

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUIZA SAYDELLES DE MORAES

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA DE REDES DE
DISTRIBUIÇÃO RURAIS: CONTROLE DE TENSÃO E
GERENCIAMENTO DA PARTIDA DE MOTORES**

Alegrete

2019

LUIZA SAYDELLES DE MORAES

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA DE REDES DE
DISTRIBUIÇÃO RURAIS: CONTROLE DE TENSÃO E
GERENCIAMENTO DA PARTIDA DE MOTORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva

Alegrete

2019

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M827a Moraes, Luiza Saydelles de
ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO
RURAS: CONTROLE DE TENSÃO E GERENCIAMENTO DA PARTIDA DE
MOTORES / Luiza Saydelles de Moraes.
72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2019.

"Orientação: Guilherme Sebastião da Silva".

1. Sistemas Elétricos de Potência. I. Título.

LUIZA SAYDELLES DE MORAES

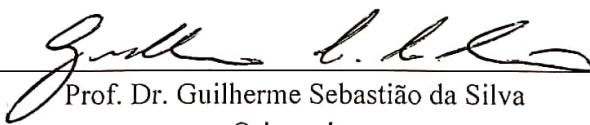
ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS: CONTROLE DE TENSÃO E GERENCIAMENTO DA PARTIDA DE MOTORES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

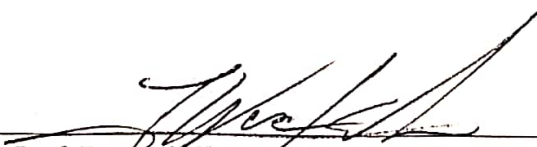
Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de junho de 2019.

Banca examinadora:


Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva
Orientador


Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto
UNIPAMPA


Prof. Dr. José Wagner Maciel Kaehler
UNIPAMPA

Agradecimentos

Primeiramente, agradecer aos meus pais, Gelson e Gissela, pelo amor, carinho, paciência e pela dedicação na minha formação social e profissional. Aos meus dindos Amilton e Evelyn e aos meus irmãos de coração e criação Ana e Diego, por todo incentivo, apoio e por sempre estarem ao meu lado.

As minhas amigas Luana Maria Arruda da Costa, Regina Stacke e Thiele Piber que sempre me motivaram para que nunca desistisse e sempre estiveram me apoiando.

Ao meu orientador Professor Guilherme Sebastião da Silva, por ter confiado no meu potencial, pelo grande auxílio e dedicação para que este trabalho evoluísse.

Aos meus amigos Amanda Maia, Ana Paula Padilha, Débora Patrícia Ströher, Gabriel Macedo, Giovana Ceolin, Jean Portella, Juliana Mareco, Larissa Prado, Leonardo Vargas, Luiz Gabriel Martins, Lucas Tarone, Paula Santos, Richard Cornelius e Rodolfo Londero, pela grande amizade e apoio para a minha formação e pelos momentos de lazer e sossego da faculdade. Todos sabem a importância que tiveram no decorrer da minha graduação e só tenho a agradecer por ter conhecido e por fazer parte da vida de cada um.

Aos demais colegas de curso, que tive o prazer de conhecer e conviver durante este período.

Ao Grupo de Exploração Integrada de Recursos Energéticos (EIRE) pela oportunidade de fazer parte deste grupo e agregar conhecimentos além da graduação.

Ao Professor José Wagner Maciel Kaehler e a Professora Natália Braun Chagas por todo apoio e por sempre acreditarem na minha capacidade e por terem compartilhado seus conhecimentos e experiências no decorrer da minha formação.

Aos demais professores, pelos ensinamentos e contribuições na formação acadêmica.

À Deus por minha vida, família, amigos e por me dar forças para superar todos os momentos de dificuldades que me deparei durante a graduação.

*"Nós poderíamos ser muito melhores
se não quiséssemos ser tão bons."*

Sigmund Freud

Resumo

Na região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, a maior produtora de arroz irrigado do Estado, faz uso de energia elétrica na fase de plantio, utilizando a irrigação e pós colheita com a secagem e armazenagem de grãos. Logo a qualidade de fornecimento de energia nas redes rurais é extremamente importante, porém muitos dos produtores identificam falhas no fornecimento, pois nessas redes ocorrem fortes oscilações de tensão nos alimentadores devido as cargas sazonais de irrigação das lavouras de arroz. Logo, a qualidade de energia torna-se um assunto importante e relevante de estudo, além de fazer parte do contexto da comunidade. É de conhecimento que uma das principais causas da baixa qualidade de energia é a partida de motores de indução, devido a variação de tensão exercida por este tipo de carga. Nesse contexto, este trabalho propõe analisar a qualidade de energia das redes de distribuição rurais utilizadas pelos produtores de arroz da Fronteira Oeste do Estado. A metodologia utilizada para a análise proposta, consiste em realizar o controle de tensão utilizando o conversor *back-to-back* a partir da injeção de potência reativa (VAr) na rede rural. Dessa forma, será realizado o gerenciamento da partida de motores de indução para controlar os níveis de tensão do meio rural e assim melhorar a qualidade de energia.

Palavras-chave: Arroz Irrigado, Controle de Tensão, Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, Motores de Indução, Oscilações de Tensão, Potência Reativa, Qualidade de Energia.

Abstract

In the Western Frontier region of Rio Grande do Sul, the largest producer of irrigated rice in the state, uses electricity in the planting phase, using irrigation and post harvest with drying and storage of grain. Therefore, the quality of energy supply in rural networks is extremely important, but many producers identify supply failures, because in these networks there are strong voltage fluctuations in feeders due to seasonal irrigation loads of rice fields. Therefore, power quality becomes an important and relevant subject of study, as well as being part of the community context. It is well known that one of the main causes of low power quality is the start of induction motors due to the voltage variation exerted by this type of load. In this context, this paper proposes to analyze the energy quality of the rural distribution networks used by the rice producers of the State West Frontier. The methodology used for the proposed analysis is to perform voltage control using the textit back-to-back converter from the reactive power injection (VAR) in the rural network. In this way, the induction motor starter will be managed to control the voltage levels of the countryside and thus improve the power quality.

Keywords: Irrigated Rice, Voltage Control, Rio Grande do Sul West Frontier, Induction Motors, Voltage Oscillations, Reactive Power, Power Quality.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa da Fronteira Oeste do RS.	16
Figura 2 – Demonstração da demanda durante o período de safra.	17
Figura 3 – Faixas de tensão em relação a tensão de referência.	19
Figura 4 – Forma de onda de tensão sob efeito da flutuação.	21
Figura 5 – Triângulo de potências.	23
Figura 6 – Esquema de funcionamento de um inversor de frequência.	26
Figura 7 – Esquema de um Soft-Starter	27
Figura 8 – Topologia do conversor <i>Back-to-Back</i>	30
Figura 9 – Modelagem do conversor <i>Back-to-Back</i>	31
Figura 10 – Plano PQ.	32
Figura 11 – Fluxograma da estratégia de gerenciamento.	33
Figura 12 – Curva VAr.	34
Figura 13 – Fonte trifásica.	35
Figura 14 – Medição tensão-corrente trifásica.	35
Figura 15 – Parâmetros de distribuição da linha.	35
Figura 16 – Carga RLC trifásica.	36
Figura 17 – Gerador de sinais.	36
Figura 18 – Carga dinâmica trifásica.	37
Figura 19 – Medidor potência ativa e reativa.	37
Figura 20 – Medidor de fator de potência.	38
Figura 21 – Sistema Genérico para testes.	39
Figura 22 – Sistema Genérico Elaborado no Software MATLAB/Simulink®.	40
Figura 23 – Medição das Variáveis no Software MATLAB/Simulink®.	41
Figura 24 – Curva de Carga de uma propriedade da Fronteira Oeste do RS.	42
Figura 25 – Tensão na Barra 2.	43
Figura 26 – Fator de Potência na Barra 1.	44
Figura 27 – Fator de Potência na Barra 2.	44
Figura 28 – Fator de Potência na Carga 1.	45
Figura 29 – Fator de Potência na Carga 2.	45
Figura 30 – Tensão na Barra 2.	46
Figura 31 – Fator de Potência na Barra 1.	47
Figura 32 – Fator de Potência na Barra 2.	47
Figura 33 – Fator de Potência na Carga 1.	48
Figura 34 – Fator de Potência na Carga 2.	48
Figura 35 – Tensão na Barra 2.	49
Figura 36 – Fator de Potência na Barra 2.	50

Figura 37 – Fator de Potência na Carga 2.	50
Figura 38 – Sistema 13 Barras IEEE Modificado.	51
Figura 39 – Sistema 13 barras IEEE Elaborado no software MATLAB/Simulink®.	55
Figura 40 – Medição das Variáveis no Software MATLAB/Simulink®.	56
Figura 41 – Potência Ativa e Potência Reativa na Subestação.	56
Figura 42 – Fator de Potência na Subestação.	57
Figura 43 – Tensão na Barra 646.	58
Figura 44 – Tensão na Barra 634.	58
Figura 45 – Tensão na Barra 671.	59
Figura 46 – Tensão na Barra 611.	59
Figura 47 – Tensão na Barra 675.	60
Figura 48 – Potência Ativa e Potência Reativa na Subestação.	60
Figura 49 – Fator de Potência na Subestação.	61
Figura 50 – Tensão na Barra 646.	61
Figura 51 – Tensão na Barra 634.	62
Figura 52 – Tensão na Barra 671.	62
Figura 53 – Tensão na Barra 611.	63
Figura 54 – Tensão na Barra 675.	63
Figura 55 – Potência Ativa e Potência Reativa na Subestação.	64
Figura 56 – Fator de Potência na Subestação.	64
Figura 57 – Tensão na Barra 646.	65
Figura 58 – Tensão na Barra 634.	65
Figura 59 – Tensão na Barra 671.	66
Figura 60 – Tensão na Barra 611.	66
Figura 61 – Tensão na Barra 675.	67

Lista de tabelas

Tabela 1 – Regiões da Fronteira Oeste e seus respectivos dados de plantação. . . .	15
Tabela 2 – Pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.	20
Tabela 3 – Vantagens e Desvantagens das Partidas de Motores de Indução.	28
Tabela 4 – Dados das configurações das linhas.	52
Tabela 5 – Dados das linhas.	52
Tabela 6 – Dados das cargas.	53
Tabela 7 – Dados dos banco de capacitores.	53

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação e Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Organização do Trabalho	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Produção de Arroz na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul	15
2.2	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	17
2.3	Qualidade de Energia Elétrica	18
2.3.1	PRODIST	18
2.3.2	Flutuação de Tensão	20
2.3.3	Variação de Curta Duração	22
2.3.3.1	Sobretensão	22
2.3.3.2	Subtensão	22
2.3.4	Fator de Potência	22
2.4	Motores de Indução	23
2.4.1	Partida Direta	24
2.4.2	Partida com Tensões Reduzidas	25
2.4.2.1	Partida Estrela - Triângulo	25
2.4.2.2	Partida Compensadora	25
2.4.3	Partidas Eletrônicas	26
2.4.4	Partida com Inversor de Frequência	26
2.4.4.1	Partida Suave Soft-Starter	26
2.4.5	Vantagens e Desvantagens das Partidas de Motores de Indução	27
2.5	Causas da Baixa Qualidade de Energia em Redes Rurais	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	Conversor <i>Back-To-Back</i>	30
3.1.1	Princípio de Funcionamento	31
3.2	Estratégia de Gerenciamento	32
3.2.1	Violação de Tensão	33
3.2.2	Ajuste de Potência Reativa	34

3.3	Software MATLAB/Simulink®	34
4	RESULTADOS	39
4.1	Cenário de Testes	39
4.1.1	Sistema Genérico	39
4.1.2	Teste 1	42
4.1.2.1	Tensão do Sistema	43
4.1.2.2	Fator de Potência do Sistema	43
4.1.3	Teste 2	45
4.1.3.1	Tensão do Sistema	46
4.1.3.2	Fator de Potência do Sistema	46
4.1.4	Teste 3	48
4.1.4.1	Tensão do Sistema	49
4.1.4.2	Fator de Potência do Sistema	49
4.1.5	Sistema de 13 Barras IEEE	50
4.1.6	Teste 1	56
4.1.7	Teste 2	60
4.1.8	Teste 3	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.1	Conclusão	68
5.2	Trabalhos Futuros	69
	REFERÊNCIAS	70

1 Introdução

No Brasil, a cultura do arroz (orizicultura) foi introduzida a partir do século XVI, enquanto que no Rio Grande do Sul (RS) passou a ser implementada em meados de 1930. Em toda sua cadeia produtiva, e em contínuo avanço tecnológico, a produção do arroz irrigado tornou-se uma importante estratégia, tanto pela sua representatividade econômica quanto pela sua relevância pela qualidade do produto contribuindo para a segurança alimentar do país e, em especial, para as regiões de produção orizícola do RS (BRUM; PORTELA, 2007).

