

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Eleandro Luis Marques da Silva

**DIAGNÓSTICO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA QUALIDADE DE ENERGIA
ELÉTRICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Santa Maria, RS
2023

Eleandro Luis Marques da Silva

**DIAGNÓSTICO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Marchesan

Santa Maria, RS
2023

Silva, Eleandro Luis Marques da
Diagnóstico dos impactos da inserção de geração
distribuída fotovoltaica na qualidade de energia elétrica
em sistemas de distribuição / Eleandro Luis Marques da
Silva.- 2023.
101 p.; 30 cm

Orientador: Gustavo Marchesan
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2023

1. Geração distribuída 2. Distribuição de energia
elétrica 3. Qualidade de energia elétrica 4. Qualidade
de tensão 5. Marchesan, Gustavo I. Marchesan, Gustavo
II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, ELEANDRO LUIS MARQUES DA SILVA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Eleandro Luis Marques da Silva

**DIAGNÓSTICO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovada em 28 de junho de 2023

Gustavo Marchesan, Dr. (UFSM)

(Presidente/Orientador)

Laura Lisiane Callai dos Santos, Dra. (UFSM)

Enoque Dutra Garcia, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força para seguir em frente neste longo período de aperfeiçoamento.

Agradeço à minha família por estar sempre ao meu lado durante todo este período da minha vida. Destaco aqui minha esposa Vanessa e filhas Marina e Lara.

Agradeço aos professores da Universidade Federal de Santa Maria, em especial o professor Gustavo Marchesan pela orientação, apoio, compreensão e dedicação a mim concedidos durante o período de mestrado.

Agradeço aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, na figura do mestrando Elton Rodrigo e Renata Martins, pelo aprendizado compartilhado, companheirismo e parceria em etapas do curso.

Agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho pelo apoio, aqui representados pelo Sr. Ederson Pereira Madruga, pelo conhecimento compartilhado nestes anos de convívio profissional.

Agradeço à Cooperativa CERTAJA Energia que, em sua política, presa seus colaboradores no sentido de contribuir continuamente em seu aperfeiçoamento.

Ele (Deus) é o dono de tudo. Devo a ele a oportunidade que tive de chegar até onde cheguei. Muitas pessoas têm essa capacidade, mas não têm a oportunidade. Ele a deu para mim, não sei porquê. Só sei que não posso desperdiçá-la.

Ayrton Senna

RESUMO

DIAGNÓSTICO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

AUTOR: Eleandro Luis Marques da Silva

ORIENTADOR: Gustavo Marchesan

Com o aumento da penetração de instalações de geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia do Brasil, em especial os sistemas fotovoltaicos, muito se tem estudado sobre os impactos da qualidade de energia causados aos sistemas. O sistema, com grandes geradores deslocados dos centros de cargas, vem sendo modificado pela presença de pequenos geradores, instalados mais próximo às cargas e espalhados ao longo de todo o sistema de distribuição. Com isso, a mudança nas filosofias de geração dos sistemas elétricos brasileiros vem trazendo grandes desafios para o setor, em especial aos sistemas de distribuição, que são, em primeira instância, os que devem absorver esses impactos. Esse modelo de geração próximo às cargas está causando grandes problemas de sobretensão nos pontos de acoplamento, devido ao fluxo reverso de potência ativa. Problemas como o aumento das perdas técnicas também são relatados na literatura. Assim, nessa dissertação, busca-se analisar os impactos causados para os sistemas sob o ponto de vista da qualidade de energia. Para isso está sendo estudado um alimentador de distribuição real. Foram realizadas medições de qualidade de energia em um sistema de baixa tensão. Para as simulações foram avaliados os impactos através do *software* OpenDSS no modo Quasi-static *time series* para vinte e quatro horas em um alimentador real de média e baixa tensão. Através das simulações e das medições realizadas, foi possível constatar impactos de sobretensão na média tensão, mas, em especial, na baixa tensão. Constatou-se também a ocorrência de violações nos indicadores de transgressão de tensão estabelecidos nos Procedimentos de Distribuição (PRODIST). Em relação aos níveis de harmônicos, não foram identificadas violações nos sistemas. Outros problemas encontrados foram relacionados ao fator de potência na subestação que, em função do alto fluxo de potência ativa inserida no sistema, traz consequências aos níveis de potência adequados. Em relação à capacidade dos alimentadores,

identificou-se que, em função da “curva do pato”, a necessidade de retomada na absorção de potência pelo sistema entre as 15h e 20h torna-se abrupta, saindo em muitos casos de um fluxo reverso para um suprimento elevado nesse horário.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Distribuição de Energia Elétrica. Qualidade da Energia Elétrica. Qualidade de Tensão. Harmônicas.

ABSTRACT

DIAGNOSIS OF THE IMPACTS OF THE INSERTION OF DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC GENERATION ON THE QUALITY OF ELECTRICITY IN DISTRIBUTION SYSTEMS

AUTHOR: Eleandro Luis Marques da Silva
ADVISER: Gustavo Marchesan

With the increased penetration of distributed generation installations in Brazil's energy distribution systems, especially photovoltaic systems, much has been studied about the impacts on energy quality caused to the systems. The system, with large generators displaced from the load centers, has been modified by the presence of small generators, installed closer to the loads and spread throughout the distribution system. As a result, the change in the generation philosophies of Brazilian electrical systems has brought major challenges to the sector, especially distribution systems, which are, in the first instance, those that must absorb these impacts. This generation model close to the loads is causing major overvoltage problems at the coupling points, due to the reverse flow of active power. Problems such as increased technical losses are also reported in the literature. Therefore, in this dissertation, we seek to analyze the impacts caused to the systems from the point of view of energy quality. For this purpose, a real distribution feeder is being studied. Power quality measurements were carried out on a low voltage system. For the simulations, the impacts were evaluated using the OpenDSS software in Quasi-static time series mode for twenty-four hours on a real medium and low voltage feeder. Through the simulations and measurements carried out, it was possible to verify the impacts of overvoltage on medium voltage, but especially on low voltage. The occurrence of violations in the voltage transgression indicators established in the Distribution Procedures (PRODIST) was also noted. Regarding harmonic levels, no violations were identified in the systems. Other problems encountered were related to the power factor in the substation which, due to the high flow of active power inserted into the system, has consequences for adequate power levels. In relation to the capacity of the feeders, it was identified that, due to the "duck curve", the need to resume power absorption by the system between 3 pm and 8 pm becomes abrupt, in many cases leaving a reverse flow for a high supply at this time.

keywords: Distributed generation. Electricity Distribution. Quality of Electric Power. Voltage Quality. Harmonics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Potência Total Instalada de GDFV no Brasil.....	22
Figura 2.2 – UCs com GDFVs instaladas e UCs Compensadas – Brasil.....	24
Figura 2.3 - Potência instalada GDFV - Acumulada, Brasil.....	25
Figura 2.4 - Sistema fluxo de potência unidirecional.....	26
Figura 2.5 - Sistema com fluxo de potência reverso.....	28
Figura 2.6 - Perfil de tensão em circuito com GDFV.....	29
Figura 2.7 - Representação da forma de onda.....	29
Figura 2.8 - Convenção do fator de potência.....	32
Figura 2.9 - Curva de carga típica - residencial.....	34
Figura 2.10 - Curva de carga típica - rural.....	35
Figura 2.11 - Curva de carga típica – Indústria (UC de MT).....	35
Figura 2.12 - Curva de carga típica das GDFVs.....	36
Figura 3.1 - Fluxo de estratificação de informações.....	39
Figura 3.2 - Definição de área de estudo.....	43
Figura 4.1 - Alimentador TQR-CT1 com transformadores.....	45
Figura 4.2 - Alimentador TQR-CT1 - identificação de fases monofásicas.....	46
Figura 4.3 - Usina UCs, A e X - Taquari/RS.....	49
Figura 4.4 - Unifilar GDFV X.....	50
Figura 4.5 - Influência da potência instalada na tensão.....	52
Figura 4.6 - Resultado de medição de qualidade, UC real.....	52
Figura 4.7 - Destaque em um range da medição.....	53
Figura 4.8 - Valores simulados, após ajuste de TAP em transformador.....	53
Figura 4.9 - Efeito das distorções harmônicas na tensão - Horas.....	55
Figura 4.10 - Efeito das distorções harmônicas na tensão - Turno.....	56
Figura 4.11 - Efeito das distorções harmônicas na corrente - Horas.....	56
Figura 4.12 - Efeito das distorções harmônicas na corrente - Turn.....	56
Figura 4.13 - Distorções harmônicas total – THD – Medição 24 horas.....	57
Figura 4.14 - Distorções harmônicas total - THD - Corrente diurno.....	58
Figura 4.15 - Espectro harmônico de tensão.....	58
Figura 5.1 - Análise no PAC da UC X - Sem GDFV.....	61
Figura 5.2 - Análise na BT do transformador 60947 sem GDFV.....	62

Figura 5.3 - Perdas no transformador 60947 - Sem GDFV	62
Figura 5.4 - Análise na MT do transformador 60947 sem GDFV	63
Figura 5.5 - Tensão e corrente - Saída do AL TQR-CT1 sem GDFV	64
Figura 5.6 - Potência ativa e aparente - Saída do AL sem GDFV	65
Figura 5.7 - Fator de Potência Saída do AL sem GDFV	65
Figura 5.8 - Perfil de tensão no AL às 13h sem GDFV	66
Figura 5.9 - Perfil de tensão no AL às 20h sem GDFV	66
Figura 5.10 - Análise no PAC da UC X - Com GDFV.....	67
Figura 5.11 - Tensão na BT do transformador 60947 com GDFV (3,5%).	69
Figura 5.12 - Corrente na BT do transformador 60947 com GDFV (3,5%)	69
Figura 5.13 - Perdas no transformador 60947 - (3,5%.....	69
Figura 5.14 - Tensões na entrada de MT do TR 60947 (3,5%)	70
Figura 5.15 – Potência ativa e aparente - Saída do AL - TQR-CT1 (3,5%).....	70
Figura 5.16 - Fator de potência na subestação (3,5%)	71
Figura 5.17 - Perfil de tensão no AL às 9h (3,5%).....	71
Figura 5.18 - Perfil de tensão no AL às 13h (3,5%).....	72
Figura 5.19 - Perfil de tensão no AL às 20h (3,5%).....	72
Figura 5.20 - Tensão e corrente - Transformador 60947 (15%).....	73
Figura 5.21 - Tensão na saída do alimentador (15%)	74
Figura 5.22 - Corrente na saída do alimentador (15%)	74
Figura 5.23 - Potência ativa e aparente - saída do alimentador (15%)	75
Figura 5.24 - Fator de potência - saída do alimentador (15%)	75
Figura 5.25 - Perfil de tensão no AL às 13h (15%).....	76
Figura 5.26 - Tensão - Saída do alimentador (30%)	77
Figura 5.27 - Corrente - Saída do alimentador (30%)	77
Figura 5.28 - Potência Ativa na saída do alimentador (30%)	78
Figura 5.29 - Potência Aparente na saída do alimentador (30%).....	78
Figura 5.30 - Demonstração do ângulo do FP.....	79
Figura 5.31 - Ângulo da potência Aparente na SE (30%).....	79
Figura 5.32 - Fator de potência médio da subestação (30%).....	79
Figura 5.33 - Perfil de tensão no AL às 13:00h (30%).....	80
Figura 5.34 - Tensão secundária no transformador 60947 (50%)	81
Figura 5.35 - Corrente no transformador 60947 (50%)	81
Figura 5.36 - Potência ativa transformador 60947 (50%).....	82

Figura 5.37 - Tensão primária no transformador 60947 (50%).....	82
Figura 5.38 - Tensão na saída do alimentador (50%)	83
Figura 5.39 - Corrente na saída do alimentador (50%)	83
Figura 5.40 - Corrente na saída do alimentador (Sem GDFV)	83
Figura 5.41 - Potência Ativa na saída do alimentador (50%)	84
Figura 5.42 - Potência Aparente na saída do alimentador (50%).....	84
Figura 5.43 - Ângulo da Potência Aparente na saída do alimentador (50%).....	85
Figura 5.44 - Fator de potência na subestação	85
Figura 5.45 - Perfil de tensão (pu) no AL às 13h (50%)	85
Figura 5.46 - Perfil de tensão (volts) no AL às 13h (50%).....	86
Figura 5.47 - Tensão na saída do transformador 60947 (70%).....	87
Figura 5.48 - Corrente na saída do transformador 60947 (70%).....	87
Figura 5.49 - Potência Ativa no transformador 60947 (70%)	88
Figura 5.50 - Potência Aparente no transformador 60947 (70%).....	88
Figura 5.51 - Potência Ativa na saída do AL (70%).....	88
Figura 5.52 - Potência Aparente na saída do AL (70%)	89
Figura 5.53 - Ângulo da Potência Aparente na saída do AL (70%)	89
Figura 5.54 - Fator de Potência Aparente na saída do AL (70%).....	89
Figura 5.55 - Figura 4.70 - Perfil de tensão no AL às 9h (70%)	90
Figura 5.56 - Perfil de tensão no AL às 13h (70%).....	90
Figura 5.57 - Perfil de tensão no AL às 20h (70%).....	90
Figura 5.58 - Perfil de tensão no AL às 13h (Comparativo)	91
Figura 5.59 - Perfil de tensão - Caso de 50% de penetração.....	92
Figura 5.60 - Curva do pato - Califórnia	93
Figura 5.61 - Curva do Pato para o alimentador na SE– TQR	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Matriz energética brasileira – Usinas outorgadas – Operação.....	23
Tabela 2.2 - Usinas em construção – Brasil.....	23
Tabela 2.3 - Usinas outorgada e não iniciadas – Brasil	24
Tabela 2.4 - Limites de distorções harmônicas totais - PRODIST.....	30
Tabela 2.5 - Modelos de cargas	32
Tabela 3.1 - Estratificação de GDFVs – Brasil	40
Tabela 3.2 - Estratificação de GDFVs - Região Sul	41
Tabela 3.3 - Estratificação de GDFVs - Rio Grande do Sul	41
Tabela 3.4 - Potências utilizadas em simulação.....	42
Tabela 4.1 - Informações alimentador TQR-CT1	45
Tabela 4.2 - Estratificação de UCs do grupo B - ALTQR-CT1	48
Tabela 4.3 - Dados de GDFVs, caso real.....	49
Tabela 4.4 - Limites de violação de tensão	51
Tabela 4.5 - Resumo de medição de qualidade	54
Tabela 4.6 - Valores estimados de compensação de acordo com o EUSD	54
Tabela 4.7 - Limites das distorções harmônicas totais (% da fundamental).....	55
Tabela 5.1 - Nível de penetração – Relação de energia versus N ^o de UCs.....	60
Tabela 5.2 - Valores simulados de compensação de acordo com o EUSD	68
Tabela 5.3 - Informações da barra MT77099_1 – OpenDSS	86
Tabela 5.4 - Crescimento da curva de carga - Alimentador	94

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
AWG	American Wire Gauge
BT	Baixa Tensão
CAA	Cabo com Alma de Aço
DER	Distributed Energy Resources
DRC	Duração relativa da transgressão de tensão crítica
DRP	Duração relativa da transgressão de tensão precária
FP	Fator de potência
GD	Geração Distribuída
GDFV	Geração Distribuída fotovoltaica
GIS	Geographic Information System
GRUPO A	Ligações de Consumidores no Grupo de Alta Tensão
I	Corrente Elétrica
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
MC	Modelos de Carga
MCM	1 kCM (1 quilocircular mil)
MRT	Monofásica com Retorno por Terra
MT	Média Tensão
NBR	Norma brasileira
OPENDSS	Open Distribution System Simulator
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
Pu	Valores por unidade
QSTS	Quasi-static time series
SE	Subestação de Energia
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TAP	Terminal de Ajuste de Potencial
THD	Total Harmonic Distortion
UC	Unidade consumidora
ZIP	Impedância, Corrente e Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	OBJETIVO GERAL.....	17
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.5	CONTRIBUIÇÕES.....	18
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	ESTADO DA ARTE	19
2.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	21
2.3	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL	22
2.4	NORMAS APLICADAS	25
2.5	INFLUÊNCIA DA GDFV NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	25
2.6	HARMÔNICAS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	29
2.7	FATOR DE POTÊNCIA	31
2.8	MODELOS DE CARGAS E CURVA TÍPICAS.....	32
2.9	CURVA DE CARGA TÍPICA DAS UNIDADES CONSUMIDORAS.....	33
2.10	COMPENSAÇÃO POR VIOLAÇÃO DE INDICADOR	36
2.11	OPENDSS	37
2.12	HISTÓRIA DO OPENDSS.....	37
2.13	O QUE É O <i>SOFTWARE</i> OPENDSS	37
3	METODOLOGIA.....	39
3.1	DEFINIÇÃO DO TIPO CARACTERÍSTICO DE GDFV SIMULADOS	39
3.2	ESTRATIFICAÇÃO REGIONAL	40
3.3	VALORES DE GDFV PARA SIMULAÇÃO	41
3.4	DEFINIÇÃO DAS UCS COM GDFVS PARA SIMULAÇÃO	42
3.5	CENÁRIOS ANALISADOS	43
4	SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO	44
4.1	TOPOLOGIA DO ALIMENTADOR	44

4.1.1	Rede primária.....	47
4.1.2	Rede secundária.....	47
4.1.3	Transformadores de distribuição.....	47
4.1.4	Capacitores.....	48
4.1.5	Unidade consumidoras de baixa tensão.....	48
4.2	ANÁLISE DE GDFV (ESTUDO DE CASO REAL).....	48
4.2.1	Análise de GDFV (análise de tensão).....	50
4.2.2	Análise de GDFV (análise de distorção harmônica).....	55
4.2.3	Discussão sobre o estudo de caso real.....	59
5	SIMULAÇÕES E REDULTADOS.....	60
5.1	CENÁRIO I – SEM GDFVS.....	60
5.1.1	Discussão sobre o cenário i – sem GDFV no sistema.....	67
5.2	CENÁRIO II - ATUAL (3,5%).....	67
5.2.1	Discussão cenário ii – GDFVS que atualmente estão no alimentador... ..	72
5.3	CENÁRIO III – 15% DE UCS COM GDFV.....	73
5.4	CENÁRIO IV – 30% DE UCS COM GDFV.....	76
5.5	CENÁRIO V - 50% DE UCS COM GDFV.....	80
5.6	CENÁRIO VI - 70% DE UCS COM GDFV.....	87
5.7	COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES CENÁRIOS.....	91
5.8	ANÁLISE DA CURVA DO PATO.....	92
5.9	CRESCIMENTO DA CURVA DE CARGA.....	93
6	CONCLUSÃO.....	95
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	96
6.2	TRABALHOS PUBLICADOS.....	96
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais a sociedade está dependente dos sistemas de energia elétrica na realização das mais diversas atividades. Para isso, além de confiabilidade, os sistemas de potência devem dispor de sistemas que propiciem a qualidade da energia elétrica aos seus usuários.

A característica mais comum do Sistema Elétrico de Potência (SEP) é de fornecer energia com qualidade e confiabilidade, na hora em que a mesma for solicitada, indiferente do tipo de carga (Vasconcelos F. M., 2017).

Nos últimos anos tem ocorrido uma crescente busca por fontes de energia alternativas, com destaque para geração distribuída fotovoltaica, o que tem gerado diversos estudos em diferentes frentes como ambiental, tecnológico e econômico (ALFONSO 2021).

Muitos países têm modificado sua topologia do sistema elétrico, de forma a diversificar suas matrizes energéticas e proporcionar a descentralização das fontes de energia (ZANCAN, 2020).

Assim como no Brasil, em diversos lugares do mundo a mudança ocasionada nas topologias dos sistemas de energia elétrica, em especial os sistemas de distribuição, as quais as gerações distribuídas fotovoltaicas (GDFV) se conectam em massa, estão alterando significativamente o modo de operação e análise desses sistemas. Antes da penetração massiva de GDFVs o fluxo de potência era unidirecional, mas agora pode ocorrer a alternância entre fluxo normal e reverso, dependendo dos períodos do dia.

Esta dissertação propõe uma análise da qualidade da energia nos sistemas de distribuição, frente à entrada com alta penetração de sistemas de GDFVs. Serão considerados os aspectos técnicos e regulatórios vigentes, com ênfase na qualidade do produto, analisando um sistema real de distribuição de energia. Para isso serão realizadas simulações e medições de qualidade para análise dos efeitos em um alimentador.

1.1 MOTIVAÇÃO

A crescente demanda de novas conexões de GDFVs, ocasionadas nos últimos anos, trouxeram aos planejadores das distribuidoras, grandes desafios em termos de manter os sistemas, principalmente de distribuição, com operacionalidade.

Devido ao caráter intermitente da geração fotovoltaica, nos sistemas de distribuição ocorrem grandes variações de injeção de energia devido às características de operação, o que ocasiona fluxo reverso nos sistemas quando a inserção das GDFVs é massiva. Isso gera problemas na qualidade de energia, em especial fenômenos de sobretensão nos sistemas.

Atualmente, as distribuidoras estão empenhadas em avaliar seus sistemas, de forma a poder acomodar o constante aumento de pedidos de conexão de GDFVs, seja com avaliações de *hosting capacity* (capacidade de hospedagem), seja por estudos de impacto em algum ponto em específico de seus alimentadores.

Além disso, há a necessidade de planejamento para os novos desafios técnicos visando absorver a nova topologia dos sistemas.

Muitos estudos são realizados, assim como uma vasta literatura já disponível sobre o assunto. Contudo, na grande maioria, não são utilizados em sistemas de distribuição reais.

Diante disso, propõe-se procedimentos metodológicos para avaliar impactos de qualidade de energia em sistemas elétricos de potência. A validação da metodologia é realizada usando dados de sistema real com diferentes cenários de inserção de GDFVs.

1.2 OBJETIVOS

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é diagnosticar os impactos da geração distribuída fotovoltaica na qualidade de energia, em especial na conformidade de nível de tensão de fornecimento das distribuidoras e na inserção de componentes harmônicos.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar localização e potência das GDFVs;
- Simular a rede considerando n Barras com GDFV;
- Avaliar o fluxo de potência utilizando o *software* OPENDSS e considerando diferentes cenários de inserção de GDFV.

1.5 CONTRIBUIÇÕES

- Metodologia para diagnóstico de impacto de inserção de GDFVs em sistemas de distribuição;
- Análise de compensação financeira, oriundas de inserção de GDFVs;
- Comparativo entre sistemas simulados e medições de alimentadores em loco.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é composto por seis capítulos, incluindo esse introdutório.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, aborda o estado da arte, a geração distribuída fotovoltaica, os números do Brasil, seus componentes e normas aplicadas, a influência de geração distribuída nos sistemas de distribuição, assim como o *software* OpenDSS.

No terceiro capítulo destaca-se a metodologia utilizada nessa dissertação.

No quarto capítulo são apresentadas as características do alimentador adotado para o estudo.

No quinto capítulo são mostrados as simulações e resultados assim como as discussões sobre os cenários analisados.

No sexto capítulo estão as conclusões, sugestões de trabalhos futuros e os trabalhos publicados durante esta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTADO DA ARTE

Na literatura, existem diversos trabalhos e estudos relacionados aos efeitos da GDFV nas redes de distribuição e formas de mitigá-los. Dentre os problemas relatados estão os de qualidade de energia, como sobretensão, distorções harmônicas e fator de potência. Estudos vem sendo direcionados para mitigar estes problemas, através de recondução de circuitos, filtros e controles com funções inteligentes, através do próprio inversor.

Bajaj & Singh (2019) analisaram os desafios para os planejadores dos sistemas de distribuição frente à inserção de geração distribuída, considerando diferentes fontes. Em um primeiro momento é possível se aproveitar das GDs para suprir deficiências técnicas nos sistemas de distribuição, como minimização das perdas e melhora no perfil da tensão, entre outros. No entanto, aproveitar essas oportunidades não é uma tarefa fácil para os planejadores, devido ao controle menor sobre as GDs, que geralmente são planejadas de acordo com o tipo de combustível, capacidade e localização, não havendo otimização do ponto de vista da qualidade de energia.

Singh, Tripathi e Yatendra (2019) analisaram os impactos específicos da geração distribuída fotovoltaica e os efeitos em uma rede de 13 barras da Electric Power Research Institute (EPRI). As simulações foram realizadas no *software* OPENDSS, com integração ao MATLAB através de interface COM. Este artigo mostra que os sistemas de distribuição, em sua topologia atual, são concebidos para operar de forma radial e unidirecional. Contudo, o aumento da penetração de fontes de geração distribuídas, especialmente as fotovoltaicas, pode ocasionar sérios problemas ao sistema, como aumento de tensão, flutuações de tensão e fluxo reverso.

Nas distribuidoras existem diferentes preocupações técnicas em relação à qualidade de energia e aos impactos gerais causados pela inserção massiva de GDs no sistema.

PINTO NETO (2016) faz uma análise teórica de redes de baixa tensão, complementado por um estudo de caso. O resultado concluiu que a inserção de GDFV afeta inclusive a curva de carga da unidade consumidora, mas essas alterações

podem ser controladas utilizando gestão ativa da demanda. Foi verificado que a GDFV afeta a tensão e o fator de potência do ponto de acoplamento. Não foram identificadas alterações sobre o conteúdo harmônico. Os autores concluíram ainda que a vida útil do transformador foi aumentada e que a tensão pode ser controlada pela injeção de reativos pelo próprio inversor.

URBANETZ (2010) Realizou Inúmeros ensaios, onde ficou evidente a elevação de tensão nos pontos de acoplamento das GDFVs, que para um sistema verificado de forma isolada tem alguns benefícios para a rede de distribuição. Contudo, altos níveis de penetração pode incorrer em problemas para o sistema de distribuição.

Em relação ao conteúdo harmônico de tensão, os resultados mostraram redução desses efeitos, principalmente quando os inversores estão carregados de forma moderada ou plena. Os testes foram realizados de forma amostral com auxílio de osciloscópio. O trabalho se deu com o ensaio de inversores, trabalho realizado a nível de laboratório universitário, o que proporciona um ambiente mais controlado.

FONSECA (2019) analisou instalações de até 50 kWp, com um estudo de caso em uma indústria. Verificou pequenos aumentos relativos à tensão no ponto de acoplamento e sensíveis diferenças relacionadas às distorções harmônicas, mas os componentes estão abaixo dos níveis indicados no PRODIST ANEEL.

HINCAPIÉ (2013), através de simulação, verificou os impactos em uma rede de baixa tensão e outra de média tensão. O sistema utilizado foi de 5 kWp e simulações computacionais no *software* simulink. Em redes de distribuição convencional, o fluxo de potência acontece de níveis de tensão maiores ao mais baixos. Com a inserção de GDs incluindo as GDFVs, o fluxo ficou mais complexo, inserindo inclusive sobretensões, especialmente nas redes de baixa tensão. Nas subestações os ajustes de tensões são compensados por reguladores de tensão e é mantida constante. A corrente no alimentador eleva a tensão na barra, originando um fenômeno oposto à queda de tensão.

Atualmente, frente às simulações, considera-se que os sistemas de distribuição não estão preparados para a alta inserção de GDFV nas redes. Hincapié (2013) complementa que chegou a um número de 50% de barras passíveis de inserção em rede de baixa tensão, a fim de não violar os limites de qualidade.

BALBINO (2017) analisou, em um estudo de caso, uma rede com um sistema de pequeno porte, de 3 kWp, localizado na UFERSA. Em seus resultados não foram

encontradas violações de qualidade, considerando os parâmetros regulamentares vigentes. No entanto, altos índices de harmônicos fizeram-se necessários para a aplicação de filtros passa-baixa para a atenuação de frequências indesejadas. Nas medições de campo, percebe-se que a injeção de harmônicos ocorre no início e no final do dia. O mesmo ocorre pois o sistema busca compensar a baixa produção de energia e, com isso, o sistema eletrônico gera harmônicos para a rede.

O trabalho de ALVES (2021) foi focado em mitigar problemas relacionados à tensão de fornecimento em uma rede de baixa tensão, investigando os problemas causados principalmente pela alta relação de X/R. Quando se tem uma elevada injeção de potência ativa, ela imprime ao alimentador uma sobretensão, em especial nos finais das redes de baixa tensão. Em seu trabalho é possível identificar algumas metodologias para minimizar os problemas da qualidade de energia. Foram indicadas estratégias consolidadas como recondutoramento e ajuste de TAP e as emergentes, como controle Volt-VAr e Volt-Watt.

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída é definida como centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente à rede de distribuição ou por meio de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas ou não pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) (ANEEL, 2021d).

As GDs classificam-se em microgeração e minigeração distribuída, sendo que é a potência instalada da geração que define o enquadramento.

As microgerações distribuídas são as centrais geradoras menores ou iguais a 75 kW de potência instalada e que utilizam cogeração qualificada, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2021d).

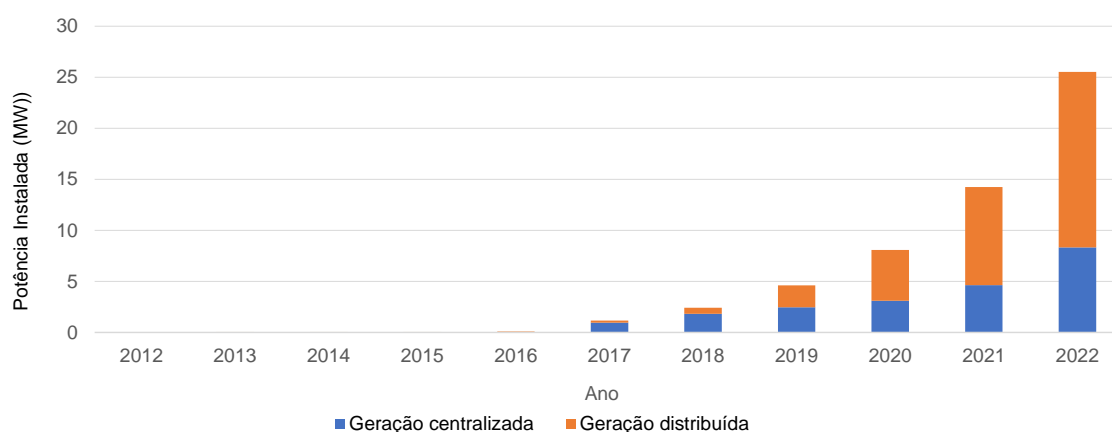
As minigerações distribuídas são as centrais geradoras de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidade consumidoras (ANEEL, 2021d).

2.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

Assim como em grande parte do mundo, o Brasil vem em uma crescente no que se refere às conexões de GDFVs em sistemas de distribuição, principalmente de instalações de GDFVs residenciais (PINTO, NETO 2016).

Em 2022, devido ao apelo das empresas de instalações de geração distribuída fotovoltaica, criada em função da lei nº 14300/21 que redefine as regras para compensação de créditos a partir do ano de 2023, tem-se um aumento mais acentuado de empreendimentos de mini e micro geração distribuída. Destaca-se ainda os empreendimentos de geração centralizada, conforme Figura 2.1.

