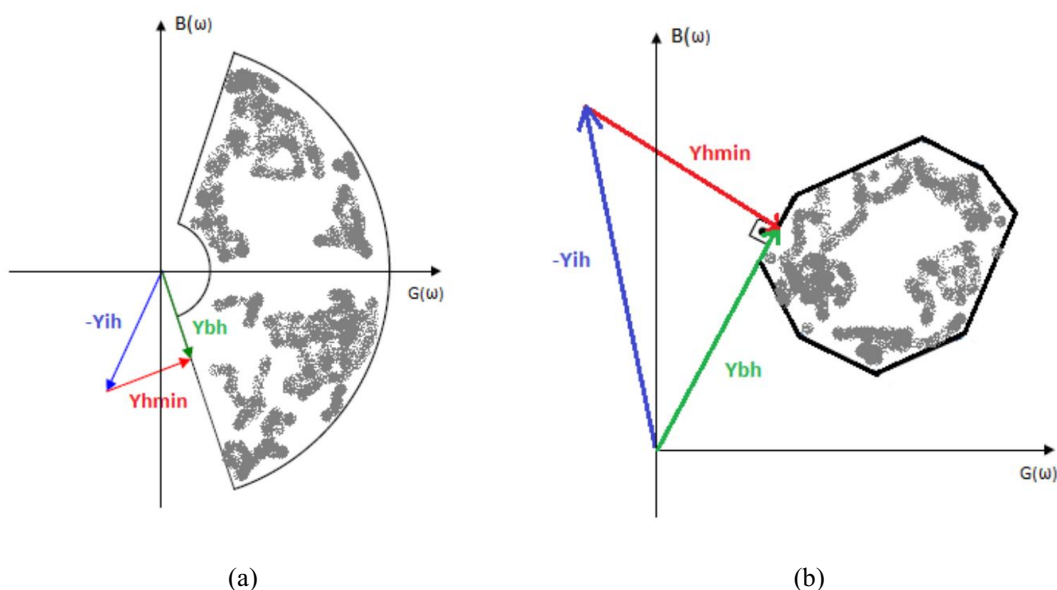
Figura 5 – Representação da modelagem da rede externa, rede interna e correntes harmônicas observadas a partir do PAC.



Fonte: Submódulo 2.3 ONS, 2020.

A metodologia utilizada pelo ONS nos estudos de QEE consiste em avaliar o impacto no domínio da frequência de uma carga não linear no PAC, considerando tanto configurações da rede no momento de sua entrada em operação, quanto configurações futuras. Para isso, faz-se uso do Método dos Lugares Geométricos (MLG). Tal método corresponde a uma avaliação razoavelmente conservadora do impacto individual provocado pela carga não linear, onde ela é representada por um equivalente Norton e a rede por um lugar geométrico de admitâncias (Varrichio *et al*,2012). A Figura 6 representa as duas formas mais tradicionais de representação do MLG.

Figura 6 – Representação do Método do Lugar Geométrico (a) Setor anular; (b) Polígono de “n” lados.



Fonte: ONS, 2018

Uma vez realizada as modelagens, obtém-se as distorções harmônicas individuais (DHI) e a distorção harmônica total (DTHT) no PAC. Para tanto, utilizam-se os limites estabelecidos no Submódulo 2.9 (ONS) como referência para avaliar o desempenho do empreendimento de geração renovável, caso seja necessário, realiza-se o dimensionamento de um filtro harmônico para atenuar as componentes que superaram os limites.

No caso dos estudos de QEE, o *software* mais amplamente utilizado no Brasil é o HarmZs (Estudos de Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas) desenvolvido e mantido pelo CEPEL. Nele é possível analisar o comportamento do sistema íntegro, e sob contingências operacionais simples, não simultâneas (critério  $N-1$ ), a partir do PAC e circunvizinhanças. Dentre as funcionalidades do programa HarmZs, tem-se a de gerar contingências de forma automática, através de uma interface própria para esta tarefa.

Entre os principais usuários do HarmZs estão: entidades setoriais, como Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE); universidades (versões acadêmicas); empresas de consultoria (CEPEL, 2021).



## 4 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

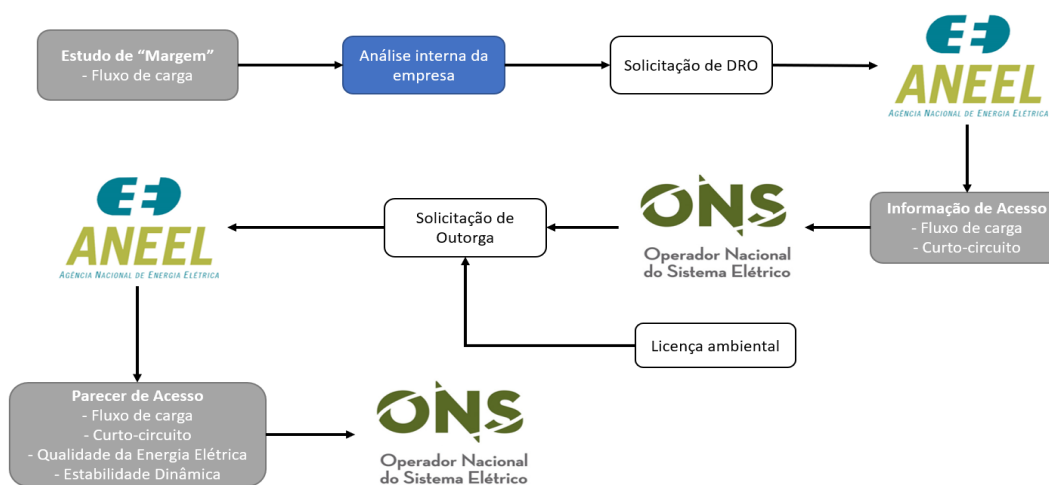
Durante o estágio, foram realizados estudos referentes aos temas apresentados (fluxo de carga, de curto-circuito e de qualidade da energia elétrica em sistemas elétricos de potência). Para tanto, fez-se necessário realizar treinamentos nos *softwares* associados a cada tipo de estudo, ANAREDE para fluxo de carga, ANAFAS para curto-circuito e HarmZs para qualidade da energia elétrica.

A ordem de execução das atividades se deu da seguinte forma: “Margem” (fluxo de carga), Informação de Acesso (fluxo de carga e curto-circuito) e Parecer de Acesso (fluxo de carga, curto-circuito, estabilidade dinâmica e qualidade da energia elétrica). Apresenta-se na Figura 7, um fluxograma simplificado das etapas e dos estudos que as compõem.

De início, geralmente, é solicitado um estudo de “Margem”. Este tipo de estudo visa quantificar a capacidade remanescente de escoamento de potência de uma determinada subestação, ou seccionamento de linha de transmissão do SIN. Sendo comumente contratado quando a empresa tem em vista a aquisição de um empreendimento solar/eólico no ponto a ser analisado. Dessa forma, os resultados obtidos servem para tomada de decisão interna na empresa contratante.

Havendo “Margem” suficiente para compreender a capacidade de geração do projeto e sendo realizado todos os trâmites burocráticos que envolvem as demais entidades do setor elétrico (ANEEL, EPE), o ONS solicita uma série de estudos para avaliar a conexão. Inicialmente realiza-se a Informação de Acesso considerando as características da subestação coletora a partir de uma modelagem simplificada, com a aprovação destes estudos, é solicitado um novo conjunto de estudos mais detalhados no Parecer de Acesso com uma modelagem mais detalhada do empreendimento.

Figura 7 – Fluxograma das etapas referentes aos estudos necessários para inserção de uma fonte de energia ao SIN



Fonte: Autor.

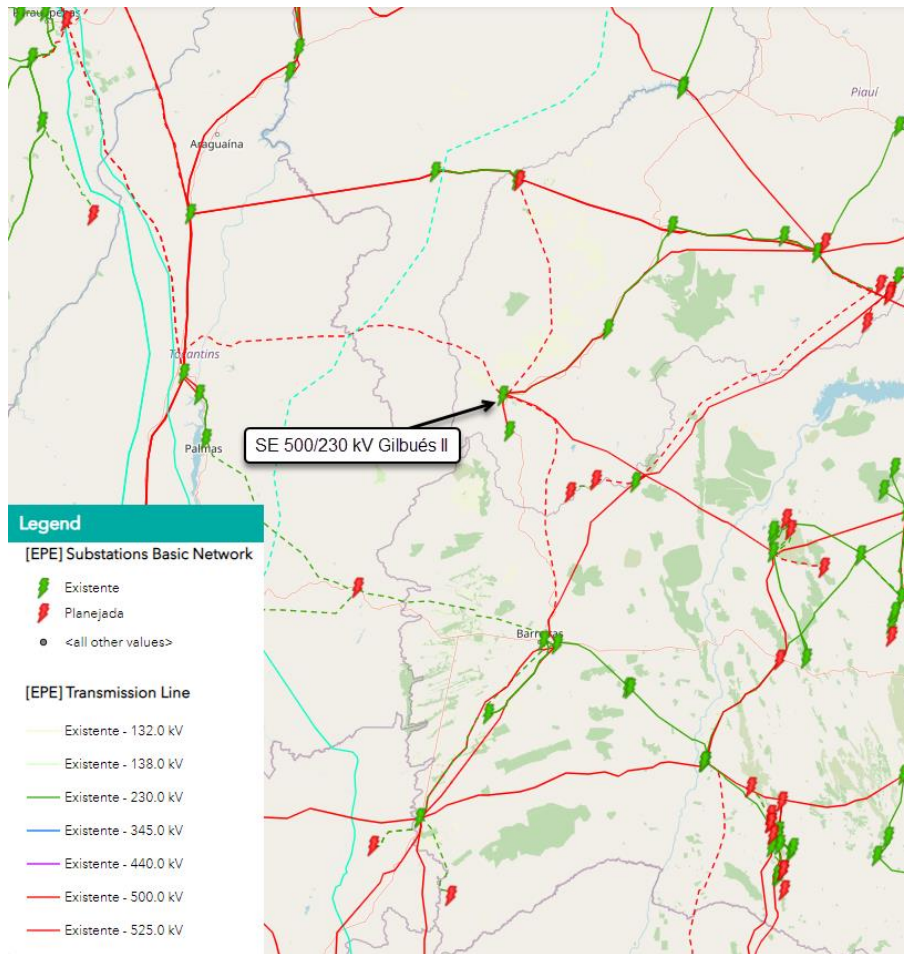
Desta forma, apresentam-se nas páginas a seguir alguns dos resultados obtidos nos estudos realizados.

Em virtude da cláusula de confidencialidade inerente aos contratos, os nomes das subestações coletoras e dos empreendimentos foram substituídos por “fictício” neste trabalho a fim de preservar as identidades dos contratantes.

#### 4.1 ESTUDO DE “MARGEM”

Um dos estudos realizados avaliou a viabilidade de conexão e quantificou a capacidade remanescente (“margem”) do sistema de transmissão para escoamento de geração de fonte solar, a partir do barramento 500 kV da SE 500/230 kV Gilbués II, no horizonte janeiro/2025, com premissas, diretrizes e critérios no contexto do Parecer de Acesso. Apresenta-se na Figura 8 a localização da SE analisada.

Figura 8 - Localização da SE 500/230 kV Gilbués II – Horizonte operacional 2026.



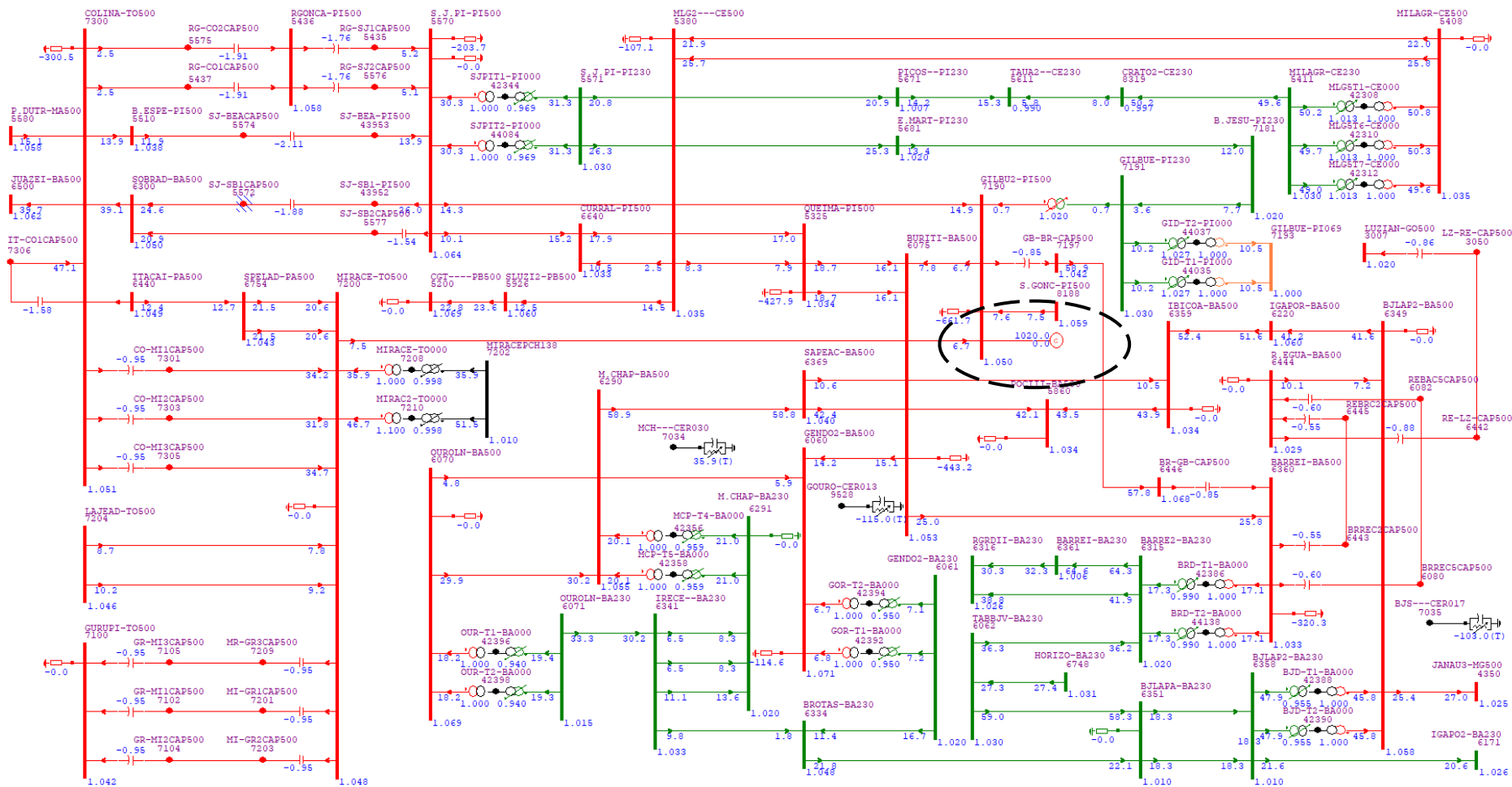
Fonte: ECOtx (2021), adaptado.