A região conhecida como Fronteira Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, a qual compreende as cidades de Alegrete, Itaqui, Manoel Viana, Uruguaiana entre outras, é a maior produtora de arroz irrigado do Estado, totalizando 26% da área plantada de arroz irrigado de todo o país, e tendo 45% da produção nacional IRGA (2017). Logo, o uso da energia é fundamental para garantir uma melhor produtividade das lavouras de arroz. Entretanto, os produtores vêm identificando deficiências no fornecimento de energia, sendo necessário a implementação de uma ampla e segura rede de distribuição de energia elétrica no meio rural para garantir a qualidade da energia (PARAGINSKI; SOUZA, 2010).

A melhoria na qualidade de fornecimento de energia elétrica é um processo que vem se aperfeiçoando com o transcorrer do tempo, não somente por parte das empresas concessionárias de energia, como também pelos consumidores. A partir da década de 70, houve um aumento significativo do consumo de energia elétrica e, devido a isso, começou a se ter a preocupação não somente com o fornecimento de energia elétrica, mas também com a sua qualidade (FELBER, 2010).

Além disso, outro problema que afeta a qualidade de energia no meio rural são os motores de indução, devido a sua elevada corrente de partida e o grande porte destes motores destinados à irrigação mecanizada. E em consequência da modalidade tarifária Verde Irrigante os produtores são obrigados a deixar de operar em períodos de ponta ditados pela concessionária. Dessa forma, a saída e reentradas dos motores afetam fortemente os níveis de tensão de fornecimento por parte da concessionária. Assim, é necessário um maior estudo sobre essas oscilações de tensão para evitar falhas no sistema elétrico e dos equipamentos utilizados na rede. É pertinente ressaltar que este distúrbio de tensão pode causar uma variação no conjugado do motor afetando o funcionamento do mesmo e ocasionando perdas na produção.

Nessa perspectiva, devido à grande importância do assunto, este trabalho propõe analisar a qualidade de energia no meio rural utilizando o conversor *back-to-back* para o controle da tensão a partir da injeção de potência reativa.

Para isso, serão realizados testes onde inicialmente será apresentado um sistema simples com duas barras que será conectado um conversor back-to-back juntamente com um motor de indução. Assim, serão feitos 3 testes para observar o comportamento das tensões das barras e cargas apresentadas no sistema, afim de verificar se há violação nos limites admissíveis do Módulo 8 do PRODIST. Caso a tensão não esteja, será realizada a injeção de potência reativa a partir da curva Volt/VAr e o plano PQ. Após este sistema genérico, serão realizados testes com o sistema de 13 barras da IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), implementando a estratégia de gerenciamento PQ realizando os mesmos testes feitos anteriormente.

1.1 Motivação e Justificativa

Atualmente, o meio rural tem encontrado problemas em relação ao fornecimento de energia de qualidade, sendo este um desejo e necessidade de muitos proprietários, além de ser também um problema nacional. Visto que para o proprietário rural consiga realizar suas atividades, é preciso uma qualidade de energia suficiente para suprir este problema.

Todavia, o problema de fornecimento se acentua quando as propriedades rurais se encontram muito distantes dos centros de carga e devido à grande extensão das linhas de distribuição rural, a energia que chega nas propriedades, muitas vezes, é de baixa qualidade.

É de conhecimento que as propriedades rurais necessitam de energia para uma melhor qualidade de vida e também para o funcionamento dos equipamentos agrícolas, que ao longo dos anos vem se modernizando, e com isso, a carência de potência de rede, conseqüentemente, tem aumentado. Com isso, muitos agricultores acabam encontrando barreiras devido à baixa qualidade de energia para o investimento na área de irrigação e agroindústria. Essa deficiência na energia elétrica tem se mostrado um problema para a expansão e aumento das atividades produtivas, bem como afetado a qualidade de vida das pessoas que moram no meio rural (BAXTER et al., 2015).

A utilização de motores de indução em propriedades rurais é muito grande, apesar disso a variação de tensão durante a partida dos mesmos sempre foi um problema principalmente para as propriedades rurais e distribuidoras de energia. Porém, devido o motor de indução apresentar maiores vantagens que o motor de corrente contínua, como sua simplicidade, baixo custo e mínima manutenção, este problema de oscilação de tensão não diminui o fato de ser muito utilizado, tornando-se assim um assunto relevante de estudo, o qual visa encontrar soluções para evitar ou mitigar as variações de tensão que este equipamento causa na rede.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Esse trabalho possui como objetivo geral realizar uma análise da qualidade de energia em redes rurais empregando uma estratégia para o controle de tensão a partir da injeção de potência reativa utilizando o conversor *back-to-back*. Dessa forma, serão realizados testes com um sistema de duas barras e um sistema de 13 barras da IEEE utilizando a curva Volt/VAr para verificar os limites admissíveis de tensão e potência reativa para o controle da tensão.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, os seguintes passos serão realizados:

- Analisar o nível de tensão do alimentador;
- Analisar o fator de potência do sistema;
- Analisar a quantidade necessária de injeção de potência reativa para o controle da tensão;
- Analisar a qualidade de energia a partir dos valores de tensão determinados no PRODIST.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, no qual o Capítulo 1 apresenta uma introdução geral ao tema proposto, contendo a motivação e justificativa de se realizar o estudo, bem como os objetivos que pretende-se alcançar.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica da literatura relacionada ao tema, apontando as principais causas da baixa qualidade de energia elétrica no meio rural.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia do trabalho, demonstrando a estrutura do conversor *back-to-back* e a estratégia de gerenciamento para o controle de tensão a partir da injeção de potência reativa.

No Capítulo 4 é apresentado os resultados obtidos a partir dos dois cenários de testes realizados e a validação dos resultados.

No Capítulo 5 ressalta-se as considerações finais do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado uma breve abordagem sobre a produção de arroz na Fronteira Oeste do RS e a qualidade de energia elétrica com foco no meio rural. Serão apresentadas as características dos sistemas de distribuição rural e normas que determinam os limites aceitáveis de tensão fornecida aos consumidores para uma boa qualidade de energia. Além disso, será apresentado sobre os métodos de partida de motores de indução e as principais causas para a baixa qualidade de energia no meio rural.

2.1 Produção de Arroz na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul

A região chamada Fronteira Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, a qual compreende as cidades de Alegrete, Itaqui, Manoel Viana, Uruguaiana entre outras, como é apresentado na Figura 1. No decorrer dos anos, segundo dados do Instituto Rio-grandense do Arroz (IRGA) e Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a região da Fronteira Oeste do RS é vista como uma das maiores produtoras nacionais de arroz, representando 26% da área plantada de arroz irrigado de todo o país e possui 45% da produção nacional (PARAGINSKI; SOUZA, 2010).

Como mencionado anteriormente, a Fronteira Oeste é um dos maiores produtores de arroz da região, conforme pode ser averiguado na Tabela 1. A Tabela 1 apresenta a safra de 2017/2018 em relação à região, apontando que a região que mais teve produtividade, colheu e produziu foi a Fronteira Oeste.

Tabela 1 – Regiões da Fronteira Oeste e seus respectivos dados de plantação.

Regional	Colhido (ha)	Produtividade (Kg/ha)	Produção (t)
Fronteira Oeste	314.660	8.661	2.725.266
Campanha	161.843	7.857	1.271.661
Central	142.937	7.740	1.106.378
Planície Costeira Interna	142.537	7.354	1.048.217
Planície Costeira Externa	131.025	6.897	903.625
Zona Sul	173.107	8.199	1.419.246
Total RS	1.066.109	7.949	8.474.392

Fonte: IRGA (2017).

Diante da alta produção e do uso de sistemas de irrigação para a plantação do arroz, é necessária uma grande utilização de energia elétrica para o funcionamento dos sistemas hidráulicos (CANCIO, 2016). Devido as cargas serem fortemente sazonais,

Figura 1 – Mapa da Fronteira Oeste do RS.

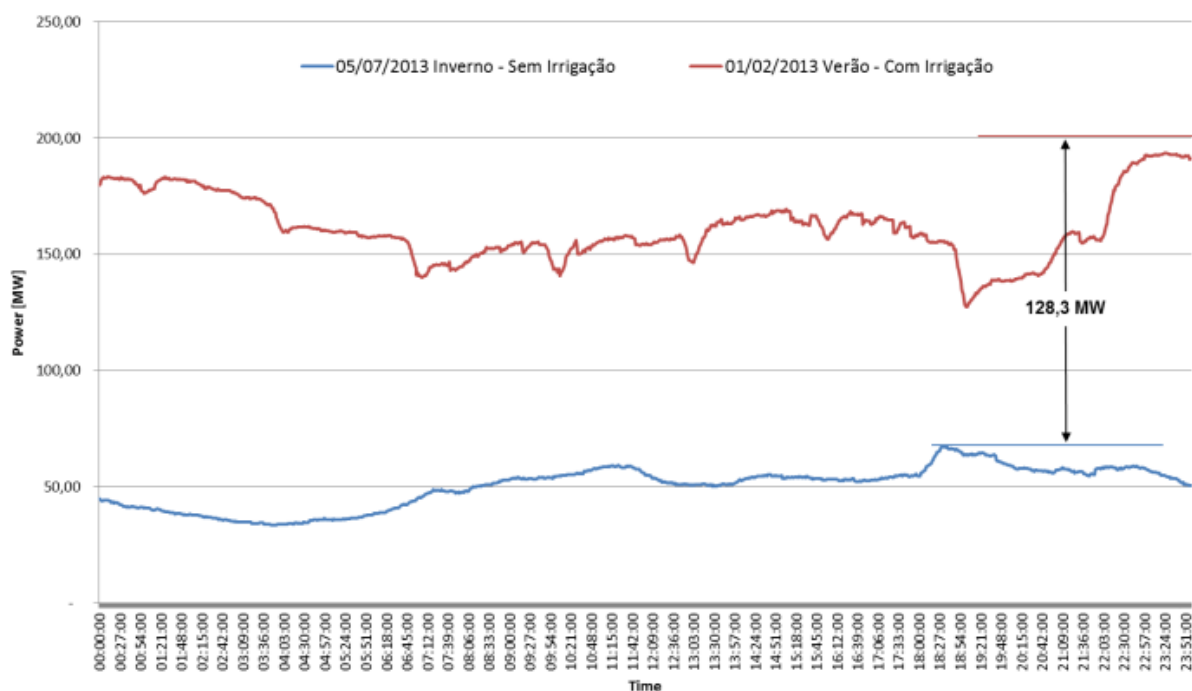


Fonte: Adaptado de 10^a CRS (Alegrete).

ocorrendo em média 120 dias do ano, constata-se uma forte variação de tensão nos meses de novembro a março, devido às energizações e desenergizações de motores em consequência do bombeamento de água para a irrigação das lavouras de arroz (KAEHLER et al., 2013).

Para ilustrar a situação em que o sistema se encontra quando o período de safra está ocorrendo, no verão em pleno plantio de arroz irrigado, e no inverno onde não há bombeamento, tem-se a Figura 2. Esta foi obtida a partir de dados de uma propriedade rural localizada no interior da cidade de Alegrete no Rio Grande do Sul, onde tem-se motores de indução utilizados para irrigação mecanizada.

Figura 2 – Demonstração da demanda durante o período de safra.



Fonte: [Kaehler et al. \(2013\)](#).

Segundo [Kaehler et al. \(2013\)](#), a demanda adicionada pela carga de bombeamento para as lavouras de arroz irrigado chegou em 2013 a 128,3MW. Devido ao horário de verão, as cargas são deslocadas para o período das 18:00 às 21:00, transformando o fator de carga para um valor elevado aproximadamente de 83,4%, enquanto quando não há bombeamento esse fator encontra-se em 74,4%.

A partir da Figura 2 é possível concluir que a produção de arroz gera uma grande variação no fator de carga, assim como na variação de tensão devido ao período de safra. Dessa forma, controlar a tensão e a partida dos motores é de grande importância para evitar problemas de funcionamento dos equipamentos, bem como baixa produção devido à falta de qualidade de energia.

2.2 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

De modo a garantir uma boa qualidade de energia elétrica aos consumidores, principalmente aos proprietários da região rural, pois são os maiores afetados por oscilações na tensão entregue, o fornecimento de energia elétrica conduzido pela rede de distribuição deve estar de acordo com as exigências da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ([ANEEL, 2015](#)).

Em função do elevado porte de cargas conectadas a rede elétrica rural e da grande distância das subestações de distribuição, os sistemas de distribuição possuem uma elevada relação resistência/reatância. Como consequência destes fatores, há perdas significativas, além de elevadas oscilações de tensão, fazendo com que os consumidores recebam uma tensão abaixo da definida como adequada pela ANEEL ([SILVA, 2015](#)).