Figura 2.1 - Potência Total Instalada de GDFV no Brasil



Fonte: ANEEL (2022)

Sobre as usinas centralizadas, pode-se observar que a demanda está cada vez mais em destaque entre os empreendimentos. Na Tabela 2.1 é mostrada a participação atual da fonte fotovoltaica. Comparada às demais fontes, percebe-se uma participação modesta para as usinas fotovoltaicas.

Apesar da modesta participação atual na matriz energética, os novos empreendimentos são outorgados na ANEEL, conforme mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Matriz energética brasileira – Usinas outorgadas – Operação

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	% Potência Instalada
UHE	215	103.175.523	53%
UTE	3.015	47.553.494	25%
EOL	913	25.416.024	13%
UFV	18.085	8.331.581	4%
PCH	428	5.727.176	3%
UTN	2	1.990.000	1%
CGH	720	870.143	0%
Total	23.378	193.063.941	100%

Fonte: ANEEL (2022)

Tabela 2.2 - Usinas em construção – Brasil

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	(%) de Potência Instalada
UHE	1	49.998,00	0%
UTE	48	4.758.301,00	26%
EOL	147	5.667.045,00	31%
UFV	148	5.961.305,78	33%
PCH	31	412.076,00	2%
UTN	1	1.350.000,00	7%
CGH	2	4.600,00	0%
Total	378	18.203.326	100%

Fonte: ANEEL (2022)

Na Tabela 2.3 pode-se verificar que as gerações fotovoltaicas se encontram entre as maiores parcelas de empreendimentos em construção ou por serem iniciados, sendo que todos já possuem outorga junto ao órgão regulador.

Tabela 2.3 - Usinas outorgada e não iniciadas – Brasil

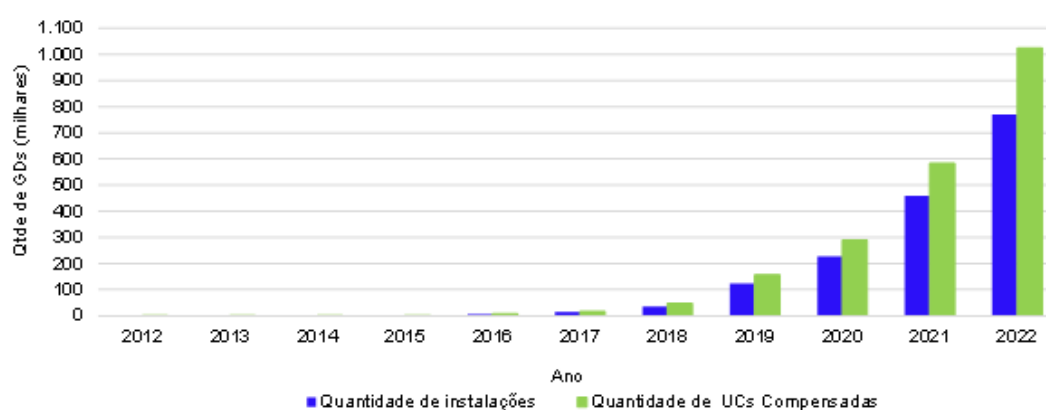
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	(%) de Potência Instalada
UHE	4	311.998	0%
UTE	95	8.255.529	7%
EOL	573	23.041.465	19%
UFV	2076	89.388.061	72%
PCH	107	1.507.010	1%
UTN	1	1.350.000	1%
CGH	3	6.600	0%
Total	2.859	123.860.662	100%

Fonte: ANEEL (2022)

Percebe-se, conforme Figura 2.2, que há uma tendência de instalações de empreendimentos com capacidade superior à necessidade local, com o intuito de compensar demais unidades consumidoras em uma única GDFV. Pelo lado do consumidor é atraente, pois tende a diminuir o custo por kWp instalado. Contudo, pelo lado da distribuidora, pode ocorrer necessidade de adaptação do sistema de distribuição para absorver a energia no local da GDVF, visto que a potência será maior que a normalmente solicitada pela unidade consumidora (UC).

Destaca-se que o ano de 2022 apresentou grande número de conexões motivadas principalmente pelas mudanças de regras de compensação e energia estabelecidas pela lei nº 14.300 de 2022.

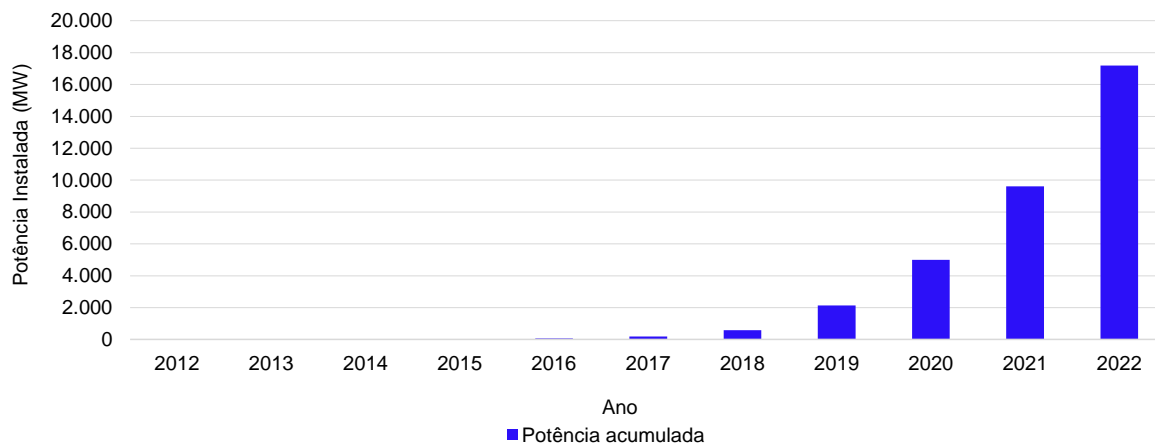
Figura 2.2 – UCs com GDFVs instaladas e UCs Compensadas – Brasil



Fonte: ANEEL (2022)

Na Figura 2.3 pode-se verificar a evolução da potência instalada no Brasil para geração distribuída fotovoltaica.

Figura 2.3 - Potência instalada GDFV - Acumulada, Brasil



Fonte: ANEEL (2022)

2.4 NORMAS APLICADAS

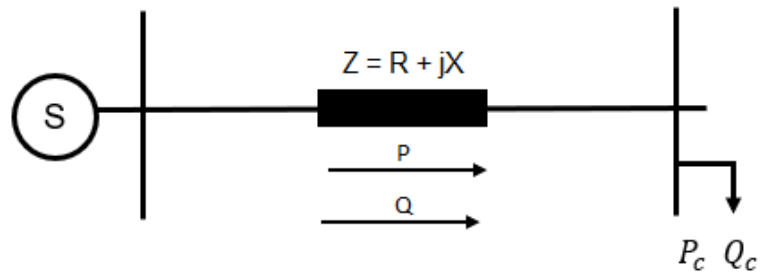
A elaboração de projetos fotovoltaicos deve seguir as recomendações das principais Normas Técnicas Brasileiras (NBRs).

- A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 16190:2019 estabelece os requisitos de projetos de sistemas fotovoltaicos, incluindo disposição de condutores, dispositivos de proteção, de manobra, de aterramento e equipotencialização do sistema fotovoltaico.
- A ABNT NBR 16149:2013, estabelece as características de interface de conexão de inversores fotovoltaicos com a rede de distribuição.

2.5 INFLUÊNCIA DA GDFV NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Tradicionalmente os sistemas de distribuição têm a topologia radial, com fluxo de potência unidirecional, com a potência fluindo da fonte para a carga, conforme Figura 2.4.

Figura 2.4 - Sistema fluxo de potência unidirecional



Fonte: Elaboração própria

No circuito representado pela Figura 2.4, tem-se a Lei de Kirchhoff das Tensões, conforme equação (2.1).

$$-V_S + V_L + I(R + jX) = 0 \quad (2.1)$$

Em que:

V_S - Fasor de tensão na barra de geração;

V_L - Fasor de tensão na barra de carga;

I - Corrente da linha;

R - Resistência da linha;

jX - Reatância da Linha.

A potência aparente complexa S na linha é dada pela equação (2.2).

$$S = P + jQ = V_S I^* \quad (2.2)$$

E o fasor I : Conforme equação (2.3)

$$I = \frac{P - jQ}{V_S^*} \quad (2.3)$$

Em que: V_S^*

V_S^* - Conjugado da Tensão

I^* - Conjugado da corrente

Através das equações (2.1) (2.2) e (2.3), acha-se a tensão na fonte, conforme equação (2.4).

$$V_S = V_L + \left(\frac{P - jQ}{V_S^*} \right) (R + jX) \quad (2.4)$$

Sendo a equação (2.5)

$$\Delta V = V_S - V_L \quad (2.5)$$

$$\Delta V = V_S - V_L = \frac{RP + XQ}{V_S^*} + j \left(\frac{XP + RQ}{V_S^*} \right) \quad (2.6)$$

Segundo (Mahmud et al. 2011), se considerado que o ângulo entre as barras de geração e carga é muito pequeno, e tomando a barra de geração como referência ($|V_S| = 1$), então pode-se assumir a equação (2.7).

$$\Delta V = V_S - V_L \approx RP + XP \quad (2.7)$$

Quando $\Delta V = 0$:

$$\Delta Q \approx -\frac{R}{X} \Delta P \quad (2.8)$$

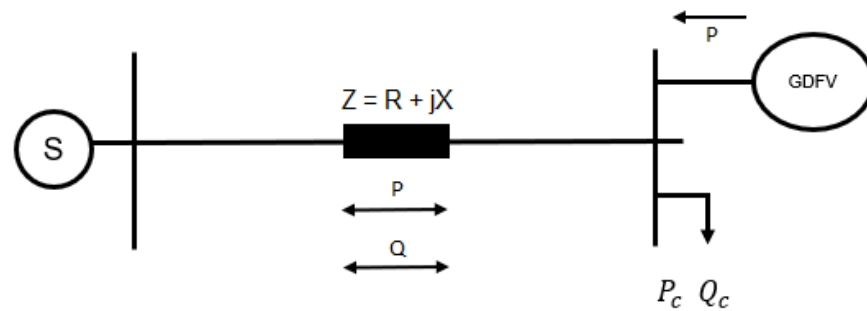
Desta forma, entende-se que a variação de potência reativa interfere no perfil de tensão. E para um sistema de n barras, a variação da tensão entre as barras i e j (V_{ij}) é dada pela equação (2.9) (Mahmud et al., 2011; Chaudhary and Rizwan, 2018).

$$\Delta V_{ij} \approx \frac{R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}}{V_i^*} \quad (2.9)$$

Com a inserção massiva de GDFVs, o fluxo de potência em determinado tempo se torna bidirecional, o que pode ocasionar problemas de sobretensão devido à inversão do fluxo de potência, oriunda da inserção de potência ativa no sistema (SOUSA, 2019).

Havendo um alto nível de penetração de geração GDFV nos horários de maior irradiação solar, a produção de energia pode ser maior do que o consumo, resultando no fluxo de potência reverso, ou seja, da baixa para a média tensão (Holguin et al., 2020). Na condição das cargas não absorverem toda a energia gerada pela GDFV, a rede deixa de ser passiva e passa a atuar como ativa na condição de fluxo reverso de potência conforme Figura 2.5, alterando os perfis de tensão do alimentador de distribuição (Teixeira et al., 2019; Luo and Shi, 2020).

Figura 2.5 - Sistema com fluxo de potência reverso



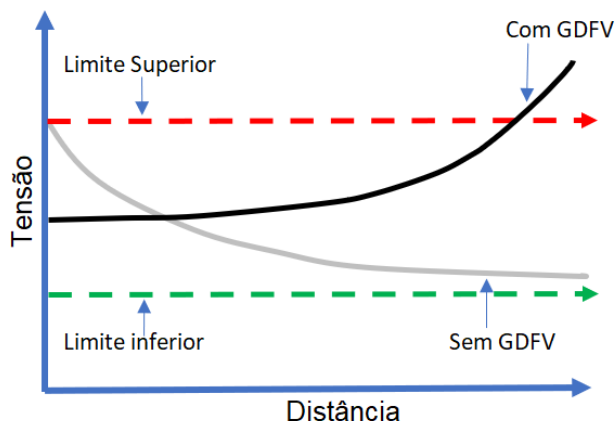
Fonte: Adaptado de (Alves, 2021)

Com o fluxo bidirecional no sistema, a variação da tensão se dá com a equação (2.10).

$$\Delta V_{ji} \approx \frac{R_{ij}(P_{Gj} - P_{Cj}) + RX_{ij}(\pm Q_{Gj} - Q_{Cj})}{V_j^*} \quad (2.10)$$

Em que P_G e Q_G são as potências ativa e reativa geradas pela GDFV, e P_C e Q_C são consumidas pela carga.

Figura 2.6 - Perfil de tensão em circuito com GDFV



Fonte: Adaptado de (Alves, 2021)

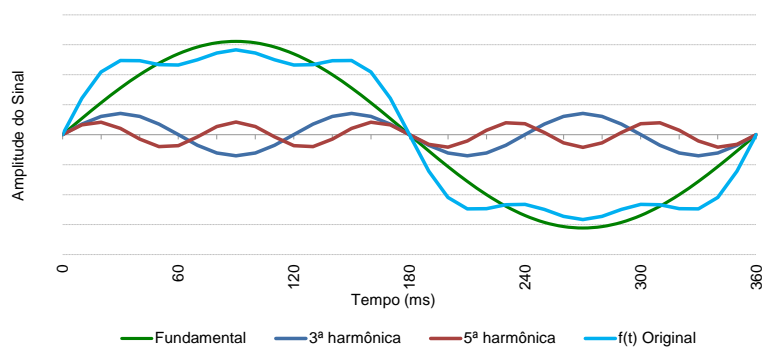
A Figura 2.6 apresenta o perfil da tensão em um circuito de distribuição antes e depois da GDFV. Percebe-se que, sem a GDFV, à medida que a distância do circuito aumenta a queda de tensão também aumenta e, com a inserção de GDFV, mesmo com o aumento da distância do circuito a tensão pode se elevar além dos limites estabelecidos.

2.6 HARMÔNICAS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Os harmônicos são componentes de frequência em tensão ou corrente, múltiplos inteiros da frequência fundamental da rede.

Quando combinados com o componente fundamental da rede, produzem uma forma de onda distorcida, PINTO NETO (2016), conforme Figura 2.7.

Figura 2.7 - Representação da forma de onda



Fonte: Elaboração própria

O nível de distorção harmônica pode ser caracterizado por sua distribuição espectral, com a magnitude de cada componente harmônico PINTO NETO (2016) conforme mostrado na equação (2.11). Também pode ser representado por um índice, o *Total Harmonic Distortion* (THD), o qual representa o desvio da forma de onda distorcida em relação à onda puramente senoidal PINTO NETO (2016), e pode ser calculada pela equação (2.11).

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.11)$$

Em que:

- h são todas as ordens harmônicas de 2 até h_{máx};
- h_{máx} é definido conforme a classe de medição do instrumento sendo A ou S;
- V₁ é o valor eficaz da onda fundamental;
- V_h é o valor eficaz da tensão harmônica.

Os limites para entrega pela distribuidora ao consumidor são conforme o PRODIST, apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Limites de distorções harmônicas totais - PRODIST

Indicador	V _n ≤ 2,3 kV	2,3 kV < V _n < 69 kV	69 kV ≤ V _n < 230kV
DTT95%	10%	8,0%	5,0%
DTTp95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTTi95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ 95%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021b)

Em que:

- DTT95% - Valor do indicador de distorção harmônica total de tensão que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas;
- DTTp95% - Valor do indicador de distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3, que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas;

- DTT_{i95%} - Valor do indicador de distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3, que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas;
- DTT_{395%} - Valor do indicador de distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3, que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas;

2.7 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência (FP) deve ser calculado a partir dos valores de potência ativa e reativa ou em termos de energia, conforme as equações 3.2 e 3.3 (ANEEL, 2021c).

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.12)$$

$$FP = \frac{E_p}{\sqrt{E_p^2 + E_q^2}} \quad (2.13)$$

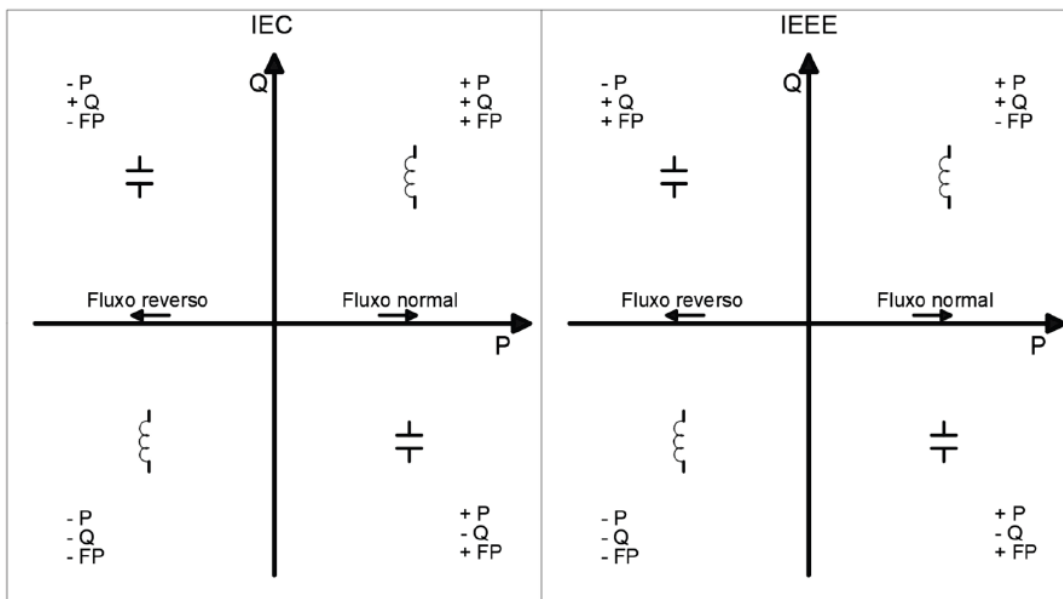
Em que:

- P é a potência ativa;
- Q é a reativa;
- E_p é a energia ativa;
- E_q a energia reativa.

De acordo com o *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), a natureza da carga determina o fator de potência, não dependendo assim do fluxo de potência ativa. Para uma carga indutiva o FP é negativo e, para uma carga capacitiva, o FP é positivo (IEEE, 2010).

Na convenção do International Electrotechnical Commission (IEC), o sinal do FP depende do sentido do fluxo de potência ativa e não da natureza da carga. Para o fluxo de potência ativa no sentido convencional, o sinal do fator de potência é positivo e, para o sentido de fluxo de potência ativa reverso, o sinal é negativo (SEAL; EALY, 2016). A Figura 2.8 apresenta a diferença entre as convenções.

Figura 2.8 - Convenção do fator de potência



Fonte: Adaptado Seal e Ealy (2016)

2.8 MODELOS DE CARGAS E CURVA TÍPICAS

A relação de corrente em função da tensão conforme equação (2.14) depende da natureza da carga.

$$i = f(\dot{V}) \quad (2.14)$$

Os principais modelos de cargas utilizados para os cálculos são de acordo com a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Modelos de cargas

Modelo	Descrição
PC	Potência constante
ZC	Impedância constante
IC	Corrente constante
ZIP	Modelo polinomial

Fonte: Adaptada pelo autor

- Potência constante: Consome sua potência complexa nominal independentemente da tensão aplicada em seus terminais, conforme equações (2.15) e (2.16).

$$i = \frac{\bar{S}^*}{\dot{V}^*} = \frac{P_n - j \times Q_n}{\dot{V}^*} \quad (2.15)$$

$$\bar{S} = P_n - j \times Q_n \quad (2.16)$$

- Impedância constante: Carga possui sua impedância na condição nominal constante em função da tensão aplicada, conforme equações (2.17) e (2.18).

$$\bar{Z}_n = \frac{[\dot{V}]^2}{\bar{S}_n^*} = \frac{P_n - j \times Q_n}{\dot{V}^*} \quad (2.17)$$

$$i = \frac{\dot{V}}{\bar{Z}_n} = \frac{\bar{S}_n^*}{[\dot{V}_n]^2} \quad (2.18)$$

- Corrente constante: Módulo da corrente absorvida [i] e o fator de potência da carga $\text{Cos}(\varphi)$ constantes, conforme equações (2.19) e (2.20).

$$i = |i_n| \angle \alpha = \frac{\bar{S}_n}{|\dot{V}_n|} \angle \alpha \quad (2.19)$$

$$i_n = \frac{\dot{V}}{|\dot{V}|} \times \frac{(P_n - j \times Q_n)}{\dot{V}_n} \quad (2.20)$$

2.9 CURVA DE CARGA TÍPICA DAS UNIDADES CONSUMIDORAS

As cargas utilizadas para realização das análises do trabalho são individuais dos consumidores conectados ao longo do circuito alimentador TQR-CT1. Tais cargas são conectadas à rede por meio de ligações monofásicas, bifásicas ou trifásicas e

caracterizadas de acordo com diferentes Modelos de Carga. Para o estudo, as cargas foram modeladas em 50% potência constante e 50% impedância constante, de acordo com o módulo 7 do PRODIST para cálculo de perdas técnicas.

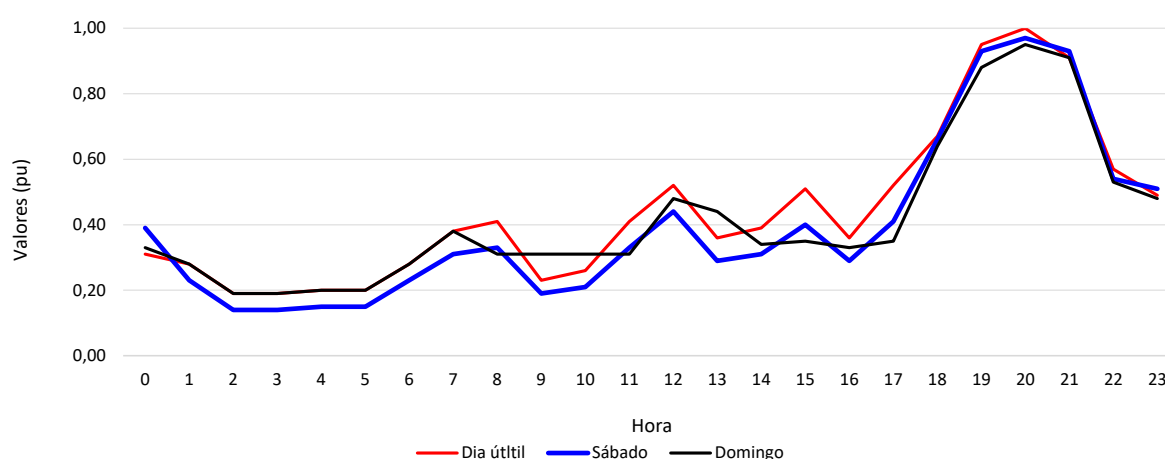
As conexões das cargas presentes no circuito são, em sua maioria, pertencentes ao Grupo B, composto por unidades consumidoras com conexão em tensão menor que 2,3 kV (ANEEL, 2021d) e uma carga pertencente ao grupo A.

Essas cargas estão classificadas de acordo com o seu subgrupo tarifário, no qual é atribuído uma curva de carga típica, definida de acordo a característica de consumo de cada classe. O detalhamento das curvas típicas de carga de cada classe de consumo foi ainda subdividido em dia útil, sábado e domingo. Para os grupos de cargas avaliados, não se verificou relevância relacionada à sazonalidade do consumo, visto que a maioria das cargas teve o perfil “Rural” de carga, o qual é bem característico, assim como a curva de carga resultante do alimentador é fortemente influenciada por um grande consumidor do grupo A.

A seguir serão relacionadas as principais curvas de cargas, concebidas através de campanhas de medições na distribuidora.

Na Figura 2.9 é mostrada a curva de carga típica para consumidores residenciais utilizadas no alimentador.

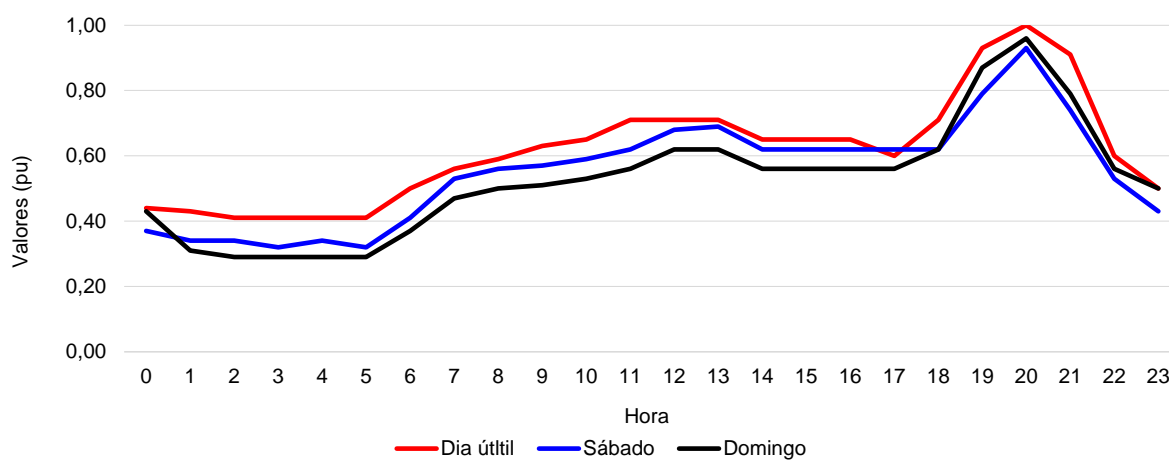
Figura 2.9 - Curva de carga típica - residencial



Fonte: Elaboração própria

Curva de carga Rural, composta por consumidores que representam a maioria das UCs deste alimentador, conforme Figura 2.10.

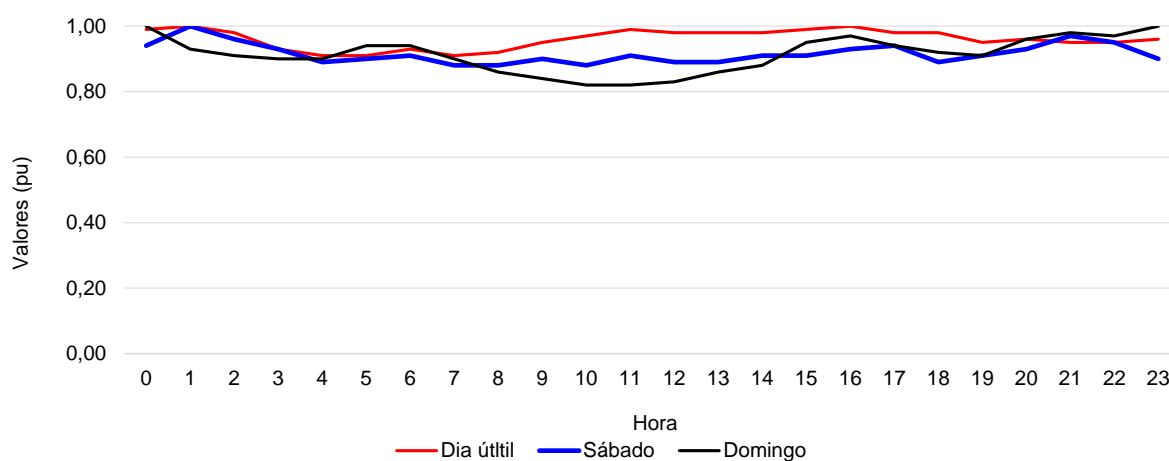
Figura 2.10 - Curva de carga típica - rural



Fonte: Elaboração própria

A curva de carga de UC do grupo A representa uma grande indústria localizada logo na saída do alimentador, a qual tem sua produção praticamente constante em virtude da modalidade tarifária de faturamento horo sazonal azul. Trata-se de uma indústria química, onde a curva de carga é conforme Figura 2.11.

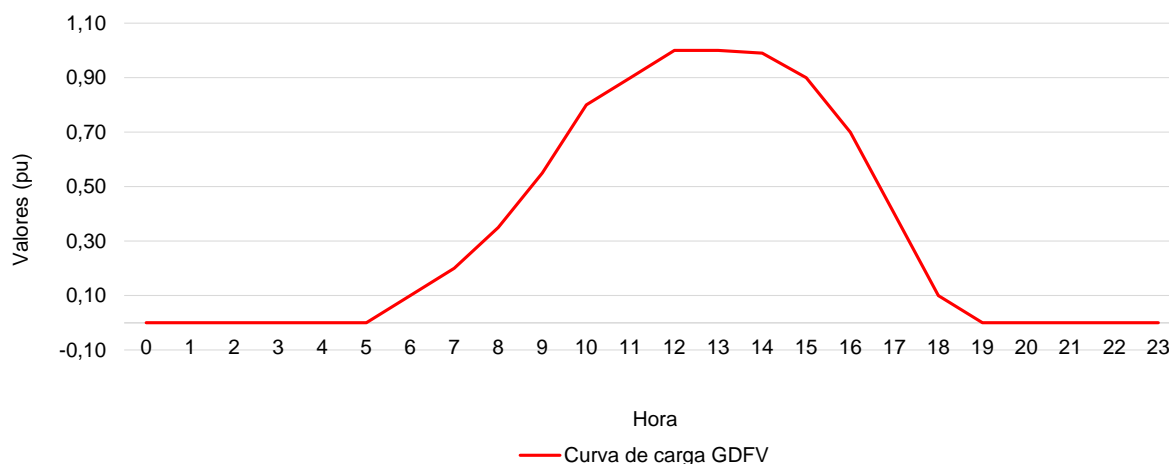
Figura 2.11 - Curva de carga típica – Indústria (UC de MT)



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 2.12, mostra-se a curva de carga adotada para a operação das GDFVs.

Figura 2.12 - Curva de carga típica das GDFVs



Fonte: Elaboração própria

2.10 COMPENSAÇÃO POR VIOLAÇÃO DE INDICADOR

Os valores financeiros a serem compensados para o consumidor são de acordo com os critérios do PRODIST módulo 8 e podem ser calculados pela equação (2.21). Além disso, a distribuidora fica obrigada a compensar todas as UCs conectadas no mesmo ponto de conexão.

$$Comp_{tensão} = \left[\left(\frac{DRP - DRP_{Limite}}{100} \right) \times k_1 + \left(\frac{DRC - DRC_{Limite}}{100} \right) \times k_2 \right] \times EUSD \quad (2.21)$$

Em que:

$k_1 = 0$, se $DRP \leq DRP_{limite}$;

$k_1 = 3$, se $DRP > DRP_{limite}$;

$k_2 = 0$, se $DRC \leq DRC_{limite}$;

$k_2 = 7$, para consumidores atendidos em Baixa Tensão, se $DRC > DRC_{limite}$;

$k_2 = 5$, para consumidores atendidos em Média Tensão, se $DRC > DRC_{limite}$;

$k_2 = 3$, para consumidores atendidos em Alta Tensão, se $DRC > DRC_{limite}$;

DRP = valor do DRP expresso em percentual, apurado na última medição;

$DRP_{limite} = 3\%$;

DRC = valor do DRC expresso em percentual, apurado na última medição;

$DRC_{limite} = 0,5\%$; e

EUSD = valor do Encargo de Uso do Sistema de Distribuição correspondente ao mês de referência da última medição.