Nas simulações de fluxo de carga realizadas, constatou-se que, o escoamento de geração solar a partir do barramento 500 kV da SE 500/230 kV Gilbués II, no horizonte janeiro/2025, apresentou:

- Quando do sistema íntegro (operação normal) um limite de 1.020,0 MWac.
- Quando de contingências simples não simultâneas (critério *N-1*), um limite de ZERO.

Tais considerações indicam que para situação de operação normal, o sistema tem a capacidade de escoar até 1.020,0 MWac a partir do barramento de 500 kV da SE 500/230 kV Gilbués II. Em contrapartida, quando de contingências, faz-se necessário retirar por completo a geração adicional alocada no barramento sob análise. Estes resultados foram obtidos avaliando os carregamentos das linhas de transmissão (LT) e autotransformadores (ATR) da região sob análise representada na Figura 9. Destaca-se a presença de um círculo tracejado em preto ressaltando a geração adicional alocada no barramento 500 kV da SE 500/230 kV Gilbués II.

Figura 9 - Carregamento (em %) dos circuitos 500 kV, 230 kV – Sistema íntegro, horizonte janeiro/2025 – Geração a partir da SE 500 kV Gilbués II de 1.280,0 MWac.



Fonte: Autor.

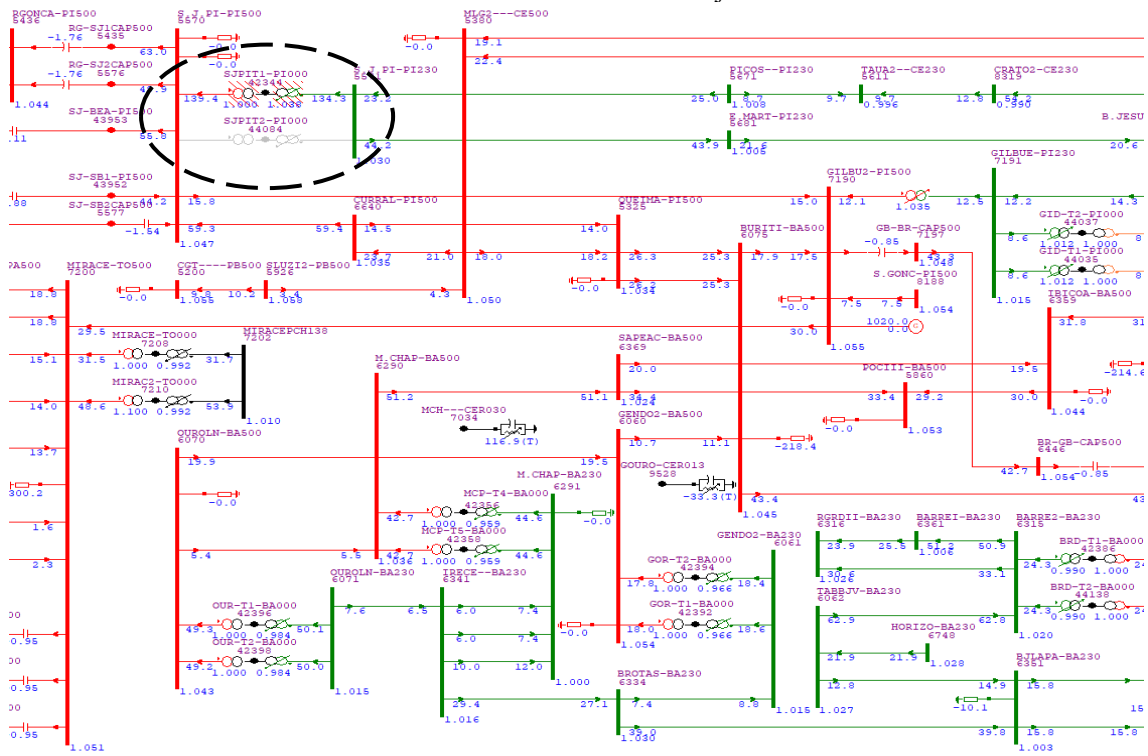
Quando de contingências, simulando a perda de um elemento por vez (critério *N-1*), observou-se os seguintes resultados:

- Na contingência do ATR 500/230 kV da SE São João do Piauí, tem-se carregamentos de até 139,40% em relação a capacidade nominal do ATR 500/230 kV da SE São João do Piauí (limites de 300 MVA/300 MVA de longa/curta duração).
- Na contingência da LT 500 kV Rio das Éguas – Barreiras II, C5, tem-se carregamentos de até 115,40% em relação a capacidade nominal do banco de capacitor série (BCS) (limites de 1.734 MVA/2.341 MVA de longa/curta duração) da LT 500 kV Rio das Éguas – Barreiras II, C2.

Desta forma, constata-se que quando de contingências, até para a situação íntegra, sem alocar geração adicional, o sistema apresenta carregamentos superiores as capacidades nominais dos equipamentos. Neste sentido, o ONS junto a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) ao identificar tais situações propõem a realização de obras de reforço no sistema de transmissão, de modo a viabilizar a operação em critério *N-1*.

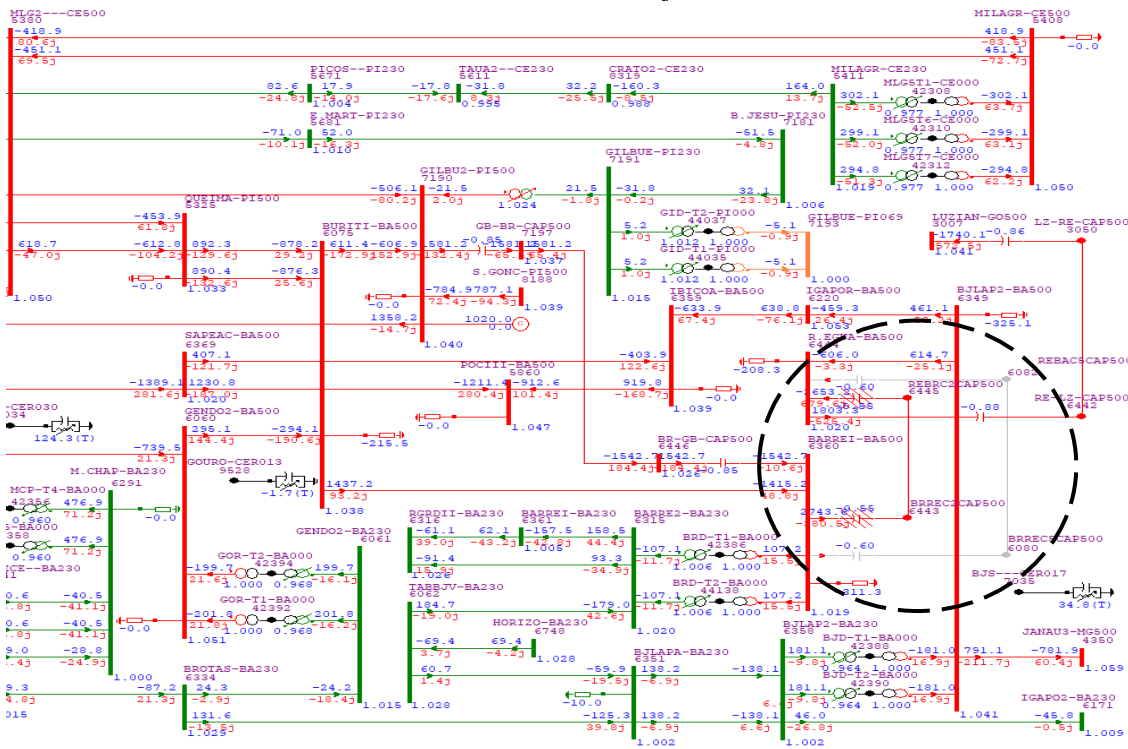
Para as Figuras 10 e 11, assim como na Figura 9, fez-se uso de um círculo tracejado em preto para enfatizar o ponto analisado. Na Figura 10 tem-se a representação dos carregamentos em porcentagem (%) do sistema quando da primeira contingência. Destaca-se a sobrecarga no primeiro ATR (hachurado) e a perda do segundo ATR (esmaecido). Na Figura 11 tem-se os fluxos do sistema quando da segunda contingência, o BCS do circuito 1 está em sobrecarga (hachurado) e o circuito 2 foi perdido (esmaecido). É importante destacar que o ANAREDE não possui a funcionalidade de quantificar em porcentagem o carregamento nos BCS, sendo necessário realizar o cálculo manualmente a partir dos fluxos.

Figura 10 – Contingência do ATR 500/230 kV da SE São João do Piauí, carregamento (em %) dos circuitos 500 kV e 230 kV – Horizonte janeiro/2025.



Fonte: Autor.

Figura 11- Contingência da LT 500 kV Barreiras II – Rio das Éguas, fluxos (em MVA) dos circuitos 500 kV e 230 kV – Horizonte janeiro/2025.



Fonte: Autor.

## 4.2 ESTUDO DE INFORMAÇÃO DE ACESSO

Nos estudos de Informação de Acesso foram realizadas simulações de fluxo de carga e curto-circuito com maior detalhamento das características do empreendimento, fez-se necessário ter especificado: o tipo de inversor/aerogerador empregado, os parâmetros da LT que conecta o empreendimento à Rede Básica e um projeto inicial da rede de média tensão (RMT). Desta forma, realizaram-se as modelagens necessárias para os estudos.

Neste estudo avaliou-se a viabilidade da integração de uma geração solar no barramento 230 kV da SE 500/230 kV Gilbués II, no horizonte janeiro/2025. O empreendimento possui 5 usinas fotovoltaicas (UFVs) totalizando 214,375 MWac. Apresenta-se a seguir os resultados obtidos para o estudo de fluxo de carga e curto-circuito.

### 4.2.1 FLUXO DE CARGA

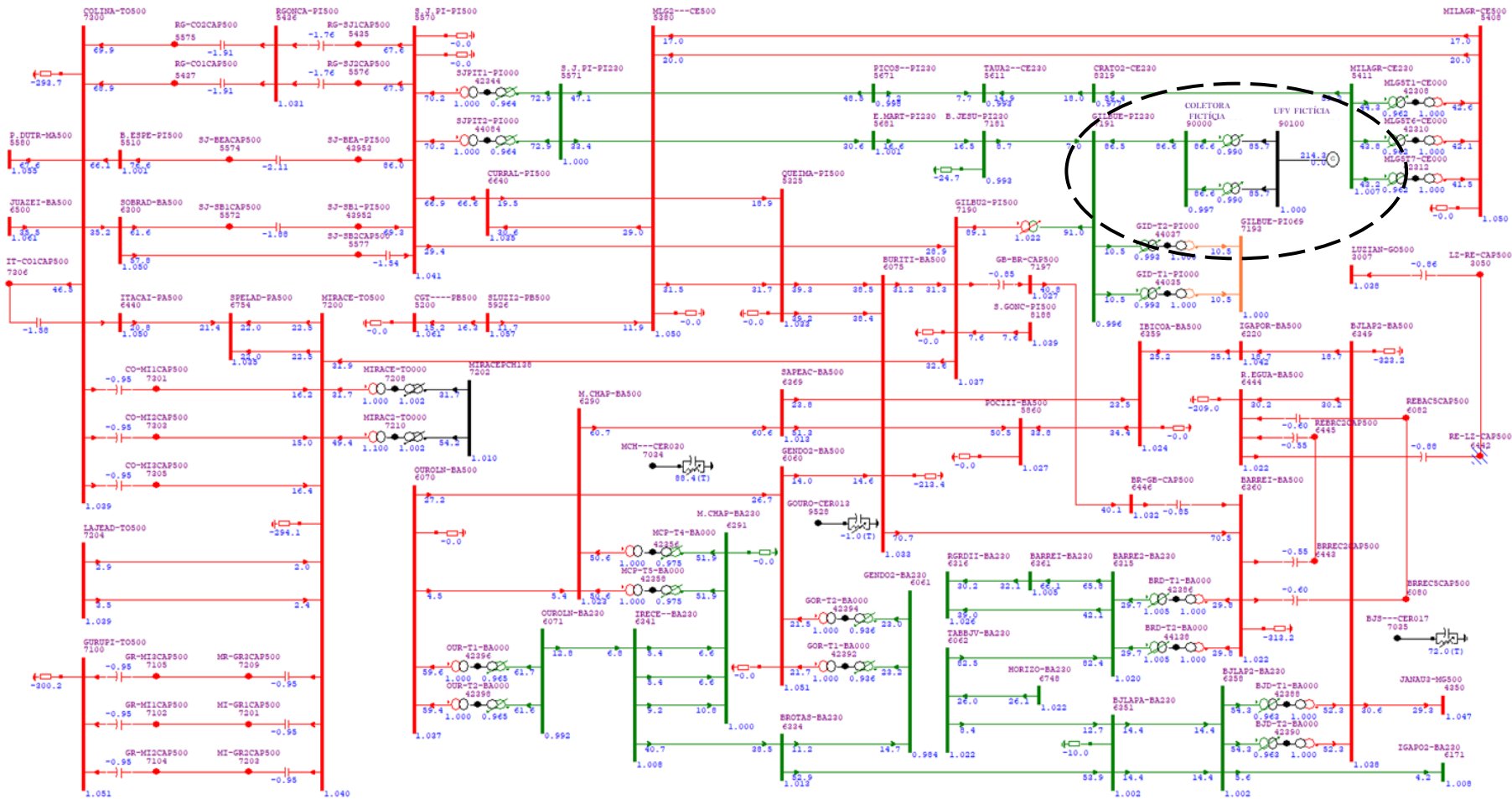
A modelagem realizada para execução deste estudo considerou que o escoamento da geração se dará de forma compartilhada por uma conexão direta a 01 barramento 34,5 kV na SE 230/34,5 kV Coletora Fictícia, que por sua vez se conecta à Rede Básica do SIN, em 230 kV, na SE 500/230 kV Gilbués II.