A conexão, o serviço e o fornecimento eficiente de eletricidade ao consumidor são gerenciados pelas distribuidoras de energia. Assim, a energia distribuída é a energia fornecida aos consumidores conectados à rede elétrica, e é um sistema muito extenso e complexo devido ao fato de ter que chegar as residências. Essa distribuição é realizada por fios, transformadores e equipamentos para medir, controlar e proteger as redes elétricas. O sistema de distribuição é integrado pelas redes de distribuição primária e secundária. As redes primárias possuem tensões entre 2,3 kV e 44 kV, logo conhecidas como média tensão, e as redes secundárias com tensões entre 110 V e 440 V, conhecidas como baixa tensão.

Nas propriedades rurais destinadas ao agronegócio, o problema da falta de qualidade de energia é ainda mais agravado, pois além de atender as propriedades afastadas, a rede é ainda mais extensa para chegar até os pontos de demanda de energia (bombeamento, secagem e armazenagem).

2.3 Qualidade de Energia Elétrica

A qualidade de energia pode ser caracterizada como um conjunto de características necessárias para que o consumidor tenha energia elétrica entregue com continuidade, qualidade, níveis de confiabilidade adequados e custo baixo, além de possuir amplitude e frequência constantes e forma de onda senoidal ([VENDRAMETO, 2015](#)).

A partir do momento em que a energia elétrica é necessária para toda a população, a qualidade desse produto é questionada. Inicialmente, a continuidade do serviço é uma preocupação, pois qualquer interrupção no fornecimento, pode desencadear problemas. E além dessa preocupação, tem-se a questão da qualidade de energia elétrica, a qual é afetada por falhas de funcionamento em equipamentos devido as oscilações que ocorrem no sistema de fornecimento de energia elétrica ([MEHL, 2013](#)).

2.3.1 PRODIST

A ANEEL instituição vinculada ao Governo Federal, foi criada com o objetivo de estimular a eficiência do sistema elétrico, sendo responsável por regulamentar, fiscalizar e estabelecer padrões mínimos de qualidade para as atividades relacionadas à energia elétrica, como geração, transmissão, distribuição e comercialização. A criação dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), foram desenvolvidos pela ANEEL para normatizar e padronizar as atividades técnicas relacio-

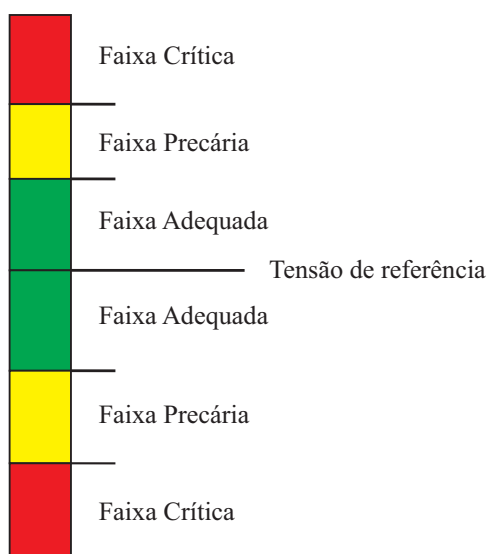
nadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (VENDRAMETO, 2015).

O oitavo módulo do PRODIST tem como objetivo estabelecer os níveis de tensão aceitáveis e não aceitáveis fornecidos aos consumidores, relacionados à qualidade de energia elétrica (QEE), abordando a qualidade do produto, a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações. A qualidade do produto, foco deste trabalho, trata-se da conformidade da tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão (VENDRAMETO, 2015). Ainda, tem como objetivo estabelecer os seus indicadores e valores de referência ou limites. Dentre os fenômenos ocasionados em regime permanente, tem-se: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuações de tensão e variação de frequência (ANEEL, 2018). O foco deste trabalho são as flutuações de tensão e o fator de potência.

A análise da qualidade de energia elétrica é definida a partir dos requisitos da qualidade de produto. Um dos requisitos é o atendimento dos consumidores dentro das faixas de tensão definidas pela ANEEL, apresentado no PRODIST – Módulo 8, sendo definidas como adequada, precária e crítica para todos os níveis de tensão nominal (IVANOV, 2017).

A partir desses níveis de tensão da rede, há uma verificação com os valores medidos no ponto de conexão da rede com os valores especificados no PRODIST para cada faixa de tensão (IVANOV, 2017). A tensão de atendimento associado às leituras realizadas deve ser classificada segundo faixas em torno da tensão de referência (TR), conforme a Figura 3, sendo (ANEEL, 2018):

Figura 3 – Faixas de tensão em relação a tensão de referência.



Fonte: [Aneel \(2018\)](#)

- Tensão de Referência (T_R);
- Faixa Adequada de Tensão ($T_R - \Delta_{ADINF}$, $T_R + \Delta_{ADSUP}$);
- Faixas Precárias de Tensão ($T_R + \Delta_{ADSUP}$, $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $T_R - \Delta_{ADINF}$);
- Faixas Críticas de Tensão ($>T_R + \Delta_{ADINF} + \Delta_{PRSUP}$ ou $<T_R + \Delta_{ADINF} + \Delta_{PRINF}$).

Em todo o sistema de distribuição, o nível de tensão em regime permanente deve atender aos limites estabelecidos por normas técnicas regulamentadoras. Para a rede de distribuição primária, os limites e suas classificações estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL \leq 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: [Aneel \(2018\)](#).

A partir da análise da Tabela 3 verifica-se que tensões entre 0,93 e 1,05 p.u. em relação a tensão nominal de 1 p.u., se encontram dentro da faixa de tensão denominada *Adequada*, que é a faixa de operação correta dos sistemas de distribuição. Os valores de tensão acima de 1,05 p.u. encontram-se na faixa de tensão denominada *Crítica*. Esta faixa pode danificar os equipamentos dos consumidores. A faixa de tensão *Precária* encontra-se entre 0,9 e 0,93 p.u. ([SPATTI et al., 2011](#)).

Além dos limites estabelecidos para a tensão, o Módulo 8 normatiza os valores de fator de potência para garantir a qualidade de energia. Para tensão inferior a 230kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1 indutivo e 0,92 e 1 capacitivo ([ANEEL, 2018](#)).

2.3.2 Flutuação de Tensão

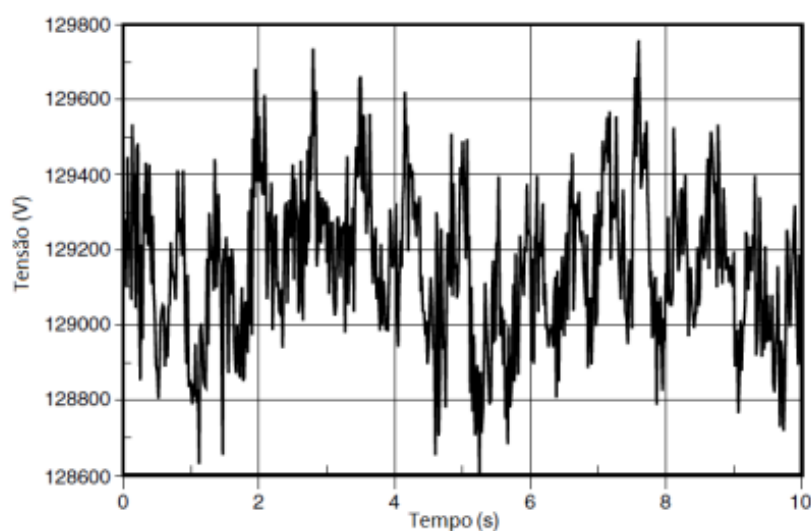
A fim de evitar possíveis falhas no fornecimento de energia, surge o estudo e investigação dos padrões de comportamento das variações de tensão, para que seja possível criar técnicas e equipamentos que diminuam ou eliminem os distúrbios, amenizando os efeitos ([SIQUEIRA, 2017](#)).

Dentre os distúrbios, pode-se definir o fenômeno de flutuação de tensão o qual pode ser caracterizado por variações sistemáticas e aleatórias devido à energização e

desenergização de grandes cargas, como partida de motores. Este distúrbio na tensão é frequente nas redes de distribuição elétrica no país e no mundo (SIQUEIRA, 2017). Segundo Dugan (2003), caracteriza-se como um problema de QEE qualquer distúrbio ou ocorrência manifestada nos níveis de tensão, nas formas de onda de tensão ou corrente que possam resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito permanente em equipamento de um sistema elétrico.

A Figura 4 apresenta uma forma de onda de tensão com a ocorrência do distúrbio de tensão conhecido como flutuação de tensão.

Figura 4 – Forma de onda de tensão sob efeito da flutuação.



Fonte: Dugan (2003)

As flutuações de tensão são geradas por cargas variáveis de potência elevada, geralmente causadas por cargas industriais e podem se manifestar de variadas formas. No caso do meio rural as oscilações de tensão ocorrem devido as regras da horosazonalidade das tarifas, no caso Verde Irrigante, com a entrada e saída dos motores em horários definidos pela concessionária (PAULILLO; TEIXEIRA, 2016) (SIQUEIRA, 2017).

Paulillo e Teixeira (2016) apontam que os principais efeitos nos sistemas elétricos resultando das oscilações de tensão são:

- Oscilações de potência e torque das máquinas elétricas;
- Queda de rendimento dos equipamentos elétricos;
- Interferência nos sistemas de proteção;
- Efeito flicker ou cintilação luminosa.

2.3.3 Variação de Curta Duração

As variações de curta duração (VTCD) são causadas por condições de falha, ao conectar grandes cargas que necessitam de elevadas correntes de partida ou de erros de conexão entre a carga e rede elétrica (SARMANHO, 2005). É um evento aleatório de tensão que compreende variações de tensão com duração superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto (MAIA, 2011).

As VTCD podem ser apresentadas como problemas de sobretensão e subtensão. Nesta seção será apresentado estes distúrbios, que podem gerar falhas nos equipamentos e baixa qualidade da energia. Normalmente, essas variações se dão devido a variações de cargas elevadas (SARMANHO, 2005).

Toda variação na tensão gera no sistema um incremento ou redução dessa grandeza, a seguir é apresentado uma breve explicação do que é sobretensão e subtensão.

2.3.3.1 Sobretensão

A sobretensão é definida como um incremento na tensão na rede elétrica, com duração superior a três segundos e igual ou superior a um minuto. A magnitude dessa sobretensão é entre 1,1 e 1,8 p.u.. Assim como a subtensão, esse salto de tensão pode estar associado com condições de falha no sistema (SARMANHO, 2005). Este fenômeno pode ser ocasionado devido a saída de grandes cargas, como os motores de indução (RODRIGUES, 2008).

2.3.3.2 Subtensão

A subtensão é caracterizada por uma rápida redução no valor eficaz da tensão (RODRIGUES, 2008). Os afundamentos de tensão apresentam uma redução de 0,1 a 0,9 p.u. no valor eficaz da tensão com duração superior a três segundos e igual ou superior a um minuto (ARRUDA, 2003). Podem ser causadas devido a partida de grandes motores, provocando uma queda de tensão no sistema (SARMANHO, 2005).

Em sistemas industriais o fenômeno de subtensão é uma das principais perturbações encontradas, consistindo na redução em um período curto de tempo ou a perda completa da tensão (DRANKA, 2012). Um dos efeitos deste distúrbio é a má operação dos equipamentos ligados a rede, de forma a causar uma baixa qualidade no sistema (ARRUDA, 2003).

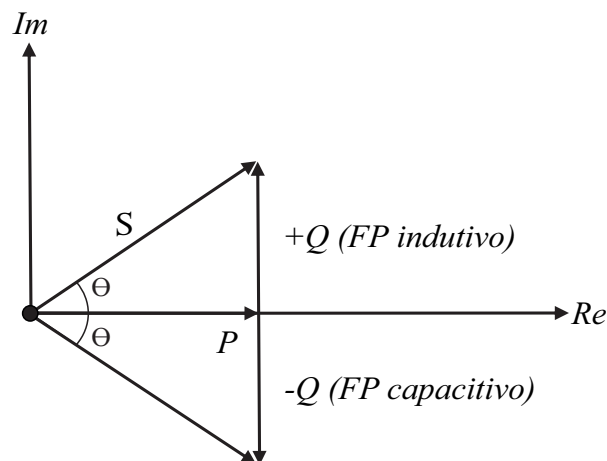
2.3.4 Fator de Potência

O fator de potência (FP) é um dos parâmetros necessários para avaliar a qualidade da energia elétrica. A partir do FP é possível tarifar e estimar a energia ativa e reativa presente no sistema elétrico, assim como minimizar as suas perdas (MATEUS, 2001) (ANICETO, 2016).

Segundo [Mateus \(2001\)](#), o fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento. Em [Aniceto \(2016\)](#), o FP indica a porcentagem da potência total fornecida (kVA) que é efetivamente transformada em potência ativa (kW).

O chamado triângulo de potências é utilizado para apresentar, graficamente, a relação entre as potências ativa, reativa e aparente. Na Figura 5, encontrasse o triângulo de potência mencionado anteriormente, que demonstra que ao termos potência reativa positiva, temos um fator de potência indutivo e ao termos potência reativa negativa, temos um fator de potência capacitivo.