2.11 OPENDSS

O *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) é um *software* simulação para sistemas elétricos de distribuição de energia elétrica.

2.12 HISTÓRIA DO OPENDSS

O desenvolvimento do DSS iniciou em 1997 na Electrotek Concepts, Inc. por Roger Dugan e Thomas McDemontt.

As principais finalidades do *software* naquele momento consistiam em dar apoio às análises de redes com a presença de GD, ser uma ferramenta flexível capaz de realizar análises que outras ferramentas não realizavam e ter um desenvolvimento constante, com o objetivo de criar soluções para novos desafios relativos aos sistemas de distribuição (DUGAN; MCDERMOTT, 2011).

Em 2004, o DSS foi comprado pelo EPRI e, em 2008, o EPRI apresentou sob licença de código aberto o chamado *software* OpenDSS, a fim de contribuir para o desenvolvimento da área de *Smart Grids*.

2.13 O QUE É O SOFTWARE OPENDSS

É baseado em linhas de comando que definem os circuitos. Podem ser oriundas do usuário, de um arquivo texto fixo ou geradas a partir de programas externos. O OpenDSS é implementado em duas versões. A primeira corresponde a um programa executável autônomo e a segunda, a um servidor COM (*Component Object Model*) implementado a partir de uma DLL. Na versão autônoma, há uma interface de usuário que permite a descrição de circuitos, a solução e a visualização de resultados. No segundo caso, o OpenDSS pode ser controlado por uma variedade de plataformas de *softwares* existentes, normalmente é controlado por Python, VBA e Matlab.

O programa suporta a maioria das análises em regime permanente senoidal (RMS), comumente realizadas para análise e planejamento de sistemas de

distribuição de energia elétrica. Além disso, o OpenDSS é capaz de realizar novos tipos de análises que são necessárias para atender às necessidades futuras relacionadas às Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grids*). Muitos dos recursos encontrados no programa foram originalmente destinados a dar suporte às necessidades das análises em que há geração distribuída (GD). Outros recursos dão suporte à análise de eficiência energética do transporte de energia e análise harmônica. Por fim, o OpenDSS foi projetado para ser indefinidamente expansível, de tal modo que possa ser facilmente modificado para atender às necessidades futuras ou específicas dos usuários. Outra característica principal do OpenDSS está nos seus modos de solução quazi-static, que permitem a realização de simulações sequenciais no tempo. Assim, é possível analisar como os sistemas se comportam durante um intervalo de tempo definido.

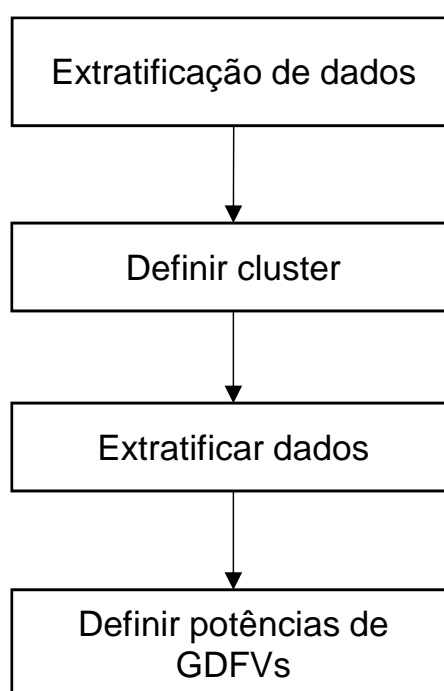
Os principais modos de solução presentes no OpenDSS:

- Fluxo de potência instantâneo (SnapShot);
- Fluxo de potência diário;
- Fluxo de potência anual;
- Análise harmônica;
- Análise dinâmica.

3 METODOLOGIA

A metodologia consiste em atribuir as UCs existentes em alimentadores, visando a obter resultados de comportamento do reflexo de inserção de GDFVs de forma massiva, conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxo de estratificação de informações



Fonte: Elaboração própria

3.1 DEFINIÇÃO DO TIPO CARACTERÍSTICO DE GDFV SIMULADOS

Para a definição das características das GDFVs a serem inseridos no *software* de simulação, a metodologia utilizada foi de acordo com a comparação dos valores encontrados atualmente nas residências brasileiras. Para tal foram estratificados os vários tipos de instalações, com informações extraídas do banco de dados da ANEEL (ANEEL, 2022). Este banco de dados retrata as informações enviadas permanentemente pelas distribuidoras e permite a consulta das potências, tipos de fontes utilizadas, localizações geográficas e distribuidoras, entre outros.

Com base nas instalações atuais disponibilizadas no *site*, realizou-se uma estratificação nas GDFVs em vários níveis de agrupamento regional, com o objetivo

de caracterizar as instalações de GDFVs representativas na região geográfica do alimentador.

Foram utilizadas somente as unidades com fonte fotovoltaica. Os *clusters* foram separados por classes de consumo e subgrupo tarifário, nos tipos residencial, comercial, rural, industrial, poder e serviço público.

As informações foram agrupadas por potência mínima, média, mediana e moda, com o objetivo de melhor representar a região escolhida, para que então as GDFVs sejam aleatoriamente alocadas no alimentador.

Diante desses valores, foram extraídos do repositório da ANEEL e regionalizados geograficamente. Para o estudo foram adotados os valores referentes à estratificação da região do Rio Grande do Sul, de forma a caracterizar a inserção no alimentador dessa região.

3.2 ESTRATIFICAÇÃO REGIONAL

Na Tabela 3.1, Tabela 3.2 e Tabela 3.3 são mostradas as características das GDFVs para cada classe de consumo a nível de Brasil, região sul e Rio Grande do Sul, respectivamente. A data de referência é o ano de 2022, em que os valores de potência estão em kWp.

Tabela 3.1 - Estratificação de GDFVs – Brasil

Classe	Quantidade	mínimo	média	mediana	Moda
Comercial	164.708	-	27	15	20
Industrial	25.792	-	40	20	75
Poder Público	3.688	0	43	15	5
Residencial	1.161.320	-	6	5	3
Rural	122.168	-	18	8	5
Serviço Público	243	0	59	20	20

Fonte: Adaptado ANEEL (2022)

Tabela 3.2 - Estratificação de GDFVs - Região Sul

Classe	Quantidade	mínimo	média	mediana	Moda
Comercial	39.984	-	24	15	5
Industrial	11.748	-	30	15	5
Poder Público	637	1	38	20	75
Residencial	284.685	-	6	5	5
Rural	49.044	-	16	8	5
Serviço Público	100	1	37	20	20

Fonte: Adaptado ANEEL (2022)

Tabela 3.3 - Estratificação de GDFVs - Rio Grande do Sul

Classe	Quantidade	mínimo	média	mediana	Moda
Comercial	17.088	0	25	15	20
Industrial	3.419	1	41	25	75
Poder Público	443	1	30	20	20
Residencial	144.071	0	6	4	3
Rural	24.273	0	13	8	5
Serviço Público	5	3	30	9	9

Fonte: Adaptado ANEEL (2022)

A estratificação realizada conforme Tabela 3.1, Tabela 3.2 e Tabela 3.3 visa à caracterização regional das potências utilizadas para as simulações, buscando com isso representar as mesmas de forma regionalizada.

3.3 VALORES DE GDFV PARA SIMULAÇÃO

A Tabela 3.4 mostra a estratificação dos valores adotados para a simulação das GDFVs e utilizados no *software* OpenDSS para os cenários de inserção massiva, com o objetivo de representar as novas entradas de geração fotovoltaicas.

Tabela 3.4 - Potências utilizadas em simulação

Classe	kVA	Pmpp ¹
Comercial	20	20
Industrial	75	75
Poder Público	15	15
Residencial	4,3	4,3
Rural	7,5	7,5
Serviço Público	-	-

Fonte: Elaboração própria

Os valores foram escolhidos considerando uma representatividade entre a média, mediana e moda para cada grupo de consumo, com o objetivo de representação em função da regionalização.

3.4 DEFINIÇÃO DAS UCS COM GDFVS PARA SIMULAÇÃO

Para a definição das unidades consumidoras que devem ser incluídas na simulação de cada cenário com GDFV acopladas, foi adotada a aleatoriedade de escolha no universo de UCS, com a utilização do *software* Excel. Foram sorteados grupos de UCS de acordo com a penetração desejada. O total de UCS nesse alimentador é de 899 UCS de baixa tensão e 1 UC de média tensão, que representa uma grande indústria da região.

Foram simulados os seguintes níveis de penetração:

- Um cenário sem GDFV no alimentador;
- Um cenário, com as GDFVs atuais do sistema que, atualmente, representa aproximadamente 3% das UCS;
- Cenários com 15%, 30%, 50% 70% de UCS com GDFVs instaladas.

As GDFVs sorteadas foram conectadas no mesmo PAC em que sua carga está conectada. Com isso, pode-se diagnosticar os efeitos da geração em unidades consumidoras, gerando e absorvendo potência de acordo com a curva de carga relacionada.

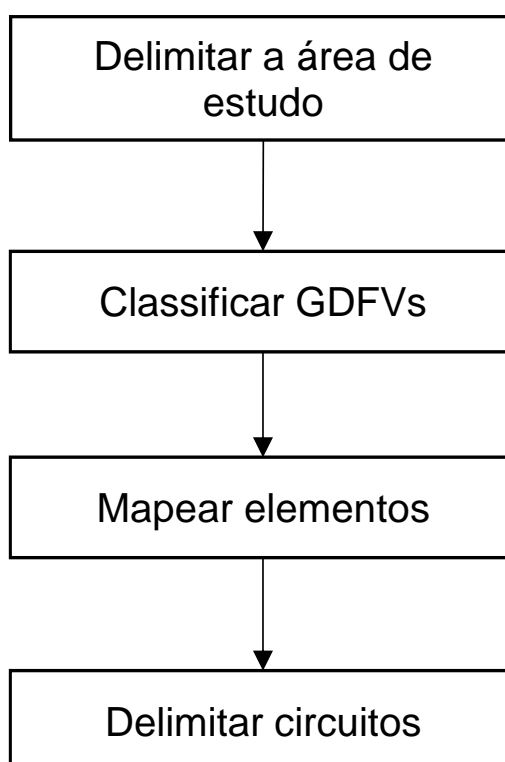
¹ Pmpp - Potência máxima nominal do conjunto fotovoltaico para irradiância de 1,0 kW/m².

3.5 CENÁRIOS ANALISADOS

Os cenários de penetrações de GDFV foram avaliados através do *software* OpenDSS. Os níveis de penetração foram determinados atribuindo-se incrementos de número de GDFV em unidades consumidoras, tomando como referência os dados de unidades consumidoras reais existentes no alimentador TQR-CT1.

Na Figura 3.2, é mostrado de forma resumida o processo adotado para a definição de cenários.

Figura 3.2 - Definição de área de estudo



Fonte: Elaboração própria

Para o estudo foram alocados monitores na saída do alimentador e em cada transformador. Assim, é possível avaliar o alimentador como um todo.

4 SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos estudos e simulações de inserção de GDFD em um alimentador real da cooperativa permissionária de distribuição CERTAJA Energia, situada no município de Taquari, Rio Grande do Sul.

4.1 TOPOLOGIA DO ALIMENTADOR

O alimentador analisado situa-se no município de Taquari, Rio Grande do Sul, e é oriundo de uma tomada de energia denominada TQR-CT1, no qual a permissionária de serviços públicos CERTAJA Energia tem como fonte de suprimento a RGE SUL.

O circuito alimentador é expresso da subestação Taquari para atender à CERTAJA Energia, que faz a distribuição em uma parcela de sua área de permissão.

Após a medição de fronteira, a permissionária possui um sistema de distribuição cujas características estão detalhadas na Tabela 4.1. O alimentador é constituído de redes urbanas e rurais, contendo uma grande indústria e diversos outros tipos de consumidores.

O diagrama unifilar é apresentado pela Figura 4.1 conforme seus elementos detalhados na Tabela 4.1.

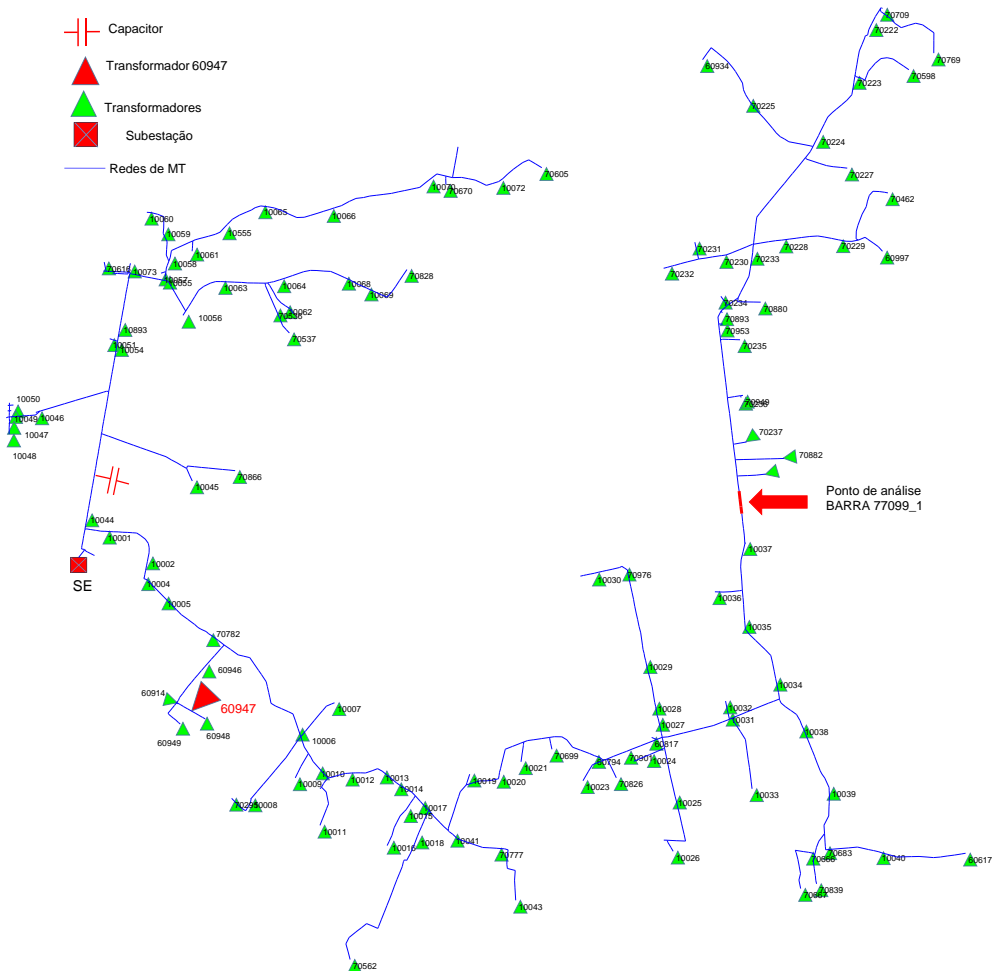
Os dados utilizados para cálculos, simulações e análises são extraídos de acordo com os critérios estabelecidos no PRODIST - Módulo 10 - Sistema de Informação Geográfica Regulatório (ANEEL,2021), assim como os parâmetros utilizados para o cálculo de perdas técnicas conforme Módulo 7 do PRODIST (ANEEL, 2021).

Tabela 4.1 - Informações alimentador TQR-CT1

Descrição das características	Valores
Tensão nominal primária	13,8 / 7,967 kV
Rede de Média Tensão	71,88 km
Tensão nominal secundária	440/380/220V
Rede Secundária	57 km
Transformadores	122 unidades
Capacitores / Compensador de reativos	3 unidades
Micro Geração distribuída fotovoltaica GDFV	31 unidades
Unidades Consumidoras (grupo B)	899 unidades
Unidades Consumidoras (grupo A)	1 unidade

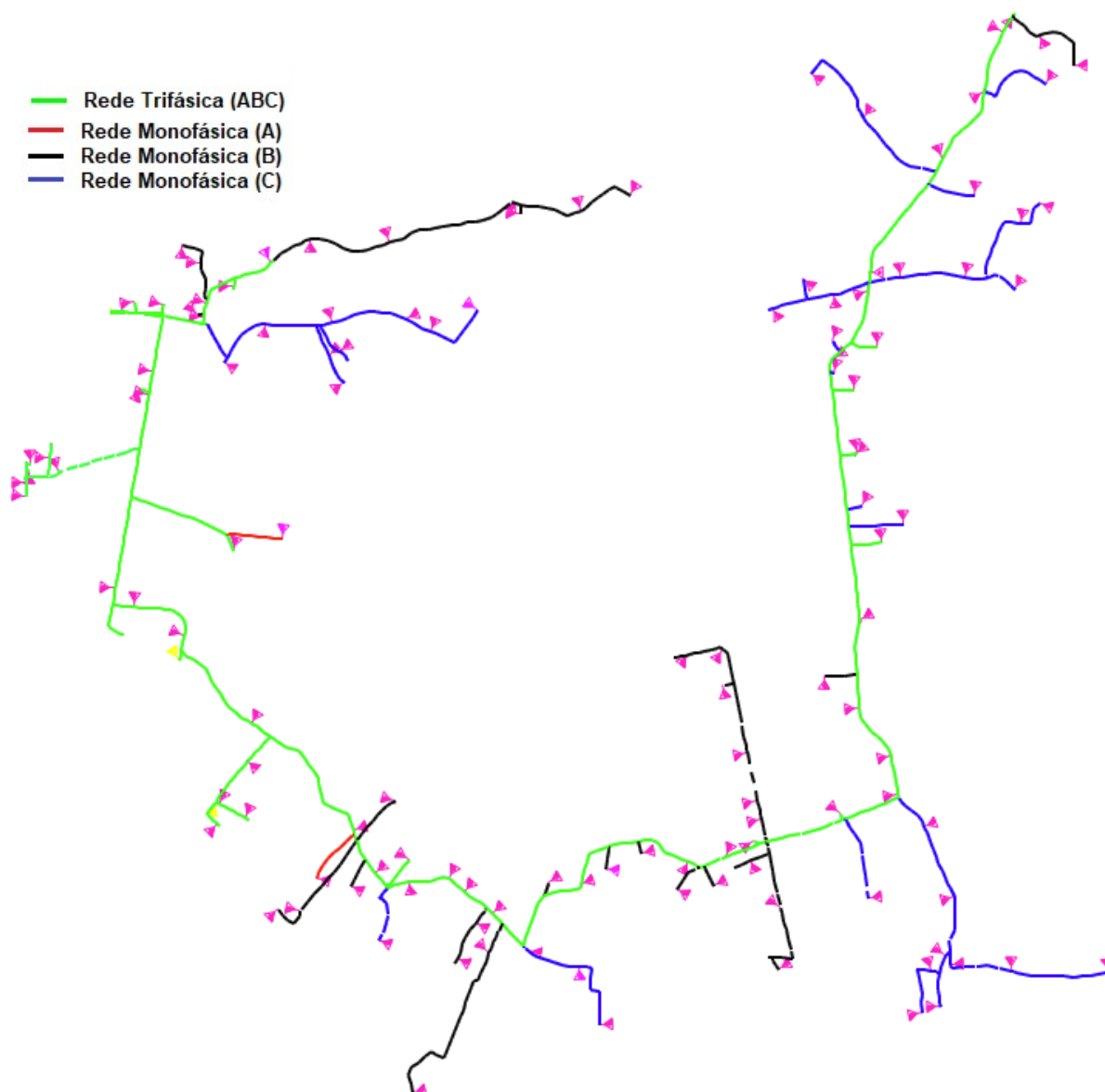
Fonte: Elaboração própria

Figura 4.1 - Alimentador TQR-CT1 com transformadores



Fonte: Elaboração própria

Figura 4.2 - Alimentador TQR-CT1 - identificação de fases monofásicas



Fonte: Elaboração própria

A Figura 4.1 mostra, em formato de diagrama unifilar, o circuito alimentador que será objeto de estudo. O mesmo possui em sua topologia circuitos com característica urbana e rural.

A Figura 4.2, mostra a disposição e representatividade das redes monofásicas ao longo do alimentador, demonstrando sua característica monofásica.

4.1.1 Rede primária

A rede primária do alimentador em estudo é alimentada em tensão nominal de linha de 13,8 kV, possuindo em sua extensão redes trifásicas e redes monofásicas com retorno por terra (MRT), com tensão de fase de 7,967 kV. Em sua extensão urbana e industrial, possui condutores 336,4 MCM do tipo CAA e, em sua extensão rural, utiliza basicamente redes monofásicas com condutores 4 AWG CAA, totalizando uma extensão de 71,88 quilômetros de rede elétrica de média tensão.

4.1.2 Rede secundária

As redes secundárias analisadas são monofásicas, bifásicas e trifásicas, com tensão de alimentação em 380/220 V para as redes trifásicas. As redes bifásicas são alimentadas por tensão de 440/220 V e as monofásicas, com tensão de 220 V. Uma extensão de 57 km de redes secundárias é o total desse alimentador.

4.1.3 Transformadores de distribuição

Os transformadores existentes na rede de distribuição são do tipo trifásicos, totalizando 122 unidades.

Os transformadores que constituem esse alimentador na configuração trifásico são do tipo de ligação delta estrela aterrado, com potência de 15, 30, 45, 75 e 112,5 kVA, quando o transformador é de propriedade da cooperativa. No caso de equipamentos destinados à ligação de UCs do grupo A, as potências são de acordo com a necessidade da carga a ser atendida e sempre acima de 75 kVA.

Os transformadores do tipo MRT são equipamentos vastamente utilizados em regiões rurais, onde existe baixa densidade de cargas e ausência de redes trifásicas. Sua aplicação torna a infraestrutura mais econômica em relação aos transformadores trifásicos.

Os enrolamentos das bobinas do secundário desses equipamentos possuem defasagem angular entre as fases de 180 graus, permitindo assim duas fases no secundário.

4.1.4 Capacitores

No alimentador há um banco de capacitores de 180 kVAr, conforme Figura 4.1, sendo que opera no sistema de forma fixa, com ligação estrela flutuante e tensão de alimentação em 7,967 kV.

4.1.5 Unidade consumidoras de baixa tensão

As unidades consumidoras desse alimentador estão classificadas conforme Tabela 4.2.

Predominam neste alimentador UCs rurais e residenciais. No entanto, apresenta uma grande indústria, que devido a sua grande carga, se torna predominante na curva de carga do alimentador.

Tabela 4.2 - Estratificação de UCs do grupo B - ALTQR-CT1

Classe	Curva de Carga típica (CCT)	Número de consumidores
Residencial	Curva de carga residencial	708
Industrial	Curva de carga industrial	7
Comercial	Curva de carga comercial	1
Rural	Curva de carga rural	182
Poder Público	Curva de carga poder público	1
Total		899

Fonte: Elaboração própria

4.2 ANÁLISE DE GDFV (ESTUDO DE CASO REAL)

Na Tabela 4.3 as informações referem-se a dados de duas usinas reais, localizadas no município de Taquari. A Figura 4.3 mostra a disposição das usinas onde foi realizada a medição de qualidade de energia, de forma a propiciar uma análise de uma GDFV de estudo de caso. Após os estudos deste caso, serão feitas generalizações para estudo de todo o alimentador TQR-CT1. As medições foram coletadas com o analisador de energia PowerNET PQ-700 G4, da fabricante IMS.

Tabela 4.3 - Dados de GDFVs, caso real

Usina	Quantidade Módulos	Módulos (kWp)	Inversor (kVA)
GD1 A	116	51,62	60
GD2 X	160	71,2	60
Total	272	122,82	120

Fonte: CERTAJA ENERGIA

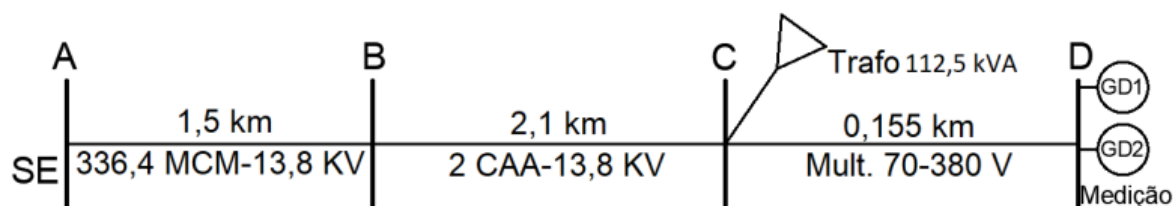
Figura 4.3 - Usina UCs, A e X - Taquari/RS.



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4.4, está representado o diagrama unifilar simplificado, contendo o esquema de ligação das referidas GDFVs, as quais são de auto consumo remoto, o que permite verificar a influência no sistema de baixa tensão. Foram utilizadas como parâmetros de estudo de um caso real, com o objetivo de validar as simulações apresentadas pelo *software* OpenDSS. Do ponto A até o ponto C, trata-se de alimentador primário com tensão de 13,8 kV e do ponto C até o ponto D, o circuito de baixa tensão do transformador com tensão de 380/220 V, onde as GDFVs estão localizadas.

Figura 4.4 - Unifilar GDFV X



Fonte: Elaboração própria

4.2.1 Análise de GDFV (análise de tensão)

Na Figura 4.5 são mostrados os valores medidos no ponto de acoplamento comum (PAC)² das GDFVs com a baixa tensão em estudo. Os resultados apresentados referem-se a um intervalo de 1008 registros de tensão, conforme estabelecido no PRODIST. No Módulo 8 é possível observar que a tensão viola o Limite de Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária (DRP) estabelecido pelo PRODIST.

Na Tabela 4.4 são mostrados os limites de tensão que devem ser verificados para que sejam considerados.

Em vários momentos a tensão viola inclusive o Limite de Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC), ocasionando compensação aos clientes ligados no mesmo PAC da GDFV.

Outro fator que se deve levar em consideração é que, de acordo com a resolução normativa 871/2020, que estabelece a revisão dos módulos 6 e 8 do PRODIST, são geradas trimestralmente amostras de UCs, que devem ser medidas de forma permanente (ANEEL, 2020). Os índices de DRP e DRC das UCs sorteadas devem ser informados com periodicidade mensal a ANEEL. Assim, independente dos consumidores realizarem reclamação na distribuidora por qualidade de energia, eles devem ser compensados financeiramente. Os índices de DRP e DRC são apurados mensalmente. Independente da fonte perturbadora, a distribuidora deve regularizar o sistema, de modo a regularizar os parâmetros de qualidade de energia.

Na Figura 4.5 são apresentados dados de geração do dia 27/03/2022, em que se pode observar a influência da potência gerada pela GDFV na tensão de

² PAC - É um ponto na rede pública de distribuição, eletricamente mais próximo a uma determinada carga, no qual outras cargas estejam conectadas.

fornecimento, principalmente no PAC da GDVF. A tensão é elevada acima do limite precário estabelecido pelo PRODIST (230V).

Na Tabela 4.4 são mostrados os limites para atendimento de tensão do módulo 8 do PRODIST, de acordo com cada faixa de tensão de atendimento.

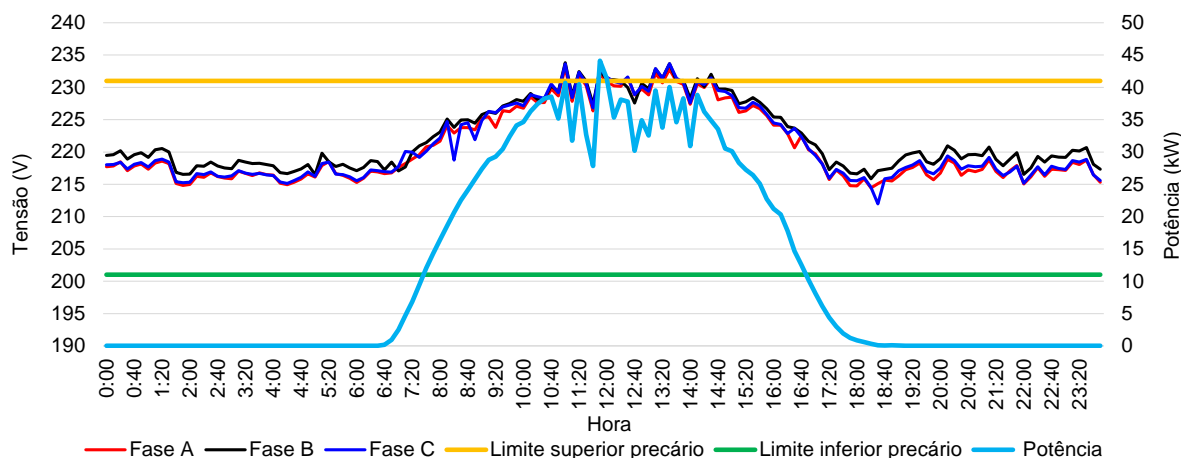
Tabela 4.4 - Limites de violação de tensão

Tensão nominal de 380/220 V	
Tensão de Atendimento	Faixa de variação da tensão (V)
Adequada	$350 \leq TL \leq 399$ / $202 \leq TL \leq 231$
	$331 \leq TL < 350$ ou $399 < TL \leq 403$ /
Precária	$191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233$
Crítica	$TL < 331$ ou $TL > 403$ / $TL < 191$ ou $TL > 233$
Tensão nominal de 440/220 V	
Adequada	$405 \leq TL \leq 462$ / $202 \leq TL \leq 231$
Precária	$383 \leq TL < 405$ ou $462 < TL \leq 466$
	$191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233$
Crítica	$TL < 383$ ou $TL > 466$ / 191 ou $TL > 233$
superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV	
Adequada	$0,93 TR \leq TL \leq 1,05 TR$
Precária	$0,90 TR \leq TL < 0,93 TR$
Crítica	$TL < 0,90 TR$ ou $TL > 1,05 TR$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021b)

Pode-se observar a influência direta das GDVF nos níveis de tensão. À medida em que o sistema começa a gerar energia, a tensão se eleva, voltando aos índices normais à medida em que o sistema cessa a geração. Isto acontece em momentos de sombreamentos, dia nublados ou ao anoitecer.

