

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESPECIALIZAÇÃO EM FONTES RENOVÁVEIS:
GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO**

Antônio Jorge dos Santos

**A MINIMIZAÇÃO DA SEVERIDADE DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO COM A
INJEÇÃO DE REATIVOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE ELÉTRICA**

Belo Horizonte
2021

Antônio Jorge dos Santos

**A MINIMIZAÇÃO DA SEVERIDADE DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO COM A
INJEÇÃO DE REATIVOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE ELÉTRICA**

Versão final

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Fontes Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Wallace do Couto
Boaventura

Belo Horizonte
2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO

UFMG

ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO ANTONIO JORGE DOS SANTOS

Realizou-se, no dia 06 de novembro de 2020, às 09:20 horas, em ambiente a distância (skype), da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *A MINIMIZAÇÃO DA SEVERIDADE DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO COM A INJEÇÃO DE REATIVOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA*, apresentada por ANTONIO JORGE DOS SANTOS, número de registro 2018724660, graduado no curso de ENGENHARIA MECÂNICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Wallace do Couto Boaventura - Orientador (UFMG), Prof(a). Luiz G. Monteiro de Oliveira (PUC-MG).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 06 de novembro de 2020.

Prof(a). Wallace do Couto Boaventura (Doutor)

Prof(a). Luis G. Monteiro de Oliveira (Doutor)

Secretaria do Curso de Especialização em
Fontes Renováveis - Geração, Operação
e Integração

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela saúde e disposição para os estudos.

Agradeço aos meus familiares, principalmente meu pai Jurandir e minha mãe Maria da Glória pelo apoio, por estarem presentes no decorrer de minha vida e aos meus irmãos por acreditarem em mim.

Ao meu professor e orientador Prof. Dr. Wallace Boaventura pelos ensinamentos durante a disciplina de conexão à rede elétrica, por dedicar seu tempo na orientação deste trabalho, por acreditar no meu potencial e incentivar. Ao professor e Coordenador do Curso de Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração, Prof. Dr. Victor Flores por estar sempre presente em todo o percurso do Curso de Especialização esclarecendo dúvidas, orientando nas disciplinas estudadas e, a atual Coordenadora Profa. Dra. Wadaed Uturbey.

Agradeço a todos os outros professores: Dr. Ivan, Dr. Seleme, Dr. José Henrique, Dr. Thales, Dr. Bruno, Dr. Martinez, Dr. Luís Guilherme, Dr. Luiz Machado, Dr. Leandro, Dr. Danilo, Dr. Sidelmo, Dr. Davies William, Dr. Glássio e aos demais professores, palestrantes e seminaristas que se dedicaram a nos compartilhar um pouco do seu tempo e dos seus conhecimentos. Aos amigos e colegas que fiz durante a especialização, que compartilharam comigo os bons momentos e os momentos difíceis.

Enfim a todos os meus amigos e colegas sem os quais a vida não teria sentido.

RESUMO

Considerando-se o crescimento do mercado global das fontes renováveis de energia intermitentes (ex: solar e eólica) nos últimos anos no Brasil e no Mundo e sua integração em sistemas elétricos de potência, surgem preocupações constantes com aspectos relacionados à qualidade de energia, principalmente com a crescente demanda por instalações de geração distribuídas ou grandes centrais de sistemas fotovoltaicos. Quando esses sistemas são instalados em grande escala no sistema de distribuição, eles podem trazer benefícios para o sistema como um todo através de seus serviços ancilares como: injeção de potência ativa e reativa, controle de harmônicos e Fator de potência, causando impactos positivos. Neste contexto, a melhoria da eletrônica de potência em conversores estáticos e ao uso de sistemas de armazenamentos trouxeram opções interessantes de forma a minimizar tais impactos, oferecendo a possibilidade de minimização de alguns distúrbios decorrentes de afundamentos de tensão e a geração de harmônicos indesejáveis. Diante deste cenário, este trabalho tem por objetivo analisar os impactos de afundamentos de tensão que podem ser causados por faltas, cargas desbalanceadas, perfis de carga variados e a utilização da geração distribuída fotovoltaica para a minimização da severidade de afundamentos por meio da injeção de potências ativa e reativas através dos conversores estáticos, principalmente aqueles utilizados nas usinas fotovoltaicas (USF) conectados à rede elétrica. A metodologia deste trabalho consistiu em revisão bibliográfica sobre o tema, modelagem matemática e simulações computacionais utilizando o software PSCAD, no qual foram simulados três circuitos e produzindo gráficos e tabelas apresentando os resultados para cada simulação executada, com a finalidade de avaliar as perturbações e sua possível minimização ou mitigação.

Palavra-chave: qualidade da energia, afundamentos de tensão, injeção de potência ativa e reativa, conversores estáticos, sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

ABSTRACT

Considering the growth of the global market for intermittent renewable energy sources (eg solar and wind) in recent years in Brazil and the World and their integration in electrical power systems, recurrent concerns arise with aspects related to power quality, mainly with the growing demand for distributed generation facilities or large photovoltaic systems. When these systems are installed on a large scale in the distribution system, they can bring benefits to the system as a whole through its ancillary services such as: active and reactive power injection, harmonic control and power factor, causing positive impacts. In this context, the improvement of power electronics in static converters and the use of storage systems have brought interesting options in order to minimize such impacts, offering the possibility of minimizing some disturbances resulting from voltage sags and the generation of undesirable harmonics. Given this scenario, this work aims to analyze the impacts of voltage sags that can be caused by faults, unbalanced loads, varied load profiles and the use of distributed photovoltaic generation to minimize the severity of sags through the injection of active and reactive power through static converters, mainly those used in photovoltaic plants (USF) connected to the power grid. The methodology of this work consisted of bibliographic review on the subject, mathematical modeling and computational simulations using the PSCAD software, in which three circuits were simulated and producing graphs and tables presenting the results for each simulation performed, in order to assess the disturbances and their possible minimization or mitigation.

Keyword: power quality, voltage sags, active and reactive power injection, static converters, photovoltaic systems connected to electrical networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Recorde de geração de energia fotovoltaica.	20
Figura 2- Matriz Elétrica Brasileira.	21
Figura 3 – Evolução do Brasil no Ranking Mundial.....	22
Figura 4 – Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil.....	23
Figura 5- Geração Distribuída e Geração centralizada.....	24
Figura 6- Benefícios da Fonte Solar Fotovoltaica na geração de empregos no Brasil.....	25
Figura 7 - Os 10 melhores países para instalações e total de capacidade instalada em 2019 por capacidade	26
Figura 8- Análise e divulgação estratégica de PV - Instantâneo de 2020 dos mercados globais de energia fotovoltaica.....	26
Figura 9- Penetração de Fotovoltaico mundial em 2019.....	27
Figura 10-Perspectivas Top Global Solar Para o Mercado de Fotovoltaico Mundial.....	28
Figura 11- Evolução global acumulada de instalação de fotovoltaicos.....	29
Figura 12- Afundamento de tensão devido a uma única falta para a terra	34
Figura 13- Sobretensão devido a uma única falta para a terra.....	34
Figura 14 -Fluxograma - Consequência econômica da QEE.	37
Figura 15- Gerador ininterrupto de tensão em standby (UPS) e transformador de tensão constante (CVT)	38
Figura 16 – Tecnologia para sistemas de armazenamento de energia elétrica.....	39
Figura 17 - Combinações de Aplicação.....	41
Figura 18- Sistemas de armazenamento químicos	43
Figura 19- Sistemas de armazenamento elétrico de célula combustível	44
Figura 20- Flutuação de 100 kW durante 3 segundos em turbina eólica de 300 kW.....	45
Figura 21- Perfil de um dia ensolarado com nuvens em uma usina fotovoltaica.....	46
Figura 22 -Sistema de armazenamento de energia (2 kW/ 6 kWh).....	47
Figura 23-Gráfico do Número de Micro Geradores Estimados: 2017-2024.....	49
Figura 24-Gráfico da Evolução no Número de Instalações com Micro e Mini Geração Distribuída: 2013-2017.....	49
Figura 25-Tensão na Corrente monofásica.....	50
Figura 26-Tensão na corrente trifásica	50
Figura 27- Forma de onda distorcida.....	52
Figura 28-Gráfico da Evolução do Índice FEC: 1996-2016 (em nº de Interrupções).....	55
Figura 29- Gráfico da Evolução do Índice DEC: 1996-2016 (em horas).....	55
Figura 30-Trajetória dos indicadores de continuidade.	56
Figura 31- Número de ocorrências e demanda interrompida no sistema interligado e no sistema isolados.....	56
Figura 32- Tela principal do PSCAD	59
Figura 33 - Tela de componentes	60
Figura 34 – Painel de Script	60
Figura 35- Circuito completo da simulação 1.	62
Figura 36- Circuito completo da simulação 2.	63

Figura 37- Circuito completo da simulação 3.	64
Figura 38-Detalhe da barra SE.	66
Figura 39-Detalhe, configuração da Barra 1 e da carga fixa.	67
Figura 40- Detalhe das Barras B2, B3, B4 e o circuito de falta.	68
Figura 41- Sinais de saídas para as tensões, potências nas barras e medidores.	69
Figura 42-Detalhes do circuito de falta.	69
Figura 43-Detalhes da Usina Fotovoltaica (USF) e da configuração da Fonte de Corrente. ...	70
Figura 44- Detalhes dos controles de falta (R) e da USF.	71
Figura 45- Análise de Harmônicos.	71
Figura 46- Gráficos para resistência de falta R=0, correntes nas barras, Se, B1, B2, B3, B4 e USF.....	72
Figura 47- Gráficos para resistência de falta R=0, circuito de Potências e tensões nas barras	72
Figura 48- Harmônicos.	73
Figura 49 - Gráfico das correntes e tensões nas barras, Potência ativa e reativa.	74
Figura 50 - Gráficos de Harmônicos nas barras Se e B4.....	75
Figura 51 - Análise de Harmônicos para resistência de falta de R=10 Ω	76
Figura 52 - Gráficos de Correntes nas Barras, tempo 3,5s, ângulo 0° e potência 1, 2 e 4 (MW).	78
Figura 53 - Gráficos de Tensões nas Barras, tempo 3,5s, ângulo 23° e potência 1, 2 e 4 (MW).	79
Figura 54 - Gráficos de potências nos tempos 3,5s para ângulo -90° e potência 1, 2 e 4 (MW).	80
Figura 55 - Gráficos de Harmônicos para potência de 4MW e Ângulo de fase 0°.....	82
Figura 56 - Gráficos de Harmônicos para potência de 4MW e Ângulo de fase 23°.....	82
Figura 57 - Gráficos de Harmônicos para potência de 4MW e Ângulo de fase -90°.	83
Figura 58- Detalhes do circuito de simulação da carga variável.	84
Figura 59- Detalhes dos circuitos e controles da USF.....	85
Figura 60-Detalhe das saídas e medidores.	85
Figura 61- Análise dos Harmônicos.	86
Figura 62-Análise usando medidores na obtenção de dados nos tempos 1,10s e 3,14 s.....	86
Figura 63- Análise gráfica com a USF fora de operação sem injeção de reativos.	86
Figura 64- Análise gráfica com a USF ligada injetando potências ativas de 1 e 4 MW.	88
Figura 65- Análise do perfil de tensão através da injeção de potências ativas 0 e 4 MW e de 0 e 4 MVar de potência reativas respectivamente.	91
Figura 66 - Harmônicos gerado pela Carga variável e USF injetado 1 MW e 1 MVar.	92
Figura 67 - Harmônicos gerado pela SE e pela Carga variável injetando 2 MW e 2 MVar. ..	92
Figura 68- Harmônicos gerados pela Carga variável e pela USF injetando 4MW e 4 MVar. 92	
Figura 69- Entrada dos perfis de cargas nas barras B2 e B3.	94
Figura 70- Detalhes dos circuitos de perfil de cargas 1 e 2 conectados a barra 3.	94
Figura 71- Entradas das potências, cargas do perfil 1 e parâmetro de configuração.	95
Figura 72- Entradas das potências e cargas do perfil 3.	96
Figura 73- Detalhes do circuito de comandos e do circuito da USF.	97
Figura 74- Detalhes das saídas.	97

Figura 75- Detalhes das análises de Harmônicos.	98
Figura 76- Configuração do escâner de frequência para obtenção de harmônicos	98
Figura 77- Detalhes dos medidores.	98
Figura 78- Detalhe dos gráficos de tensões e potências com a USF fora de operação.	99
Figura 79- Gráficos da USF injetando potência Ativa de 1 2 e 4 MW e reativos iguais a zeros.	100
Figura 80- Gráficos da USF injetando de potência Ativa e Reativa de 1, 2 e 4 MW /MVAr.	103
Figura 81- Gráficos da USF injetando potência Ativa de 1,2 e 4 MW e Reativos iguais a zero.	106
Figura 82- Gráficos da USF injetando de potências Ativa e Reativa de 1, 2 e 4 MW/ MVAr	107
Figura 83- Gráficos de harmônicos quando injetado P=1 MW e Q=0 MVAr.	109
Figura 84- Gráficos de harmônicos quando injetado P= 2 MW e Q=0 MVAr.	109
Figura 85- Gráficos de harmônicos quando injetado P= 4MW e Q=0 MVAr.	110
Figura 86- Gráficos de harmônicos quando injetado P=1MW e Q= 1 MVAr.	110
Figura 87- Gráficos de harmônicos quando injetado P=2 MW e Q= 2 MVAr.	111
Figura 88- Gráficos de harmônicos quando injetado P=4 MW e Q= 4 MVAr.	111
Figura 89- Detalhe da barra SE, configurações da fonte e multímetro.	120
Figura 90- Detalhe do Circuito, gráficos de tensões e potências com a USF desligada.	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Classificação das variações de tensão de curta duração	35
Tabela 2 - Limites para os desequilíbrios de tensão	51
Tabela 3 - Limites para flutuação de tensão	51
Tabela 4 - Distorções harmônicas totais de tensão.....	54
Tabela 5 - Distorções harmônicas totais para tensões - PRODIST Módulo 8.	54
Tabela 6- Potência Ativa e Ângulo de fase.	66
Tabela 7- Análise da variação das correntes, tensões e Potência com resistência de falta de 5 Ω nos tempos de 2s a 4s.	74
Tabela 8- Análise da variação das correntes, tensões e Potência com resistência de falta de 10 Ω nos tempos de 2s a 4s.	75
Tabela 9 - Análise da minimização através da injeção de reativos para potências de 1, 2 e 4 MW e ângulo de fase igual a zero.	78
Tabela 10 - Análise da minimização da severidade através da injeção de reativos para potências de 1, 2 e 4 MW e ângulo de fase igual a 23°.	79
Tabela 11 - Análise da minimização através da injeção de reativos para potências de 1,2 e 4 MW e ângulo de fase igual a -90°.	81
Tabela 12- Potência Ativa(P) e Potência Reativa (Q).	84
Tabela 13- Análise com a USF desligada.....	87
Tabela 14- Injeção de Potência Ativa de 0 e 4MW e Reativo igual a 0.	88
Tabela 15- Injeção de Potências Ativas e Reativas de 1, 2 e 4(MW e MVar) respectivamente.	90
Tabela 16-Potência Ativa(P) e Potência Reativa (Q).	93
Tabela 17- Perfil de carga a ser carregado para o arquivo DadosCarga1 no PSCAD.....	95
Tabela 18- Perfil de carga a ser carregado para o arquivo DadosCarga3 no PSCAD.....	96
Tabela 19-Dados obtidos dos gráficos com a USF fora de operação, potência ativa e reativa igual a zero para comparação com a USF Operando.....	100
Tabela 20- Injeção de Potência Ativa de 1, 2 e 4 MW e Reativo igual a 0.	101
Tabela 21- Injeção pela USF de Potência Ativa e Reativa de 1, 2 e 4 MW/ MVar	104
Tabela 22- Injeção pela USF de Potência Ativa Reativa de 1,2 e 4MW/ MVar.....	105
Tabela 23- Injeção de potência ativa (P) e reativa (Q) de 1, 2 e 4 MW e 1, 2 e 4 MVar.	108
Tabela 24- Análise da variação das correntes, tensões e Potência com resistência de falta de 5 Ω nos tempos de 2s a 4s.	121
Tabela 25- Análise da variação das correntes, tensões e Potência com resistência de falta de 10 Ω nos tempos de 2s a 4s.	121
Tabela 26 - Análise da minimização através da injeção de reativos para potências de 1, 2 e 4 MW e ângulo de fase igual a zero.	121
Tabela 27 - Análise da minimização da severidade através da injeção de reativos para potências de 1, 2 e 4 MW e ângulo de fase igual a 23°.	122
Tabela 28 - Análise da minimização através da injeção de reativos para potências de 1,2 e 4 MW e ângulo de fase igual a -90°.	122
Tabela 29- Análise com a USF desligada.....	123
Tabela 30- Injeção de Potência Ativa de 0 e 4MW e Reativo igual a 0.	123
Tabela 31- Injeção de Potências Ativas e Reativas de 1, 2 e 4(MW e MVar) respectivamente.	124
Tabela 32-Dados obtidos dos gráficos com a USF desligada, potência ativa e reativa igual a zero tabela completa.	125

Tabela 33-Dados obtidos dos gráficos com a USF desligada, potência ativa e reativa igual a zero tabela completa.	126
Tabela 34- Injeção pela USF de Potência Ativa Reativa de 1,2 e 4MW/ MVar.....	126
Tabela 35- Injeção de potência ativa (P) e reativa (Q) de 1, 2 e 4 MW e 1, 2 e 4 MVar.....	127

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Absolar	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
B1, B2, B3 e B4	Barras da Linha de distribuição
C.A.	Corrente Alternada
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Electriques
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
CVT	Transformador de tensão constante (Sigla em inglês)
D.C.	Corrente Contínua
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por unidade consumidora
DVR	Regulador de tensão dinâmica (Sigla em inglês)
EMAE	Empresa Metropolitana de águas e Energia S.A.
EMC	Compatibilidade Eletromagnética
EMT	Electromagnetic Transiente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESS	Energy Storage System
F	Frequência
FCS	Fuel Cell System
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por unidade consumidora
FFT	Fast Fourier Transform
FV	Fotovoltaico
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
GW	Gigawatts
GWp	Gigawatts pico
HESS	Hybrid Energy Storage System (Sigla em inglês)
HVDC	High Voltage Direct Current
I_USF	Corrente da Usina fotovoltaica
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ISe	Corrente na SE
ISO	International Organization for Standardization
kA	kiloamperes
kW	kilowatts
LD	Linha de Distribuição
LT	Linha de Transmissão
MMC	Multilevel Converter
MVAr	Mega Volts Ampere Reativos
MW	Megawatts

ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P	Potência
P_Load	Potência Ativa da carga
PCS	Power Conditioning System
Ph	Ângulo de fase
Prodist	Procedimentos de Distribuição
PSCAD	Power Systems Computer Aided Design
Pse	Potência Ativa da SE
PSS/E	Power System Simulation and Analysis
Pusf	Potência Ativa da Usina fotovoltaica
PV	Painel fotovoltaico
PVPS	Photovoltaic Power Systems Programme
PVsyst	Photovoltaic Systems Software
PWM	Pulse Width Modulation
Q	Potência Reativa
Q_Load	Potência Reativa da carga
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
Qse	Potência Reativa da SE
QT	Queda de Tensão
QUCS	Quite Universal Circuit Simulator
Qusf	Potência Reativa da Usina fotovoltaica
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
SAM	Photovoltaic Systems Software
SCSS	Supercapacitor Storage System (sigla em inglês)
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
THD	Distorções Harmônicas Totais (Sigla em inglês)
UFV	Usinas fotovoltaicas
UPS	Fonte de tensão Ininterrupta (Sigla em inglês)
USF	Usina do Sistema fotovoltaico
V	Tensão
VAR	Compensador Estático de Reativos (Sigla em inglês)
VE	Veículo elétrico
Vef1, 2, 3 e 4	Tensão eficaz nas Barras 1 ,2, 3 e 4
VefSE	Tensão eficaz na SE

-

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Organização do trabalho	17
1.2	Objetivo geral	17
1.3	Objetivos específicos	18
1.4	Metodologia.....	18
2	ESTADO DA ARTE	20
2.1	Considerações iniciais.....	20
2.2	Mercado de energia fotovoltaico (FV) no Brasil e no Mundo.....	20
2.3	Qualidade da energia, definição, distúrbios e impactos em sistemas elétricos.....	30
2.3.1	Definição	30
2.3.2	Causa de distúrbios em sistema de energia elétrica.....	31
2.3.3	Classificação da questão de Qualidade de energia elétrica	32
2.3.4	Impactos dos distúrbios em frente as quedas de tensão e as interrupções na QEE 33	
2.3.5	Impactos nos custos gerado pela queda de tensão, interrupções de curtas e longas durações	36
2.3.6	Sistema de armazenamento e os Impactos gerados ao sistema elétrico	38
2.3.7	Melhoria do perfil de carga, suavização de afundamentos e confiabilidade possibilitados pelos sistemas armazenamento.....	44
2.3.8	Impactos das Geração Distribuída (GD) conectados à rede e inserção de reativos 48	
2.4	Comportamentos das tensões e correntes em sistema monofásicos e polifásicos	50
2.5	O que as normas definem sobre a qualidade da energia elétrica (QEE).....	50
2.5.1	Problemas com harmônicos.....	51
2.5.2	Confiabilidade do sistema e indicadores de qualidade de energia elétrica.....	54
2.6	Considerações finais	56
3	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	58
3.1	Considerações iniciais.....	58
3.2	Modelagem computacional (software)	58
3.3	Análise e Resultados das Simulações nos Três Circuitos.....	61
3.4	Detalhes das simulações	65

3.4.1	Análise da minimização da severidade de afundamentos de tensão da rede elétrica através da injeção de reativos pela USF	65
3.4.2	Análise da melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela USF.....	83
3.4.3	Análise da melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela USF considerando diversos perfis de carga.....	93
4	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
4.1	Considerações finais	114
4.1.1	Habilidades desenvolvidas:	114
4.1.2	Trabalhos futuros.....	115
	REFERÊNCIAS	116
	ANEXOS 1 – Figuras, gráficos e tabelas - Análise da minimização da severidade de afundamentos de tensão da rede elétrica através da injeção de reativos pela USF.	120
	ANEXO 2 - Figuras, gráficos e tabelas-Análise da melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela USF	123
	ANEXO 3- Figuras, gráficos e tabelas Análise da melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela USF considerando diversos perfis de carga.....	125

1 INTRODUÇÃO

Com a grande diversidade de fontes renováveis de energia intermitentes (ex: Solar e Eólica) e novas tecnologias surgindo nos anos atuais, tais como: módulos fotovoltaicos mais eficientes, conversores estáticos capazes de controlar a injeção de potência ativa e reativa e harmônicos, muitas empresas do setor de energia esperam contar com sistemas de proteção contra distúrbios elétricos causados, por exemplo, por afundamentos de tensão e a injeção de harmônicos, com a finalidade de minimizar e ou mitigá-los. (ALEXANDRE et al., 2014).

Nos dois últimos anos teve início a implantação de sistemas de armazenamentos inteligentes, capazes de suprir a falta de energia em caso de sombreamento de módulos fotovoltaicos, intermitência dos recursos eólicos e solar, permitindo despacho programado de energia, a operação em redes elétricas “ilhadas” (micro-grids) e a interligação de veículos elétricos (VE). A energia fornecida pelos sistemas de geração renovável precisa ser de qualidade, não só do ponto de vista técnico, mas também econômico. Os sistemas de armazenamentos acoplados às usinas fotovoltaicas (USF) traz uma boa vantagem quando operam em conjunto com fontes renováveis de energia, pois não só podem suprir a demanda de carga, como também, produzem energia despachável, além de serem usados para minimizar afundamentos de tensão, injetando potências reativas ao sistema elétrico quando necessário. (SOLAR POWER EUROPE, 2019).

Para se garantir a qualidade da energia, é preciso fazer uma análise detalhada sobre os impactos causados por fontes renováveis de energia intermitentes, como eólica e solar, as que mais crescem na atualidade. Neste contexto, este trabalho apresenta uma revisão dos impactos de afundamentos de tensão causados por faltas, cargas desbalanceadas, perfis de cargas variadas, como também as possibilidades oferecidas pela geração distribuída para a minimização da severidade desses afundamentos através da injeção de reativos por conversores estáticos, principalmente aqueles acoplados às usinas (USF) conectados à rede elétrica (SFCR). A metodologia usada será baseada em uma ampla revisão bibliográfica, permitindo o embasamento teórico e a realização de simulações computacionais de transitórios eletromagnéticos. As simulações serão feitas por meio do software de simulação PSCAD da Manitoba HVDC *Research Centre* versão 4.6.3.0.

O trabalho será dividido em duas partes principais: o estado da arte, delineando o embasamento teórico e as simulações realizadas, demonstrando a efetividade da minimização de afundamentos por meio dos conversores estáticos instalados em usinas fotovoltaicas.

1.1 Organização do trabalho

O presente trabalho é dividido em quatro capítulos, onde o primeiro capítulo diz respeito a introdução, apresentando o tema da pesquisa, objetivos e a metodologias de pesquisa desenvolvida no decorrer do trabalho.

O segundo capítulo apresenta o estado da arte, onde são feitas considerações apresentando o cenário atual do mercado de energia no Brasil e no mundo, custos e impactos causados pelos distúrbios gerados pelos afundamentos de tensão, interrupções de curta e longa duração, e harmônicos, os quais afetam a QEE. É abordado também a utilização de conversores associados às fontes renováveis de energia integradas à rede de distribuição para a mitigação/minimização de problemas de QEE e sistema de armazenamento em baterias.

No capítulo três são apresentados os parâmetros, configurações e simulações de uma rede de distribuição monofásica composta por uma USF para vários cenários a fim de verificar a minimização da severidade de afundamentos e a melhoria do perfil de tensão com injeção de energia ativa e reativa pela USF. As simulações, bem como os resultados, foram implementadas no PSCAD.

No capítulo quatro serão apresentados a conclusão e considerações finais.

1.2 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar os aspectos de qualidade da energia elétrica (QEE) e sua interação com equipamentos de fontes renováveis de energia (conversores estáticos) conectados à rede, focando na possibilidade destes equipamentos serem utilizados para a minimização e, ou mitigação de problemas relacionado a severidade de afundamentos de tensões ou violação de níveis de tensão através da injeção de reativos.

1.3 Objetivos específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre os distúrbios elétricos que causam afundamentos de tensão, produzem: harmônicos, sobretensões, sobrecorrentes e trazem prejuízos técnicos e econômicos, e também maneiras de como minimizar suas severidades e/ ou mitigá-los;
- Elaborar e configurar a modelagem de circuitos de uma rede de distribuição monofásica compostas de cargas fixas, cargas variáveis e perfis de cargas diversas conectados a uma usina solar fotovoltaicas (USF);
- Simular e analisar o comportamento das tensões, correntes e potências no circuito, a fim de verificar a minimização da severidade de afundamentos de tensão através da injeção de reativos pela USF, nas condições sem falta e com falta;
- Simular e analisar o comportamento das tensões, correntes e potências com a finalidade de trazer a melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativos pela USF para o perfil de carga variável ou diversos perfis de carga.

1.4 Metodologia

De acordo com Marconi e Lakatos (2003), a pesquisa aplicada, tem como característica o interesse prático, de forma que seus resultados sejam aplicados imediatamente na solução de problemas que ocorrem na realidade. Diferentemente, as pesquisas exploratórias são investigações empíricas que possuem a finalidade principal de desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, formular problemas de forma mais precisa ou formular hipóteses para estudos de caso. Este trabalho se encaixa na categoria de pesquisa aplicada, realizando revisões bibliográficas e embasando-se em simulações para demonstração de resultados.

Os seguintes circuitos serão analisados:

- 1) Circuito 1 – Projetado para analisar a minimização da severidade de afundamentos de tensão da rede através da injeção de reativos pela usina fotovoltaica (USF) conectada à rede durante uma falta;

- 2) Circuito 2 – Projetado para analisar a melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela usina fotovoltaica (USF) conectada à rede considerando uma carga variante no tempo;
- 3) Circuito 3 – Projetado para analisar a melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela usina fotovoltaica (USF) conectada à rede considerando diversos perfis de cargas.

Os circuitos têm finalidade de realizar simulação de transitório eletromagnéticos envolvendo a injeção de reativos usando o software PSCAD.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, **estado da arte**, serão abordadas considerações apresentando o cenário atual do mercado de energia fotovoltaica no Brasil e no Mundo, a classificação da questão de qualidade da energia elétrica, os custos e impactos causados pelos distúrbios gerados pelos afundamentos de tensão, interrupções de curta e longa duração e harmônicos, os quais afetam a QEE. Também serão apresentados alguns impactos positivos que os sistemas de armazenamento proporcionam para a melhoria do perfil de carga e a suavização de afundamentos de tensão, e alguns impactos que a geração distribuída (GD), conectado à rede elétrica, trazem de benéficos com a injeção de reativos, além de conceitos estabelecido por normas internacionais e nacionais no que se refere a QEE.

2.2 Mercado de energia fotovoltaico (FV) no Brasil e no Mundo

- No Brasil

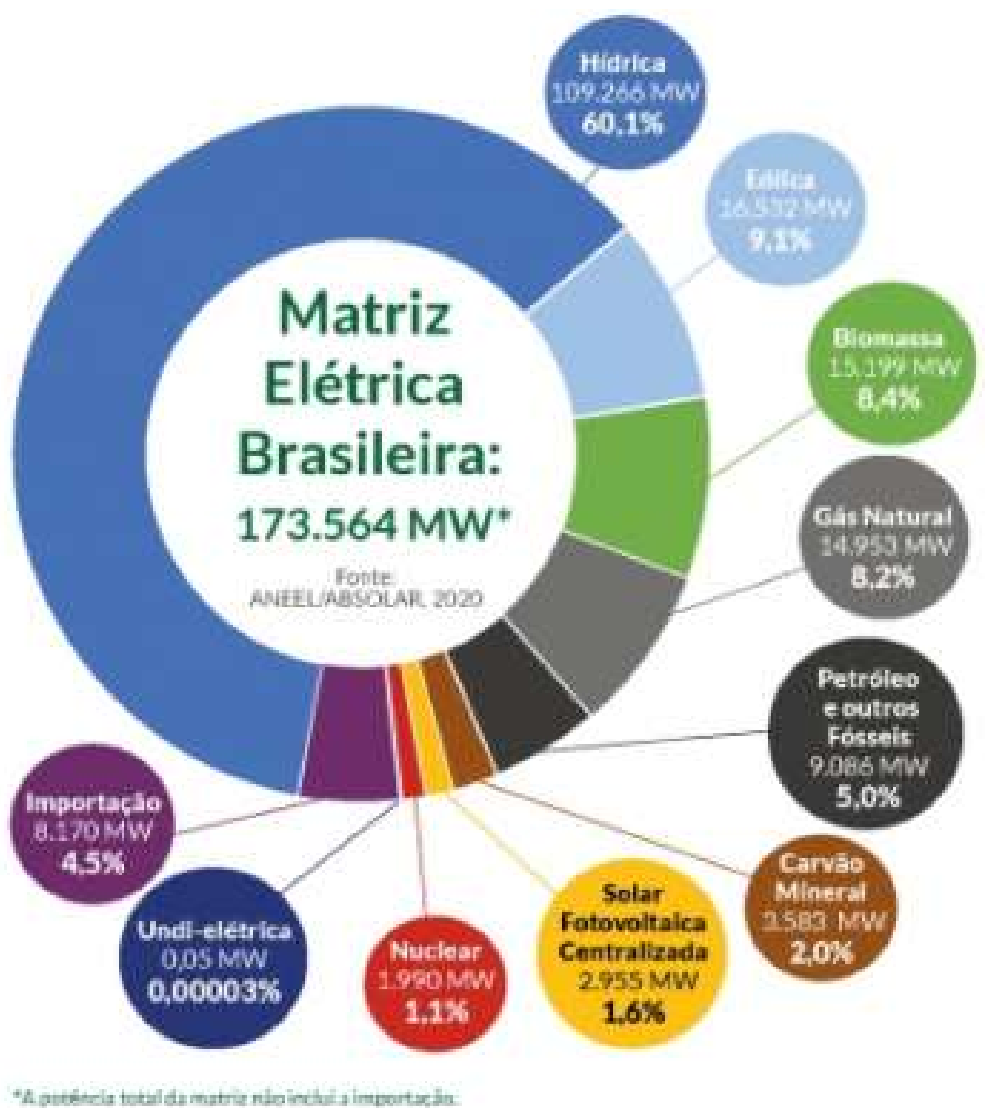
Segundo levantamento da Absolar (2020), o Brasil ultrapassou a marca histórica de 6 GW de potência operacional do ponto vista solar fotovoltaico em usinas de grande porte, pequenos e médios sistemas instalados em telhados, fachadas e terrenos. De janeiro a junho de 2020, o setor adicionou 1.381 MW em capacidade instalada, representado um crescimento de 30,6% frente ao histórico consolidado até o final de 2019, também são demonstrados os recordes da geração fotovoltaica no Brasil apresentado na FIG. 1, e na FIG. 2 são apresentados a matriz energética Brasileira.

Figura 1 - Recorde de geração de energia fotovoltaica.



Fonte: Portal Solar (2020)

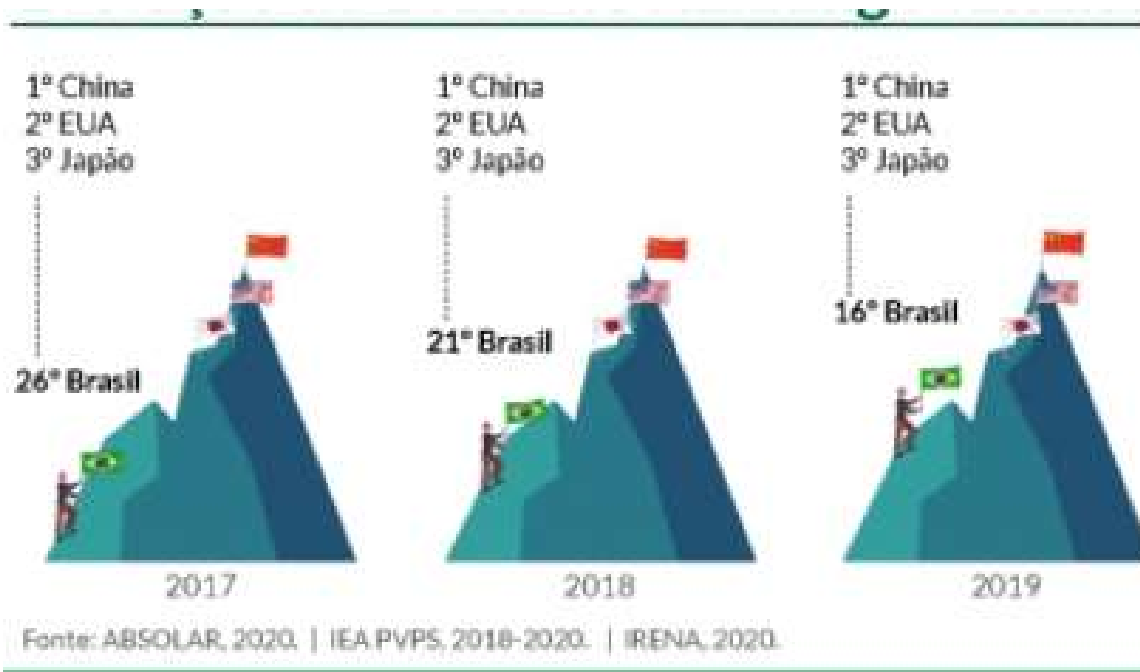
Figura 2- Matriz Elétrica Brasileira.



Fonte: Portal solar (2020)

Segundo a Quantum (2020), o mercado de energia brasileiro teve recorde de crescimento por volta de 212%, ultrapassando os 2,4 GW instalados, com investimentos de R\$ 4,8 bilhões, em maio de 2020 a energia solar passou a responder por 1,6% da matriz energética brasileira. A previsão em que o Brasil feche o ano de 2020 com 174 mil sistemas fotovoltaicos on-grid (0,21% das unidades consumidoras) e que até 2024, especialista estimam que o país terá mais de 880 mil sistemas de energia solar fotovoltaicos conectados à rede distribuidora de energia, a FIG. 3 mostra a evolução do Brasil no ranking mundial.

Figura 3 – Evolução do Brasil no Ranking Mundial

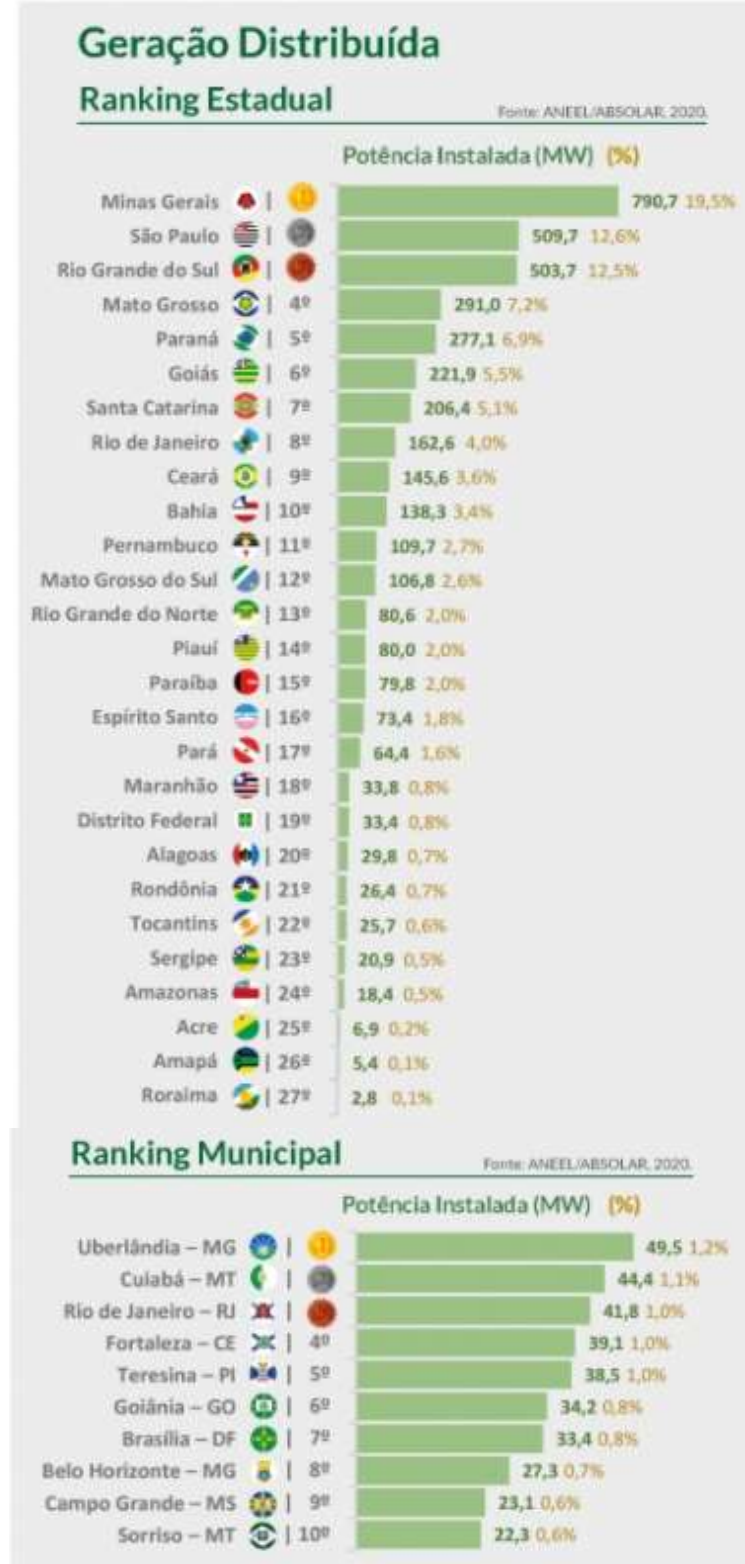


Fonte: Portal Solar (2020)

Segundo o Portal Solar (2020), o mercado de energia solar fotovoltaico no Brasil só no mês de outubro de 2020 alcançou a geração de 3 GW de acordos com a Aneel e a Absolar, ainda segundo o site cada vez mais impactados pelo crescimento populacional e de consumo, governo, iniciativa privada e consumidores investem em meios de utilizar fontes renováveis de energia, estima-se que até 2024 o Brasil contará com mais de 880mil sistemas de energia solar instalado ao longo do território nacional, na FIG. 4 é possível observar a evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil e da geração distribuída (GD) no ranking estadual e no ranking municipal.

A potência operacional total de energia solar brasileira é de 5764 MW, onde 2928,8 MW vem da geração centralizada e 2836 MW da microgeração. Em geração distribuída a potência instalada é de 2835,6MW e 304.427 unidades consumidoras recebem créditos pelo sistema de compensação de energia elétrica, na FIG. 5 é possível acompanhar a evolução da geração distribuída e a geração centralizada. (PORTAL SOLAR, 2020).

Figura 4 – Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



Fonte: Portal Solar (2020)

Figura 5- Geração Distribuída e Geração centralizada.



Fonte: Portal Solar (2020)

Na geração de empregos a Absolar (2020) descreveu que o setor de energia fotovoltaico brasileiro gerou mais de 130 mil empregos diretos, onde o maior estado com maior potência instalada foi Minas Gerais, com 562,5 MW, seguido pelo Rio Grande do sul com 385,0 MW e São Paulo (356,8 MW) e somente nos primeiros 6 meses de 2020, a solar fotovoltaico foi responsável por mais de 41 mil empregos, mesmo com queda da economia decorrente da pandemia da covid19. Em menos de 10 anos, a fonte solar fotovoltaica se tornou a renovável mais competitiva do país, um feito histórico no setor elétrico brasileiro, onde se tornou uma forte locomotiva para o desenvolvimento sustentável, com geração de emprego e renda, atração de investimentos, diversificação da matriz elétrica e benefícios sistêmicos para todos os consumidores, FIG. 6.

Figura 6- Benefícios da Fonte Solar Fotovoltaica na geração de empregos no Brasil



Fonte: Portal Solar (2020)

- No mundo

Segundo o relatório IEA-PVPS T1-37, (2020) o *Snapshot of Global PV Markets, 2020*, aponta que o mercado de energia solar fotovoltaica (FV) vem crescendo de forma exponencial, onde a China lidera com uma capacidade total instalada de 204,7 GW, sendo que no restante do mundo houve um crescimento de 44% em 2019. O maior mercado Europeu foi estabelecido pela Espanha (4,4 GW), acompanhado pela Alemanha (3,9 GW), Ucrânia (3,5 GW), Holanda (2,4 GW) e França (0,9 GW), o Brasil aparece em 12º na capacidade adicionada e capacidade instalada acumulada aparece em 16º, conforme apresentam as FIG. 7, já a FIG. 8 mostra a análise e a divulgação estratégica de PV - Instantâneo de 2020 dos mercados globais de energia fotovoltaica.

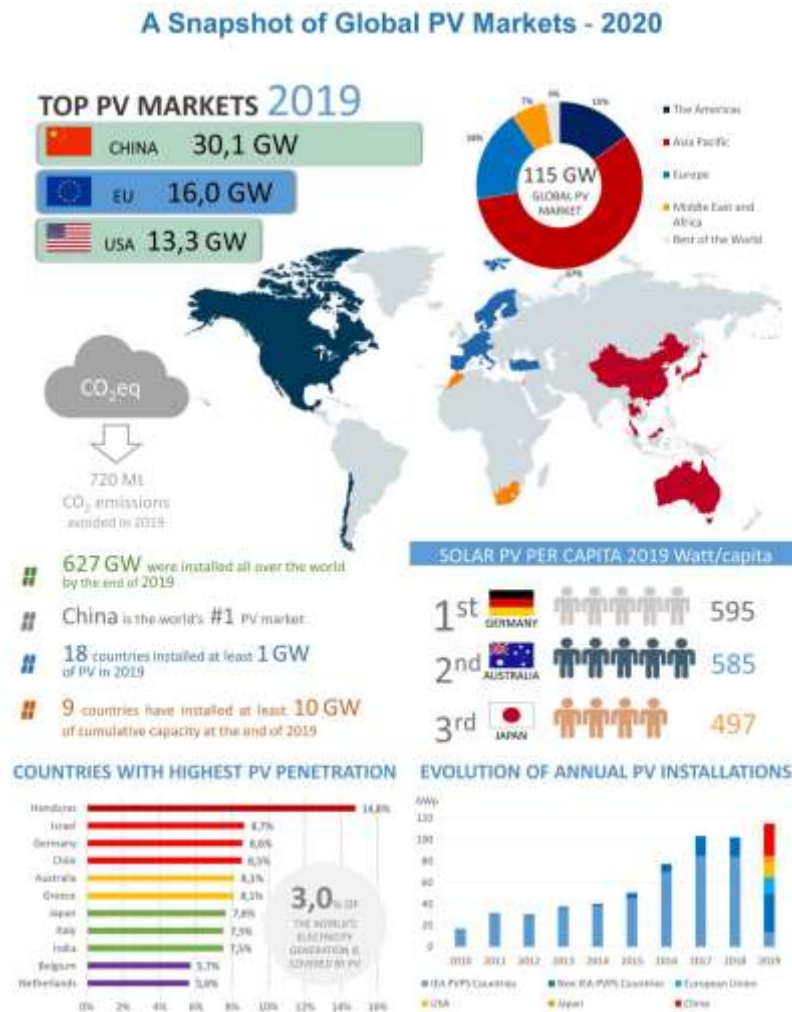
Figura 7 - Os 10 melhores países para instalações e total de capacidade instalada em 2019 por capacidade



Fonte: ABSOLAR, 2020. | IEA PVPS, 2020. | IRENA, 2020.

Fonte: Portal solar (2020)

Figura 8- Análise e divulgação estratégica de PV - Instantâneo de 2020 dos mercados globais de energia fotovoltaica.

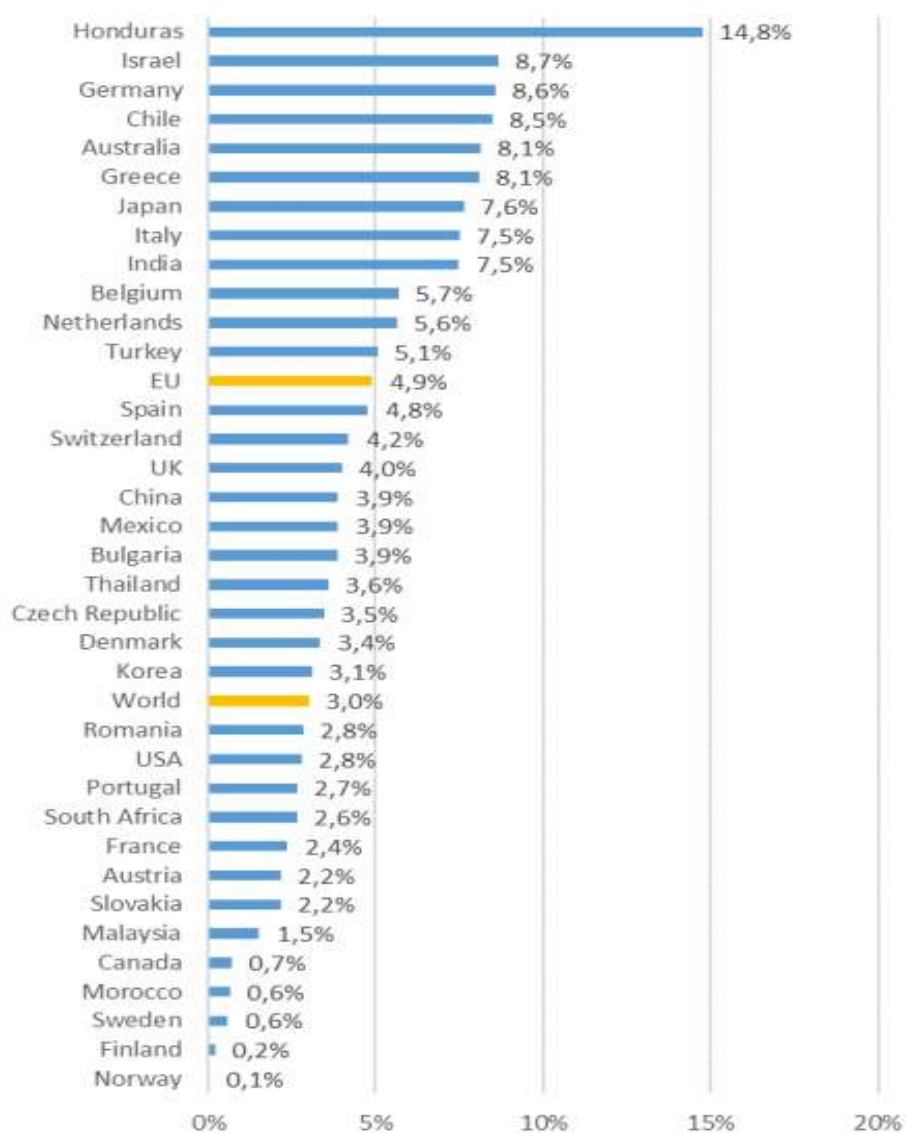


Fonte: IEA PVPS (2020, p.7)

O mercado americano também apresentou crescimento, aumentando sua geração para 13,3 GW respondendo aproximadamente por 60% das novas adições. O IEA também informou no mesmo relatório que os 10 principais países representavam 72% do mercado de fotovoltaicos (FV) global, número em declínio, significando um mercado menos concentrado.