Figura 5 – Triângulo de potências.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para um uso eficiente da energia elétrica, o valor do FP deve ser alto (próximo de 1) ([ANICETO, 2016](#)). Ao termos um baixo FP tem-se uma redução na potência ativa, dessa forma a circulação de potência reativa na rede é maior, causando perdas através dos condutores e uma diminuição na eficiência do sistema ([BELISKI; SCARABELOT; RAMPINELLI, 2018](#)).

2.4 Motores de Indução

O motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em mecânica. O motor de indução trifásico (MIT) é o mais utilizado pois apresenta vantagens em sua utilização como ([CASTRO, 2008](#)):

- Custo reduzido;
- Facilidade de transporte;

- Limpeza e simplicidade de comando;
- Grande versatilidade de adaptação às cargas;
- Melhor rendimento.

O MIT possui também algumas vantagens em relação ao motor de corrente contínua como menor custo, manutenção mais simples e consumo de energia nos processos de aceleração e frenagem é menor. Porém, como desvantagem, o MIT encontra-se dependente do fluxo e da tensão do estator, assim, a faixa de variação de velocidade do motor é limitada (CAMARGO, 2006).

A maior desvantagem desse equipamento está no momento da partida devido a necessidade de uma corrente inicial muito alta, comparada com a corrente nominal (BRUNA et al., 2012).

Este motor, também conhecido como motor assíncrono, possui apenas seu estator ligado à rede elétrica e seu rotor não possui nenhum tipo de alimentação. As correntes que circulam são oriundas da indução eletromagnética do estator (CASTRO, 2008).

A variação de tensão nas partidas de motores de indução trifásicos sempre foi um problema para indústrias, propriedades rurais e distribuidoras. Durante a partida, os motores solicitam da rede uma corrente de valor elevado, aproximadamente de seis a dez vezes a sua corrente nominal. Em consequência, ocorre uma oscilação na tensão superior aos limites estabelecidos pela norma, provocando distúrbios nos equipamentos, assim como má operação (FERREIRA, 2009).

Em virtude dos elevados valores de corrente de partida as concessionárias de energia estabelecem limites de potência para a partida a plena carga de grandes motores (ELECTRA, 2007). Dessa forma, é necessário a utilização de sistemas de partidas visando uma diminuição na corrente de partida.

A seguir serão apresentados os métodos de partida, sendo eles partida direta, partida com tensões reduzidas e partidas eletrônicas.

2.4.1 Partida Direta

Neste tipo de partida, o estator está ligado diretamente à rede, sendo o modo mais simples de partida. Porém, devido a corrente de partida ser muito grande em relação a corrente nominal, este tipo de partida é realizada apenas para motores de potência até 7,5CV para tensão de 220V e até 10CV para tensão de 380V (ELECTRA, 2007) (MASCHERONI; LICHTBLAY; GERARDI, 2007).

O motor recebe tensão nominal de serviço, e seu valor de conjugado (torque) e corrente de partida são plenos. Apesar disto, ocorrem problemas devido à queda de tensão acentuada (BRUNA et al., 2012).

2.4.2 Partida com Tensões Reduzidas

Visando reduzir a corrente de partida utilizam-se dispositivos que diminuem a tensão de alimentação do estator durante a partida. Dentre esses métodos tem-se a partida com chave estrela-triângulo e a partida com autotransformador ou também conhecido como chave compensadora (GONÇALVES, 2012).

2.4.2.1 Partida Estrela - Triângulo

Este tipo de partida só pode ser utilizado em motores que possuem ligação em dupla tensão, ou seja, 220/380V, 380/660V ou 440/760V, sendo a menor delas a tensão igual à da rede e seis terminais acessíveis. A partida do motor é realizada em estrela até que esse alcance uma velocidade próxima da velocidade de regime, cerca de 90%, passando então, para a ligação em triângulo. Devido a isto, o motor perde aproximadamente 33% do torque, porém a corrente de partida diminui na mesma proporção (BRUNA et al., 2012) (URTUBI, 2009) (MASCHERONI; LICHTBLAY; GERARDI, 2007).

Devido ao fato de o conjugado de partida ser baixo e constante, as chaves estrela-triângulo são mais adequadas em motores cuja partida se dá em vazio ou com uma carga muito leve (URTUBI, 2009).

2.4.2.2 Partida Compensadora

Esse método de partida atende melhor a potências de carga superiores àquelas atendidas pela partida estrela-triângulo. A chave compensadora é usada para reduzir a elevada corrente de partida de um MIT aliviando a rede elétrica de alimentação (CAMARGO, 2006). Para realizar o controle da corrente o ajuste é realizado a partir de derivações na saída do autotransformador, que possuem valores padrões de 50%, 65% e 80% da tensão nominal. Este autotransformador é ligado ao circuito do estator, inicialmente o primário é ligado em estrela e posteriormente a ligação estrela é aberta. Dessa forma, o ponto estrela fica acessível e, durante a partida, é curto circuitado. Quando o motor é conectado diretamente à rede esta ligação se desfaz. (URTUBI, 2009) (GONÇALVES, 2012).

Este modo de partida é utilizado para motores com potência superior a 10kW. No entanto, devido ao preço elevado do autotransformador, é necessário o emprego de equipamentos relativamente caros (ELECTRA, 2007).

2.4.3 Partidas Eletrônicas

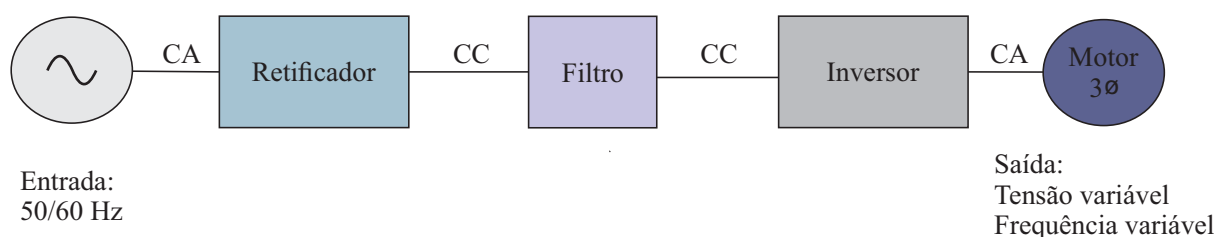
2.4.4 Partida com Inversor de Frequência

A partida com inversor de frequência, também conhecido como conversor de frequência, é um equipamento que é utilizado para variar tensão e frequência nos terminais do motor, mantendo constante o conjugado do motor e o fluxo magnético (FERREIRA, 2009) (BRUNA et al., 2012) e (PIRES, 2006) complementa que, para a obtenção da tensão e frequência desejadas é necessário três estágios:

- a) Ponte de diodos: retificação do sinal alternado – tensão e frequência constantes oriundo da rede de alimentação;
- b) Filtro ou Link DC: regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de banco de capacitores;
- c) Transistores IGBT: inversão da tensão contínua proveniente do link DC num sinal alternado, com tensão e frequência variáveis.

Conforme apresentado na Figura 6, pode-se observar que o inversor é composto por um módulo de retificação de corrente, um módulo inversor e o circuito intermediário. O controle eletrônico é integrado por um regulador de frequência que tem como valor de referência a tensão em corrente alternada da saída (FERREIRA, 2009).

Figura 6 – Esquema de funcionamento de um inversor de frequência.



Fonte: Pires (2006).

Segundo Ferreira (2009), a frequência do motor varia com a potência do motor, dessa forma ao diminuir a frequência, a velocidade diminui e em consequência, a potência solicitada pelo eixo do motor. Com a redução da tensão durante a partida, os valores de corrente tornam-se aproximadamente igual aos valores nominais.

2.4.4.1 Partida Suave Soft-Starter

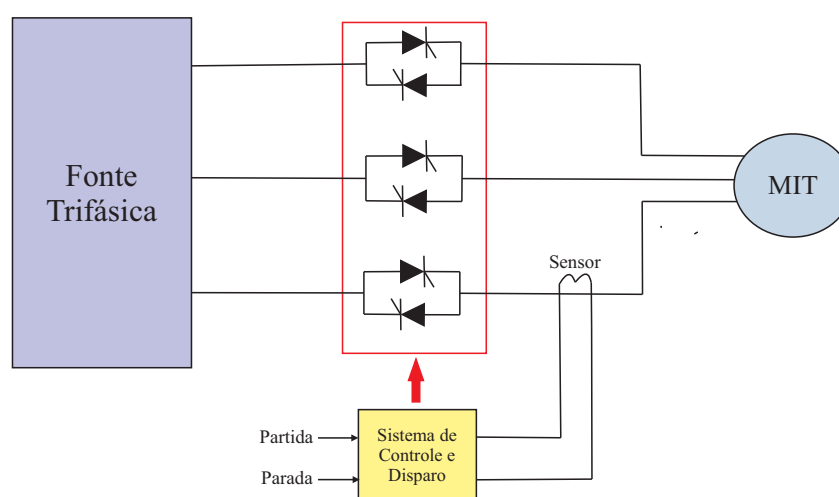
Para a obtenção das partidas suaves é utilizado as soft-starters, que são chaves capazes de controlar a rampa de tensão do motor, utilizando pontes de tiristores SCRs (Retificador Controlado de Silício), com a finalidade de controlar a tensão de partida do

motor através do controle do ângulo de disparo dos tiristores (URTUBI, 2009) (BRUNA et al., 2012).

Em consequência da partida suave, a corrente do motor é reduzida, mantendo a corrente de partida o mais próximo possível da corrente nominal, devido o torque do motor ser ajustado automaticamente em função da carga (BRUNA et al., 2012) (MASCHERONI; LICHTBLAY; GERARDI, 2007).

A Figura 7 apresenta um esquema de um soft-starter implementado com seis tiristores para acionar um MIT.

Figura 7 – Esquema de um Soft-Starter



Fonte: Urtubi (2009)

2.4.5 Vantagens e Desvantagens das Partidas de Motores de Indução

Na Tabela 3 são apresentados as vantagens e desvantagens das partidas dos motores de indução.

Tabela 3 – Vantagens e Desvantagens das Partidas de Motores de Indução.

Método de Partida	Vantagens	Desvantagens
Direta	Custo reduzido	Elevada corrente de partida
	Simple implementação	Sobredimensionamento de cabos e contadores
	Componentes ocupam pouco espaço	Interferência em equipamentos ligados na mesma instalação
	Alto torque de partida	Limitação do número de manobras/hora
Estrela-Triângulo	Custo reduzido	Tensão da rede deve coincidir com a tensão em triângulo do motor
	Componentes ocupam pouco espaço	Redução do torque de partida em 1/3
	Corrente de partida reduzida para 1/3	Motores devem ter dupla tensão nominal com seis terminais acessíveis
	Elevado número de manobras	O motor deve alcançar pelo menos 90% de sua velocidade de regime para que a corrente de pico não atinja valores elevados
Compensadora	Redução da corrente de partida	Custo mais elevado em comparação à estrela-triângulo
	Variação dos taps do autotransformador	Construção volumosa e pesada
	Corrente de partida é reduzida a 42%	Exige uso de três contadores e pesado autotransformador
	Variação gradativa das derivações para aplicar tensões adequadamente à capacidade do sistema	Provoca trancos no sistema no início da partida e na comutação
Inversor de Frequência	Instalação e operação simples	Custo inicial elevado
	Economia de espaço na instalação	Requer componentes de alta potência dentro do inversor
	Protegem o motor de forma eficaz	Necessidade de técnicas especializadas para manutenção
	Eliminação de elementos de partida pesada e complicada	Interferência eletromagnética
Suave (<i>Soft-Starter</i>)	Corrente de partida próxima da corrente nominal	Alto custo de implementação
	Número de partidas ilimitado	Geração de torques harmônicos na carga
	Torque de partida próximo do torque nominal	Geração de correntes harmônicas na rede
	Longa vida útil devido à inexistência de partes eletromecânicas móveis	Dependendo da potência do motor, há necessidade de ventilação forçada

Fonte: Adaptado pela autora.

2.5 Causas da Baixa Qualidade de Energia em Redes Rurais

Um dos fatores da baixa qualidade de energia são as sobretensões e subtensões que ocorrem na rede. No caso da sobretensão, a ocorrência se dá através de descargas atmosféricas ou oscilações de tensão na rede. Já as subtensões ocorrem devido as altas quedas de tensão na linha de distribuição. Os problemas tornam-se maiores aos consumidores rurais que residem em lugares onde a distância entre a subestação e as residências são grandes e vivem em locais de baixa densidade de consumidores com escassez de recursos (BAXTER et al., 2015).