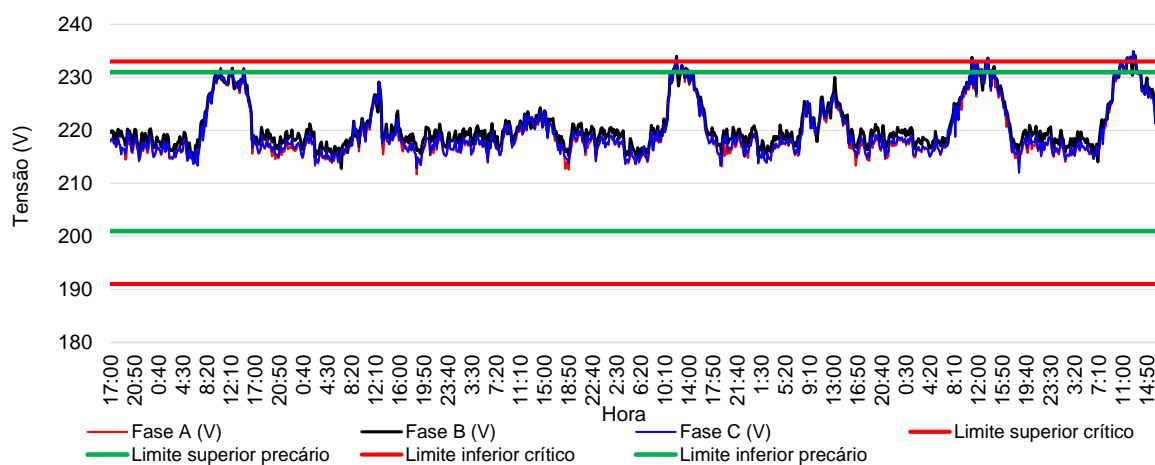
Figura 4.5 - Influência da potência instalada na tensão



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4.6 é mostrada uma medição em uma UC, ocorrendo do dia 21/03/2022 até o dia 28/03/2022. Pode-se evidenciar violações de tensão nas horas próximas ao meio dia de cada dia.

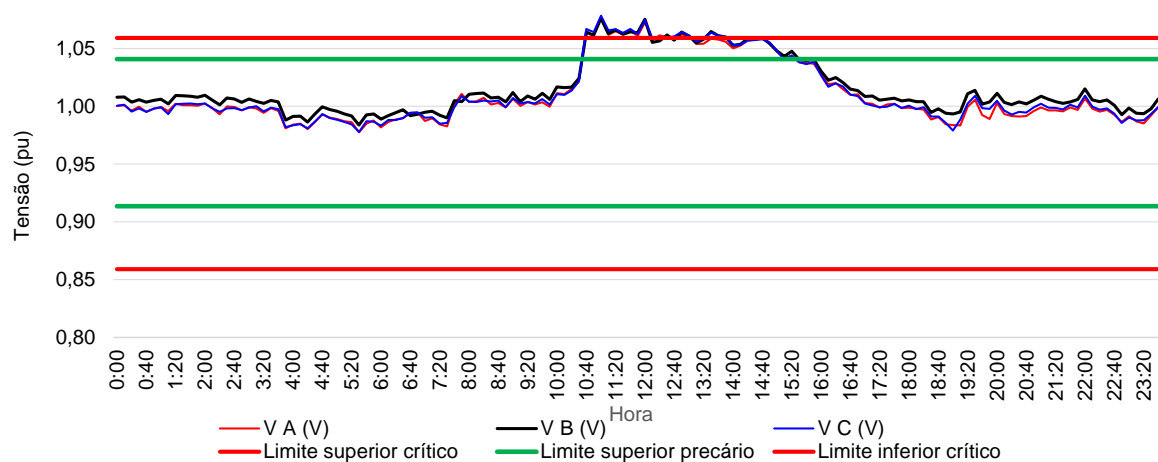
Figura 4.6 - Resultado de medição de qualidade, UC real



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4.7 foi ampliada a análise com destaque para dia 27/03/2022, totalizando um dia completo de medição, de forma a evidenciar por quanto tempo os níveis de tensão ficam fora dos valores esperados.

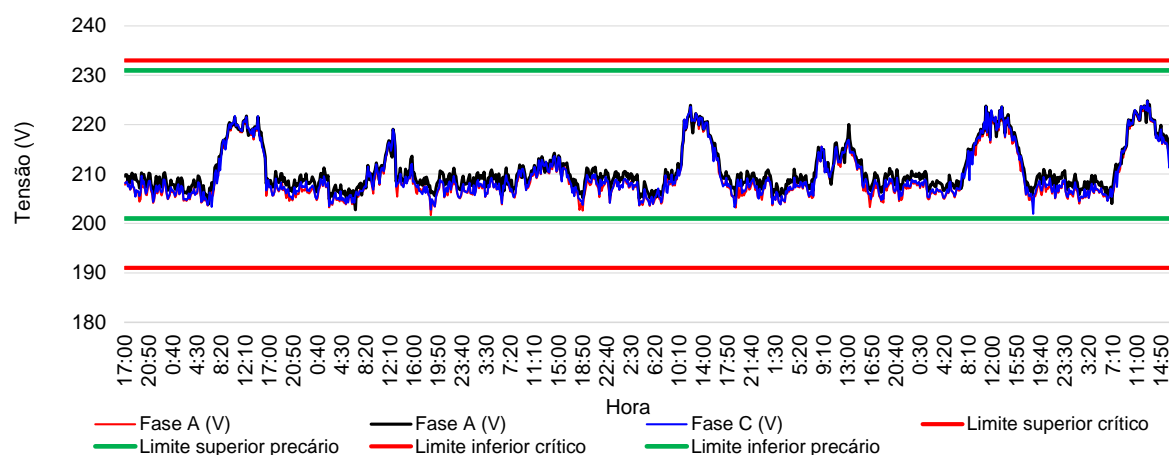
Figura 4.7 - Destaque em um range da medição



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4.8 é apresentada a simulação de uma proposta de solução por meio do ajuste de TAP do transformador. Esta solução deve ser avaliada pela distribuidora para regularizar e cessar eventuais compensações de qualidade de energia. Este ajuste em TAP no transformador é uma medida que deve ser avaliada com cautela, levando-se em conta que todo o circuito de baixa tensão será influenciado.

Figura 4.8 - Valores simulados, após ajuste de TAP em transformador



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 4.5 é apresentado o resumo de medição de qualidade de energia realizada na UC X, sendo o intervalo de 1008 registros válidos, totalizando uma semana de medição em campo.

Pode-se verificar que foram ultrapassados os níveis de tensão em índices precários e críticos, mesmo que a potência gerada tenha ficado em torno de 40 kWp, em seu máximo, o que indica que no período da medição a irradiância não era a máxima, visto que a medição da GD1 pode chegar a 51,62 kWp.

Tabela 4.5 - Resumo de medição de qualidade

Registros Válidos	Fase A	Fase B	Fase C
Registros Válidos	1008	1008	1008
Máximo da Tensão	234,5	234,9	234,8
Mínimo da Tensão	211,7	212,8	212
DRP	7,64%	8,63%	8,63%
DRC	0,5%	1,09%	0,99%
	DRP = 8,63%	DRC=1,09%	
RESUMO	V _{máx} = 1,07 pu	V _{min} = 0,96 pu	

Fonte: Elaboração própria

Para o caso analisado, na Tabela 4.6 são mostrados os valores para uma série de possibilidades de valores financeiros a serem compensados, dependendo do Encargo de Uso do Sistema de Distribuição (EUSD)³ da referida UC, que sofre influência dos níveis de tensão gerados pelas GDFVs dos sistemas.

Tabela 4.6 - Valores estimados de compensação de acordo com o EUSD

Tipo	Caso	DRP %	DRC %	K1	K2	EUSD	Comp.
BT	1	8,63	1,09	3	7	19,56	4,11
BT	2	8,63	1,09	3	7	195,6	41,12
BT	3	8,63	1,09	3	7	1956	411,15

Fonte: Elaboração própria

³ EUSD - Encargo de Uso do Sistema de Distribuição correspondente à parcela da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) Fio B.

4.2.2 Análise de GDFV (análise de distorção harmônica)

Outra análise sob o ponto de vista de impactos na qualidade de energia que deve ser avaliada são as distorções harmônicas geradas no sistema de distribuição.

Na Tabela 4.7 pode-se verificar os limites de distorção admitido, de acordo com o PRODIST.

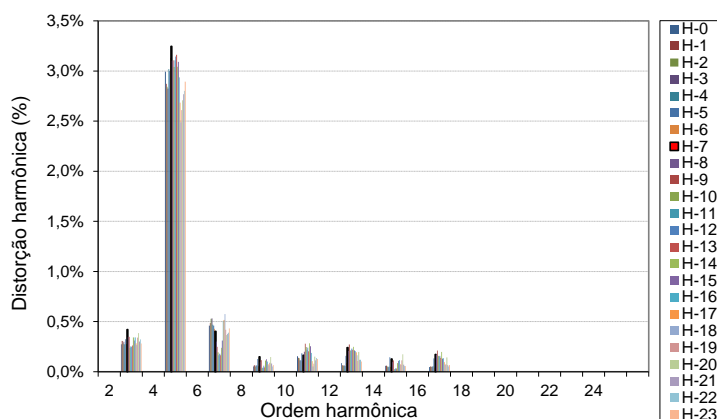
Tabela 4.7 - Limites das distorções harmônicas totais (% da fundamental)

Indicador	Vn ≤ 2,3 kV	2,3 kV < Vn < 69 kV	69 kV < Vn < 230 kV
DTT 95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _p 95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _i 95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ 95%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021b)

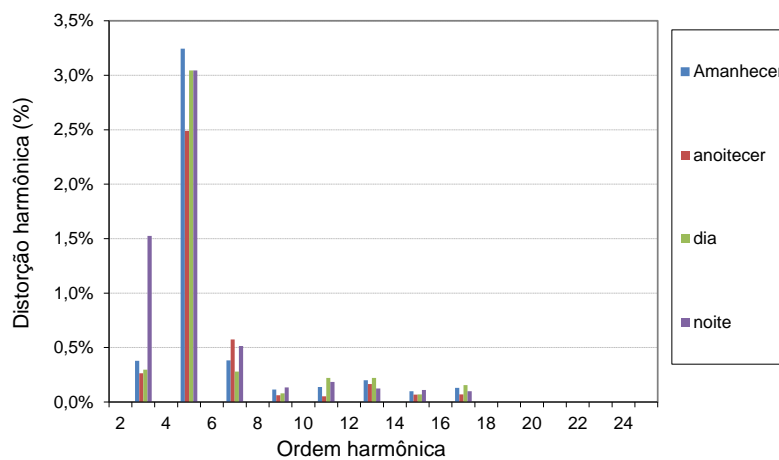
Na Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12 pode-se avaliar o efeito das distorções harmônicas de tensão e corrente, respectivamente. Os dados são das medições do dia 27/03/2022, dos efeitos das harmônicas ímpares de ordem 3 até a ordem 25, sendo que os efeitos foram estratificados hora a hora e por turno de ocorrência. O intervalo de medição compreende 1008 registros válidos, conforme indicação do PRODIST para avaliação da qualidade de energia.

Figura 4.9 - Efeito das distorções harmônicas na tensão - Horas



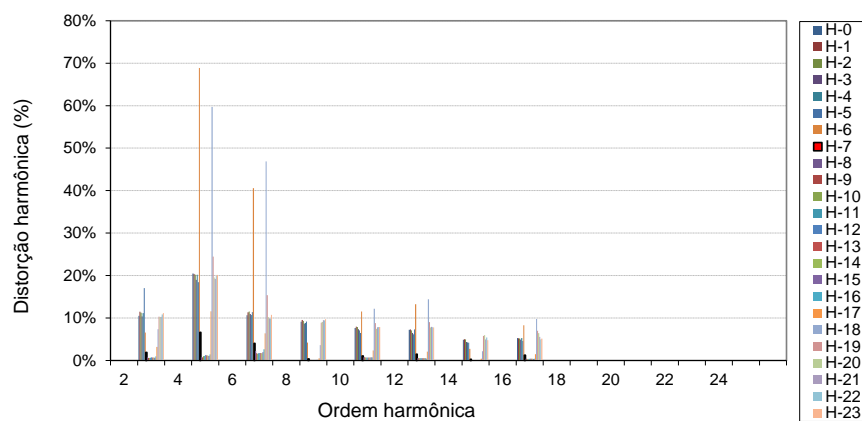
Fonte: Elaboração própria

Figura 4.10 - Efeito das distorções harmônicas na tensão - Turno



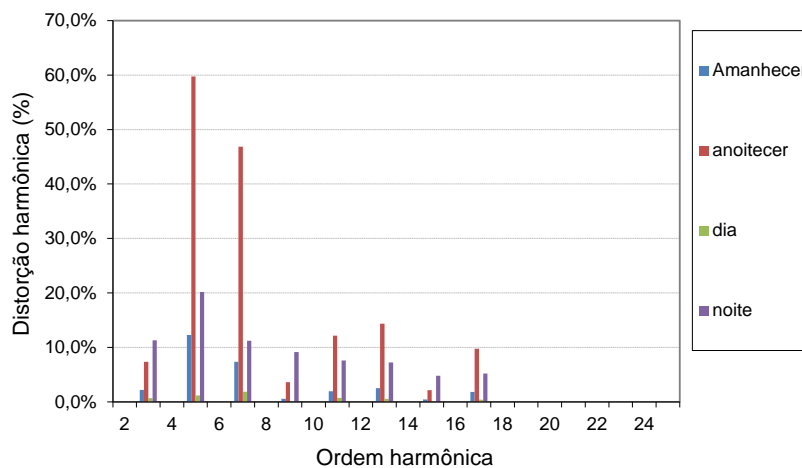
Fonte: Elaboração própria

Figura 4.11 - Efeito das distorções harmônicas na corrente - Horas



Fonte: Elaboração própria

Figura 4.12 - Efeito das distorções harmônicas na corrente - Turno

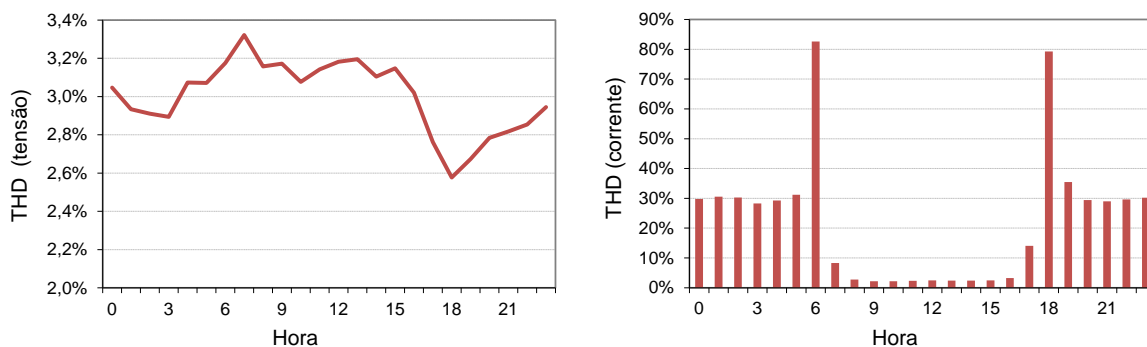


Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4.13 estão representadas as distorções harmônicas totais THD, de tensão e corrente, respectivamente, observadas na medição realizada. Pode-se observar que as THD de tensão ficam dentro das faixas esperadas, conforme mostrado na Tabela 4.7 de acordo com o PRODIST, em qualquer período do dia. No entanto, as THDs de corrente no período da noite ficam em torno de 30%, período em que a GDFV não gera nenhuma potência. Logo, as correntes são muito pequenas. Nos períodos de amanhecer e anoitecer, onde os inversores estão em pequena geração, as 6 horas da manhã e as 18 horas da tarde observa-se THD de 80%. Isso se deve à baixa corrente na componente fundamental nas correntes do circuito, ocasionado valores percentuais e um valor elevado.

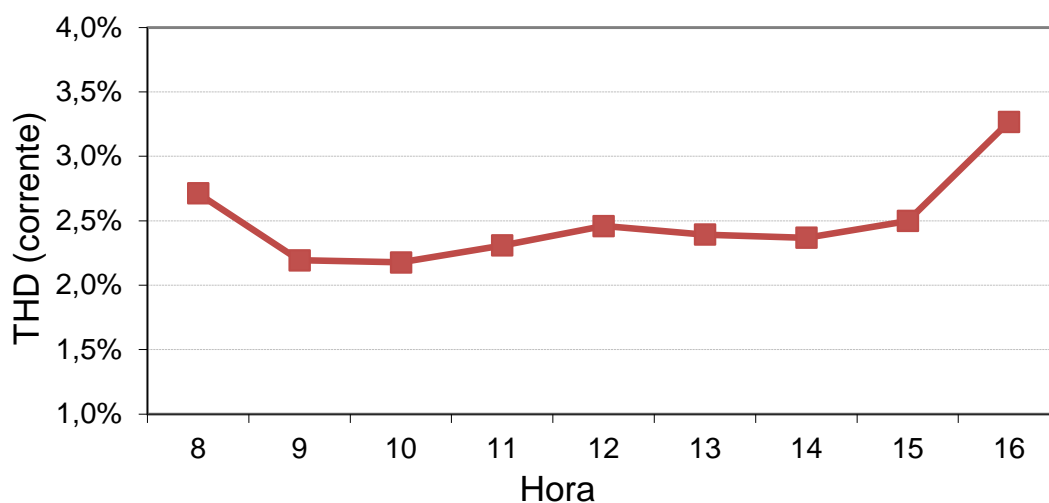
Durante o período do dia, as THDs de corrente estão dentro dos parâmetros estabelecidos pelo PRODIST. Conforme mostrado na Figura 4.14, o período avaliado foi referente a 144 amostras, totalizando um dia completo de medição, ocorrida no dia 27/03/2022.

Figura 4.13 - Distorções harmônicas total – THD – Medição 24 horas



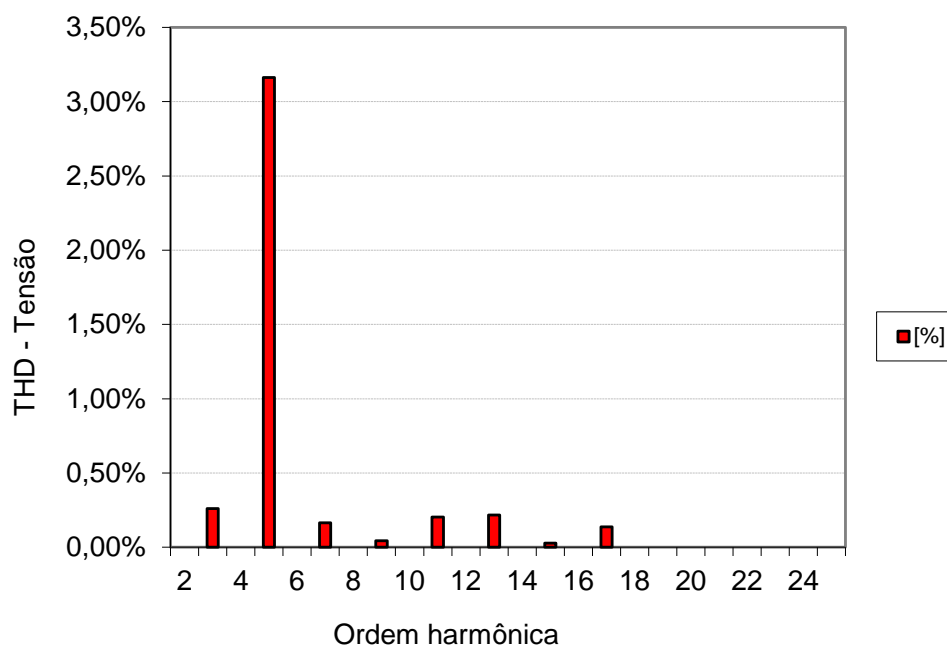
Fonte: Elaboração própria

Figura 4.14 - Distorções harmônicas total - THD - Corrente diurno



Fonte: Elaboração própria

Figura 4.15 - Espectro harmônico de tensão



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4.15 é apresentado o espectro harmônico da tensão as 13 horas do dia 27/03/2020. Verifica-se que, para o caso analisado, o maior efeito das harmônicas advém da quinta harmônica.

4.2.3 Discussão sobre o estudo de caso real

O estudo de caso analisado aponta sérios impactos causados pela GDVF na tensão do circuito de baixa tensão em períodos de grande irradiação solar.

Na Figura 4.5 foi possível evidenciar a influência da potência de geração, relacionada com o aumento da tensão no PAC, efeitos que fazem com que a tensão fique fora dos parâmetros adequados, violando indicadores do PRODIST. Esta violação gera compensações financeiras aos consumidores ao longo do circuito por transgressão de DRP e ou DRC.

Com relação às distorções harmônicas, não se verifica violações às referências do PRODIST. Nas distorções de tensão os limites ficaram em torno de 2,5 a 3,5%, abaixo do limite de 10% estabelecido pelo PRODIST. As distorções de corrente chegaram, em determinados horários, a 80%, o que é explicado pela baixa corrente fundamental gerada pelo sistema fotovoltaico. Nos períodos do dia de maior geração, os valores também ficaram em torno dos 2 e 3,3%.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Os cenários criados têm por objetivo avaliar o sistema em várias penetrações de GDFVs. Para esse estudo foram considerados casos de pequena até grande inserção de GDFVs. Cada cenário será avaliado individualmente nesta seção. Cada cenário apresenta um percentual de consumidores com GDFV conforme a Tabela 5.1. A tabela também mostra a relação de penetração em termos de energia.

Tabela 5.1 - Nível de penetração – Relação de energia versus N° de UCs

Caso (% de UCs)	Energia gerada Março 2022 (kWh)	Energia percentual em relação a carga
Sem GD	0	0%
Original (3,5%)	55.025	5,5%
10	142.414	14,2%
15	198.710	19,8%
20	245.086	24,4%
30	352.842	35,1%
40	472.440	47,0%
45	532.797	53,0%
50	594.456	59,2%
70	818.338	81,5%
80	975.818	97,1%
90	1.022.194	101,7%
Energia solicitada no Alimentador (kWh)		1.004.672

Fonte: Elaboração própria

5.1 CENÁRIO I – SEM GDFVS

No cenário I a simulação se deu com apenas cargas de consumidores, ou seja, sem nenhum efeito de GDFV. Nesse cenário foram retiradas das simulações todas as GDFVs existentes, com o objetivo de avaliar os níveis de tensão em pontos dos

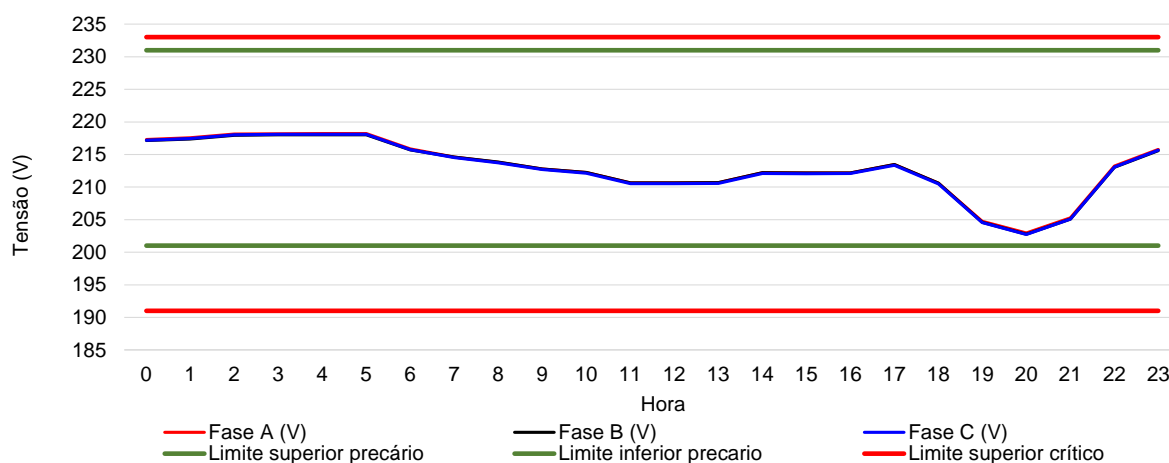
alimentadores, bem como em determinados transformadores, com o objetivo de comparar cenários sem e com GDFVs.

Para esse caso a simulação avalia o mesmo transformador em que há duas GDFVs alocadas, que foram objeto de medição com registrador de grandezas.

Na Figura 5.1 são verificados os valores simulados sem o efeito da geração distribuída no PAC da UC X. Nela encontra-se instaladas as GDFVs, com o objetivo de verificar os dados de medição nas duas GDFVs com 120 kWp de potência instalada.

Sem GDFV há maior queda nas tensões, agravadas nos horários de ponta.

Figura 5.1 - Análise no PAC da UC X - Sem GDFV

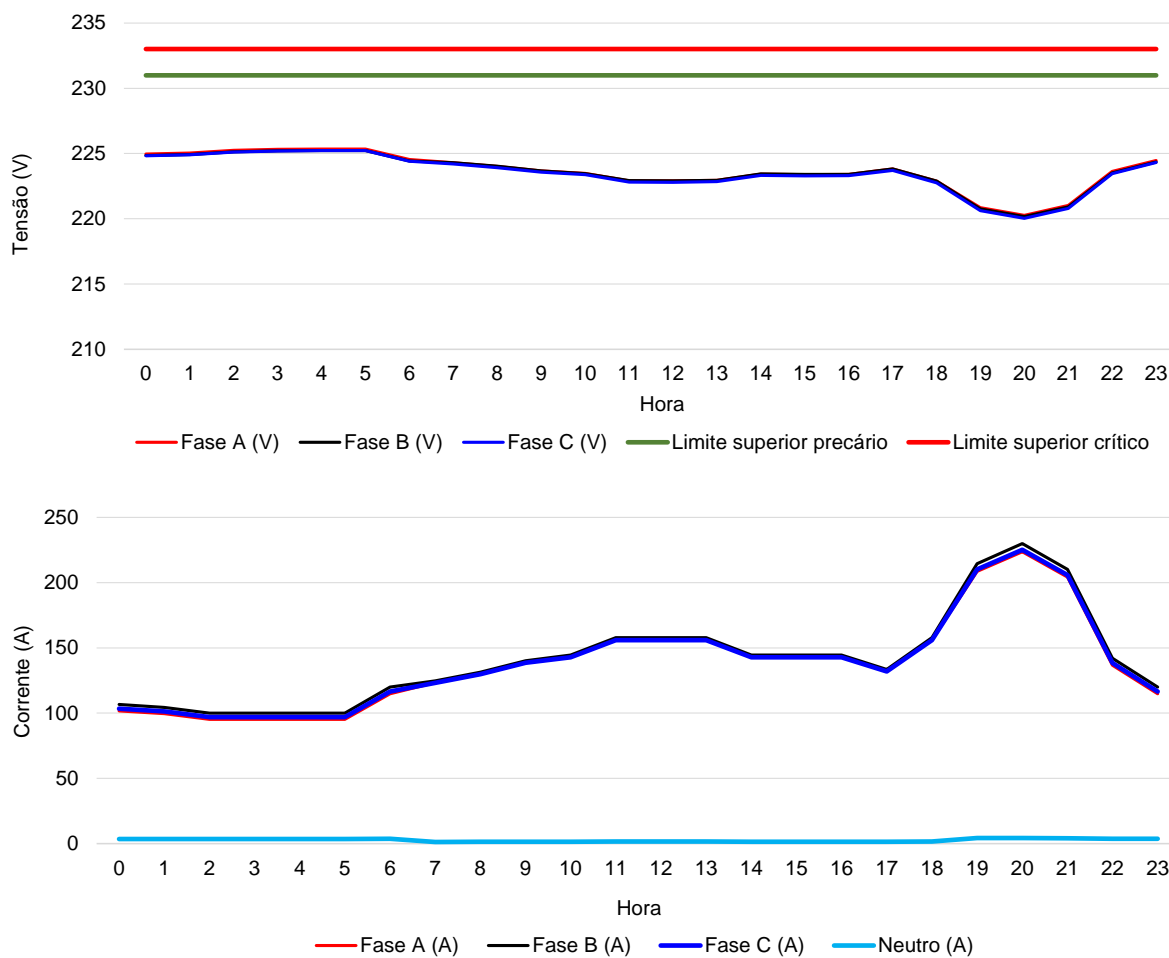


Fonte: Elaboração própria

A simulação mostra a tensão na baixa tensão alimentada pelo transformador 60947 (UC X) sem o efeito das GDFVs, conforme a Figura 5.1. Observa-se os valores de tensão dentro dos limites adequados.

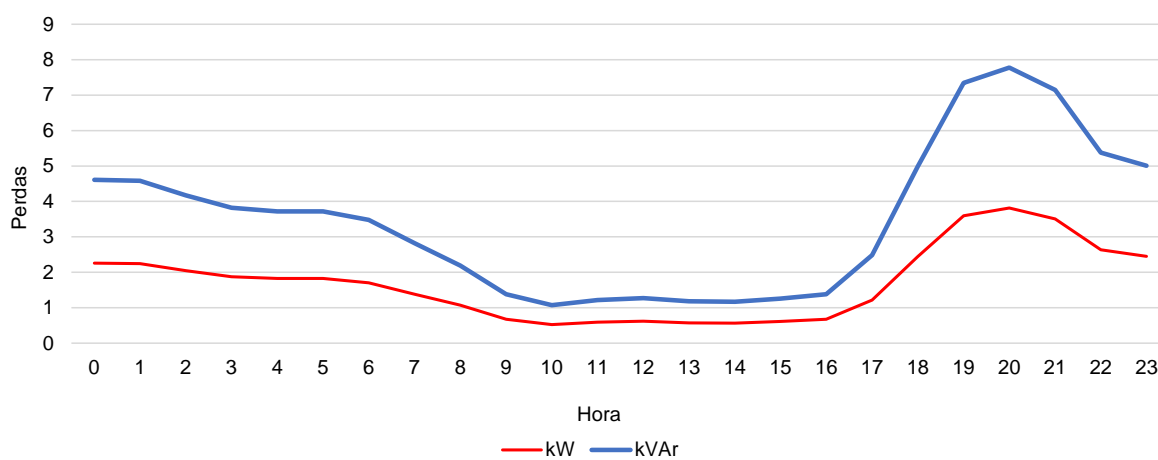
A Figura 5.2 mostra os níveis de tensão e corrente na saída do transformador, onde é possível relacionar o aumento das quedas de tensão em função do aumento da corrente de carga.