Os países: Honduras, Israel, Alemanha, Chile, Austrália, Grécia, Japão, Itália, Índia, Bélgica, Holanda e Turquia, em 2020 possui capacidade instalada fotovoltaica suficiente para produzir teoricamente 5% de sua demanda anual de eletricidade com energia fotovoltaica na União Europeia, na FIG. 9 é apresentada a contribuição teórica da energia fotovoltaica para a demanda de eletricidade nos principais países. (IEA PVPS, 2020).

Figura 9- Penetração de Fotovoltaico mundial em 2019.



Fonte: IEA PVPS (2020, p. 14)

A contribuição para a descarbonização, segundo o relatório da IEA (2020), utilizando de tecnologia FV, foi de aproximadamente 720 milhões de toneladas de CO₂, contribuindo no final de 2019 para reduzir em 1,7 a 2,2% de CO₂ global e 5,3% das emissões relacionadas à eletricidade quando comparado com o mundo sem energia fotovoltaica.

No relatório IEA-PVPS T1-37 (2020), nas Américas, o Brasil aparece como o segundo mercado com cerca de 2,0 GW instalado em 2019, seguido do México (1,0 GW), Chile (700 MW) e Argentina (500 MW). O relatório ainda descreve que em dados preliminares o mercado de geração distribuída FV aumentou em números absolutos, quando comparado a 2018, mas diminuiu em comparação ao centralizado, crescendo em escala de utilidade em número absoluto em 2019, não houve muitas mudanças nos grupos dos 20 mercados com maior potencial de instalação nos 5 anos desde 2018, como apresentado na FIG. 10.

Segundo o relatório IEA-PVPS T1-37 (2020) o mercado de energia solar fotovoltaica diversificou muito com a implantação de diversos tipos de aplicações tais como: FV aplicado em reservatórios de hidroelétricas através de estruturas flutuantes, no setor agrícola, grandes usinas FV que utilizam de tecnologias de módulos FV Bifacial, e mais recentemente a utilização da energia solar FV integrada a veículos elétricos, que apresentam um potencial relevante para a diversificação de aplicação FV.

Figura 10-Perspectivas Top Global Solar Para o Mercado de Fotovoltaico Mundial.

	2018 Total Capacity (MW)	2023 Total Capacity Medium Scenario by 2023 (MW)	2019 - 2023 New Capacity (MW)	2019 - 2023 Compound Annual Growth Rate (%)	Political support prospects
China	175 131	448 131	273 000	21%	
India	27 347	116 106	88 759	34%	
United States	62 127	132 426	70 299	16%	
Australia	12 560	45 236	32 676	29%	
Germany	45 920	72 611	26 692	10%	
Japan	55 851	82 351	26 500	8%	
Spain	5 915	25 367	19 452	34%	
South Korea	7 742	24 768	17 026	26%	
Netherlands	4 181	20 059	15 878	37%	

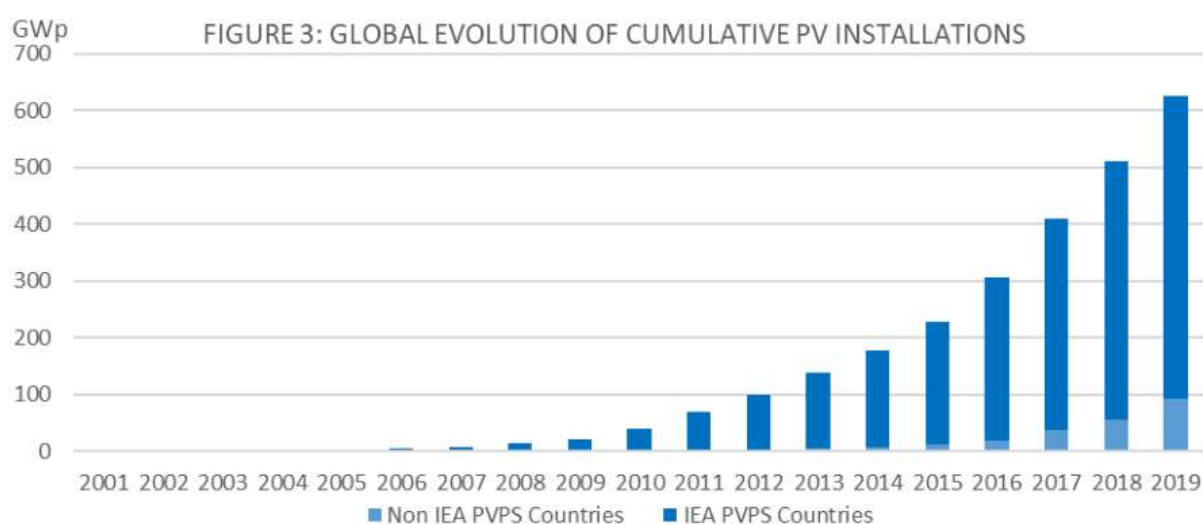
Continua

Mexico	3 580	19 010	15 430	40%	☀️☁️
France	8 920	22 259	13 339	20%	☀️
Saudi Arabia	19	11 412	11 393	260%	☀️
Brazil	2 346	12 505	10 159	40%	☀️
Italy	19 877	29 498	9 621	8%	☀️
Taiwan	2 739	12 074	9 335	35%	☀️
Pakistan	1 720	8 381	6 660	37%	☀️☁️
Ukraine	2 004	7 963	5 959	32%	☀️
Turkey	5 062	10 562	5 500	16%	☁️🌧️
United Arab Emirates	720	6 132	5 412	53%	☀️
Egypt	661	5 023	4 362	50%	☀️

Fonte: Solar Power Europe (2020, p. 22)

No mesmo relatório da IEA (2020) é descrito que a capacidade instalada mundial de sistemas fotovoltaicos é de 617,2 GWp, que representa o mínimo instalado até o final de 2019, enquanto os mercados remanescentes representam 9,8 GWp adicionais estimados, que poderiam elevar a capacidade instalada total cerca de 327 GWp, como visto na FIG. 11.

Figura 11- Evolução global acumulada de instalação de fotovoltaicos.



Fonte: IEA PVPS (2020, p. 12)

É possível perceber que cada vez mais as capacidades fotovoltaicas começam a representar melhor a distribuição de riquezas e população de um país.

2.3 Qualidade da energia, definição, distúrbios e impactos em sistemas elétricos

2.3.1 Definição

O termo QEE foi usado desde 1980 e descreve que é a energia elétrica disponível no ponto de uso e é compatível com requisitos dos equipamentos conectados naquele ponto e naquele momento. (HORIA et al 2018; apud MAEIR, V, et al, 2012).

Segundo Masoum e Fuchs (2015) em seu livro *Power Quality In Power Systems and Electrical Machines*, segunda edição de 2015, informa que a qualidade da energia elétrica (QEE) se tornou uma parte importante em sistema de energia e máquinas elétricas, onde o assunto atraiu a atenção de universidades e indústrias e que apesar de documentos importantes, artigos e livros publicados na área de qualidade da energia elétrica, sua definição não foi universalmente aceita, entretanto, a maioria aceita que é um aspecto muito importante para o sistema de energia e máquinas elétricas com impactos diretos na eficiência, segurança e confiabilidade.

O autor descreve que várias fontes usam a QEE com significados diferentes, usando como sinônimos de confiabilidade do fornecimento, qualidade do serviço, qualidade da tensão, qualidade da corrente, qualidade do fornecimento e qualidade do consumo, segundo o autor a julgar pelas diferentes definições, a QEE geralmente exprime a qualidade da tensão e ou a qualidade da corrente elétrica, e pode ser definida como: a medida, análise e melhoria da tensão do barramento, mantendo uma forma de onda senoidal na tensão nominal e frequência, onde esta definição inclui todos os momentâneos e de estado estacionário.

Por ter conceito complexo a QEE é expressa por indicadores cujos valores são determinados para um ponto específico da rede elétrica, ou sejam, um nível de tensão de alimentação e as flutuações afetam significativamente a qualidade da iluminação, prejudicando a percepção visual de objetos, detalhes e gráficos, impactando a qualidade do trabalho e contribuindo para a fadiga ocular e a saúde das pessoas

A norma internacional IEEE 11598 define qualidade de energia como fornecer energia e aterrar os equipamentos sensíveis de maneira adequada para a operação dos mesmo e compatível com o sistema de cabeamento do local e outros equipamentos conectados. (KUSKO; THOMPSON, 2007).

O que justifica o interesse pelo campo da qualidade da energia elétrica é que os equipamentos modernos são mais sensíveis a redução da QEE, possuindo dispositivos eletrônicos e sistemas de controles baseado em microprocessadores, nos quais são afetados pelas perturbações e distúrbios na fonte de alimentação. (HORIA et al, 2018, apud TARGOSZ, R. et al, 2007).

2.3.2 Causa de distúrbios em sistema de energia elétrica

De acordo com Masoum e Fuchs (2015), o sistema de linha de transmissão (LT) apresenta poucos problemas de qualidade da energia elétrica, e os problemas típicos são causados por ventos fortes (causando interrupções), descargas atmosféricas (causando picos e sobretensões transitória), queda de tensão (devido a falhas), sobretensões transitórias gerado pelo capacitor e/ ou pelo chaveamento do indutor , e operação inadequada dos dispositivos de regulação de tensão que pode acarretar variação de tensão de longa duração, variação lenta de tensão causado por uma variação de longo prazo da carga produzido pela comutação contínua de dispositivos e cargas.

Ainda segundo o autor, na distribuição os problemas típicos em QEE são causados por quedas de tensão, picos e interrupções de tensão, sobretensão transitória, energização do transformador, operação inadequada dos dispositivos de regulação de tensão, o efeito corona variações lentas tensão e sinais de portadora da linha de energia.

Outra causa do problema de QEE levantada pelos autores, é ocasionada pelas cargas dos clientes com a geração de harmônicos produzido por cargas não lineares produzidos por sistemas que utilizam dispositivos e equipamentos eletrônicos de potência, ou seja, sistemas de energia que utilizam de fontes de energia renováveis intermitentes, aparelhos tais como: No-breaks, computadores e lâmpadas fluorescentes, equipamentos com baixo fator de potência, devido a cargas altamente indutivas, como motores de indução e unidades de ar condicionado, entre outros, sendo que qualquer problema de energia manifestado em desvios de tensão, correntes ou frequência que resulte em falha ou operação incorreta do equipamento do cliente. (DAS, J.C, 2015; ROGER et al 2007).

Masoum e Fuchs (2015), ainda descreve que existem duas fontes principais para a baixa qualidade da energia elétrica relacionados aos regulamentos de fabricação: a primeira diz respeito a padronização, como por exemplo, a falta de padrões para a realizações e ensaios/

testes, certificações, venda, compra, instalação e uso de equipamentos e aparelhos eletrônicos. O segundo a sensibilidade dos equipamentos: como a proliferação de equipamentos e aparelhos eletrônicos sensíveis.

A QEE deve ser abordada a partir de outros três pontos importantes que precisam ser analisados; **i)** a concessionária de energia deve projetar, manter e operar o sistema de energia minimizando os problemas de QEE, **ii)** o usuário final deve empregar cabeamento adequado, prática de aterramento do sistema e dispositivos eletrônicos de proteção de última geração, e por fim **iii)** o fabricante deve projetar dispositivos eletrônicos que reduzam ao mínimo as perturbações elétricas e sejam imunes a anomalias da linha de fonte de alimentação. (MASOUM; FUCHS, 2015.)

2.3.3 Classificação da questão de Qualidade de energia elétrica

Segundo Roger et al (2007), Masoum e Fuchs (2015), para resolver o problema de QEE é necessário entender e classificar esse assunto que é muito complexo. Pois existem diferentes formas de classificar esse problema e cada uma usa uma propriedade específica para categorizar o problema. Como por exemplo o comitê coordenador de padrões do *Institute of Electrical and Electronic Engineers Standards Coordinating Committee 22* (IEEE SCC22) que liderou o principal esforço nos estados unidos para coordenar os padrões de QEE, principalmente a sociedade de aplicações industriais (*Industry Applications Society*) e a sociedade de engenharia de potência (*Power Engineering Society*) se coordenando com os esforços internacionais da *International Electrotechnical Commission* (IEC) e do *Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Hute Tension* (CIGRE).

A *American National Standards Institute* (ANSI) C84.1 classifica os eventos de maior importância como fenômenos de estado estacionário, preocupando com a duração do evento, onde a variação de longa duração da categoria foi adicionada para lidar com limites, enquanto a IEEE-519 preocupa com o formato da onda (duração e magnitude) de cada evento para classificar os problemas de QEE, por outro lado a IEC usa a faixa de frequência do evento para a classificação. Por exemplo a IEC 61000-2-5 usa a faixa de frequência e divide o problema em três categorias principais, baixa frequência (<9 kHz), alta frequência (>9 kHz) e fenômeno de descarga eletrostática, e divide cada faixa de frequência em distúrbios irradiados e conduzidos. (ROGER et al, 2007; MASOUM; FUCHS, 2015).

A qualidade da tensão segundo Angelo Baggini (2008), é a forma quantitativa de descrever a qualidade da energia incluindo as variações em estado estacionário e distúrbios momentâneos impactando as cargas, sua categoria incluem: Frequência, magnitude da tensão de alimentação, harmônicos, harmônicos e inter-harmônicas, desequilíbrio de tensão, flicker, quedas de tensão e interrupções momentâneas (variação r.m.s) e transientes. Segundo o mesmo autor a *International Electrotechnical Commission* (IEC), também definiu um conjunto de parâmetros para qualificar as variações na QEE. Alguns dos principais fenômenos que causam perturbações eletromagnética classificada pela IEC são:

a) Fenômeno de baixa frequência

Harmônicos e inter-harmônicos, Sinalização da tensão, Flutuação da tensão, Queda e interrupções de tensão, Desequilíbrio da tensão, Variação de frequência de potência, Tensão de baixa frequência induzidas DC em redes AC;

b) Fenômenos de baixa frequência irradiados

Campo magnético e campo elétrico.

c) Fenômenos de altas frequências de condução

Tensão ou corrente de ondas induzidas, transientes unidirecionais, transientes oscilatórios;

d) Fenômeno irradiado de alta frequência

Campos: magnéticos, elétricos, eletromagnéticos, onda de estado estacionário e transientes;

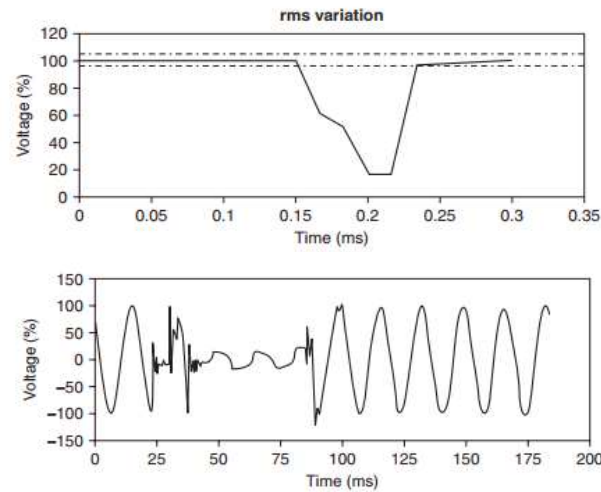
e) Fenômeno de descarga eletrostática (ESD)

f) Pulso eletromagnético nuclear (NEMP)

2.3.4 Impactos dos distúrbios em frente as quedas de tensão e as interrupções na QEE

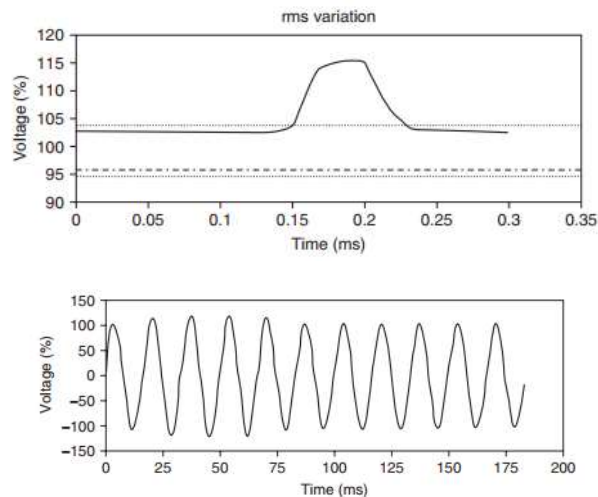
Segundo Roger et al, (2007), Kusko e Thompson (2007), uma queda de tensão é uma diminuição entre 0,1 e 0,9 pu. Os autores ainda descrevem que a medição da qualidade da energia elétrica é complexa, pois tanto o fornecedor quanto o consumidor no qual tem equipamentos elétricos sensíveis se tornam uma fonte de perturbação, principalmente em tensão ou corrente eficaz na frequência por duração de 0,5 ciclo a 1 minuto, outro termo usado a muitos anos é **afundamento** para descrever uma diminuição de tensão de curta duração, FIG. 12, já uma **sobretensão** é o inverso do afundamento da tensão de linha em r.m.s, representado na FIG. 13. (grifo nosso).

Figura 12- Afundamento de tensão devido a uma única falta para a terra



Fonte: *power Quality in Electrical Systems* (2007, p. 26)

Figura 13- Sobretensão devido a uma única falta para a terra



Fonte: *Power Quality in Electrical Systems* (2007, p. 30)

A variação das tensões pode ser analisada de duas maneiras, curta duração e longa duração.

a) Curta duração

A variação de tensão de curta duração é causada por condições de falha, energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida ou conexões soltas intermitentes na fiação de energia. (ROGER et al, 2007). Segundo o autor a norma internacional IEEE 1159 classifica as quedas de tensão de curta duração como sendo instantânea, momentâneas e temporais, onde; a instantânea tem duração de 0,5 a 30 ciclos, a momentânea entre 30 ciclos a 2 segundos e a temporais entre 2 segundos a 2 minutos. O módulo 8 do PRODIST tem sua classificação de acordo com a TAB. 1.

Tabela 1 -Classificação das variações de tensão de curta duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: PRODIST Módulo 8 (2018, p. 20)

b) Longa duração

As variações de longa duração abrangem desvios nas frequências médias r.m.s. de potência por mais de 1 minuto, podendo ser de sobretensões ou subtensões. (ROGER at al, 2007). As principais causas das variações de longa duração são a variação da carga e operação de chaveamento de sistema. As interrupções mais importantes são as causadas em parte de um sistema sem redundância ou redundante fora de operação, intervenção incorreta de um relé de proteção levando a uma falha e interrupção programada em uma rede de baixa tensão. (MOHAMMAD, 2015).

As subtensões ocorrem quando a tensão eficaz diminui de 0,8-0,9 p.u. durante mais de 1 minuto, podem ser causados quando é ligada uma carga ou o desligamento de um banco de capacitores, já as sobretensões ocorrem quando a tensão eficaz aumenta de 1,1-1,2 p.u por mais de 1 minuto, eles são gerados por falhas de isolamento, ferorrressonância, falha do regulador de tensão do alternador, rápidas modificações na estrutura da rede elétrica. As flutuações das tensões degradam o desempenho dos equipamentos e causam instabilidade das tensões internas e correntes de equipamentos eletrônicos. A variação de frequência de potência depende das características das cargas e a respostas do sistema de controle de geração às mudanças das cargas. (MOHAMMAD, 2015).

2.3.5 Impactos nos custos gerado pela queda de tensão, interrupções de curtas e longas durações

Horia et al (2018) descreve que a implantação de Qualidade de energia Elétrica (QEE) inadequada podem determinar perdas financeiras muito importantes e influenciam no desenvolvimento sustentável das empresas através dos efeitos gerados. Segundo ele para se determinar o custo total é necessário analisar os custos baseando em interrupções, lentidão de processos, falta de equipamentos, tempo de inatividade, eficiência reduzida de energia, menor qualidade do produto, menor produtividade do trabalho e outros custos indiretos. Cada perturbação da QEE afeta o usuário final de formas diferentes.

Por ser uma commodity a energia elétrica deve atender regras de qualidade e que a QEE gera efeitos a curto, médio e longo prazo sobre as empresas, de forma que um nível inadequado além das perdas, traz consequências sociais adversas e uso insustentável de recursos.

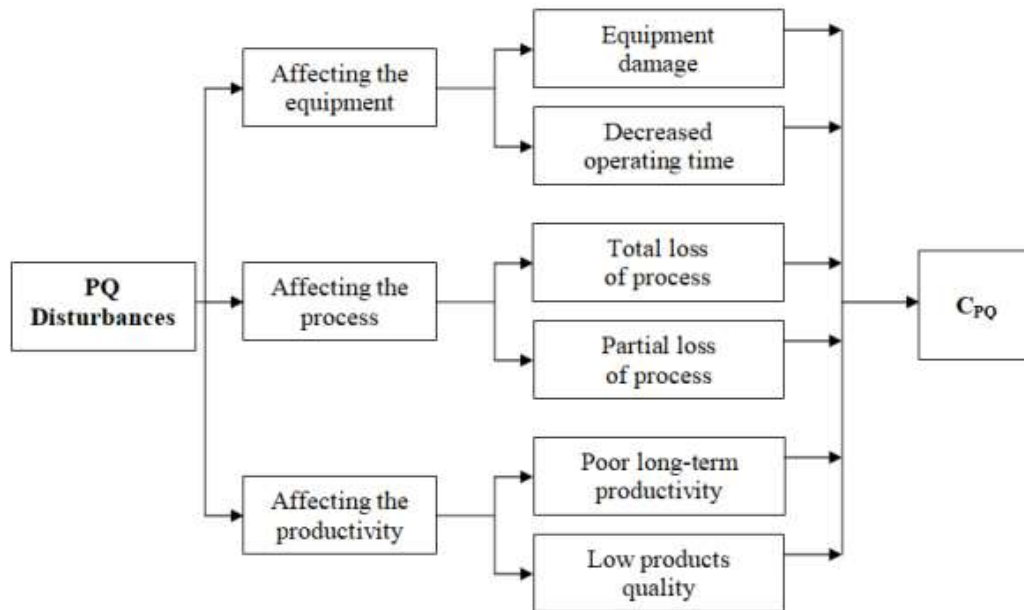
As quedas de tensão segundo Horia et al (2018) e as interrupções curtas representam 60% dos custos totais nas indústrias e representa um total de 57%. O impacto de distúrbios em QEE são classificados em 23,3 % em queda de tensão, 18,8% em interrupções curtas, 12,5% em interrupções longas, 5,4% em harmônicos e 29% de flutuações e oscilações. No setor de serviços as quedas de tensão são duas vezes mais frequentes. A diferença de frequência também é alta no caso de sobretensões e variação na indústria quando relativa a serviços.

Em estudo levantado pelo autor, as empresas anualmente investem cerca de 297,5 milhões de Euros em problemas de QEE, onde os custos com quedas de tensão ficam entre €2.120 e €4.682, sendo que as interrupções curtas são em média 3,3 vezes mais caras para a indústria e 9 vezes para serviços, já para a longas interrupções é de €91,021, entretanto para as sobretensões e transitórios ficam entre €120,000 e €180,000. (HORIA et al, 2018).

Segundo o mesmo autor as quedas de tensão podem causar erros de processos em equipamentos como Controladores Lógico Programáveis (CLPs), relés, contadores, fontes de alimentação e motores de acionamento, de forma que o seu tempo de inatividade resultante pode ser muito caro, causando perdas na produção. Uma queda de baixa tensão de até 70% da tensão nominal (ou seja, uma redução de 30%), menor que 100 milissegundos pode ocasionar quedas automáticas do sistema, resultando em perdas anuais estimada em €10 bilhões de

Euros. Algumas soluções para resolver os problemas de QEE podem ser dispendiosas para fornecedores, operadores e consumidores finais que os atendem. Para empresas, a solução completa em QEE pode custar em média de €388 e €1,115 por kW, excluindo a instalação do equipamento. É possível observar as consequências econômicas da QEE no fluxograma da FIG. 14.

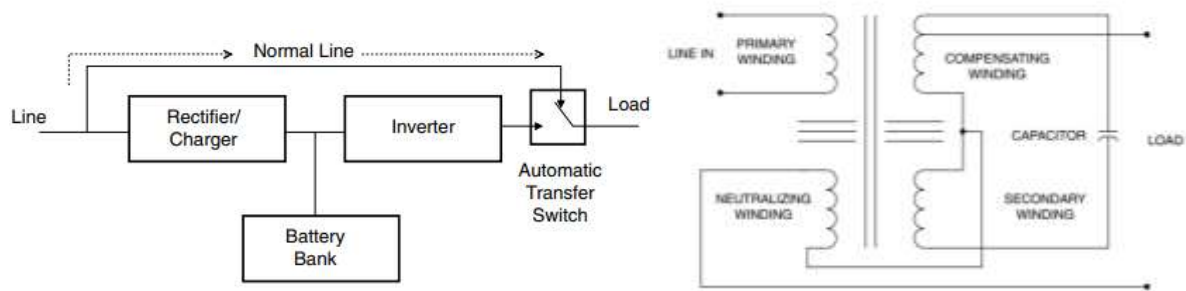
Figura 14 - Fluxograma - Consequência econômica da QEE.



Fonte: (Horia et al, 2018, p. 5)

Felizmente existem várias alternativas para proteção de uma instalação inteira e técnicas de projetos para sistema rígidos e flexíveis, com sistema automatizados mais robustos em relação a queda de tensão, onde as técnicas inclui a detecção dos tipos de distúrbios elétricos prováveis em uma empresa, limitando os efeitos de afundamentos de tensão, identificando componentes e equipamentos sensíveis a esses distúrbios como como métodos importantes para limitar os efeitos de quedas de tensão são: geradores de backup, transformadores de tensão constante (CVT), fontes de tensão ininterruptas (UPS), FIG. 15 e reguladores de tensão dinâmicos (DVR). (HORIA et al, 2018; ROGER et al, 2007).

Figura 15- Gerador ininterrupto de tensão em standby (UPS) e transformador de tensão constante (CVT)



Fonte:Electrical power System Quality (2007, p. 62-66)

O autor descreve que, em geral, uma interrupção de tensão pode interromper todos os processos de produção desprotegidos e os afundamentos de tensão podem afetar apenas parcialmente os processos de produção dependendo de sua amplitude e ou severidade, a gravidade do afundamento de tensão pode ser caracterizada pela multiplicação dos custos base da interrupção por uma relação representada pelo impacto relativo da queda de tensão (QT) em comparação com uma interrupção curta. Como exemplo se o custo base da interrupção for 1,0, para uma interrupção onde a queda de tensão seja de 50% de amplitude pode ocasionar 80% de impacto econômico da interrupção, apresentando um fator de correlação de 0,8. (HORIA et. al, 2018).

2.3.6 Sistema de armazenamento e os Impactos gerados ao sistema elétrico

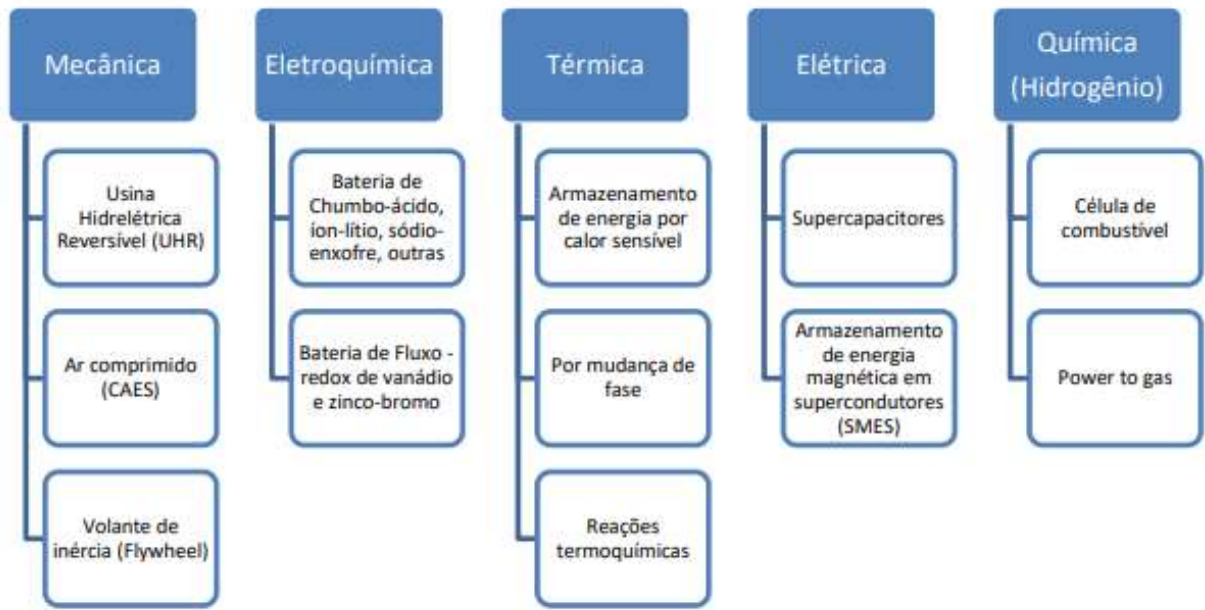
Segundo Horia et al, (2018) e Khalid, Muhammad (2019) Um sistema de armazenamento como um Uninterruptible Power Supply (UPS) é projetado para fornecer energia de forma ininterrupta para a carga, protegendo-a independente das condições de energia fornecida pela rede elétrica, fornecendo a energia armazenada, caso a tensão de alimentação caia abaixo de um valor predeterminado, fornecendo também uma qualidade na onda de tensão e corrente na entrada e saída.

No Brasil segundo Bueno e Brandão (2015) não há históricos disponíveis de instalação de Sistema de Armazenamento de Energia (SAE), no entanto a primeira hidroelétrica reversível do mundo foi construída no país, nos estados de São Paulo e é operada pela Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. (EMAE), onde a usina elevatória de pedra foi inaugurada em 1939, com a operação da unidade 4 (primeira unidade reversível em operação

comercial do mundo, funcionando tanto como geradora , como também como bomba.

Existem diversas alternativas tecnológicas para armazenamento de energia, onde cada uma delas apresentam vantagens, desvantagens e aplicações, na FIG. 16 são ilustradas as principais tecnologias em estudos. (EPE, 2019)

Figura 16 – Tecnologia para sistemas de armazenamento de energia elétrica



Fonte: Sistema de armazenamento em baterias EPE (2019, p. 8)

2.3.6.1 Algumas Possíveis aplicações dos sistemas de armazenamento ao SEP

Segundo Bueno e Brandão (2015), a aplicação dos sistemas de armazenamentos de energia (SAE) tem a capacidade de agregar à energia elétrica uma maior disponibilidade, qualidade e confiabilidade, e que a estrutura tradicional da rede elétrica é suportada pelo Sistema Elétrico de Potência (SEP), onde o mesmo trabalha como um sistema *just-in-time*, onde a energia produzida é toda utilizada.

Bueno e Brandão (2015) descreve que os sistemas de armazenamento de energia prestam-se a uma grande gama de aplicações e que podem ser condensadas em 4 grupos: Deslocamento de energia no tempo, capacidade adicional de fornecimento, integração de renováveis- geração intermitente e serviços ancilares.

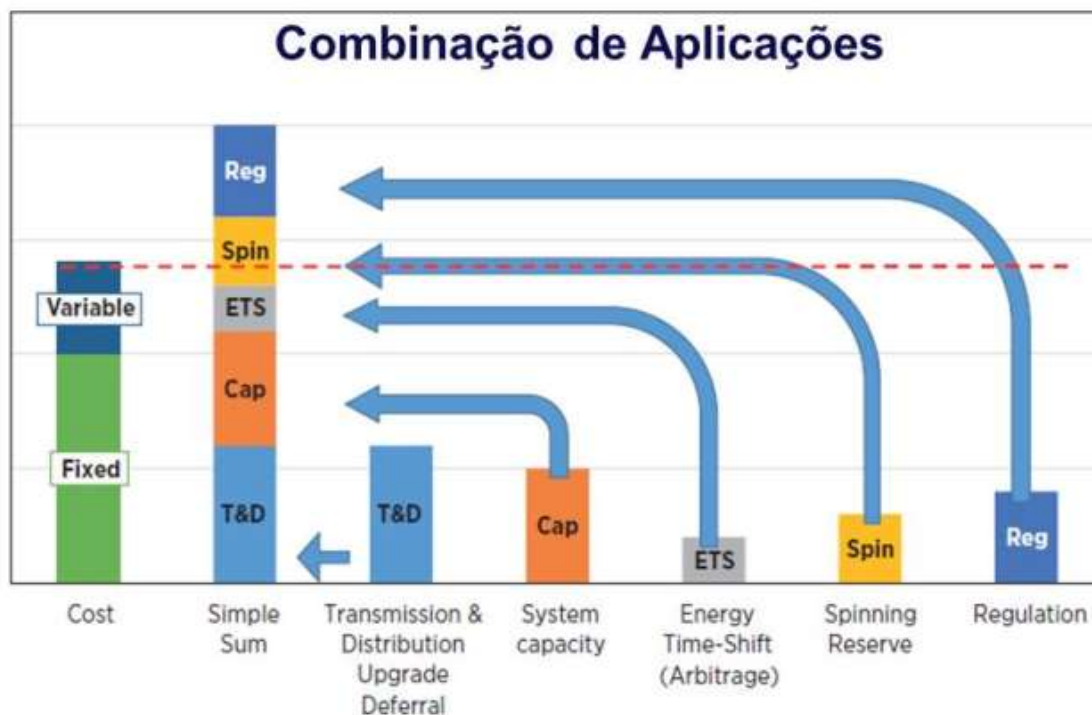
- Os sistemas de armazenamento intermediam fontes e cargas variáveis, movendo energia através do tempo de forma que a energia gerada em um dado momento pode ser utilizada em outro, neste caso é uma forma de obter vantagens na diferença de preços da energia elétrica nos horários de ponta e fora de ponta;
- Como capacidade adicional o sistema de armazenamento traz reforço do sistema de suprimento, principalmente quando uma carga demanda uma potência elevada por um período curto de tempo, assim evita a ampliação ou reforço do sistema elétrico de suprimento;
- Como integração de renováveis o sistema de geração distribuída, principalmente baseada nas fontes eólica e solar, podem prover o aplainamento da curva de geração e, mesmo, suprir energia por pequenos intervalos, durante uma indisponibilidade da geração;
- Como serviços ancilares ou auxiliares, o sistema de armazenamento traz grandes benefícios para a operação da SEP, podendo ser usado para aumentar a estabilidade dinâmica, capacidade de suprimento e a confiabilidade, podendo ser aplicado em: controle de tensão e frequência, reserva girante / reserva suplementar e controle de intermitência.

O armazenamento através de baterias apresenta grande potencial e destaca como uma das principais tecnologias a ser utilizada nas matrizes elétricas futuras, onde algumas de suas características justificam o grande crescimento de projetos desenvolvidos e a grande expectativa sobre o futuro das tecnologias., proporcionando alta densidade de energia, alta eficiência e baixo tempo de respostas em operação, flexibilidade tanto na capacidade de instalação quanto em possibilidade de alocação física, versatilidade de aplicação estendida, onde são exigidas respostas instantâneas e de alta potência durante um curto intervalo de tempo e aplicações de maior duração. (EPE, 2019).

O fluxo reverso de potência na variação da tensão pode prejudicar a QEE, o armazenamento em baterias também contribui com as concessionárias de energia operando para mitigar o fluxo de potência reversa injetado na rede elétrica de baixa tensão. Em sistemas residenciais o sistema de armazenamento em baterias se torna adequado, uma vez que reduz o fluxo reverso

de energia elétrica para a rede de baixa tensão, aumentando a confiabilidade do sistema, na FIG. 17 está representado as combinações de aplicação do armazenamento. (JEFFERSON A.C.; MATIAS e ALEXANDRE RASI AOKI, 2019)

Figura 17 - Combinações de Aplicação



Fonte: Sistema de armazenamento em baterias EPE (2019, p.15)

Segundo a *Solar Power Europe*, (2020), em seu relatório *Global Market Outlook For Solar Power / 2019 – 2023*, publicado em 2018, descreve que os sistemas de armazenamento de energia trazem segurança e baixo custo em residências ou em um espaço comerciais, reagindo muito rápido a uma restrição da rede elétrica, fornecendo um serviço de balanceamento da mesma a um curto prazo. As tecnologias para os sistemas de armazenamento podem ser

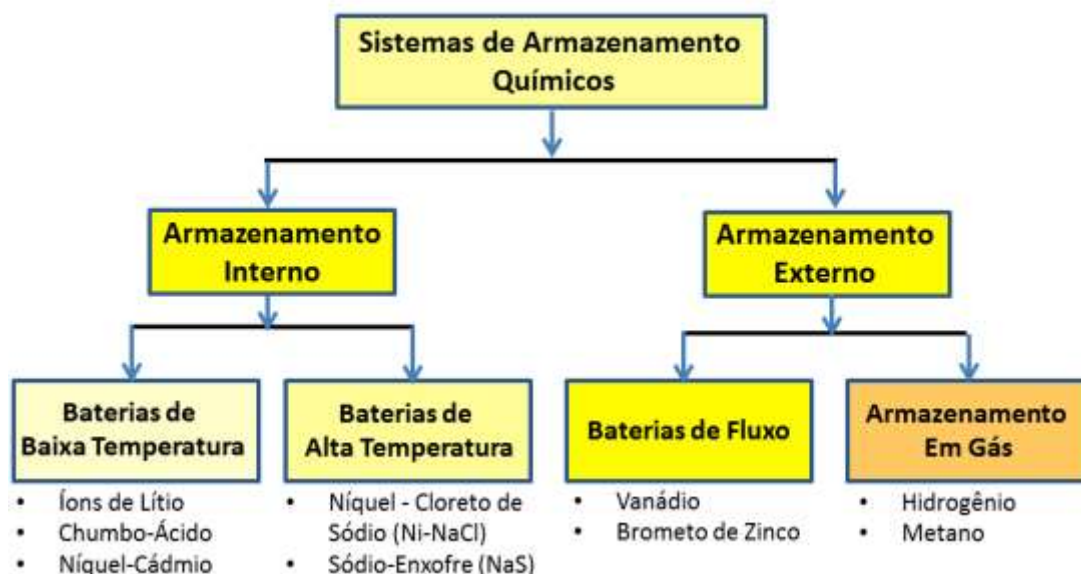
O custo com sistemas de armazenamento de energia tem diminuído muito nas últimas décadas, principalmente as baterias de lítio-ion, passando de 1.000USD/kWh, em 2010, para 200USD/kWh em 2017, outro benefício que o armazenamento de energia pode proporcionar é sua flexibilidade e poder aproveitar todo o potencial da energia solar, podendo despachar, a qualquer momento do dia, ajudando na regulação rápida e confiável de energia ativa e reativa dos sistemas de energia.

De acordo com a Bueno e Brandão (2015) e EPE, (2019), nos sistemas elétricos, os sistemas

que têm sido estudados ultimamente é o Híbrido composto por **baterias e supercapacitores** denominado HESS (*Hybrid Energy Storage System*), onde os **supercapacitores** quando comparados a baterias, tem um ciclo de vida bastante superior, porém com uma densidade de energia (W/kg) bastante inferior. (grifo nosso).

- Os **Sistemas magnéticos supercondutores**, são sistemas que armazenam energia por curtos intervalos de tempo e podem suprir grandes picos de potência com tempo de respostas muito rápido, porém com baixa capacidade de armazenamento, quando comparado a outras tecnologias.
- Nos sistemas mecânicos temos o **bombeamento reverso**, que é o sistema mais utilizado comercialmente, possui quantidade de energia armazenada teoricamente infinita, que depende apenas do volume do reservatório. No sistema de **ar comprimido** a energia é armazenada como ar comprimido em um reservatório, o sistema CAES adiabáticos armazenam o calor gerado durante o processo de compressão. Tem eficiência de 20%, sem a utilização de combustíveis e sem emissão de CO₂. (grifo nosso)
- No **Flywheel ou volante de inércia**, o sistema tem tempo de respostas muito rápido, podem armazenar grandes quantidades de energia e efetuam, teoricamente, infinitos ciclos de carga e descarga, são adequados a aplicações que demandam altos picos de potência durante curtos períodos de tempo, com altos números de ciclo de carga e descarga. (grifo nosso)
- Nos sistemas de energia elétrica **eletroquímicos**, FIG. 18, temos as baterias de Lítio (Li-ion), essas baterias armazenam o dobro de energia que uma bateria de hidreto metálico de níquel (NiMH) e três vezes mais que uma de níquel cádmio (iCd), existem outros sistemas de armazenamento em baterias como: chumbo-ácido, níquel cádmio, Sódio (sodium-níquel-chloride- Níquel-cloreto de Sódio), sódio enxofre, bateria de fluxo, vanadium redox, ferro-cromo, brometo de zinco, zinco-ar, etc. (BUENO; BRANDÃO, 2015) (grifo nosso.)

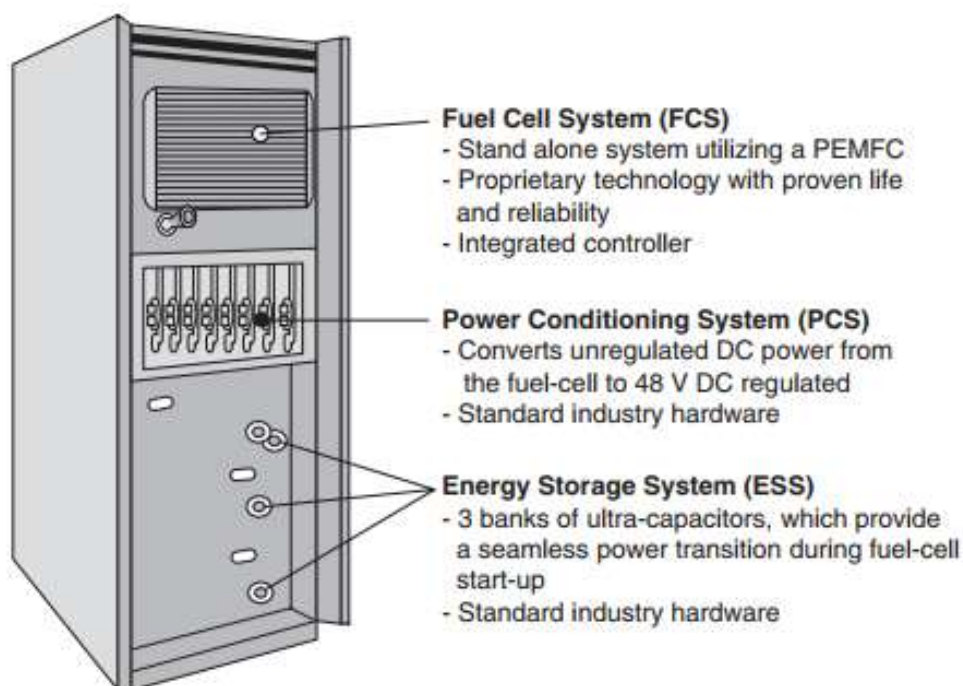
Figura 18- Sistemas de armazenamento químicos



Fonte: ABAQUE (BUENO; BRANDÃO, 2015, p. 12)

Khalid, Muhammad (2019) descreve que o sistema híbrido melhora a QEE dando suporte a contingência, atuando na regulação da tensão, frequência e inércia, e assim, contribuindo para uma fonte de alimentação ininterrupta para diversos perfis de carga. De acordo com o autor as fontes renováveis eólicas e fotovoltaicas possuem energias imprevisíveis e incontroláveis, pois dependem da natureza, essas variações causam perturbações e flutuação na energia, produzindo frequências prejudiciais e a variação da tensão, reduzindo a vida útil de certos aparelhos conectados à carga, sendo desta forma necessário o uso de armazenamento para absorver as flutuações abruptas de alta potência. Ainda segundo o autor, os sistemas de armazenamento de energia bidirecional, pode otimizar o sistema de perdas e custos com manutenção do sistema como um todo, já o sistema HESS foi estudado com a finalidade de prevenção de distúrbios na tensão e na frequência da rede. Na FIG. 19 é apresentado um sistema de armazenamento elétrico de célula combustível.

Figura 19- Sistemas de armazenamento elétrico de célula combustível



Fonte: (kusko; Thompson, 2007, p.137.)

2.3.7 Melhoria do perfil de carga, suavização de afundamentos e confiabilidade possibilitados pelos sistemas armazenamento

Cada unidade consumidora apresenta perfis de cargas bem variadas e imprevisível, com demandas de energias diferentes, esse tipo de variação podem causar harmônicos, variabilidade na magnitude da tensão e no baixo fator de potência. Em micro redes, se faz necessário o uso de *Energy Storage system* (ESS) para estabilizar o sistema devido a variações imprevisíveis e ou abrupta de cargas e assim, colabora na melhoria da QEE, garantindo que as cargas instaladas neste sistema funcionem de forma correta, e também como backup para a rede interconectada, compensando a demanda de energia e os picos de transitórios. (KUSKO; THOMPSON, 2007). (grifo nosso)

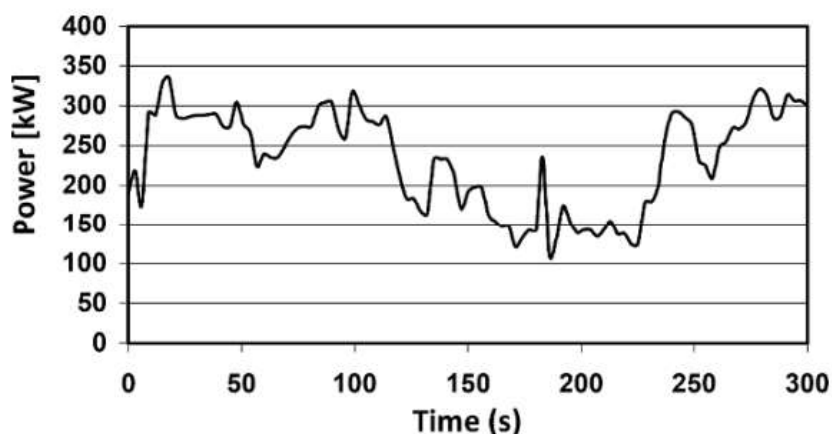
Nos Sistemas com **supercapacitores** SCSS (*Supercapacitor Storage System*), ele compensa a energia dos transitórios em carga abrupta, reduzindo a queda de tensão no barramento c.a, regula a energia desequilibrada em carga monofásica, enquanto a bateria fornece energia balanceada, o SCSS pode fornecer/ absorver a energia necessária para controlar a tensão, mantendo a tensão no barramento c.c. abaixo dos limites permitido e o fluxo de energia para

compensar a energia entregue a carga e a geração inconsistente. (KHALID, 2019).(Grifo nosso)

Os sistemas de armazenamento são bastantes úteis em sistema localizado em áreas remotas, onde a demanda de carga é de natureza estocástica e imprevisível, e a estabilidade da rede elétrica fica comprometida. Nestes sistemas existem o problema de QEE, como o desvio da tensão e em micro redes com cargas híbridas a magnitude da tensão e a frequência das cargas c.a. ficam comprometidas, neste caso o sistema de armazenamento fornece flexibilidade para desacoplar a demanda de geração e suprimento. (KHALID, 2019).