Outro fator que causa uma baixa na qualidade de energia são os motores de indução, devido as flutuações de tensão que eles geram no meio industrial e rural (IVANOV, 2017). Além disso, por causa do valor elevado de corrente que o MIT necessita na partida, ocorrem

perturbações nos equipamentos instalados ao longo da rede de distribuição e falhas no sistema elétrico, como flutuações de tensão durante o acionamento ou durante o regime normal de operação (RODRIGUES, 2008).

Devido o porte dos motores encontrados nas propriedades rurais destinados à irrigação mecanizada serem muito elevados, em média de 150CV, oscilando de 75CV até 500CV em associações série ou paralelo de bombas situadas a grandes distâncias das SE's ou dos trafos de regulação de tensão, ocorrem fortes variações na tensão do sistema.

Outro problema relacionado aos motores é quando a carga necessita de torque variável, dessa forma, a potência reativa e a corrente no circuito variam e geram flutuações de tensão no sistema onde a carga está conectada.

3 Metodologia

A partir do estudo das diferentes partidas, a partida que melhor apresenta vantagens para a proposta desse trabalho é a partida utilizando inversor de frequência. De forma que as propriedades rurais que embasam este estudo já possuem os inversores de frequência e a fim de garantir uma boa eficiência na rede rural. Dessa forma, a topologia escolhida para a realização da estratégia do controle de tensão a partir do gerenciamento da partida dos motores foi a do conversor *back-to-back*.

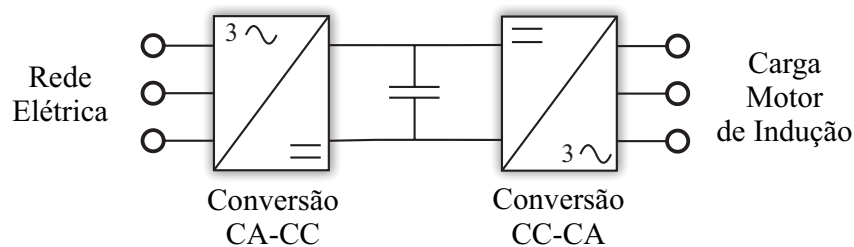
Neste capítulo será apresentado uma breve revisão sobre o conversor *back-to-back*, juntamente com o seu princípio de funcionamento. Por fim, será apresentado a estratégia de gerenciamento escolhida para este trabalho.

3.1 Conversor *Back-To-Back*

A topologia *back-to-back* (CA-CC-CA) consiste em dois conversores de tensão interligados através de um barramento CC possibilitando a operação nos quatro quadrantes aumentando a capacidade de desempenho desse conversor junto ao sistema elétrico (JUNIOR, 2014). Nesta topologia, um conversor funciona como retificador e outro como inversor. Devido a presença de um barramento CC existe a possibilidade de conexão de dois sistemas CA distintos (CRISPIM, 2018).

O conversor *back-to-back*, apresentado na Figura 8, que consiste em um retificador do lado da rede e um inversor do lado do motor de indução conectados através de um barramento CC. Além disso, o conversor apresenta filtros de conexão, entre o lado da rede e motor, normalmente sendo do tipo indutivo (JUNIOR, 2014).

Figura 8 – Topologia do conversor *Back-to-Back*.

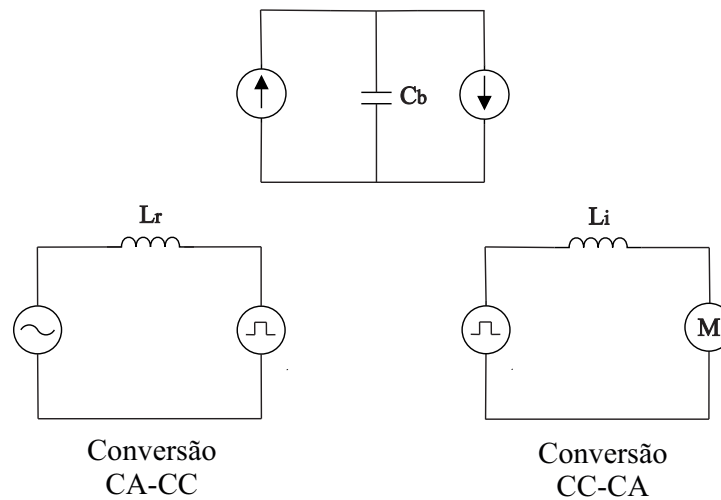


Fonte: Elaborado pela autora.

3.1.1 Princípio de Funcionamento

A Figura 9 apresenta modelagem do conversor. O controle do conversor no lado da rede é responsável pelo controle do barramento CC a partir da fonte de corrente. E o controle do conversor no lado do motor é responsável por garantir que o sistema mantenha o nível de potência reativa nos limites admitidos, injetando ou absorvendo potência conforme necessário.

Figura 9 – Modelagem do conversor *Back-to-Back*.



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com as especificações do inversor de frequência é possível definir um plano PQ, o qual define os limites de potência ativa e reativa que podem ser injetados/absorvidos pelo mesmo. Com base em [Lamb e Mirafzal \(2016\)](#) e [Lamb e Mirafzal \(2017\)](#) o plano PQ é dado pela Equação Equação 3.1:

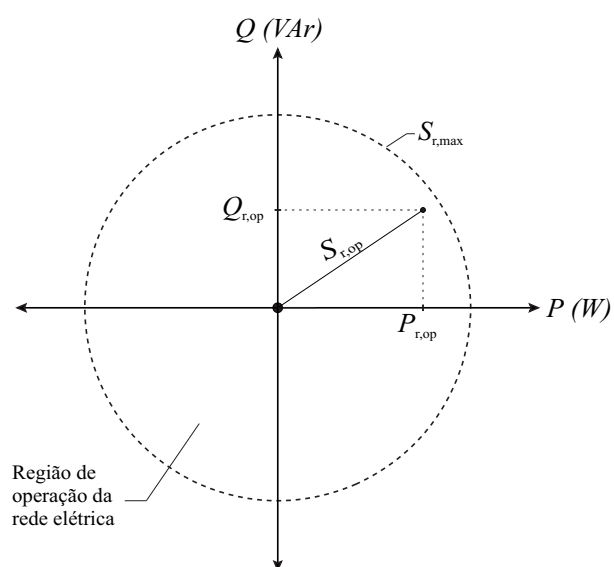
$$S_r = |S| e^{-j\theta_r} \quad (3.1)$$

Onde:

- \$S\$: potência aparente injetada na rede elétrica (VA);
- \$\theta_r\$: ângulo do fator de potência da rede.

A Figura 10 mostra o plano PQ.

Figura 10 – Plano PQ.

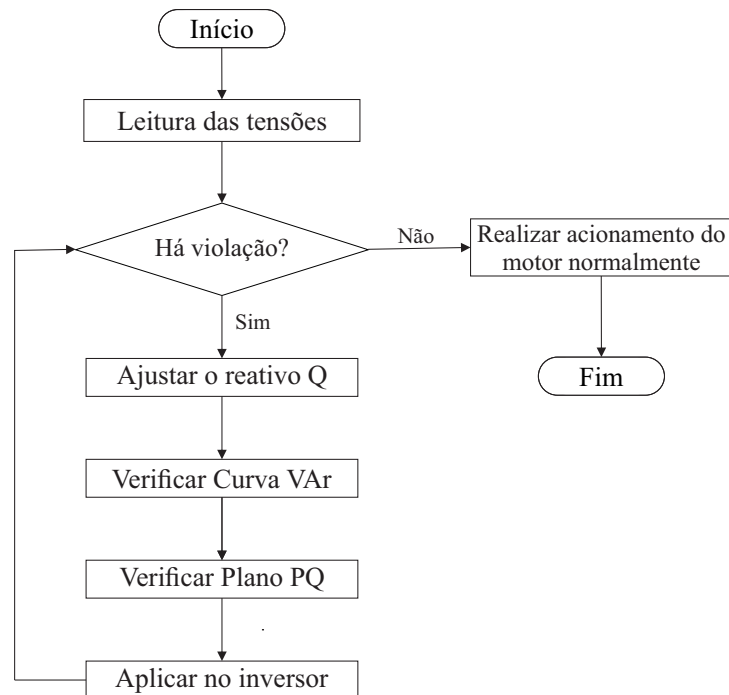


Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Estratégia de Gerenciamento

A estratégia escolhida para o gerenciamento da partida do motor para o controle de tensão escolhida está apresentada no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma da estratégia de gerenciamento.



Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente, será efetuada a leitura das tensões para verificar se há ou não violação em relação as tensões permitidas pelo PRODIST para garantir a qualidade de energia. Caso não ocorra violação, o acionamento do motor continua normalmente sem qualquer alteração. Caso contrário será necessário realizar o ajuste de potência reativa a partir das necessidades do sistema. Para o ajuste de potência reativa, utiliza-se a curva Volt/VAr. E, dessa forma, verifica-se os limites do inversor a partir do plano PQ com objetivo de averiguar se a potência aparente de operação é menor que a potência aparente máxima, para evitar violação dos limites permitidos.

3.2.1 Violação de Tensão

A partir do modelo apresentado anteriormente, será realizado a verificação da violação de tensão a partir da Equação 3.2:

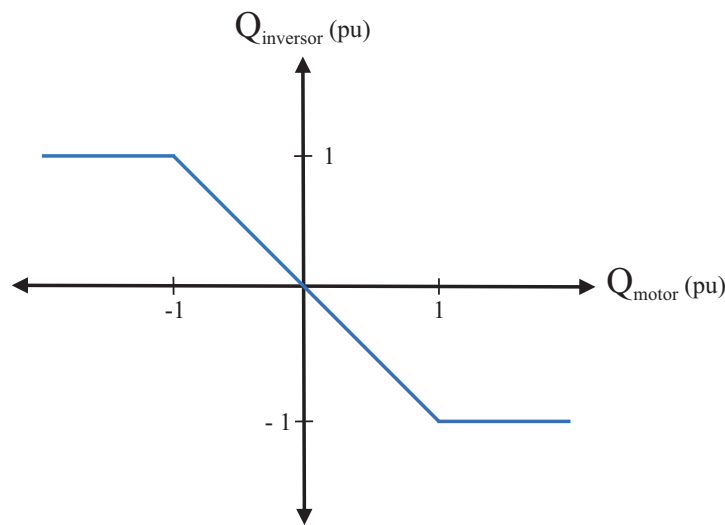
$$\Delta V = V_{REF} - V_K \quad (3.2)$$

Onde a tensão de referência V_{ref} é a tensão admitida pelo PRODIST para garantir a qualidade de energia, que neste caso, seria 0,93 p.u. a 1,05 p.u.. E V_k é a tensão da barra a ser analisada.

3.2.2 Ajuste de Potência Reativa

Para a realização do ajuste de potência reativa, a fim de realizar o controle da tensão será, utilizado a curva VAR apresentada na Figura 12, a curva que determina o valor da absorção/injeção de potência reativa do inversor de frequência, a partir do nível de potência reativa do motor.

Figura 12 – Curva VAR.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esta curva será utilizada para manter a tensão no terminal do motor dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST. Assim, para realizar a injeção de potência será utilizado o comportamento da potência reativa do motor de indução invertendo seus valores para um comportamento capacitivo, de forma a manter a tensão dentro dos limites adequados.

3.3 Software MATLAB/Simulink[®]

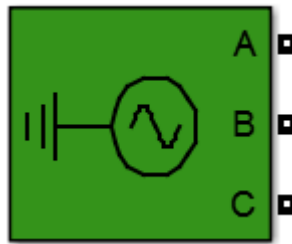
Primeiramente para a melhor compreensão do sistema utilizado para a proposta de estratégia de gerenciamento PQ, é necessário entender para que servem os blocos utilizados no software MATLAB/Simulink[®]. Desta forma, serão apresentados abaixo os principais blocos utilizados e uma breve explicação de para que servem e como foram utilizados.

a) Fonte Trifásica (Three-Phase Source)

A Figura 13 apresenta o bloco da fonte trifásica.

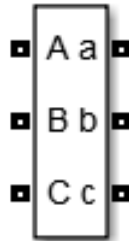
b) Medição Tensão-Corrente Trifásica (Three-Phase VI Measurement)

Figura 13 – Fonte trifásica.



A Figura 14 apresenta o bloco de medição tensão-corrente trifásica.

Figura 14 – Medição tensão-corrente trifásica.



c) Parâmetros de Distribuição da Linha (Distributed Parameters Line)

Os parâmetros da linha de transmissão do sistema foram obtidos a partir do sistema 13 barras da IEEE. A Figura 15 apresenta o bloco parâmetros de distribuição da linha.

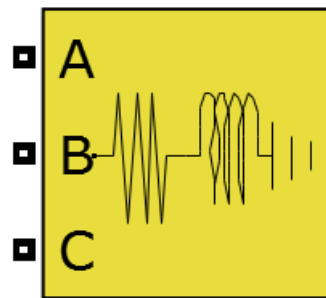
Figura 15 – Parâmetros de distribuição da linha.



d) Carga RLC Trifásica (Three-Phase Series RLC Load)

Serão utilizadas cargas com potência PQ variável. A Figura 16 apresenta o bloco da carga RLC trifásica.