Dentre as premissas definidas pelo ONS no estudo de fluxo de carga na Informação de Acesso, está a exigência de o complexo solar/eólico atender os fatores de potência - 0,950 (indutivo), +0,950 (capacitivo) e 1,00 no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), fronteira com a Rede Básica.

Sendo assim, para o estudo realizado, os resultados obtidos mostram que é possível excursionar entre os valores limites de +0,950 e -0,950 do fator de potência no PAC (barramento 230 kV da SE Gilbués II), fazendo-se uso unicamente da capacidade de reativos dos inversores das UFVs.

Estando o sistema íntegro (operação normal) e uma geração plena no Complexo Solar Fictício, os recursos disponíveis para controle de reativos na região sob análise, possibilitam uma ação efetiva no controle de tensão nos barramentos 500 kV e 230 kV da Rede Básica, vide Figura 12 a representação da região sob análise.

Figura 12 - Diagrama Unifilar – Rede Básica do SIN – Complexo Solar Fictício, com conexão na SE 230/34,5 kV Coletora Fictícia, tendo conexão com a Rede Básica na em 230 kV na SE 500/230 kV Gilbués II – Horizonte operacional Verão 2024-2025 – Sistema Nordeste.



Fonte: Autor



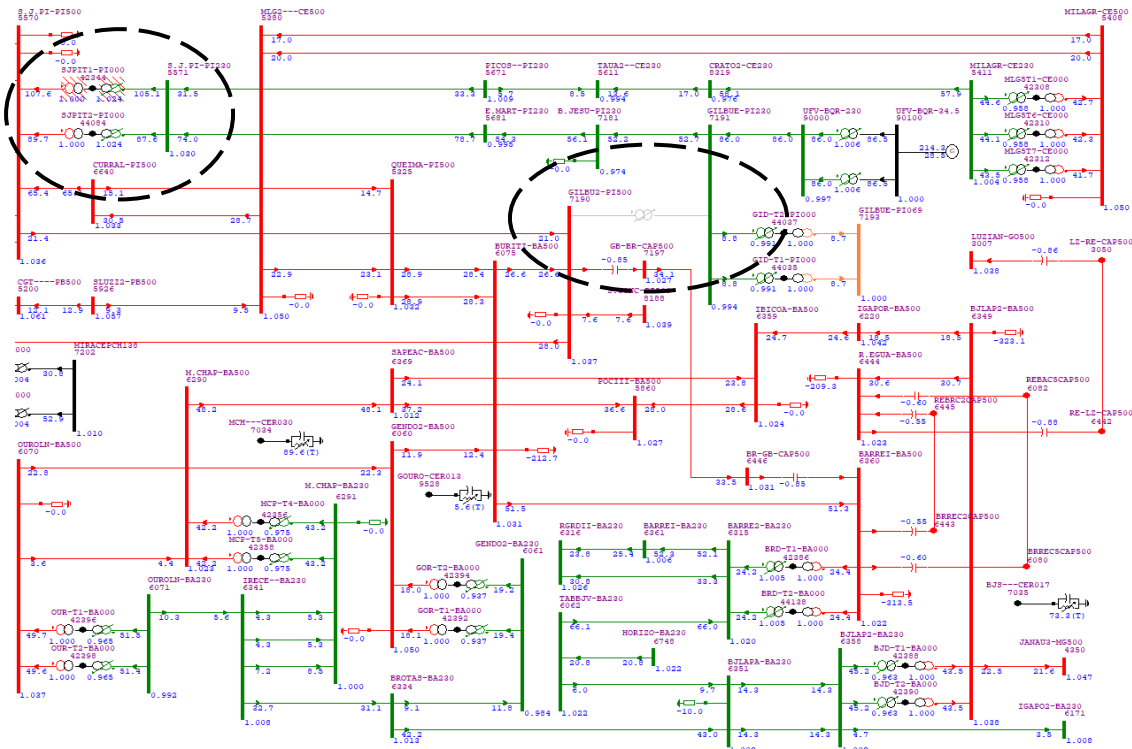
Quando de contingências, simulando a perda de um elemento por vez (critério *N-1*), observou-se os seguintes resultados:

- Na contingência do ATR 500/230 kV da SE Gilbués II, um carregamento de até 107,60% em relação a capacidade nominal do ATR 500/230 kV da SE São João do Piauí (limites de 300 MVA/300 MVA de longa/curta duração), Figura 13.
- Na contingência da LT 500 kV Rio das Éguas – Barreiras II, C5, tem-se carregamentos de até 115,75% em relação a capacidade nominal do banco de capacitor série (BCS) (limites de 1.734 MVA/2.341 MVA de longa/curta duração) da LT 500 kV Rio das Éguas – Barreiras II, C2, Figura 14.
- Na contingência do ATR 500/230 kV da SE São João do Piauí, tem-se carregamentos de até 134,90% em relação a capacidade nominal do ATR 500/230 kV da SE São João do Piauí (limites de 300 MVA/300 MVA de longa/curta duração), Figura 15.

Nas demais contingências simuladas, não se observaram sobrecargas no sistema 500/230 kV da região, ou dificuldades no controle de tensão.

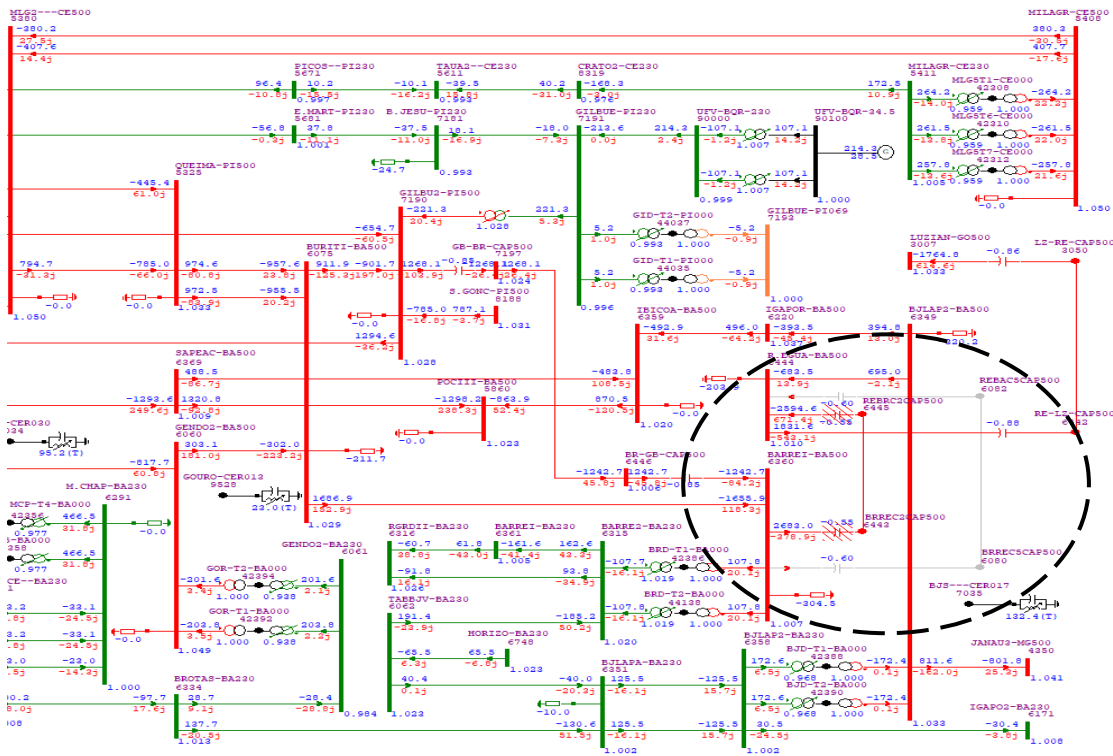
Os resultados evidenciam a viabilidade técnica do empreendimento quanto à capacidade instalada do sistema de transmissão (Rede Básica), em regime permanente, para uma geração de 214,375 MWac, em operação normal (íntegro). Quando de contingências (critério *N-1*), faz-se necessário avaliar as sobrecargas observadas, implicando na realização de reforços no sistema de transmissão.

Figura 13 – Contingência do ATR 500/230 kV da SE Gilbués II carregamento (em %) dos circuitos 500 kV e 230 kV – Horizonte janeiro/2025.



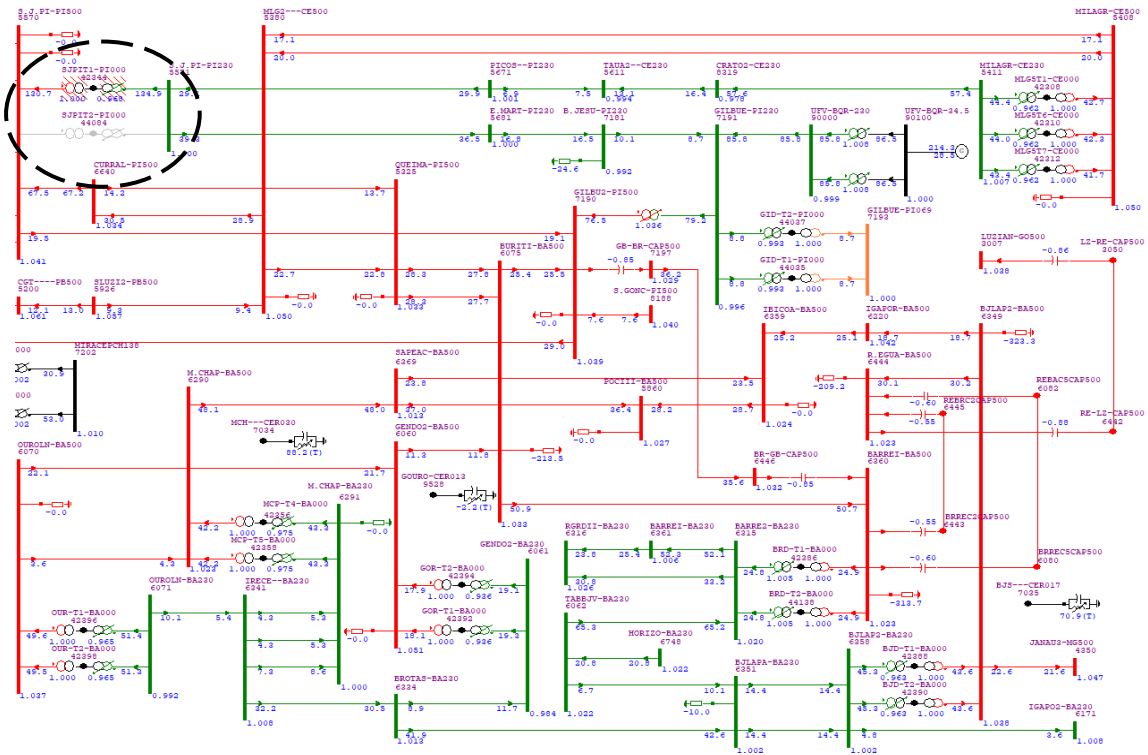
Fonte: Autor.

Figura 14- Contingência da LT 500 kV Barreiras II – Rio das Éguas, Fluxos (em MVA) dos circuitos 500 kV e 230 kV – Horizonte janeiro/2025.



Fonte: Autor.

Figura 15 – Contingência do ATR 500/230 kV da SE Gilbués II carregamento (em %) dos circuitos 500 kV e 230 kV – Horizonte janeiro/2025.



Fonte: Autor.

#### 4.2.2 CURTO-CIRCUITO

No estudo de curto-circuito, o sistema é avaliado antes e depois da conexão do empreendimento, visando determinar a evolução e o impacto nos níveis de curto-circuito, monofásico, bifásico-terra e trifásico, quando da integração das usinas solares.

Assim como o estudo de fluxo de carga, o de curto-circuito foi executado de acordo com as diretrizes e critérios dos Procedimentos de Rede [ONS, 2021].

A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que a integração do Complexo Solar Fictício, totalizando 214,375 MWac, tendo as UFVs compartilhando a conexão na SE 230/34,5 kV Coletora Fictícia, tendo a conexão com a Rede Básica do SIN, em 230 kV, na SE 500/230 kV Gilbués II, é plenamente viável.

A variação dos níveis de curto-circuito provocada exclusivamente por conta da integração da geração solar com 214,375 MWac, é da ordem de:

- Barramento 230 kV da SE 500/230 kV Gilbués II (PAC): 13,98% (0,67 kA), para o curto-circuito trifásico e de 26,24% (1,34 kA) para o curto-circuito monofásico.

Nas demais subestações 500 kV e 230 kV da região próxima, os maiores acréscimos nos níveis de curto-circuito são sempre iguais ou inferiores a 10,00% para o curto-circuito trifásico e sempre iguais ou inferiores a 10,16% para o curto-circuito monofásico. Em valores absolutos (em kA) os níveis de curto-circuito estão abaixo da capacidade interrupção teórica de disjuntores classe 500 kV e 230 kV.

Nas tabelas a seguir são apresentados os resultados obtidos no estudo de curto-circuito. Tem-se na Tabela 3 o sistema anteriormente a conexão da geração solar. Na Tabela 4, os resultados são referentes ao sistema posteriormente a integração a geração solar. Por fim, na Tabela 5, a evolução dos níveis de curto-circuito quando comparado os casos sem geração (configuração 1) e com geração (configuração 2).