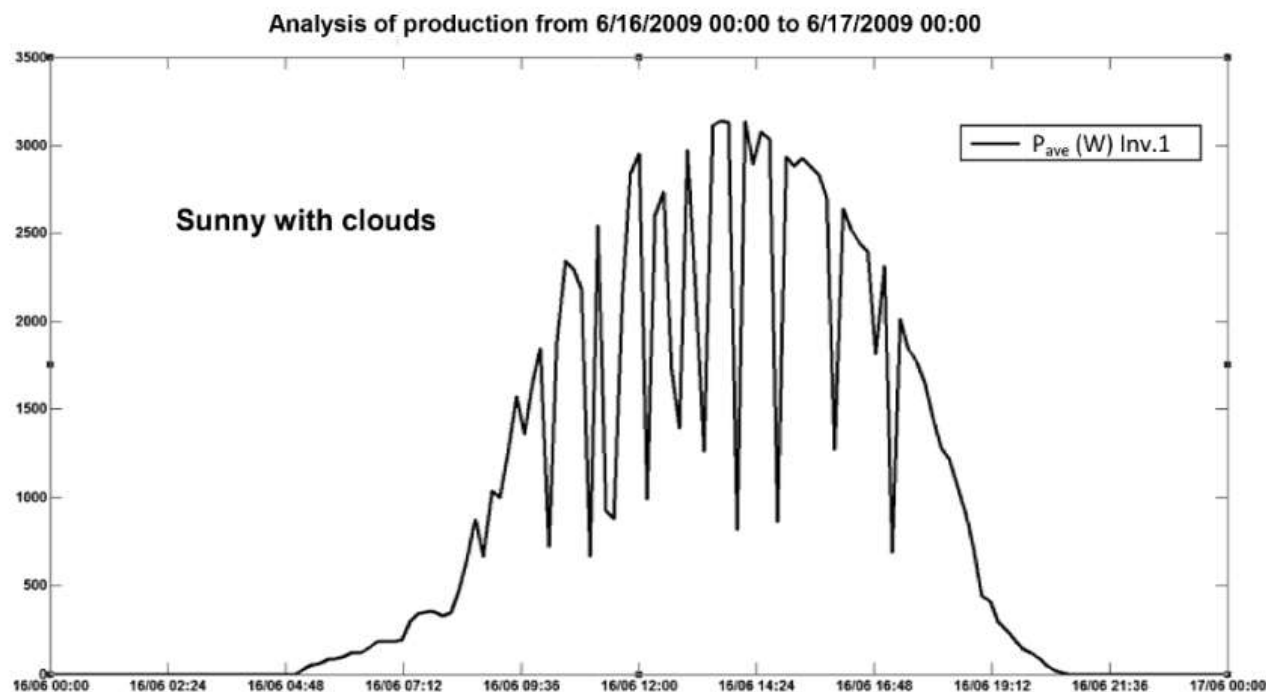
Bernoit et. al, (2015) descreve que desde o surgimento de fontes renováveis de energia, as redes elétricas foram forçadas a enfrentar a acomodação de produção altamente intermitente, como é o caso de energia eólica, fotovoltaica, maremotriz/ondamotriz e hídrica (através das pequenas centrais hidroelétrica - PCHs). A título de exemplo, a FIG. 20 apresenta a potência gerada por uma turbina eólica de potência instalada de 300kW, operando por um período maior que 5 minutos, e devido à alta variedade do recurso eólico sofre uma flutuação de potência da ordem de 100 kW em 3 segundos, já a FIG. 21 apresenta a oscilação da potência de uma usina fotovoltaica devido a presença de nuvens no período de um dia.

Figura 20- Flutuação de 100 kW durante 3 segundos em turbina eólica de 300 kW



Fonte: *Energy Storage in Electric Power Grids*, Bernoit et al (2015, p. 4)

Figura 21- Perfil de um dia ensolarado com nuvens em uma usina fotovoltaica.



Fonte: *Energy Storage in Electric Power Grids*, Bernoit et al (2015, p. 5)

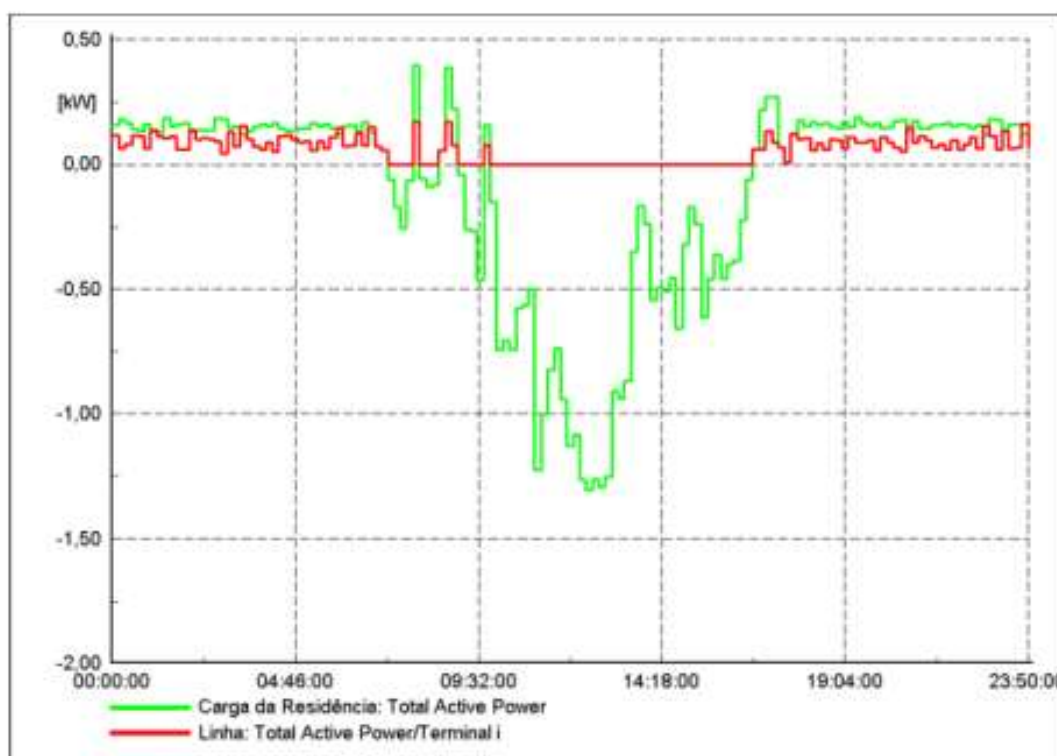
O consumo e o perfil de carga ficam em desequilíbrio, pois elas não ocorrem naturalmente, uma vez que o desenvolvimento de energias renováveis de alta variabilidade cresce, o armazenamento de energia elétrica produzida por essas fontes intermitentes, tornam possível a suavização e a produção para adaptar ao consumo. Outros serviços trazidos pelo armazenamento para a rede de energia elétrica é o controle local e dinâmico da tensão, suporte da rede em operação degradada, compensação de reativos, controle primário de frequência e estabilidade da frequência de rede, qualidade do fornecimento e continuidade, suavização de pico e garantia de um perfil de produção. As perturbações causadas por fontes renováveis intermitentes como: variação e, sensibilidade à temperatura, cobertura de nuvens, interrupção etc., trazem riscos à rede elétrica, como risco de colapso de tensão, riscos de sobrecarga e risco de perda de sincronismo. (BERNOIT et al, 2015).

Alguns problemas ocasionados nas redes de transmissão e distribuição são causados por circulação de energia reativa, devido seu caráter principalmente indutivo, dessa forma o armazenamento limita a queda de tensão nas redes de alta tensão, limitando as correntes aparentes e preservam a disponibilidade de reservas de energia reativa na geração centralizada.

Os serviços ancilares fornecidos pelos ESS, mantém equilibrado a frequência da rede e a tensão, trazendo estabilidade ao barramento. Ainda segundo o autor, vários estudos têm sido propostos a integração de sistema de armazenamento de energia conectado à rede com geração distribuída (GD) para reduzir o impacto negativo, e a injeção suave de energia de forma controlada traz uma maneira mais eficiente e a estabilidade da tensão. (NIETO, MARIS, VITA, 2016)

Segundo Matias. e Aoki (2019), o fluxo reverso de potência na variação da tensão pode prejudicar a QEE, enquanto usando o sistema de armazenamento de energia em baterias se obterá uma contribuição para mitigar esse fluxo de potência reversa, injetado na rede de baixa tensão como visto na FIG. 22 e assim aumentando a confiabilidade do sistema.

Figura 22 -Sistema de armazenamento de energia (2 kW/ 6 kWh)



Fonte: (Matias; Aoki, 2019)

Finalmente, como já destacado, os sistemas de armazenamento de energia (Energy Storage System-ESS) têm sido considerados por vários autores como: Bueno, Brandão, Bernoit,

Khalid, Muhammad, Gustavo pontes (EPE), entre outros, como solução para o problema de degradação da QEE, proporcionado pela crescente integração de fontes renováveis de energia à rede elétrica de energia. Os sistemas de armazenamento em baterias vêm apresentando crescimento acelerado no mundo nos últimos anos. (EPE, 2019).

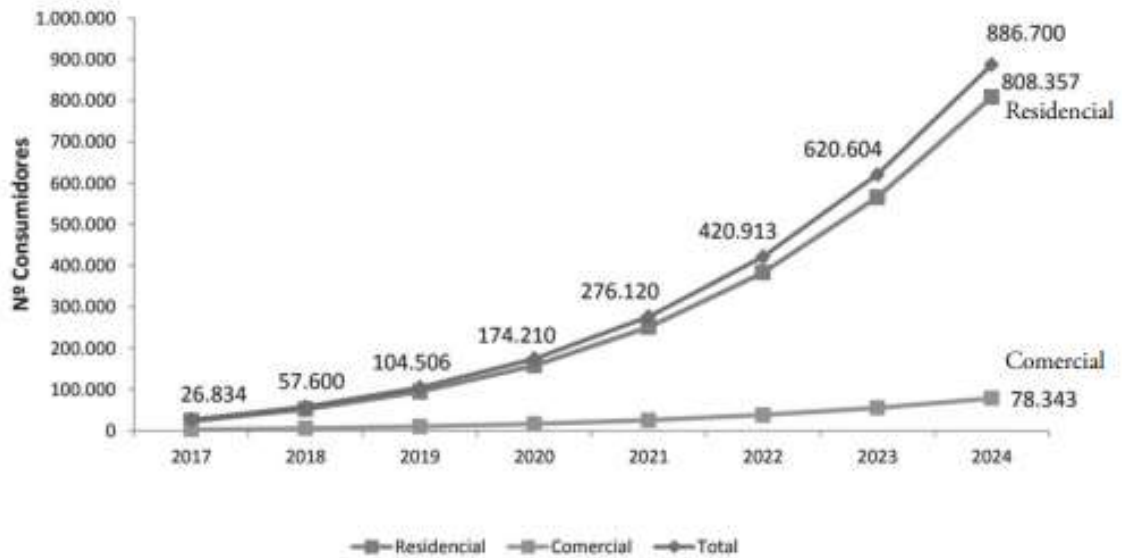
2.3.8 Impactos das Geração Distribuída (GD) conectados à rede e inserção de reativos

Alexandre et al (2014) define em seu estudo que a multiplicidade de fontes primárias pode agregar um maior grau de flexibilidade ao sistema de energia elétrica, e que, o sistema de geração fotovoltaica é um sistema mais dinâmico, pois podem ser instalados de forma rápida junto à carga, na forma de um sistema de geração distribuída. Porém quando instalados em grandes quantidades no sistema distribuídos, podem impactar a rede elétrica com distúrbios e perturbações, como por exemplo o aumento do perfil de tensão devido a relação X/R da linha de distribuição (LD), criando desbalanceamento das potências quando os geradores monofásicos são instalados em sistemas trifásicos, gerando o aumento das perdas devido ao fluxo reverso da corrente.

Segundo Yangwu et al (2018), lidar com cenários de sobretensão extrema com pequena probabilidade na energia de rede regionais e planejamento de energia reativa, requer grandes investimentos em compensadores VAR, no entanto, com base nas saídas de energias dos geradores e consumo de carga é possível melhorar o perfil de tensão injetando potência reativa da geração distribuídas. Essa mudança devido ao crescimento das GDs e as mudanças do sistema convencional unidirecional para o bidirecional traz prejuízo para a QEE.

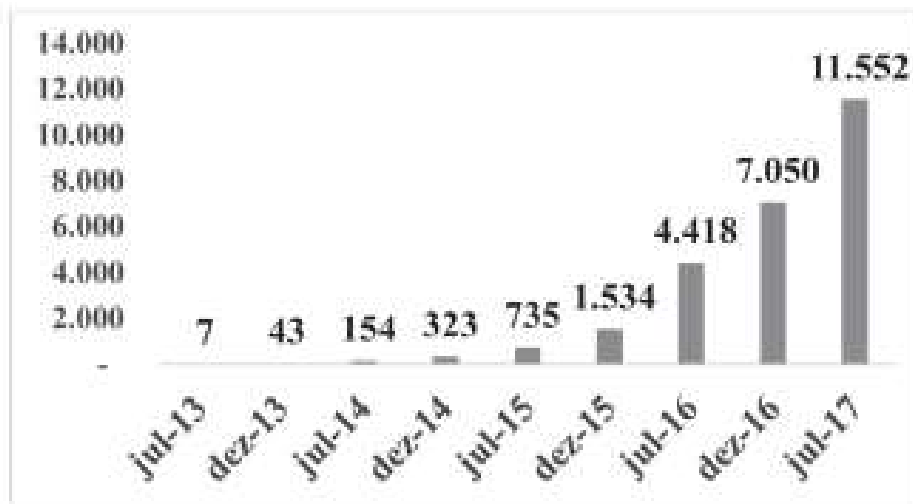
Nas FIG. 23 e 24, são apresentadas as estimativas de expansão do número de consumidores e da capacidade instalada para um cenário de 2017 a 2024 (CASTRO et. Al, 2017). Na literatura, segundo o autor, foram propostos diferentes meios para melhorar o perfil das tensões, e propostos alguns algoritmos para a tomada de decisão, que pode determinar a localização e o tamanho das GDs baseando na melhoria do perfil de tensão e na redução das perdas totais de energia reativa.

Figura 23-Gráfico do Número de Micro Geradores Estimados: 2017-2024



Fonte: ANEEL, apud CASTRO et. al 2017, p. 20)

Figura 24-Gráfico da Evolução no Número de Instalações com Micro e Mini Geração Distribuída: 2013-2017



Fonte: ANEEL, apud CASTRO et. al, 2017, p. 21)

De acordo com Dantas e Apolônio (2019), o problema de regulação de tensão são os mais críticos e que podem impactar a rede elétrica na inserção de grandes quantidades de sistemas fotovoltaicos. Uma das medidas propostas para resolver os problemas, ou diminuí-los, é usar controles do fluxo de potência ativa e reativa dos inversores e armazenamento de energia através de baterias para regular a tensão, regulando o fator de potência e melhorando o nível

da tensão da rede elétrica.

2.4 Comportamentos das tensões e correntes em sistema monofásicos e polifásicos

Segundo Mariani e Silva (2017), os sistemas de energia podem ser monofásicos, composto por uma fase e um neutro, podendo ser de correntes contínuas ou alternadas, abrangendo curtas distâncias, por exemplo as redes residenciais e as rurais. São sistemas utilizado geralmente em iluminação, aquecimento e pequenos motores elétricos, seu comportamento está representado na FIG. 25, possuindo apenas uma onda senoidal. Enquanto a polifásica possui duas ou mais ondas senoidais onde apresenta diferença de fase constante, nos sistemas bifásicos a defasagem [é de 180° , O sistema bifásico é geralmente encontrado em zonas rurais e são compostos por duas fases e um neutro, composto por duas ondas senoidais e o trifásico tem ângulo de fase de 120° e são compostos por três ondas senoidais representado na FIG. 26. É o mais usado na geração e transmissão de energia elétrica por permitir a transmissão de forma mais econômica, por demandar menos material e gerar menos perdas quando comparado com o sistema monofásico e bifásico, a potência gerada é constante por serem mais eficientes na distribuição, são mais leves e podem atingir grandes distâncias com menos perdas.

Figura 25-Tensão na Corrente monofásica

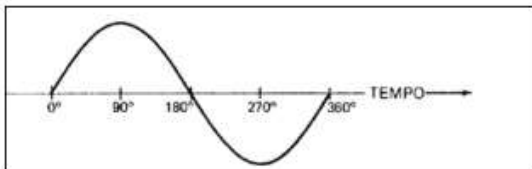
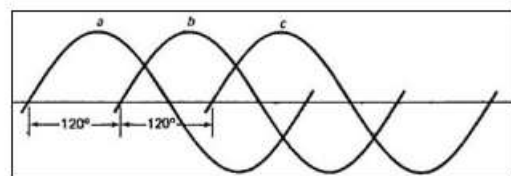


Figura 26-Tensão na corrente trifásica



Fonte: (Mariani; Silva, 2017, p. 40-41)

2.5 O que as normas definem sobre a qualidade da energia elétrica (QEE).

De acordo com Oliveira, J., Oliveira, L. e Raquel (2017), os sistemas trifásicos devem ser providos de tensões senoidais de mesma magnitude em todas as fases e defasadas de 120° entre si, entretanto, em sistemas reais as tensões e corrente apresentam comportamentos distintos em cada fase provocada pela distribuição assimétrica das cargas monofásicas nas redes elétricas. Os desequilíbrios entre as tensões podem depreciar a vida útil de dispositivos, aumentando as perdas, sobreaquecimentos, sobrecarregar os isolamentos e comprometer a operação do sistema.

Como destaque às regulamentações brasileiras, mais especificamente o módulo 8 do Prodist (Procedimentos de Distribuição da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), definem os percentuais de desequilíbrio de forma a não ultrapassar 3% da tensão nominal menor ou igual 1kV e 2% da tensão nominal para tensão entre 1kV a 230kV, como representado na TAB. 2. Para a flutuação da tensão o verificado num período de 10 minutos. Na TAB. 3 são apresentados os limites para flutuação de tensão (PRODIST MÓDULO 8, 2018).

Para a rede básica a ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) define por meio do submódulo 2.8, que os desbalanceamentos das tensões devem ser restritos a 2% e 1,5% considerando os limites globais e individuais. (ONS, 2008). A ISO 50001 estabelece como requisito para a gestão de um sistema de energia, a melhoria do seu desempenho energético global incluindo a utilização de consumo e eficiência energético.

Tabela 2 - Limites para os desequilíbrios de tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: Prodist módulo 8, (2018, p. 17)

Tabela 3 - Limites para flutuação de tensão

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
Pst95%	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: PRODIST Módulo 8, (2018, p. 19)

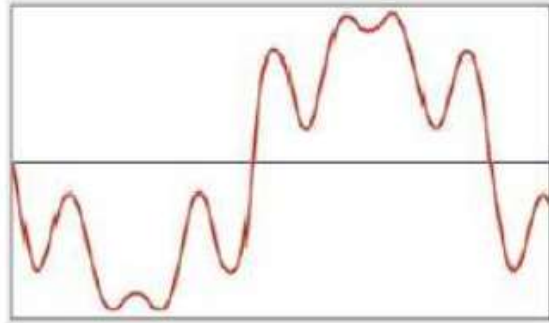
2.5.1 Problemas com harmônicos

Apesar deste trabalho não focar em harmônicos e sim em afundamentos de tensão, vale apenas ressaltar um pouco sobre o assunto e seu impacto na qualidade de energia elétrica, principalmente em cargas não lineares.

Rocha, Joaquin Eloir (2016) define que os aspectos considerados na qualidade do produto energia em regime permanente ou transitórios são os harmônicos, as variações de tensão de curta duração, a flutuação de tensão, os transitórios, os desequilíbrios de tensão, a tensão em regime permanente, o fator de potência e a variação de frequências são fenômenos são

associados a deformação nas formas das ondas das tensões e correntes quando comparado a onda senoidal da frequência fundamental, FIG. 27.

Figura 27- Forma de onda distorcida



Fonte: (Rocha, Joaquim Eloir, 2016, p. 8)

Segundo Das. J.C. (2015) os sistemas de energia elétrica devem ser projetados, não apenas para correntes e tensões senoidais, mas também para cargas não lineares e comutadas eletricamente. As distorções harmônicas são um dos principais problemas para garantir uma certa qualidade de energia. Ele ainda afirma que o interesse na análise de harmônicos vem desde o início da década de 1990, em conexão com sistemas c.c, de alta tensão (HVDC) e compensadores estáticos.

As cargas não lineares têm aumentado nas últimas décadas e segundo Das J. C. (2015) e estima-se que 60% das cargas nos sistemas serão não lineares, e isso traz uma grande preocupação com harmônicos, pois eles têm origem do cumprimento de uma determinada qualidade de energia, e leva aos problemas relacionados de efeito na operação de equipamentos elétricos, na análise e controle de harmônicos.

As cargas não lineares são fontes de geração de harmônicos e são relativamente menos tolerantes a baixa qualidade da energia elétrica que se origina da emissão de harmônicos dessas cargas. Alguns exemplos de cargas não lineares são:

Ciclo conversores, fornos a arco, laminadores, fontes de alimentação de modo de comutação, computadores, copiadoras, aparelhos de televisão e eletrodomésticos, transformadores, motores, etc, todas elas são fontes geradoras de harmônicos. Reduzir a tensão e a distorção da forma de onda da corrente para níveis aceitável tem sido um problema no projeto dos sistemas de potência desde os primeiros dias da corrente alternada. (ARRILLAGA; WATSON, 2003).

Segundo Arrillaga e Watson (2003) a organização amplamente reconhecida em padrões de qualidade de energia elétrica é a IEC (*International Electrotechnical Commission*), com sede em Genebra, a IEC definiu padrões de compatibilidade eletromagnética (EMC), para lidar com o problema da QEE. A IEC 61000-3-2 inclui harmônicos e inter-harmônicos como um dos fenômenos eletromagnéticos de baixa frequência, ela define limites para a emissão de harmônicos para equipamentos que solicitam correntes até 16 A por fase, podem ser válidas para tensões, porém igual ou superior a 220V, a IEC 61001-4 fornece justificativa para limitar as emissões de correntes harmônicas e inter-harmônicas conduzidas por frequências de energia de equipamentos na faixa de 9kHz. A IEC61000 2-4 fornece níveis de compatibilidade harmônica e inter-harmônica para instalações industriais.

Outra alternativa difundida para a IEC é o documento da IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), que fornece diretrizes sobre harmônicos, essa norma, IEEE 519-1992, sofreu alterações e atualmente é chamada IEEE 519-2014. Ela identifica as principais fontes harmônicas em sistema elétrico de potência (SEP), nela incluem conversores de potencias, fornos a arco, compensadores VAR estático, inversores, controle eletrônico de fase de potência, cicloconversores, fontes de alimentação comutada e acionamentos modulados por largura de pulso (PWM), esta norma não tem como filosofia preocupar com o que ocorre dentro das instalações, mas sim com o que as instalações podem injetar na rede elétrica e portanto, atingir outros consumidores. (ARRILLAGA; WATSON (2003); KUSKO; TOMPSON (2007).

No Brasil a regulamentação é feita pelo Módulo 8 do PRODIST, o modulo é composto de três seções, Qualidade do produto, qualidade do serviço e qualidade do tratamento de reclamações. Também define limites adequados, precários e críticos para tensão em regime permanente.

Segundo o PRODIST (2018) a tensão em regime permanente deve ser avaliada por meio de um conjunto de leituras obtidas por medições apropriadas, os níveis de tensão devem ser avaliados nos pontos de conexão à rede de distribuição, nos pontos de conexão entre distribuidoras e nos pontos de conexão com as unidades consumidoras. Com relação ao fator de potência o PRODIST determina que para unidade consumidora ou conexão entre distribuidora com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve

estar entre 0,92 e 1 (indutivo) ou 1,0 e 0,92 (capacitivo).

O PRODIST não define limites para os harmônicos de correntes elétricas, somente para os harmônicos de tensão. Na TAB. 4 e 5 são apresentados os valores de referências globais das distorções harmônicas totais em porcentagem. Para o desequilíbrio de tensão são limitados de acordo com a TAB. 2, e para a flutuação de tensão os limites usados par avaliar o desempenho do sistema de distribuição descrito na TAB. 3. Para a variação de frequência ela estabelece uma faixa de 59,5Hz a 60,5Hz, ela também classifica as variações de tensão de curta duração, ver TAB. 1.

Tabela 4 - Distorções harmônicas totais de tensão

<i>Tensão nominal do Barramento</i>	<i>Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]</i>
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

Fonte: (Rocha, Joaquim Eloir, 2016, p.10)

Tabela 5 - Distorções harmônicas totais para tensões - PRODIST Módulo 8.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{F95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{I95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

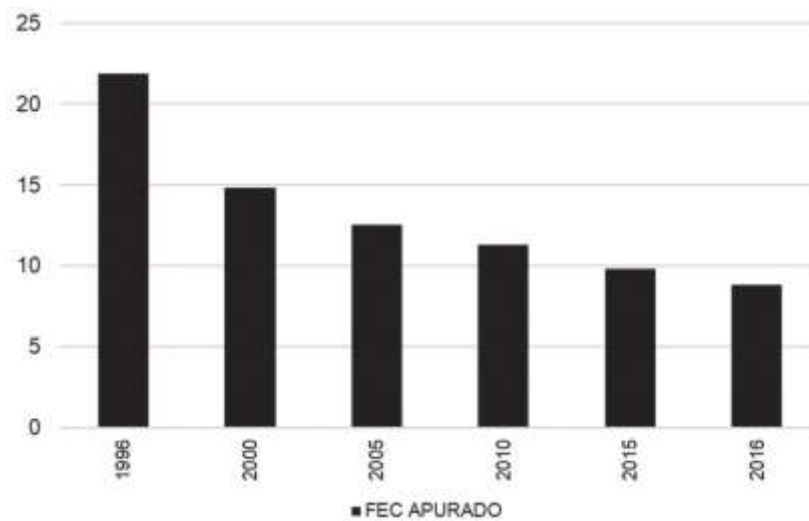
Fonte: PRODIST Módulo 8 (2018, p. 15)

2.5.2 Confiabilidade do sistema e indicadores de qualidade de energia elétrica

A confiabilidade de um sistema de energia está ligada diretamente a qualidade do fornecimento de energia elétrica, pois como o sistema está sujeito a ocorrências, é importante que estes sejam concebidos e operados de forma a promover a confiabilidade, os consumidores desejam poder consumir a energia na hora e na quantidade que lhes convém. A confiabilidade pode ser medida por índices usado para avaliar seu grau como o FEC

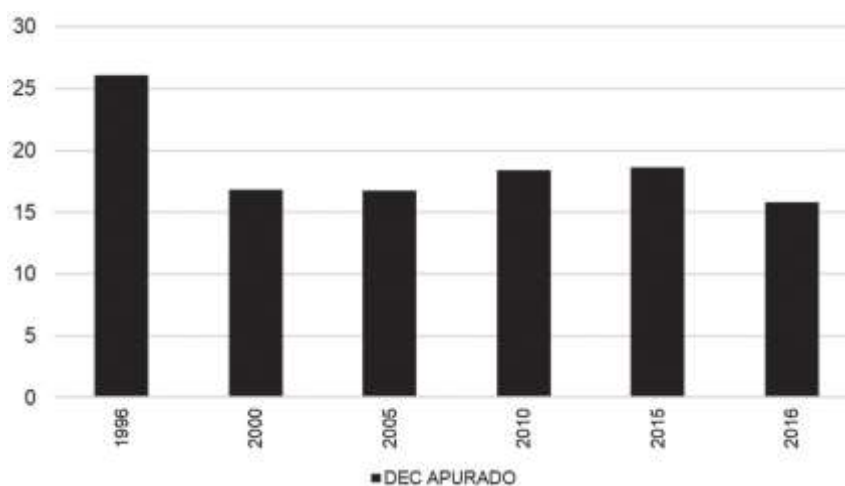
(Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). no gráfico da FIG. 28, o FEC apresentou queda ao longo de praticamente todo o período e o DEC, FIG. 29, apresentou queda substancial entre 1996 e 2001, houve uma estabilização entre 2003 e 2008 e elevou em 2009. Nas FIG. 30 e 31 são apontadas as tendências para a melhoria dos indicadores referentes a carga interrompidas. (*White Paper* do Instituto Acende Brasil, 2014).

Figura 28-Gráfico da Evolução do Índice FEC: 1996-2016 (em nº de Interrupções).



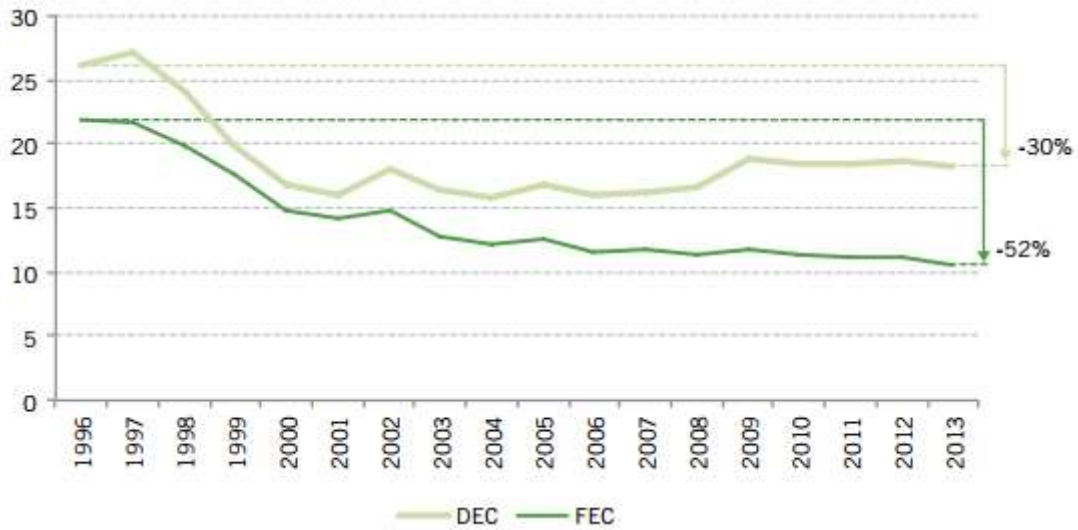
Fonte: ANEEL, apud CASTRO et. al (2017, p. 13)

Figura 29- Gráfico da Evolução do Índice DEC: 1996-2016 (em horas).



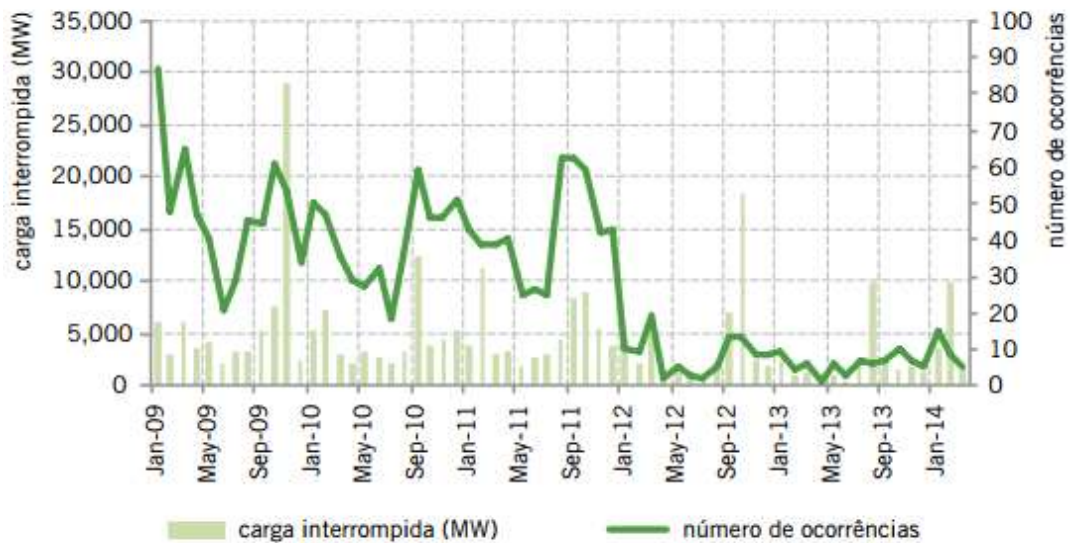
Fonte: ANEEL, apud CASTRO et. al (2017, p. 13)

Figura 30-Trajetória dos indicadores de continuidade.



Fonte: *White Paper* do Instituto Acende Brasil (2014, p.11)

Figura 31- Número de ocorrências e demanda interrompida no sistema interligado e no sistema isolados.



Fonte: *White Paper* - Instituto Acende Brasil (2014, p. 12).

2.6 Considerações finais

Este capítulo destacou alguns conceitos importantes que tange a qualidade da energia elétrica, onde foi delineado o embasamento teórico, tais como: o mercado de energia, as considerações propostas por vários autores no que se refere aos distúrbios eletromagnéticos, custo e impactos causados por afundamentos de tensão, os impactos positivos e negativos dos

sistemas de armazenamentos e das GDs conectados à rede elétrica como forma de minimizá-los ou mitigá-los. Baseado nestas informações, este trabalho será focado em um item muito importante no contexto de qualidade de energia, os afundamentos de tensão, onde será avaliado o impacto da operação de inversores associados aos sistemas fotovoltaico, através da injeção de reativos, na severidade de tensão, com o objetivo de analisar estes fenômenos através de simulações computacionais realizada através do PSCAD.

3 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os circuitos elétricos das modelagens realizadas, como também as configurações e detalhes das simulações. Existem uma gama de programas para simulações tais como: Photovoltaic Systems Software (PVsyst), System Advison Model (SAM), o Quite Universal Circuit Simulator (QUCS), Power System Simulation and Analysis (PSS/E), Power Factory, MatLab/ Simulink etc. As simulações foram implementadas através do software PSCAD. Foi escolhido este software pela facilidade de manuseio e por ter uma biblioteca completa. Neste contexto, foram utilizados três circuitos: (circuito 1, circuito 2 e circuito 3), que possuem o objetivo de analisar a minimização de severidade de afundamentos de tensões ou violação de níveis de tensão, causado por faltas, cargas desbalanceadas e perfis de cargas diversas, através da injeção de reativos por conversores estáticos acoplados a sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. A versão utilizada foi o *PSCAD edição 4.6.3.0 Free edition*.

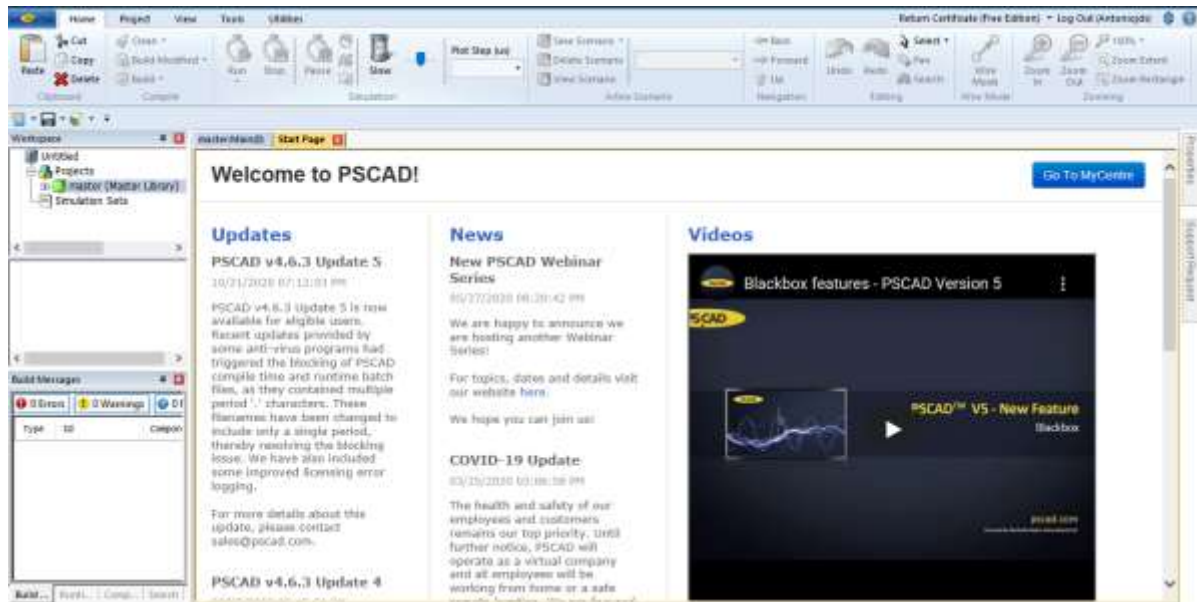
3.2 Modelagem computacional (software)

Pesquisando na base de conhecimento do PSCAD versão 4.6.3 (2018), é possível ver que é um software que contém centenas de artigos relacionado a ele. Segundo a base de dados, à medida que os sistemas de energia evoluem, a necessidade de ferramentas de simulação precisas e intuitivas se tornam cada vez mais importantes. Com o PSCAD é possível construir, simular e modelar muitos sistemas com facilidade, fornecendo possibilidades ilimitadas nas simulações de sistema de energia. O software possui uma biblioteca muito abrangente de modelos de sistemas que vão desde elementos passivos simples e funções de controle de máquinas elétricas a outros dispositivos complexos. É um software que se beneficiou com mais de 40 anos de pesquisas e desenvolvimento contínuo. (Tradução nossa)

Segundo a base de dados do O PSCAD, ele é o software com pacotes de simulações de transitórios de sistema de energia mais popular do mundo. O PSCAD possui uma edição proprietária e uma edição gratuita, a edição gratuita é perfeita para simular sistemas pequenos, e para uso como ferramenta de demonstração. A versão gratuita é caracterizada e limitado apenas pelo tamanho da rede e alguns outros recursos não essenciais, essa versão é gerenciado

pela própria Manitoba Hidro International Ltd., uma solução baseada na nuvem, que licencia o aplicativo através de certificados. A FIG. 32 apresenta a tela inicial do PSCAD. (Tradução nossa)

Figura 32- Tela principal do PSCAD



Fonte: PSCAD 4.6.3

O PSCAD possui algumas características, as principais são:

- **PRSIM**, é o aplicativo que permite a usuários converterem dados de rede padrão PSS/E ou PowerFactory para PSCAD com tempo de esforço mínimo. Ele converte os arquivos de dados PSS/E e Power Factory para PSCAD V5.0 e V4.6, é possível importar dados dinâmicos, dados de sequência de importação etc.
- **Inicializador PSCAD**, é um programa para cálculo de transitórios eletromagnéticos (EMT) que simula o comportamento de uma rede de sistemas de energia após uma perturbação, como uma falta, ou uma operação de disjuntor. Seu objetivo é configurar as condições adequadas de fluxo de energia, como por exemplo, tensão correta e ângulo nos barramentos, fluxo de energia ativos e reativos etc., na FIG. 33 são apresentados as ferramentas ou tela de componentes. (Tradução nossa).

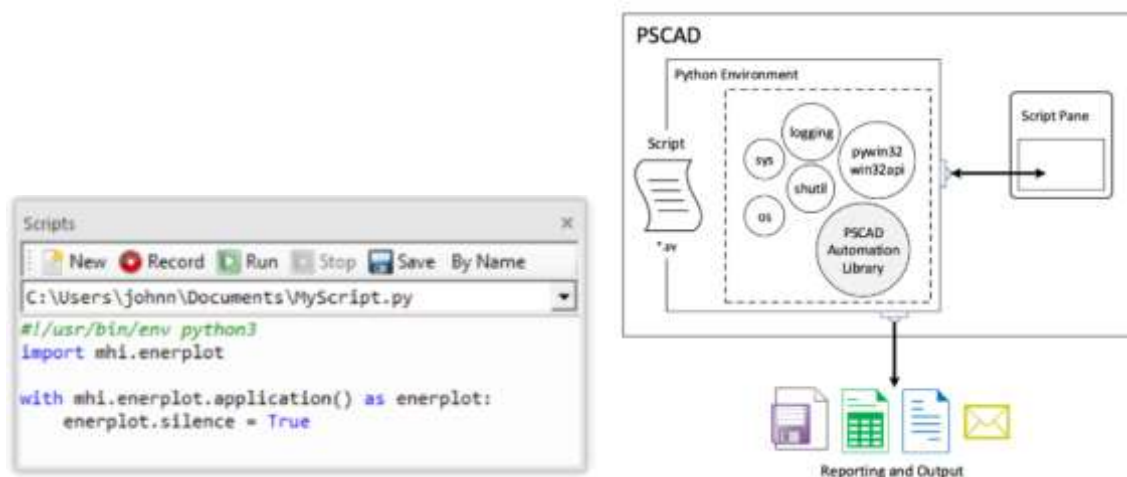
Figura 33 - Tela de componentes



Fonte: PSCAD 4.6.3

- **Automação:** Scripting python incorporado com gravação a partir da V4.6.1. São comandos para carregar e executar simulações e já vem incluso na instalação do PSCAD, permitindo que usuários mantenha seus script dentro do PSCAD, a FIG.34 apresenta o painel de script .

Figura 34 – Painel de Script



Fonte: PSCAD 4.6.3

- **Análise nodal aumentada e modificada (MANA) em EMTDC,** é uma extensão de análise nodal que tem como função determinar as tensões de nó do circuito, e algumas correntes de ramificação

- **Algoritmo de Sparsidade KLU em EMTDC**, onde o KLU é um pacote de software para resolver sistemas lineares esparsos de equações que surgem em aplicação de simulação de circuitos.
- **Biblioteca de Modelos MMC**, na versão 5 foi incluído uma biblioteca de modelos de componentes *multilevel converter* (MMC);
- **Aprimoramento de modelo de biblioteca mestre geral**, nesta biblioteca é possível executar suporte de sinal complexo, suporte ao sinal de matriz, resumo estático de gravação de várias excursões, aprimoramento FFT;
- **Atualização de caixa preta**, são recursos que dão suportes as redes elétricas,
- **Tratamento de arquivos de recursos externos**. São realizados através de dois campos de entrada separada nas configurações do projeto ou através do componente *File Reference*;
- **Interface de co-simulação**, nessa interface de programação em geral podem ser usadas para personalizar uma interface no lado externo do aplicativo.
- **Mistura de sistema de transmissão aérea e subterrânea**, possui um editor do segmento para linhas de transmissão área ou subterrânea e o programa de constante de linhas (LCP), onde são feitas a combinação de torres de transmissão aéreas e seções transversais de cabos, etc.

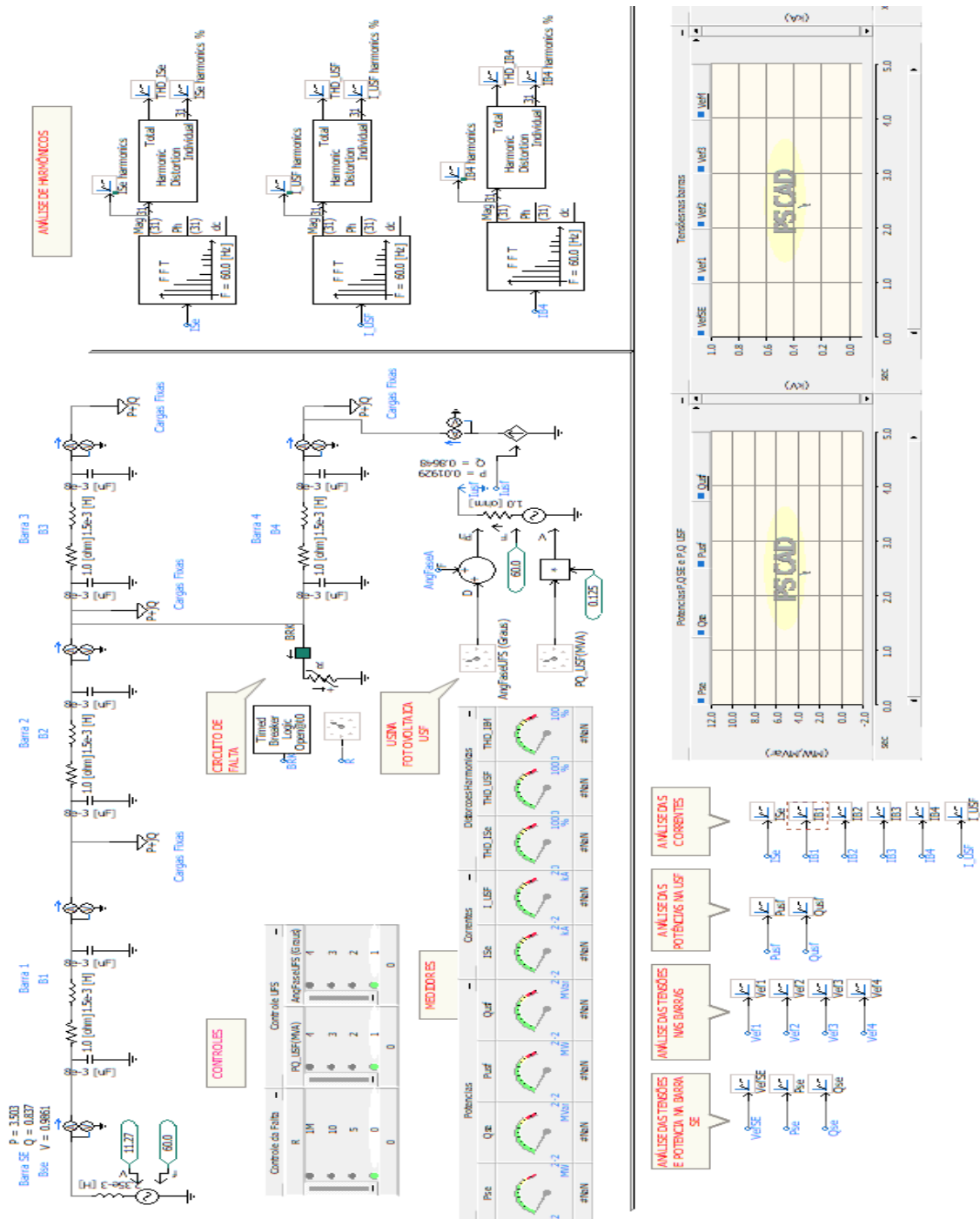
3.3 Análise e Resultados das Simulações nos Três Circuitos

No software PSCAD os geradores conectados por inversores, independente da fonte primária, podem ser representados por uma fonte de corrente controlada para o estudo de desempenho da rede elétrica. Nesta parte do trabalho, serão apresentadas modelagens de sinais para a análise da rede elétrica, utilizando uma fonte de corrente ideal controlada representando por uma USF, pois deseja-se controlar a corrente de saída dos inversores e desta forma, analisar detalhes sobre os impactos de perfil de tensão, perdas e fator de potência causado pela

penetração da USF na rede elétrica, como a melhoria através da injeção de potência ativa e reativa. (ALEXANDRE et al, 2014)

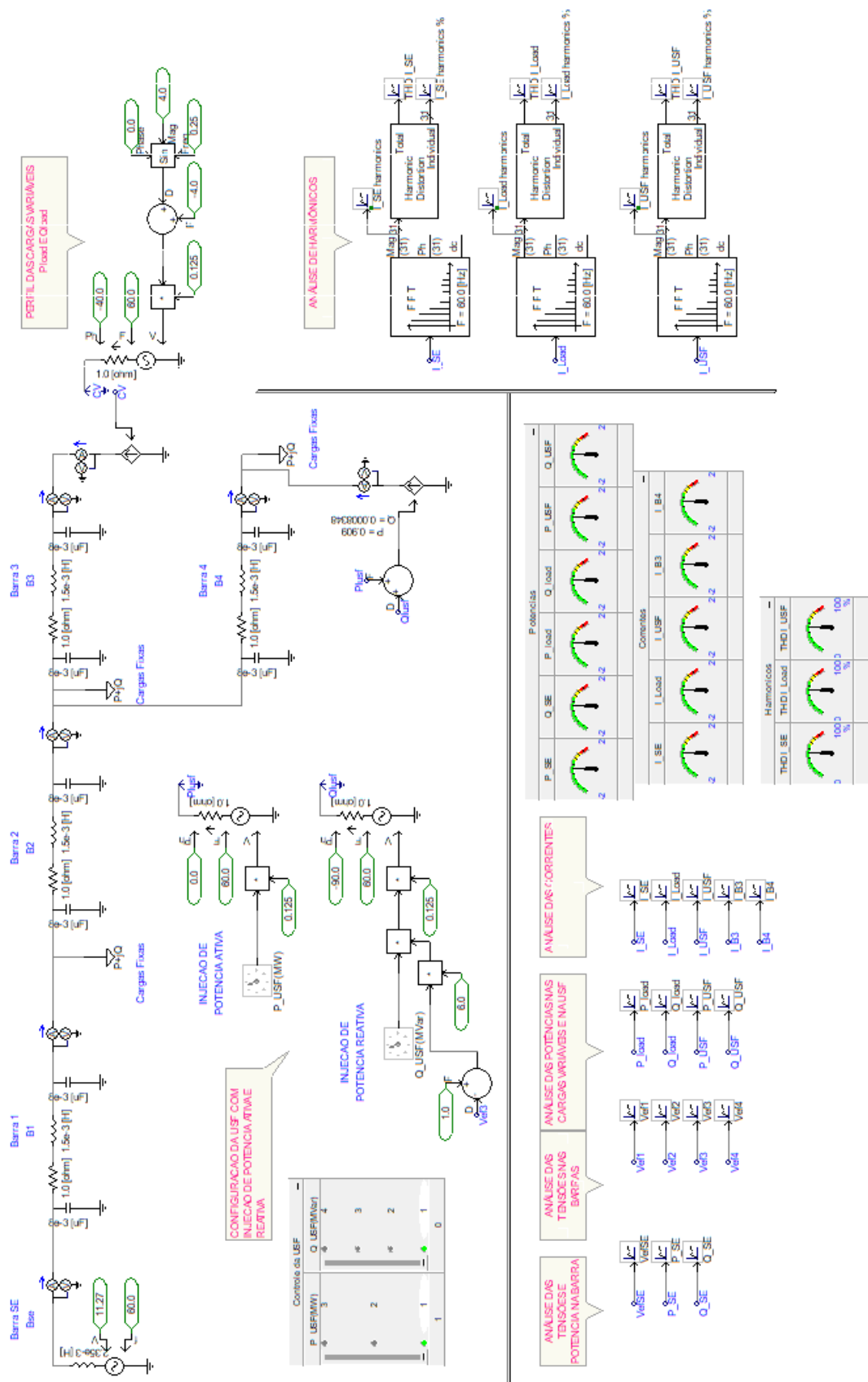
Os circuitos representarão uma rede de distribuição monofásica com faltas, cargas lineares e não lineares, cargas fixas, cargas variáveis e perfis de cargas diversas. Os três circuitos simulados são apresentados na FIG. 35, 36 e 37.