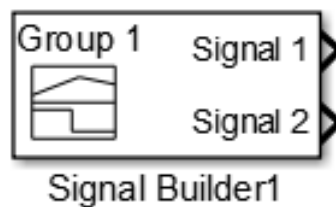
Figura 16 – Carga RLC trifásica.



e) Gerador de Sinais (Signal Builder)

Cria e gera sinais a partir de valores em determinado período de tempo. Neste trabalho, serão fornecidos dados de uma curva de carga onde tem-se valores de potência ativa (P) e potência reativa (Q) de um levante na Fronteira Oeste do RS em um período de 24 horas, com intervalos em minutos, totalizando 1440 minutos. Estes sinais são fornecidos para a carga dinâmica. A Figura 17 apresenta o bloco do gerador de sinais.

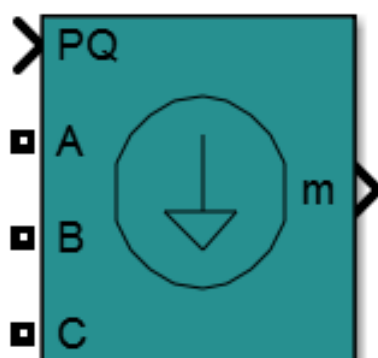
Figura 17 – Gerador de sinais.



f) Carga Dinâmica Trifásica (Three-Phase Dynamic Load)

Este bloco implementa uma carga dinâmica trifásica, sistema cuja saída muda ao longo do tempo, onde a potência ativa e reativa variam em função da tensão em sequência positiva. Neste trabalho, este bloco funciona como o conversor back-to-back utilizado como estratégia do gerenciamento PQ. A Figura 18 apresenta o bloco da carga dinâmica trifásica.

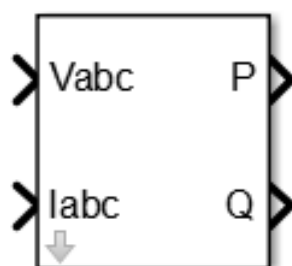
Figura 18 – Carga dinâmica trifásica.



g) Medidor Potência Ativa e Reativa (Power (3ph, phasor))

A partir dos valores de tensão e corrente nas barras e nas cargas são obtidas as potências ativas e reativas do sistema. A Figura 19 apresenta o bloco do medidor de potência ativa e reativa.

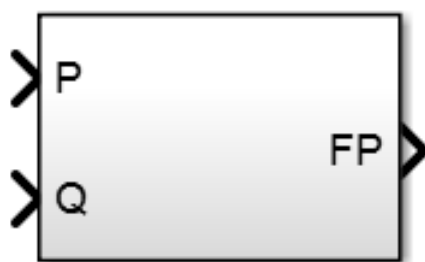
Figura 19 – Medidor potência ativa e reativa.



h) Medidor de Fator de Potência (Power Factor)

A partir de blocos matemáticos e dos valores de potência ativa e reativa obtidos a partir do bloco mostrado anteriormente é calculado o fator de potência das barras e cargas do sistema. A Figura 20 apresenta o bloco de medidor de fator de potência.

Figura 20 – Medidor de fator de potência.



4 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos das simulações realizadas para demonstrar a estratégia de gerenciamento proposta. No decorrer do capítulo serão apresentados os cenários utilizados e os resultados dos testes realizados com os dois sistemas radiais.

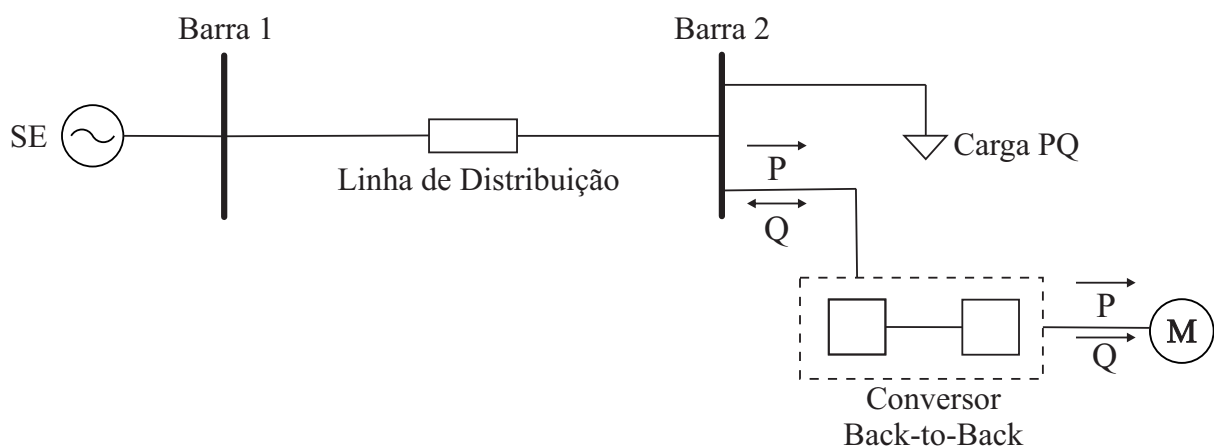
4.1 Cenário de Testes

Para apresentar melhor o funcionamento da rede junto ao conversor back-to-back, foram realizados testes com dois sistemas radiais. O primeiro sistema consiste em um sistema genérico com apenas duas barras e uma carga PQ conectada, o segundo o sistema de 13 barras da IEEE. Todas as simulações foram realizadas para um período de 24 horas, com intervalo em minutos, totalizando 1440 minutos, utilizando o software MATLAB/Simulink®.

4.1.1 Sistema Genérico

A partir do sistema genérico mostrado na Figura 21 serão realizados os testes da proposta do trabalho.

Figura 21 – Sistema Genérico para testes.



Fonte: Elaborado pela autora.

É composto por uma tensão na subestação de 23 kV (média tensão) e uma carga variável de 1 MW de potência ativa e 0,5 MVar de potência reativa conectadas em

220/380 V. No ponto de conexão dos motores a rede fornece potência ativa e reativa para o funcionamento do motor, e o conversor será responsável pelo controle de potência reativa, podendo assim absorver/injetar reativos se necessário. A linha de distribuição possui 40km de comprimento utilizando um cabo 4/0 CAA. Os parâmetros da linha de transmissão foram obtidos a partir de dados do sistema de 13 barras da IEEE. Estes parâmetros são desequilibrados entre as fases, encontrados nas Equações 4.1, 4.2 e 4.3, onde apresenta os parâmetros de resistência e reatância indutiva e capacitiva utilizados.

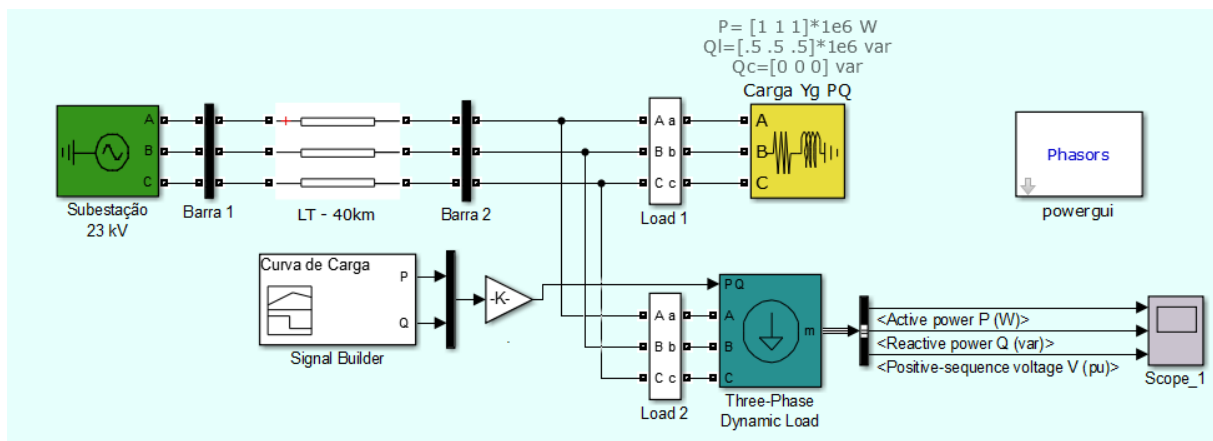
$$R_{601} = \begin{bmatrix} 0.1338 & 0.0602 & 0.0610 \\ 0.0602 & 0.1303 & 0.0593 \\ 0.0610 & 0.0593 & 0.1318 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$L_{601} = \begin{bmatrix} 0.0018 & 0.0008 & 0.0007 \\ 0.0008 & 0.0017 & 0.0006 \\ 0.0007 & 0.0006 & 0.0017 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$C_{601} = 1x10^{-7} \begin{bmatrix} 0.1038 & -0.0329 & -0.0208 \\ -0.0329 & 0.0982 & -0.0122 \\ 0.0208 & -0.0122 & 0.0929 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Para realização da simulação no software foi implementado o sistema em blocos apresentado na Figura 22. Na barra 2 foi conectada a carga PQ e o conversor back-to-back juntamente com o motor de indução para a estratégia de gerenciamento PQ.

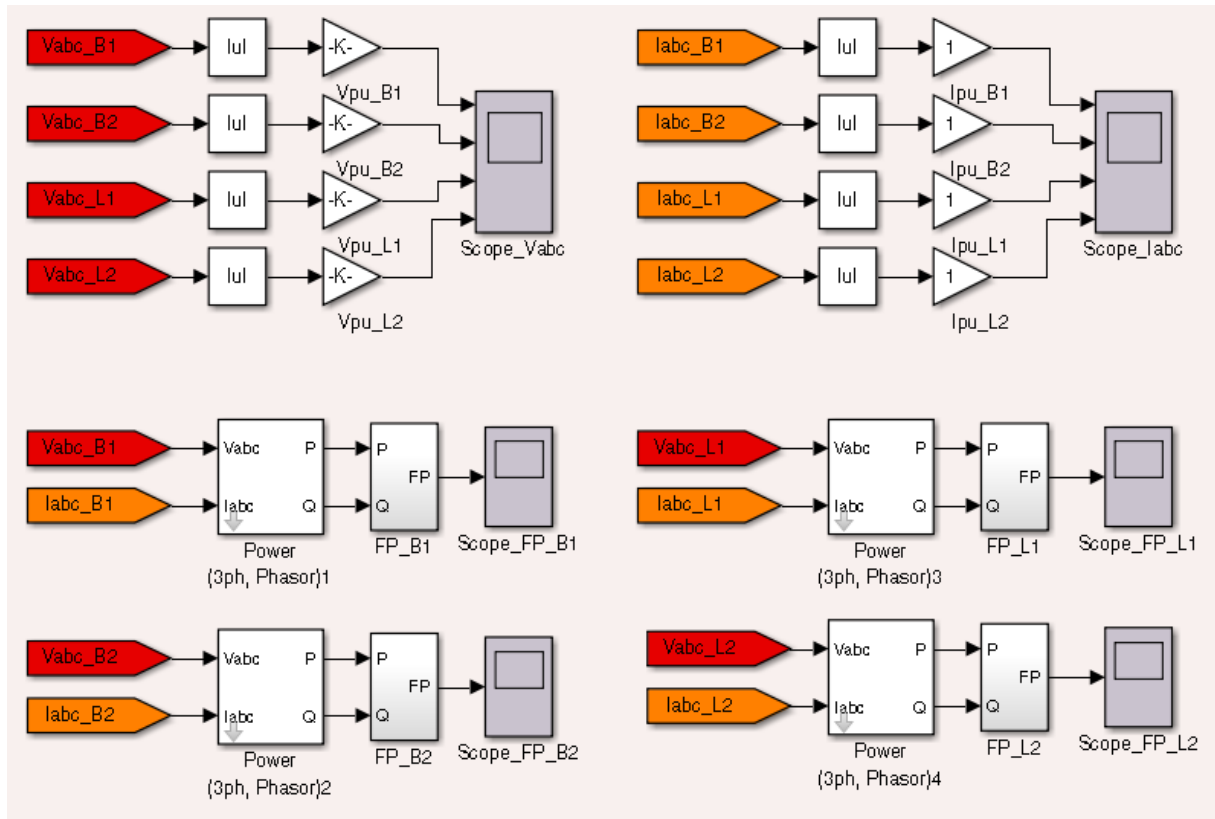
Figura 22 – Sistema Genérico Elaborado no Software MATLAB/Simulink®.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para realizar as medições necessárias para verificação dos resultados dos testes a serem realizados foram utilizados os blocos de medição como apresentado na Figura 23.