Figura 5.2 - Análise na BT do transformador 60947 sem GDFV



Fonte: Elaboração própria

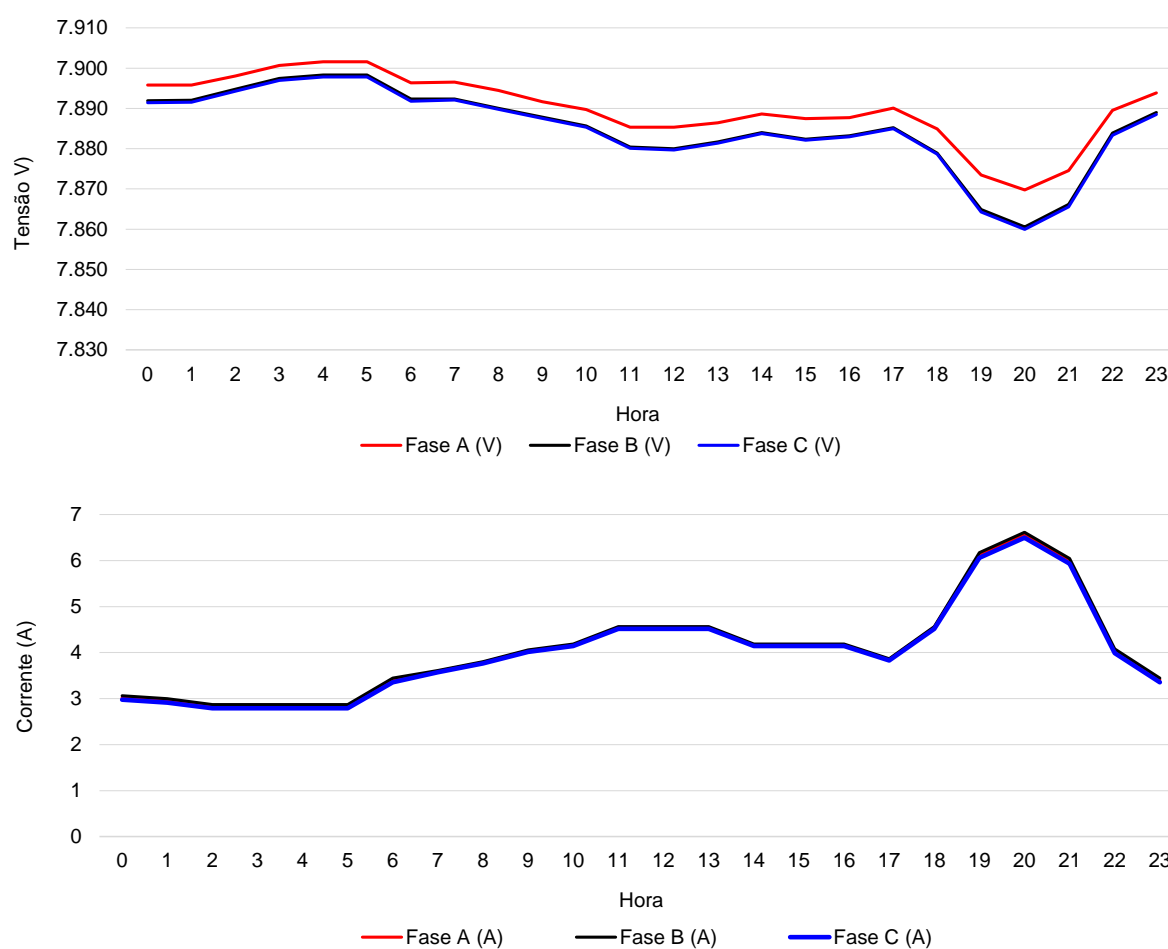
Figura 5.3 - Perdas no transformador 60947 - Sem GDFV



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 5.4 pode-se observar os efeitos da carga nos circuitos de média tensão. Foi adicionado um monitor na entrada do transformador e verificadas as tensões, que são impactadas não apenas pela carga local, mas também pela rede e pelo estante da carga da rede MT. A corrente expressa na Figura 5.4 refere-se apenas às cargas do próprio equipamento.

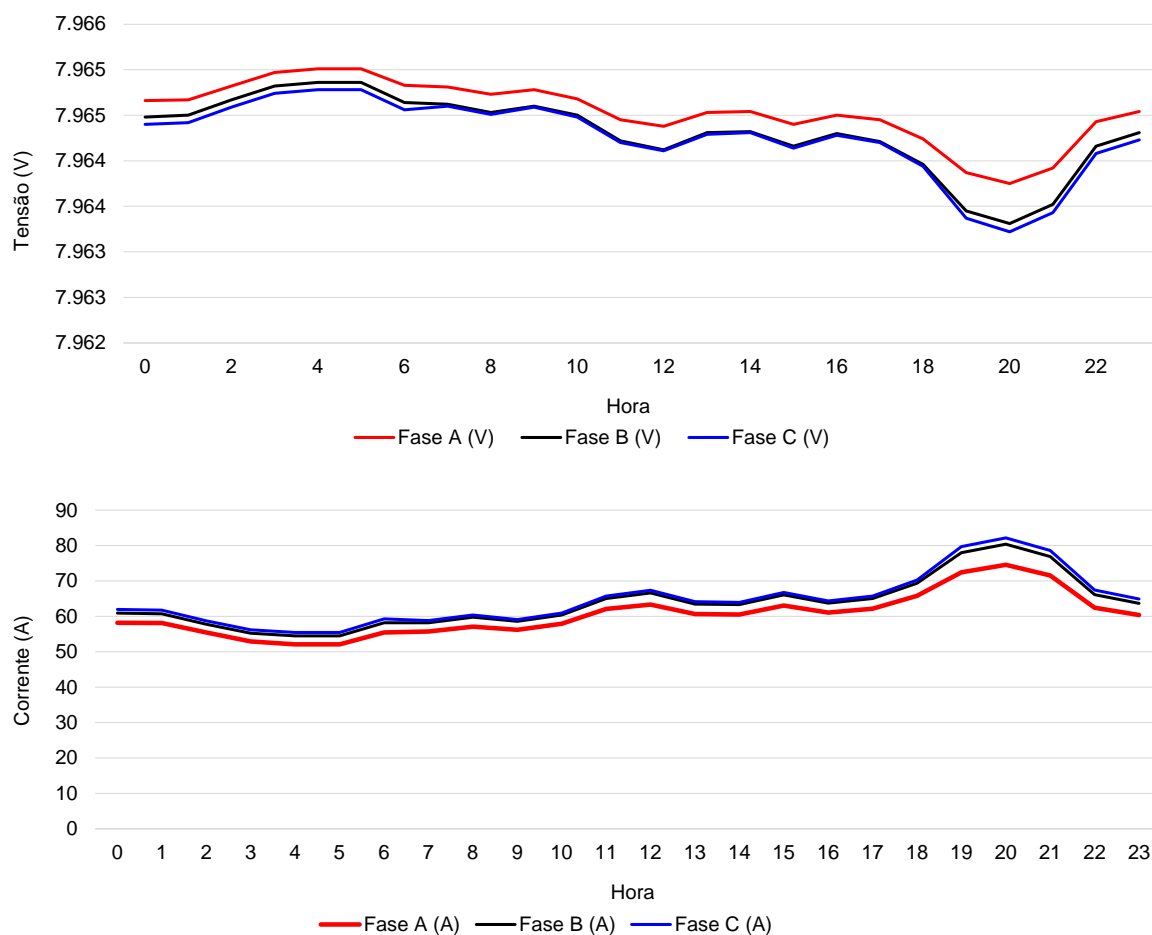
Figura 5.4 - Análise na MT do transformador 60947 sem GDFV



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 5.5 pode-se verificar as tensões e correntes na saída do alimentador para o caso sem GDVF. Percebe-se que, na quase na totalidade do dia, há uma curva de corrente constante, com exceção ao período de ponta, onde os consumidores residenciais possuem maior carga.

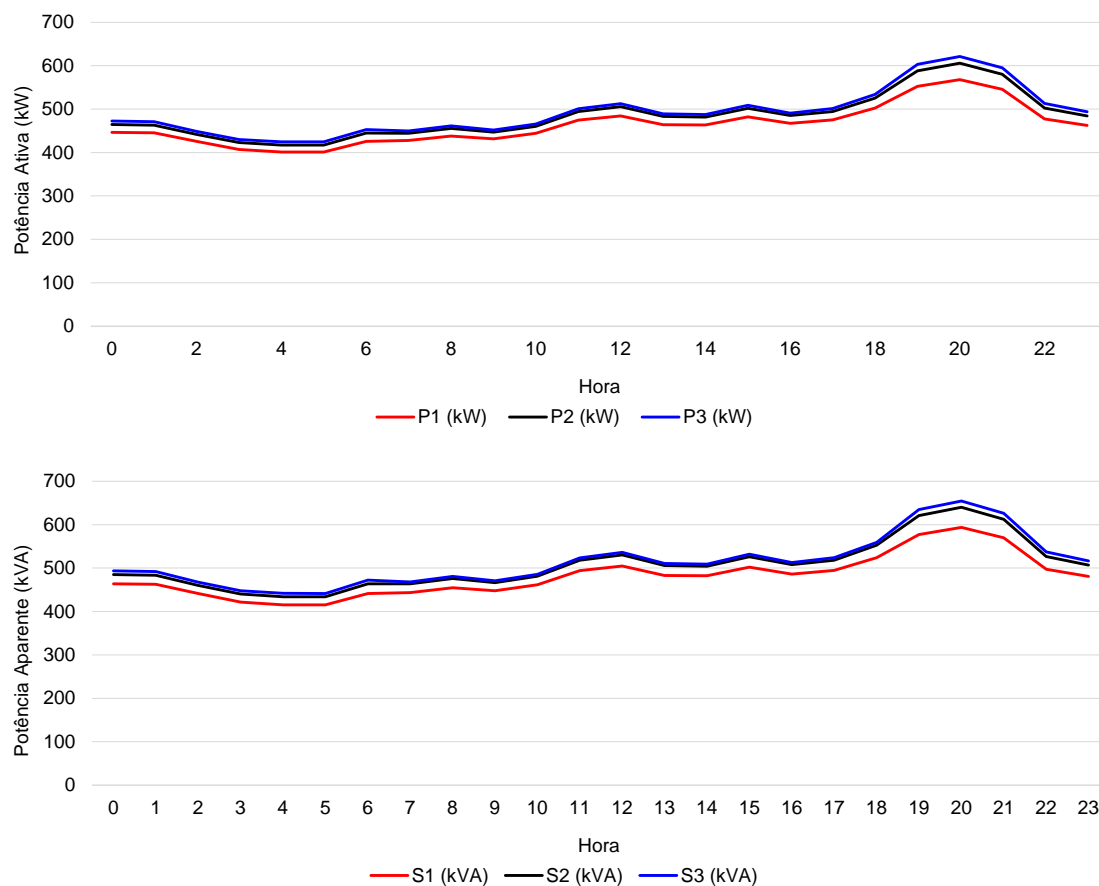
Figura 5.5 - Tensão e corrente - Saída do AL TQR-CT1 sem GDFV



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 5.6, tem-se as potências ativa e aparente na saída do alimentador e, nesse caso, percebe-se uma fraca influência da GDFV. A curva de carga resultante segue o perfil característico da carga industrial existente no alimentador. Há um aumento da potência solicitada por conta da curva de carga dos consumidores residenciais e rurais.

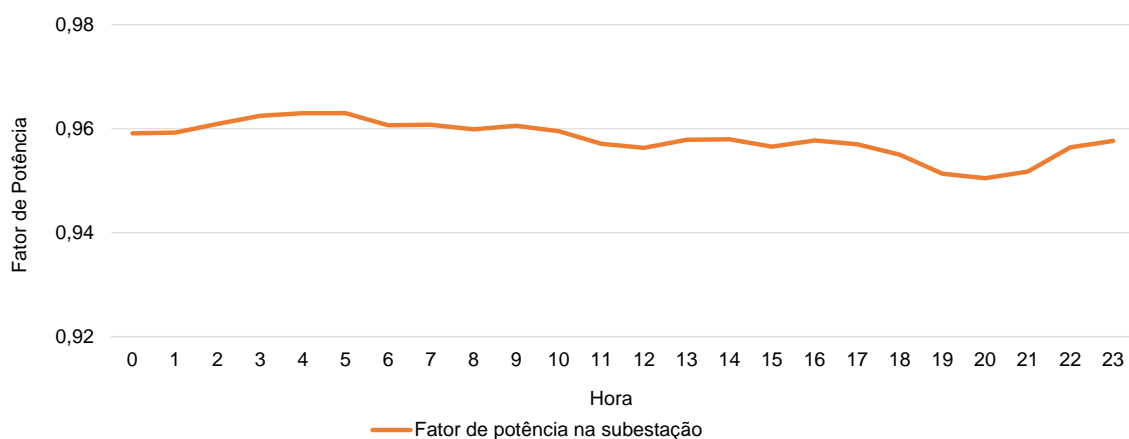
Figura 5.6 - Potência ativa e aparente - Saída do AL sem GDFV



Fonte: Elaboração própria

O fator de potência na saída do alimentador tem um comportamento constante e em quase todo o período ficou próximo a 0,96, como mostrado na Figura 5.7.

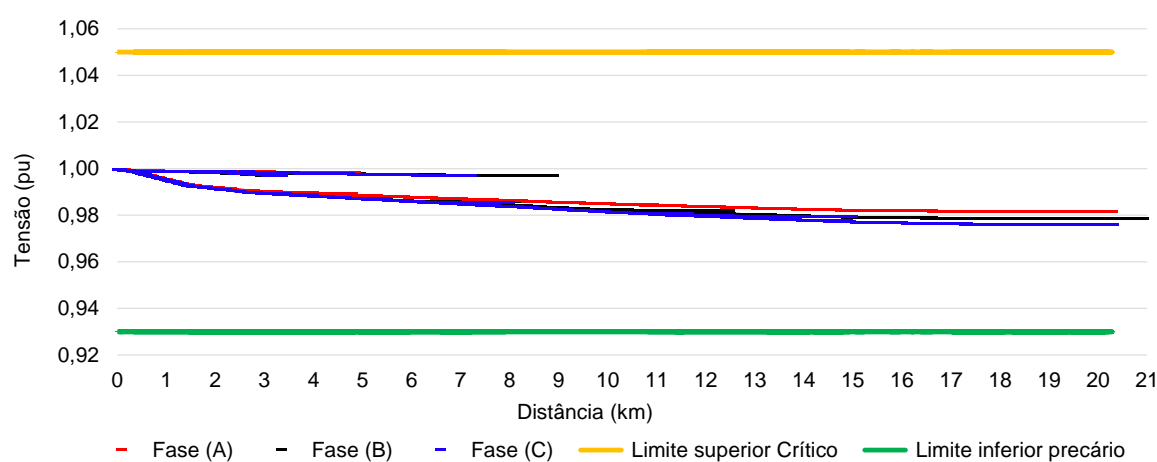
Figura 5.7 - Fator de Potência Saída do AL sem GDFV



Fonte: Elaboração própria

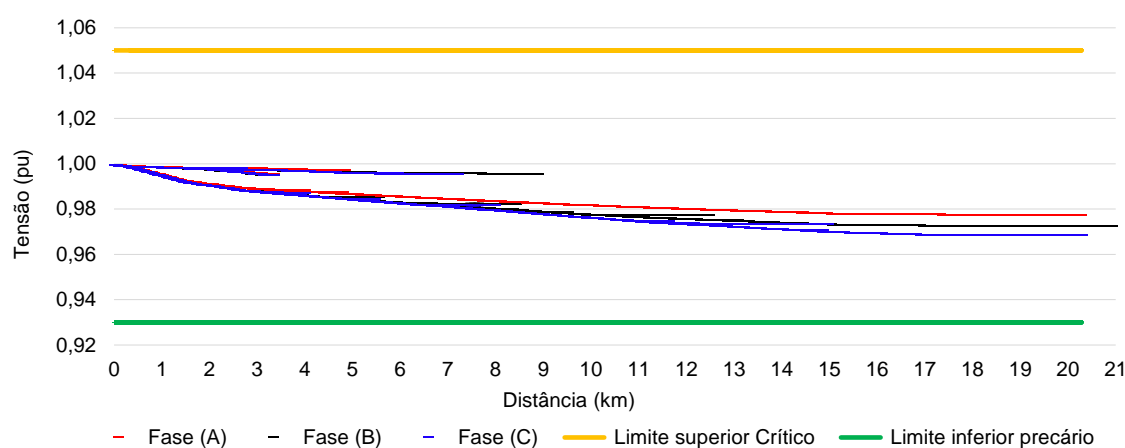
Na Figura 5.8 e Figura 5.9 é realizada uma avaliação através do OPENDESS, em que se relaciona o perfil de tensão em valores por unidade (pu) ao longo do alimentador. Percebe-se que, sem a presença de GDFVs, o perfil da tensão segue a influência da carga dos consumidores. Conforme Figura 5.9, no horário das 20h há um aumento na queda na tensão, relacionado ao aumento da carga característica desse horário.

Figura 5.8 - Perfil de tensão no AL às 13h sem GDFV



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.9 - Perfil de tensão no AL às 20h sem GDFV



Fonte: Elaboração própria

5.1.1 Discussão sobre o cenário i – sem GDFV no sistema

Nesse cenário, pode-se observar no alimentador apenas os efeitos das próprias cargas relacionadas ao sistema. Destaca-se que não foram observadas transgressões nos níveis de tensão nem na baixa tensão quanto na média tensão. Além disso, o fator de potência na saída do alimentador encontra-se na faixa recomendada e em torno de 0,96.

A curva de carga do alimentador tem predominância industrial. Apesar de ser em número de UCs, tipicamente residencial e rural, possui uma grande indústria, fazendo que a curva de cargas característica seja industrial.

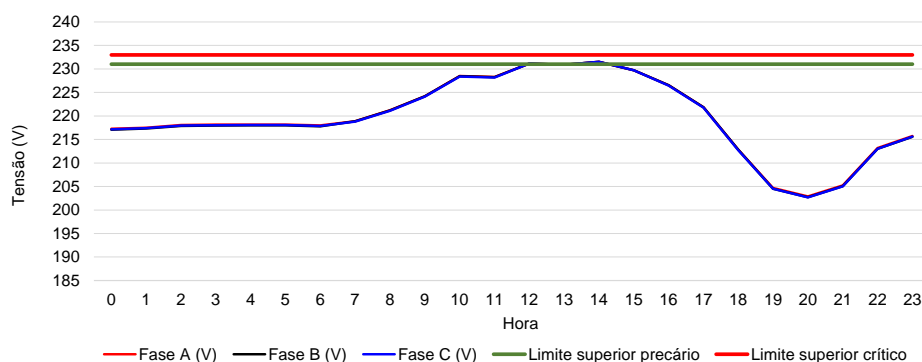
5.2 CENÁRIO II - ATUAL (3,5%).

No cenário II, a simulação se deu considerando a inserção das GDFVs reais que estão operando atualmente no alimentador.

O objetivo nesse cenário é observar o comportamento do alimentador com um baixo nível de penetração de GDFVs de forma geral no alimentador. Além disso, avalia-se o circuito de baixa tensão do transformador 60947, em que há duas GDFVs instaladas, as quais foram objetos de medição real com registrador de grandezas.

Na Figura 5.10 observa-se o efeito da GDFV no período entre 8h e 17h, período de geração de energia das GDFVs. Observa-se que no período de maior geração a tensão ultrapassa os 230V, o que coloca o circuito de baixa tensão em transgressão aos níveis precários, de acordo com o PRODIST módulo 8.

Figura 5.10 - Análise no PAC da UC X - Com GDFV



Fonte: Elaboração própria

A Figura 5.11 e Figura 5.12 mostram os níveis de tensão e corrente na saída do transformador 60947. É possível relacionar o aumento de tensão em função do aumento da operação da GDFV, assim como a diminuição das correntes absorvidas pelo transformador no mesmo período. No entanto, para esse nível de penetração, acaba sendo benéfico ao circuito de baixa tensão, visto que não há violações de DRP e DRC e acaba anulando pequenas quedas de tensão nos circuitos.

Na Tabela 5.2 mostra-se os valores a serem compensados em uma simulação com irradiância máxima, na mesma GDFV, em que valores foram simulados considerando UCs com valores de Encargo de Uso do Sistema de Distribuição (EUSD) diferenciados, com o objetivo de se ter uma avaliação financeira do impacto das compensações, considerando-se diferentes tarifas dos consumidores para uma mesma violação de tensão.

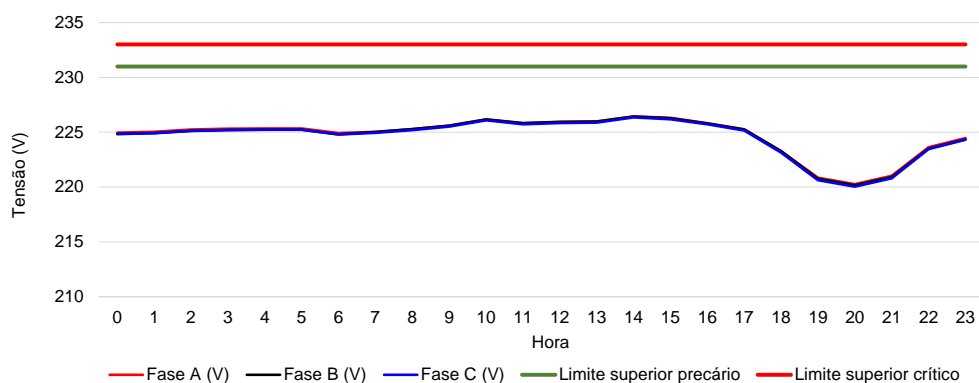
Mesmo com o DRP e DRC mantidos, verifica-se que os valores financeiros são elevados devido às violações por DRC se sobressaírem na análise, e que provavelmente coloca mais UCs em situação de compensação financeira, devido a tornar mais trechos dos circuitos de baixa tensão em níveis críticos ou precários.

Tabela 5.2 - Valores simulados de compensação de acordo com o EUSD

Tipo	Caso	DRP %	DRC %	K1	K2	EUSD	Comp.
BT	1	6,94	25,69	3	7	19,56	36,8
BT	2	6,94	25,69	3	7	195,6	368
BT	3	6,94	25,69	3	7	1956	3680,21

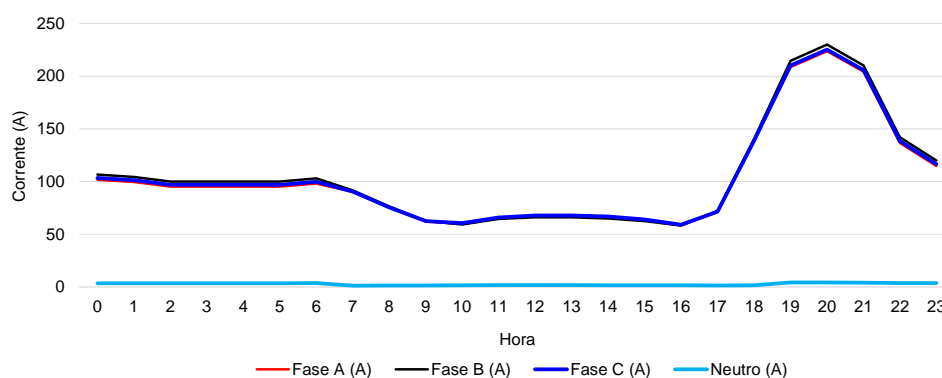
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.11 - Tensão na BT do transformador 60947 com GDFV (3,5%).



Fonte: Elaboração própria

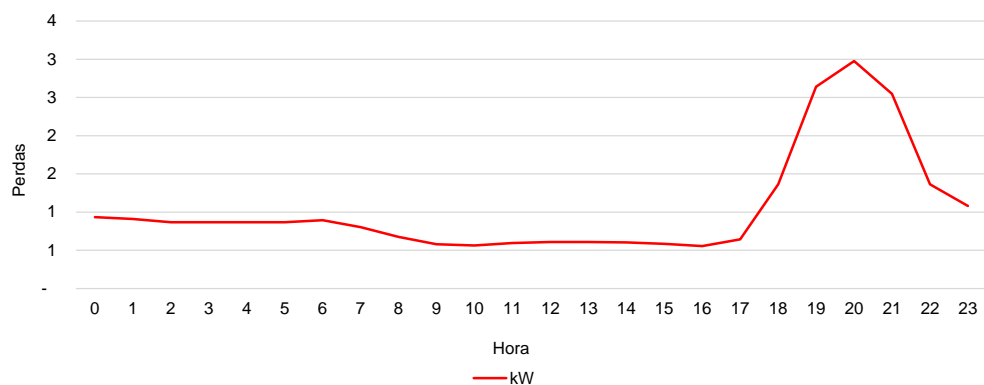
Figura 5.12 - Corrente na BT do transformador 60947 com GDFV (3,5%)



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 5.13 é verificado que, no período de operação da GDFV, há uma diminuição das perdas relacionadas à baixa tensão.

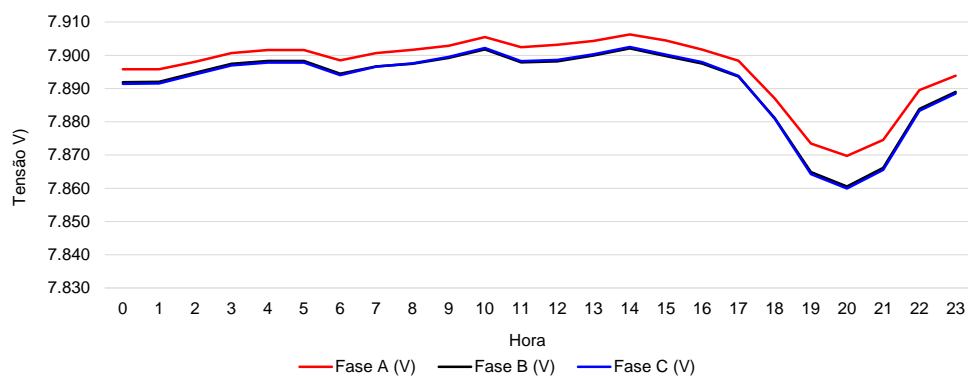
Figura 5.13 - Perdas no transformador 60947 - (3,5%)



Fonte: Elaboração própria

Pode ser observado na Figura 5.14 que as tensões na média tensão (PAC da conexão do transformador 60947) sofrem pouca influência no período de geração.

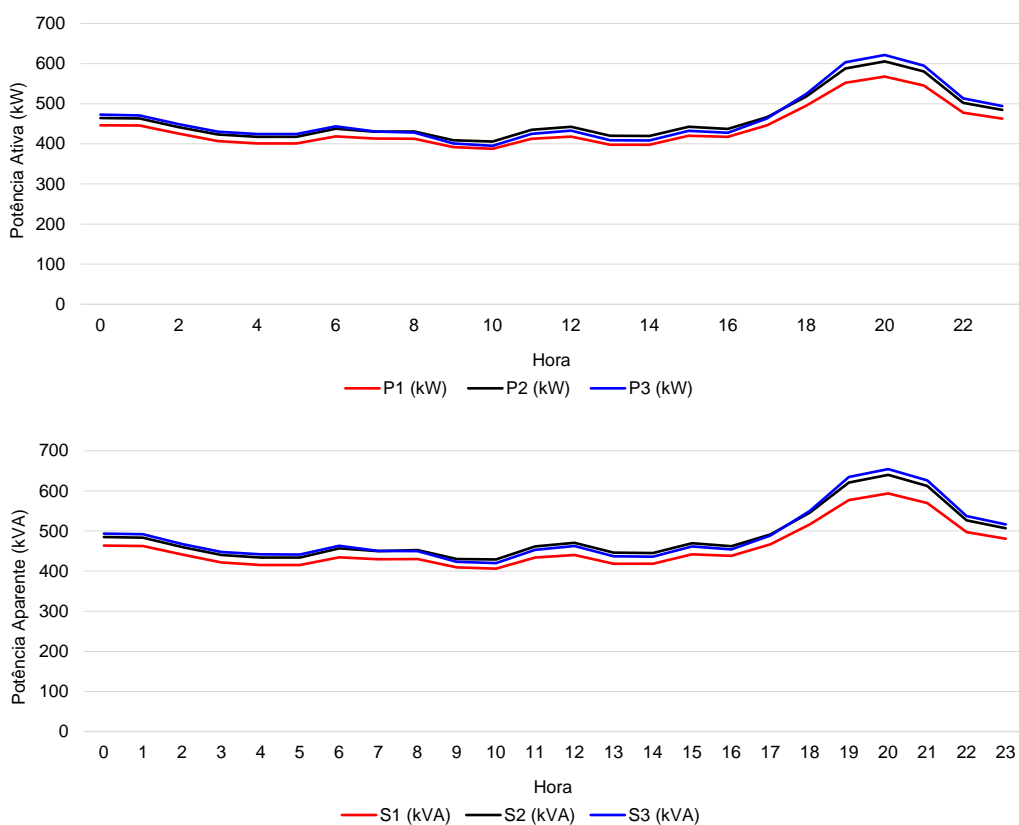
Figura 5.14 - Tensões na entrada de MT do TR 60947 (3,5%)



Fonte: Elaboração própria

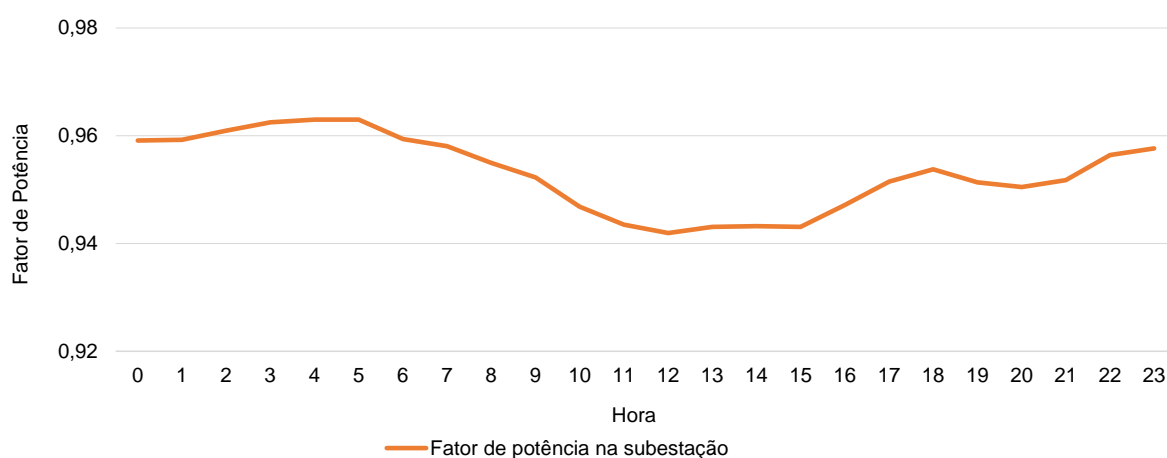
Em relação à saída do alimentador, na Figura 5.15 e Figura 5.16 mostra-se as variações de potência ativa, aparente e fator de potência respectivamente.