Figura 35- Circuito completo da simulação 1.



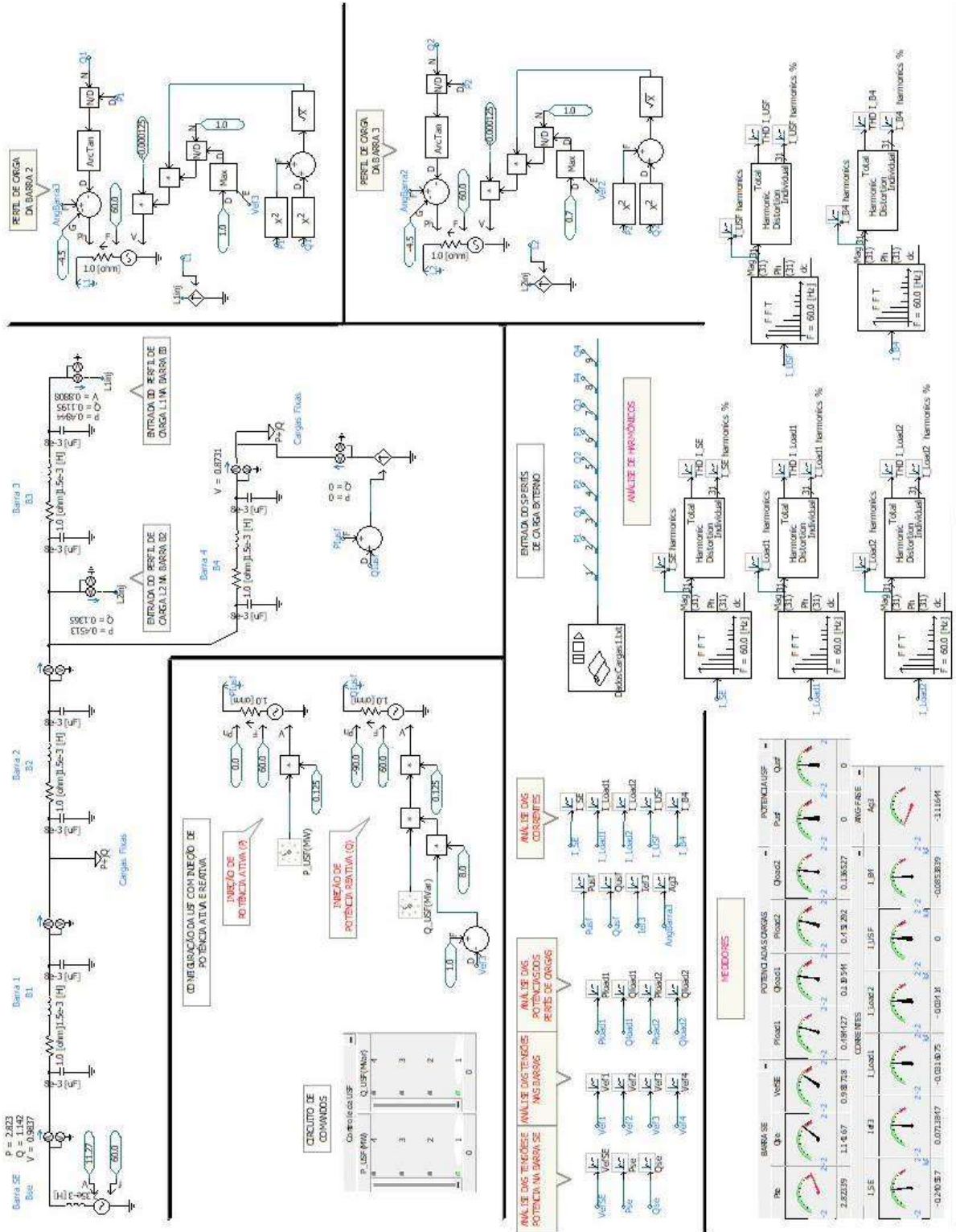
Fonte: Autor.

Figura 36- Circuito completo da simulação 2.



Fonte: O autor.

Figura 37- Circuito completo da simulação 3.



Fonte: O autor.

Na primeira simulação realizada, ver FIG. 35, o circuito é interligado a um circuito de falta composto por uma resistência (R) e um disjuntor (BRK), uma Usina fotovoltaica (USF) que tem a capacidade de injetar potência reativa denominada PQ_USF, como também regular o ângulo de fase FaseUSF, o circuito de falta está conectado entre a barra 2 e 4 e a USF está conectada a barra 4.

Na segunda simulação realizada, ver FIG. 36, foi removido o circuito de falta e a carga fixa conectada na barra 3, que foi substituída por um circuito de carga variável. O circuito da USF foi reestruturado e conectada na mesma barra 4 da simulação anterior, porém agora será possível por ela injetar potência ativa P_USF e Reativa Q_USF.

Na terceira simulação, como representado na FIG. 37, foram substituídas as duas cargas fixas na barra 2 e na barra 3 por dois circuitos de perfis de cargas variáveis L2inj e L1inj.

3.4 Detalhes das simulações

3.4.1 Análise da minimização da severidade de afundamentos de tensão da rede elétrica através da injeção de reativos pela USF

Esta simulação tem por objetivo analisar a minimização da severidade de afundamentos de tensão da rede elétrica através da injeção de reativos pela usina fotovoltaica (USF) durante uma falta, para tal, serão seguidos alguns procedimentos descritos a seguir.

3.4.1.1 Procedimentos

Os seguintes procedimentos serão aplicados nas simulações.

- 1) Avaliação 1- Com a USF desligada, serão avaliadas as tensões nas barras BSE, B1, B2, B3 e B4 para condições sem e com falta (resistência de falta $R_f = 5 \Omega$ e 10Ω).
- 2) Avaliação 2- Nessa avaliação será introduzida a USF, onde será verificada a diminuição da severidade do afundamento de tensão provocado pelo curto-circuito. A simulação será iniciada com a USF com potência nula e após o curto-circuito será inserida a USF para os seguintes parâmetros da TAB. 6. Cabe salientar que durante a simulação serão injetadas potências ativas e a variação do ângulo de fase.

Tabela 6- Potência Ativa e Ângulo de fase.

1	Potência	1 MVA	ângulo 0°
2	Potência	2 MVA	ângulo 0°
3	Potência	4 MVA	ângulo 0°.
4	Potência	1 MVA	ângulo 23°
5	Potência	2 MVA	ângulo 23°
6	Potência	4 MVA	ângulo 23°
7	Potência	1 MVA	ângulo -90°
8	Potência	2 MVA	ângulo -90°
9	Potência	4 MVA	ângulo -90 ^a

Fonte: O autor.

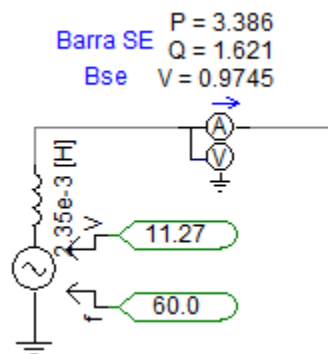
3.4.1.2 Detalhes dos principais componentes do circuito de simulação

O circuito desta simulação é composto por uma fonte de tensão monofásica de 60 Hz, 6 medidores (multímetros), 4 circuitos PIs formado por dois capacitores de $8\mu\text{f}$ aterrado, uma resistência de 5Ω , e um indutor de 1,5 mH, também é composto por 4 cargas, um resistor de falta, uma fonte de corrente interligado ao circuito e uma Usina Fotovoltaica (USF).

3.4.1.3 Características da Subestação (SE)

Na FIG. 38, é apresentado a barra SE que é composta por uma fonte com frequência de 60Hz configurada para uma tensão monofásica de 7,97kV, com circuito de impedância R/RL com resistor serie e paralelo de 1Ω (ohm) e indutância de 0,1 H, e o circuito R-L-C com resistência de 1Ω , indutância de 0,1H e capacitância de $1\mu\text{F}$, detalhe da barra SE, maiores informações da configuração completa se encontram no anexo 1.

Figura 38-Detalhe da barra SE.

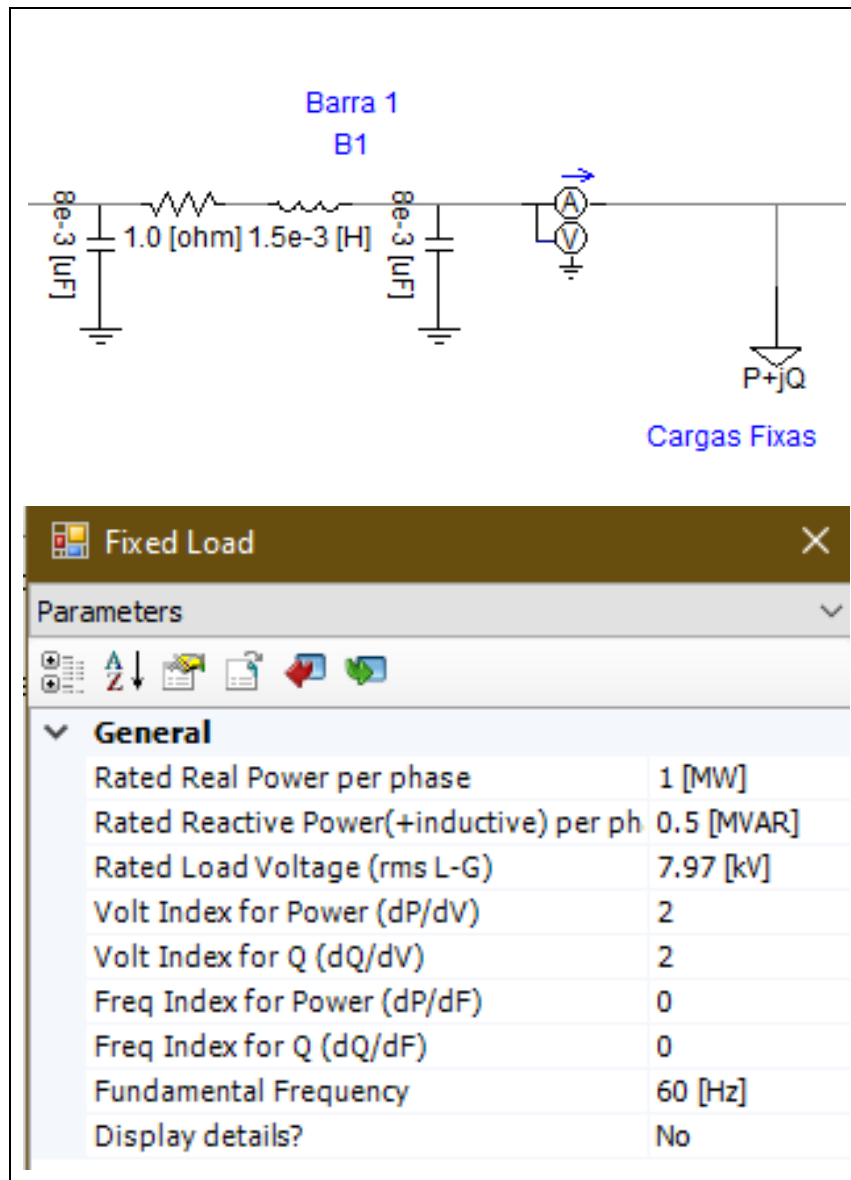


Fonte: Autor.

3.4.1.4 Características da barra e das cargas fixas nas barras

O circuito primário é composto de 4 circuitos PIs formado por dois capacitores de $8\mu\text{F}$ aterrado, uma resistência de 1Ω e um indutor de $1,5\text{ mH}$, e 4 cargas configuradas da seguinte forma: Potência Ativa de 1 MW , potência Reativa Indutiva de $0,5\text{ MVAR}$, tensão rms de $7,97\text{ kV}$, frequência de 60 Hz , tensão para potência Ativa (dP/dV) = $2,0$ e tensão para potência reativa Q (dQ/dV) = $2,0$ como visto na FIG. 39 detalhe da barra 1.

Figura 39-Detalhe, configuração da Barra 1 e da carga fixa.

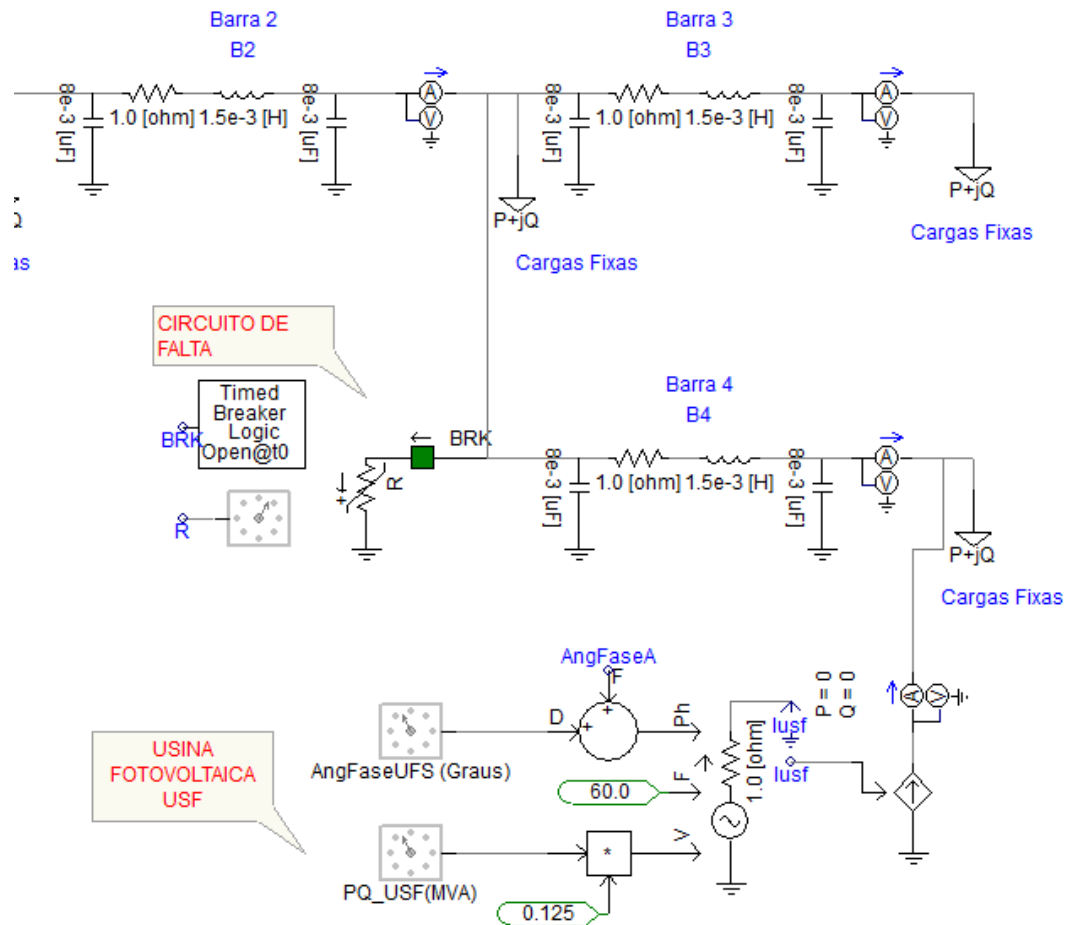


Fonte: O autor.

3.4.1.5 Detalhes das barras 2, 3 e 4

As barras 2, 3 e 4 seguem a mesma configuração da barra 1, onde foi inserido entre as barras 2, 3 e 4 um circuito de falta e um time *breaker*, simulando um disjuntor, com os parâmetros mostrados na FIG. 40 e após a barra 4 foi inserida a usina fotovoltaica (UFS).

Figura 40- Detalhe das Barras B2, B3, B4 e o circuito de falta.

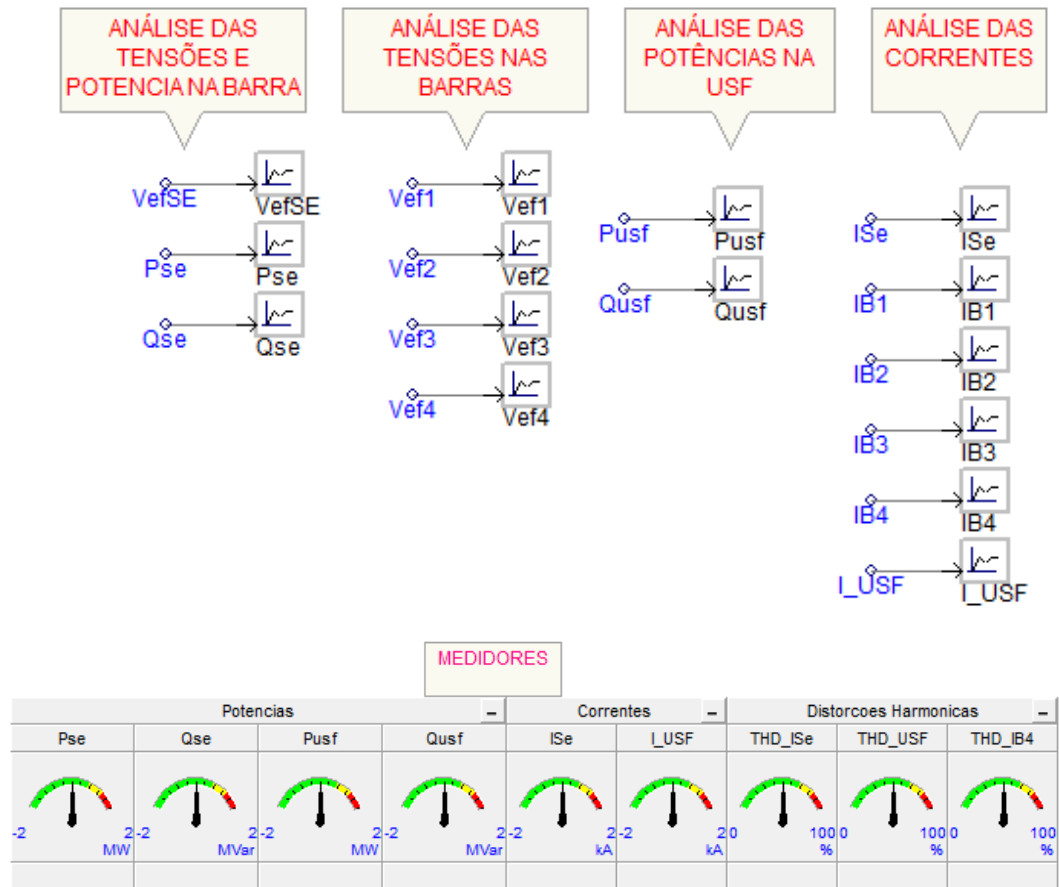


Fonte: O autor.

3.4.1.6 Características dos medidores e sinais de saídas das análises de tensão e corrente

Foram criados 5 sinais de saídas para tensão nas barras, V_{efSE} , V_{ef1} , V_{ef2} , V_{ef3} , V_{ef4} ; dois sinais para a análise das potências ativas e reativas na SE, P_{se} e Q_{se} e dois sinais para análise das potências ativas e reativas na USF, P_{usf} e Q_{usf} , também foram inseridas saídas para possibilita a análise das correntes, na FIG. 41 estão representados os sinais de saída e os medidores instantâneo.

Figura 41- Sinais de saídas para as tensões, potências nas barras e medidores.

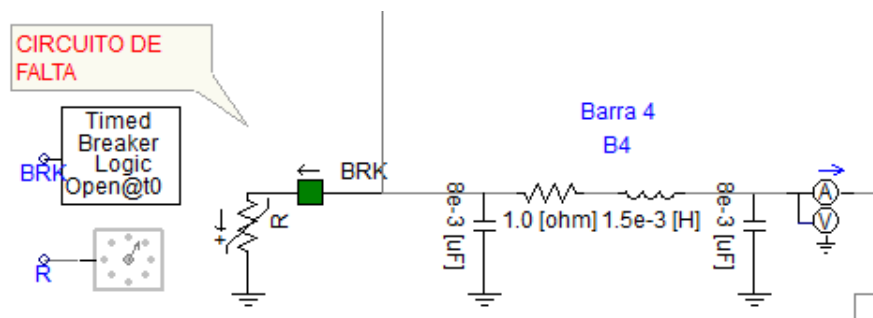


Fonte: O autor.

3.4.1.7 Característica do circuito de falta

No sistema foi inserido um circuito de falta com o controle da resistência externo utilizando um controle chave rotativa (Dial) para a troca das resistências de falta. O circuito de falta é composto por BRK interligado a um resistor variável R com faixa de variação de 0 a 10 Ω aterrado, configurado para 2 tempos em um estado inicial aberto no 1º tempo de 2s e no 2º de 4s, ver FIG. 42, detalhe do circuito de falta.

Figura 42-Detalhes do circuito de falta.



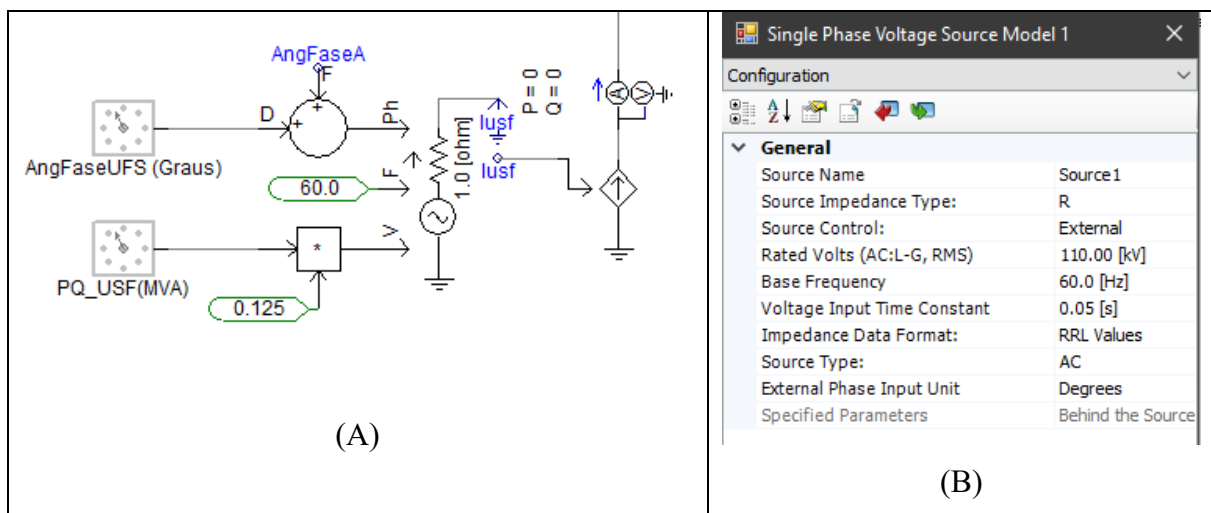
Fonte: O autor.

3.4.1.8 Característica da Usina Fotovoltaica (USF)

Na FIG. 43A, está representado a usina fotovoltaica USF, que é composta por uma fonte de tensão e uma fonte de corrente controlada pelo sinal gerado pela fonte de tensão, injetando potência ativa e reativa na rede elétrica, o controle dessa fonte de corrente é feita externamente através dos Dial de Ângulo de fase e Dial de Potência reativa.

A fonte de tensão, FIG. 43B, é controlada externamente através dos parâmetros tensão (V), frequência (F) e ângulo de fase (Ph). Os parâmetros internos das fontes, configuráveis pelo usuário: Tensão de 110kV, frequência de 60Hz, barra AC com magnitude de 132,79056kV, frequência inicial 60Hz, tensão na barra DC com magnitude de 100kV e circuito Rrl série e paralelo de 1ohm e indutiva de 0,1H, são descartados pelo controle externo.

Figura 43-Detalhes da Usina Fotovoltaica (USF) e da configuração da Fonte de Corrente.



Fonte: O autor.

3.4.1.9 Características dos circuitos de comando e saída de Harmônicos

Ressalta-se que este trabalho não tem como foco analisar os harmônicos e sim afundamentos de tensões e minimização das severidades desses afundamentos. A análise de harmônicos foi introduzida para demonstrar as possibilidades de análise oferecidas pelo PSCAD e mostrar que harmônicos variantes no tempo podem surgir atrelados a variações nas formas de onda da tensão, não correspondendo aos harmônicos típicos de cargas não lineares que perduram no sistema por um longo tempo, de acordo com o tempo de funcionamento da carga. São simplesmente harmônicos que surgem porque há variação na curva de tensão.

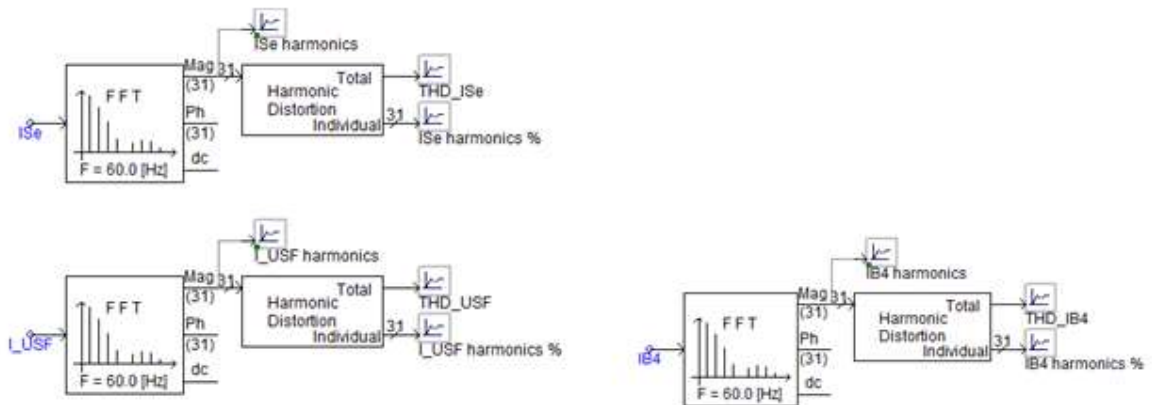
Foram inseridos no circuito três sistema de comandos, como representado na FIG. 44 e 45., uma para o controle das correntes de faltas e outro dois para o controle da USF, também foram inseridas saídas para análise de harmônicos com magnitude de 31 para a análise do THD (Distorções Harmônicas Totais). A análise de harmônicos é facilitada pelos recursos do PSCAD e foram inseridos de forma a complementar a análise dos afundamentos de tensão. Os circuitos de comando são compostos pelos seguintes componentes: três Chave seletora do tipo Dial para a inserção de potências Reativa (Q) para a USF de 4 posições, ângulo de fase de 0° , 23° , -90° e $+90^\circ$ e controle de falta R para o comando das resistências de falta, uma fonte de corrente de 132,79kA, frequência de 60Hz, tempo de 1s, constantes de conversões de 0,125 para correção da potência reativa Q, onde, -90 capacitivo e $+90$ indutivo.

Figura 44- Detalhes dos controles de falta (R) e da USF.

Controle da Falta		Controle UFS	
R		AngFaseUFS (Gra...	PQ_USF(MVA)
	4		4
	3		3
	2		2
	1		1
	0		0

Fonte: O autor.

Figura 45- Análise de Harmônicos.



Fonte: O autor.

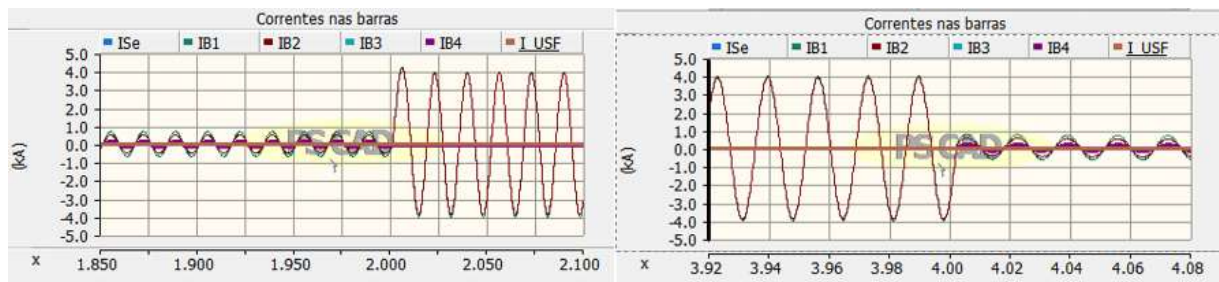
3.4.1.10 Resultados da Simulação 1- Minimização da severidade de afundamentos de tensão

3.4.1.10.1 Análise com a USF fora de operação

a) Circuito aberto, resistência de falta R=0.

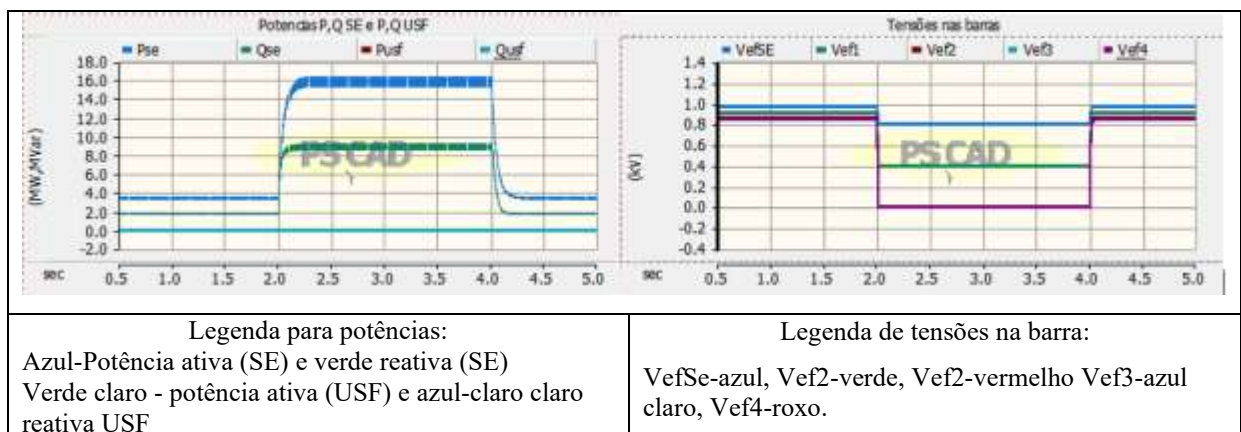
Na FIG. 46, simulação com $R=0$, circuito aberto, no momento em que ocorreu a falta no tempo entre 2s e 4s, houve uma sobrecorrente, saindo de 0,56 kA e chegou a 4,2 kA e após cessar a falta em 4s a corrente voltou ao parâmetro normal, Já na FIG. 47, a direita, gráfico de tensão foi verificado que em todas as barras houveram afundamentos de tensões, sendo que nas barras Vef 2, 3 e 4 a tensão chegou a zero durante a falta, na barra VefSE (azul) o afundamento foi de 0,8p.u. e na barra Vef1(verde) o afundamento chegou a 0,4p.u.. Já a esquerda, gráfico de potências, a potência ativa na Pse (azul) subiu de 3,31MW para aproximadamente 16 MW e a reativa Qse (verde) de 3,26 MVar para 9,10MVar.

Figura 46- Gráficos para resistência de falta $R=0$, correntes nas barras, Se, B1, B2, B3, B4 e USF



Fonte: O autor.

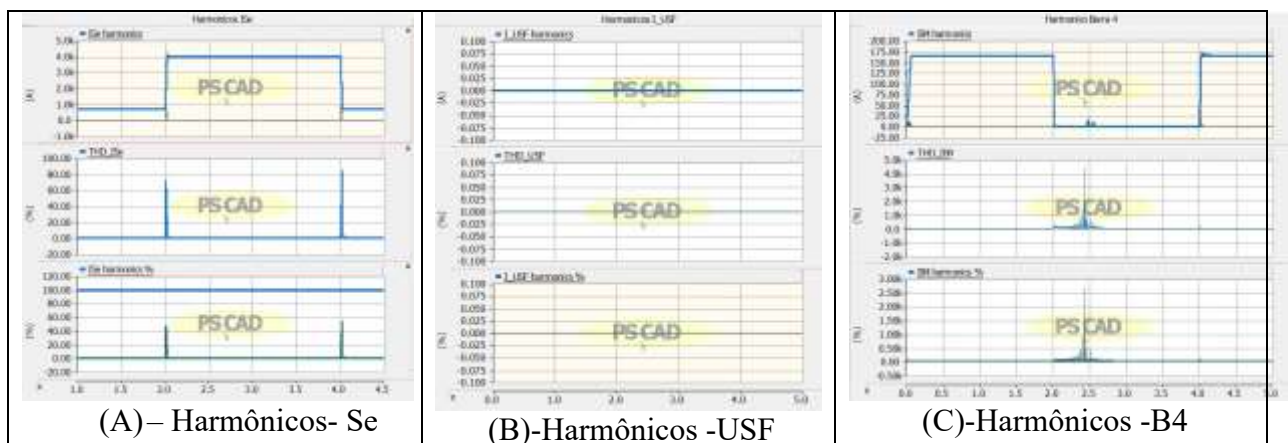
Figura 47- Gráficos para resistência de falta $R=0$, circuito de Potências e tensões nas barras



Fonte: O autor.

Durante as simulações apareceram harmônicos e na sua análise FIG. 48A, observou-se que quando ocorreu a falta, houve um aumento na corrente de harmônicos gerados na barra SE chegando à magnitude de 4 kA, que perduram até o final da falta, o THD sobe para 71,96% em 2s e 82,64% em 4s até cessar a falta, é possível ver que não houve harmônicos na USF, FIG. 48B, porque ela estava fora de operação. Na barra 4, FIG.48C, a corrente de harmônico chegou a 0 no intervalo de 2s a 3s e pequenas elevações em 2,5s com magnitude de 15A onde houve o maior pico individual aos 2,4s com magnitude de 2,5% e THD de 4%. Estes resultados demonstram que harmônicos variantes no tempo, e de curta duração, podem ter origem em afundamentos de tensão, porém quando a severidade do afundamento diminui, a onda fica mais suave e logo os harmônicos tendem a ficarem mais suave. Lembrando que são harmônicos que apareceu em função da forma de onda e não dos harmônicos típicos de cargas não lineares que são gerados por cargas permanentes prejudiciais.

Figura 48- Harmônicos.



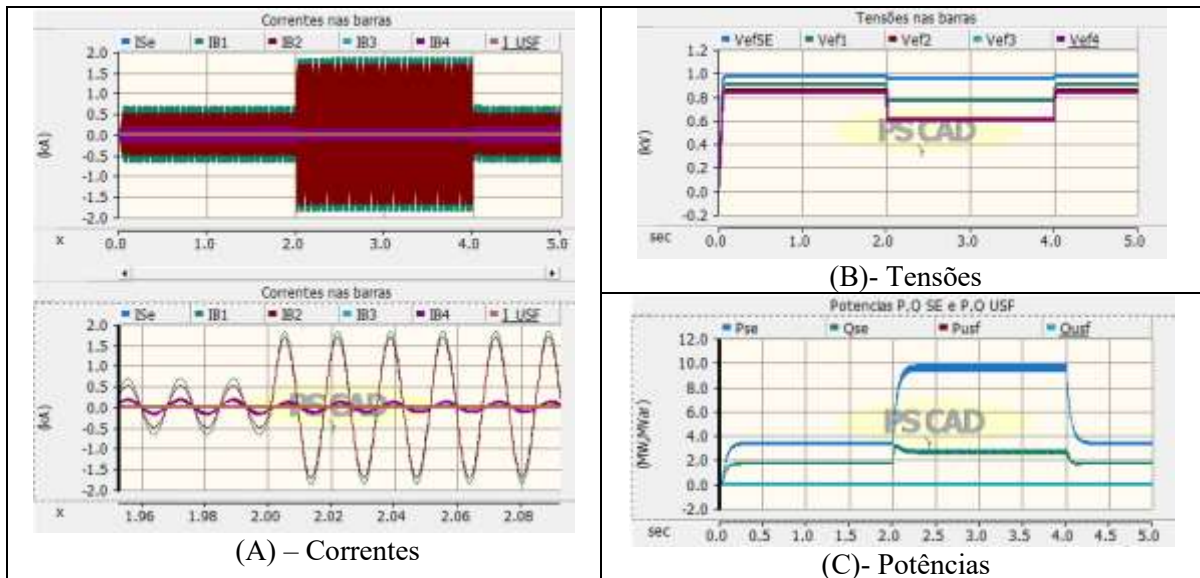
Fonte: O autor.

b) Circuito com resistência de falta $R=5 \Omega$.

• Correntes, tensões e potências nas barras

Na FIG. 49A e TAB. 7 é possível notar na parte de correntes que houve elevação delas nas barras ISe, IB1e IB2, já nas barras IB3 e IB4 a variação das correntes foi bem pequena durante a falta e não houve alteração na corrente I_USF por estar fora de operação. Na parte de tensões FIG. 49B e TAB 7 é possível notar afundamentos de tensões, sendo que o pior afundamento foi verificado na barra VefB4 quando ocorre a falta., chegando a 0,6p.u.. Na parte das potências FIG. 49B e TAB. 7 foi possível notar elevações das potências ativas PSe de 3,42 MW para 9,75 MW e na parte de reativo QSe a elevação saiu de 1,61 MVAR para 2,67 MVAR, não houve injeção por parte da USF.

Figura 49 - Gráfico das correntes e tensões nas barras, Potência ativa e reativa.



Fonte: O autor.

Tabela 7- Análise da variação das correntes, tensões e Potência com resistência de falta de 5Ω nos tempos de 2s a 4s.

Tempo (s)	Correntes (kA)						Tensões (p.u.)						Potências (MW e MVar)			
	Barras						Barras									
	ISe	IB1	IB2	IB3	IB4	I_USF	Vef _{SE}	Vef _{B1}	Vef _{B2}	Vef _{B3}	Vef _{B4}	PSe	QSe	Puf	Quf	
1 a 2	0,68	0,68	0,50	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,42	1,61	-	-	
2 a 3	1,83	1,82	1,67	0,10	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,59	0,60	9,75	2,67	-	-	
3 a 4	1,83	1,84	1,67	0,10	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,59	0,60	9,76	2,67	-	-	
4 a 5	0,68	0,72	0,50	0,16	0,18	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,35	1,66	-	-	

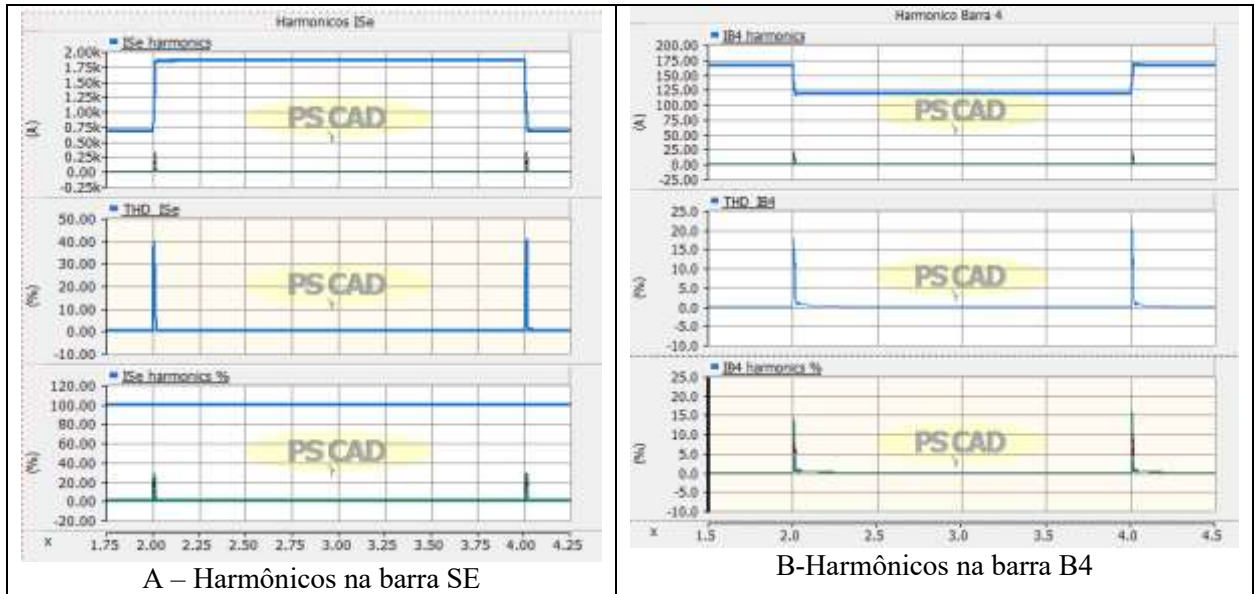
Fonte: O autor.

- **Harmônicos na barra SE e na barra B4**

Barra SE: Notou-se que corrente de harmônicos na barra SE, FIG. 49A, foi elevada de 681A para 1736,41A, nos tempos de 1s a 2s quando ocorreu a falta e prevaleceu de 2s a 4s, retornando a seu estado normal após cessar a falta, também foi verificado um THD de 39,73% aos 2s e 40,25% aos 4s após cessar a falta, não há harmônicos na USF devido a mesma está fora de operação.

Barra B4: já na barra B4, FIG. 49B, houve uma redução na corrente que passou de 166,09 A para 118,49 A durante a falta, com picos de 146,72A no 1º e 20,80A no 2º harmônico nos intervalos de tempo de 2s e 132,86 A 1º e 20,64 A para os 2º harmônicos, o THD no início da falta aos 2s chegou a 17,49% e 20,81% no final da falta aos 4s.

Figura 50 - Gráficos de Harmônicos nas barras Se e B4.



Fonte: O autor.

c) Circuito com resistência de falta $R=10 \Omega$.

• Correntes, tensões e potências nas barras

Após rodar a simulação 1, FIG.35, para uma resistência de falta $R=10 \Omega$, verificou-se uma sobrecorrente ao entrar a falta no tempo de 2s, passando de 0,67kA para 1,35kA, as tensões na barra SE sofreram poucas variações, variando gradativamente à medida que percorria as outras barras, ocorrendo o maior afundamento de tensão nas barras B2, B3 e B4, passando de 0,84p.u. para 0,70p.u., pior caso. Notou-se uma elevação na potência ativa nos tempos de 2s a 4s início e fim da falta, saindo de 3,43MW para 7,27MW início da falta, ver TAB.8, parte das potências.

Tabela 8- Análise da variação das correntes, tensões e Potência com resistência de falta de 10Ω nos tempos de 2s a 4s.

Tempo (s)	Correntes (kA)						Tensões (p.u.)					Potências (MW e MVar)			
	Barras						Barras								
	ISe	IB1	IB2	IB3	IB4	I_USF	VefSE	VefB1	VefB2	VefB3	VefB4	PSe	Qse	Pusf	Qusf
1 a 2	0,67	0,65	0,50	0,16	0,14	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,43	1,71	-	-
2 a 3	1,35	1,35	1,14	0,12	0,13	0,00	0,96	0,83	0,71	0,70	0,70	7,27	2,01	-	-
3 a 4	1,35	1,35	1,19	0,13	0,13	0,00	0,96	0,83	0,71	0,70	0,70	7,27	2,03	-	-
4 a 5	0,69	0,69	0,51	0,16	0,17	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,41	1,65	-	-

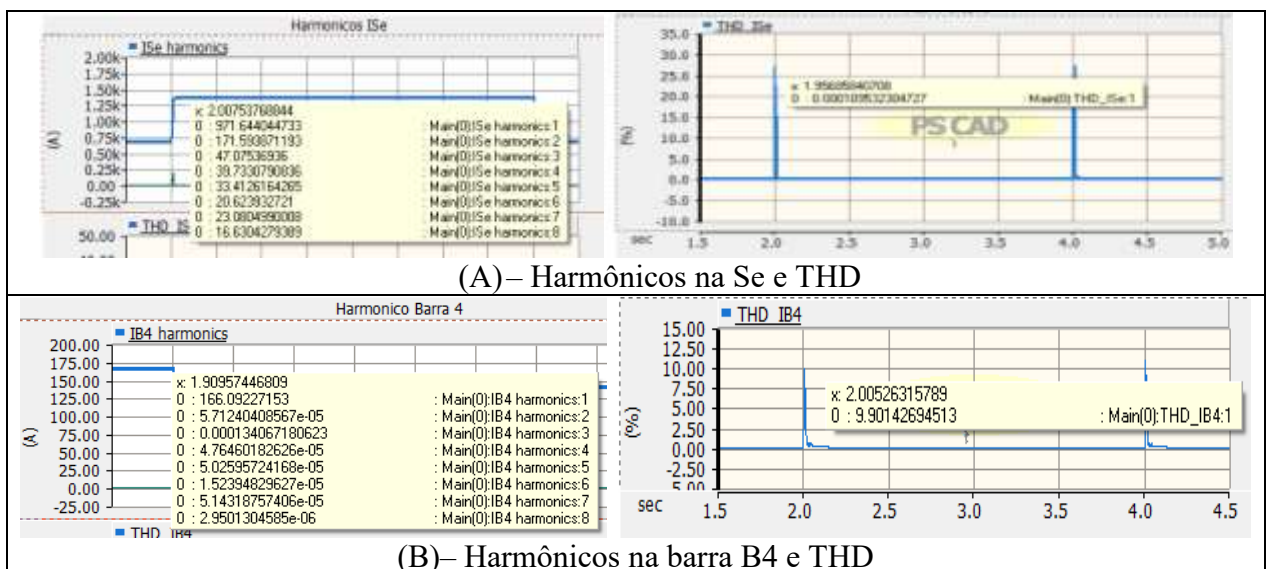
Fonte: O autor.

- **Harmônicos na barra SE e na barra B4**

Barra SE: na barra SE, FIG. 51A para uma resistência $R=10\ \Omega$, verificou um aumento nos harmônicos quando ocorreu a falta, saindo de 681,10A para 971,64A na transição de 2s para 3s, estabilizando em 1223,66A durante a falta nos tempos de 2s a 4s e retornou para 681,10A após cessar a falta. Foi verificado um THD no início da falta de 26,91% aos 2s e 23,11% aos 4s, não houve presença de harmônicos na USF por estar fora de operação.