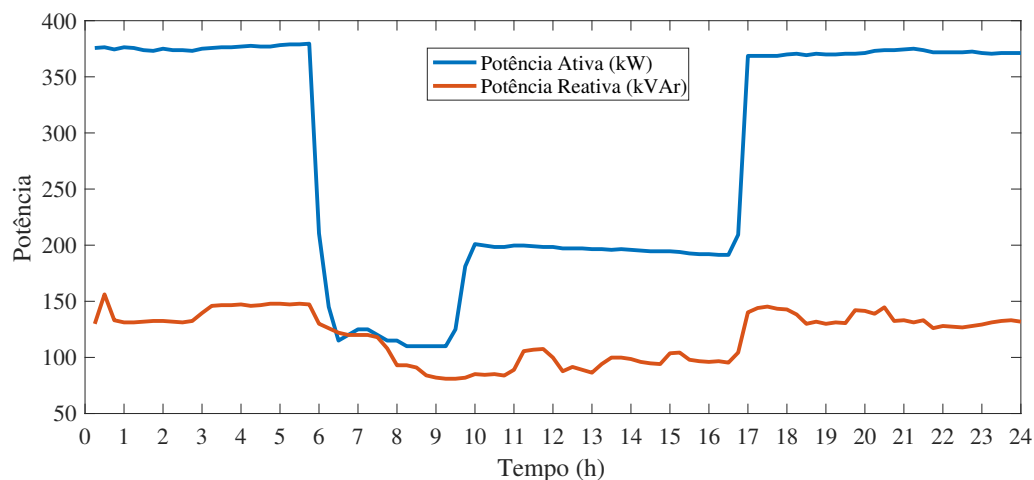
Figura 23 – Medição das Variáveis no Software MATLAB/Simulink®.



Fonte: Elaborado pela autora.

A curva de carga que é enviada para a entrada PQ do conversor back-to-back está apresentada na Figura 24. Os testes a serem realizados tem o intuito de melhorar a tensão nos pontos onde ocorrem violações, evidenciando a importância da utilização da curva de carga para assim ser possível visualizar o comportamento do sistema a ser analisado.

Figura 24 – Curva de Carga de uma propriedade da Fronteira Oeste do RS.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esta curva apresenta o comportamento da potência ativa e reativa no decorrer de 24 horas de uma propriedade rural da Fronteira Oeste do RS que utiliza motores de indução destinados à irrigação mecanizada. É possível notar que durante o período de 1h a 6h e entre 17h e 24h o motor está operando à plena carga, sendo assim uma elevada potência reativa indutiva sendo solicitada da rede. Por isso é o período em que a tensão é mais afetada, de forma a ocasionar flutuações de tensão, distorção das harmônicas e variação de frequência.

Para este sistema genérico serão realizados três testes:

- Teste 1 - Potência ativa e potência reativa oriundas da curva de carga;
- Teste 2 - Potência reativa do sistema igual a zero;
- Teste 3 - Potência reativa sendo injetada no sistema.

Nos testes realizados serão apresentadas as tensões nas barras e nas cargas, assim como o fator de potência, para demonstrar se houve melhora no sistema ao injetar potência reativa capacitiva. Os limites adequados de tensão conforme o Módulo 8 do PRODIST estão apresentados em vermelho nas figuras, onde 0.93 p.u. é o limite inferior e 1.05 p.u. é o limite superior. Assim como no fator de potência, onde 0.92 p.u. capacitivo é o limite inferior e 0.92 p.u. indutivo é o limite superior.

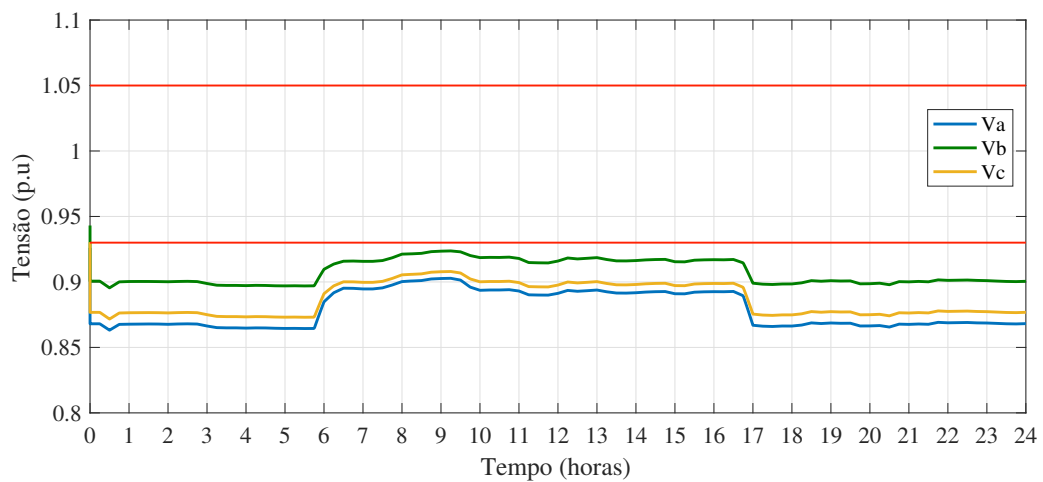
4.1.2 Teste 1

Este teste serve para apresentar como a rede se comporta com o acionamento dos motores já existentes no sistema e sem realizar mudanças na potência reativa.

4.1.2.1 Tensão do Sistema

A tensão na Barra 2 é apresentada na Figura 25, devido aos motores interligados nesse sistema há uma grande injeção de potência reativa indutiva na rede, afetando assim as tensões que se encontram abaixo dos limites admissíveis pela norma, encontrando-se na faixa de tensão precária. Este é o problema encontrado nas propriedades rurais da Fronteira Oeste, onde ocorrem as flutuações de tensão afetando o funcionamento dos equipamentos. As tensões na Carga 1 e Carga 2 são iguais a apresentada anteriormente devido estarem conectadas no mesmo ponto.

Figura 25 – Tensão na Barra 2.

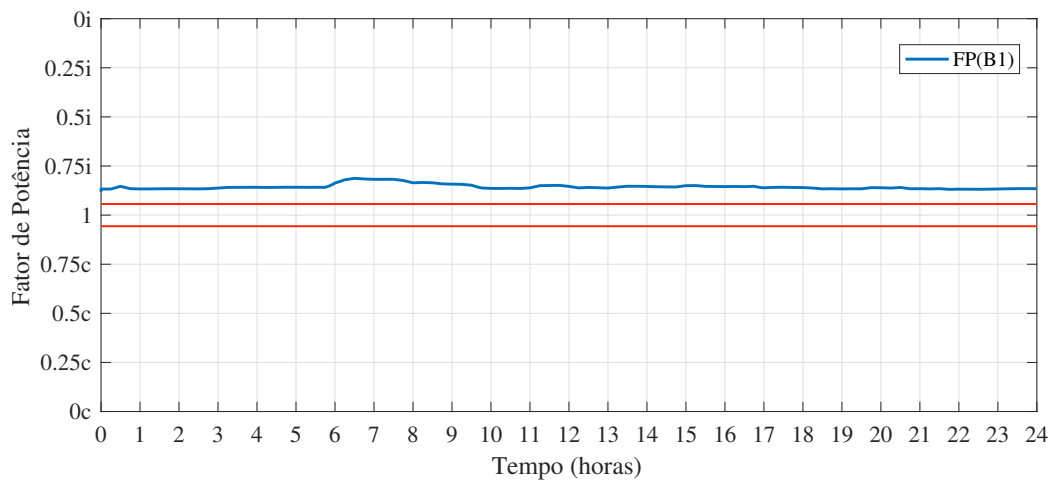


Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.2.2 Fator de Potência do Sistema

Analisando a Figura 26 é possível observar que o sistema está apenas absorvendo a potência reativa, de forma a apresentar assim um FP indutivo. Neste caso, além de afetar o funcionamento do sistema elétrico, os limites admissíveis pela norma estão fora do adequado.

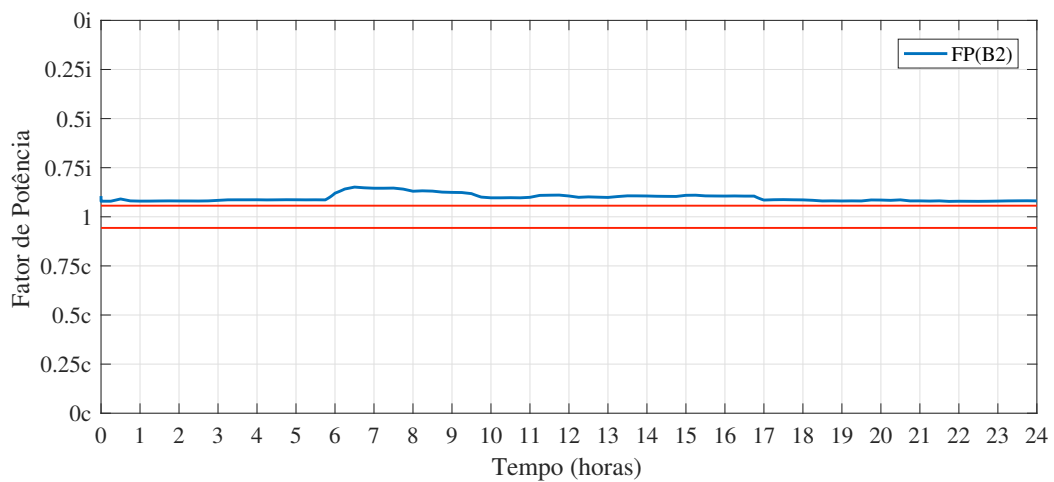
Figura 26 – Fator de Potência na Barra 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 27, o FP apresenta resultados semelhantes ao visto anteriormente, porém com um FP mais próximo dos valores admissíveis.

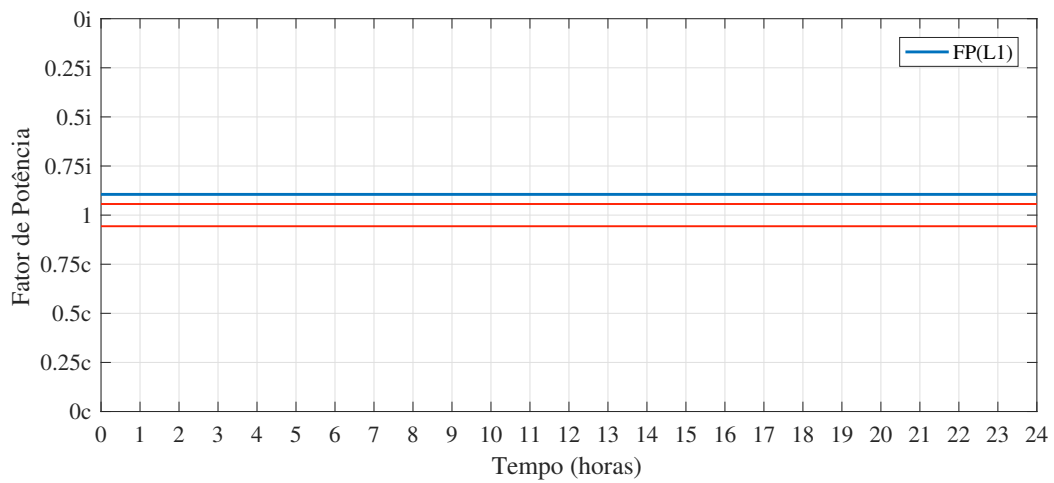
Figura 27 – Fator de Potência na Barra 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 28, o FP se mantém constante em 0.8944 indutivo devido este ponto estar observando o funcionamento da carga PQ conectada na Barra 2.

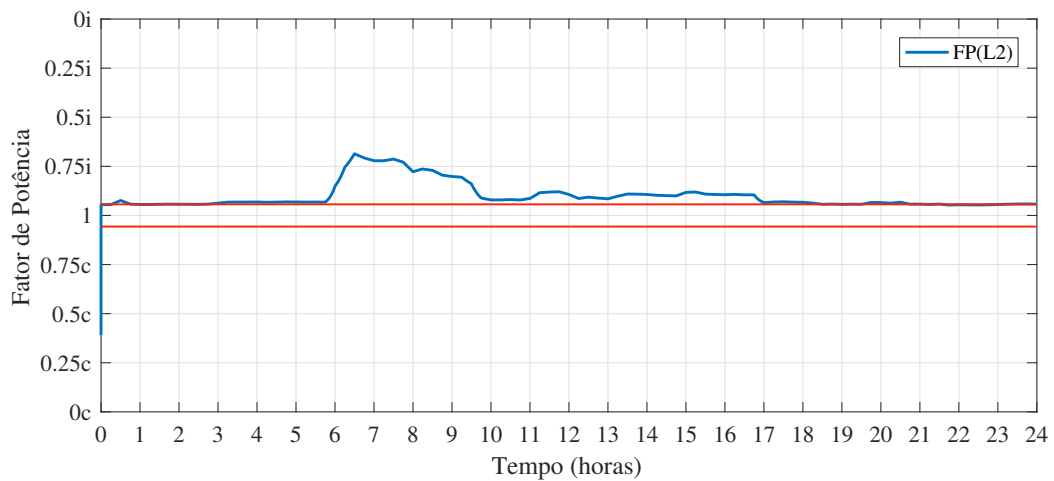
Figura 28 – Fator de Potência na Carga 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 29, o FP apresenta uma grande variação em certo ponto devido a queda brusca das potência ativa e reativa, tornando o FP com valor aproximado de 0.68 indutivo. Durante à plena carga do motor, conforme a curva de carga apresentada, o FP nestes pontos apresenta um valor no limite superior da norma.