Constata-se, portanto, que a incorporação do Complexo Solar Fictício (214,375 MWac), conectada à Rede Básica do SIN, em 230 kV na SE 500/230 kV Gilbués II (PAC), não altera de forma significativa os níveis de curto-circuito na região de interesse. Os resultados evidenciam a viabilidade técnica do empreendimento, visto que, não se faz necessário dispor de reforços na rede.

Tabela 3: Correntes de curto-circuito e relação X/R na região de influência da SE 500/230 kV Gilbués II (PAC), considerando a situação inicial, SEM a geração solar.

IDENTIFICAÇÃO		T R I F Á S I C O			M O N O F Á S I C O			B I F Á S I C O - T E R R A						
NUM.	NOME	VBAS	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)
7190	GILBU2-PI500	500.0	16.53	-84.13*	9.72	40.30	11.26	-82.83*	7.95	26.66	14.77	167.73*	9.22	35.74 B
7191	GILBUE-PI230	230.0	4.74	-88.18	31.43	12.78	5.11	-87.83	26.36	13.64	4.99	148.07	28.14	13.36 B
7181	B.JESU-PI230	230.0	2.11	-82.34	7.43	4.94	2.38	-82.59	7.69	5.60	2.29	44.14	7.61	5.38 C
5681	E.MART-PI230	230.0	2.11	-80.99	6.31	4.80	2.50	-81.99	7.11	5.81	2.44	47.97	6.93	5.64 C
5571	S.J.PI-PI230	230.0	13.72	-86.54	16.55	35.45	13.72	-85.76	13.50	34.78	13.86	153.71	14.82	35.45 B
5570	S.J.PI-PI500	500.0	26.04	-84.65*	10.68	64.27	14.79	-81.78*	6.93	34.21	22.84	171.80*	9.42	55.44 B
6640	CURRAL-PI500	500.0	16.02	-86.31	15.50	41.15	9.48	-83.00	8.14	22.51	14.26	170.07	12.36	35.80 B
6070	OUROLN-BA500	500.0	14.20	-86.45	16.12	36.60	9.79	-82.26	7.35	22.88	12.91	166.18	11.97	32.29 B
6071	OUROLN-BA230	230.0	21.18	-87.39	21.98	55.92	16.86	-83.98	9.48	40.95	19.83	161.50	13.61	50.32 B
6341	IRECE--BA230	230.0	12.74	-84.17	9.80	31.10	10.59	-82.10	7.21	24.66	12.07	163.30	8.65	28.94 B
6291	M.CHAP-BA230	230.0	20.95	-87.20	20.43	55.03	20.44	-85.86	13.80	51.94	21.03	152.02	15.94	54.16 B
6290	M.CHAP-BA500	500.0	11.71	-86.61	16.89	30.30	10.30	-85.50	12.70	25.94	11.19	156.96	15.05	28.67 B
6369	SAPEAC-BA500	500.0	17.03	-86.04	14.45	43.45	14.96	-83.89	9.35	36.27	16.55	160.18	12.00	41.43 B
6060	GENDO2-BA500	500.0	12.32	-86.27	15.33	31.61	9.93	-84.48	10.34	24.41	11.44	161.64	12.87	28.86 B
6334	BROTAS-BA230	230.0	5.00	-80.24	5.81	11.19	4.16	-77.87	4.65	8.87	4.80	168.06	5.38	10.56 B
6061	GENDO2-BA230	230.0	15.72	-87.26	20.87	41.36	15.24	-86.05	14.47	38.91	15.71	154.07	17.16	40.72 B
6062	TABBJV-BA230	230.0	4.81	-82.12	7.23	11.22	5.14	-82.39	7.49	12.05	5.59	48.04	7.95	13.22 C
6351	BULAPA-BA230	230.0	16.47	-87.26	20.86	43.34	16.95	-85.80	13.63	43.02	17.16	148.65	14.94	43.93 B
6358	BULAP2-BA230	230.0	17.25	-87.29	21.14	45.43	17.87	-86.25	15.24	45.83	18.05	147.86	16.78	46.70 B
6316	RGRII-BA230	230.0	3.68	-80.44	5.94	8.28	3.30	-80.46	5.95	7.43	3.52	35.20	5.93	7.90 C
6361	BARREI-BA230	230.0	7.35	-83.14	8.31	17.51	7.26	-83.21	8.40	17.33	7.36	38.37	8.46	17.58 C
6315	BARRE2-BA230	230.0	13.57	-87.37	21.77	35.80	12.15	-84.98	11.39	30.23	13.12	157.24	14.09	33.41 B
6360	BARREI-BA500	500.0	19.10	-84.36*	10.12	46.82	10.96	-81.73*	6.88	25.32	16.62	172.13*	8.70	39.88 B
6349	BULAP2-BA500	500.0	15.09	-86.45	16.13	38.91	11.97	-84.63	10.64	29.52	13.79	160.37	13.22	34.89 B
6444	R.EGUA-BA500	500.0	20.84	-84.45*	10.28	51.20	11.16	-80.81*	6.18	25.28	18.18	173.38*	8.94	43.80 B
6359	IBICOA-BA500	500.0	10.79	-85.95	14.13	27.47	8.17	-82.84	7.97	19.34	10.13	165.19	11.64	25.27 B
5860	POCIII-BA500	500.0	11.49	-85.77	13.51	29.13	8.19	-82.29	7.38	19.15	10.73	167.09	11.26	26.64 B
6075	BURITI-BA500	500.0	15.07	-85.87	13.85	38.30	9.14	-81.77	6.92	21.14	13.55	169.99	11.47	33.73 B
5325	QUEIMA-PI500	500.0	16.30	-86.06	14.53	41.63	9.39	-82.34	7.44	21.98	14.57	170.84	12.29	36.56 B

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Correntes de curto-circuito e relação X/R na região de influência da SE 500/230 kV Gilbués II (PAC), COM máxima geração no Complexo Solar Fictício.

IDENTIFICAÇÃO			T R I F Á S I C O			M O N O F Á S I C O			B I F Á S I C O - T E R R A					
NUM.	NOME	VBAS	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA)	MOD (kA)	ANG (gr)	X/R	ASSM (kA) F
90000	FICTICIA-230	230.0	4.73	-86.70	17.35	12.28	5.71	-86.46	16.18	14.72	5.45	45.12	14.94	13.96 C
90100	FICTICIA-345	34.5	18.64	-87.48	22.70	49.33	1.01	-88.63	41.75	2.75	16.15	3.74	20.40	42.42 C
7190	GILBU2-PI500	500.0	16.79	-83.75*	9.12	40.57	11.81	-83.09*	8.25	28.12	15.07	166.91*	9.24	36.48 B
7191	GILBUE-PI230	230.0	5.41	-87.70	24.86	14.39	6.45	-87.24	20.71	16.97	6.19	142.41	20.00	16.24 B
7181	B.JESU-PI230	230.0	2.32	-82.10	7.21	5.41	2.62	-82.15	7.25	6.11	2.52	44.60	7.26	5.88 C
5681	E.MART-PI230	230.0	2.24	-80.81	6.18	5.08	2.66	-81.75	6.90	6.14	2.59	48.19	6.75	5.96 C
5571	S.J.PI-PI230	230.0	13.84	-86.48	16.27	35.71	13.85	-85.70	13.31	35.04	13.98	153.77	14.60	35.72 B
5570	S.J.PI-PI500	500.0	26.15	-84.64*	10.66	64.52	14.86	-81.77*	6.92	34.37	22.94	171.81*	9.40	55.66 B
6640	CURRAL-PI500	500.0	16.07	-86.30	15.44	41.27	9.51	-82.99	8.13	22.59	14.31	170.08	12.33	35.93 B
6070	OUROLN-BA500	500.0	14.24	-86.44	16.07	36.69	9.82	-82.25	7.35	22.94	12.94	166.19	11.94	32.38 B
6071	OUROLN-BA230	230.0	21.23	-87.39	21.90	56.04	16.90	-83.97	9.47	41.06	19.88	161.51	13.58	50.44 B
6341	IRECE--BA230	230.0	12.77	-84.16	9.78	31.15	10.61	-82.09	7.20	24.71	12.09	163.31	8.64	28.99 B
6291	M.CHAP-BA230	230.0	20.99	-87.19	20.37	55.12	20.48	-85.85	13.78	52.03	21.07	152.03	15.90	54.26 B
6290	M.CHAP-BA500	500.0	11.73	-86.60	16.84	30.36	10.32	-85.49	12.68	25.99	11.22	156.97	15.01	28.73 B
6369	SAPEAC-BA500	500.0	17.04	-86.04	14.43	43.49	14.98	-83.89	9.34	36.31	16.57	160.19	11.99	41.47 B
6060	GENDO2-BA500	500.0	12.37	-86.25	15.25	31.73	9.98	-84.46	10.32	24.53	11.50	161.66	12.83	29.00 B
6334	BROTAS-BA230	230.0	5.02	-80.23	5.81	11.23	4.17	-77.86	4.65	8.90	4.81	168.07	5.37	10.60 B
6061	GENDO2-BA230	230.0	15.80	-87.24	20.76	41.55	15.33	-86.04	14.43	39.11	15.79	154.08	17.10	40.91 B
6062	TABBJV-BA230	230.0	4.84	-82.10	7.21	11.28	5.17	-82.36	7.45	12.11	5.62	48.06	7.92	13.29 C
6351	BJLAPA-BA230	230.0	16.53	-87.22	20.62	43.45	17.02	-85.79	13.57	43.15	17.22	148.67	14.86	44.07 B
6358	BJLAP2-BA230	230.0	17.31	-87.26	20.92	45.56	17.93	-86.23	15.17	45.97	18.12	147.88	16.68	46.84 B
6316	RGRDII-BA230	230.0	3.72	-80.42	5.93	8.35	3.34	-80.44	5.94	7.50	3.55	35.22	5.91	7.97 C
6361	BARREI-BA230	230.0	7.41	-83.12	8.28	17.66	7.33	-83.19	8.37	17.49	7.42	38.20	8.43	17.73 C
6315	BARRE2-BA230	230.0	13.69	-87.33	21.46	36.08	12.27	-84.96	11.35	30.51	13.25	157.25	14.00	33.72 B
6360	BARREI-BA500	500.0	19.30	-84.34*	10.09	47.28	11.10	-81.69*	6.85	25.62	16.79	172.14*	8.66	40.27 B
6349	BJLAP2-BA500	500.0	15.14	-86.43	16.03	39.01	12.02	-84.61	10.60	29.63	13.84	160.39	13.17	35.00 B
6444	R.EGUA-BA500	500.0	21.00	-84.43*	10.25	51.55	11.26	-80.78*	6.16	25.48	18.32	173.41*	8.90	44.10 B
6359	IBICOA-BA500	500.0	10.80	-85.94	14.10	27.50	8.19	-82.84	7.96	19.37	10.15	165.19	11.62	25.31 B
5860	POCIII-BA500	500.0	11.50	-85.76	13.49	29.16	8.20	-82.28	7.38	19.17	10.74	167.09	11.25	26.67 B
6075	BURITI-BA500	500.0	15.20	-85.84	13.73	38.58	9.24	-81.76	6.90	21.36	13.66	169.98	11.41	34.00 B
5325	QUEIMA-PI500	500.0	16.37	-86.05	14.48	41.78	9.43	-82.34	7.43	22.08	14.64	170.85	12.26	36.72 B

Fonte: Autor.

Tabela 5: Evolução (em %) dos níveis de curto-circuito na região de influência da SE 500/230 kV Gilbués II (PAC). Configuração 1 = SEM geração solar / Configuração 2 = COM máxima geração no Complexo Solar Fictício.

IDENTIFICACAO		CONFIGURACAO 1			CONFIGURACAO 2			EVOLUCAO ( % )		
NUM.	NOME	3F (kA)	FT (kA)	2FT (kA)	3F (kA)	FT (kA)	2FT (kA)	3F	FT	2FT
7191	GILBUE-PI230	4.74	5.11	4.99	5.41	6.45	6.19	13.98	26.24	24.20
7181	B.JESU-PI230	2.11	2.38	2.29	2.32	2.62	2.52	10.00	10.16	10.04
5681	E.MART-PI230	2.11	2.50	2.44	2.24	2.66	2.59	6.13	6.13	6.13
7190	GILBU2-PI500	16.53	11.26	14.77	16.79	11.81	15.07	1.55	4.86	2.03
6360	BARREI-BA500	19.10	10.96	16.62	19.30	11.10	16.79	1.01	1.25	1.03
6075	BURITI-BA500	15.07	9.14	13.55	15.20	9.24	13.66	0.83	1.10	0.86
6315	BARRE2-BA230	13.57	12.15	13.12	13.69	12.27	13.25	0.88	1.00	0.98
6316	RGRDII-BA230	3.68	3.30	3.52	3.72	3.34	3.55	0.92	0.98	0.94
6361	BARREI-BA230	7.35	7.26	7.36	7.41	7.33	7.42	0.92	0.95	0.92
5571	S.J.PI-PI230	13.72	13.72	13.86	13.84	13.85	13.98	0.89	0.91	0.90
6444	R.EGUA-BA500	20.84	11.16	18.18	21.00	11.26	18.32	0.74	0.87	0.75
6062	TABBJV-BA230	4.81	5.14	5.59	4.84	5.17	5.62	0.61	0.58	0.60
6061	GENDO2-BA230	15.72	15.24	15.71	15.80	15.33	15.79	0.49	0.53	0.51
6060	GENDO2-BA500	12.32	9.93	11.44	12.37	9.98	11.50	0.44	0.53	0.51
5570	S.J.PI-PI500	26.04	14.79	22.84	26.15	14.86	22.94	0.41	0.49	0.42
5325	QUEIMA-PI500	16.30	9.39	14.57	16.37	9.43	14.64	0.41	0.49	0.47
6349	BJLAP2-BA500	15.09	11.97	13.79	15.14	12.02	13.84	0.32	0.39	0.36
6640	CURRAL-PI500	16.02	9.48	14.26	16.07	9.51	14.31	0.33	0.39	0.38
6358	BJLAP2-BA230	17.25	17.87	18.05	17.31	17.93	18.12	0.34	0.36	0.35
6351	BJLAPA-BA230	16.47	16.95	17.16	16.53	17.02	17.22	0.34	0.36	0.35
6334	BROTAS-BA230	5.00	4.16	4.80	5.02	4.17	4.81	0.36	0.36	0.36
6070	OUROLN-BA500	14.20	9.79	12.91	14.24	9.82	12.94	0.28	0.31	0.29
6071	OUROLN-BA230	21.18	16.86	19.83	21.23	16.90	19.88	0.25	0.27	0.26
6341	IRECE--BA230	12.74	10.59	12.07	12.77	10.61	12.09	0.20	0.22	0.21
6290	M.CHAP-BA500	11.71	10.30	11.19	11.73	10.32	11.22	0.21	0.22	0.22
6291	M.CHAP-BA230	20.95	20.44	21.03	20.99	20.48	21.07	0.19	0.19	0.19
6359	IBICOA-BA500	10.79	8.17	10.13	10.80	8.18	10.15	0.14	0.17	0.17
5860	POCIII-BA500	11.49	8.19	10.73	11.50	8.20	10.74	0.12	0.12	0.12
6369	SAPEAC-BA500	17.03	14.96	16.55	17.04	14.98	16.57	0.10	0.11	0.11

Fonte: Autor.