Barra B4: na barra B4, FIG. 51B, como nos casos anteriores houve alterações nas correntes de harmônicos, passando de 166,09A para 139,21A, gerando THD de 9,9% aos 2s e 10,88% aos 4s.

Figura 51 - Análise de Harmônicos para resistência de falta de $R=10\ \Omega$.



Fonte: O autor.

3.4.1.10.2 Análise com a USF injetando reativos.

Os gráficos mostrados na FIG.52 foram utilizados para a obtenção dos valores registrados na TAB.9, onde para cada ângulo foi escolhido um tipo de gráfico comprovando as análises realizadas. As análises foram feitas coletando informações nos tempos 1,5, 2,5, 3,5 e 4,5 segundo, onde entre os tempos 2s e 4s que entra a falta e logo após é acionado a USF injetando potências reativas e a mudança do ângulo de fase no tempo de 3,5s. As análises foram para as correntes e tensões nas barras e potências na SE e na USF, as potências de entrada na USF foram 1, 2 e 4MW e ângulos de fase de 0° , 23° e -90° como visto nas tabelas e gráficos que se seguem.

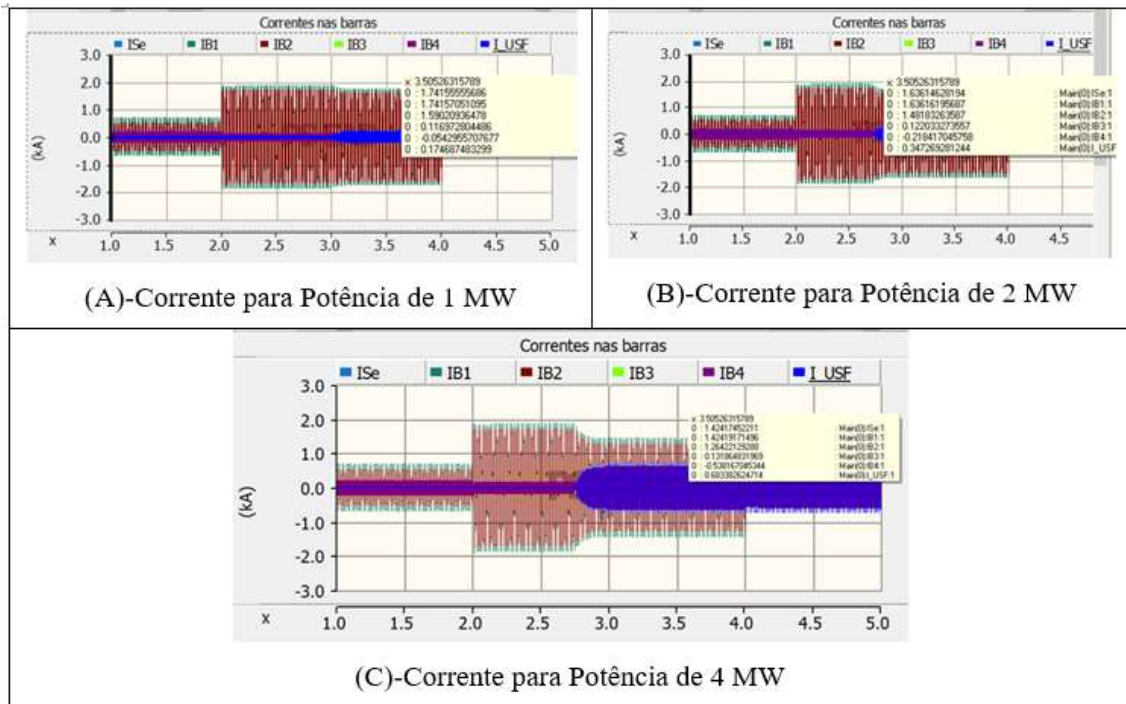
a) Análise para ângulo 0° injetando Potências de 1, 2 e 4 MW.

No primeiro caso foi considerado o gráfico de corrente da FIG.52A e a TAB. 9, onde foram destacados em amarelo o tempo de 2,5s e cinza o tempo de 3,5s, sinalizando o início e o fim da falta para um ângulo de fase de 0° e potência ativa de 1 MW. Observou-se que aos 2,5s quando entra a falta houve uma sobrecorrente nas barras ISE, IB1 e IB2, causando uma elevação na potência ativa da SE de 9,44MW e reativa de 2,75 MVar, um afundamento de tensão é percebido nas barras, cujo, o maior afundamento aconteceu nas barras VefB1, VefB3 e VefB4 que estão próximas ao circuito de onde ocorreu a falta.

Percebe-se na barra VefSE, TAB. 9, na parte de tensão, um afundamento pequeno, passando de 0,97p.u. para 0,95p.u., enquanto na barra VefB2 o afundamento chegou aos 0,77p.u.. Quando entrou a USF injetando 4 MW no tempo de 2,5s e 3,5s a corrente diminuiu de 1,84kA para 1,42kA, FIG. 52C, TAB. 9, com isso a potência ativa da SE foi reduzida de 9,44 para 7,50 MW, na injeção de 4 MW de potência ativa, verificou-se uma melhoria na tensão, com ganhos expressivo, reduzindo bastante a severidade de afundamentos de tensão, cujo, pior caso foi de 0,60p.u. em VefB3, subindo para 0,68p.u. e chegando a 0,94p.u. em 4,5s. Foi possível verificar uma melhoria no afundamento de tensão nas barras VefB1, VefB2, VefB3, VefB4 de 0,94p.u., 0,87p.u., 0,88p.u. e 0,81p.u., comparado com a injeção de 1 MW respectivamente.

Após cessar a falta, no tempo de 4s e obter a amostragem no tempo de 4,5s foi possível observar uma menor demanda de potência fornecida pela SE, nesse caso as demandas foram supridas pela UFS, melhorando consideravelmente o fornecimento de potência ativa, nesse caso os reativos ainda continuam sendo fornecidos pela SE.

Figura 52 - Gráficos de Correntes nas Barras, tempo 3,5s, ângulo 0° e potência 1, 2 e 4 (MW).



Fonte: O autor.

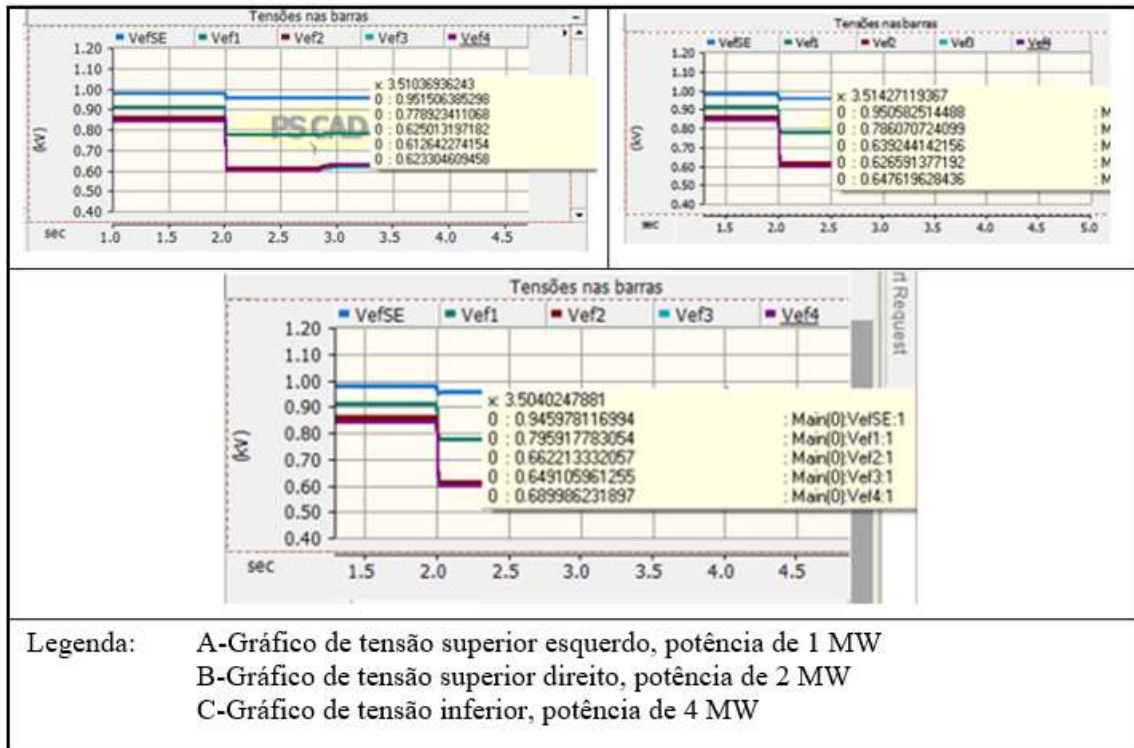
Tabela 9 - Análise da minimização através da injeção de reativos para potências de 1, 2 e 4 MW e ângulo de fase igual a zero.

Pot. (MW)	Ang. Fase	Tempo (s)	Correntes kA						Tensões p.u.					Potências (MW e MVar)			
			Barras						Barras								
			ISe	IB1	IB2	IB3	IB4	I_USF	VeffSe	Veff ₁	Veff ₂	Veff ₃	Veff ₄	PSe	Qse	Pusf	Qusf
1	0°	1,5	0,52	0,67	0,47	0,15	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,83	0,87	3,24	1,67	0,00	0,00
		2,5	1,80	1,83	1,69	0,12	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,44	2,75	0,00	0,00
		3,5	1,74	1,74	1,59	0,12	0,05	0,17	0,95	0,78	0,63	0,62	0,63	8,92	2,45	0,62	0,01
		4,5	0,52	0,53	0,35	0,18	0,08	0,17	0,97	0,92	0,88	0,86	0,88	2,42	1,69	0,85	0,01
2	0°	1,5	0,67	0,67	0,50	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,83	0,83	3,43	1,70	0,00	0,00
		2,5	1,84	1,84	1,69	0,11	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,59	0,59	9,41	2,74	0,00	0,00
		3,5	1,63	1,63	1,48	0,12	0,22	0,35	0,95	0,79	0,65	0,64	0,67	8,63	2,26	1,35	0,00
		4,5	0,42	0,42	0,27	0,14	0,02	0,16	0,97	0,93	0,91	0,89	0,92	1,73	1,77	1,87	0,00
4	0°	1,5	0,68	0,68	0,50	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,87	0,84	3,43	1,69	0,00	0,00
		2,5	1,84	1,84	1,70	0,11	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,41	2,74	0,00	0,00
		3,5	1,42	1,42	1,26	0,13	0,54	0,68	0,96	0,82	0,70	0,68	0,74	7,50	2,11	3,00	0,00
		4,5	0,14	0,14	0,04	0,18	0,41	0,62	0,97	0,95	0,96	0,94	1,00	0,03	1,99	4,06	0,01

Fonte: O autor

b) Análise para ângulo de 23°, injetando Potências de 1, 2 e 4 MW.

Figura 53 - Gráficos de Tensões nas Barras, tempo 3,5s, ângulo 23° e potência 1, 2 e 4 (MW).



Fonte: O autor.

Tabela 10 - Análise da minimização da severidade através da injeção de reativos para potências de 1, 2 e 4 MW e ângulo de fase igual a 23°.

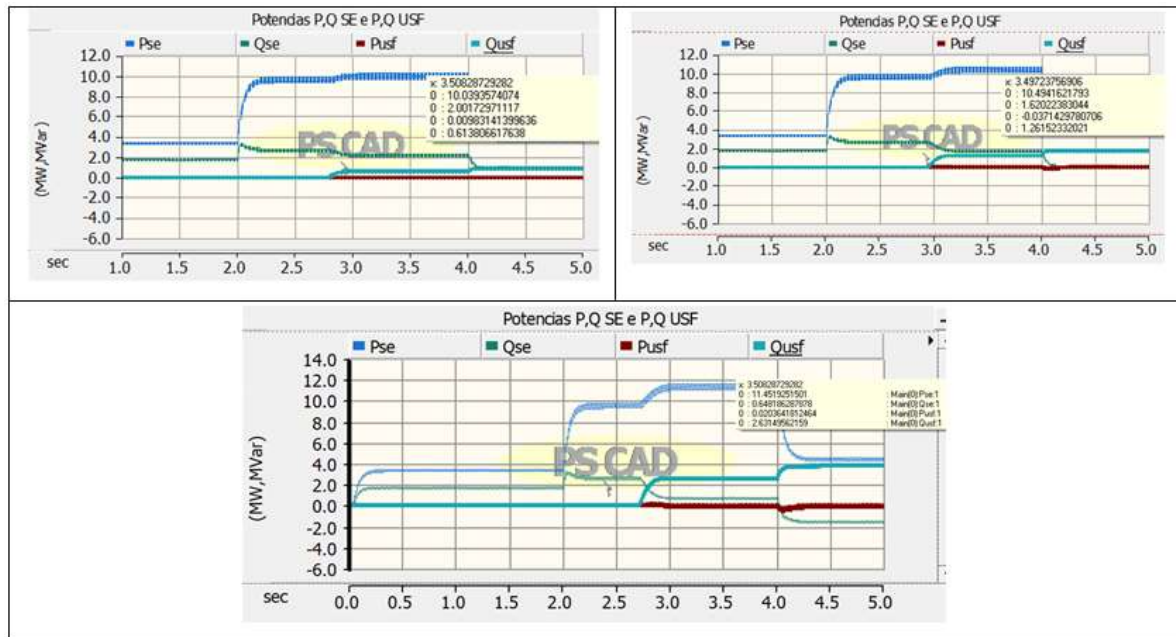
Pot. (MW)	Ang Fase.	Tempo (s)	Correntes kA						Tensões kV					Potências (MW e QVar)			
			Barras						Barras								
			I _{Se}	IB1	IB2	IB3	IB4	I _{USF}	VefSe	VefB1	VefB2	VefB3	VefB4	P _{Se}	Q _{se}	P _{usf}	Q _{usf}
1	23°	1,5	0,44	0,44	0,32	0,11	0,11	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,24	1,67	0,00	0,00
		2,5	0,98	0,98	0,94	0,03	0,03	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,28	2,60	0,00	0,00
		3,5	1,56	1,56	1,41	0,12	0,03	0,09	0,95	0,78	0,62	0,61	0,62	9,08	2,74	0,58	-0,24
		4,5	0,53	0,53	0,35	0,16	0,02	0,14	0,97	0,91	0,87	0,85	0,86	2,60	1,96	0,78	-0,34
2	23°	1,5	0,66	0,66	0,49	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,39	1,71	0,00	0,00
		2,5	1,74	1,74	1,61	0,09	0,09	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,28	2,60	0,00	0,00
		3,5	1,61	1,61	1,46	0,11	-0,20	0,32	0,95	0,79	0,64	0,63	0,65	8,50	2,73	1,18	-0,49
		4,5	0,55	0,55	0,40	0,14	0,12	0,02	0,96	0,91	0,88	0,86	0,88	1,86	2,37	1,60	-0,71
4	23°	1,5	0,66	0,66	0,49	0,16	0,16	0,00	0,97	0,91	0,85	0,84	0,84	3,39	1,62	0,00	0,00
		2,5	0,99	0,99	0,94	0,03	0,03	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,66	2,66	0,00	0,00
		3,5	1,47	1,47	1,31	0,13	0,38	0,52	0,94	0,79	0,66	0,65	0,69	7,26	3,31	2,61	-1,08
		4,5	0,32	0,32	0,14	0,17	0,21	0,39	0,95	0,91	0,90	0,90	0,92	0,38	3,36	3,36	-1,41

Fonte: O autor.

- No segundo caso, gráfico de tensão, TAB. 10 e FIG. 53A com ângulo de 23° , há um aumento de corrente no momento que ocorre a falta, que piora quando a USF entra injetando 1MW, porém nos tempos 2,5s e 3,5s é percebido melhoras na severidade de afundamentos. Também é possível notar que houve um aumento de reativos (Qse), passando de 2,66MVar na falta para 3,31MVar, onde observa-se menor potência ativa da SE e maior participação na potência ativa da UFS (Qusf), todavia por ser um ângulo de fase de 23° positivo, a injeção de reativos é indutiva, por isso houve excesso de reativos quando cessa a falta.

c) **Análise para ângulo -90° e injetando Potências de 1, 2 e 4 MW.**

Figura 54 - Gráficos de potências nos tempos 3,5s para ângulo -90° e potência 1, 2 e 4 (MW).



Legenda:

Azul – Potência ativa Pse;

Verde – Potência reativa Qse

Vermelho – Potência ativa Pusf;

Verde clado – Potência reativa Qusf

Fonte: O autor.

Tabela 11 - Análise da minimização através da injeção de reativos para potências de 1,2 e 4 MW e ângulo de fase igual a -90° .

Pot. (MW)	Ang Fase.	Tempo (s)	Correntes kA						Tensões kV					Potências (MW e QVAr)			
			Barras						Barras								
			I _{Se}	IB1	IB2	IB3	IB4	I _{USF}	V _{efSe}	V _{efB1}	V _{efB2}	V _{efB3}	V _{efB4}	P _{Se}	Q _{se}	P _{usf}	Q _{usf}
1	-90°	1,5	0,58	0,58	0,42	0,14	0,14	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,39	1,62	0,00	0,00
		2,5	1,84	1,84	1,70	0,11	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,67	2,51	0,00	0,00
		3,5	1,87	1,87	1,72	0,11	0,10	0,01	0,96	0,78	0,62	0,61	0,62	10,04	2,00	0,01	0,61
		4,5	0,64	0,64	0,46	0,17	0,12	0,05	0,99	0,92	0,88	0,86	0,87	3,38	0,87	-0,01	0,86
2	-90°	1,5	0,68	0,68	0,50	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,24	1,67	0,00	0,00
		2,5	1,84	1,84	1,70	0,11	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,66	2,66	0,00	0,00
		3,5	1,91	1,91	1,76	0,11	0,12	0,00	0,96	0,78	0,63	0,62	0,63	10,49	1,62	-0,04	1,26
4	-90°	1,5	0,68	0,68	0,50	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,38	1,71	0,00	0,00
		2,5	1,84	1,84	1,70	0,11	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,68	2,52	0,00	0,00
		3,5	2,02	2,02	1,87	0,11	0,21	-0,10	0,98	0,79	0,64	0,63	0,66	11,45	0,65	0,02	2,63
4	-90°	4,5	0,62	0,62	0,43	0,18	0,07	0,10	1,02	0,97	0,94	0,92	0,95	4,35	-1,62	0,08	3,79

Fonte: O autor.

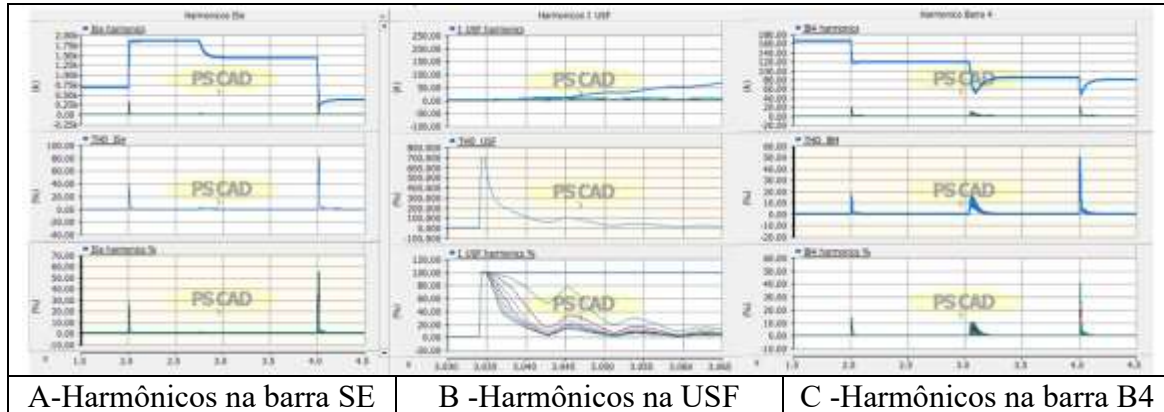
No terceiro caso, gráfico de potências, FIG. 54 e TAB. 11, com ângulo de fase de -90° , capacitivo, foi percebido elevação de corrente nas barras ISE, IB1, IB2 na hora que ocorreu a falta e quando entrou a USF no tempo de 2,5s, notou-se que a sobrecorrente foi mínima, não foi observado problemas nas barras IB3 e IB4. Também se observa uma redução de reativos da SE momento em que ocorre a falta, pois parte desse reativo é fornecido pela USF, ao cessar a falta aparece um reativo de -1,62MVar na SE indicando que os reativos foram supridos pela USF, após ser injetado 2,63MVar pela USF. Melhorias na severidade foram notadas nas barras, implicando em afundamentos menores devido a injeção de reativos.

d) Harmônicos.

Na FIG. 55, é possível notar correntes de harmônicas sendo injetadas pela USF durante a falta, gráfico da FIG.55B, e uma redução dessas correntes na SE, FIG. 55A, demonstrando a melhoria que a USF pode trazer, reduzindo essas correntes. Frisando que esses harmônicos aparecem em função da variação da curva de tensão, não são harmônicos típico de cargas não lineares prejudiciais ao sistema. Para o pior caso com a USF injetando potência de 4MW e Ângulo de fase de 0° , FIG. 55, o maior THD observado foi na SE, quando cessou a falta no tempo de 4s, chegando a quase 40% no início da falta de 2s e 80% no final com 4s, esses harmônicos foi sentido na barra B4, onde está conectado a USF, com um THD de 18% aos 2s

início da falta e outro pico quando a UFS foi iniciada, aos 3s, causando harmônicos de magnitude de 18% e mais outros de magnitude 50% quando finalizou a falta.

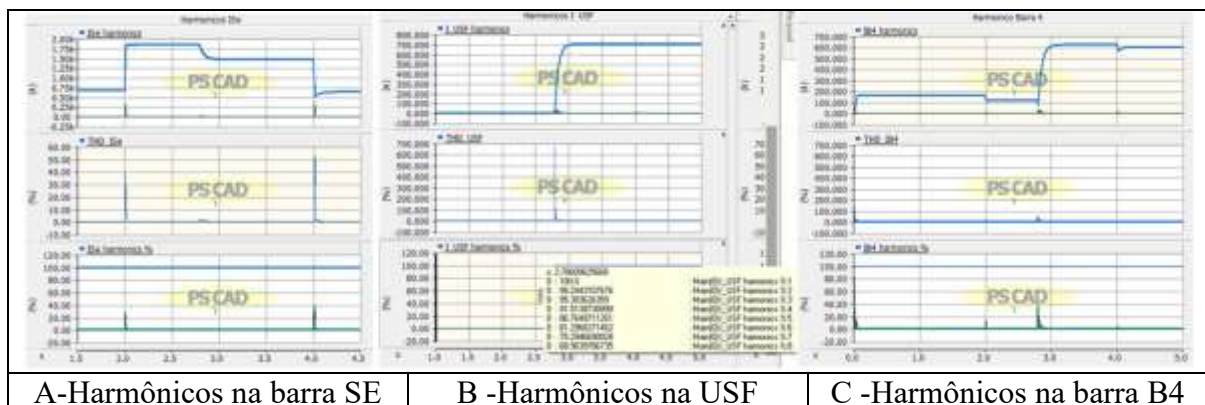
Figura 55 - Gráficos de Harmônicos para potência de 4MW e Ângulo de fase 0°.



Fonte: O autor.

Quando injetado 4MW e ângulo de 23°, FIG.56, verificou-se que no início a corrente de harmônicos era de 0,75 kA, ocorrendo a falta subiu para 1,75kA, FIG.56A e quando entrou a USF reduziu para 1,50kA e ao cessar a falta a corrente de harmônicos voltou aos 0,75 kA, o THD no tempo de 2s foi de 40% e quando entrou a USF no tempo de 3,5s foi de 2% e de 52% quando cessou a falta. A USF injetou 100% de corrente de harmônicas no tempo de 2,78s e no 8º harmônico chegou a 0,68%, onde o THD chegou a 67,2%. Na barra B4, FIG. 56C, houve uma redução nas correntes de harmônicos quando iniciou a falta nos tempos de 2s de 190kA para 120kA. O THD foi de 18% e permaneceu até a entrada da USF, FIG.56B, onde houve uma pequena oscilação e subindo para 620 kA com THD de 50% e THD de 5% no término da falta.

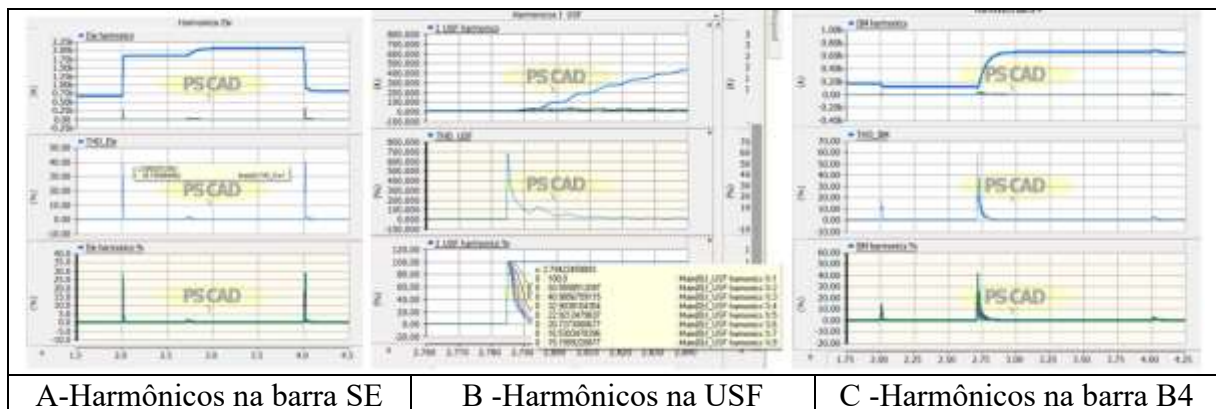
Figura 56 - Gráficos de Harmônicos para potência de 4MW e Ângulo de fase 23°.



Fonte: O autor.

Quando injetado 4MW e Ângulo de -90° , FIG. 57, no início da ocorrência da falta aos 2s a corrente de Harmônicos na SE subiu para 1,85kA, logo após no entrar a USF, a corrente subiu para 2,10kA, FIG. 57A e retornou para os parâmetros normais quando cessou a falta. Os THDs registrados foram 39,74% e reduzindo para 2%, outro pico ocorreu quando a falta cessou aos 4s com magnitude de 42%. Quando entrou a USF, FIG. 57B, a corrente de Harmônicos chegou a 0,7KA, gerou um THD de 100%, na barra B4, FIG. 57C, houve uma queda da corrente de harmônicos aos 2s e uma elevação quando a USF entrou aos 2,71s com THD de 56,70 %, e com uma pequena oscilação quando a falta cessou.

Figura 57 - Gráficos de Harmônicos para potência de 4MW e Ângulo de fase -90° .



Fonte: O autor.

3.4.2 Análise da melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela USF.

Esta simulação tem por objetivo analisar a melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela usina fotovoltaica (USF) para uma situação de carga variável. Neste cenário será retirado a falta entre os barramentos 2 e 3 e será conectado a barra 3 (B3) uma carga de perfil variado, para tal serão seguidos alguns procedimentos.

3.4.2.1 Procedimentos.

Os seguintes procedimentos serão aplicados nas simulações.

Avaliação 1- serão avaliados a tensão nas barras Bse, B1, B2, B3 e B4, onde na barra 3 (B3) a tensão será usada para governar a injeção de reativos pela USF e o ângulo de fase na injeção de -90° , as condições para a operação da USF, o circuito completo é apresentado na FIG. 36, as os parâmetros de entrada estão representados na TAB. 12.

Tabela 12- Potência Ativa(P) e Potência Reativa (Q).

Item	Potência Ativa (P)	Potência Reativa (Q)
1	P= 1 MW	Qmáx = 0 MVar
2	P= 2 MW	Qmáx = 0 MVar
3	P= 4 MW	Qmáx = 0 MVar
4	P= 1 MW	Qmáx = 1 MVar
5	P= 2 MW	Qmáx = 2 MVar
6	P= 4 MW	Qmáx = 4 MVar

Fonte: O autor.

3.4.2.2 Detalhes dos principais componentes do circuito de simulação.

O circuito foi semelhante ao anterior com exceção da carga variável, mudança na USF e da nova configuração da montagem do circuito, possuindo uma SE, 5 medidores (Multímetros), 4 barras a saber: B1, B2, B3 e B4, 3 cargas fixas e um circuito de carga variável governado pela barra 3 e uma Usina Fotovoltaica USF para a injeção de potência ativa e reativa, FIG. 36. As configurações da SE, das barras, das três cargas e dos multímetros são os mesmos, serão prestados apenas as modificações no circuito referente a carga variável utilizando uma fonte de corrente e a nova configuração da USF, dados de entrada de acordo com a TAB.12.

3.4.2.3 Características do Circuito de carga variável.

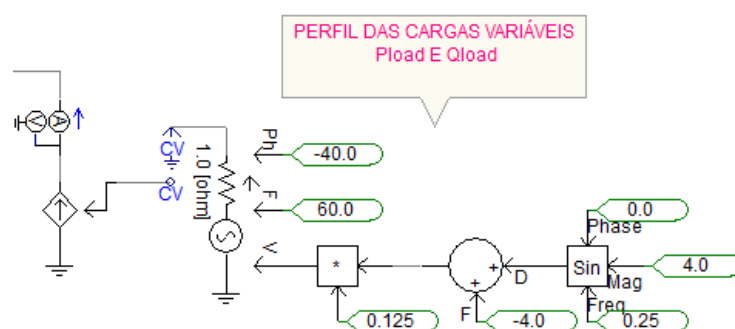
A FIG. 58 apresenta o circuito de carga variável que foi elaborado de forma em que a tensão ficasse oscilando, possuindo uma fonte de tensão alternada com controle externo e uma fonte de corrente contínua, as fontes possuem as seguintes características:

- Detalhe do circuito de carga variável

Fonte de tensão: Fonte de tensão com controle externo através dos parâmetros V (Tensão), F (Frequência) e Ph. (Ângulo de fase).

Fonte de Corrente: Controlada pelo sinal gerado pela fonte de tensão.

Figura 58- Detalhes do circuito de simulação da carga variável.

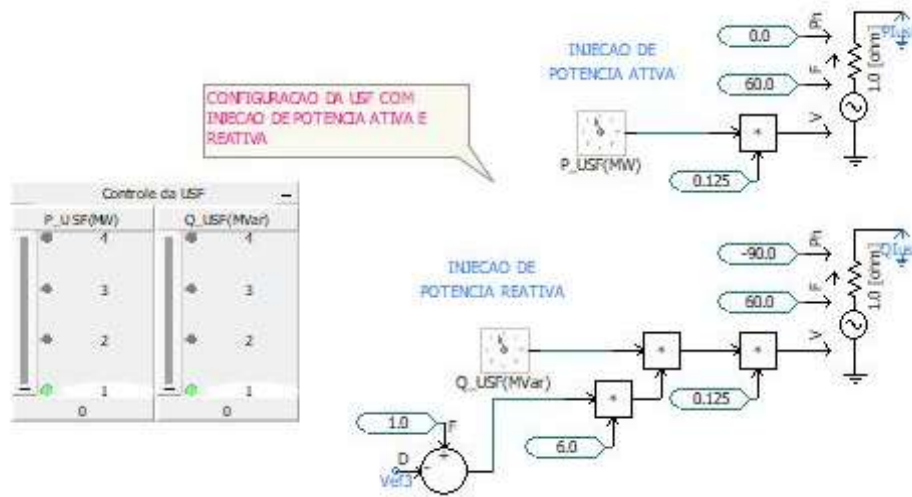


Fonte: O autor.

3.4.2.4 Característica da Usina Fotovoltaica e circuito de comandos.

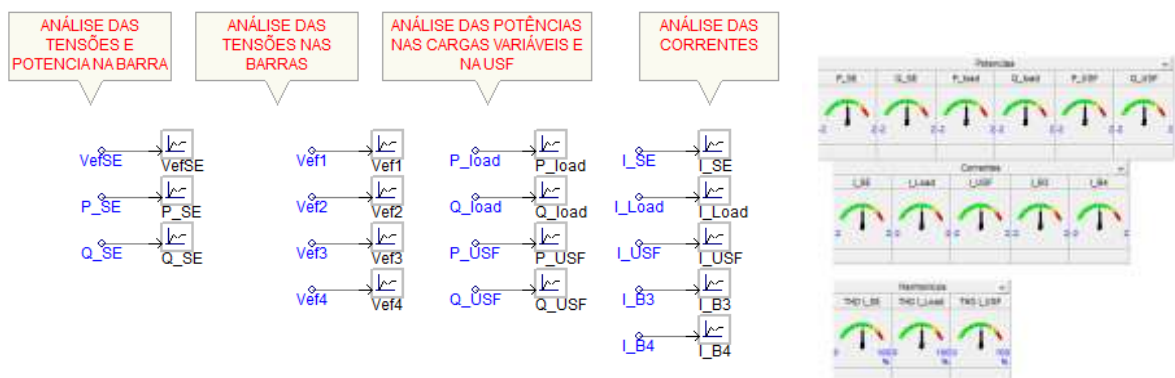
A usina fotovoltaica é representada na FIG. 59, com seus respectivos controles, neste circuito foram utilizadas duas chaves de comando para inserção de potências ativas (P) e reativa (Q) para a USF do tipo chave rotativa (Dial) com posições de 1 a 4, o ângulo de injeção foi de -90° para a inserção de reativos interligada a uma fonte de corrente controlada, constantes de conversões de 0,125 para correção da potência reativa Q, onde, -90 capacitivo e +90 indutivo. Na FIG. 60 estão representados os detalhes das saídas e dos medidores e na FIG. 61 mostra as saídas para as análises de harmônicos.

Figura 59- Detalhes dos circuitos e controles da USF.



Fonte: O autor.

Figura 60-Detalhe das saídas e medidores.



Fonte: O autor.

Figura 61- Análise dos Harmônicos.

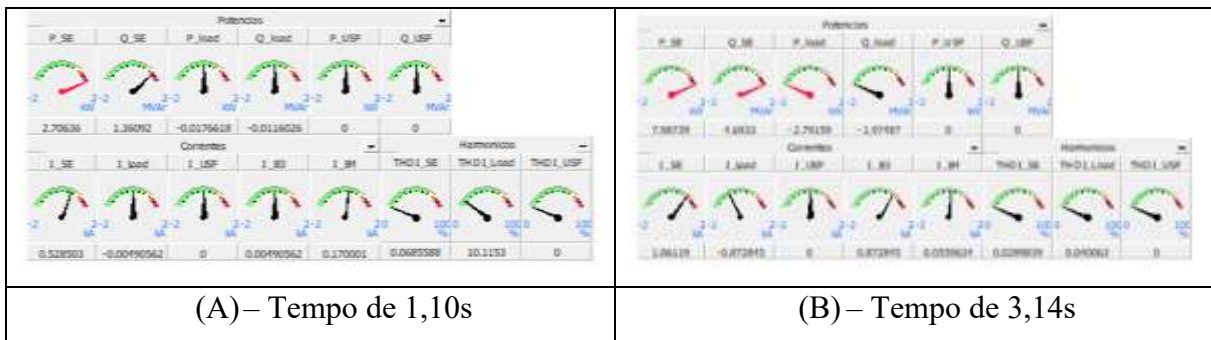


Fonte: O autor.

3.4.2.5 Resultados da Simulação 2-Melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição com a injeção de Reativos pela USF para carga variável.

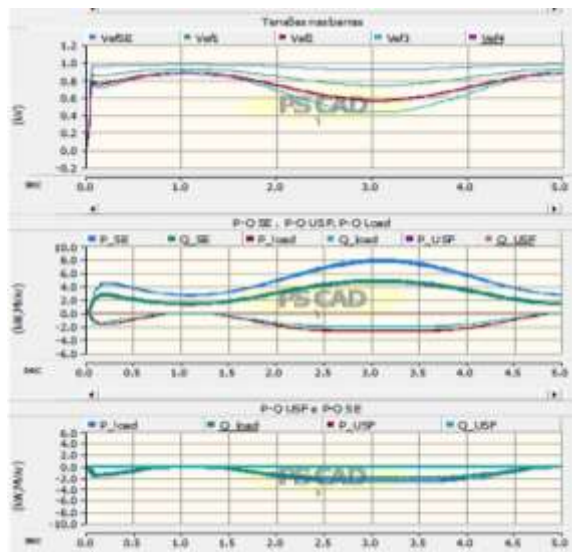
a) Considerando a USF deligada.

Figura 62-Análise usando medidores na obtenção de dados nos tempos 1,10s e 3,14 s.



Fonte: O autor.

Figura 63- Análise gráfica com a USF fora de operação sem injeção de reativos.



Fonte: O autor.

Tabela 13- Análise com a USF desligada.

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVAr	Tempo (s)	Correntes kA					Tensões kV					Potência Fornecida pela SE		Potência Fornecida pela USF		Potencia Requerida pela Carga	
			Barras					Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load	Q_Load
			ISE	I_Load	I_USF	IB3	IB4	VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4						
0	0	0,20	0,91	0,43	0,00	0,43	0,15	0,97	0,89	0,83	0,81	0,82	4,44	2,75	0,00	0,00	-1,65	-1,34
		1,10	0,52	0,00	0,00	0,00	0,17	0,98	0,92	0,89	0,89	0,87	2,71	1,36	0,00	0,00	-0,02	-0,01
		3,00	1,01	0,76	0,00	0,76	0,70	0,92	0,74	0,57	0,43	0,56	7,90	4,70	0,00	0,00	-2,76	-2,00
		3,14	1,06	0,87	0,00	0,87	0,05	0,92	0,74	0,57	0,43	0,56	7,99	4,69	0,00	0,00	-2,79	-1,97
		4,50	0,53	0,20	0,00	0,20	0,10	0,97	0,89	0,83	0,81	0,82	3,61	2,13	0,00	0,00	-1,00	-0,76
		4,90	0,54	0,00	0,00	0,00	0,17	0,97	0,92	0,88	0,88	0,87	2,79	1,39	0,00	0,00	-0,15	-0,09

OBS.: Tabela completa nos anexos 2

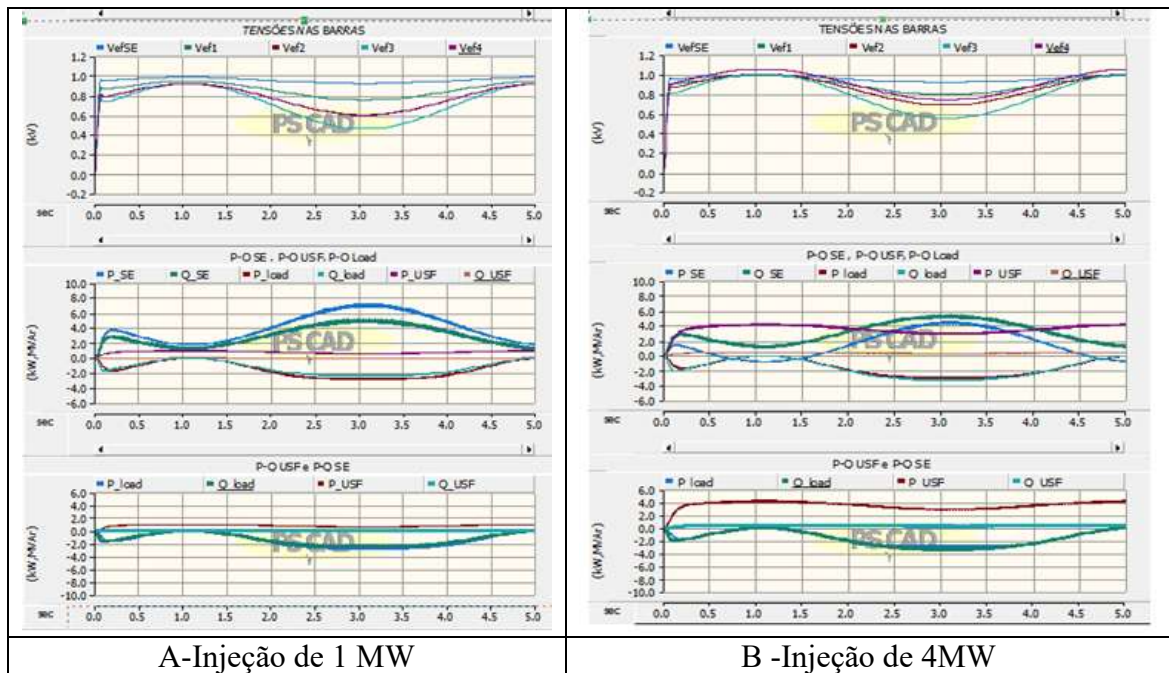
Fonte: O autor.

As análises de melhoria de perfil de tensão são apresentadas nas tabelas e gráficos que fazem parte deste trabalho obtidos do PSCAD, para a comparação foi simulado o circuito com a USF desligada mostrado na FIG. 63 e na TAB. 13. Foram rodadas as simulações considerando perfil de carga variável como apresentado na FIG. 58), onde **P_load** (potência Ativa) e **Q_Load**, (potência reativa), ambas sendo requisitadas pelas cargas. A Usina Sistema Fotovoltaica (USF) são representadas por **P_USF** (Potência ativa) e (**Q_USF**) potência reativa, injetada pela USF.

Nos gráficos, as cores que representam a tensão nas barras são: azul, barra SE (VefSE); verde, barra B1(Vef1); Vermelho escuro barra B2 (Vef2); verde claro barra B3 (Vef3) e marrom barra B4 (Vef4). As potências são representadas pelas seguintes cores: azul (P_SE), verde (Q_SE), vermelho (P_load), verde (Q_load), marrom (P_USF) e laranja (Q_USF). Foi também criado um terceiro gráfico com as potencias P_Load e Q_Load, PUSF e QUSF, que representam as cargas e a USF usado para comparar com o gráfico completo nos quais aparecem as potências da SE como representado na FIG. 63. Na TAB. 13 as cores azul, amarelo e laranja, são os pontos de amostragens selecionados para fazer a comparação, As tabelas completas se encontra nos anexos 2.

b) Considerando a Injeção somente de potência ativa pela USF.

Figura 64- Análise gráfica com a USF ligada injetando potências ativas de 1 e 4 MW.



Fonte: O autor.

Tabela 14- Injeção de Potência Ativa de 0 e 4MW e Reativo igual a 0.

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVar	Tempo (s)	Correntes kA					Tensões kV					Potência Fornecida pela SE		Potência Fornecida pela USF		Potência Requerida pela Carga	
			Barras					Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load	Q_Load
			ISE	I_Load	I_USF	IB3	IB4	VeSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4						
0	0	0,20	0,91	0,43	0,00	0,43	0,15	0,97	0,89	0,83	0,81	0,82	4,44	2,75	0,00	0,00	-1,65	-1,34
		1,10	0,52	0,00	0,00	0,00	0,17	0,98	0,92	0,89	0,89	0,87	2,71	1,36	0,00	0,00	-0,02	-0,01
		3,00	1,01	0,76	0,00	0,76	0,70	0,92	0,74	0,57	0,43	0,56	7,90	4,70	0,00	0,00	-2,76	-2,00
		3,14	1,06	0,87	0,00	0,87	0,05	0,92	0,74	0,57	0,43	0,56	7,99	4,69	0,00	0,00	-2,79	-1,97
		4,50	0,53	0,20	0,00	0,20	0,10	0,97	0,89	0,83	0,81	0,82	3,61	2,13	0,00	0,00	-1,00	-0,76
		4,90	0,54	0,00	0,00	0,00	0,17	0,97	0,92	0,88	0,88	0,87	2,79	1,39	0,00	0,00	-0,15	-0,09
4	0	0,20	0,29	0,00	-0,44	0,00	0,38	0,95	0,91	0,88	0,83	0,93	1,36	2,90	3,03	0,32	-1,64	-1,93
		1,10	0,04	1,09	0,55	0,00	-0,35	0,98	0,98	1,00	1,00	1,05	-0,85	1,26	4,28	0,42	-0,02	-0,01
		3,00	0,96	-0,75	-0,09	0,75	0,12	0,92	0,79	0,69	0,55	0,74	4,41	5,33	5,33	3,01	0,36	-2,98
		3,14	0,07	-0,42	0,60	0,42	-0,50	0,92	0,79	0,69	0,55	0,74	4,20	5,35	2,86	0,35	0,60	-3,27
		4,50	0,24	-0,03	0,52	0,03	-0,43	0,97	0,95	0,95	0,92	0,99	0,22	2,13	3,81	0,40	-1,03	-0,99
		4,90	0,30	-0,02	0,56	0,02	-0,36	0,98	0,98	1,00	1,00	1,05	0,98	0,98	0,98	0,98	1,00	1,05

Fonte: O autor.

Para a simulação considerando apenas injeção de potência ativa é possível notar que toda a potência reativa foi fornecida pela SE, com poucas alterações nos tempos 1,10s, 3,14s e 4,9s

linha azul, amarelo e laranja, respectivamente, ver TAB.14 e gráfico verde (Q_{SE}) FIG. 63. Foi observado que a potência ativa no barramento da Se (P_{SE}) vai diminuindo a medida que vai sendo injetado potência ativa P_{USF} pela usina fotovoltaica, gráfico azul. A tensão se mantém estável com uma pequena variação quando comparado com a simulação sem a injeção de potência ativa e reativa.

Na TAB. 14, parte de tensão, é observado uma melhoria do perfil de tensão a partir da injeção de 4 MW pela USF nas barras **Vef2**, **Vef3** e **Vef4**, onde, para os tempos de 1,10s e 4,9s chegam a 100% quando comparado sem a injeção de potência ativa. Na parte de correntes, TAB. 14 ISE, e I_{USF} é possível notar uma menor demanda de corrente fornecidas pela SE, na qual boa parte da corrente passa a ser fornecida pela USF quando injetado a potência de 4 MW chegando a 0,60kA no tempo de 3,14s. A potência ativa fornecida pela SE, TAB. 14 P_{SE} , era de 7,99 MW no tempo de 3,14s, quando entra a USF injetando 4MW, temos uma redução para 4,20 MW de potência ativa fornecida pela SE, a carga consumia 2,79 MW de potência ativa da SE passa a consumir 0,60 MW e a USF fornece 2,86 MW representado pela linha vermelha do gráfico P-Q USF e P-Q SE e linha amarela da TAB.14, P_{USF} .

c) Considerando a injeção de potência ativa e reativa pela USF.

Na TAB. 15 e nos Gráficos da FIG. 65 A e B, onde A é sem a injeção de potências ativas e reativas e B com a Injeção potência ativa e Reativa. Considerando o caso mais extremo com a injeção de 4 MW de potência ativa e reativa pela USF, quando comparados com os gráficos de correntes sem a injeção de potências ativa e reativa, é possível notar claramente que houve um aumento considerado da corrente fornecida pela USF e uma redução da corrente fornecida pela SE. Injetando 4 MW de potência ativa e 4MVAR de potência reativa é possível identificar na tabela um fornecimento de 0,81 kA pela SE que antes era de 1,06 kA, uma redução de 76,41% no tempo de 3s, enquanto a USF passa a fornecer 1 kA, parte da corrente absorvida pela carga de 1,28 k passa a ser fornecida pela USF. As tensões nas barras chegam a quase 100% nos tempos de 1,10s e 4,9s em todos os barramentos, indicando uma melhoria considerável no perfil de tensão, principalmente para as cargas próximas a USF, Ver tabela e gráfico de tensão, TAB. 15 e FIG. 65 A e B. Tabela e gráfico completo nos anexos.

Tabela 15- Injeção de Potências Ativas e Reativas de 1, 2 e 4(MW e MVar) respectivamente.