Figura 5.15 – Potência ativa e aparente - Saída do AL - TQR-CT1 (3,5%)



Fonte: Elaboração própria

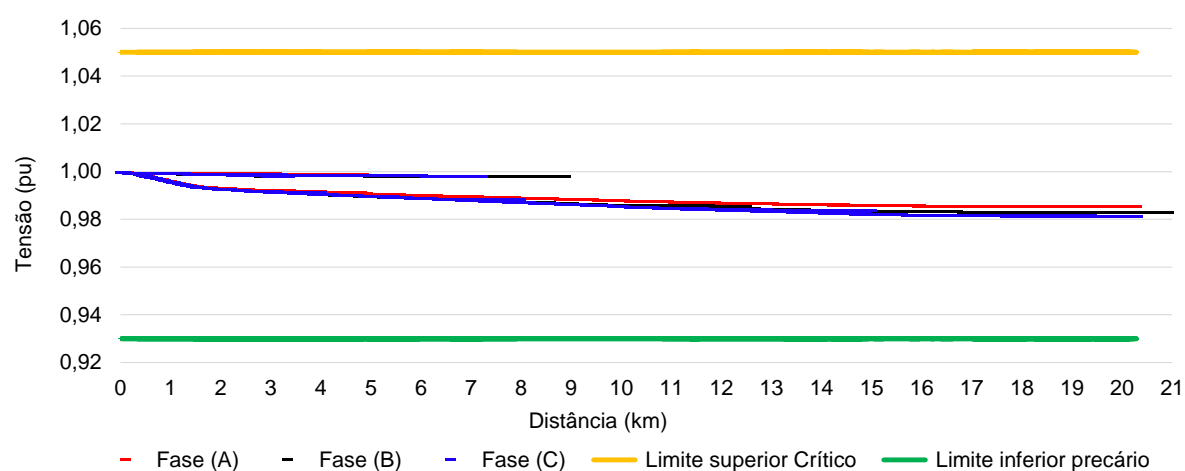
Figura 5.16 - Fator de potência na subestação (3,5%)



Fonte: Elaboração própria

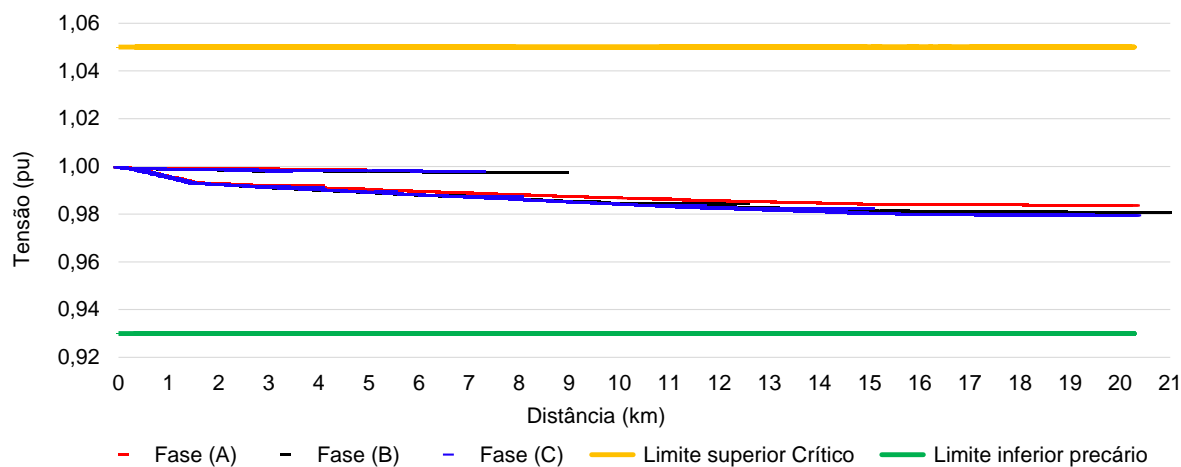
Na Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19 percebe-se o perfil de tensão ao longo do alimentador com a presença de GDFVs. Nessa condição a tensão segue a influência da curva de carga dos consumidores. Às 20h há uma pequena queda na tensão, relacionada ao aumento da carga característica desse horário.

Figura 5.17 - Perfil de tensão no AL às 9h (3,5%)



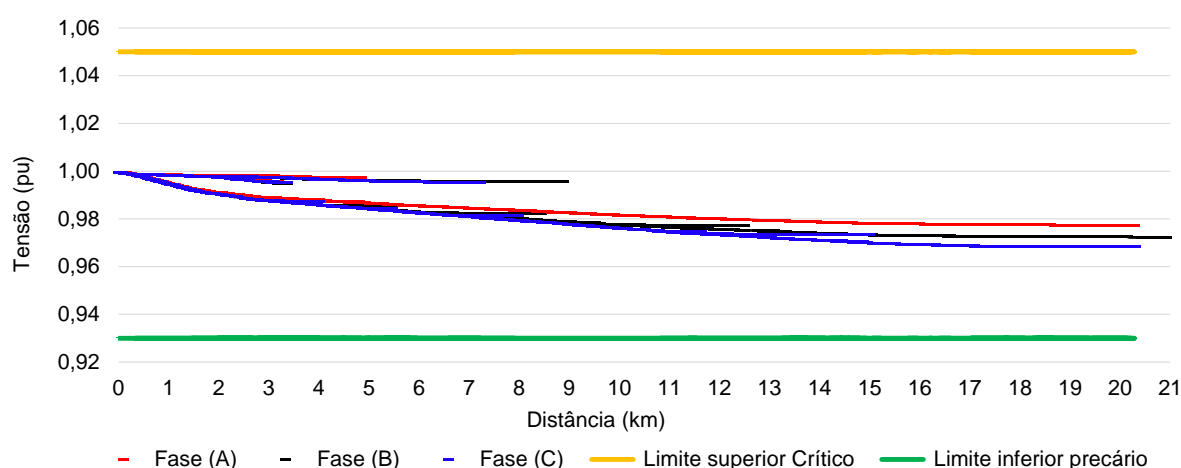
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.18 - Perfil de tensão no AL às 13h (3,5%)



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.19 - Perfil de tensão no AL às 20h (3,5%)



5.2.1 Discussão cenário ii – GDFVS que atualmente estão no alimentador

No cenário II, todas as potências das simulações, tanto das UCS quanto das GDFVs são as que de fato estão no sistema, é uma pequena inserção de GDFVs. Nesse cenário observa-se que, em geral, as GDFVs são benéficas aos sistemas de baixa tensão, em virtude de não ser o suficiente para causar violações dos níveis precários e críticos de tensão e contribuem para minimizar quedas de tensão nos circuitos de baixa tensão.

Nesse cenário, as GDFVs não trouxeram prejuízos ao alimentador como um todo.

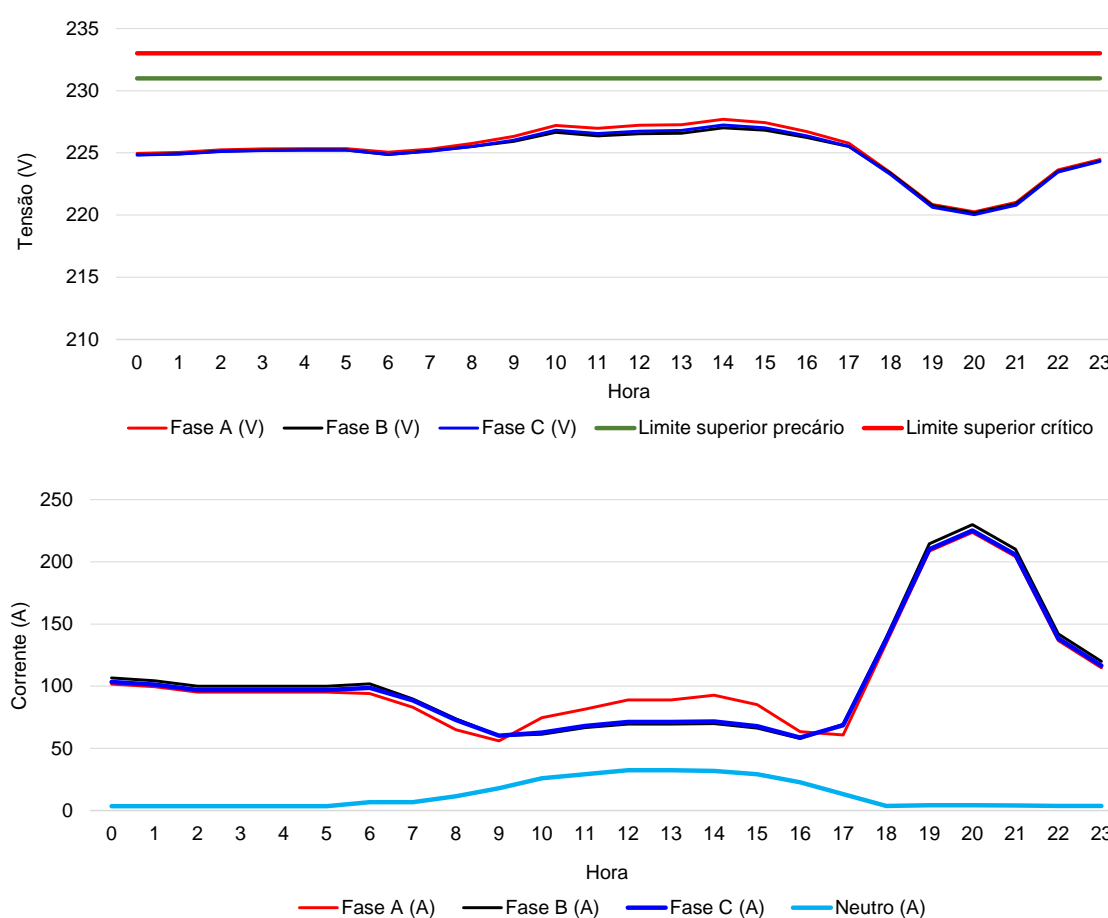
Na média tensão praticamente não há influência com esse nível de penetração de GDFVs.

5.3 CENÁRIO III – 15% DE UCS COM GDFV

No cenário III foi considerada a penetração em 15% das UCs com GDFV. O objetivo desse cenário é avaliar os impactos a nível de alimentador de MT, assim como os efeitos em um transformador com um médio número de GDFVs instalados nos circuitos.

Na Figura 5.20 percebe-se que a influência das GDs, apesar de ocasionar uma elevação na tensão do transformador, não chega a ter impactos negativos. Percebe-se ainda que há uma corrente de neutro, que nesse caso está associada a uma maior penetração de GDFVs na fase C.

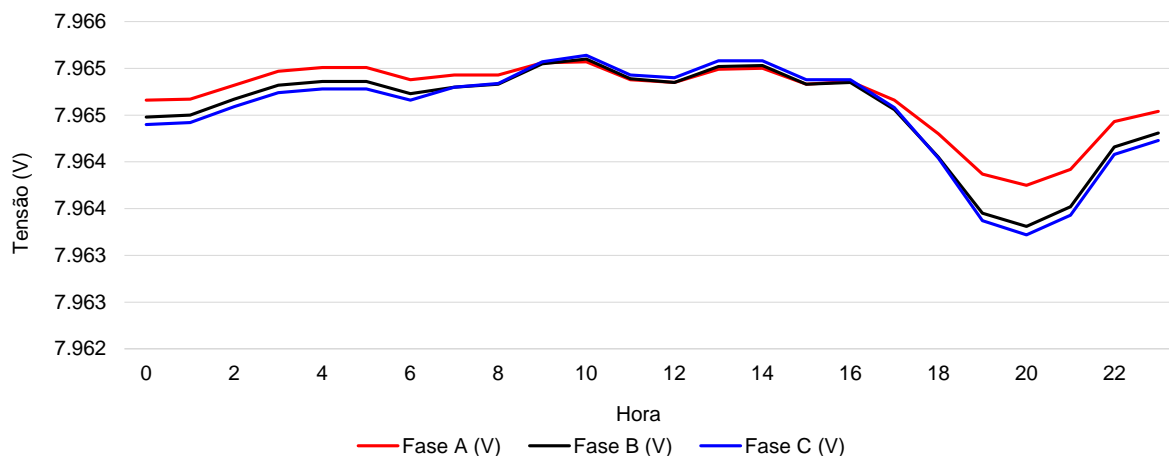
Figura 5.20 - Tensão e corrente - Transformador 60947 (15%)



Fonte: Elaboração própria

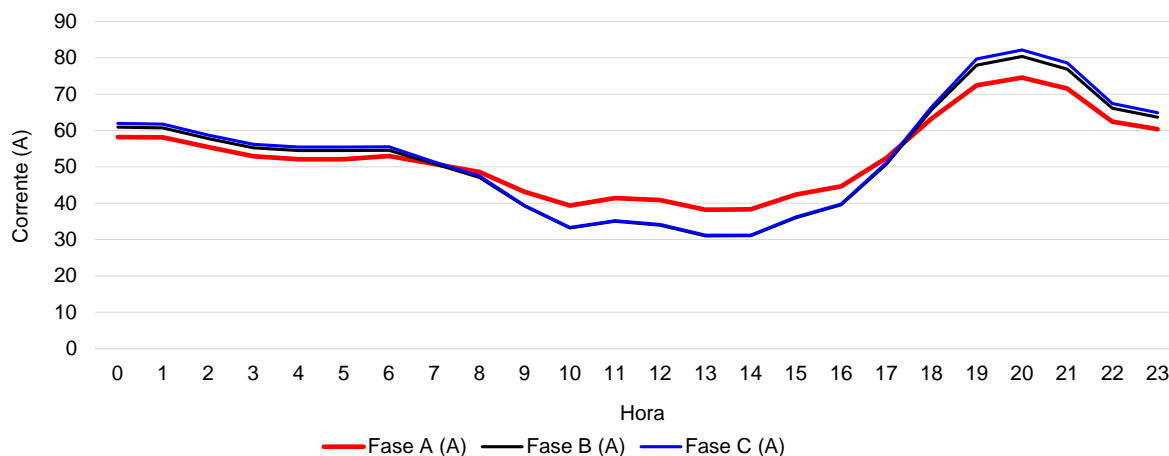
Nas Figura 5.21 e Figura 5.22 são mostradas as tensões e correntes para o caso de uma inserção de 15 % de GDFVs.

Figura 5.21 - Tensão na saída do alimentador (15%)



Fonte: Elaboração própria

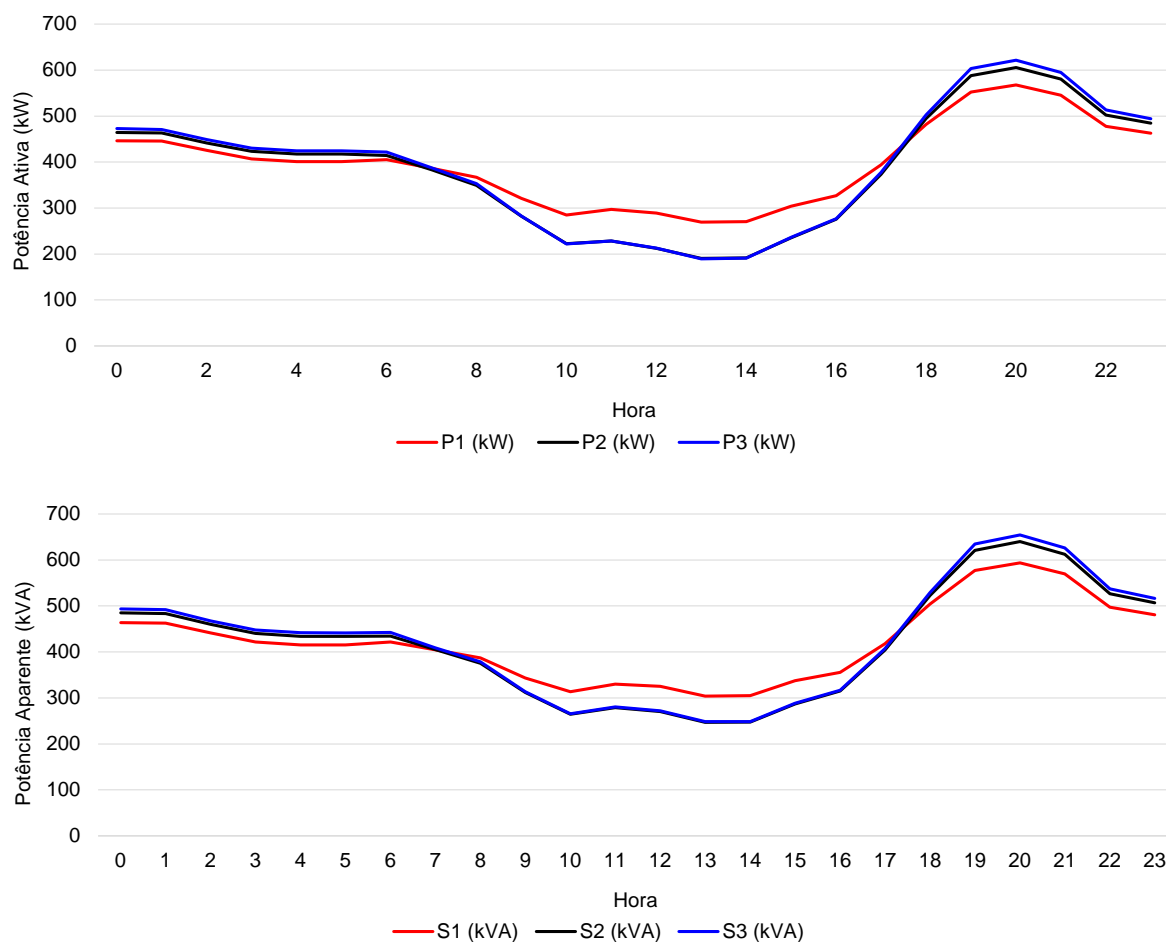
Figura 5.22 - Corrente na saída do alimentador (15%)



Fonte: Elaboração própria

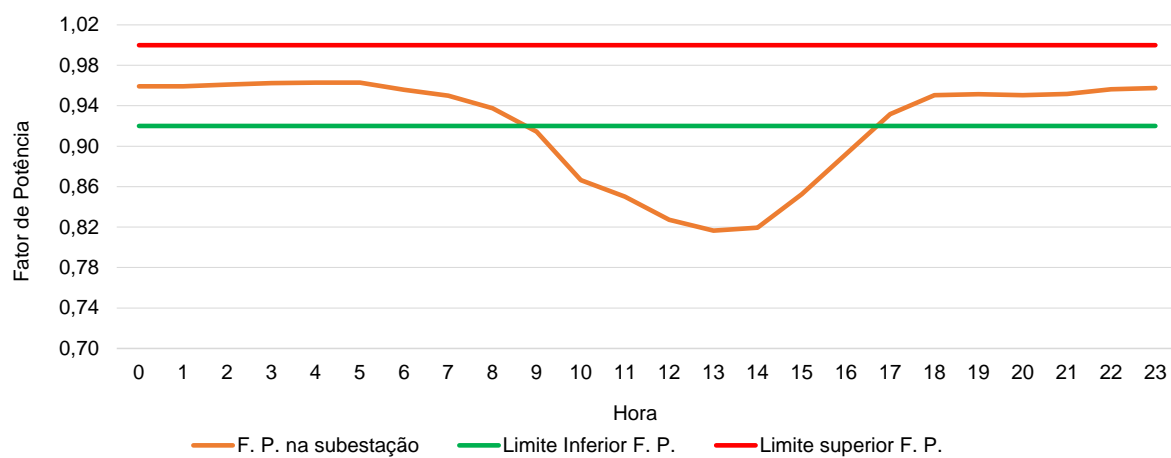
Nas Figura 5.23 e Figura 5.24 são apresentadas as potências ativa e aparente do alimentador, assim como o fator de potência. Para esse nível de penetração, ocorre um alívio de cargas nos alimentadores, no período de maior geração das GDFVs.

Figura 5.23 - Potência ativa e aparente - saída do alimentador (15%)



Fonte: Elaboração própria

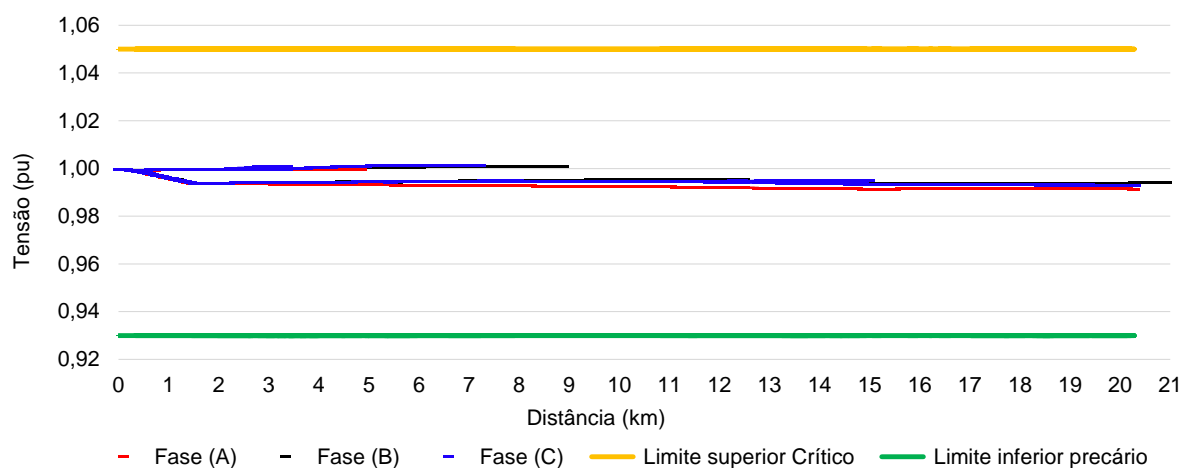
Figura 5.24 - Fator de potência - saída do alimentador (15%)



Fonte: Elaboração própria

Nas Figura 5.25 mostra-se o perfil de tensão do alimentador. Percebe-se que, com esse nível de penetração no período de grande geração, às 13h, os níveis de tensão permanecem em torno de 1 pu, o que acaba sendo benéfico ao alimentador de média tensão.

Figura 5.25 - Perfil de tensão no AL às 13h (15%)



Fonte: Elaboração própria

Observa-se que as GDFVs são benéficas ao sistema de média tensão, em virtude de não ser o suficiente para haver violações de níveis precários e críticos de tensão e contribuindo para o alívio de potência no período de geração, diminuindo a corrente do circuito.

Para o fator de potência, percebe-se influência no alimentador nos momentos de maior geração das GDFVs. Nesses momentos há a necessidade de compensação de reativos no sistema.

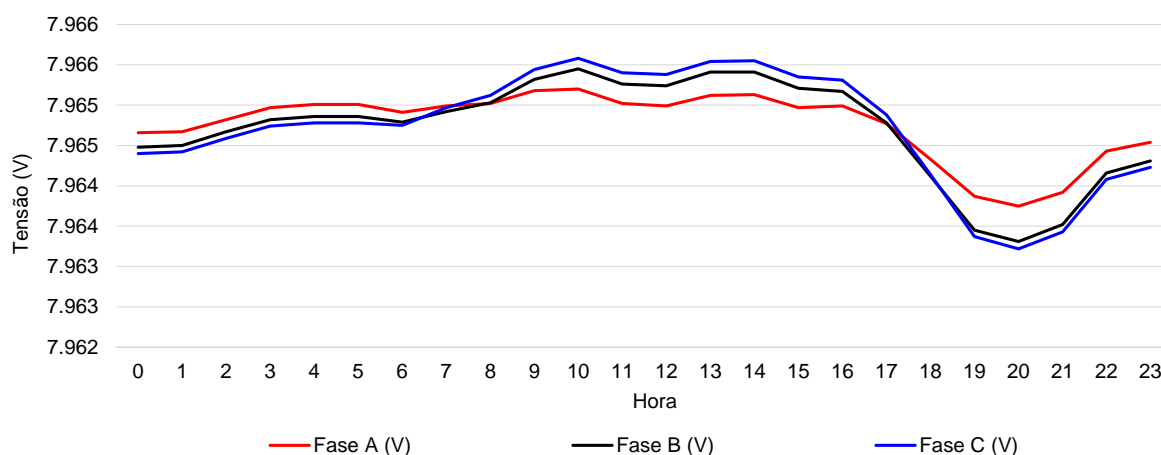
5.4 CENÁRIO IV – 30% DE UCS COM GDFV

No cenário IV foi considerada a penetração em 30% das UCs com GDFV, sendo a energia gerada ao longo do mês corresponde a 35% da que é solicitada pelo alimentador.

Na saída do alimentador pode-se verificar que, pela Figura 5.26, as tensões não são impactadas significativamente. A Figura 5.27 mostra que os valores de

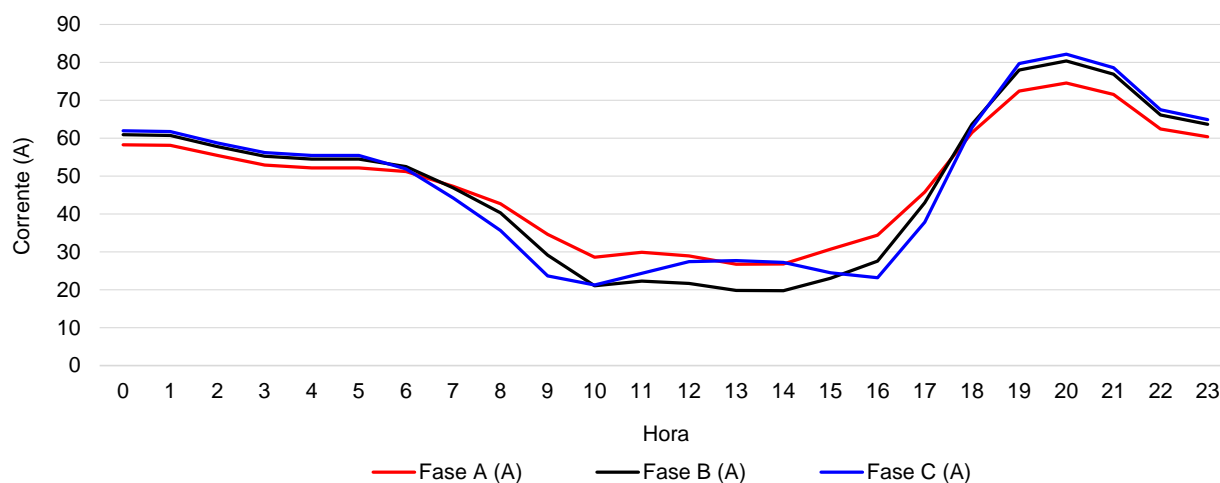
corrente nos períodos de geração acabam sendo bem reduzidos, o que de certa forma alivia o carregamento dos condutores.

Figura 5.26 - Tensão - Saída do alimentador (30%)



Fonte: Elaboração própria

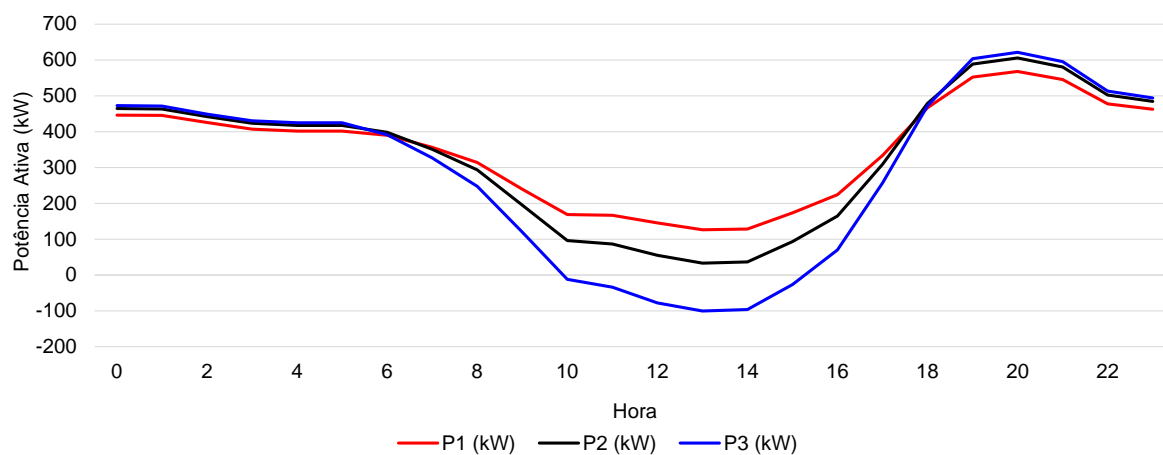
Figura 5.27 - Corrente - Saída do alimentador (30%)



Fonte: Elaboração própria

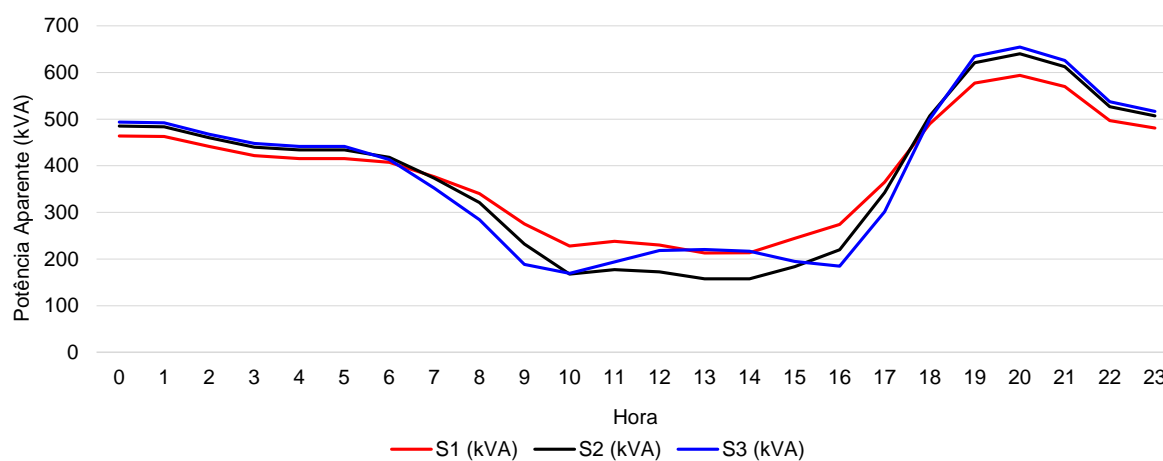
Na Figura 5.28 pode-se verificar que já há uma inversão do fluxo de potência para a fase C. Esse efeito se deve ao fato de o alimentador conter ramais rurais, o que tem características de atendimento em sistemas MRT. Na Figura 5.29 pode-se verificar um alívio como um todo no carregamento do alimentador no período de geração.

Figura 5.28 - Potência Ativa na saída do alimentador (30%)



Fonte: Elaboração própria

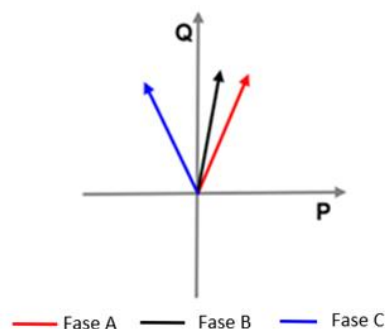
Figura 5.29 - Potência Aparente na saída do alimentador (30%)



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 5.30 é demonstrada a potência das fases para as X horas em razão da inversão da potência ativa em uma das fases. O ângulo do fator de potência também se torna negativo, segundo a definição do IEC.