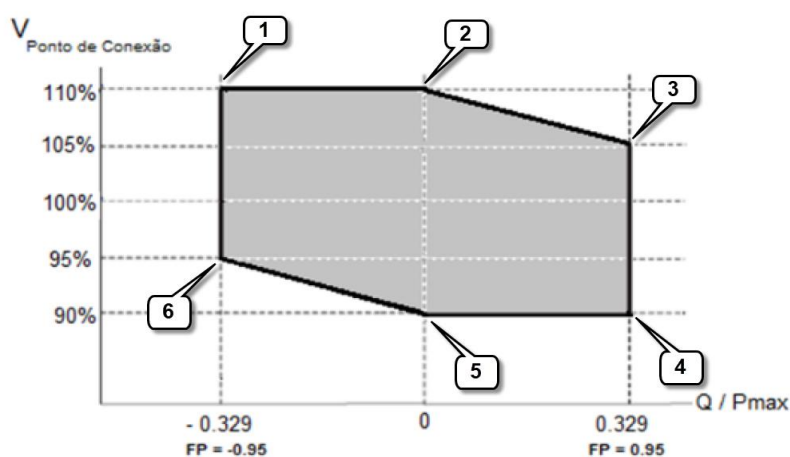
### 4.3 PARECER DE ACESSO

Na etapa referente ao Parecer de Acesso, faz-se necessário dispor de todas as características/parâmetros do empreendimento. Nesse sentido, as modelagens realizadas para os estudos possuem o maior grau de detalhamento possível, sendo modelado cada inversor/aerogerador do complexo e cada cabo da RMT. Além dos estudos de fluxo de carga e curto-circuito, já exigidos na etapa de Informação de Acesso, faz-se necessário realizar os estudos de estabilidade dinâmica e qualidade da energia elétrica.

No estudo de fluxo de carga, além das considerações feitas na etapa da Informação de Acesso, tem como adicional todo o detalhamento do empreendimento e o cumprimento de um dimensionamento da compensação reativa para atendimento do fator de potência em regime de tensão não nominal. De acordo com Submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede [ONS, 2021], faz-se necessário atender os pontos dos vértices do polígono apresentado na Figura 16.

No ponto de operação 1, deve-se atender o fator de potência de  $-0,950$  (indutivo) para uma tensão no PAC de  $1,100$  pu. No outro extremo, no ponto de operação 4, deve-se atender o fator de potência de  $+0,950$  (capacitivo) para uma tensão no PAC de  $0,900$  pu. Teoricamente, ao atender estes extremos (vértices 1 e 4), os demais pontos de operação podem ser atendidos, fazendo uso da capacidade de reativos dos inversores/aerogeradores + compensação reativa disponível na subestação coletora. Nos requisitos dos Procedimentos de Rede do SIN, o fator de potência deve excursionar entre  $-0,950$  (indutivo) e  $+0,950$  (capacitivo) no PAC.

Figura 16 - Requisito para atendimento ao fator de potência na faixa operativa de tensão não nominal no ponto de conexão – Submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede [ONS, 2021].



Fonte: ONS (2020), adaptado.

No estudo de curto-circuito, faz-se necessário considerar todo o detalhamento do empreendimento e realizar análises semelhantes às realizadas na etapa da Informação de Acesso (sem geração, com geração e evolução dos níveis de curto-circuito).

O estudo de estabilidade dinâmica visa avaliar a resposta do sistema frente a conexão do empreendimento e das contingências simuladas analisando os transitórios eletromecânicos. Para execução destes estudos utiliza-se o software ANATEM. No entanto, estes estudos são elaborados em um outro setor da empresa, no estágio realizado não houve contato com estes estudos.

No estudo de qualidade da energia elétrica, avalia-se o impacto das distorções harmônicas provenientes de fontes não lineares inversores/aerogeradores no PAC. Sendo assim, tem-se como referência os limites estabelecidos pelos ONS para as distorções harmônicas individuais e total.

De acordo com os Submódulos 2.9, 7,8 e 9.7 dos Procedimentos de Rede [ONS, 2021], a solicitação de acesso de agentes de geração, cujas instalações não lineares possam comprometer o desempenho da rede de transmissão, devem ser realizadas análises fundamentadas em indicadores de qualidade da energia elétrica (QEE), sendo os fenômenos de distorção harmônica o de maior interesse.

Os limites individuais de desempenho, relativos aos indicadores de QEE, devem ser respeitados em todos os modos de operação possíveis, ou seja, tanto em operação normal como degradada, da instalação do agente e da rede de transmissão (contingências N-1), tais como a saída de linhas de transmissão, transformadores, bancos de capacitores, reatores, dentre outros, no entorno do PAC (Ponto de Acoplamento Comum = Fronteira com a Rede Básica).

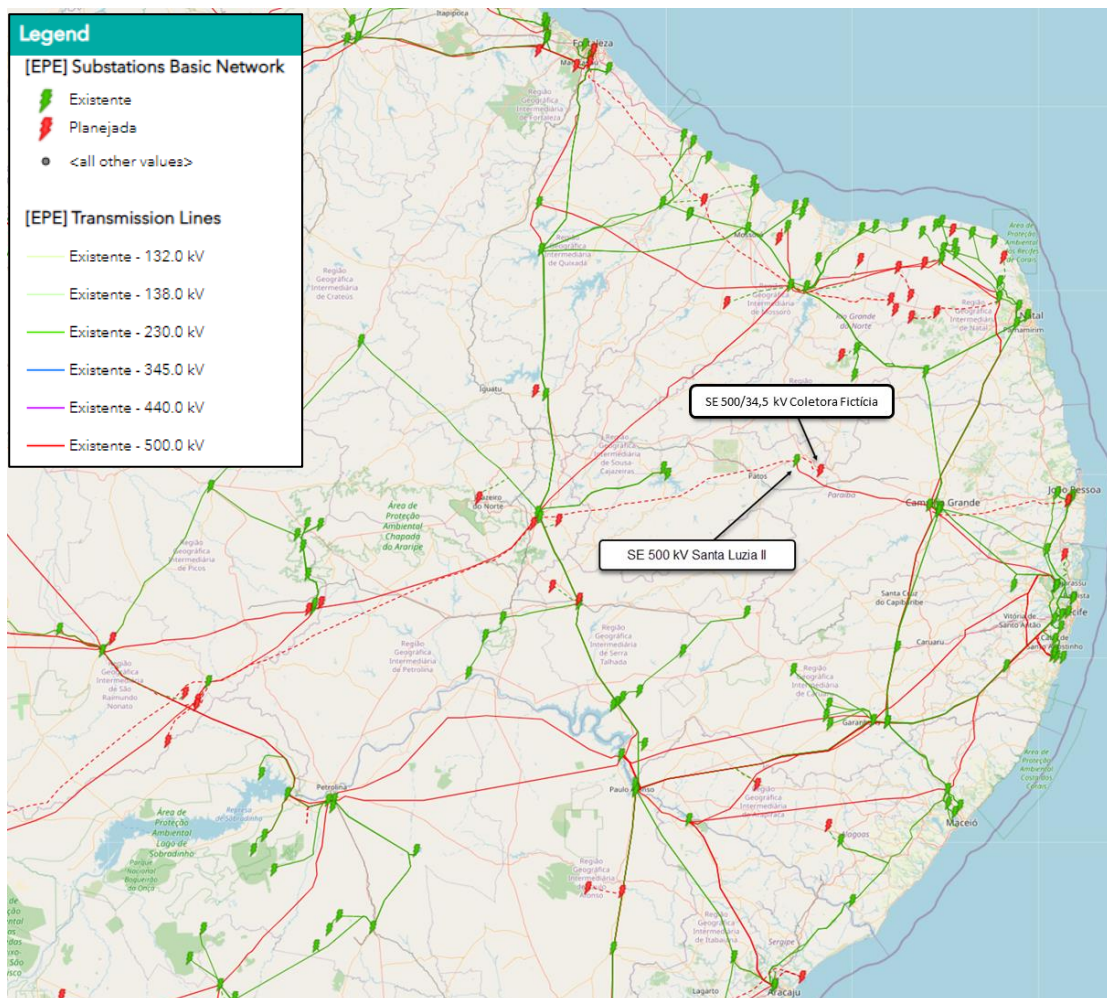
A realização dos estudos de QEE possibilita uma avaliação prospectiva do efeito da nova instalação no sistema, considerando diversas configurações sistêmicas no horizonte de operação disponível, incluindo condições de emergência (N-1), que poderão não ocorrer, necessariamente, durante as campanhas de medição. Assim sendo, ambos os procedimentos, estudo e medição, têm caráter complementar, pois se referem a momentos e situações distintas [ONS, 2021].

#### 4.3.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Para tanto, um dos estudos de QEE realizados, avaliou a integração de 10 Usinas Eólicas (EOLs), compondo o Complexo Eólico Fictício, totalizando 256,2 MW. Em função

da localização geográfica das usinas eólicas, o escoamento da geração se dará de forma compartilhada por uma conexão direta a 02 (dois) barramentos 34,5 kV na SE 500/34,5 kV Coletora Fictícia, que por sua vez se conecta à Rede Básica do SIN, em 500 kV, na SE 500 kV Santa Luzia II. Apresenta-se a seguir a topologia da Rede Básica do SIN (Sistema Interligado Nacional), com destaque para a região próxima da SE 500 kV Santa Luzia II, no horizonte operacional 2026 [ECOTx, 2021; EPE, 2021].

Figura 17 - Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN) – Horizonte operacional 2026 – Região região próxima da SE 500 kV Santa Luzia II [ECOTx, 2021].



Fonte: ECOTx (2021), adaptado.

Para a realização do estudo de QEE, adotou-se as diretrizes e os critérios constantes dos Submódulo 2.3 [ONS, 2021] e Submódulo 7.8 [ONS, 2021] dos Procedimentos de Rede do SIN. Especificamente para o estudo do comportamento harmônico em instalações 230 kV, faz-se uso dos valores apresentados no Submódulo 2.3.



Com relação aos limites para a distorção harmônica de tensão, apresenta-se nas tabelas a seguir os limites globais e individuais inferiores para os indicadores DTHI e DTHTS95% [ONS, 2021].

Tabela 6 - Limites globais inferiores para os indicadores DTHI e DTHTS95% [ONS, 2021].

<b>V &lt; 69 kV</b>				<b>V ≥ 69 kV</b>			
<b>DTHI, h ímpar</b>		<b>DTHI, h par</b>		<b>DTHI, h ímpar</b>		<b>DTHI, h par</b>	
<b>Ordem</b>	<b>Valor (%)</b>	<b>Ordem</b>	<b>Valor (%)</b>	<b>Ordem</b>	<b>Valor (%)</b>	<b>Ordem</b>	<b>Valor (%)</b>
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
<b>DTHTS95% = 6%</b>				<b>DTHTS95% = 3%</b>			

Fonte: ONS (2020).

Tabela 7 - Limites individuais inferiores para os indicadores DTHI e DTHTS95% [ONS, 2021].

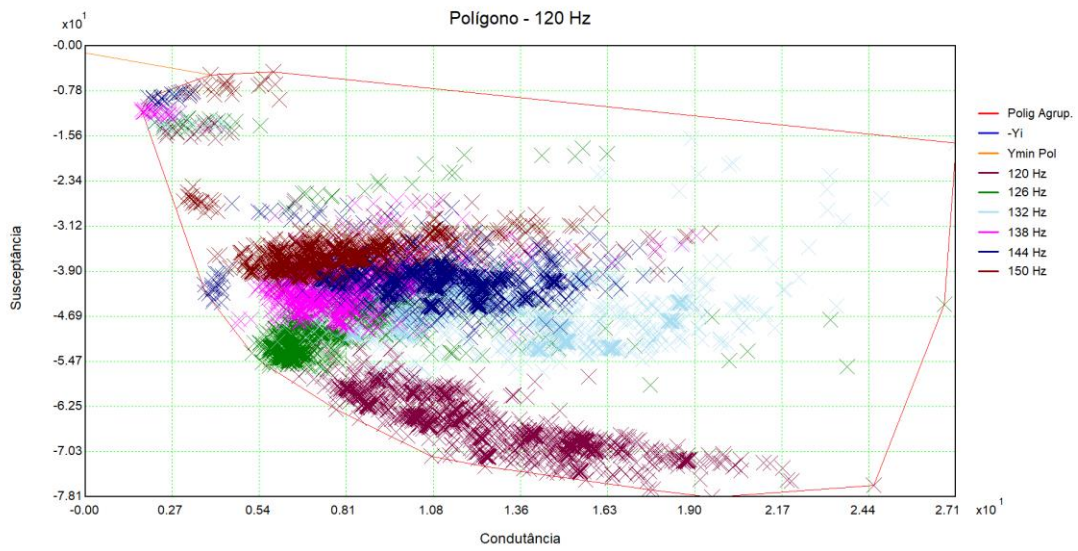
<b>13,8 kV ≤ V &lt; 69 kV</b>				<b>V ≥ 69 kV</b>			
<b>DTHI, h ímpar</b>		<b>DTHI, h par</b>		<b>DTHI, h ímpar</b>		<b>DTHI, h par</b>	
<b>Ordem</b>	<b>Valor (%)</b>	<b>Ordem</b>	<b>Valor (%)</b>	<b>Ordem</b>	<b>Valor (%)</b>	<b>Ordem</b>	<b>Valor (%)</b>
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥27	0,7%			≥27	0,4%		
<b>DTHTS95% = 3%</b>				<b>DTHTS95% = 1,5%</b>			

Fonte: ONS (2020).