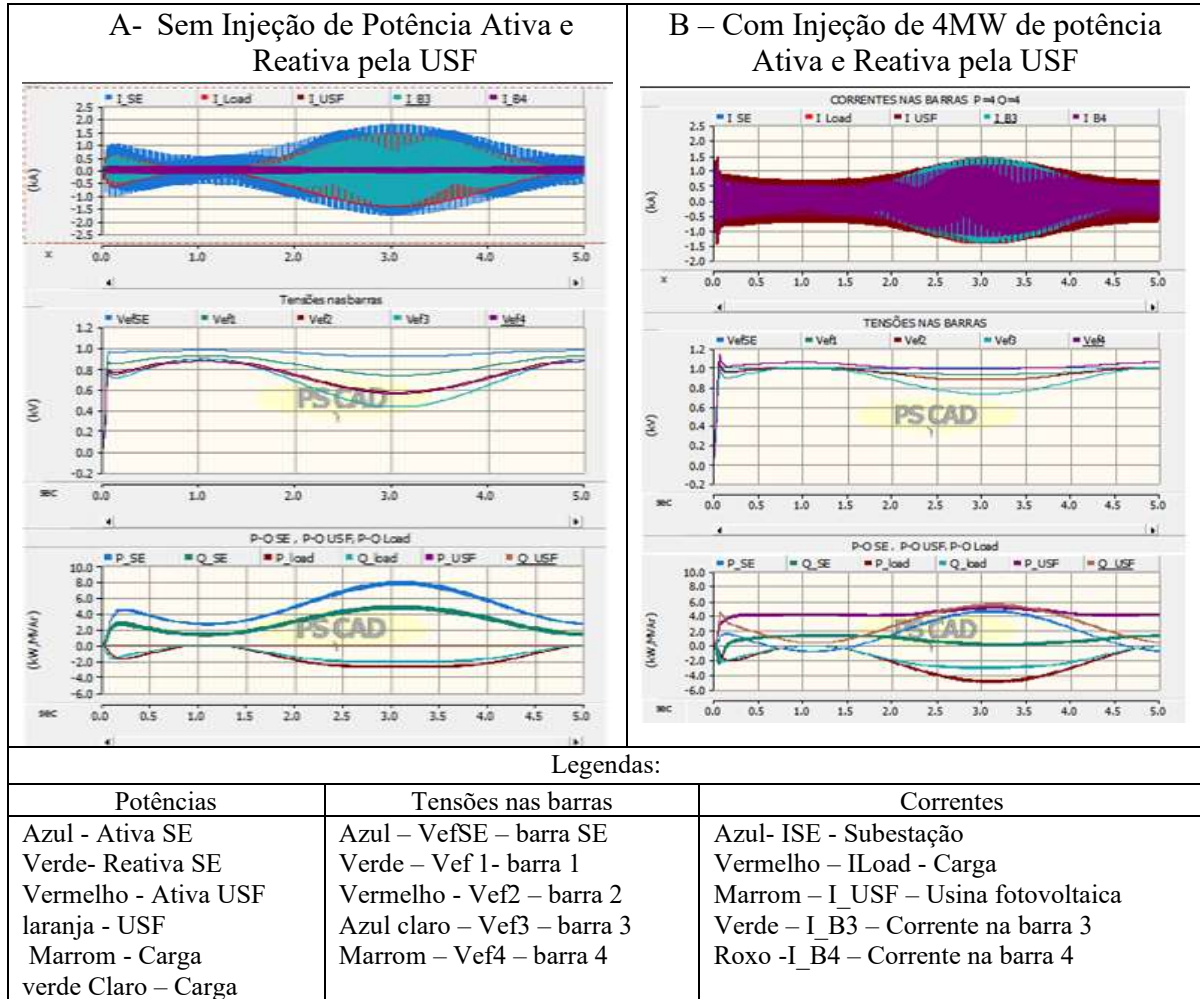
Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVar	Tempo (s)	Correntes kA					Tensões kV					Potência Fornecida pela SE		Potência Fornecida pela USF		Potência Requerida pela Carga	
			Barras					Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load	Q_Load
			ISE	I_Load	I_USF	IB3	IB4	VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4						
0	0	0,20	0,91	0,43	0,00	0,43	0,15	0,97	0,89	0,83	0,81	0,82	4,44	2,75	0,00	0,00	-1,65	-1,34
		1,10	0,52	0,00	0,00	0,00	0,17	0,98	0,92	0,89	0,89	0,87	2,71	1,36	0,00	0,00	-0,02	-0,01
		3,00	1,01	0,76	0,00	0,76	0,70	0,92	0,74	0,57	0,43	0,56	7,90	4,70	0,00	0,00	-2,76	-2,00
		3,14	1,06	0,87	0,00	0,87	0,05	0,92	0,74	0,57	0,43	0,56	7,99	4,69	0,00	0,00	-2,79	-1,97
		4,50	0,53	0,20	0,00	0,20	0,10	0,97	0,89	0,83	0,81	0,82	3,61	2,13	0,00	0,00	-1,00	-0,76
		4,90	0,54	0,00	0,00	0,00	0,17	0,97	0,92	0,88	0,88	0,87	2,79	1,39	0,00	0,00	-0,15	-0,09
4	4	0,20	0,20	-0,34	0,61	0,34	-0,45	0,99	0,96	0,95	0,89	1,01	1,48	0,48	3,97	2,80	-2,14	-1,87
		1,10	0,21	0,00	-0,68	0,00	0,52	0,98	0,98	1,00	1,00	1,05	-0,82	1,34	4,11	0,39	-0,04	-0,03
		2,00	0,25	-0,55	0,68	-0,55	0,55	0,99	0,95	0,93	0,86	1,00	1,43	1,06	3,93	2,61	-2,20	-2,00
		3,00	0,81	1,28	-1,00	-1,29	0,82	1,00	0,92	0,87	0,73	0,98	4,67	0,11	4,98	5,43	-4,87	-3,02
		4,00	0,35	-0,57	0,73	-0,55	0,57	0,99	0,95	0,93	0,86	1,01	2,32	0,51	4,44	3,59	-3,12	-2,28
		4,90	0,05	0,02	-0,02	-0,34	0,54	0,98	0,98	1,00	1,00	1,05	-0,66	1,29	4,10	0,56	0,15	-0,11

Fonte: O autor

No tempo de 3s, TAB. 15, quando a carga requer mais potências ativas e reativas de 4,87 MW e 3,02 MVar, toda a potência ativa e reativa requerida pela carga passou a ser fornecida pela USF, chegando a 4,98 MW e 5,43 MVar, diminuindo assim o fornecimento de potência ativa e reativa pela SE que era 7,99 MW e 4,69 MVar respectivamente devido as cargas estarem próximas da usina fotovoltaica USF.

Quando comparado, na TAB.15, sem a injeção de potência ativa e reativa com a injeção de ativos e reativos para o pior caso, no tempo de 3,14s, onde a carga demanda maior potência de 2,79 MW e 1,97 MVar, tem se um ganho de 58,45% em potência ativa e reativas, mostrando um ganho enorme na melhoria do perfil de tensão com cargas variáveis. Esse ganho pode ser visto na curva de potências em vermelho (ativo) e laranja (reativo), FIG 65 A e B. Tabelas completas se encontram nos anexos 2.

Figura 65- Análise do perfil de tensão através da injeção de potências ativas 0 e 4 MW e de 0 e 4 MVAR de potência reativas respectivamente.

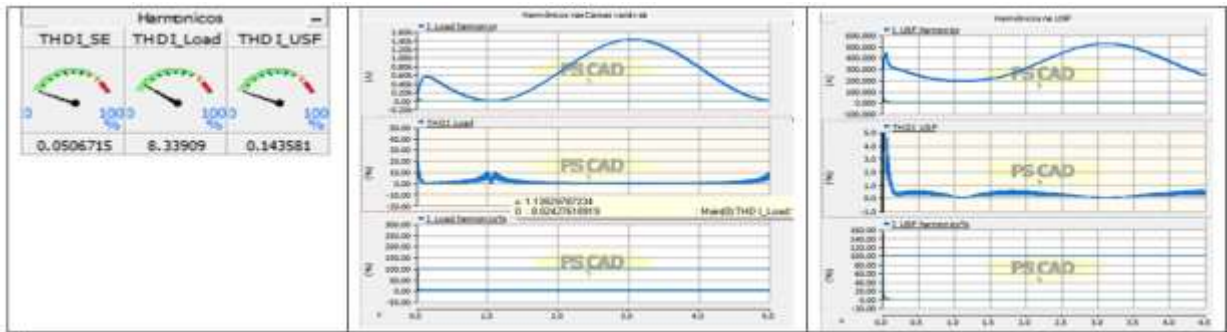


Fonte: O autor.

d) Harmônicos.

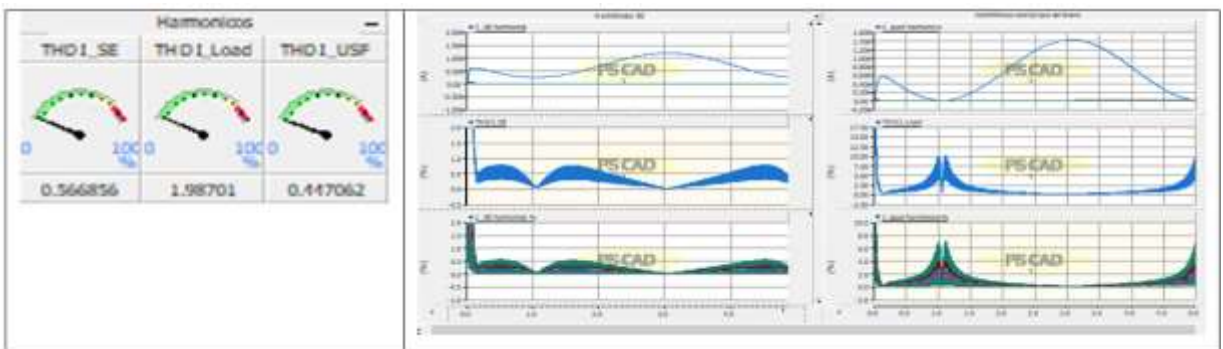
Devido a variação da curva de tensão, durante as simulações foram verificadas pequenas correntes de harmônicos e pequenos THDs com magnitude de 1,5% para a SE e 8,33%. Alguns harmônicos foram encontrados nos tempos de 0,08s, 1s, 2s e 4,5s com magnitude muito baixa, como apresentado nas FIG. 66,67 e 68. Os harmônicos encontrados nesta simulação estão dentro dos padrões das normas como mostrado na TAB. 4 e 5.

Figura 66 - Harmônicos gerado pela Carga variável e USF injetado 1 MW e 1 MVar.



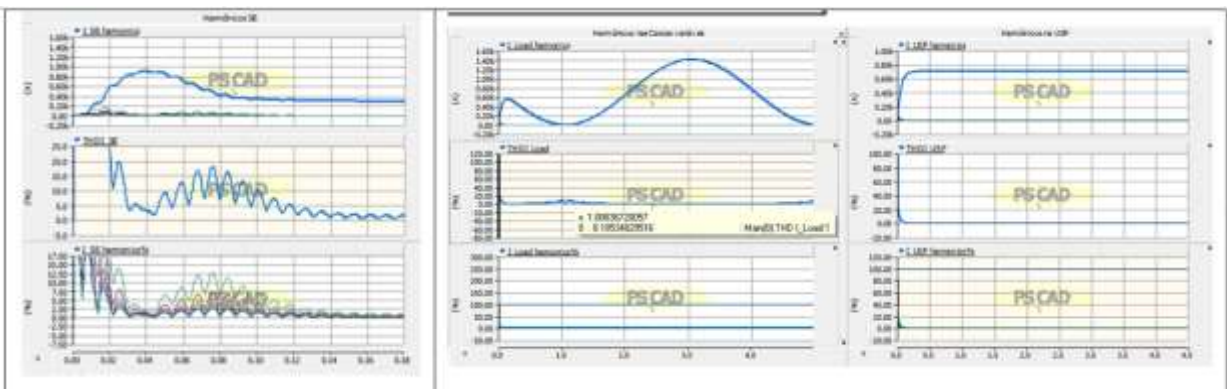
Fonte: O autor.

Figura 67 - Harmônicos gerado pela SE e pela Carga variável injetando 2 MW e 2 MVar.



Fonte: O autor.

Figura 68- Harmônicos gerados pela Carga variável e pela USF injetando 4MW e 4 MVar.



Fonte: O autor.

3.4.3 Análise da melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela USF considerando diversos perfis de carga.

Esta simulação tem por objetivo analisar a Melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela usina fotovoltaica (USF) conectada à rede elétrica, considerando diversos perfis de cargas. Neste cenário serão usados dois perfis de cargas conectados a barra 3 (B3) onde serão seguidos alguns procedimentos.

3.4.3.1 Procedimentos.

Os seguintes procedimentos serão aplicados nas simulações:

Serão escolhidos dois perfis de carga FIG. 70 e 72, TAB. 17 e 18 e serão avaliadas as tensões nas barras SE, B1, B2, B3 e B4, onde na barra 3 (B3) serão conectados os dois perfis de cargas, uma antes e outro depois, a tensão será usada para governar a injeção de reativos pela USF e o ângulo de fase na injeção de -90° , as condições para a operação da USF é apresentado na TAB. 16.

Tabela 16-Potência Ativa(P) e Potência Reativa (Q).

Item	Potência Ativa (P)	Potência Reativa (Q)
1	P= 1 MW	Q _{máx} = 0 MVar
2	P= 2 MW	Q _{máx} = 0 MVar
3	P= 4 MW	Q _{máx} = 0 MVar
4	P= 1 MW	Q _{máx} = 1 MVar
5	P= 2 MW	Q _{máx} = 2 MVar
6	P= 4 MW	Q _{máx} = 4 MVar

Fonte: O autor.

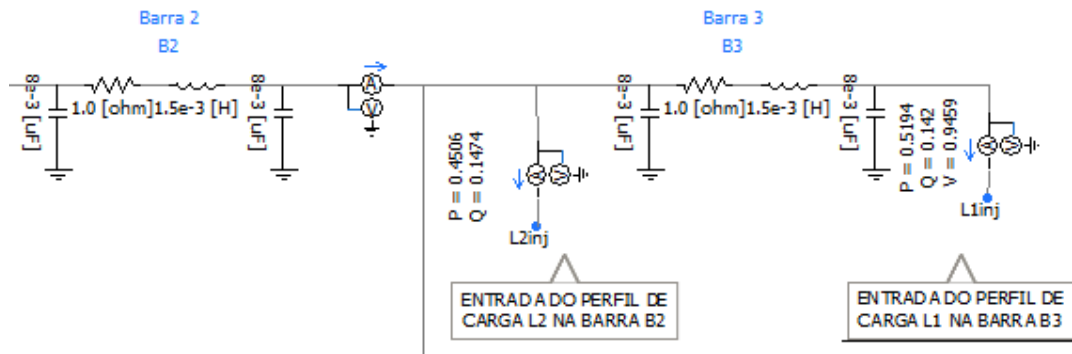
3.4.3.2 Detalhes dos principais componentes do circuito de simulação.

O circuito segue o mesmo modelo dos anteriores com alteração dos perfis de cargas e do circuito de comandos. Ver FIG 37.

3.4.3.3 Perfis de cargas.

Para os perfis de cargas foram utilizados carga externa, TAB. 17 e 18, para cargas ativa P1, P2, P3 e P4 em kW e carga reativas Q1, Q2, Q3 e Q4 em kVAr, porém foram utilizadas apenas a P1 e P2 e Q1 e Q2. Foram considerados os perfis, **dados de carga 1**, cargas L1 conectado no fim da barra B3 e gerado outro, **dados de carga 3**, cargas L2 conectado entre a barra B2 e a barra B3, como mostra a FIG. 69, a entrada dos dados externos foi baseada nas FIG. 71 e 72.

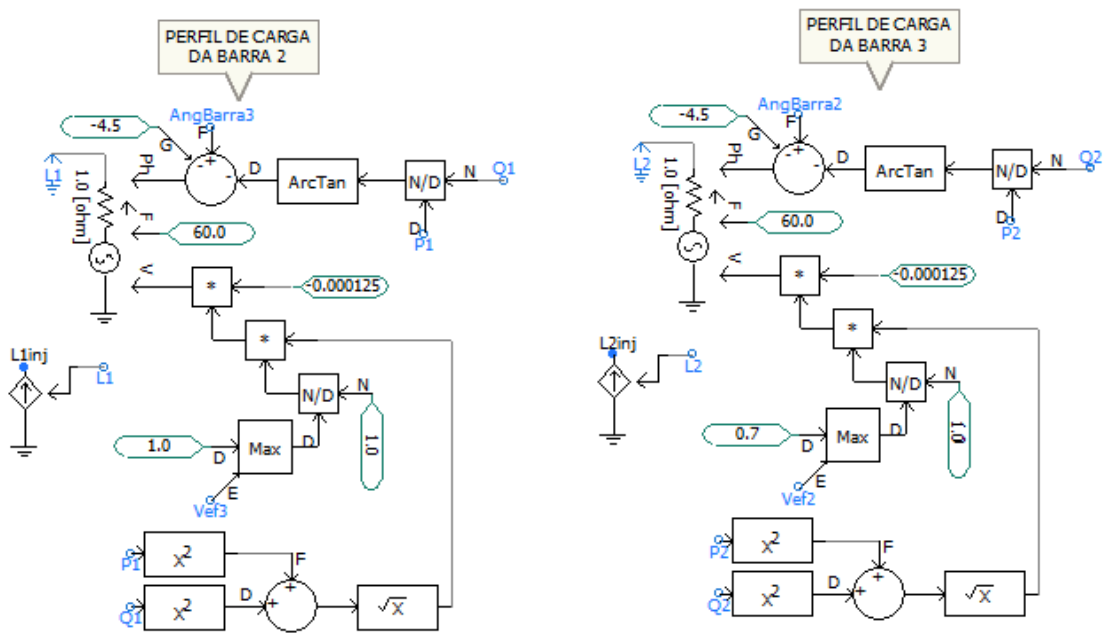
Figura 69- Entrada dos perfis de cargas nas barras B2 e B3.



Fonte: O autor.

De maneira similar às simulações anteriores, as fontes têm controle externo V, F e Ph. A primeira simulação foi executada usando o perfil de carga 1, TAB. 17 e FIG. 70 e 71 e a segunda simulação usando o perfil de carga 3, TAB.18, FIG. 70 e 72, estes dados são gravados em arquivo texto e inserido no PSCAD através do arquivo de leitura “*File Read*.”. O file Read, é um componente usado no PSCAD para ler arquivos de dados de textos em colunas pré-formatados, o arquivo pode ter até 11 colunas de dados e cada coluna contém informações que representam um sinal de controle escalar individual.

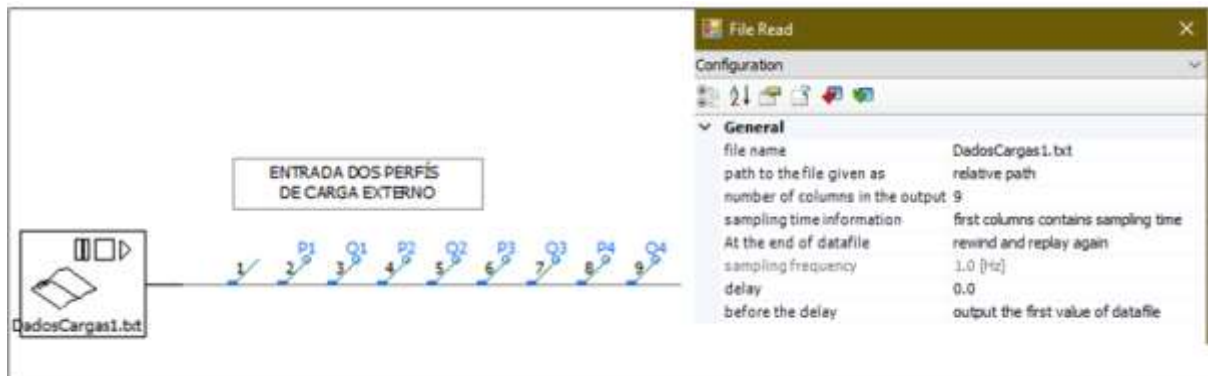
Figura 70- Detalhes dos circuitos de perfil de cargas 1 e 2 conectados a barra 3.



Fonte: O autor

a) Perfil de carga 1.

Figura 71- Entradas das potências, cargas do perfil 1 e parâmetro de configuração.



Fonte: O autor.

A TAB. 17 apresenta o primeiro perfil das cargas a serem carregadas nas barras B2 e B3, onde 2 e 4 são cargas ativas P1 e P2 (kW) e 3 e 5 cargas reativa Q1 e Q2 (kVAr) nos tempos 11 - 20h, FIG. 71. Arquivo de texto contendo o perfil das cargas em cada uma das barras de 1 a 4.

Tabela 17- Perfil de carga a ser carregado para o arquivo **DadosCarga1** no PSCAD.

0	800	300	750	250	900	200	1100	400
0.99	800	300	750	250	900	200	1100	400
1	850	350	750	250	950	250	1100	500
1.99	850	350	750	250	950	250	1100	500
2	900	400	850	350	1000	300	1200	500
2.99	900	400	850	350	1000	300	1200	500
3	950	450	950	350	1100	400	1200	500
3.99	950	450	950	350	1100	400	1200	500
4	1150	650	950	350	1100	400	1200	500
4.99	1150	650	950	350	1100	400	1200	500
5	1150	650	1150	350	1100	400	1200	600
5.99	1150	650	1150	350	1100	400	1200	600
6	850	350	1150	350	1000	400	1000	600
6.99	850	350	1150	350	1000	400	1000	600
7	850	350	750	350	900	400	800	300
7.99	850	350	750	350	900	400	800	300
8	750	250	650	250	800	300	700	200
8.99	750	250	650	250	800	300	700	200
9	550	150	450	150	600	100	500	100
9.99	550	150	450	150	600	100	500	100

Fonte: Autor.

- b) Perfil de carga 3 alterados para os tempos 0, 1, 2 em azul e 4 e 5 em amarelo.

Figura 72- Entradas das potências e cargas do perfil 3.



Fonte: O autor.

A TAB 18, apresenta os perfis de cargas alteradas, perfil de carga 3, a serem carregadas nas barras B2 e B3, onde 2 e 4 cargas ativa P1 e P2 (kW), 3 e 5 cargas reativa Q1 e Q2 (kVAr) nos tempos 11 - 20h, FIG. 72. Arquivo de texto com conteúdo o perfil das cargas em cada uma das barras de 1 a 4.

Tabela 18- Perfil de carga a ser carregado para o arquivo **DadosCarga3** no PSCAD.

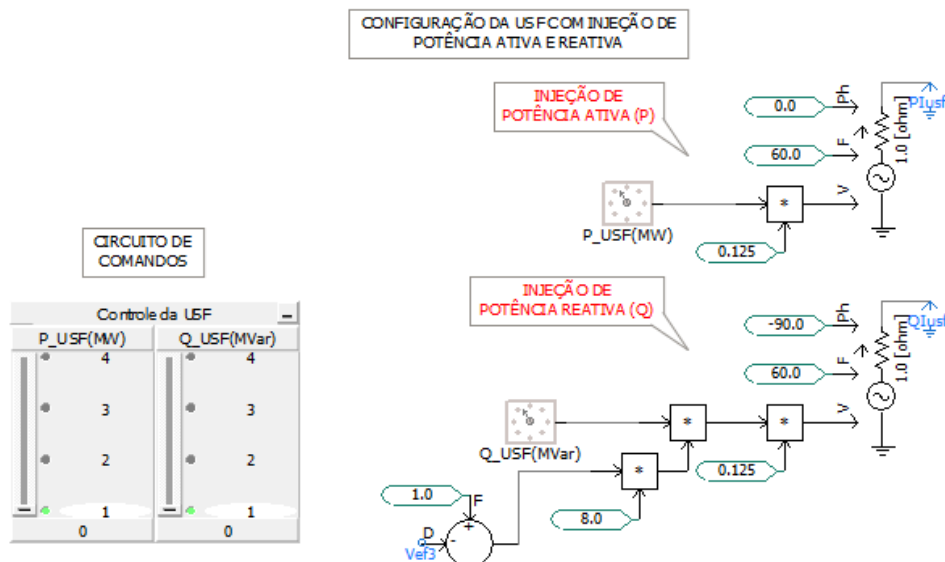
0	600	300	750	250	700	200	900	400
0.99	600	300	750	250	700	200	900	400
1	1050	350	750	450	950	250	900	500
1.99	1050	350	750	450	950	250	900	500
2	900	400	850	350	1000	300	1200	500
2.99	900	400	850	350	1000	300	1200	500
3	950	450	950	350	1100	400	1200	500
3.99	950	450	950	350	1100	400	1200	500
4	1000	650	950	350	1100	500	1200	500
4.99	1000	650	950	350	1100	500	1200	500
5	1100	650	1150	350	1100	400	1100	600
5.99	1110	650	1150	350	1100	400	1200	600
6	850	350	1150	350	1000	400	1000	600
6.99	850	350	1150	350	1000	400	1000	600
7	850	350	750	350	900	400	800	300
7.99	850	350	750	350	900	400	800	300
8	750	350	650	250	800	300	700	200
8.99	750	350	650	250	800	300	700	200
9	550	150	450	150	600	100	500	100
9.99	550	150	450	150	600	100	500	100

Fonte: O autor.

3.4.3.4 Circuito de comandos e saídas das simulações

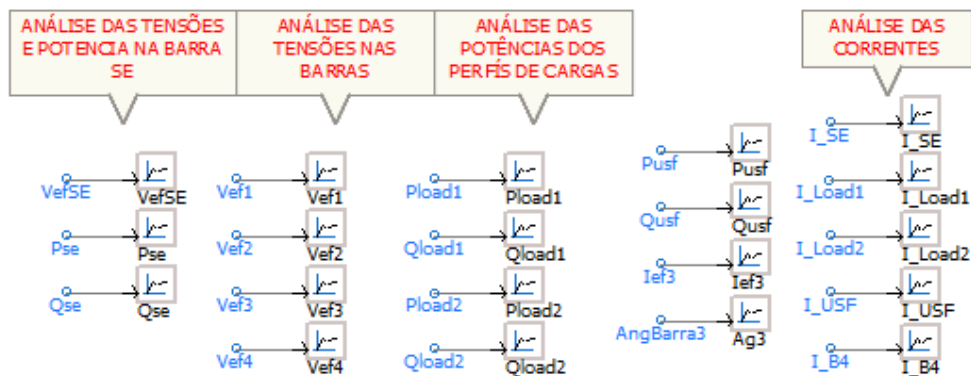
Na FIG. 73, são apresentados o circuito da USF e os circuitos de comando. Os circuitos de comando são compostos por duas chaves rotativa tipo Dial para inserção de potências ativas (P) e reativa (Q) para a USF com intervalo de 0 a 5. O ângulo de fase de -90° para a injeção de potências Ativas P (MW) e Reativos Q (MVar), conforme TAB. 16. A USF é representada por uma fonte de corrente de 132,79kA, frequência de 60Hz, tempo de 1s, constantes de conversões de 0,125 para correção da potência reativa Q, onde, -90 capacitivo e $+90$ indutivo, FIG. 73. As saídas das simulações estão detalhas na FIG. 74. Para as análises de harmônicos FFT-Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier) estão representados nas FIG.75 e 76 e na FIG. 77 estão representados os medidores instantâneos.

Figura 73- Detalhes do circuito de comandos e do circuito da USF.



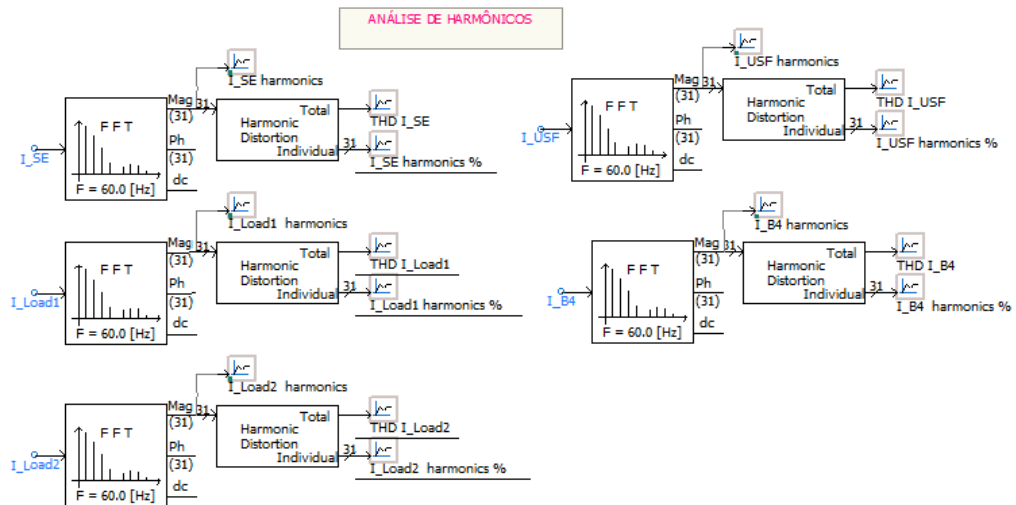
Fonte: O autor.

Figura 74- Detalhes das saídas.



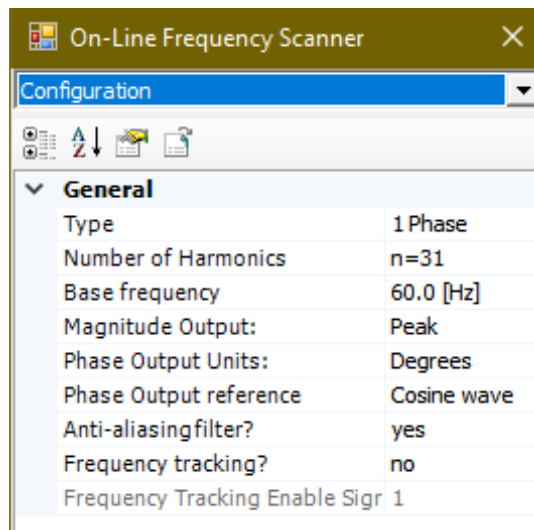
Fonte: O autor.

Figura 75- Detalhes das análises de Harmônicos.



Fonte: O autor.

Figura 76- Configuração do escâner de frequência para obtenção de harmônicos



Fonte: O autor.

Figura 77- Detalhes dos medidores.



Fonte: O autor.

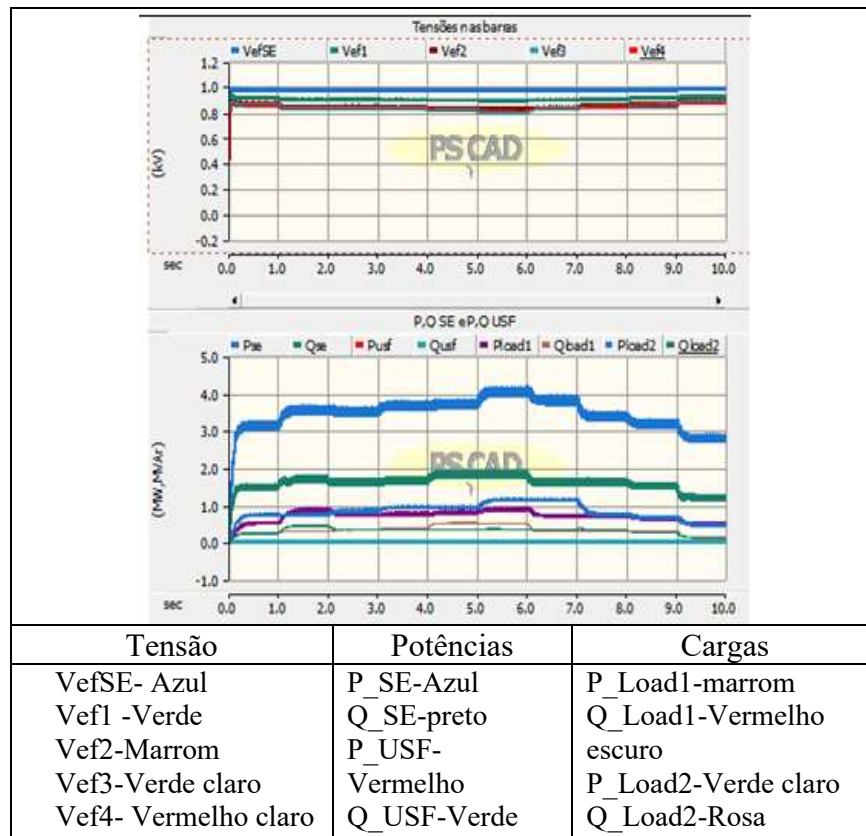
3.4.3.5 Resultados da Simulação 3 - Melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela USF considerando diversos perfis de cargas.

a) Considerando perfil de carga 1.

- Com a USF desligada.

Nesta terceira simulação foi utilizado um circuito para vários perfis de carga, onde elas são obtidas do arquivo de texto externo denominado de **DadosCarga1.txt**, TAB. 17 e FIG. 71. O objetivo é analisar as melhorias do perfil de tensão da Rede de Distribuição (RD) quando vários perfis de cargas, FIG. 69, e Usina Fotovoltaica, FIG. 74, estão conectados ao barramento da rede elétrica utilizando dos serviços auxiliares da USF como, a injeção de potências ativas e reativas, para corrigir e ou amenizar os problemas. Para tal foram usadas duas condições: considerando a mesma fora de operação e em operação, verificando as potências, correntes, tensões nas barras SE, B1, B2, B3 e B4, foram considerados para a análise o intervalo de tempo de 0 a 10 segundos. Os levantamentos das amostragens de dados foram obtidos nos tempos de 0,5s e final em 9,5s. Os dados estão representados nos gráficos e tabelas que compõem este trabalho.

Figura 78-Detalhe dos gráficos de tensões e potências com a USF fora de operação.



Fonte: O autor.

As tensões foram representadas nos gráficos da FIG. 78, pelas siglas: VefSE (azul), Vef1 (verde), Vef2 (marrom), Vef3 (verde claro) e Vef4 (vermelho claro). Para as potências seguem o mesmo padrão, sendo P-SE traço mais forte azul, Q_SE traço mais forte verde escuro, P_USF (vermelho claro), Q_USF (verde) e para as cargas P_Load 1 (marrom), Q_load 1 (verde mais claro), P_load 2 (laranja) e Q_Load 2 (Marrom).

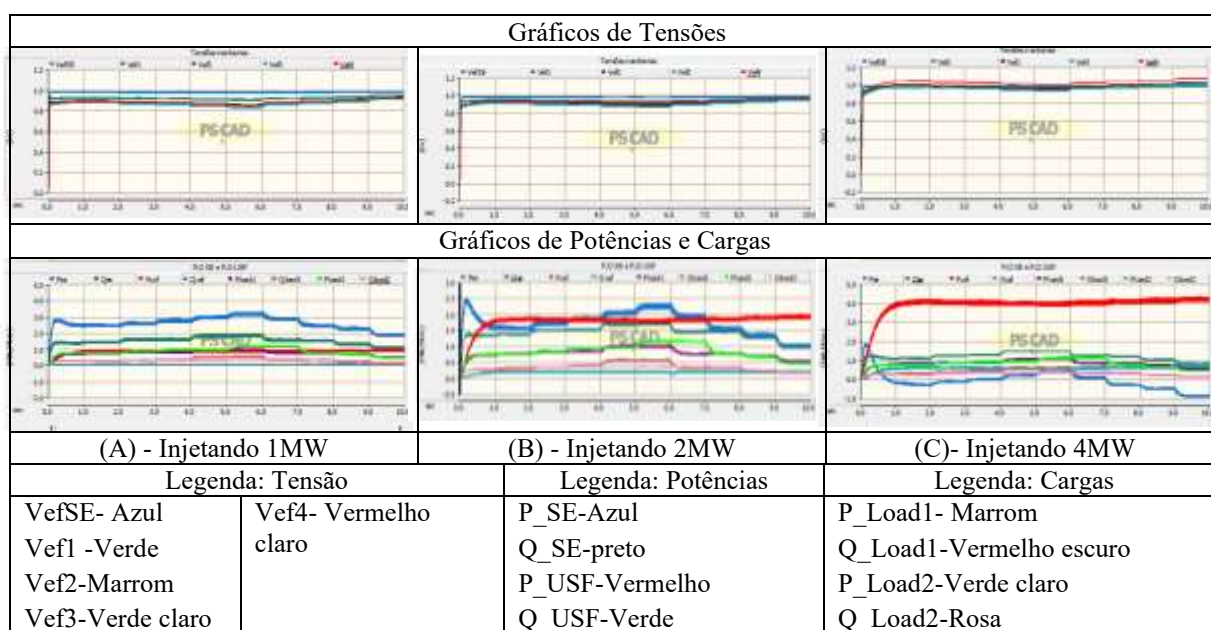
Tabela 19-Dados obtidos dos gráficos com a USF fora de operação, potência ativa e reativa igual a zero para comparação com a USF Operando.

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVAR	Tempo (s)	Tensões kV					Potência na SE, USF (MW)				Gargas (Load) kW e KVar				Angulo Fase B3 (graus)
			Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load 1	Q_Load 1	P_Load 2	Q_Load 2	
			VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4									
0	0	0,50	0,98	0,91	0,86	0,85	0,85	3,42	1,52	0,00	0,00	0,67	0,24	0,75	0,25	-3,70
		1,00	0,97	0,91	0,86	0,85	0,84	0,39	1,47	0,00	0,00	0,68	0,25	0,75	0,25	-3,69
		2,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,38	1,55	0,00	0,00	0,71	0,29	0,75	0,16	-3,65
		3,00	0,97	0,90	0,85	0,83	0,83	3,72	1,68	0,00	0,00	0,77	0,37	0,92	0,35	-3,80
		4,00	0,97	0,90	0,84	0,82	0,82	3,82	1,78	0,00	0,00	0,81	0,42	0,96	0,34	-3,81
		5,00	0,97	0,89	0,82	0,80	0,81	3,94	1,87	0,00	0,00	0,92	0,52	0,97	0,34	-3,81
		6,00	0,97	0,90	0,84	0,82	0,82	4,13	1,78	0,00	0,00	0,92	0,50	1,05	0,34	-4,32
		7,00	0,97	0,90	0,84	0,82	0,82	3,77	1,66	0,00	0,00	0,70	0,28	1,13	0,38	-4,30
		8,00	0,98	0,91	0,87	0,85	0,85	3,46	1,65	0,00	0,00	0,72	0,28	0,75	0,34	-3,52
		9,00	0,98	0,92	0,88	0,87	0,86	3,05	1,36	0,00	0,00	0,62	0,20	0,63	0,23	-0,35
9,50	0,98	0,92	0,89	0,88	0,87	2,86	1,21	0,00	0,00	0,49	0,12	0,46	0,14	-3,12		

Fonte: O autor.

- **Considerando a injeção somente de potência ativa pela USF.**

Figura 79- Gráficos da USF injetando potência Ativa de 1 2 e 4 MW e reativos iguais a zeros.



Obs.: As tabelas completas se encontram no anexo 3.

Fonte: O autor.

Tabela 20- Injeção de Potência Ativa de 1, 2 e 4 MW e Reativo igual a 0.

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVar	Tempo (s)	Tensões kV					Potência na SE, USF (MW)				Gargas (Load) kW e KVar				Angulo Fase B3 (graus)
			Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load 1	Q_Load 1	P_Load 2	Q_Load 2	
			VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4									
1	0	0,50	0,98	0,92	0,89	0,87	0,88	2,66	1,36	0,68	0,03	0,69	0,25	0,74	0,25	-2,43
		1,00	0,98	0,93	0,89	0,88	0,89	2,41	1,41	0,85	0,05	0,70	0,26	0,74	0,25	-2,07
		2,00	0,98	0,92	0,88	0,86	0,88	2,48	1,40	0,88	0,07	0,74	0,29	0,75	0,24	-1,94
		3,00	0,97	0,91	0,87	0,55	0,87	2,68	1,63	0,90	0,07	0,79	0,34	0,86	0,34	-1,95
		4,00	0,97	0,91	0,86	0,84	0,86	2,69	1,62	0,86	0,05	0,80	0,38	0,94	0,35	-2,10
		5,00	0,97	0,90	0,85	0,83	0,85	2,96	1,82	0,84	0,05	0,96	0,53	0,95	0,35	-2,07
		6,00	0,98	0,92	0,87	0,86	0,87	3,12	1,89	0,83	0,05	0,94	0,54	1,14	0,36	-2,52
		7,00	0,98	0,92	0,89	0,87	0,89	2,79	1,58	0,85	0,05	0,72	0,31	1,12	1,12	-2,54
		8,00	0,98	0,93	0,90	0,89	0,90	2,53	1,54	0,91	0,07	0,75	0,29	0,76	0,34	-1,82
		9,00	0,98	0,94	0,91	0,90	0,91	2,19	1,27	0,87	0,07	0,65	0,20	0,64	0,23	-1,85
9,50	0,98	0,94	0,92	0,91	0,92	1,93	1,09	0,92	0,06	0,51	0,14	0,45	0,15	-1,44		
2	0	0,50	0,98	0,94	0,91	0,90	0,92	1,92	1,33	1,45	0,11	0,71	0,28	0,75	0,25	-1,22
		1,00	0,98	0,94	0,92	0,90	0,93	1,52	1,34	1,77	0,19	0,72	0,28	0,73	0,23	-0,49
		2,00	0,98	0,94	0,92	0,90	0,93	1,74	1,47	1,85	0,17	0,81	0,33	0,85	0,33	-0,32
		3,00	0,97	0,93	0,91	0,89	0,92	1,91	1,53	1,87	0,18	0,85	0,39	0,96	0,35	-0,37
		4,00	0,97	0,93	0,90	0,88	0,91	1,82	1,52	1,84	0,19	0,84	0,39	0,95	0,34	-0,48
		5,00	0,98	0,92	0,89	0,87	0,91	2,14	1,64	1,79	0,20	1,00	0,54	0,99	0,33	-0,55
		6,00	0,98	0,93	0,90	0,89	0,92	2,21	1,74	1,75	0,17	0,98	0,54	1,13	0,36	-0,87
		7,00	0,98	0,94	0,92	0,90	0,93	1,98	1,41	1,82	0,20	0,76	0,31	1,14	0,35	-0,91
		8,00	0,98	0,94	0,93	0,92	0,94	1,50	1,41	1,83	0,19	0,76	0,30	0,74	0,33	-0,22
		9,00	0,98	0,95	0,95	0,93	0,96	1,38	1,21	1,92	0,18	0,69	0,21	0,65	0,23	-0,26
9,50	0,98	0,96	0,95	0,94	0,96	1,00	1,07	1,97	0,20	0,52	0,15	0,46	0,15	0,12		
4	0	0,50	0,98	0,96	0,97	0,95	1,00	0,41	1,51	0,74	0,45	0,73	0,29	0,74	0,25	1,16
		1,00	0,98	0,98	0,99	0,97	1,03	-0,18	1,10	3,81	0,59	0,76	0,29	0,74	0,25	2,25
		2,00	0,98	0,97	0,98	0,97	1,03	0,31	1,12	4,11	0,63	0,83	0,33	0,74	0,24	2,55
		3,00	0,98	0,97	0,98	0,96	1,02	-0,12	1,24	4,17	0,62	0,88	0,38	0,86	0,34	2,55
		4,00	0,98	0,96	0,96	0,94	1,01	0,05	1,32	4,04	0,59	0,91	0,42	0,95	0,34	2,45
		5,00	0,98	0,96	0,96	0,93	1,00	0,18	1,45	3,96	0,60	1,07	0,60	0,94	0,34	2,47
		6,00	0,98	0,97	0,98	0,96	1,02	0,38	1,44	3,91	0,60	1,06	0,57	1,13	0,35	2,10
		7,00	0,98	0,98	0,99	0,98	1,04	0,11	1,24	3,94	0,61	0,81	0,33	1,13	0,38	2,07
		8,00	0,99	0,99	1,00	0,99	1,05	-0,26	1,15	4,17	0,60	0,32	0,76	0,76	0,33	2,65
		9,00	0,99	0,99	1,02	1,00	1,06	-0,81	0,86	4,29	0,72	0,63	0,17	0,54	0,17	2,82
9,50	0,98	0,99	1,02	1,01	1,07	-0,87	0,81	4,29	0,75	0,56	0,15	0,46	0,15	2,98		

Obs.: Tabelas completas no anexo 3

Fonte: O autor.

Após executar a simulação 3 com o perfil de cargas externas 1, TAB. 17, para cada potência ativa injetada, observou-se uma melhoria no perfil de tensão quando comparado a FIG. 78 e TAB.19, com a FIG. 78 e TAB. 20. Ao observar os gráficos de tensão comparando-os, no gráfico da FIG. 78, a pior tensão ocorre na barra B4 (Vef4) com tensão eficaz variando de 0,81p.u. a 0,86p.u., já na FIG. 79C, com injeção de 4MW, nota se a elevação do gráfico chegando a quase 1p.u., curva em vermelho, barra B4(Vef4) que é o ideal.

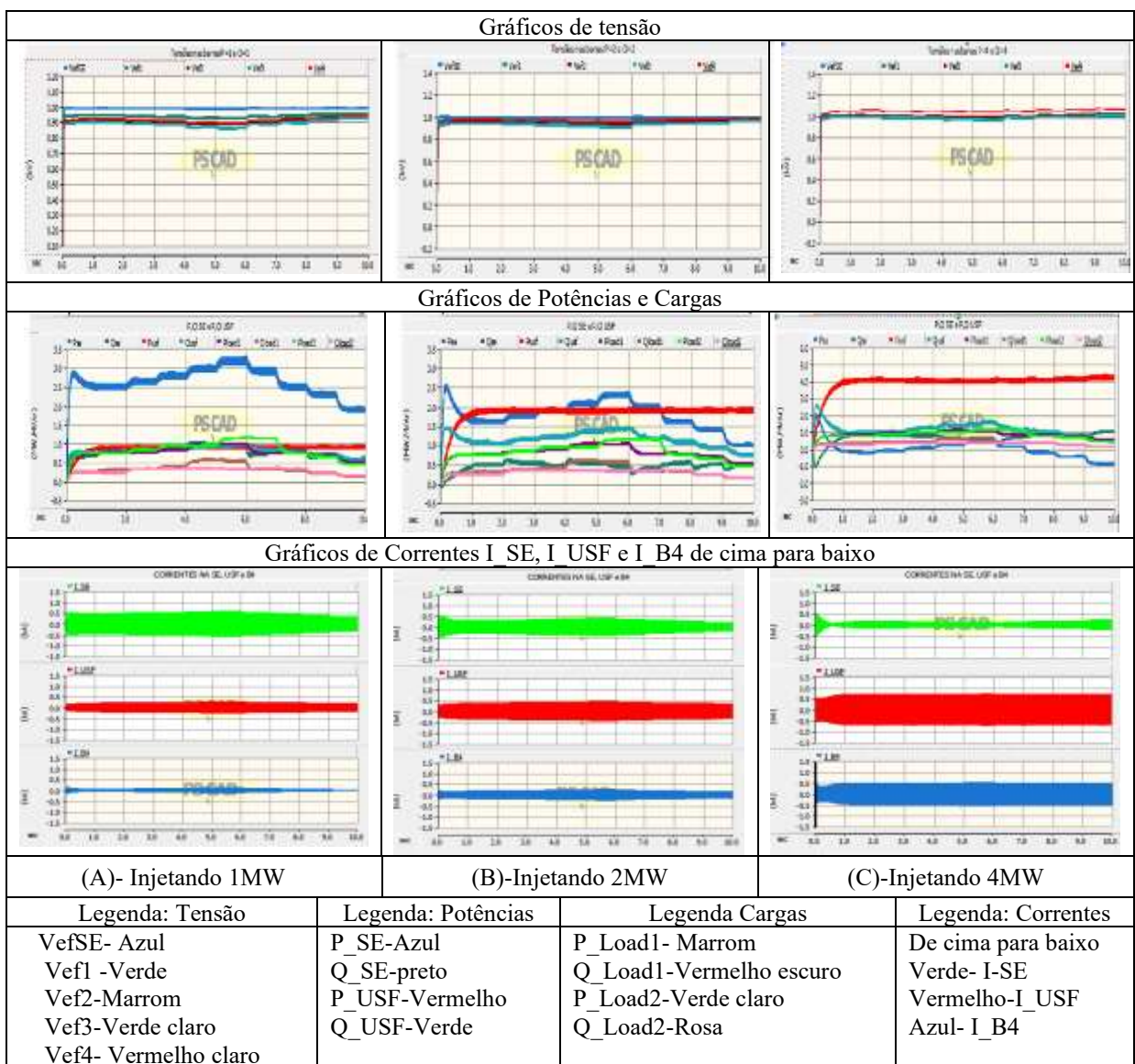
As tensões nas barras SE e B1 são constantes apresentando pouca variação, FIG 79 (VefSE e Vef1). No gráfico de potências FIG.79, com injeção de 1MW, 2MW e 4MW, nota-se um aumento considerável na barra B4 e uma redução nas potências fornecidas pela SE, boa parte da potência ativa requisitada pelas cargas passa a ser fornecida pela USF, principalmente por a mesma estar próximo à carga. A potência ativa da SE, coluna azul da TAB. 19, tem seu valor máximo eficaz de 4,13 MW em 6s e potência reativa valor máximo eficaz de 1,87MVar, gráfico verde, TAB 19, em 5s. A medida que a USF vai injetando potência ativa de 1, 2 e 4MW é possível notar que a potência ativa da SE vai sofrendo redução, com a injeção de 4MW, FIG. 20, seu maior valor é observado aos 0,5s de 0,41MW e seu menor valor aos 9,5s (-0,87 MW) significando que ela passa a receber potência da USF que nesse intervalo de tempo injeta 4,29MW, ou seja, toda a potência requerida pela carga passa a ser fornecida pela USF, TAB.20 parte das potências. Ao injetar 4MW pela USF, gráfico vermelho, visivelmente se nota a melhoria no perfil de tensão no barramento B4 chegando a 1p.u..