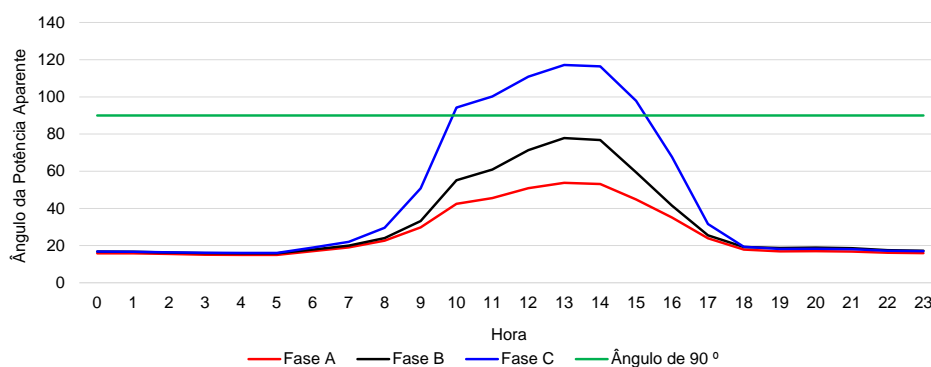
Figura 5.30 - Demonstração do ângulo do FP



Fonte: Elaboração própria

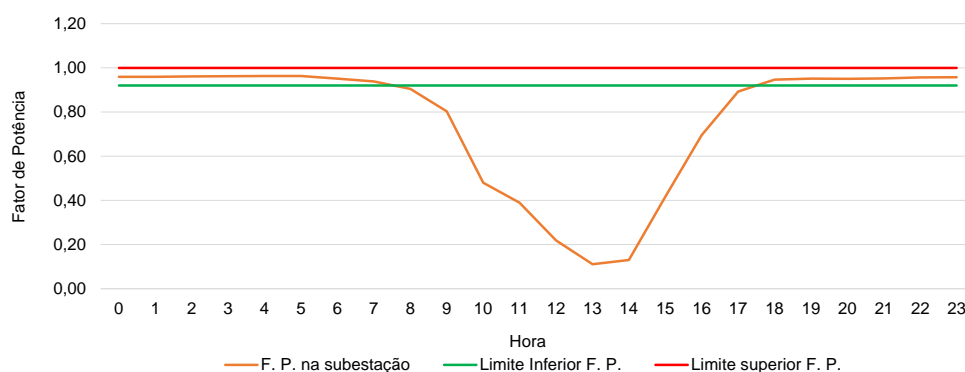
Na Figura 5.31 está ilustrado em um período de 24 horas o comportamento do ângulo da potência aparente. Nesse caso, pode-se observar que na fase “C” do circuito houve inversão de fluxo de potência.

Figura 5.31 - Ângulo da potência Aparente na SE (30%)



Fonte: Elaboração própria

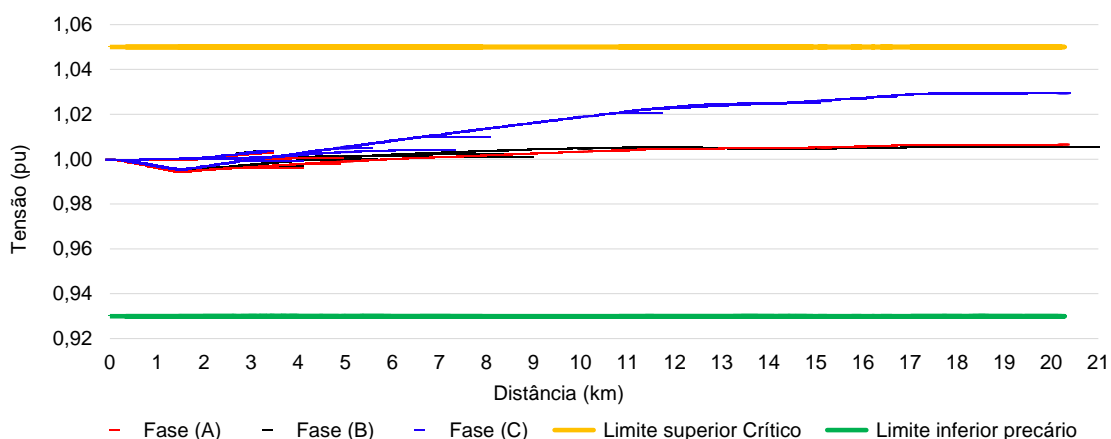
Figura 5.32 - Fator de potência médio da subestação (30%)



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 5.33 pode-se verificar o perfil de tensão ao longo do alimentador às 13h, em uma condição de alta penetração das GDFVs.

Figura 5.33 - Perfil de tensão no AL às 13:00h (30%)



Fonte: Elaboração própria

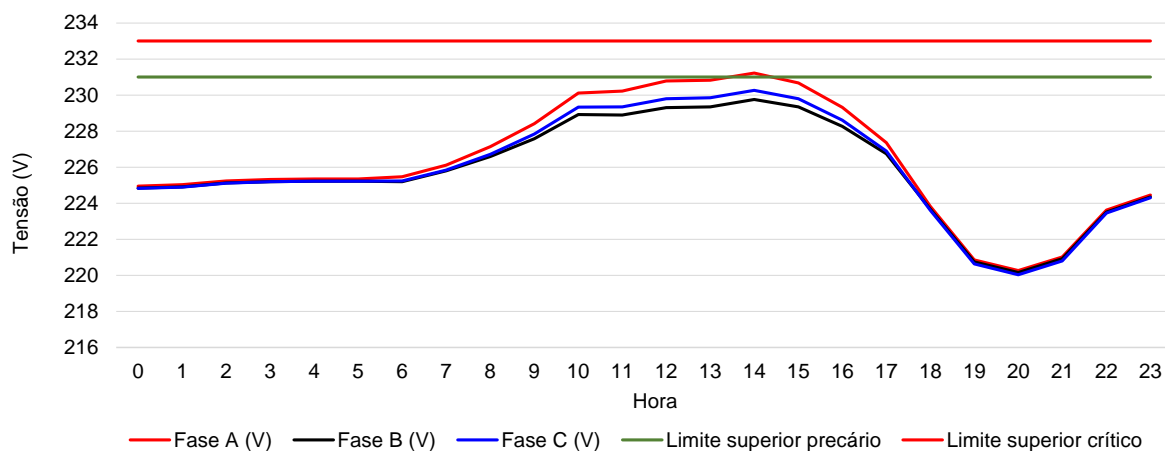
No cenário IV foram adicionadas, aleatoriamente, GDFVs em 30% das UCs do alimentador. Observa-se que as GDFVs começam a trazer problemas ao sistema de média tensão, principalmente para o fator de potência, o que deve ser mitigado com compensação dinâmica de reativos, despachados nos momentos de maior geração das GDFVs.

5.5 CENÁRIO V - 50% DE UCS COM GDFV

No cenário IV, a avaliação ocorreu considerando a penetração em 50% das UCs com GDFV.

Na Figura 5.34 e Figura 5.35 são apresentadas respectivamente as medidas de tensão e corrente para o transformador 60947.

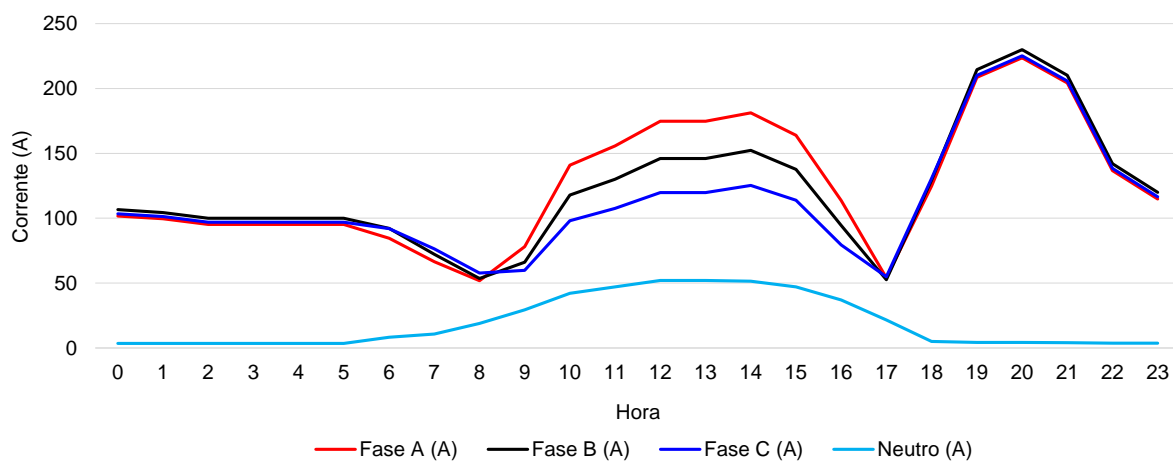
Figura 5.34 - Tensão secundária no transformador 60947 (50%)



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 5.35 percebe-se que a corrente aumenta no período de geração, o que pode causar a superação dos limites do transformador, ocorrendo perda da vida útil deste equipamento.

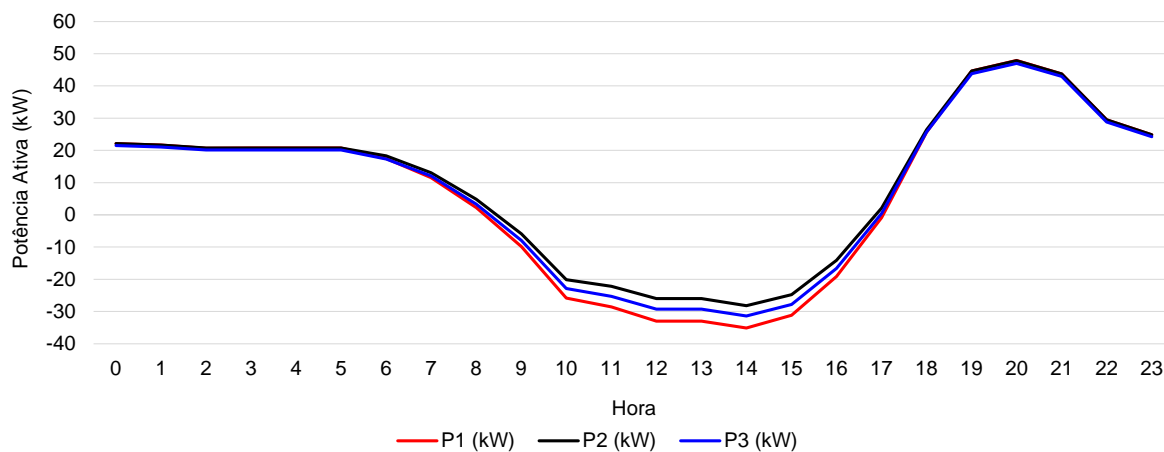
Figura 5.35 - Corrente no transformador 60947 (50%)



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 5.36 pode ser avaliado o fluxo reverso no transformador.

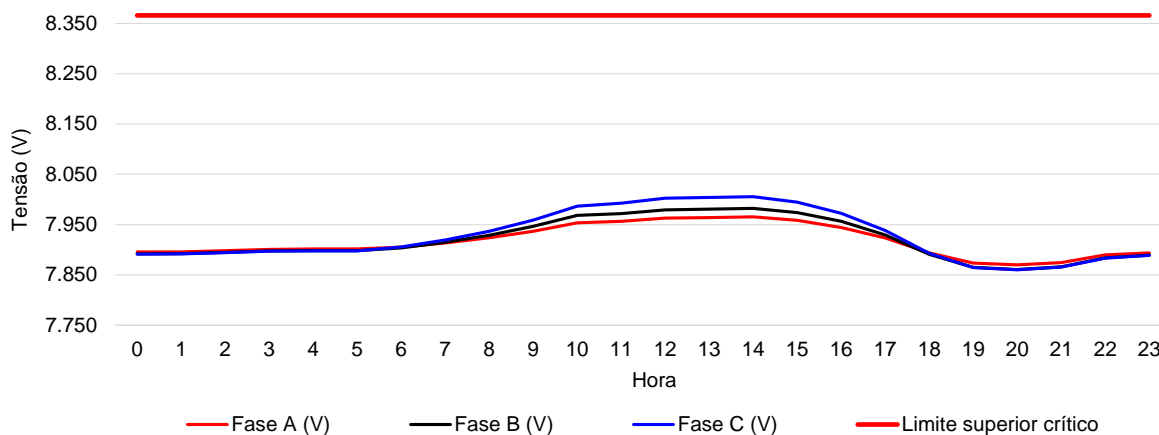
Figura 5.36 - Potência ativa transformador 60947 (50%)



Fonte: Elaboração própria

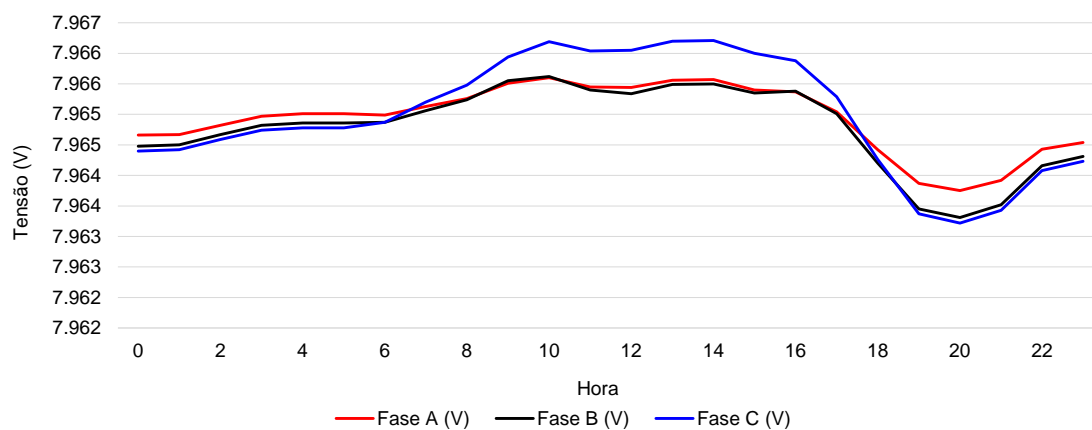
Na Figura 5.37 é possível observar que há um aumento de tensão na entrada do transformador 60947, o que pode influenciar em equipamentos a montante e jusante deste.

Figura 5.37 - Tensão primária no transformador 60947 (50%)



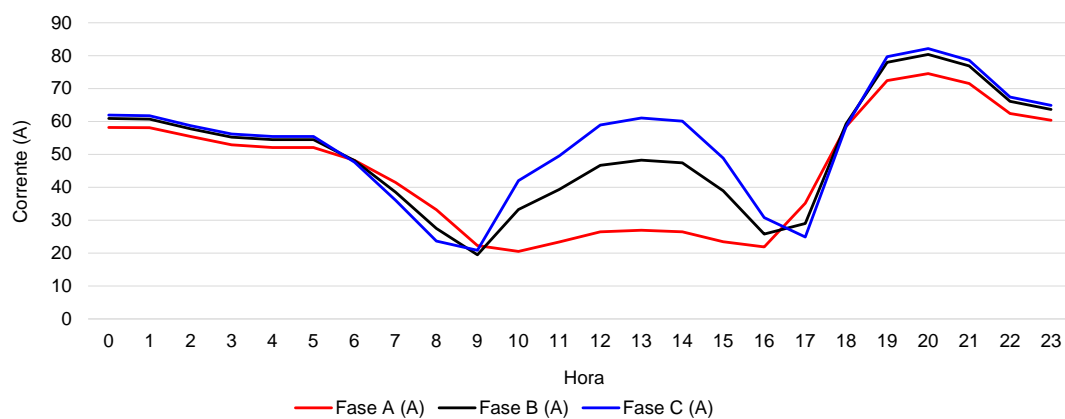
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.38 - Tensão na saída do alimentador (50%)



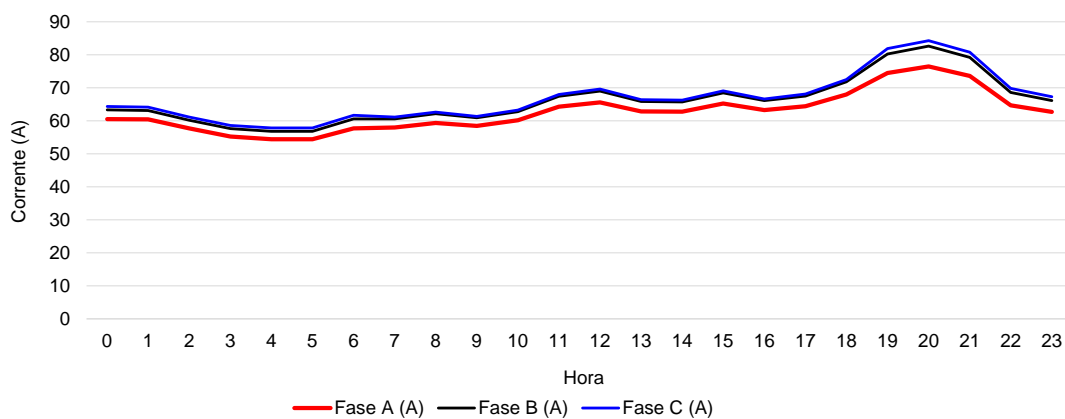
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.39 - Corrente na saída do alimentador (50%)



Fonte: Elaboração própria

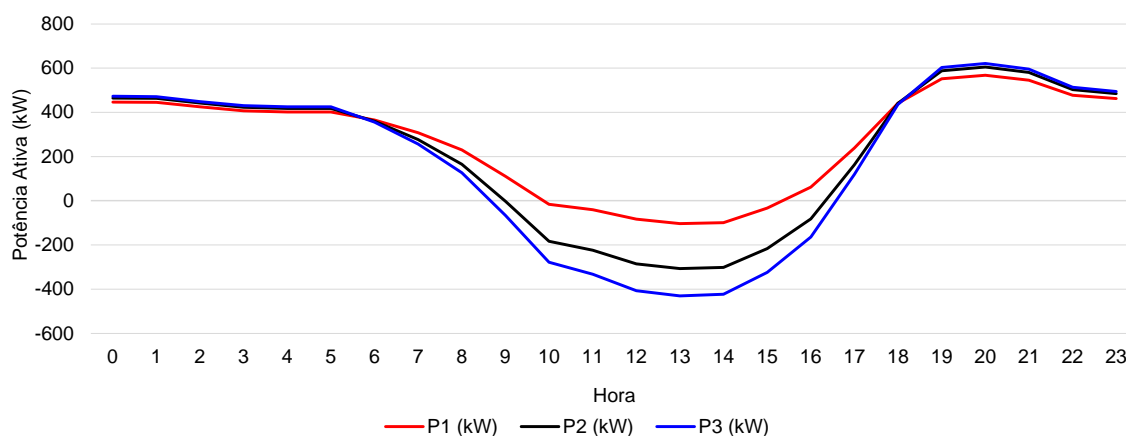
Figura 5.40 - Corrente na saída do alimentador (Sem GDFV)



Fonte: Elaboração própria

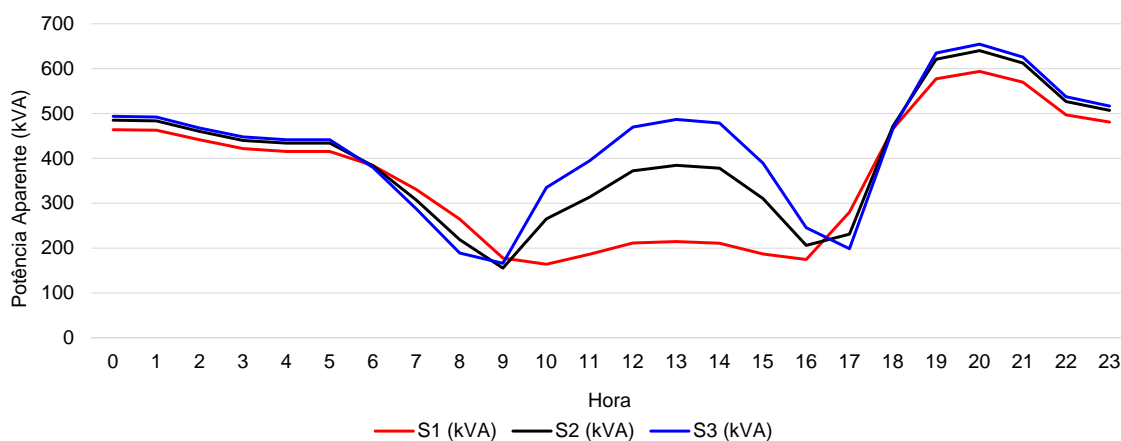
Na Figura 5.39 e Figura 5.40 têm-se um comparativo relacionado ao comportamento da corrente na saída do alimentador, onde há um alívio no carregamento no início do período de geração, passando a ter grande carregamento em período de forte geração de GDFV.

Figura 5.41 - Potência Ativa na saída do alimentador (50%)



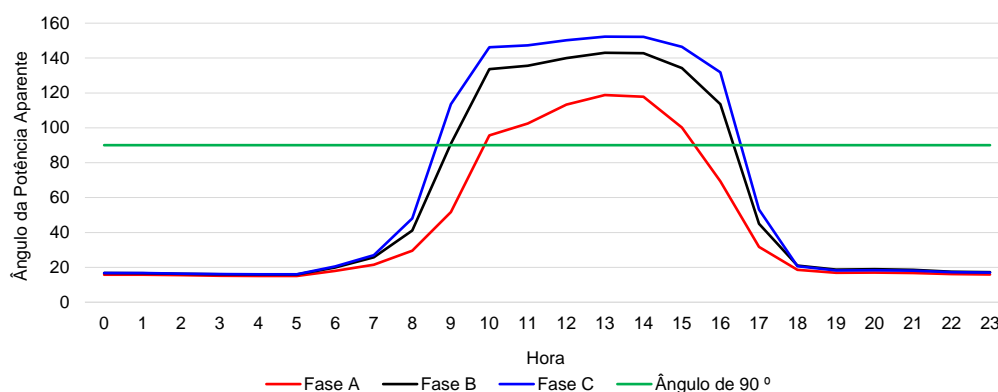
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.42 - Potência Aparente na saída do alimentador (50%)



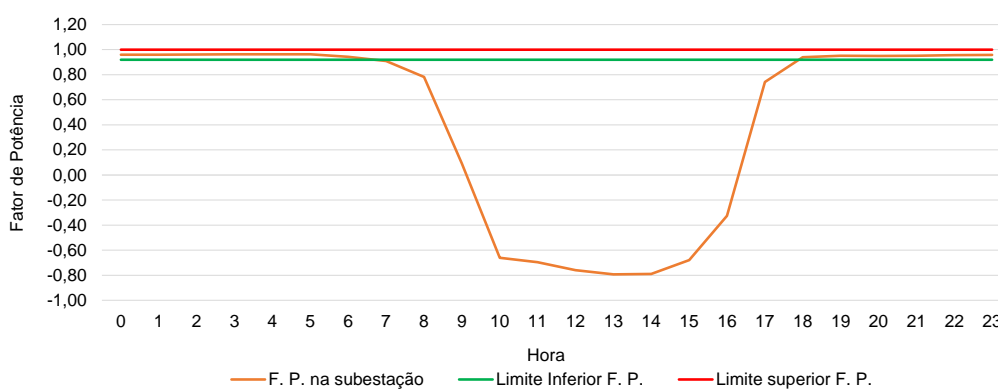
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.43 - Ângulo da Potência Aparente na saída do alimentador (50%)



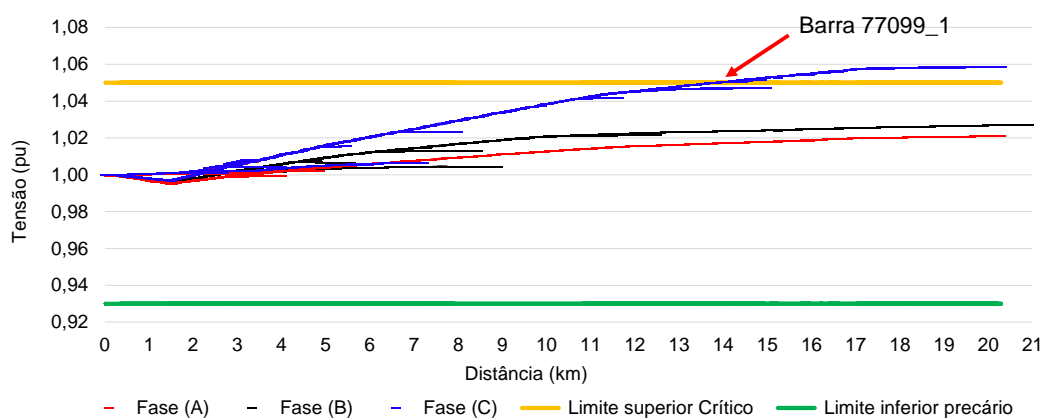
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.44 - Fator de potência na subestação



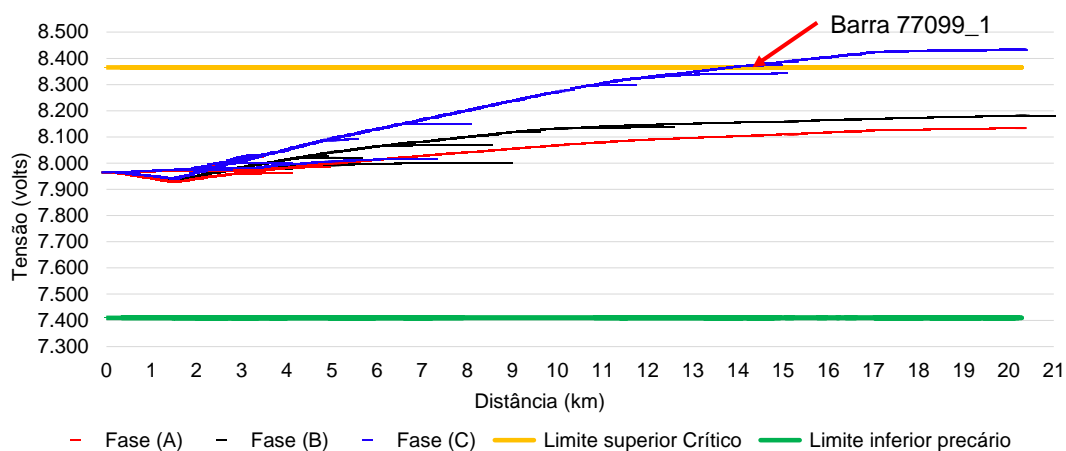
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.45 - Perfil de tensão (pu) no AL às 13h (50%)



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.46 - Perfil de tensão (volts) no AL às 13h (50%)



Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.3 - Informações da barra MT77099_1 – OpenDSS

Report - OpenDSS	
Barra 1	77098_1
Barra21	77099_1
Distancia da Subestação	13,845 km
Fluxo de potência	- 70,5 kW + j 50,11 kVAr
Tensão fase "A" (volts)	8.103
Tensão fase "B" (volts)	8.155
Tensão fase "C" (volts)	8.366

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 5.45 e Figura 5.46 pode-se avaliar o perfil de tensão em pu e em volts. Destaca-se a barra 77099_1, a qual é a primeira a sofrer violação dos níveis de tensão à medida que há afastamento da subestação.

Pode-se verificar na Tabela 5.3 os valores em volts, sendo que a fase C supera os limites do PRODIST, o que é explicado pelo grande número de redes monofásicas nesse alimentador.

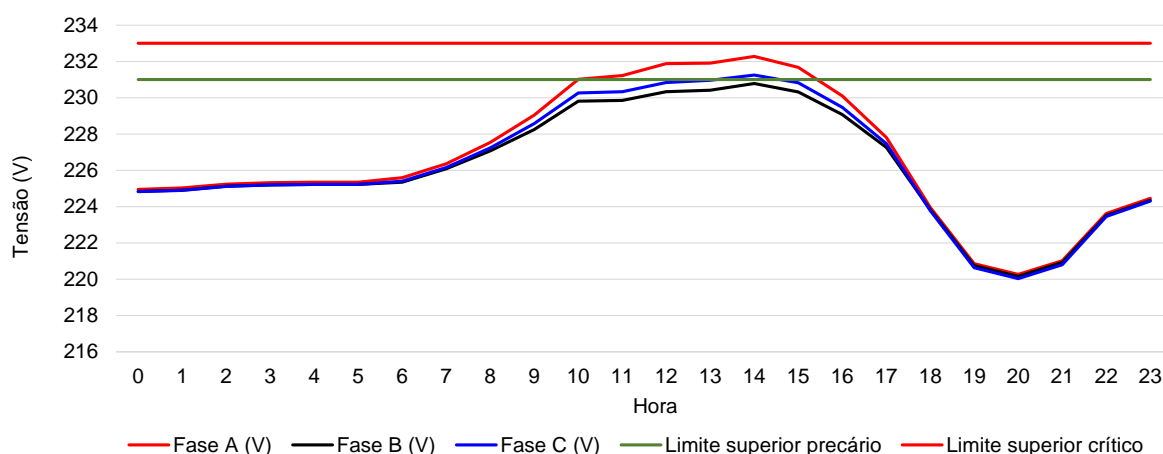
No cenário V, a inserção de GDFVs já é considerada massiva, sendo que já se percebe violações no sistema nos perfis de baixa e média tensão. Isso deve ser ajustado ao longo do alimentador com algum método para mitigar o problema, normalmente com regulador de tensão.

O fator de potência no perfil de alta geração necessita de controle, o que deve ser realizado com compensação de reativos dinamicamente.

5.6 CENÁRIO VI - 70% DE UCS COM GDFV

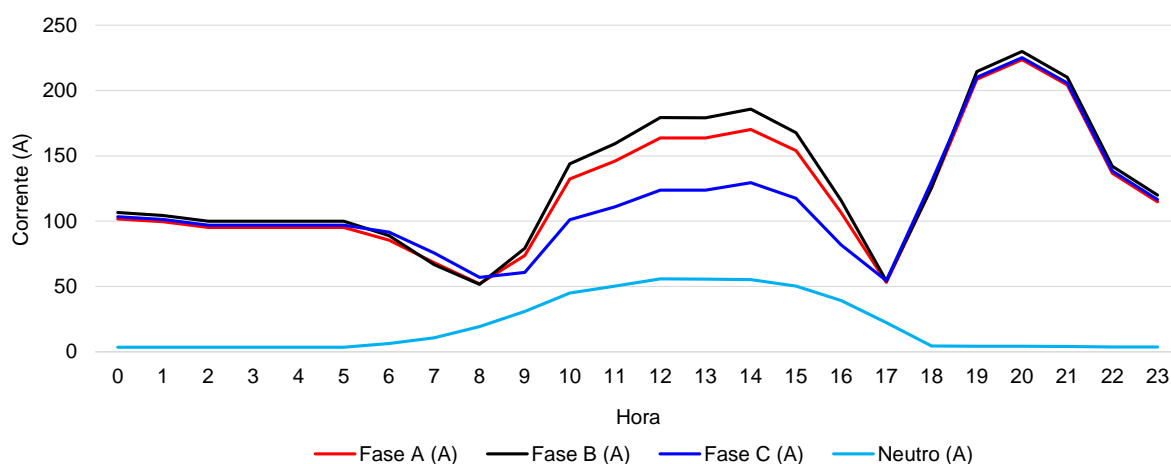
No cenário VI, a avaliação foi considerando a penetração em 70% das UCs com GDFV. O objetivo desse cenário é avaliar os impactos a nível de alimentador de MT, assim como o um transformador com número alto de penetração de GDFV.