Considerando a integração do Complexo Eólico Fictício, calcula-se a distorção harmônica de tensão para o horizonte 2023/2024/2025/2026 estando o sistema íntegro e degradado (contingências *N-1*). Tem-se como Ponto de Acoplamento Comum (PAC) o barramento 500 kV da SE 500 kV Santa Luzia II (fronteira com a Rede Básica).

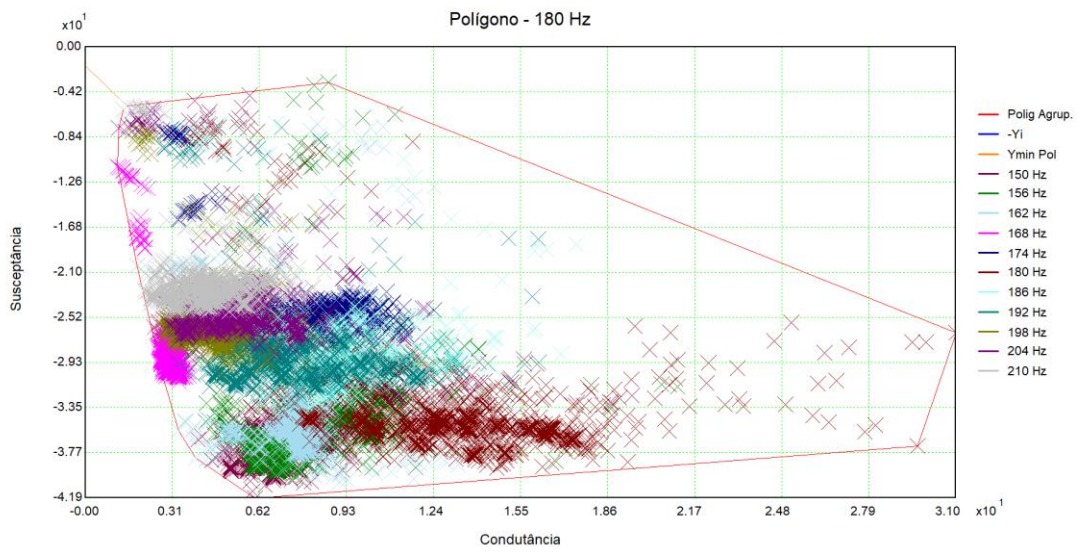
Para tanto, considera-se o Complexo Eólico Fictício com máxima geração eólica, estando os 61 aerogeradores VESTAS V150, 4,2 MW, conectados e em operação. Apresenta-se a seguir, os resultados obtidos no HarmZs para os lugares geométricos (LG) de admitâncias, fazendo uso do Polígono de “n” lados.

Figura 18 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 120 Hz.



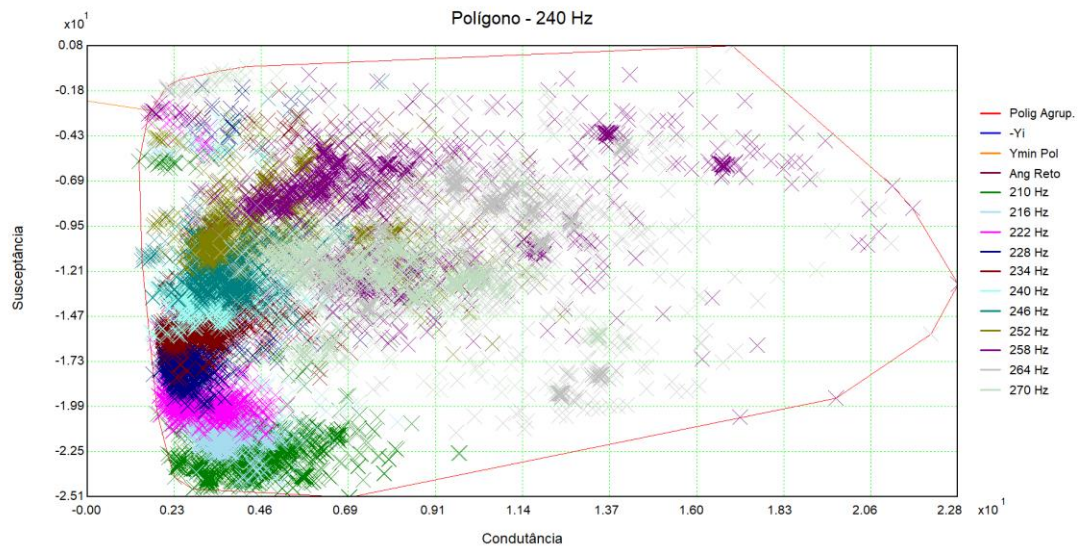
Fonte: Autor.

Figura 19 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 180 Hz.



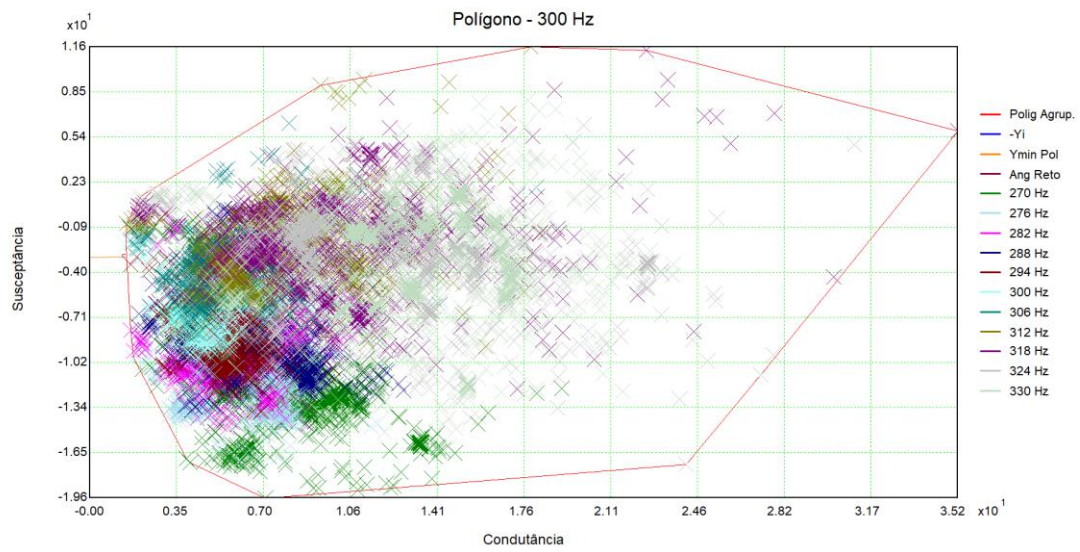
Fonte: Autor.

Figura 20 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 240 Hz.



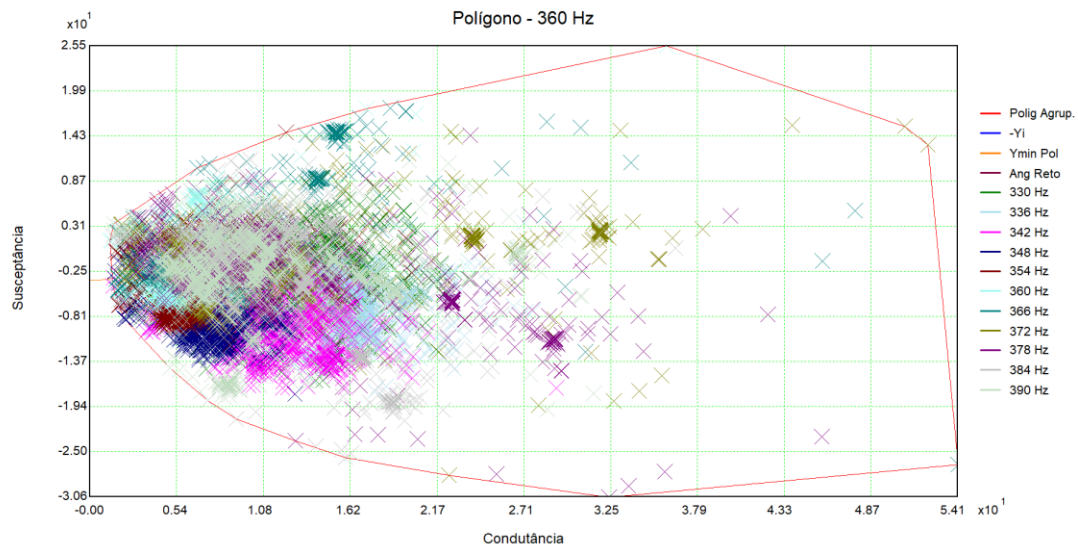
Fonte: Autor.

Figura 21 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 300 Hz.



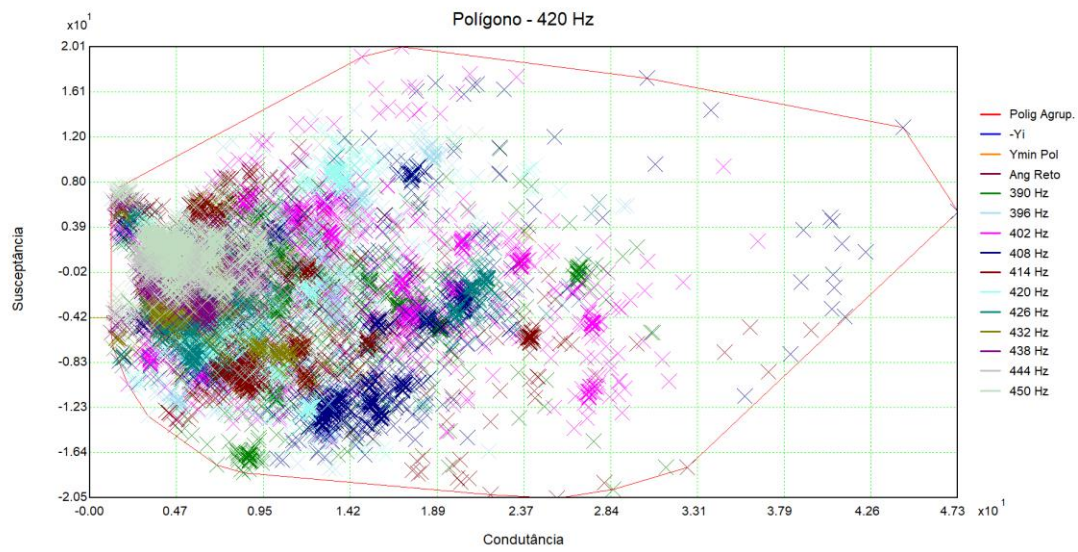
Fonte: Autor.

Figura 22 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 360 Hz.



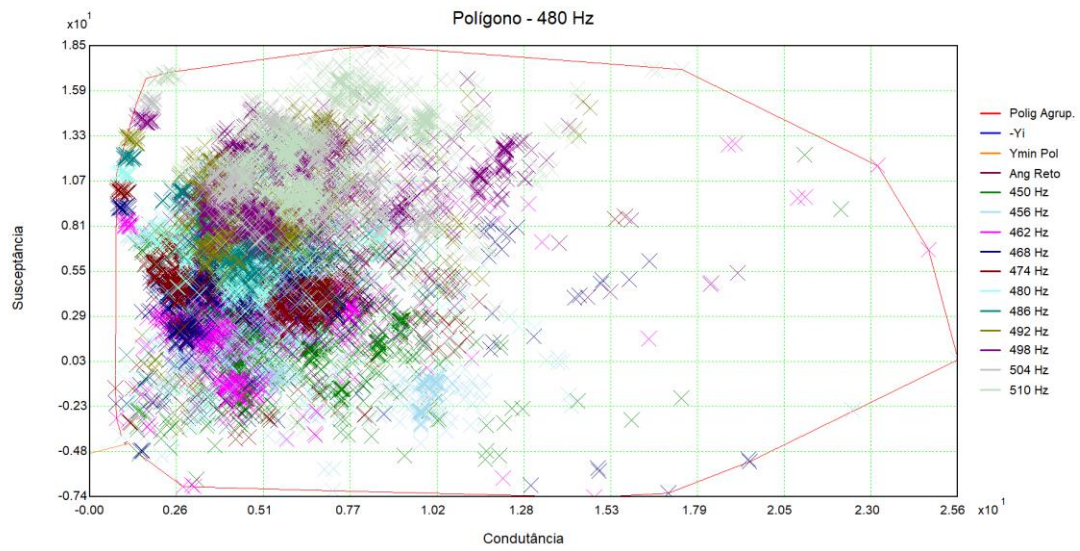
Fonte: Autor.

Figura 23 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 420 Hz.