Foi observado também que tensão em certos intervalos de tempo nas barras B2, B3 e B4, FIG. 79 e TAB.20, chega a mais de 100%, linha vermelha da curva de tensão da USF, indicando a melhoria do perfil de tensão nos barramentos. Injetando 4MW de potência ativa o perfil de tensão tem ganho de 10,88%, quando comparando a USF nas duas situações, fora de operação e em operação, com a USF fora de operação toda potência ativa e reativa requerida pelas cargas eram fornecidas pela SE, isso fazia com que a SE trabalhasse mais injetando potências ativa e reativa para o sistema, essa elevação na demanda elevava a corrente, já que a tensão é inversamente proporcional a corrente, uma vez que a SE não podia elevar a tensão, já que a tensão nas barras eram as mesmas, elevava a corrente para suprir as cargas, com isso aumentava as perdas e isso era sentido em todos os barramentos, principalmente nas barras mais afastadas da SE e mais próxima a carga B3 e B4, isso causava desequilíbrio da tensão e consequentemente afundamentos. Melhorias no perfil de tensão são observadas nos tempos 6s, 7s e 9s a medida que as cargas vão requisitando mais energia da SE, parte dessa energia em forma de potência ativa de 1MW, 2MW e 4MW é injetada pela USF TAB.20, reduzindo o fornecimento de energia gradativamente fornecida pela SE, nos campos marcados com amarelo para tensão, potências e cargas.

A entrada em operação da USF, FIG.20, (P_USF e Q_USF), favorecia as cargas próximas a ela, trazendo benefícios para o sistema como um todo, já que ela comporta como uma fonte de corrente, assim ela injetava correntes no sistema através da fonte de corrente fornecidas pelos **inversores estáticos** conectados à rede elétrica, com isso melhorando o perfil de tensão, já que parte da potência requerida pela carga é suprida por ela, aliviando os barramentos e consequentemente a SE, mantendo a tensão equilibrada FIG.79C, gráfico de tensões e potencias.

- **Considerando a injeção de potência ativa e reativa pela USF.**

Figura 80- Gráficos da USF injetando de potência Ativa e Reativa de 1, 2 e 4 MW /MVar.



Fonte: O autor.

Tabela 21- Injeção pela USF de Potência Ativa e Reativa de 1, 2 e 4 MW/ MVar

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVar	Tempo (s)	Tensões kV					Potência na SE, USF e Gargas (Load)								ângulo Fase
			Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load 1	Q_Load 1	P_Load 2	Q_Load 2	
			VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4									
1	1	0,50	0,99	0,94	0,91	0,90	0,91	2,54	0,65	0,73	0,79	0,70	0,24	0,73	0,26	-3,84
		1,00	0,99	0,94	0,92	0,90	0,92	2,43	0,73	0,85	0,77	0,71	0,27	0,74	0,23	-3,51
		2,00	0,99	0,94	0,91	0,89	0,91	2,57	0,79	0,93	0,78	0,77	0,31	0,76	0,24	-3,39
		3,00	0,99	0,94	0,90	0,83	0,91	2,64	0,84	0,88	0,80	0,79	0,34	0,85	0,34	-3,52
		4,00	0,98	0,93	0,89	0,87	0,90	2,84	0,84	0,93	0,84	0,84	0,41	0,96	0,34	-3,74
		5,00	0,98	0,93	0,88	0,86	0,89	3,03	0,95	0,89	0,93	1,00	0,58	0,96	0,34	-3,93
		6,00	0,99	0,94	0,90	0,89	0,91	3,07	0,80	0,93	0,97	0,95	0,44	1,14	0,33	-4,56
		7,00	0,99	0,94	0,91	0,90	0,92	2,78	0,85	0,89	0,84	0,74	0,32	1,10	0,34	-4,06
		8,00	0,99	0,95	0,92	0,91	0,93	2,57	0,83	0,93	0,79	0,77	0,30	0,76	0,34	-3,32
		9,00	0,99	0,95	0,93	0,91	0,93	1,91	0,59	0,90	0,63	0,52	0,14	0,46	0,15	-2,66
9,50	0,99	0,95	0,94	0,97	0,94	1,96	0,58	0,94	0,57	0,52	0,14	0,46	0,15	-2,58		
2	2	0,50	0,99	0,96	0,95	0,93	0,97	1,98	0,24	1,46	1,27	0,72	0,28	0,73	0,25	-3,53
		1,00	0,99	0,96	0,95	0,94	0,97	1,62	0,49	1,83	1,06	0,75	0,29	0,75	0,25	-2,37
		2,00	0,99	0,96	0,95	0,93	0,97	1,65	0,50	1,95	1,07	0,80	0,33	0,76	0,26	-2,14
		3,00	0,99	0,96	0,94	0,92	0,96	1,77	0,54	1,91	0,14	0,84	0,38	0,86	0,33	-2,35
		4,00	0,99	0,95	0,93	0,91	0,96	1,92	0,52	1,90	1,24	0,88	0,44	0,95	0,35	-2,61
		5,00	0,99	0,95	0,93	0,91	0,93	2,19	0,55	1,89	1,36	1,04	0,58	1,02	0,34	-3,07
		6,00	0,99	0,96	0,95	0,94	0,97	2,36	0,54	1,95	1,46	1,06	0,56	1,16	0,33	-3,45
		7,00	0,99	0,96	0,95	0,94	0,97	1,98	0,46	1,89	1,18	0,78	0,32	1,14	0,35	-2,99
		8,00	0,99	0,97	0,96	0,95	0,98	1,58	0,54	1,85	1,09	0,79	0,31	0,74	0,34	-2,09
		9,00	0,99	0,97	0,96	0,95	0,98	1,16	0,37	1,87	0,95	0,63	0,17	0,57	0,19	-1,69
9,50	0,99	0,97	0,97	0,96	0,99	1,04	0,48	1,96	0,74	0,53	0,14	0,45	0,15	-1,08		
4	4	0,50	1,00	0,99	1,00	0,98	1,04	-0,56	0,08	3,22	1,58	0,78	0,31	0,75	0,26	-1,45
		1,00	0,99	0,99	1,00	0,99	1,05	-0,16	0,66	4,02	1,03	0,80	0,30	0,76	0,25	1,25
		2,00	0,99	0,99	1,00	0,98	1,05	-0,12	0,82	3,96	0,97	0,85	0,39	0,80	0,34	1,77
		3,00	0,99	0,98	1,00	0,98	1,05	0,06	0,74	4,05	1,14	0,92	0,42	0,93	0,33	1,34
		4,00	0,98	0,98	1,00	0,98	1,05	0,03	0,71	4,12	1,28	0,93	0,44	0,93	0,35	1,19
		5,00	0,99	0,98	0,99	0,96	1,04	0,28	0,60	4,14	1,39	1,13	0,62	0,97	0,35	0,70
		6,00	0,99	0,98	1,00	0,98	1,05	0,46	0,48	4,00	1,64	1,11	0,62	1,14	0,36	0,14
		7,00	0,99	0,99	1,00	0,99	1,05	0,11	0,68	4,11	1,19	0,83	0,33	1,14	0,35	0,90
		8,00	0,99	0,99	1,01	1,00	1,06	-0,27	0,77	4,12	1,04	0,84	0,34	0,75	0,34	1,86
		9,00	0,99	0,99	1,01	0,99	1,06	-0,46	0,82	4,22	0,70	0,75	0,24	0,65	0,23	2,28
9,50	0,98	0,99	1,02	1,00	1,06	-0,84	0,99	4,14	0,55	0,55	0,16	0,45	0,15	3,30		

Obs.: Tabelas completas no Anexo 3.

Fonte: O autor.

Nos gráficos da FIG. 80 e a TAB. 21 estão representados a injeção de potência ativa 1,2 e 4MW e reativa 1,2 e 4 MVar pela USF de acordo com a TAB.16. Quando injetado 1MW de potência ativa e 1MVar de potência reativa para os tempos de 5s, 6s quando a carga requer mais potências ativa, P_Load 1 e P_Load 2 e reativa Q_Load 1 e Q_Load 2 da SE (P_SE e Q_SE) de 3,94 MW e 4,13MW ativos e 1,87MVar e 1,78MVar reativos, de acordo com a FIG. 19, já é possível notar uma melhoria no perfil de tensão, que passa de 0,81p.u. e 0,82p.u. TAB 19 para 0,89 p.u. e 0,91p.u. TAB. 21, onde as seleções das células em amarelo potência

ativa e em azul claro potência reativa, também é possível observar uma redução da potência injetada pela SE que antes eram 3,94 MW e 4,13MW ativos e 1,87MVar e 1,78MVar reativos para 3,03MW e 3,07MW ativos e 0,95MVar e 0,80MVar para os tempos de 6s e 7s, uma redução de aproximadamente 20% nas potencias ativas e 50% nas potências reativas.

À medida que vai se injetando potências ativas de 2 e 4MW e reativas de 2 e 4MVar pela USF, o perfil de tensão tendem a melhorar consideravelmente, chegando em 0,92p.u. e 0,82p.u., para 0,93p.u. e 0,97p.u. nos tempos de 5s e 6s, respectivamente quando injetado 2MW ativo e 2MVar reativos. Quando injetado 4MW de potência ativa e 4MVar de reativos, o perfil de tensão chega a 100% em algumas barras, gráficos da FIG. 80 e TAB. 21 destacados em amarelo e em azul claro, gráficos de tensão e potencias. Praticamente toda energia requerida pelas cargas está sendo fornecidas pela USF, é possível ver nos gráficos de correntes como a corrente da SE gráfico verde vai diminuído e a da USF vai aumentado, gráfico vermelho, é possível ver também a melhoria na injeção de correntes apresentada na barra B4 que é onde está conectada a USF, FIG.80, gráficos de correntes. Tabelas completas se encontram nos anexos.

b) Considerando perfil de carga 3.

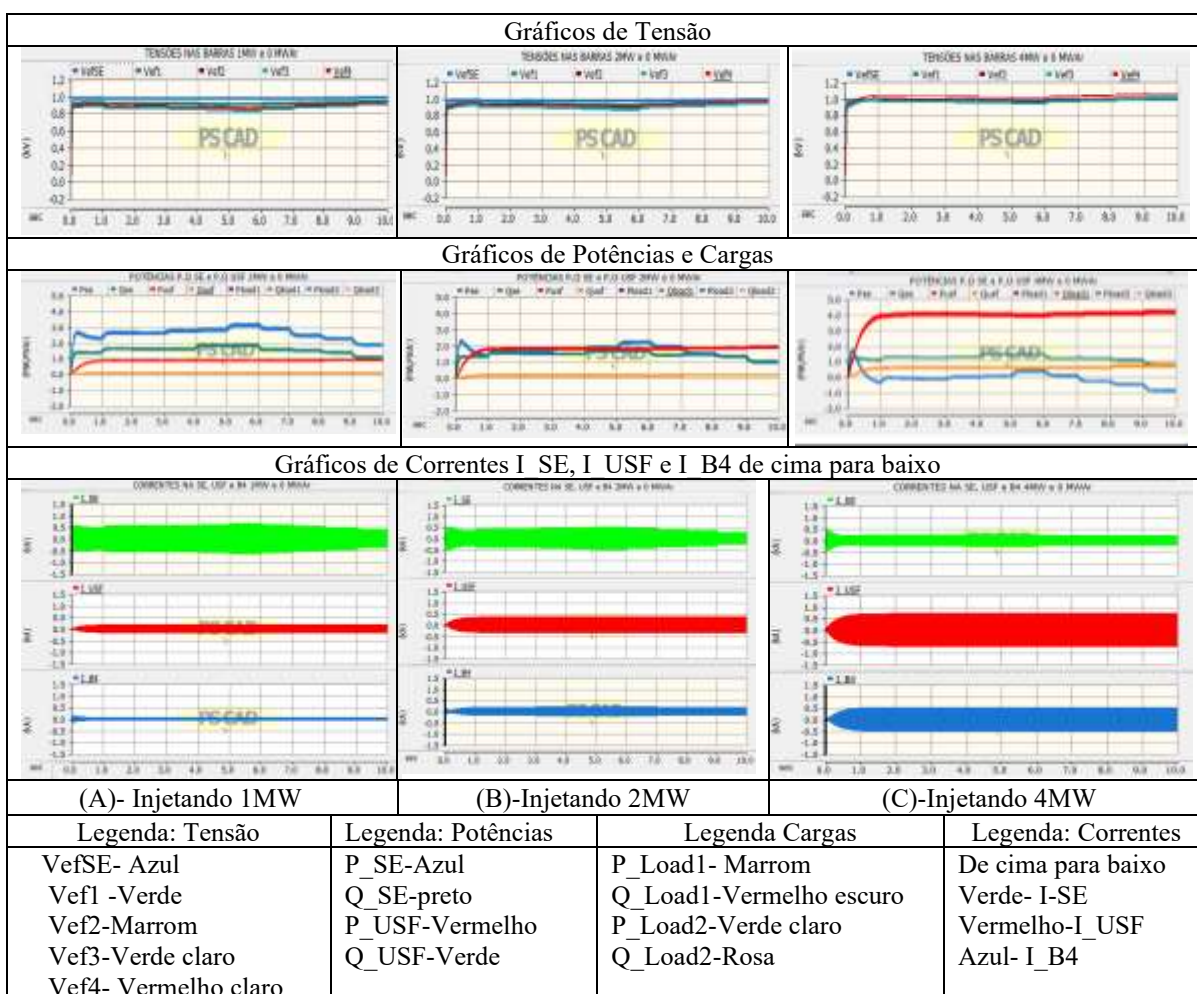
• Considerando somente a injeção de potência Ativa pela USF.

Tabela 22- Injeção pela USF de Potência Ativa Reativa de 1,2 e 4MW/ MVar

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVar	Tempo (s)	Tensões kV Barras					Potência na SE, USF e Gargas (Load) MW / MVar								Angulo Fase B3 (graus)
			VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4	P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load 1	Q_Load 1	P_Load 2	Q_Load 2	
1	0	1,00	0,98	0,92	0,88	0,86	0,88	2,73	1,64	0,88	0,06	0,91	0,30	0,76	0,44	-1,62
		2,00	0,98	0,92	0,88	0,86	0,88	2,53	1,59	0,86	0,06	0,77	0,33	0,83	0,34	-1,99
		4,00	0,97	0,91	0,87	0,84	0,86	2,74	1,84	0,84	0,06	0,83	0,53	0,94	0,35	-2,00
		6,00	0,98	0,91	0,87	0,86	0,87	2,84	1,63	0,85	0,05	0,72	0,31	1,14	0,36	-2,62
		7,00	0,98	0,93	0,89	0,87	0,89	2,49	1,55	0,90	0,07	0,74	0,30	0,76	0,34	-2,51
2	0	9,00	0,98	0,94	0,92	0,91	0,92	2,50	1,54	0,90	0,07	0,75	0,30	0,76	0,35	-1,62
		1,00	0,98	0,94	0,91	0,89	0,93	1,72	1,54	1,83	0,19	0,93	0,31	0,74	0,44	-0,09
		2,00	0,98	0,94	0,92	0,90	0,93	1,64	1,51	1,80	0,18	0,80	0,34	0,84	0,34	-0,45
		4,00	0,98	0,93	0,90	0,88	0,92	1,96	1,68	1,84	0,17	0,89	0,54	0,96	0,34	-0,40
		6,00	0,98	0,94	0,91	0,89	0,92	2,02	1,46	1,88	0,19	0,77	0,32	1,16	0,36	-0,81
4	0	7,00	0,98	0,94	0,92	0,90	0,93	1,56	1,46	1,90	0,77	0,77	0,31	0,76	0,35	-0,87
		9,00	0,99	0,96	0,96	0,95	0,97	0,99	1,06	1,95	0,20	0,52	0,15	0,46	0,15	0,13
		1,00	0,98	0,97	0,98	0,96	1,02	-0,39	1,09	3,90	0,60	0,59	0,29	0,74	0,24	2,66
		2,00	0,98	0,97	0,99	0,97	1,03	-0,04	1,29	4,04	0,59	1,01	0,31	0,76	0,43	2,43
		4,00	0,98	0,96	0,97	0,95	1,02	-0,01	1,33	4,13	0,62	0,91	0,44	0,96	0,35	2,47
4	0	6,00	0,98	0,97	0,98	0,96	1,02	0,41	1,40	3,97	0,62	1,05	0,57	1,15	0,35	2,77
		7,00	0,98	0,98	0,99	0,97	1,04	0,14	1,23	4,04	0,58	0,82	0,32	1,15	0,35	2,07
		9,00	0,99	1,00	1,02	1,01	1,07	-0,44	1,08	4,12	0,68	0,74	0,35	0,65	0,25	2,87

Fonte: O autor.

Figura 81- Gráficos da USF injetando potência Ativa de 1,2 e 4 MW e Reativos iguais a zero.



Fonte: O autor.

Após executar o programa para a simulação do circuito 3, FIG. 37, utilizando os perfis de carga 1 (um) TAB.17, foram alterados os dados e criado um perfil de carga 3 (três), TAB.18, para verificar o comportamento com outros tipos de cargas. Os mesmos procedimentos foram aplicados ao perfil de carga 3 (três) foram levantados os tempos 1s, 2s, 4s, 6s, 7s e 9s, para comparar os dois resultados entre as duas simulações.

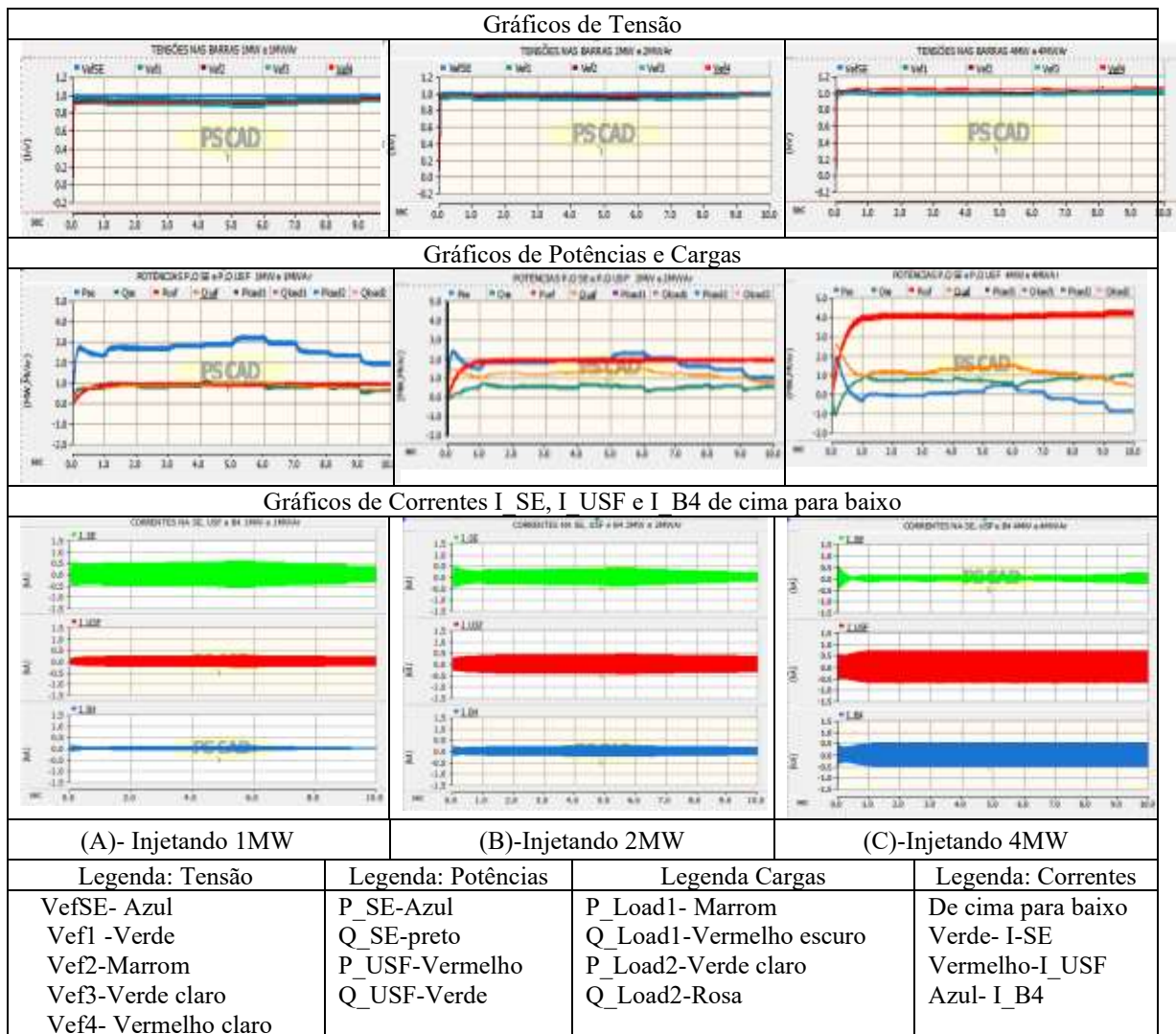
Os resultados não foram muitos diferentes dos anteriores, foram observados algumas alterações no comportamento das potências nos pontos de modificações das entradas de dados das cargas de acordo com a TAB. 18, nos intervalos de tempos marcados, 1s, 2s, 4s e 5s. simulando com a injeção apenas de potência ativa de 1MW pela USF, não foi observado muita diferença entre os dois perfis de cargas, TAB.20 e TAB.22, apesar das cargas serem diferentes. Já injetando 4MW de potência ativa foram observados uma pequena variação nas tensões da barra B2 e B3. É observado nos dois perfis de cargas potências reversa chegando

na SE, valores negativos da tabela, e gráfico azul que fica na parte negativa da curva de potencias, FIG.80C, porém nas tensões houve melhorias gráfico vermelho da FIG. 80C. quando injetado 4MW, nos gráficos de correntes é observado melhorias devido a injeção de corrente pelos inversores que trabalham como fonte de corrente.

Toda potência ativa requisitada pelas cargas P_Load1 e P_Load 2, gradativamente vai sendo fornecida pela USF, à medida que se vai injetando potência ativa vai reduzindo assim as potencias fornecidas pela SE. Mas já era de se esperar poucas variações entre os dois perfis de cargas, devido as cargas não terem valores muito diferentes, em ambos os casos houve melhorias no perfil de tensão.

- **Considerando a injeção de potência Ativa e Reativa pela USF.**

Figura 82- Gráficos da USF injetando de potências Ativa e Reativa de 1, 2 e 4 MW/ MVar



Fonte: O autor.

Tabela 23- Injeção de potência ativa (P) e reativa (Q) de 1, 2 e 4 MW e 1, 2 e 4 MVar.

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVar	Tempo (s)	Tensões kV					Potência na SE, USF e Gargas (Load)								ângulo Fase B3 (graus)
			Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load 1	Q_Load 1	P_Load 2	Q_Load 2	
			VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4									
1	1	1,00	0,98	0,93	0,90	0,88	0,91	2,45	0,85	0,89	0,71	0,61	0,27	0,74	0,31	-2,95
		2,00	0,99	0,94	0,91	0,89	0,91	2,65	0,90	0,89	0,84	0,91	0,33	0,75	0,43	-3,67
		4,00	0,99	0,93	0,90	0,88	0,90	2,81	0,83	0,92	0,83	0,84	0,40	0,95	0,34	-3,75
		6,00	0,99	0,93	0,90	0,88	0,90	3,07	0,76	0,89	0,94	0,91	0,41	1,15	0,34	-4,49
		7,00	0,99	0,94	0,91	0,89	0,92	2,94	0,84	0,93	0,84	0,76	0,32	1,14	0,38	-4,11
		9,00	0,99	0,95	0,94	0,93	0,94	2,32	0,75	0,92	0,68	0,68	0,30	0,65	0,25	-2,95
2	2	1,00	0,99	0,96	0,94	0,92	0,97	1,49	0,54	1,87	1,03	0,58	0,28	0,75	0,26	-1,79
		2,00	0,99	0,96	0,95	0,93	0,97	1,76	0,48	1,85	1,26	0,96	0,34	0,74	0,43	-2,55
		4,00	0,99	0,95	0,94	0,92	0,96	1,92	0,65	1,94	1,22	0,88	0,43	0,96	0,34	-2,51
		6,00	0,99	0,96	0,94	0,93	0,96	2,28	0,38	1,92	1,47	0,00	0,55	1,14	0,33	-3,35
		7,00	0,99	0,96	0,95	0,93	0,97	1,95	0,50	1,94	1,23	0,80	0,33	0,99	0,38	-2,63
		9,00	0,99	0,97	0,97	0,93	0,99	1,39	0,52	0,86	0,97	0,70	0,31	0,64	0,23	-1,67
4	4	1,00	0,99	0,98	1,00	0,98	1,04	-0,33	0,81	3,82	0,92	0,60	0,29	0,73	0,28	1,93
		2,00	0,99	0,98	1,00	0,98	1,05	-0,05	0,71	3,97	1,15	1,01	0,33	0,75	0,44	1,24
		4,00	0,99	0,98	0,99	0,97	1,04	0,04	0,81	3,93	1,24	0,90	0,51	0,93	0,35	1,37
		6,00	0,99	0,98	0,99	0,98	1,05	0,44	0,51	4,11	1,43	1,08	0,59	1,16	0,34	0,28
		7,00	0,99	0,98	0,99	0,98	1,04	-0,15	0,70	4,18	1,16	0,84	0,34	0,92	0,36	1,35
		9,00	0,99	0,99	1,02	1,01	1,07	-0,43	0,85	4,11	0,86	0,74	0,33	0,65	0,24	2,40

Obs.: Tabelas completa no anexo 3.

Fonte: O autor.

Para o perfil de carga 3, considerado a injeção de potências ativas e reativas pela USF, FIG. 82 e TAB. 23, graficamente não se observa muita diferença, é observado melhorias no perfil de tensão e nas potências fornecidas pela USF, com redução considerável da potencias fornecida pela SE, tanto de potências ativa quanto reativa. Quando comparado as duas tabelas a TAB.23 com a tabela TAB.20, as diferencias foram mínimas entre os dois perfis de tensão, porém quando comparado com a TAB.19, com a USF fora de operação, se observa as melhorias.

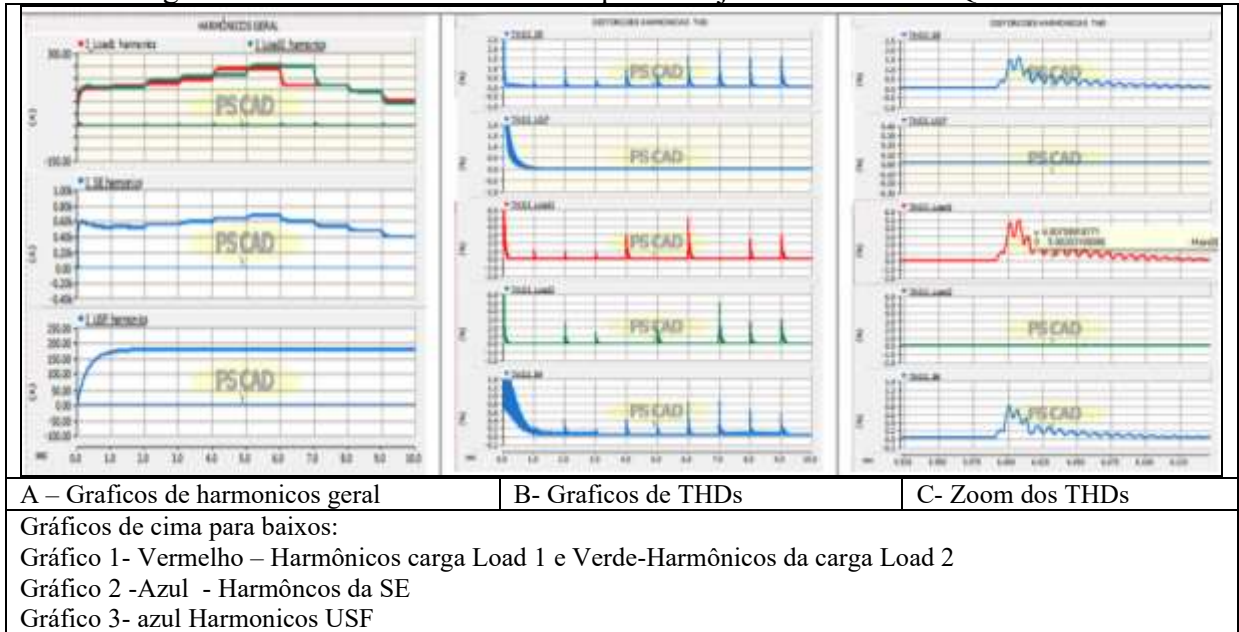
c) Harmônicos.

Relembrando que este trabalho não está focado em analisar harmônicos e sim na minimização de afundamentos de tensão e melhorias do perfil de tensão considerando perfis de cargas diversas, eles só foram abordados para demonstrar que em afundamentos de tensão podem surgir harmônicos,

Em todas as simulações realizada neste trabalho apareceram harmônicos devido a forma de onda causada pelos afundamentos, porém durante as simulações da parte 3. Quando analisados os gráficos de harmônicos injetando potências ativas, os harmônicos encontrados foram resultantes dos perfis de cargas diversos. Os maiores picos de harmônicos ocorreram

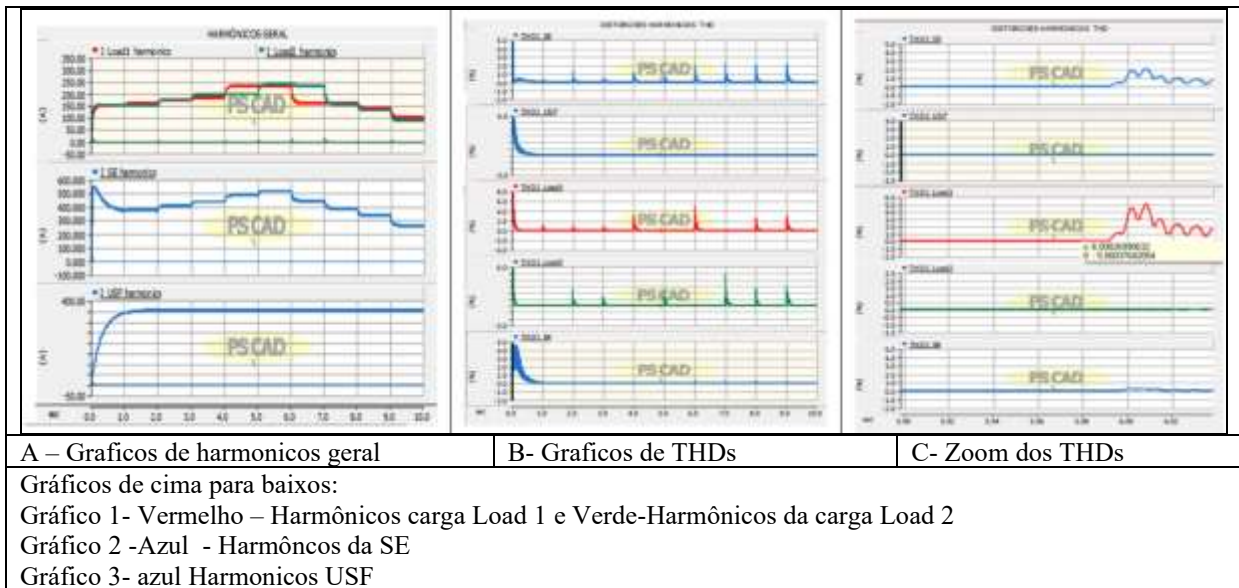
nos tempos de 2s, 4s, 5s, 6s e 7s considerando injeção de potência ativa P=1MW, 2 MW e 4 MW e reativa Q=0. O, onde o maior pico de Distorções Harmônicas Totais (THD) foi observado nas cargas P_load 1 em 6s e P_load 2 em 7s com magnitude de 5% refletindo em toda a rede elétrica, indicando que cargas causam distúrbios na rede elétrica, FIG 83, 84 e 85.

Figura 83- Gráficos de harmônicos quando injetado P=1 MW e Q=0 MVar.



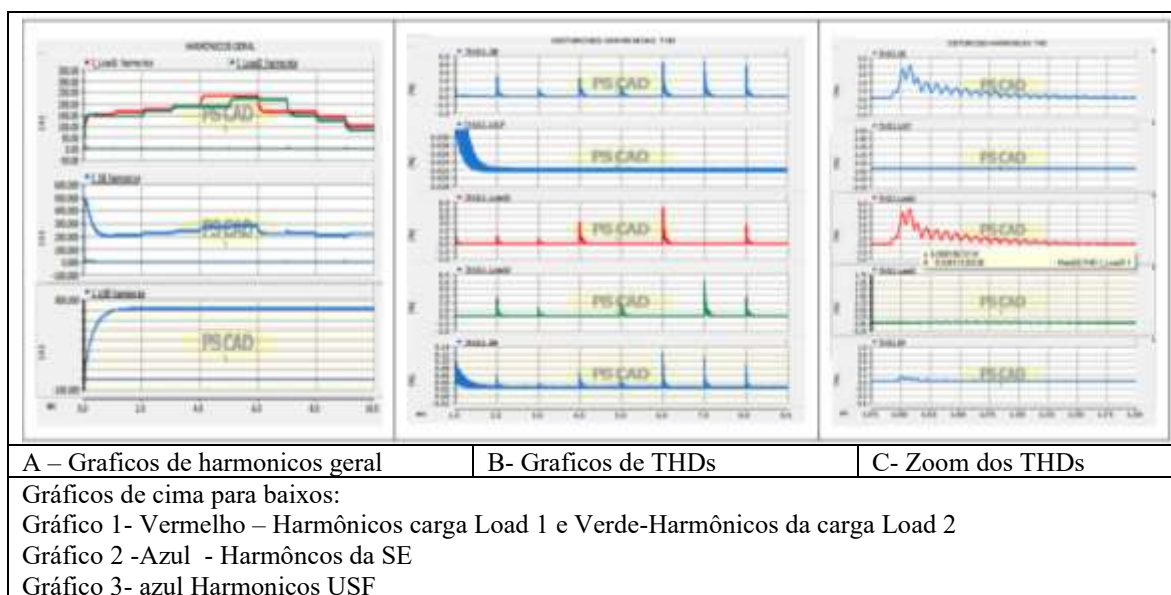
Fonte: O autor.

Figura 84- Gráficos de harmônicos quando injetado P= 2 MW e Q=0 MVar.



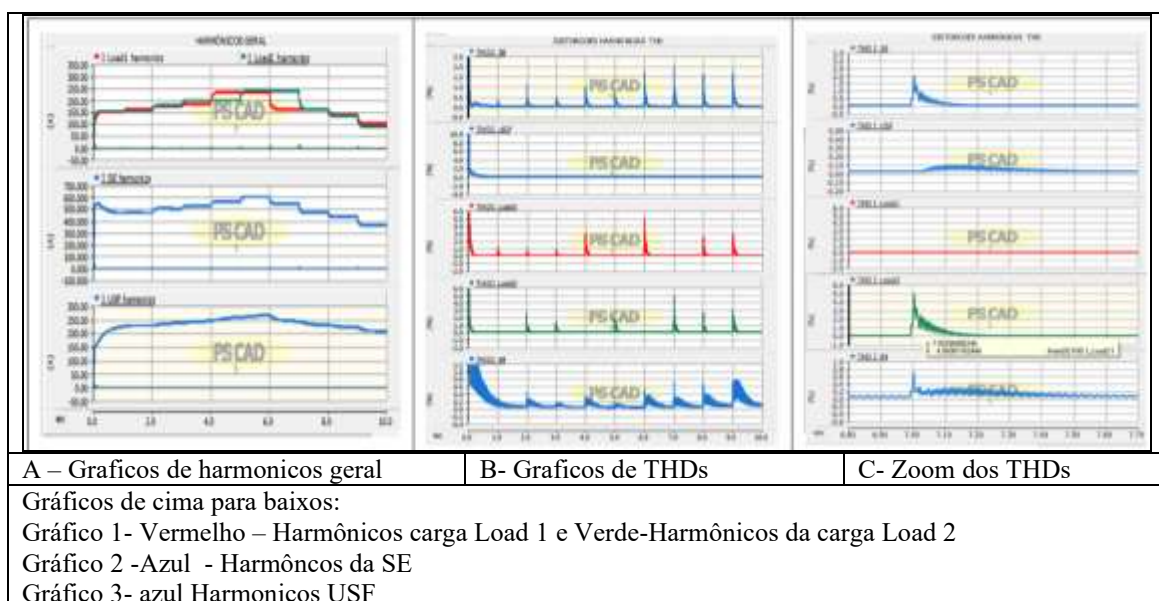
Fonte: O autor.

Figura 85- Gráficos de harmônicos quando injetado $P=4\text{MW}$ e $Q=0\text{MVar}$.



Fonte: O autor.

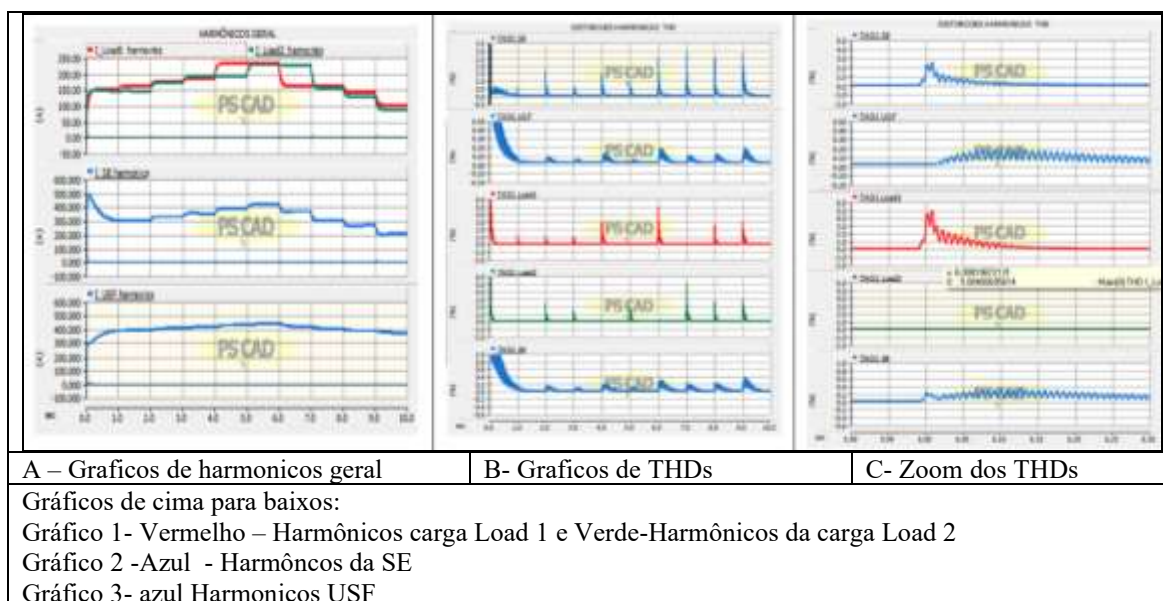
Figura 86- Gráficos de harmônicos quando injetado $P=1\text{MW}$ e $Q=1\text{MVar}$.



Fonte: O autor.

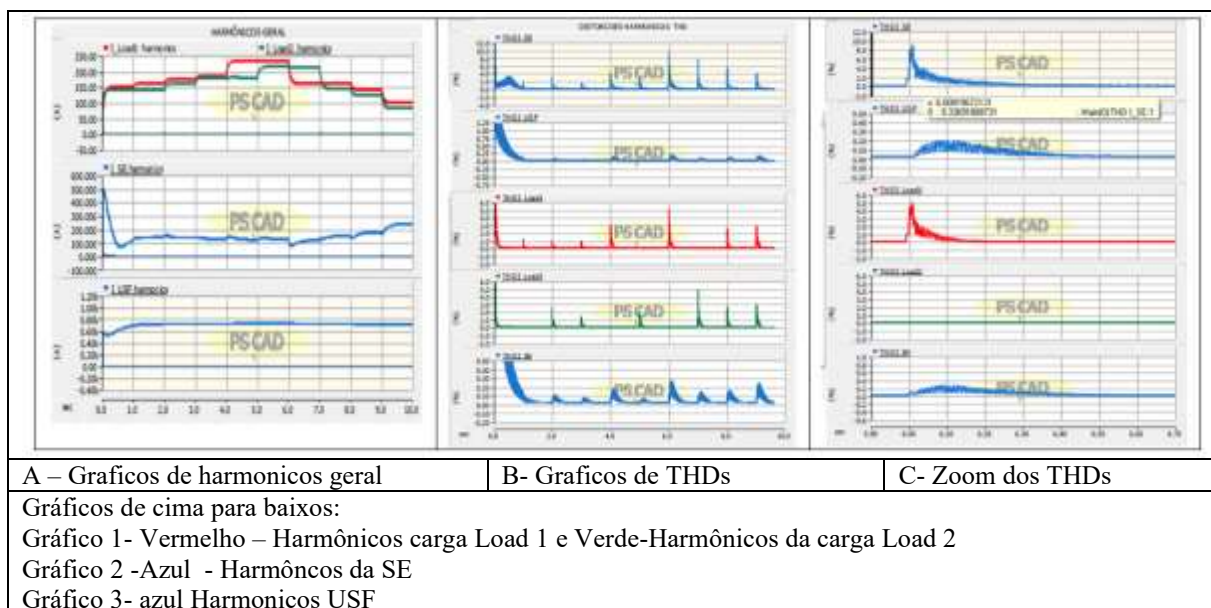
Quando analisado os harmônicos injetando potência ativa $P=1\text{MW}$ e reativa $Q=1\text{MVar}$, FIG. 86, notou-se o aparecimento de harmônicos na USF de magnitude 0,1%. Foram observados picos de THD gerado pela carga P_{load2} no tempo de 7s com magnitude de 4,96% e 5% em no tempo de 6s pela P_{load1} , FIG.86. Alguns THDs foram observados na barra 4 onde o maior pico chegou a 0,8% quando injetado potência ativa $P=2\text{MW}$ e reativa $Q=2\text{MVar}$, FIG. 87.

Figura 87- Gráficos de harmônicos quando injetado P=2 MW e Q= 2 MVar.



Fonte: O autor.

Figura 88- Gráficos de harmônicos quando injetado P=4 MW e Q= 4 MVar.



Fonte: O autor.

Ao injetar 4 MW de potência ativa e 4 MVar de potência reativa, FIG. 88, observou-se distorções harmônicas na SE de 0,33% no tempo de 6s que vai reduzindo à medida que o perfil de tensão é melhorado. Foi observado correntes de harmônica na SE, chegando a 0,1 kA. O THD observado na barra 4, FIG. 88 notou-se alguns picos de harmônicos chegando no máximo em 0,30%, o nível máximo de harmônico de THD nas cargas P_load 1 e P_Load 2 chegaram a 5%. Os maiores THDs foram observados no primeiro, segundo e terceiro harmônicos analisados. Baseado nas informações observadas quando da injeção de potência

ativa e reativa pela USF traz melhorias também para os harmônicos gerados pelas cargas. Estes resultados demonstram que harmônicos variantes no tempo, e de curta duração, não os críticos, podem ter origem em variação das cargas, reduzindo à medida que o perfil de tensão melhora, atendendo o que se referem as normas.

4 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de sistemas de fontes renováveis, como solar e eólica, conectados à rede está crescendo no Brasil e garantir a qualidade dessa energia elétrica se torna uma busca primordial. Conforme apontado pelas diversas referências estudadas e também respaldado pelas simulações realizadas no PSCAD, importantes impactos de problemas de qualidade de energia, notadamente os afundamentos de tensão, afetam muitos setores produtivos, os quais são expostos a perdas econômicas em consequências destes distúrbios eletromagnéticos, as quais podem ser muito altas para a maioria das concessionárias e consumidores. Complementando este contexto, a revisão bibliográfica apresentou a crescente demanda de fontes renováveis solar e eólica em um mercado global, analisando o mercado de energia fotovoltaicos no Brasil e no mundo. Apresentou os impactos dos distúrbios causados por afundamentos de tensão e interrupções de curta e longa duração, com o impacto nos custos decorrentes dessas perturbações. Por outro lado, apresentou a possibilidade de impactos benéficos produzidos por sistemas de armazenamento e a melhorias no perfil de tensão e suavização de afundamentos através da injeção de reativos pelos conversores estáticos utilizados por fontes renováveis.

Neste contexto, foram realizadas simulações em um pacote para cálculo de transitórios eletromagnéticos que tiveram o foco na interação entre conversores de fontes renováveis (uma Usina Solar Fotovoltaica – USF, simulada por fontes de corrente) e a rede elétrica, evidenciando os benefícios advindos da injeção de potência ativa e reativa por esses conversores. Especificamente, foram estudados os impactos na minimização da severidade dos afundamentos de tensão e melhorias no perfil de tensão do alimentador em condição de carga variável e também de diferentes perfis de carga.

No primeiro caso foram analisados a minimização da severidade de afundamentos de tensão da rede elétrica para os barramentos da subestação (SE) e nos outros barramentos B1, B2, B3 e B4 ao longo da rede elétrica modelada. O circuito de falta modelou faltas com resistência variável e duração de 2s. A USF foi programada para injetar potência ativa e reativa, através da variação do ângulo de fase da fonte de corrente. As melhorias na severidade do afundamento de tensão foram demonstradas por gráficos e tabelas.

No segundo conjunto de simulações, foram apresentadas a análise da melhoria do perfil de tensão na rede de distribuição considerando um circuito de carga variável, sendo a melhoria promovida pela injeção de potência ativa e reativa pelas USFs. Os resultados desse conjunto de simulações também foram expressos através de tabelas e gráficos gerados pelo PSCAD.

Na terceira simulação, foram abordadas situações de diferentes perfis de carga, evidenciando a contribuição da USF na melhoria do perfil de tensão através da injeção de potência ativa e reativa. Como nos casos anteriores os resultados foram expressos através de tabelas e gráficos gerados pelo PSCAD. De forma complementar, por não ser o foco do trabalho, para todos os três conjuntos de simulações foram analisados os harmônicos produzidos pelas variações na envoltória da forma de onda tensão. Estes harmônicos não geram preocupação por serem de curta duração e eventuais.

Concluindo, todos os resultados obtidos, para cada conjunto de simulações, demonstraram que a interação entre sistemas de energia renováveis, conectados através de inversores estáticos, como na USF, pode, através do controle das potências ativas e reativas injetadas, promover melhorias no perfil de tensão da rede e reduzir a severidade de afundamentos de tensão, os quais são muito danosos para cargas industriais e cargas sensíveis em geral. Finalizando, os conversores estáticos atrelados às fontes renováveis, se usados sem sua plenitude, podem prover um excelente conjunto de serviços auxiliares, promovendo melhorias significativas na qualidade de energia fornecida para os consumidores, através de um controle desta por parte das concessionárias de energia elétrica.

4.1 Considerações finais

4.1.1 Habilidades desenvolvidas:

- Simulação envolvendo fontes renováveis variáveis;
- Avaliação de afundamentos de tensão;
- Avaliação de perfil de tensão;
- Avaliação do perfil de correntes e potências;
- Avaliação de harmônicos.

4.1.2 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, são sugeridos estudos comparativos dos resultados do PSCAD e outros softwares de simulação como Power factory, PSS/E, MatLab, comparando-se os resultados com o objetivo de uma ampla validação dos resultados encontrados.

Sugere-se, ainda, a inclusão de sistemas de armazenamento nas simulações, uma vez que existe uma forte tendência da adoção destes sistemas para operarem em conjunto com as fontes renováveis.