Figura 5.47 - Tensão na saída do transformador 60947 (70%)



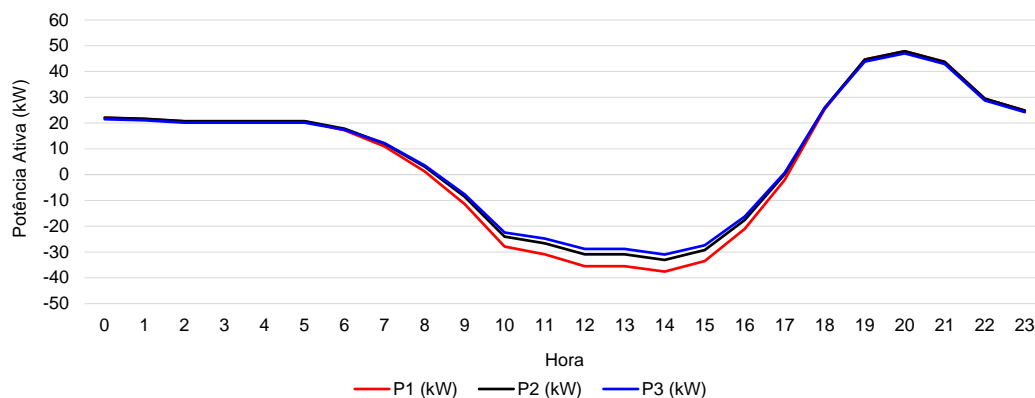
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.48 - Corrente na saída do transformador 60947 (70%)



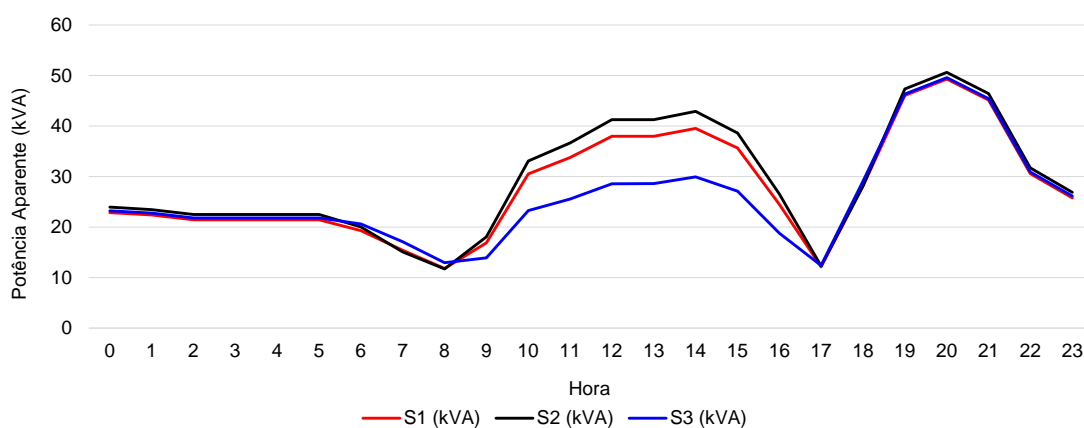
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.49 - Potência Ativa no transformador 60947 (70%)



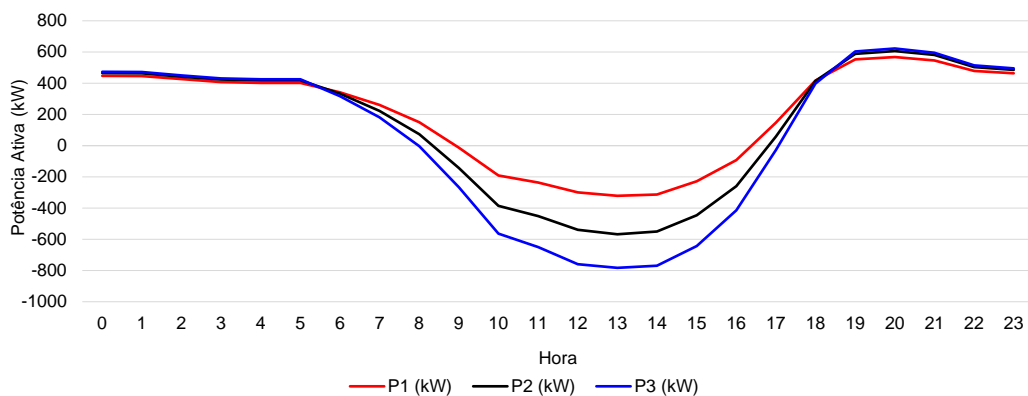
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.50 - Potência Aparente no transformador 60947 (70%)



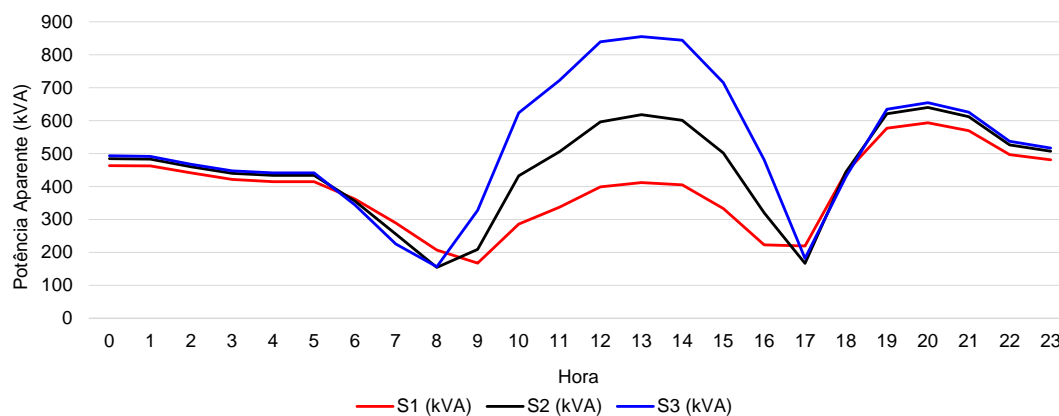
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.51 - Potência Ativa na saída do AL (70%)



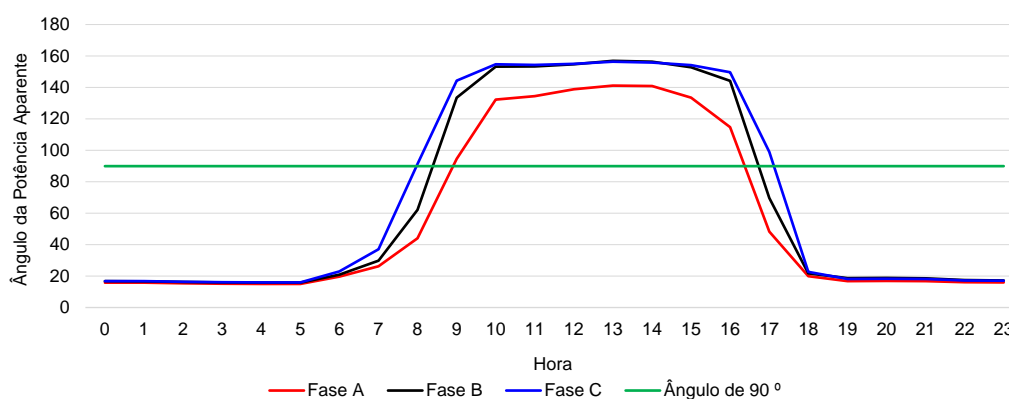
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.52 - Potência Aparente na saída do AL (70%)



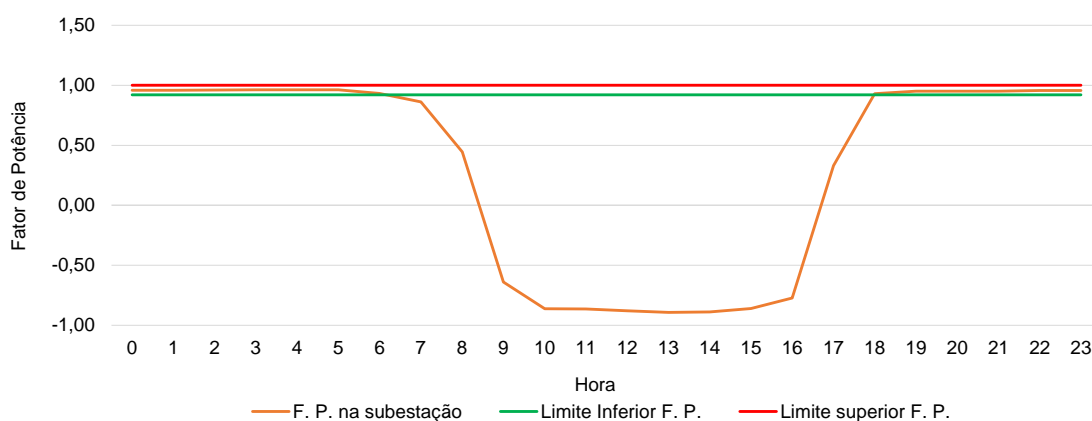
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.53 - Ângulo da Potência Aparente na saída do AL (70%)



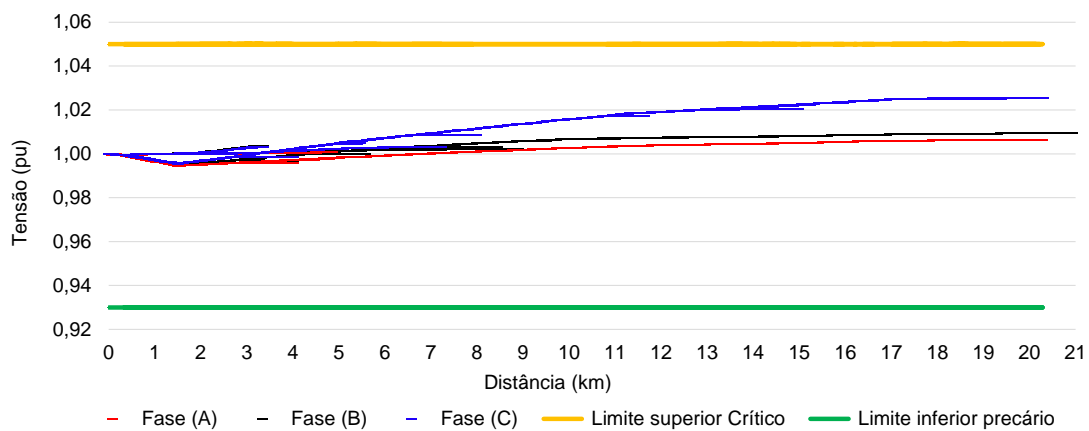
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.54 - Fator de Potência Aparente na saída do AL (70%)



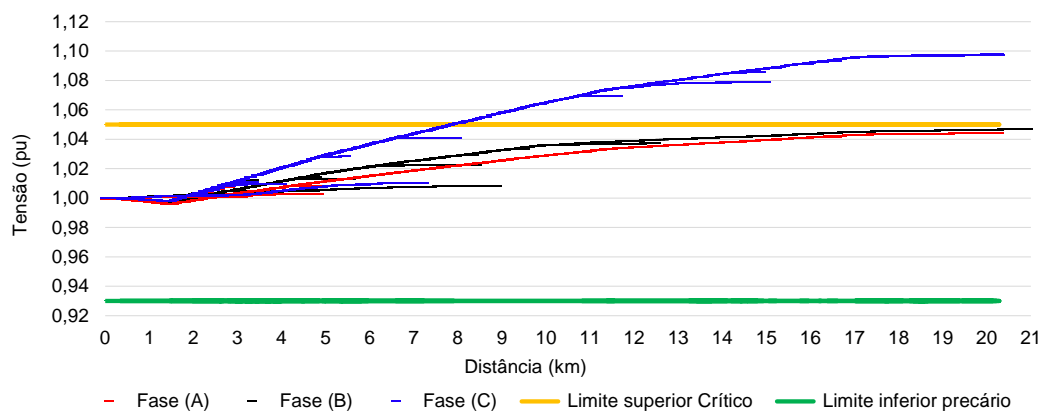
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.55 - Figura 4.70 - Perfil de tensão no AL às 9h (70%)



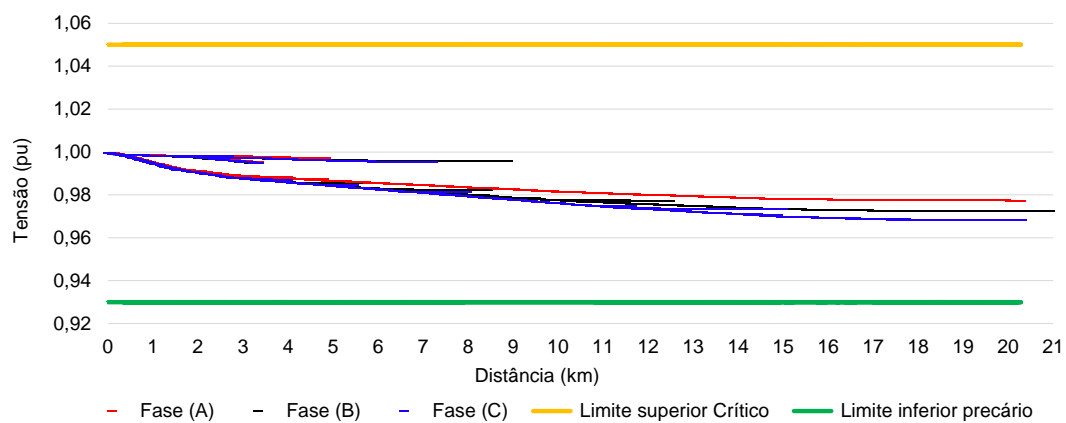
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.56 - Perfil de tensão no AL às 13h (70%)



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.57 - Perfil de tensão no AL às 20h (70%)



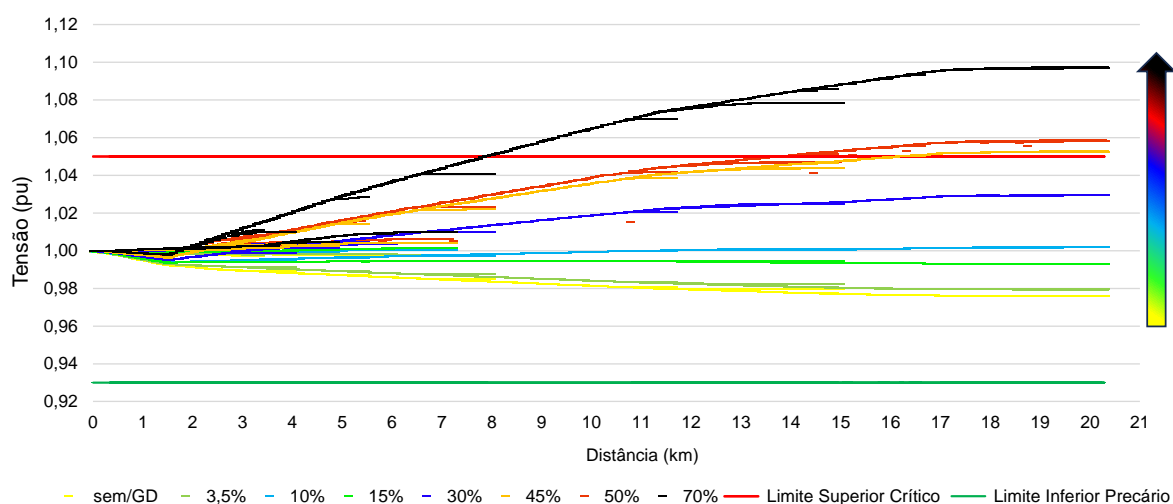
Fonte: Elaboração própria

No caso de penetração de 70%, o sistema apresenta elevado aumento de potência durante o período de geração. Conforme se percebe na Figura 5.52, existe um alívio em torno das 17h e por volta das 18h há uma rampa de potência, ocasionada pela carga solicitada no horário de ponta. Esta característica da curva de carga desse alimentador confere semelhança com a “curva do pato”.

5.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES CENÁRIOS

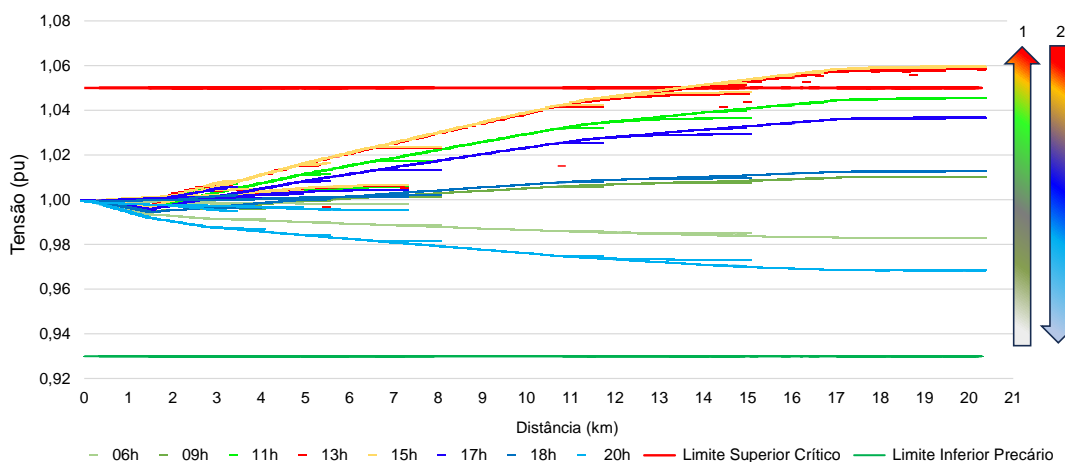
Na Figura 5.58 pode-se verificar a influência dos diferentes níveis de penetração de GDFVs no perfil da tensão ao longo do alimentador. Percebe-se que, em geral, até o 30% de penetração não há problemas para os níveis de tensão do alimentador. Contudo, para níveis superiores de penetração, começa a haver violações dos indicadores de conformidade de nível de tensão, o que implica em investimentos para regularizar estas situações.

Figura 5.58 - Perfil de tensão no AL às 13h (Comparativo)



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.59 - Perfil de tensão - Caso de 50% de penetração



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 5.59 pode-se avaliar, para o caso de 50% de penetração de GDFVs, a sua influência na elevação de tensão ao longo do dia. Pode-se verificar que os alimentadores devem ser capazes de evitar os altos níveis de tensão nos momentos de maior geração, além de manter a tensão em níveis adequados, quando não há operação das GDFVs, o que ocorre justamente nos períodos de maior carga do sistema.

A graduação mostrada juntamente à Figura 5.59 representa, na graduação “1”, escala de cor do “verde” para o “vermelho”, indicando a elevação de tensão ao longo do dia no alimentador. A graduação “2”, escala de cor do “vermelho” para o “azul”, indica a diminuição de tensão ao longo do dia no alimentador à medida em que há um alívio de carga.

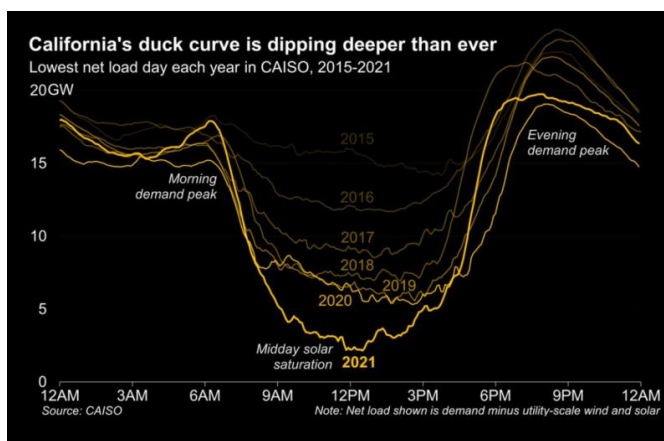
5.8 ANÁLISE DA CURVA DO PATO

Em sistemas elétricos com elevada participação de energia fotovoltaica, a curva de carga diária é identificada com variações de amplitude muito grande. Esse fenômeno é conhecido como curva do pato (*duck curve*).

Sua característica é de uma acentuada queda na carga líquida, o que ocorre nos momentos de maior geração de energia solar, o que inclui uma grande parcela da carga que é atendida pela GDFV. A resultante da curva de carga líquida equivale a um formato de pato, conforme ilustrado na Figura 5.60. O fenômeno foi identificado

inicialmente na Califórnia pelo operador independente do sistema da Califórnia (CAISO, 2013).

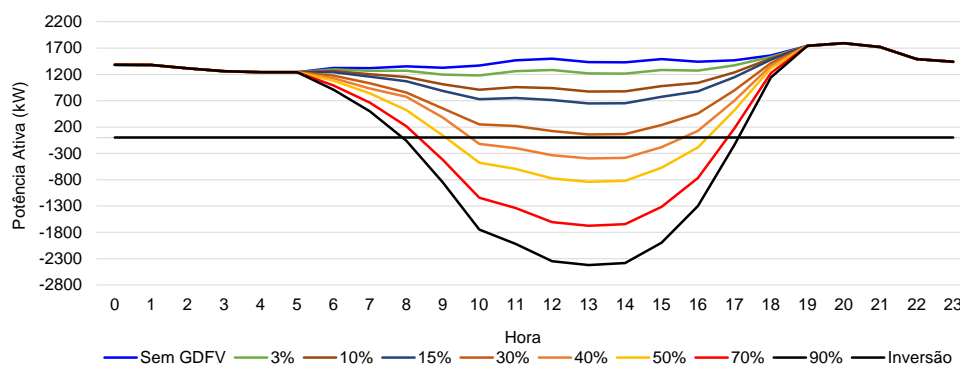
Figura 5.60 - Curva do pato - Califórnia



Fonte: (CAISO, 2021)

Na Figura 5.61 pode-se verificar a carga do alimentador TQR para diferentes penetrações de GDFV. Percebe-se que, até os níveis de 30% de penetração, não há inversão de fluxo. Contudo, para níveis maiores, além da inversão de fluxo de potência, a retomada de carga pelo alimentador no período das 15h até as 20h se torna abrupta.

Figura 5.61 - Curva do Pato para o alimentador na SE– TQR



Fonte: Elaboração própria

5.9 CRESCIMENTO DA CURVA DE CARGA

Ao avaliar a curva do pato pode-se também realizar a análise de quanto o alimentador deve responder em termos de retomada das curvas de carga com relação

ao crescimento percentual da curva de carga ao final do dia. A equação (5.1), (M. Lave) avalia o crescimento da curva de carga das 15h até as 20h quando há inserção de GDFV, em relação ao caso base.

$$CR(\%) = \frac{\Delta L_{\%GDFV} - \Delta L_{base}}{\Delta L_{base}} * 100 \quad (5.1)$$

Em que:

- CR (%) é o crescimento percentual da curva de carga;
- $\Delta L_{\%GDFV}$ é a diferença entre a carga das 20h e a carga das 15h quando há um percentual de GDFV;
- $\Delta L_{base\ GDFV}$ é a diferença entre a carga das 20h e a carga das 15h sem a presença de GDFV;

Na Tabela 5.4 pode-se avaliar o crescimento da curva de carga para o alimentador como forma complementar à avaliação a curva do pato, conforme Figura 5.61.

Tabela 5.4 - Crescimento da curva de carga - Alimentador

% de GD	Carga às 15h	Carga às 20h	Crescimento (%)
sem	1492	1794	0%
3%	1294	1794	65%
10%	980	1794	170%
15%	775	1794	237%
20%	612	1794	291%
30%	240	1794	414%
40%	-178	1794	553%
50%	-574	1794	684%
70%	-1320	1794	931%
90%	-1998	1794	1155%

Fonte autor

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizada a avaliação de resultados de medição de grandezas em um circuito real de baixa tensão de distribuição, frente aos impactos causados pelas gerações distribuídas fotovoltaicas na qualidade de energia.

Também foram simulados cenários de penetração de inserção de GDFVs em um sistema de distribuição e comparados com os resultados medidos em um circuito de baixa tensão real.

Em relação aos indicadores de conformidade de níveis de tensão, observou-se que, na média tensão, os impactos foram suportados pelo sistema até o nível de 30% de penetração de GDFV. Todavia, nos circuitos de baixa tensão, tanto nos resultados medidos quanto nos simulados no software OpenDSS, ocorreu as transgressões dos níveis de tensão críticos e precários, mesmo com inserções na ordem de 5% de unidades de GDFVs, dependendo da topologia do circuito, ocasionando violação dos indicadores nas UCs conectadas no mesmo PAC da geração. Por conseguinte, ocasiona compensação financeira por parte das distribuidoras para os consumidores afetados.

Na baixa tensão foi realizada medição em circuito real. Pode-se concluir que os resultados simulados foram muito parecidos com os resultados medidos no circuito, visto que, as informações de cargas, curvas de cargas e GDFVs tiveram semelhança nos modelos adotados para os elementos.

Sobre os impactos da alta penetração de geração distribuída na qualidade de energia, nota-se que os maiores impactos são obtidos nos circuitos de baixa tensão. Na média tensão os efeitos começam a ser negativos para um nível de penetração superior a 30% para esse alimentador estudado.

Os impactos serão diferentes para outras topologias de rede, sendo que cada alimentador responderá de acordo com sua robustez e localização da GDFV no sistema.

Em relação à distorção harmônica, verificou-se que não houve impactos ao sistema e à penetração, ficando dentro dos parâmetros atualmente indicados pelo PRODIST.

Com a metodologia proposta, consegue-se avaliar as perturbações relacionadas aos níveis de tensão, permitindo antecipar eventuais melhorias nos sistemas de distribuição.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

- Estudo de definição de penetração;
- Análise aprofundada do impacto de distorções harmônicas causadas por GDFV;
- Criação de espectros harmônicos para simulação;
- Impacto das GDFVs na oscilação de tensão e soluções para eliminar problemas;
- Operação de reguladores de tensão causados por GDFVs;

6.2 TRABALHOS PUBLICADOS

- SILVA, E. L. M.; MARTINS, R. M.; MARCHESAN, G.; CARDOSO, G.; NASCIMENTO, L. A. F.; GARCIA, E. D. Análise do Impacto da Inserção de Geração Distribuída Fotovoltaica na Qualidade da Energia Elétrica. In: XXIV Congresso Brasileiro de Automática – CBA, 2022, Fortaleza.
- MARTINS, R. M.; SILVA, E. L. M.; MARCHESAN, G.; CARDOSO, G.; FERREIRA, F. S. Análise de Estratégias de Regulação de Tensão em Sistema com Alta Penetração de Geração Fotovoltaica. In: São Paulo State University; National University of Mar del Plata; Pontifical Catholic University of Valparaiso. (Org.). Book of abstracts and Proceedings of 14th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2022. XIVed. Guaratingetá: Câmara Brasileira do Livro (CBL), 2022, v., p. 79-79.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDINIA, O.; AMJADY, N.; ZAREIPOUR, H. A New Feature Selection Technique for Load and Price Forecast of Electrical Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 32, n. 1, p. 62–74, Jan. 2017.

ABNT, N. 16149, 2013. **Sistemas fotovoltaicos (FV)–Características da interface de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição**, 2013.

ANEEL. Módulo 7–cálculo de perdas técnicas e procedimentos distribuição. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2021.

ANEEL. Módulo 8–qualidade da energia elétrica e procedimentos distribuição. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2021.

ANEEL. Módulo 10– sistema de informação geográfica regulatório e procedimentos distribuição. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2021.

ANEEL. Resolução normativa ANEEL no 956/2021 - glossário de termos técnicos do PRODIST. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2021.

ANEEL. **Geração Distribuída**. 2022. Acessado em 20 abr 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>>.

ALFONSO, T. **Análise sistêmica do impacto da geração distribuída no sistema de distribuição de energia**. 2021. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ALVES, C. S. **Avaliação de desempenho de estratégias convencionais emergentes para controle de tensão em redes de distribuição de baixa tensão com presença de microgeração fotovoltaica**. 2021. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

AY Saber, T. Khandelwal e AK Srivastava, "**Fast Feeder PV Hosting Capacity using Swarm Based Intelligent Distribution Node Selection**," 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Atlanta, GA, EUA, 2019, pp., doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8973389.

BALBINO, I. M. **Análise de impactos de um sistema fotovoltaico conectado à rede em Mossoró/RN**. Dissertação de Mestrado - 2017. 94 f. Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2017.

B. B. Navarro and M. M. Navarro, "**A comprehensive solar PV hosting capacity in MV and LV radial distribution networks**," 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Turin, Italy, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGTEurope.2017.8260210.

CHAUDHARY, P.; RIZWAN, M. Voltage regulation mitigation techniques in distribution system with high pv penetration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3279–3287, 2018. ISSN 1364-0321.

FONSECA, P. H. **Análise do impacto na qualidade de energia causado pela conexão de geração distribuída fotovoltaica de até 50kW**. 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

IEEE. Ieee standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions - redline. **IEEE Std 1459- 2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000) - Redline**, p. 1–52, 2010.

LUO, K.; SHI, W. Comparison of voltage control by inverters for improving the pv penetration in low voltage networks. **IEEE Access**, v. 8, p. 161488–161497, 2020.

M. Bajaj and A. K. Singh, “Grid integrated renewable DG systems: A review of power quality challenges and state-of-the-art mitigation techniques,” **International Journal of Energy Research**, pp. 1–44, Sep. 2019.

MAHMUD, M. et al. Voltage control of distribution networks with distributed generation using reactive power compensation. In: **IEEE. IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S.l.], 2011. p. 985–990.

PINTO NETO, A. F. C. **Avaliação do impacto de sistemas fotovoltaicos conectados a rede de distribuição de baixa tensão**. (Tese de Doutorado), p. 108 – Universidade de São Paulo, 2016.

OPENDSS. OpenDSS PVSystem Element Model: **Electric Power Research Institute**: Open Distribution System Simulator p. 2011.

R. D. Fuchs. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas**. 2 Ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. 1979. 588 p.

SEAL, B.; EALY, B. Common functions for smart inverters 4th edition. **Tech. Report, Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA**, 2016.

SOUSA, A. L. d. **Estimativa da capacidade de hospedagem de geração distribuída em redes de distribuição via algoritmos genéticos**. 2019. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

TEIXEIRA, L. d. G. et al. The effect of local inverter voltage control in technical losses on low voltage of a brazilian distribution feeder with increasing pv penetration. In: **2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

TEIXEIRA, L. G. et al. Análise dos impactos da difusão da geração distribuída fotovoltaica nas redes reais de baixa tensão considerando estratégias de controle do inversor. **Anais da Sociedade Brasileira de Automática**, v. 1, n. 1, 2019.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade.** Tese de doutorado, p. 189 - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

VASCONCELOS, F. M. (2017). **uma abordagem lagrangiana na otimização volt/VAr em redes de distribuição.** Tese de Doutorado, p. 151.

VASCONCELOS, F. M. (2017). **Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.** Londrina: Educacional S. A

ZANCAN, D. N. **Metodologia para análise da tarifa binômica para consumidores residenciais considerando microgeração distribuída.** 2020. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.