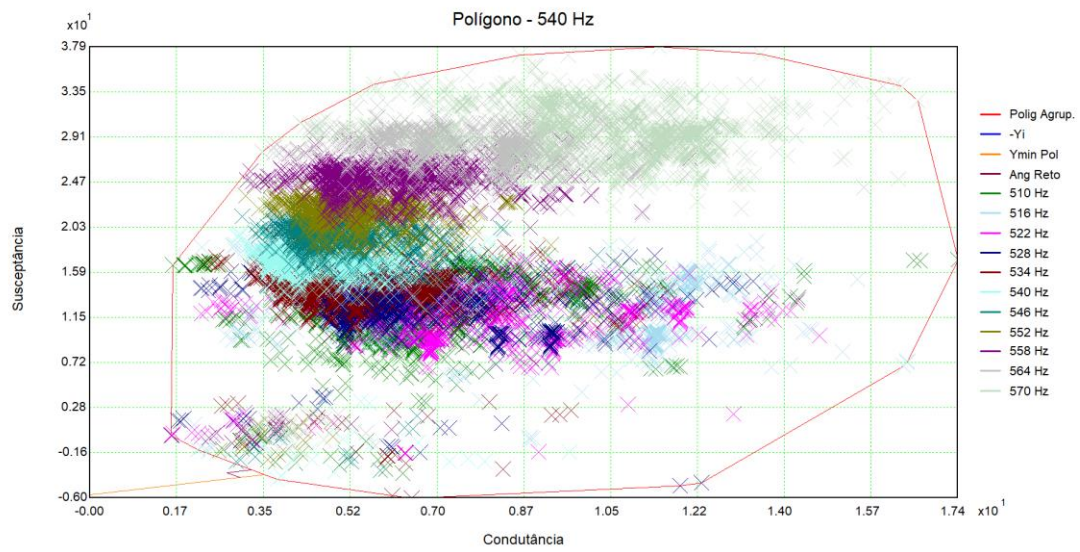
Fonte: Autor.

Figura 24 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 480 Hz.



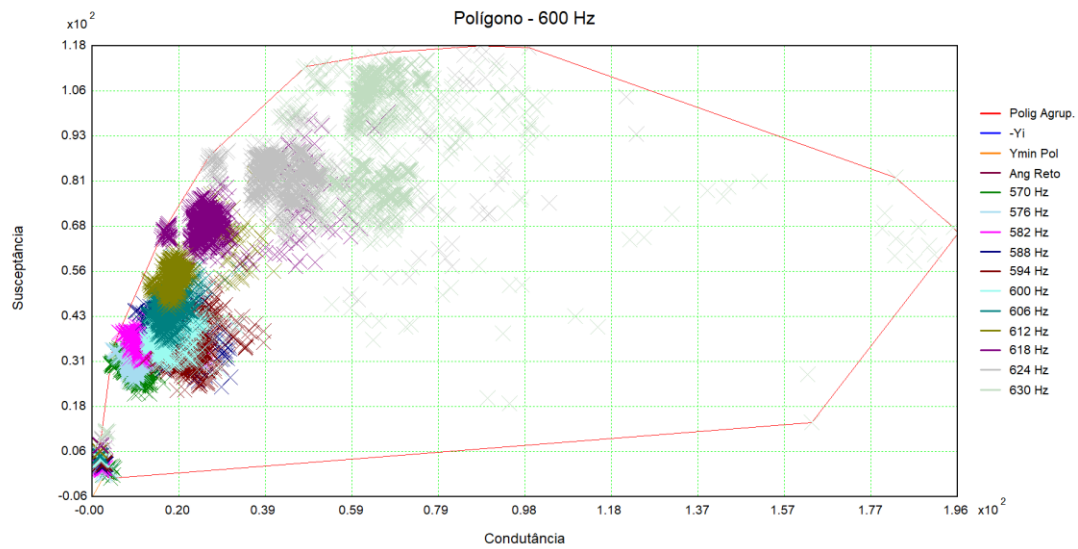
Fonte: Autor.

Figura 25 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 540 Hz.



Fonte: Autor.

Figura 26 - Lugar Geométrico (LG) – Polígono de “n” lados (plano GB), 600 Hz.



Fonte: Autor.

Apresenta-se na tabela a seguir uma síntese dos resultados para a distorção harmônica de tensão, obtidos com a metodologia do Polígono de “n” lados, aqui utilizada para o LG.

Tabela 8: Síntese dos resultados -Distorção harmônica – Polígono de “n” lados (plano GB) – Horizonte 2023/2024/2025/2026, carga PESADA, MÉDIA e LEVE, INVERNO e VERÃO – Sistema inteiro + degradado – Complexo Eólico Fictício em operação, com máxima geração.

Ordem (H)	Frequência (Hz)	I Norton  (pu)	a (fator de agregação)	Yi (pu)	Ymin Polígono (pu)	DHI Máx Polígono (%)	Limites ONS (%)	Frequências LG
2	120	0,0062	1	0,0002+j1,1495	5,4762	0,1131	0,3	120 126 132 138 144 150
3	180	0,0023	1	0,0005+j1,7331	4,031	0,0582	0,6	150 156 162 168 174 180 186 192 198 204 210
4	240	0,0074	1	0,0011+j2,3274	1,7488	0,4226	0,3	210 216 222 228 234 240 246 252 258 264 270
5	300	0,0017	1,4	0,0019+j2,9366	1,4955	0,1165	0,6	270 276 282 288 294 300 306 312 318 324 330
6	360	0,0004	1,4	0,0030+j3,5650	1,4427	0,0294	0,3	330 336 342 348 354 360 366 372 378 384 390
7	420	0,0016	1,4	0,0045+j4,2175	1,1761	0,1329	0,6	390 396 402 408 414 420 426 432 438 444 450
8	480	0,0008	1,4	0,0064+j4,8998	1,2938	0,0622	0,3	450 456 462 468 474 480 486 492 498 504 510
9	540	0,0005	1,4	0,0090+j5,6185	4,0181	0,0115	0,6	510 516 522 528 534 540 546 552 558 564 570
10	600	0,0012	1,4	0,0122+j6,3812	6,5299	0,0191	0,3	570 576 582 588 594 600 606 612 618 624 630
11	660	0,0022	2	0,0164+j7,1972	4,5363	0,0486	0,6	630 636 642 648 654 660 666 672 678 684 690
12	720	0,0003	2	0,0217+j8,0780	2,7335	0,0112	0,3	690 696 702 708 714 720 726 732 738 744 750
13	780	0,0015	2	0,0284+j9,0375	4,1628	0,0354	0,6	750 756 762 768 774 780 786 792 798 804 810
14	840	0,0003	2	0,0372+j10,0937	3,8454	0,0089	0,3	810 816 822 828 834 840 846 852 858 864 870
15	900	0,0002	2	0,0485+j11,2694	3,6091	0,0044	0,6	870 876 882 888 894 900 906 912 918 924 930
16	960	0,0003	2	0,0634+j12,5948	5,8278	0,0058	0,3	930 936 942 948 954 960 966 972 978 984 990
17	1020	0,0012	2	0,0832+j14,1103	9,9974	0,0116	0,6	990 996 1002 1008 1014 1020 1026 1032 1038 1044 1050
18	1080	0,0002	2	0,1101+j15,8717	16,8522	0,0012	0,3	1050 1056 1062 1068 1074 1080 1086 1092 1098 1104 1110
19	1140	0,0011	2	0,1474+j17,9581	16,02	0,007	0,6	1110 1116 1122 1128 1134 1140 1146 1152 1158 1164 1170
20	1200	0,0003	2	0,2006+j20,4858	15,4029	0,0016	0,3	1170 1176 1182 1188 1194 1200 1206 1212 1218 1224 1230
21	1260	0,0002	2	0,2794+j23,6333	8,2029	0,0023	0,6	1230 1236 1242 1248 1254 1260 1266 1272 1278 1284 1290
22	1320	0,0003	2	0,4016+j27,6891	8,3449	0,004	0,3	1290 1296 1302 1308 1314 1320 1326 1332 1338 1344 1350
23	1380	0,0016	2	0,6034+j33,1525	8,5032	0,0189	0,6	1350 1356 1362 1368 1374 1380 1386 1392 1398 1404 1410
24	1440	0,0003	2	0,9668+j40,9689	9,308	0,0036	0,4	1410 1416 1422 1428 1434 1440 1446 1452 1458 1464 1470
25	1500	0,0035	2	1,7112+j53,1716	27,5577	0,0126	0,6	1470 1476 1482 1488 1494 1500 1506 1512 1518 1524 1530

Ordem (H)	Frequência (Hz)	I Norton  (pu)	a (fator de agregação)	Yi (pu)	Ymin Poligono (pu)	DHI Máx Poligono (%)	Limites ONS (%)	Frequências LG
26	1560	0,0006	2	3,5920+j75,0711	57,8935	0,0011	0,4	1530 1536 1542 1548 1554 1560 1566 1572 1578 1584 1590
27	1620	0,0011	2	10,7505+j126,2235	113,2636	0,0009	0,6	1590 1596 1602 1608 1614 1620 1626 1632 1638 1644 1650
28	1680	0,0033	2	106,5908+j373,3560	381,419	0,0009	0,4	1650 1656 1662 1668 1674 1680 1686 1692 1698 1704 1710
29	1740	0,0118	2	82,7358-j322,1569	323,6032	0,0036	0,6	1710 1716 1722 1728 1734 1740 1746 1752 1758 1764 1770
30	1800	0,0005	2	11,3080-j118,8786	99,0568	0,0006	0,4	1770 1776 1782 1788 1794 1800 1806 1812 1818 1824 1830
31	1860	0,0017	2	4,3893-j72,0146	42,3927	0,004	0,6	1830 1836 1842 1848 1854 1860 1866 1872 1878 1884 1890
32	1920	0,0003	2	2,3734-j51,3123	25,5135	0,001	0,4	1890 1896 1902 1908 1914 1920 1926 1932 1938 1944 1950
33	1980	0,0002	2	1,5123-j39,5969	22,8638	0,0009	0,6	1950 1956 1962 1968 1974 1980 1986 1992 1998 2004 2010
34	2040	0,0002	2	1,0628-j32,0185	23,4544	0,0007	0,4	2010 2016 2022 2028 2034 2040 2046 2052 2058 2064 2070
35	2100	0,0005	2	0,7973-j26,6821	10,2347	0,0046	0,6	2070 2076 2082 2088 2094 2100 2106 2112 2118 2124 2130
36	2160	0,0001	2	0,6267-j22,6948	5,1543	0,0027	0,4	2130 2136 2142 2148 2154 2160 2166 2172 2178 2184 2190
37	2220	0,0003	2	0,5102-j19,5807	6,7997	0,0039	0,6	2190 2196 2202 2208 2214 2220 2226 2232 2238 2244 2250
38	2280	0,0001	2	0,4270-j17,0625	5,9461	0,0021	0,4	2250 2256 2262 2268 2274 2280 2286 2292 2298 2304 2310
39	2340	0	2	0,3656-j14,9676	7,311	0	0,6	2310 2316 2322 2328 2334 2340 2346 2352 2358 2364 2370
40	2400	0,0001	2	0,3191-j13,1820	4,7734	0,0024	0,4	2370 2376 2382 2388 2394 2400 2406 2412 2418 2424 2430
41	2460	0,0001	2	0,2832-j11,6274	2,7857	0,0041	0,6	2430 2436 2442 2448 2454 2460 2466 2472 2478 2484 2490
42	2520	0,0001	2	0,2554-j10,2475	3,3336	0,0035	0,4	2490 2496 2502 2508 2514 2520 2526 2532 2538 2544 2550
43	2580	0,0001	2	0,2337-j8,9996	11,3086	0,001	0,6	2550 2556 2562 2568 2574 2580 2586 2592 2598 2604 2610
44	2640	0	2	0,2173-j7,8502	10,3645	0	0,4	2610 2616 2622 2628 2634 2640 2646 2652 2658 2664 2670
45	2700	0	2	0,2055-j6,7707	18,531	0	0,6	2670 2676 2682 2688 2694 2700 2706 2712 2718 2724 2730
46	2760	0	2	0,1984-j5,7347	14,1088	0	0,4	2730 2736 2742 2748 2754 2760 2766 2772 2778 2784 2790
47	2820	0,0001	2	0,1967-j4,7144	8,1151	0,0018	0,6	2790 2796 2802 2808 2814 2820 2826 2832 2838 2844 2850
48	2880	0	2	0,2023-j3,6756	5,2886	0	0,4	2850 2856 2862 2868 2874 2880 2886 2892 2898 2904 2910
49	2940	0,0002	2	0,2199-j2,5684	2,1271	0,0085	0,6	2910 2916 2922 2928 2934 2940 2946 2952 2958 2964 2970
50	3000	0	2	0,2619-j1,3029	1,5289	0	0,4	2970 2976 2982 2988 2994 3000
#	DTHT					0,4859	1,5	#



A Tabela 8 sintetiza os resultados da distorção harmônica de tensão no PAC (barramento 500 kV da SE 500 kV Santa Luzia II), decorrentes das correntes harmônicas injetadas pelos aerogeradores do Complexo Eólico Fictício. A distorção harmônica total de tensão (*DTHT*) é dada por:

$$DTHT = \sqrt{\sum V_h^2} \quad (\text{em } \%)$$

Sendo:

$V_h = 100 \times \frac{v_h}{v_i}$ ;  $V_h$  = tensão harmônica de ordem  $h$ , em porcentagem da tensão à frequência fundamental;  $v_h$  = tensão harmônica de ordem  $h$ , em [V];  $v_i$  = tensão à frequência fundamental, em [V].

Com base nos valores calculados, para o Complexo Eólico com máxima geração, tem-se a DHT = **0,4859%**. O limite para distorção harmônica total de tensão ( $DHTT = 1,5\%$ ) não foi violado no caso simulado com o Polígono de “n” lados. Observou-se violações dos limites individuais apenas para o 4º (240 Hz) harmônico, no caso aqui simulado, vide Tabela 9.

Tabela 9 – Ordem harmônica acima do limite estabelecido pelo ONS.

Ordem (H)	Frequência (Hz)	DHI Máx Polígono (%)	Limites ONS (%)
4	240	0,4226	0,3

Fonte: Autor.

Dos resultados, constatou-se que, faz-se necessário projetar e verificar a efetividade de um filtro de harmônicos sintonizado para a 4ª ordem (240 Hz).

Como uma alternativa viável, sob os aspectos técnicos e econômicos, considerou-se a alocação de um filtro sintonizado (*single tuned*) em derivação (*shunt*), composto por elementos *RLC* conectados em série, nos barramentos 34,5 kV da SE Coletora Fictícia.