REFERÊNCIAS

Absolar, A força da energia solar em tempos de pandemia, disponível em <<http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/a-forca-da-energia-solar-em-tempos-de-pandemia.html>>, acessado em novembro de 2020

Alexandre C. Moreira, Danilo I. Brandão, Tiago Davi Curi Busarello, Jose Antenor Pomilio Luiz C. P. da Silva Helmo K. M. Paredes - Impactos técnicos decorrentes da conexão de geradores fotovoltaicos com injeção de reativos em redes residenciais. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/270568856_Impactos_tecnicos_decorrentes_da_conexao_de_geradores_fotovoltaicos_com_injecao_de_reativos_em_redes_residenciais_In_Simp osio_Brasileiro_de_Sistemas_Eletricos acessado em fevereiro de 2020.

Baggini, Angelo B., Handbook of Power Quality, University of Bergamo, Italy, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, ISBN 978-0-470-06561-7, 2008. 645pag.

Benoît Robyns , Bruno François, Gauthier Delille, Christophe Saudemont - Energy Storage in Electric Power Grids - British Library Cataloguing-in-Publication Data A CIP record for this book is available from the British Library ISBN 978-1-84821-611-2, Pag 3. - 8 de 308.

Bueno, A.F.M. e Brandão, C.A.L. Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no brasil, 2015, disponível em <http://abaque.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Estudo_Mercado_Armazenamento_Brasil.pdf> acessado em 2020.

Castro, Nivalde José de; Ferreira, Daniel; Castro Gabriel; Sampaio André - Qualidade do fornecimento de energia elétrica: aspectos regulatórios e perspectivas - Rio de Janeiro, Publit, 2017, 28 pag.

Das, J. C., Power system harmonics and passive filter design / J. C. Das. Copyright © 2015 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc ISBN 978-1-118-86162-2 (hardback) pag1-4 de 872.

EPE, Sistemas de Armazenamento em Baterias – Aplicações e Questões relevantes para o Planejamento, disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098_2019_Baterias_no_planejamento.pdf> acessado em dezembro de 2020, 36pag.

Global Market Outlook For Solar Power / 2019 – 2023- Disponível em <https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/07/SolarPower-Europe_Global-Market-Outlook-2019-2023.pdf> acessado em fevereiro de 2020.

Horia Gheorghe Beleiu , Ioana Natalia Beleiu , Sorin Gheorghe Pavel e Cosmin Pompei Darab -Management of Power Quality Issues from na Economic Point of View, disponível em <https://www.mdpi.com/search?q=Management+of+Power+Quality+Issues+from+an+Economic+Point+of+View&authors=&journal=&article_type=&search=Search§ion=&special_issue=&volume=&issue=&number=&page=>> acessado em março de 2020.

IEA Photovoltaic Power Systems Programme -Snapshot of Global PV Markets 2020, disponível em <<https://iea-pvps.org/publications/>> acessado em abril de 2020.

Instituto Acende Brasil (2014). Qualidade no Fornecimento de Energia Elétrica: Confiabilidade, Conformidade e Presteza. White Paper 14, São paulo, 36 pag.

Kusko, Alexander e Thompson, Marc T., Quality in Electrical Systems, Copyright © 2007 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. 241pag.

LAKATOS, Eva Maria. fundamentos de metodologia científica / Marconi, Marina De Andrade, Eva Maria LakatoS. - 5. ED. - SÃO PAULO: ATLAS 2003, Pag 186 -187 de 310.

Maier, V .; Moldavo, HA; Beleiu, HG; Muresan, PD Parâmetros elétricos do transformador de potência Determinação por Monitoramento de Regimes Permanentes. Nos Anais da 3ª Conferência Internacional sobre Modern Power Systems 2010, Cluj-Napoca, Romênia, 18–21 de maio de 2010; 229-232.

Mariani, Leidiane; Silva, Natalí Nunes dos Reis da. Eficiência energética e qualidade de energia – Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. P.39 – 41; 208 p

Matias, Jefferson A.C. e Aoki Alexandre Rasi - Um olhar sobre o armazenamento de energia em baterias, energias renováveis e eficiência energética para consumidores residenciais, disponível em <<https://www.osetoreletrico.com.br/um-olhar-sobre-o-armazenamento-de-energia-em-baterias-energias-renovaveis-e-eficiencia-energetica-para-consumidores-residenciais/>> acessado em janeiro de 2020.

MOHAMMAD A.S. Masoum, EWALD F. Fuchs, Power Quality In Power Systems And Electrical Machines, Second Edition, 2015, pag. (9 -26)

Muhammad Khalid - A Review on the Selected Applications of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Microgrids, disponível em <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/23/4559>> acessado em março de 2020.

Nieto, Alejandro; Maris, I. Theodoros; Vita; Vasiliki, Power Quality Improvement in Power Grids with the Integration of Energy Storage Systems, disponível em <<https://www.researchgate.net/publication/307914658>>, acessado em fevereiro de 2020.

Oliveira, J.Carlos.; Oliveira, L.Tiago; Filiagi, Raquel, Qualidade da Energia elétrica, disponível em <<https://www.osetoreletrico.com.br/qualidade-da-energia-eletrica>> acessado em abril de 2020

ONS submódulo 2.8. Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes, disponível em <<http://www.ons.org.br/ProcedimentosDeRede/M%C3%B3dulo%202/Subm%C3%B3dulo%202.8/Subm%C3%B3dulo%202.8.pdf#search=modulo%20%2E8>> acessado em abril de 2020.

Portal solar, **Dados do Mercado de Energia Solar no Brasil,** disponível em < Dados do Mercado de Energia Solar no Brasil (portalsolar.com.br), acessado em novembro de 2020.

PSCAD Development Group Free Edition, Copyright (c) 2018, Manitoba HVDC, Version 4.6.3.0 (2019/05/10). Disponível em <<https://www.pscad.com/software/pscad/v5-features>> acessado em julho de 2019.

Quantum, Dados de energia solar do mercado Brasileiro, disponível em <https://www.quantumengenharia.net.br/dados-de-energia-solar-fotovoltaica-no-brasil-em-2020> acessado em novembro de 2020.

Repositório Institucional UFMG, **Diretrizes para normalização de trabalhos acadêmicos da UFMG,** disponível em < [diretrizes-para-normalizacao-de-trabalhos-academicos-da-UFMG.pdf](#)> Acessado em fevereiro de 2020.

Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H.Wayne Beaty, Eletrical Power Systems Quality second editions, Copyright © 2004 The McGraw-Hill Companies. All rights reserved. 525pag.

ROCHA, Joaquim Eloir, Qualidade da energia elétrica, 2016, departamento de eletrotécnica da UTFPR. Disponível em <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidade-da-energia-eletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Eletrica%20_%20Apostila.pdf/at_download/file>, acessado em 30 de janeiro de 2020.

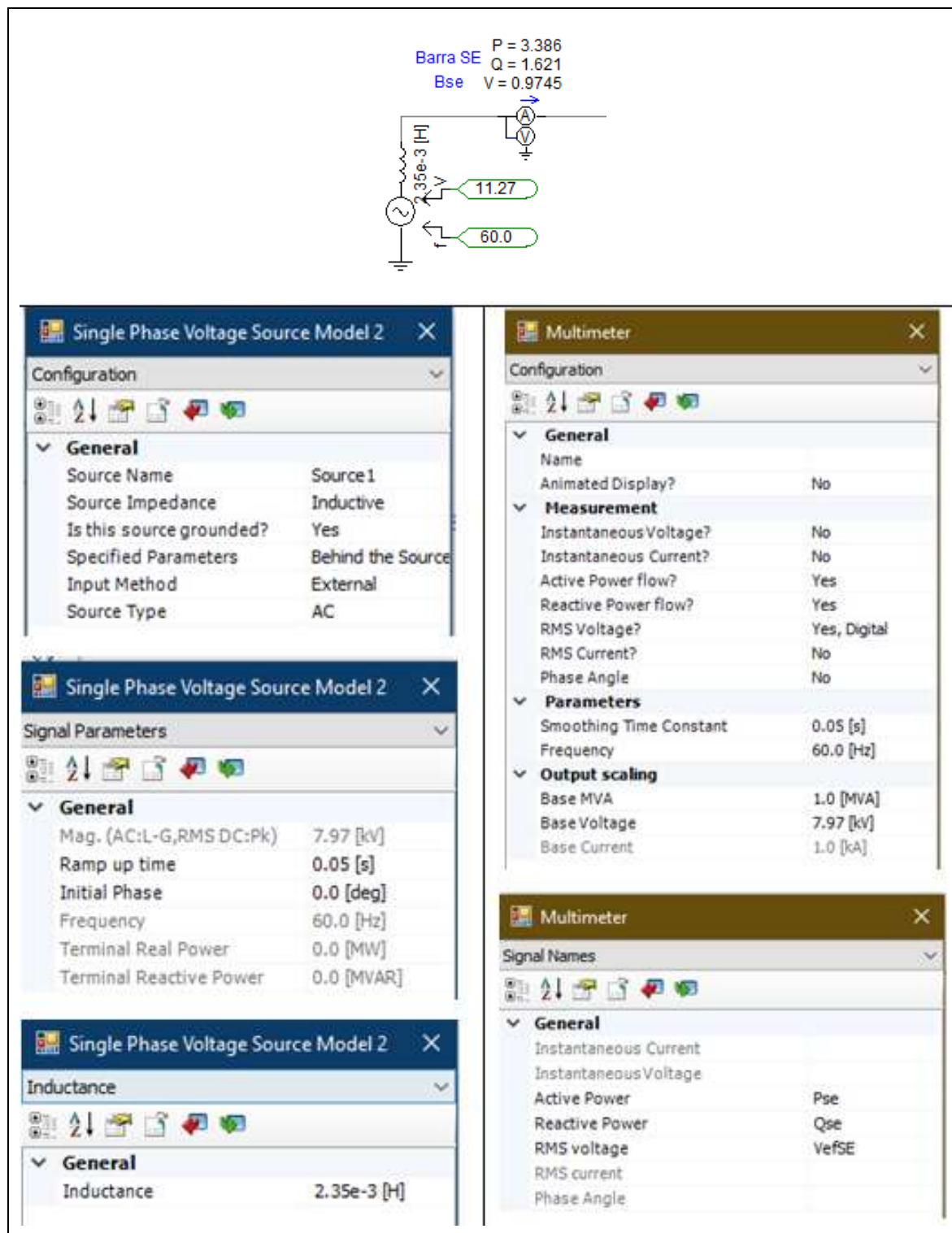
SOARES, Iolanda, Eficiência Energética e a ISO 50001- Uma combinação fundamental, Edições Sílabo, Lda, 1ª Edição – Lisboa, abril de 2015

Targosz, R. ; Manson, J. Pesquisa Pan-Europeia de Qualidade de Energia. Nos Anais da 9ª Internacional de 2007 - Conferência sobre Qualidade e Utilização de Energia Elétrica, Barcelona, Espanha, 9 a 11 de outubro de 2007.

Yangwu Shen , Feifan Shen , Yaling Chen , Liqing Liang , Bin Zhang and Deping Ke - Reactive Power Planning for Regional Power Grids Based on Active and Reactive Power Adjustments of DGs disponível em <<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/6/1606>> acessado em março de 2020.

ANEXOS 1 – Figuras, gráficos e tabelas - Análise da minimização da severidade de afundamentos de tensão da rede elétrica através da injeção de reativos pela USF.

Figura 89-Detalhe da barra SE, configurações da fonte e multímetro.



Fonte: Autor.

Tabela 24- Análise da variação das correntes, tensões e Potência com resistência de falta de 5Ω nos tempos de 2s a 4s.

Tempo (s)	Correntes (kA)						Tensões (kV)					Potências (MW e QVar)			
	Barras						Barras								
	I _{Se}	IB1	IB2	IB3	IB4	I_USF	V _{efSe}	V _{efB1}	V _{efB2}	V _{efB3}	V _{efB4}	P _{Se}	Q _{Se}	P _{usf}	Q _{usf}
1 a 2	0,68	0,68	0,50	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,42	1,61	-	-
2 a 3	1,83	1,82	1,67	0,10	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,59	0,60	9,75	2,67	-	-
3 a 4	1,83	1,84	1,67	0,10	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,59	0,60	9,76	2,67	-	-
4 a 5	0,68	0,72	0,50	0,16	0,18	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,35	1,66	-	-

Fonte: O autor.

Tabela 25- Análise da variação das correntes, tensões e Potência com resistência de falta de 10Ω nos tempos de 2s a 4s.

Tempo (s)	Correntes (kA)						Tensões (kV)					Potências (MW e QVar)			
	Barras						Barras								
	I _{Se}	IB1	IB2	IB3	IB4	I_USF	V _{efSe}	V _{efB1}	V _{efB2}	V _{efB3}	V _{efB4}	P _{Se}	Q _{Se}	P _{usf}	Q _{usf}
1 a 2	0,67	0,65	0,50	0,16	0,14	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,43	1,71	-	-
2 a 3	1,35	1,35	1,14	0,12	0,13	0,00	0,96	0,83	0,71	0,70	0,70	7,27	2,01	-	-
3 a 4	1,35	1,35	1,19	0,13	0,13	0,00	0,96	0,83	0,71	0,70	0,70	7,27	2,03	-	-
4 a 5	0,69	0,69	0,51	0,16	0,17	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,41	1,65	-	-

Fonte: O autor.

Tabela 26 - Análise da minimização através da injeção de reativos para potências de 1, 2 e 4 MW e ângulo de fase igual a zero.

Pot. (MW)	Ang. Fase	Tempo (s)	Correntes kA						Tensões kV					Potências (MW e QVar)			
			Barras						Barras								
			I _{Se}	IB1	IB2	IB3	IB4	I_USF	V _{efSe}	V _{efB1}	V _{efB2}	V _{efB3}	V _{efB4}	P _{Se}	Q _{Se}	P _{usf}	Q _{usf}
1	0°	1,5	0,52	0,67	0,47	0,15	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,83	0,87	3,24	1,67	0,00	0,00
		2,5	1,80	1,83	1,69	0,12	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,44	2,75	0,00	0,00
		3,5	1,74	1,74	1,59	0,12	0,05	0,17	0,95	0,78	0,63	0,62	0,63	8,92	2,45	0,62	0,01
		4,5	0,52	0,53	0,35	0,18	0,08	0,17	0,97	0,92	0,88	0,86	0,88	2,42	1,69	0,85	0,01
2	0°	1,5	0,67	0,67	0,50	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,83	0,83	3,43	1,70	0,00	0,00
		2,5	1,84	1,84	1,69	0,11	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,59	0,59	9,41	2,74	0,00	0,00
		3,5	1,63	1,63	1,48	0,12	0,22	0,35	0,95	0,79	0,65	0,64	0,67	8,63	2,26	1,35	0,00
		4,5	0,42	0,42	0,27	0,14	0,02	0,16	0,97	0,93	0,91	0,89	0,92	1,73	1,77	1,87	0,00
4	0°	1,5	0,68	0,68	0,50	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,87	0,84	3,43	1,69	0,00	0,00
		2,5	1,84	1,84	1,70	0,11	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,41	2,74	0,00	0,00
		3,5	1,42	1,42	1,26	0,13	0,54	0,68	0,96	0,82	0,70	0,68	0,74	7,50	2,11	3,00	0,00
		4,5	0,14	0,14	0,04	0,18	0,41	0,62	0,97	0,95	0,96	0,94	1,00	0,03	1,99	4,06	0,01

Fonte: O autor

Tabela 27 - Análise da minimização da severidade através da injeção de reativos para potências de 1, 2 e 4 MW e ângulo de fase igual a 23°.

Pot. (MW)	Ang Fase.	Tempo (s)	Correntes kA						Tensões kV					Potências (MW e QVAr)			
			Barras						Barras								
			I _{Se}	IB1	IB2	IB3	IB4	I_USF	V _{efSe}	V _{efB1}	V _{efB2}	V _{efB3}	V _{efB4}	P _{Se}	Q _{se}	P _{usf}	Q _{usf}
1	23°	1,5	0,44	0,44	0,32	0,11	0,11	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,24	1,67	0,00	0,00
		2,5	0,98	0,98	0,94	0,03	0,03	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,28	2,60	0,00	0,00
		3,5	1,56	1,56	1,41	0,12	0,03	0,09	0,95	0,78	0,62	0,61	0,62	9,08	2,74	0,58	-0,24
		4,5	0,53	0,53	0,35	0,16	0,02	0,14	0,97	0,91	0,87	0,85	0,86	2,60	1,96	0,78	-0,34
2	23°	1,5	0,66	0,66	0,49	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,39	1,71	0,00	0,00
		2,5	1,74	1,74	1,61	0,09	0,09	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,28	2,60	0,00	0,00
		3,5	1,61	1,61	1,46	0,11	-0,20	0,32	0,95	0,79	0,64	0,63	0,65	8,50	2,73	1,18	-0,49
		4,5	0,55	0,55	0,40	0,14	0,12	0,02	0,96	0,91	0,88	0,86	0,88	1,86	2,37	1,60	-0,71
4	23°	1,5	0,66	0,66	0,49	0,16	0,16	0,00	0,97	0,91	0,85	0,84	0,84	3,39	1,62	0,00	0,00
		2,5	0,99	0,99	0,94	0,03	0,03	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,66	2,66	0,00	0,00
		3,5	1,47	1,47	1,31	0,13	0,38	0,52	0,94	0,79	0,66	0,65	0,69	7,26	3,31	2,61	-1,08
		4,5	0,32	0,32	0,14	0,17	0,21	0,39	0,95	0,91	0,90	0,90	0,92	0,38	3,36	3,36	-1,41

Fonte: O autor

Tabela 28 - Análise da minimização através da injeção de reativos para potências de 1,2 e 4 MW e ângulo de fase igual a -90°.

Pot. (MW)	Ang Fase.	Tempo (s)	Correntes kA						Tensões kV					Potências (MW e QVAr)			
			Barras						Barras								
			I _{Se}	IB1	IB2	IB3	IB4	I_USF	V _{efSe}	V _{efB1}	V _{efB2}	V _{efB3}	V _{efB4}	P _{Se}	Q _{se}	P _{usf}	Q _{usf}
1	-90°	1,5	0,58	0,58	0,42	0,14	0,14	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,39	1,62	0,00	0,00
		2,5	1,84	1,84	1,70	0,11	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,67	2,51	0,00	0,00
		3,5	1,87	1,87	1,72	0,11	0,10	0,01	0,96	0,78	0,62	0,61	0,62	10,04	2,00	0,01	0,61
		4,5	0,64	0,64	0,46	0,17	0,12	0,05	0,99	0,92	0,88	0,86	0,87	3,38	0,87	-0,01	0,86
2	-90°	1,5	0,68	0,68	0,50	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,24	1,67	0,00	0,00
		2,5	1,84	1,84	1,70	0,11	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,66	2,66	0,00	0,00
		3,5	1,91	1,91	1,76	0,11	0,12	0,00	0,96	0,78	0,63	0,62	0,63	10,49	1,62	-0,04	1,26
		4,5	0,62	0,62	0,43	0,17	0,09	0,09	1,00	0,94	0,90	0,88	0,90	3,60	0,07	-0,20	1,79
4	-90°	1,5	0,68	0,68	0,50	0,16	0,16	0,00	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,38	1,71	0,00	0,00
		2,5	1,84	1,84	1,70	0,11	0,11	0,00	0,95	0,77	0,61	0,60	0,60	9,68	2,52	0,00	0,00
		3,5	2,02	2,02	1,87	0,11	0,21	-0,10	0,98	0,79	0,64	0,63	0,66	11,45	0,65	0,02	2,63
		4,5	0,62	0,62	0,43	0,18	0,07	0,10	1,02	0,97	0,94	0,92	0,95	4,35	-1,62	0,08	3,79

Fonte: O autor.

ANEXO 2 - Figuras, gráficos e tabelas-Análise da melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela USF

Tabela 29- Análise com a USF desligada.

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVar	Tempo (s)	Correntes kA					Tensões kV					Potência Fornecida pela SE		Potência Fornecida pela USF		Potência Requerida pela Carga	
			Barras					Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load	Q_Load
			ISE	I_Load	I_USF	IB3	IB4	VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4						
0	0	0,20	0,91	0,43	0,00	0,43	0,15	0,97	0,89	0,83	0,81	0,82	4,44	2,75	0,00	0,00	-1,65	-1,34
		1,10	0,52	0,00	0,00	0,00	0,17	0,98	0,92	0,89	0,89	0,87	2,71	1,36	0,00	0,00	-0,02	-0,01
		3,00	1,01	0,76	0,00	0,76	0,70	0,92	0,74	0,57	0,43	0,56	7,90	4,70	0,00	0,00	-2,76	-2,00
		3,14	1,06	0,87	0,00	0,87	0,05	0,92	0,74	0,57	0,43	0,56	7,99	4,69	0,00	0,00	-2,79	-1,97
		4,50	0,53	0,20	0,00	0,20	0,10	0,97	0,89	0,83	0,81	0,82	3,61	2,13	0,00	0,00	-1,00	-0,76
		4,90	0,54	0,00	0,00	0,00	0,17	0,97	0,92	0,88	0,88	0,87	2,79	1,39	0,00	0,00	-0,15	-0,09

Fonte: O autor.

Tabela 30- Injeção de Potência Ativa de 0 e 4MW e Reativo igual a 0.

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVar	Tempo (s)	Correntes kA					Tensões kV					Potência Fornecida pela SE		Potência Fornecida pela USF		Potencia Requerida pela Carga	
			Barras					Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load	Q_Load
			ISE	I_Load	I_USF	IB3	IB4	VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4						
1	0	0,20	0,01	0,00	0,11	0,00	0,08	0,95	0,86	0,79	0,74	0,79	3,80	2,83	0,72	0,00	-1,74	-1,52
		1,10	0,40	0,00	0,14	0,00	0,04	0,98	0,94	0,92	0,92	0,91	1,82	1,37	0,93	0,00	-0,04	-0,04
		3,00	0,84	0,68	0,03	0,68	0,07	0,92	0,75	0,60	0,46	0,60	6,72	4,94	0,59	-0,01	-2,68	-2,32
		3,14	1,61	1,36	0,10	1,36	0,00	0,91	0,75	0,60	0,47	0,60	7,16	5,05	0,62	-0,01	-2,86	-2,38
		4,50	0,49	0,17	0,05	0,17	0,06	0,96	0,90	0,86	0,83	0,85	2,77	2,17	0,82	0,00	-1,01	-0,82
		4,90	0,42	0,02	0,13	0,02	0,04	0,97	0,94	0,91	0,91	0,91	1,92	1,40	0,89	0,00	-0,15	-0,09
2	0	0,20	0,66	0,50	-0,50	-0,16	0,32	0,96	0,88	0,83	0,77	0,84	2,83	2,90	1,48	0,05	-1,65	-1,63
		1,10	0,29	0,00	25,00	0,00	-0,07	0,98	0,95	0,95	0,95	0,96	0,93	1,35	1,96	0,07	-0,02	-0,01
		3,00	0,86	0,68	-0,68	0,10	-0,02	0,92	0,76	0,63	0,49	0,65	5,85	5,06	1,27	0,04	-2,71	-2,63
		3,14	-1,27	1,09	-0,07	-1,09	0,00	0,91	0,76	0,63	0,49	0,65	6,29	5,08	1,30	0,04	-2,90	-2,62
		4,50	0,03	0,03	0,03	0,19	0,26	0,97	0,92	0,89	0,86	0,90	1,92	2,18	1,73	0,06	-1,02	-0,87
		4,90	0,60	0,00	0,00	0,20	0,33	0,98	0,95	0,94	0,94	0,95	0,98	1,41	1,86	0,07	-0,13	-0,09
4	0	0,20	0,29	0,00	-0,44	0,00	0,38	0,95	0,91	0,88	0,83	0,93	1,36	2,90	3,03	0,32	-1,64	-1,93
		1,10	0,04	1,09	0,55	0,00	-0,35	0,98	0,98	1,00	1,00	1,05	-0,85	1,26	4,28	0,42	-0,02	-0,01
		3,00	0,96	-0,75	-0,09	0,75	0,12	0,92	0,79	0,69	0,55	0,74	4,41	5,33	5,33	3,01	0,36	-2,98
		3,14	0,07	-0,42	0,60	0,42	-0,50	0,92	0,79	0,69	0,55	0,74	4,20	5,35	2,86	0,35	0,60	-3,27
		4,50	0,24	-0,03	0,52	0,03	-0,43	0,97	0,95	0,95	0,92	0,99	0,22	2,13	3,81	0,40	-1,03	-0,99
		4,90	0,30	-0,02	0,56	0,02	-0,36	0,98	0,98	1,00	1,00	1,05	0,98	0,98	0,98	0,98	1,00	1,05

Fonte: O autor.

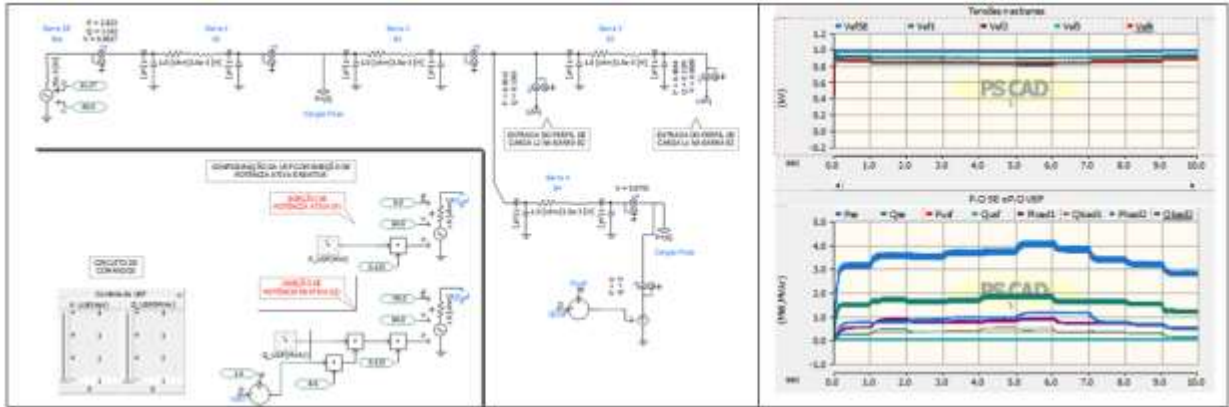
Tabela 31- Injeção de Potências Ativas e Reativas de 1, 2 e 4(MW e MVar) respectivamente.

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVar	Tempo (s)	Correntes kA					Tensões kV					Potência Fornecida pela SE		Potência Fornecida pela USF		Potencia Requerida pela carga	
			Barras					Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load	Q_Load
			ISE	I_Load	I_USF	IB3	IB4	VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4						
1	1	0,20	0,51	-0,26	0,08	0,26	0,02	0,97	0,90	0,84	0,78	0,85	3,64	1,60	0,83	1,13	-1,79	-1,48
		1,10	0,25	0,00	0,11	0,00	0,00	0,98	0,95	0,93	0,93	0,93	1,84	0,97	0,95	0,37	-0,02	-0,01
		2,00	0,27	-0,09	-0,04	0,09	0,09	0,95	0,81	0,68	0,54	0,71	3,92	2,04	0,90	1,07	-1,99	-1,61
		3,00	0,95	-0,70	0,00	0,70	0,77	0,95	0,81	0,68	0,54	0,71	6,85	2,86	1,02	1,80	-3,51	-2,22
		4,00	0,86	-0,62	0,20	-0,06	0,62	0,97	0,87	0,80	0,72	0,81	4,92	2,08	1,00	1,38	-2,68	-1,82
		4,90	0,37	0,00	0,19	0,00	0,00	0,98	0,95	0,93	0,92	0,93	1,86	0,94	0,94	0,39	-0,05	-0,03
2	2	0,20	0,57	-0,47	0,41	0,47	-0,24	0,98	0,92	0,88	0,83	0,92	2,91	0,98	1,83	1,93	-1,93	-1,61
		1,10	0,01	0,00	0,20	0,00	-0,13	0,99	0,96	0,96	0,96	0,98	0,93	0,92	1,88	0,54	-0,05	-0,03
		2,00	0,25	-0,09	-0,01	0,09	0,06	0,98	0,91	0,86	0,79	0,89	3,37	1,43	2,00	1,84	-2,32	-1,76
		3,00	-0,06	0,57	-0,68	-0,57	0,61	0,97	0,86	0,76	0,62	0,82	6,22	1,64	2,49	3,25	-4,25	-2,42
		4,00	0,70	-0,62	0,40	0,62	-0,24	0,98	0,91	0,86	0,79	0,90	3,85	1,26	2,05	2,35	-2,75	-1,97
		4,90	0,23	0,00	0,35	-0,16	0,00	0,99	0,96	0,96	0,95	0,97	1,01	0,89	-0,14	-0,09	1,89	0,61
4	4	0,20	0,20	-0,34	0,61	0,34	-0,45	0,99	0,96	0,95	0,89	1,01	1,48	0,48	3,97	2,80	-2,14	-1,87
		1,10	0,21	0,00	-0,68	0,00	0,52	0,98	0,98	1,00	1,00	1,05	-0,82	1,34	4,11	0,39	-0,04	-0,03
		2,00	0,25	-0,55	0,68	-0,55	0,55	0,99	0,95	0,93	0,86	1,00	1,43	1,06	3,93	2,61	-2,20	-2,00
		3,00	0,81	1,28	-1,00	-1,29	0,82	1,00	0,92	0,87	0,73	0,98	4,67	0,11	4,98	5,43	-4,87	-3,02
		4,00	0,35	-0,57	0,73	-0,55	0,57	0,99	0,95	0,93	0,86	1,01	2,32	0,51	4,44	3,59	-3,12	-2,28
		4,90	0,05	0,02	-0,02	-0,34	0,54	0,98	0,98	1,00	1,00	1,05	-0,66	1,29	4,10	0,56	0,15	-0,11

Fonte: O autor.

ANEXO 3- Figuras, gráficos e tabelas Análise da melhoria do perfil de tensão em redes de distribuição através da injeção de reativo pela USF considerando diversos perfis de carga.

Figura 90-Detalhe do Circuito, gráficos de tensões e potências com a USF desligada.



Fonte: O autor.

Tabela 32-Dados obtidos dos gráficos com a USF desligada, potência ativa e reativa igual a zero tabela completa.

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVAr	Tempo (s)	Correntes kA					Tensões kV					Potência na SE, USF (MW)				Gargas (Load) kW e KVar				Ângulo Fase B3 (graus)	
			Barras					Barras					P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load 1	Q_Load 1	P_Load 2	Q_Load 2		
			I_SE	I_Load 1	I_Load 2	I_USF	I_B4	VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4										
0	0	0,50	0,55	0,12	0,13	0,00	0,14	0,98	0,91	0,86	0,85	0,85	3,42	1,52	0,00	0,00	0,67	0,24	0,75	0,25	-3,70	
		1,00	0,37	0,80	0,80	0,00	0,10	0,97	0,91	0,86	0,85	0,84	0,39	1,47	0,00	0,00	0,68	0,25	0,75	0,25	-3,69	
		2,00	0,67	0,11	0,16	0,00	0,16	0,97	0,90	0,85	0,84	0,84	3,38	1,55	0,00	0,00	0,71	0,29	0,75	0,16	-3,65	
		3,00	0,73	0,18	0,21	0,00	0,16	0,97	0,90	0,85	0,83	0,83	3,72	1,68	0,00	0,00	0,77	0,37	0,92	0,35	-3,80	
		4,00	0,36	0,08	0,12	0,00	0,07	0,97	0,90	0,84	0,82	0,82	3,82	1,78	0,00	0,00	0,81	0,42	0,96	0,34	-3,81	
		5,00	0,60	0,19	0,15	0,00	0,12	0,97	0,89	0,82	0,80	0,81	3,94	1,87	0,00	0,00	0,92	0,52	0,97	0,34	-3,81	
		6,00	0,29	0,08	0,07	0,00	0,07	0,97	0,90	0,84	0,82	0,82	4,13	1,78	0,00	0,00	0,92	0,50	1,05	0,34	-4,32	
		7,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,01	0,97	0,90	0,84	0,82	0,82	0,82	3,77	1,66	0,00	0,00	0,70	0,28	1,13	0,38	-4,30
		8,00	0,62	0,14	0,15	0,00	0,16	0,98	0,91	0,87	0,85	0,85	3,46	1,65	0,00	0,00	0,72	0,28	0,75	0,34	-3,52	
		9,00	0,22	0,06	0,05	0,00	0,05	0,98	0,92	0,88	0,87	0,86	3,05	1,36	0,00	0,00	0,62	0,20	0,63	0,23	-0,35	
9,50	0,52	0,09	0,09	0,00	0,17	0,98	0,92	0,89	0,88	0,87	2,86	1,21	0,00	0,00	0,49	0,12	0,46	0,14	-3,12			

Fonte: o autor

Tabela 33-Dados obtidos dos gráficos com a USF desligada, potência ativa e reativa igual a zero tabela completa.

Item	Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa (MVar)	Tempo (s)	Correntes kA						Tensões kV					Potência na SE, USF e Gargas (Load)								ângulo Fase		
				Barras						Barras															
				ISE	I_Load 1	I_Load 2	I_USF	IB4		VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4	P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load 1	Q_Load 1	P_Load 2	Q_Load 2			
1	1	1	0,50	0,31	0,08	0,09	0,03	0,05	0,99	0,94	0,91	0,90	0,91	2,54	0,65	0,73	0,79	0,70	0,24	0,73	0,26	-3,84			
2			1,00	0,17	0,04	0,05	0,02	0,05	0,99	0,94	0,92	0,90	0,92	2,43	0,73	0,85	0,77	0,71	0,27	0,74	0,23	-3,51			
3			2,00	0,42	0,15	0,15	0,23	0,55	0,99	0,94	0,91	0,89	0,91	2,57	0,79	0,93	0,78	0,77	0,31	0,76	0,24	-3,39			
4			3,00	0,49	0,16	0,17	0,18	0,02	0,99	0,94	0,90	0,83	0,91	2,64	0,84	0,88	0,80	0,79	0,34	0,85	0,34	-3,52			
5			4,00	0,25	0,13	0,10	0,20	0,09	0,98	0,93	0,89	0,87	0,90	2,84	0,84	0,93	0,84	0,84	0,41	0,96	0,34	-3,74			
6			5,00	0,58	0,23	0,21	0,22	0,04	0,98	0,93	0,88	0,86	0,89	3,03	0,95	0,89	0,93	1,00	0,58	0,96	0,34	-3,93			
7			6,00	0,15	0,02	0,04	0,09	0,09	0,99	0,94	0,90	0,89	0,91	3,07	0,80	0,93	0,97	0,95	0,44	1,14	0,33	-4,56			
8			7,00	0,13	0,02	0,03	0,05	0,07	0,99	0,94	0,91	0,90	0,92	2,78	0,85	0,89	0,84	0,74	0,32	1,10	0,34	-4,06			
9			8,00	0,40	0,14	0,14	0,23	0,06	0,99	0,95	0,92	0,91	0,93	2,57	0,83	0,93	0,79	0,77	0,30	0,76	0,34	-3,32			
10			9,00	0,34	0,09	0,08	0,16	0,00	0,99	0,95	0,93	0,91	0,93	1,91	0,59	0,90	0,63	0,52	0,14	0,46	0,15	-2,66			
11			9,50	0,18	0,05	0,05	0,15	0,03	0,99	0,95	0,94	0,97	0,94	1,96	0,58	0,94	0,57	0,52	0,14	0,46	0,15	-2,58			
1	2	2	0,50	0,34	0,15	0,14	0,31	0,13	0,99	0,96	0,95	0,93	0,97	1,98	0,24	1,46	1,27	0,72	0,28	0,73	0,25	-3,53			
2			1,00	0,26	0,13	0,13	0,29	0,14	0,99	0,96	0,95	0,94	0,97	1,62	0,49	1,83	1,06	0,75	0,29	0,75	0,25	-2,37			
3			2,00	0,26	0,15	0,13	0,37	0,19	0,99	0,96	0,95	0,93	0,97	1,65	0,50	1,95	1,07	0,80	0,33	0,76	0,26	-2,14			
4			3,00	0,06	0,06	0,04	0,17	0,11	0,99	0,96	0,94	0,92	0,96	1,77	0,54	1,91	1,14	0,84	0,38	0,86	0,33	-2,35			
5			4,00	0,36	0,19	0,19	0,40	0,21	0,99	0,95	0,93	0,91	0,96	1,92	0,52	1,90	1,24	0,88	0,44	0,95	0,35	-2,61			
6			5,00	0,04	0,05	0,00	0,15	0,11	0,99	0,95	0,93	0,91	0,93	2,19	0,55	1,89	1,36	1,04	0,58	1,02	0,34	-3,07			
7			6,00	0,28	0,19	0,18	0,42	0,25	0,99	0,96	0,95	0,94	0,97	2,36	0,54	1,95	1,46	1,06	0,56	1,16	0,33	-3,45			
8			7,00	0,02	0,01	0,02	0,10	0,07	0,99	0,96	0,95	0,94	0,97	1,98	0,46	1,89	1,18	0,78	0,32	1,14	0,35	-2,99			
9			8,00	0,27	0,14	0,13	0,31	0,15	0,99	0,97	0,96	0,95	0,98	1,58	0,54	1,85	1,09	0,79	0,31	0,74	0,34	-2,09			
10			9,00	0,10	0,06	0,05	0,15	0,08	0,99	0,97	0,96	0,95	0,98	1,16	0,37	1,87	0,95	0,63	0,17	0,57	0,19	-1,69			
11			9,50	0,11	0,04	0,04	0,18	0,07	0,99	0,97	0,97	0,96	0,99	1,04	0,48	1,96	0,74	0,53	0,14	0,45	0,15	-1,08			
1	4	4	0,50	0,06	0,10	0,09	0,43	0,28	1,00	0,99	1,00	0,98	1,04	-0,56	0,08	3,22	1,58	0,78	0,31	0,75	0,26	-1,45			
2			1,00	0,06	0,15	0,13	0,60	0,40	0,99	0,99	1,00	0,99	1,05	-0,16	0,66	4,02	1,03	0,80	0,30	0,76	0,25	1,25			
3			2,00	0,12	0,06	0,06	0,36	0,29	0,99	0,99	1,00	0,98	1,05	-0,12	0,82	3,96	0,97	0,85	0,39	0,80	0,34	1,77			
4			3,00	0,13	0,06	0,04	0,10	0,03	0,99	0,98	1,00	0,98	1,05	0,06	0,74	4,05	1,14	0,92	0,42	0,93	0,33	1,34			
5			4,00	0,06	0,19	0,18	0,71	0,51	0,98	0,98	1,00	0,98	1,05	0,03	0,71	4,12	1,28	0,93	0,44	0,93	0,35	1,19			
6			5,00	0,12	0,22	0,17	0,65	0,46	0,99	0,98	0,99	0,96	1,04	0,28	0,60	4,14	1,39	1,13	0,62	0,97	0,35	0,70			
7			6,00	0,04	0,01	0,01	0,02	0,07	0,99	0,98	1,00	0,98	1,05	0,46	0,48	4,00	1,64	1,11	0,62	1,14	0,36	0,14			
8			7,00	0,05	0,16	0,20	0,72	0,51	0,99	0,99	1,00	0,99	1,05	0,11	0,68	4,11	1,19	0,83	0,33	1,14	0,35	0,90			
9			8,00	0,02	0,16	0,14	0,71	0,51	0,99	0,99	1,01	1,00	1,06	-0,27	0,77	4,12	1,04	0,84	0,34	0,75	0,34	1,86			
10			9,00	0,09	0,08	0,07	0,37	0,22	0,99	0,99	1,01	0,99	1,06	-0,46	0,82	4,22	0,70	0,75	0,24	0,65	0,23	2,28			
11			9,50	0,22	0,01	0,00	0,19	0,21	0,98	0,99	1,02	1,00	1,06	-0,84	0,99	4,14	0,55	0,55	0,16	0,45	0,15	3,30			

Fonte: O autor.

Tabela 34- Injeção pela USF de Potência Ativa Reativa de 1,2 e 4MW/ MVar

Item	Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa (MVar)	Tempo (s)	Correntes kA						Tensões kV					Potência na SE, USF e Gargas (Load) MW/ MVar								ângulo Fase B3 (graus)		
				Barras						Barras															
				ISE	I_Load 1	I_Load 2	I_USF	IB4		VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4	P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load 1	Q_Load 1	P_Load 2	Q_Load 2			
1	1	0	1,00	0,53	0,16	0,17	0,16	0,02	0,98	0,92	0,88	0,86	0,88	2,73	1,64	0,88	0,06	0,91	0,30	0,76	0,44	-1,62			
2			2,00	0,41	0,11	0,11	0,06	0,06	0,98	0,92	0,88	0,86	0,88	2,53	1,59	0,86	0,06	0,77	0,33	0,83	0,34	-1,99			
3			4,00	0,53	0,17	0,20	0,18	0,01	0,97	0,91	0,87	0,84	0,86	2,74	1,84	0,84	0,06	0,83	0,33	0,94	0,35	-2,00			
4			6,00	0,59	0,17	0,22	0,13	0,03	0,98	0,91	0,87	0,86	0,87	2,84	1,63	0,85	0,05	0,72	0,31	1,14	0,36	-2,62			
5			7,00	0,06	0,04	0,05	0,10	0,07	0,98	0,93	0,89	0,87	0,89	2,49	1,55	0,90	0,07	0,74	0,30	0,76	0,34	-2,51			
6			9,00	0,34	0,07	0,07	0,06	0,06	0,98	0,94	0,92	0,91	0,92	2,50	1,54	0,90	0,07	0,75	0,30	0,76	0,35	-1,62			
1	2	0	1,00	0,31	0,13	0,15	0,14	0,15	0,98	0,94	0,91	0,89	0,93	1,72	1,54	1,83	0,19	0,93	0,31	0,74	0,44	-0,09			
2			2,00	0,09	0,02	0,02	0,15	0,14	0,98	0,94	0,92	0,90	0,93	1,64	1,51	1,80	0,18	0,80	0,34	0,84	0,34	-0,45			
3			4,00	0,18	0,04	0,00	0,10	0,11	0,98	0,93	0,90	0,88	0,92	1,96	1,68	1,84	0,17	0,89	0,54	0,96	0,34	-0,40			
4			6,00	0,47	0,21	0,24	0,34	0,17	0,98	0,94	0,91	0,89	0,92	2,02	1,46	1,88	0,19	0,77	0,32	1,16	0,36	-0,81			
5			7,00	0,12	0,01	0,00	0,14	0,13	0,98	0,94	0,92	0,90	0,93	1,56	1,46	1,90	0,77	0,77	0,31	0,76	0,35	-0,87			
6			9,00	0,22	0,04	0,04	0,03	0,06	0,99	0,96	0,96	0,95	0,97	0,99	1,06	1,95	0,20	0,52	0,15	0,46	0,15	0,13			
1	4	0	1,00	0,21	0,03	0,07	0,05	0,03	0,98	0,97	0,98	0,96	1,02	-0,39	1,09	3,90	0,60	0,59	0,29	0,74	0,24	2,66			
2			2,00	0,23	0,07	0,05	0,05	0,02	0,98	0,97	0,99	0,97	1,03	-0,04	1,29	4,04	0,59	1,01	0,31	0,76	0,43	2,43			
3			4,00	0,13	0,19	0,18	0,63	0,43	0,98	0,96	0,97	0,95	1,02	-0,01	1,33	4,13	0,62	0,91	0,44	0,96	0,35	2,47			
4			6,00	0,05	0,20	0,19	0,71	0,51	0,98	0,97	0,98	0,96	1,02	0,41	1,40	3,97	0,62	1,05	0,57	1,15	0,35	2,77			
5			7,00	0,24	0,06	0,08	0,05	0,02	0,98	0,98	0,99	0,97	1,04	0,14	1,23	4,04	0,58	0,82	0,32	1,15	0,35	2,07			
6			9,00	0,17	0,03	0,03	0,05	0,03	0,99	1,00	1,02	1,01	1,07	-0,44	1,08	4,12	0,68	0,74	0,35	0,65	0,25	2,87			

Fonte: O autor.

Tabela 35- Injeção de potência ativa (P) e reativa (Q) de 1, 2 e 4 MW e 1, 2 e 4 MVar.

Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativa MVar	Tempo (s)	Correntes kA					Tensões kV					Potência na SE, USF e Gargas (Load)								ângulo Fase B3 (graus)
			Barras					Barras					P		Q		P		Q		
			ISE	I_Load 1	I_Load 2	I_USF	IB4	VefSE	Vef1	Vef2	Vef3	Vef4	P_SE	Q_SE	P_USF	Q_USF	P_Load 1	Q_Load 1	P_Load 2	Q_Load 2	
1	1	1,00	0,28	0,08	0,12	0,18	0,05	0,98	0,93	0,90	0,88	0,91	2,45	0,85	0,89	0,71	0,61	0,27	0,74	0,31	-2,95
		2,00	0,07	0,00	0,00	0,08	0,07	0,99	0,94	0,91	0,89	0,91	2,65	0,90	0,89	0,84	0,91	0,33	0,75	0,43	-3,67
		4,00	0,16	0,10	0,07	0,17	0,09	0,99	0,93	0,90	0,88	0,90	2,81	0,83	0,92	0,83	0,84	0,40	0,95	0,34	-3,75
		6,00	0,55	0,17	0,23	0,19	0,03	0,99	0,93	0,90	0,88	0,90	3,07	0,76	0,89	0,94	0,91	0,41	1,15	0,34	-4,49
		7,00	0,43	0,14	0,19	0,24	0,08	0,99	0,94	0,91	0,89	0,92	2,94	0,84	0,93	0,84	0,76	0,32	1,14	0,38	-4,11
		9,00	0,10	0,03	0,04	0,13	0,05	0,99	0,95	0,94	0,93	0,94	2,32	0,75	0,92	0,68	0,68	0,30	0,65	0,25	-2,95
2	2	1,00	0,25	0,11	0,14	0,18	0,18	0,99	0,96	0,94	0,92	0,97	1,49	0,54	1,87	1,03	0,58	0,28	0,75	0,26	-1,79
		2,00	0,10	0,03	0,03	0,00	0,02	0,99	0,96	0,95	0,93	0,97	1,76	0,48	1,85	1,26	0,96	0,34	0,74	0,43	-2,55
		4,00	0,22	0,16	0,12	0,33	0,19	0,99	0,95	0,94	0,92	0,96	1,92	0,65	1,94	1,22	0,88	0,43	0,96	0,34	-2,51
		6,00	0,40	0,18	0,21	0,32	0,16	0,99	0,96	0,94	0,93	0,96	2,28	0,38	1,92	1,47	0,00	0,55	1,14	0,33	-3,35
		7,00	0,28	0,16	0,16	0,41	0,22	0,99	0,96	0,95	0,93	0,97	1,95	0,50	1,94	1,23	0,80	0,33	0,99	0,38	-2,63
		9,00	0,23	0,12	0,10	0,21	0,14	0,99	0,97	0,97	0,93	0,99	1,39	0,52	0,86	0,97	0,70	0,31	0,64	0,23	-1,67
4	4	1,00	0,14	0,07	0,05	0,44	0,35	0,99	0,98	1,00	0,98	1,04	-0,33	0,81	3,82	0,92	0,60	0,29	0,73	0,28	1,93
		2,00	0,05	0,14	0,12	0,59	0,44	0,99	0,98	1,00	0,98	1,05	-0,05	0,71	3,97	1,15	1,01	0,33	0,75	0,44	1,24
		4,00	0,09	0,06	0,09	0,40	0,32	0,99	0,98	0,99	0,97	1,04	0,04	0,81	3,93	1,24	0,90	0,51	0,93	0,35	1,37
		6,00	0,08	0,12	0,10	0,38	0,25	0,99	0,98	0,99	0,98	1,05	0,44	0,51	4,11	1,43	1,08	0,59	1,16	0,34	0,28
		7,00	0,10	0,12	0,11	0,44	0,28	0,99	0,98	0,99	0,98	1,04	-0,15	0,70	4,18	1,16	0,84	0,34	0,92	0,36	1,35
		9,00	0,14	0,02	0,02	0,05	0,02	0,99	0,99	1,02	1,01	1,07	-0,43	0,85	4,11	0,86	0,74	0,33	0,65	0,24	2,40

Fonte: O autor.