Para tanto, tem-se como premissas/resultados de projeto:

- Tensão nominal: 34,5 kV.
- Frequência fundamental: 60 Hz.
- Frequência de sintonia: 4º (240 Hz) harmônico.
- Fator de qualidade ( $Q_f$ ): 100 para o 4º harmônico.
- 02 filtros sintonizados de 244,2 kvar, totalizando 488,4 kvar.

A seguir, demonstra-se que a solução de filtro proposta elimina as violações observadas anteriormente. Constatou-se, portanto, a efetividade do filtro projetado.

**Tabela 10: Síntese dos resultados -Distorção harmônica – Polígono de “n” lados (plano GB) – Horizonte 2023/2024/2025/2026, carga PESADA, MÉDIA e LEVE, INVERNO e VERÃO – Sistema inteiro + degradado – Complexo Eólico Fictício, com máxima geração + filtros de harmônicos.**

Ordem (H)	Frequência (Hz)	I Norton  (pu)	a	Yi (pu)	Ymin Poligono (pu)	DHI Máx Poligono (%)	Limites ONS (%)	Frequências LG
2	120	0,0062	1	0,0004+j1,1619	5,4676	0,1134	0,3	120 126 132 138 144 150
3	180	0,0024	1	0,0017+j1,7655	4,0012	0,0588	0,6	150 156 162 168 174 180 186 192 198 204 210
4	240	0,0073	1	0,9594+j2,2284	2,6924	0,2729	0,3	210 216 222 228 234 240 246 252 258 264 270
5	300	0,0017	1,4	0,0038+j2,8925	1,4958	0,1158	0,6	270 276 282 288 294 300 306 312 318 324 330
6	360	0,0004	1,4	0,0035+j3,5401	1,4424	0,0293	0,3	330 336 342 348 354 360 366 372 378 384 390
7	420	0,0016	1,4	0,0047+j4,1990	1,1763	0,1325	0,6	390 396 402 408 414 420 426 432 438 444 450
8	480	0,0008	1,4	0,0066+j4,8845	1,2872	0,0624	0,3	450 456 462 468 474 480 486 492 498 504 510
9	540	0,0005	1,4	0,0091+j5,6049	4,0116	0,0115	0,6	510 516 522 528 534 540 546 552 558 564 570
10	600	0,0012	1,4	0,0123+j6,3686	6,5185	0,0191	0,3	570 576 582 588 594 600 606 612 618 624 630
11	660	0,0022	2	0,0164+j7,1852	4,5354	0,0485	0,6	630 636 642 648 654 660 666 672 678 684 690
12	720	0,0003	2	0,0217+j8,0662	2,7315	0,0112	0,3	690 696 702 708 714 720 726 732 738 744 750
13	780	0,0015	2	0,0284+j9,0257	4,1594	0,0354	0,6	750 756 762 768 774 780 786 792 798 804 810
14	840	0,0003	2	0,0371+j10,0815	3,8433	0,0089	0,3	810 816 822 828 834 840 846 852 858 864 870
15	900	0,0002	2	0,0484+j11,2566	3,6034	0,0043	0,6	870 876 882 888 894 900 906 912 918 924 930
16	960	0,0003	2	0,0633+j12,5811	5,8162	0,0058	0,3	930 936 942 948 954 960 966 972 978 984 990
17	1020	0,0012	2	0,0830+j14,0953	9,9855	0,0116	0,6	990 996 1002 1008 1014 1020 1026 1032 1038 1044 1050
18	1080	0,0002	2	0,1099+j15,8549	16,8369	0,0012	0,3	1050 1056 1062 1068 1074 1080 1086 1092 1098 1104 1110
19	1140	0,0011	2	0,1471+j17,9387	16,008	0,007	0,6	1110 1116 1122 1128 1134 1140 1146 1152 1158 1164 1170
20	1200	0,0003	2	0,2001+j20,4629	15,3943	0,0016	0,3	1170 1176 1182 1188 1194 1200 1206 1212 1218 1224 1230
21	1260	0,0002	2	0,2787+j23,6051	8,2059	0,0023	0,6	1230 1236 1242 1248 1254 1260 1266 1272 1278 1284 1290
22	1320	0,0003	2	0,4005+j27,6530	8,3355	0,004	0,3	1290 1296 1302 1308 1314 1320 1326 1332 1338 1344 1350
23	1380	0,0016	2	0,6015+j33,1036	8,484	0,0188	0,6	1350 1356 1362 1368 1374 1380 1386 1392 1398 1404 1410
24	1440	0,0003	2	0,9632+j40,8978	9,2775	0,0036	0,3	1410 1416 1422 1428 1434 1440 1446 1452 1458 1464 1470
25	1500	0,0035	2	1,7032+j53,0562	27,4471	0,0126	0,6	1470 1476 1482 1488 1494 1500 1506 1512 1518 1524 1530

Ordem (H)	Frequência (Hz)	I Norton  (pu)	a	Yi (pu)	Ymin Poligono (pu)	DHI Máx Poligono (%)	Limites ONS (%)	Frequências LG
26	1560	0,0006	2	3,5693+j74,8473	57,6695	0,0011	0,3	1530 1536 1542 1548 1554 1560 1566 1572 1578 1584 1590
27	1620	0,0011	2	10,6405+j125,6052	112,6357	0,0009	0,4	1590 1596 1602 1608 1614 1620 1626 1632 1638 1644 1650
28	1680	0,0033	2	103,5047+j368,4277	375,7982	0,0009	0,3	1650 1656 1662 1668 1674 1680 1686 1692 1698 1704 1710
29	1740	0,0119	2	84,8398-j326,0317	327,9071	0,0036	0,4	1710 1716 1722 1728 1734 1740 1746 1752 1758 1764 1770
30	1800	0,0005	2	11,4108-j119,4422	99,6293	0,0005	0,3	1770 1776 1782 1788 1794 1800 1806 1812 1818 1824 1830
31	1860	0,0017	2	4,4130-j72,2278	42,5922	0,004	0,4	1830 1836 1842 1848 1854 1860 1866 1872 1878 1884 1890
32	1920	0,0003	2	2,3825-j51,4247	25,5852	0,001	0,3	1890 1896 1902 1908 1914 1920 1926 1932 1938 1944 1950
33	1980	0,0002	2	1,5167-j39,6672	22,9099	0,0009	0,4	1950 1956 1962 1968 1974 1980 1986 1992 1998 2004 2010
34	2040	0,0002	2	1,0653-j32,0675	23,5024	0,0007	0,3	2010 2016 2022 2028 2034 2040 2046 2052 2058 2064 2070
35	2100	0,0005	2	0,7989-j26,7187	10,2699	0,0045	0,4	2070 2076 2082 2088 2094 2100 2106 2112 2118 2124 2130
36	2160	0,0001	2	0,6277-j22,7238	5,1703	0,0027	0,3	2130 2136 2142 2148 2154 2160 2166 2172 2178 2184 2190
37	2220	0,0003	2	0,5109-j19,6046	6,8043	0,0039	0,4	2190 2196 2202 2208 2214 2220 2226 2232 2238 2244 2250
38	2280	0,0001	2	0,4276-j17,0830	5,9519	0,0021	0,3	2250 2256 2262 2268 2274 2280 2286 2292 2298 2304 2310
39	2340	0	2	0,3660-j14,9857	7,3193	0	0,4	2310 2316 2322 2328 2334 2340 2346 2352 2358 2364 2370
40	2400	0,0001	2	0,3194-j13,1984	4,7875	0,0024	0,3	2370 2376 2382 2388 2394 2400 2406 2412 2418 2424 2430
41	2460	0,0001	2	0,2835-j11,6428	2,7877	0,0041	0,4	2430 2436 2442 2448 2454 2460 2466 2472 2478 2484 2490
42	2520	0,0001	2	0,2555-j10,2622	3,3335	0,0035	0,3	2490 2496 2502 2508 2514 2520 2526 2532 2538 2544 2550
43	2580	0,0001	2	0,2338-j9,0141	11,3143	0,001	0,4	2550 2556 2562 2568 2574 2580 2586 2592 2598 2604 2610
44	2640	0	2	0,2173-j7,8648	10,3705	0	0,3	2610 2616 2622 2628 2634 2640 2646 2652 2658 2664 2670
45	2700	0	2	0,2055-j6,7859	18,539	0	0,4	2670 2676 2682 2688 2694 2700 2706 2712 2718 2724 2730
46	2760	0	2	0,1983-j5,7510	14,125	0	0,3	2730 2736 2742 2748 2754 2760 2766 2772 2778 2784 2790
47	2820	0,0001	2	0,1965-j4,7325	8,1328	0,0018	0,4	2790 2796 2802 2808 2814 2820 2826 2832 2838 2844 2850
48	2880	0	2	0,2018-j3,6966	5,3076	0	0,3	2850 2856 2862 2868 2874 2880 2886 2892 2898 2904 2910
49	2940	0,0002	2	0,2190-j2,5942	2,1406	0,0084	0,4	2910 2916 2922 2928 2934 2940 2946 2952 2958 2964 2970
50	3000	0	2	0,2599-j1,3377	1,5274	0	0,3	2970 2976 2982 2988 2994 3000
#	DTHT					0,3630	1,5	#

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as atividades desenvolvidas durante o período de estágio foram recebidas com prontidão e desenvolvidas com êxito com todo apoio do orientador e do supervisor, bem como de toda equipe de estudos elétricos da Carpe Vie Engenharia. Além disso, é necessário reforçar que foi possível consolidar e usufruir de todas as ferramentas pedagógicas apresentadas durante a Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), destacando o uso contínuo das disciplinas de: Sistemas Elétricos, Máquinas Elétricas, Análise de Sistemas Elétricos e Operação e Controle de Sistemas Elétricos e Equipamentos Elétricos.

A experiência de participar de um programa de estágio em uma empresa de consultoria referência de mercado é indescritível, já que há contato constante com profissionais extremamente experientes e competentes de todas as áreas. Isso permitiu uma análise multidisciplinar para solucionar todas as demandas.

Por fim, é possível reforçar que o estudante de graduação da UFCG é submetido a um fluxograma capaz de desenvolver habilidades e experiências que lhe permitirão encarar qualquer desafio de engenharia com responsabilidade, destreza e qualidade. Além do mais, a UFCG e a Carpe Vie Engenharia assemelham-se por ambas as partes serem focadas em resultado e na qualidade do serviço executado.

## REFERÊNCIAS

- Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, Análise de Redes Elétricas - ANAREDE. Disponível Online: [http://www.cepel.br/pt\\_br/produtos/harmzs-estudos-de-comportamento-harmonico-e-analise-modal-de-redes-eletricas.htm](http://www.cepel.br/pt_br/produtos/harmzs-estudos-de-comportamento-harmonico-e-analise-modal-de-redes-eletricas.htm). Acessado em julho de 2021.
- Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, Análise de Faltas Simultâneas - ANAFAS. Disponível Online: [http://www.cepel.br/pt\\_br/produtos/harmzs-estudos-de-comportamento-harmonico-e-analise-modal-de-redes-eletricas.htm](http://www.cepel.br/pt_br/produtos/harmzs-estudos-de-comportamento-harmonico-e-analise-modal-de-redes-eletricas.htm). Acessado em julho de 2021.
- Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, Estudos de Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas – HarmZs. Disponível Online: [http://www.cepel.br/pt\\_br/produtos/harmzs-estudos-de-comportamento-harmonico-e-analise-modal-de-redes-eletricas.htm](http://www.cepel.br/pt_br/produtos/harmzs-estudos-de-comportamento-harmonico-e-analise-modal-de-redes-eletricas.htm). Acessado em julho de 2021.
- Desmitificando a Qualidade da Energia Elétrica [ livro eletrônico ] : Volume 1: definições e conceitos básicos / Mateus Duarte Teixeira... [et al.]. Curitiba: Mateus Duarte Teixeira, 2020.
- ECOTx, Disponível Online: <http://www.ecotx.com.br>. Acessado em agosto de 2021.
- Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Disponível Online: <http://www.epe.gov.br>. Acessado em agosto de 2021.
- GLOVER, J. D., SARMA, M. S., & OVERBYE, T. J. (2008). Power system analysis and design. Australia, Thomson Melo, 2017
- Mundo da Elétrica. Um pouco mais sobre o sistema elétrico de potência (SEP). Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/um-pouco-mais-sobre-o-sistema-eletrico-de-potencia-sep/>. Acessado em agosto de 2021.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Submódulo 3.6 dos Procedimentos de Rede – Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão às Instalações de Transmissão, Revisão 2016.12, datado de 01 de Janeiro de 2017.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, Revisão 2019.08, datada de 04/09/2019.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Disponível Online: <http://www.ons.org.br>. Acessado em agosto de 2021.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Acessos à Rede Básica ou aos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras – ONS NT 009/2016 – REV. 03 –Abril/2019.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, ONS DPL-REL-0344/2019 – Representação de Centrais Eólicas e Fotovoltaicas em Estudos de Fluxo de Potência, Transitórios Eletromecânicos e Curto – Versão Final, Dezembro/2019.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos – Metodologia, Revisão 2020.12, datada de 01 de janeiro de 2021.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos – Critérios, Revisão 2020.12, datada de 01 de janeiro de 2021.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Submódulo 2.5 – Critérios para Operação – Critérios, Revisão 2020.12, datada de 01 de janeiro de 2021.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Submódulo 2.9 – Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica – Requisitos. Revisão 2020.12, datado de 01 de janeiro de 2021.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Submódulo 2.10 – Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão – Requisitos. Revisão 2020.12, datada de 01 de janeiro de 2021.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Submódulo 7.8 – Avaliação do impacto do acesso ou integração à Rede Básica de instalações com elementos não lineares ou especiais – Operação. Revisão 2020.12, datado de 01 de janeiro de 2021.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Submódulo 9.7 – Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica – Indicadores. Revisão 2020.12, datado de 01 de janeiro de 2021.

Project Builder. Scrum: O que é? Disponível em :<https://www.projectbuilder.com.br/blog/o-que-e-scrum/>. Acessado em agosto de 2021

SCHWABER, K.; SUTHERLAND, J. The scrum guide. 2020.

STEVENSON JR W. D. (1986): Elementos de Análise de Sistemas de Potência. Editora McGraw-Hill do Brasil.