Figura 29 – Fator de Potência na Carga 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

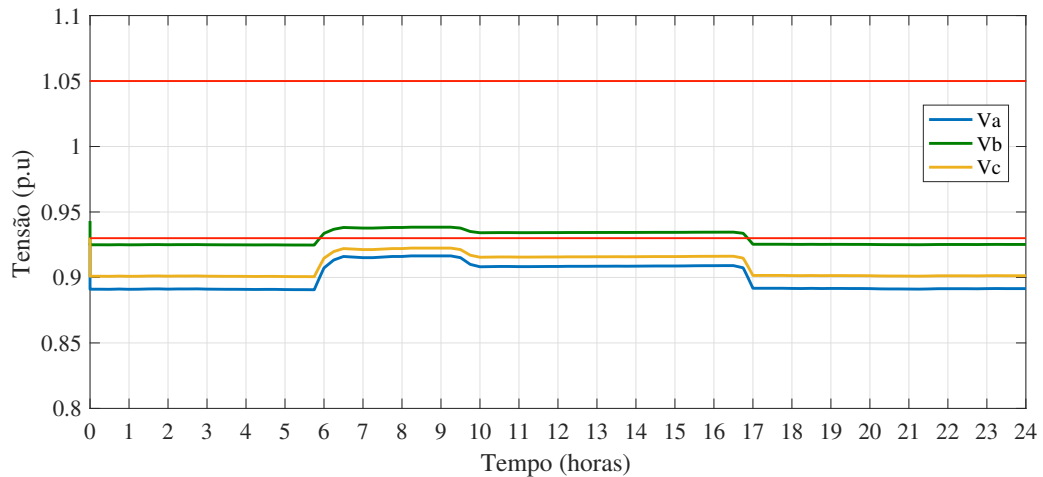
4.1.3 Teste 2

O segundo teste consiste no sistema com potência reativa oriunda do motor aproximadamente igual a zero. Este teste serve para apresentar como as tensões se comportam sem a influência de reativos.

4.1.3.1 Tensão do Sistema

A tensão na Barra 2 é apresentada na Figura 30, onde é possível observar que há uma elevação nos níveis das tensões devido a redução da potência reativa indutiva do motor. As tensões na Carga 1 e Carga 2 são iguais devido estarem conectadas no mesmo ponto.

Figura 30 – Tensão na Barra 2.

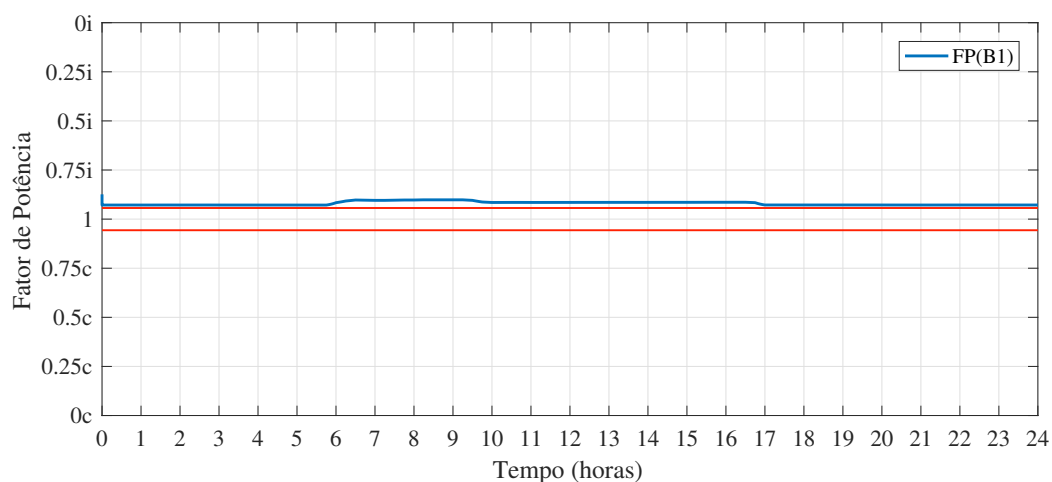


Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.3.2 Fator de Potência do Sistema

Analisando a Figura 31, o FP da Barra 1 encontra-se absorvendo a potência reativa indutiva, porém diferentemente do FP do Teste 1, houve uma redução na grandeza desse valor devido o menor valor de reativos que existem no sistema. Porém os valores ainda encontram-se fora dos limites admissíveis pela norma.

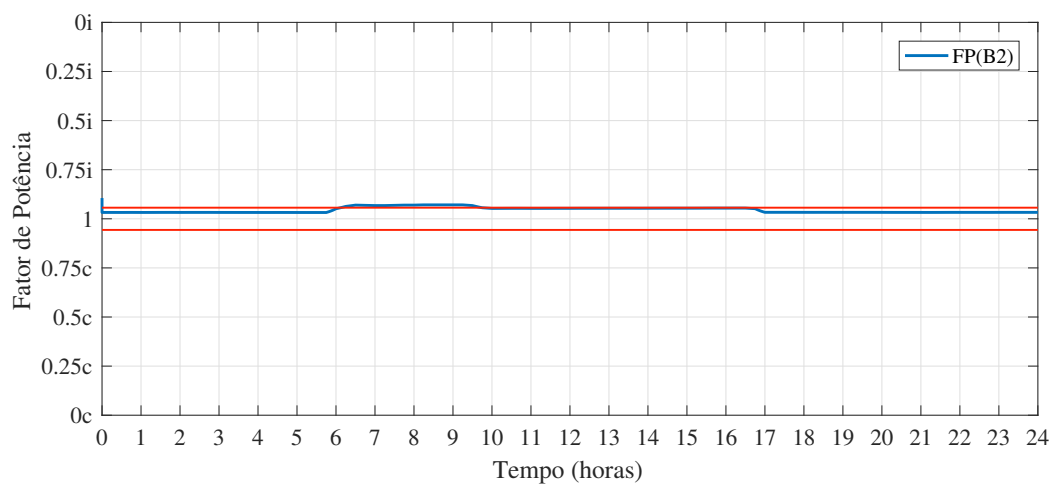
Figura 31 – Fator de Potência na Barra 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 32, o FP da Barra 2 encontra-se dentro dos limites da norma durante os momentos onde o motor está à plena carga.

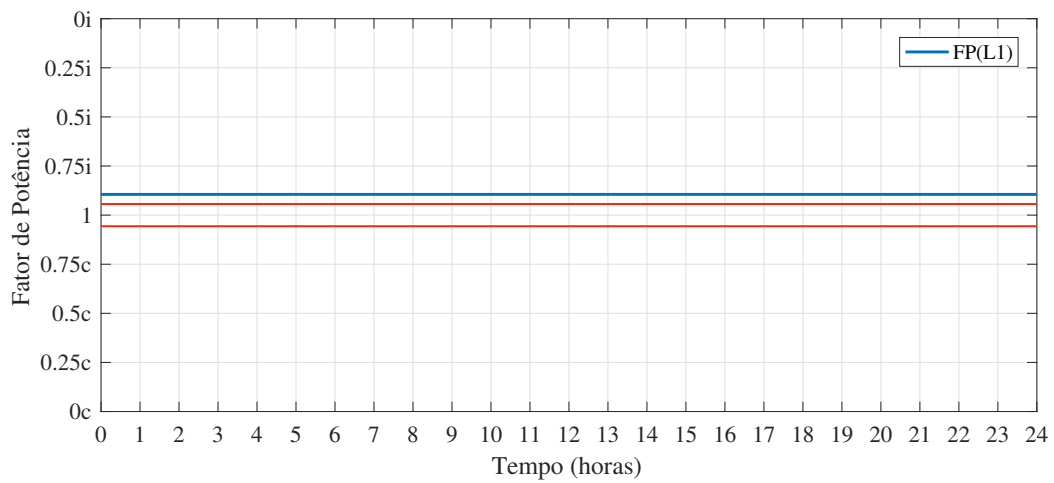
Figura 32 – Fator de Potência na Barra 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 33, o FP se mantém constante em 0.8944 indutivo devido este ponto estar observando o funcionamento da carga PQ conectada na Barra 2.

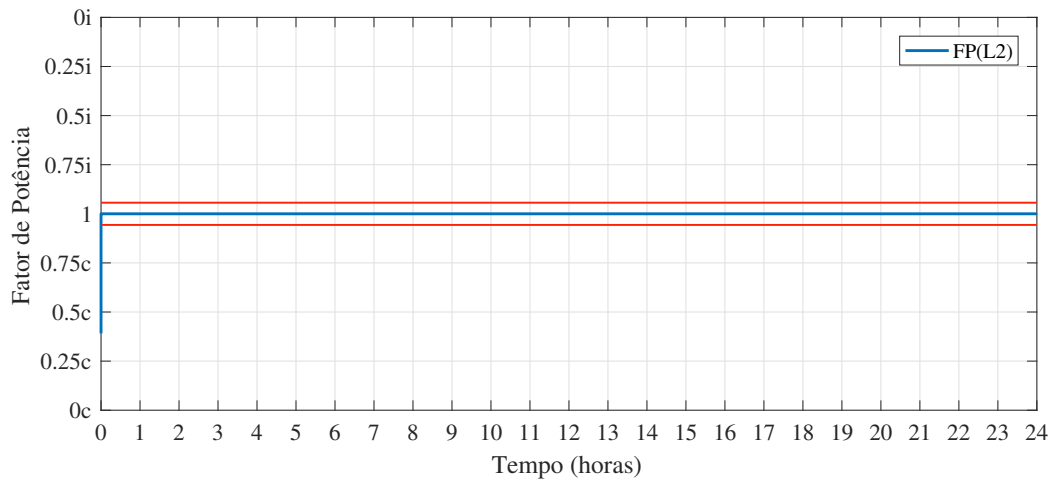
Figura 33 – Fator de Potência na Carga 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 34, o FP possui valor unitário variando entre capacitivo e indutivo devido a variação da potência ativa no sistema.

Figura 34 – Fator de Potência na Carga 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

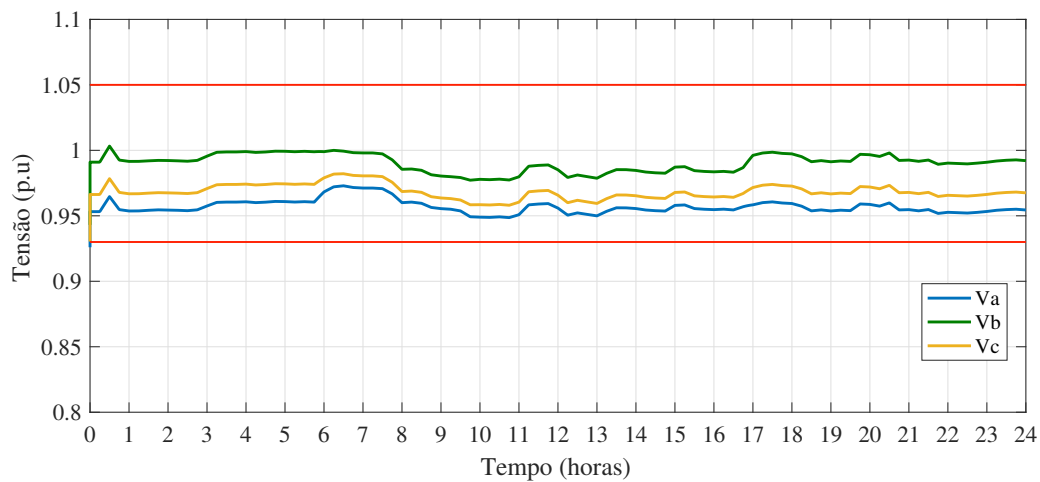
4.1.4 Teste 3

Para o terceiro teste foi realizado a injeção de potência reativa no sistema, com objetivo de manter os níveis de tensão dentro dos padrões adequados. Este teste serve para apresentar a estratégia de gerenciamento proposta e verificar se os resultados obtidos são favoráveis ao que foi proposto.

4.1.4.1 Tensão do Sistema

A Figura 35 apresenta a tensão na Barra 2, onde foi injetado potência reativa de forma a compensar a energia consumida pelas cargas indutivas conectadas ao sistema, no caso o motor de indução. É possível concluir que as tensões encontram-se nos limites admissíveis da norma, demonstrando que ao injetar reativos de forma controlada os distúrbios dessa grandeza são minimizados.

Figura 35 – Tensão na Barra 2.

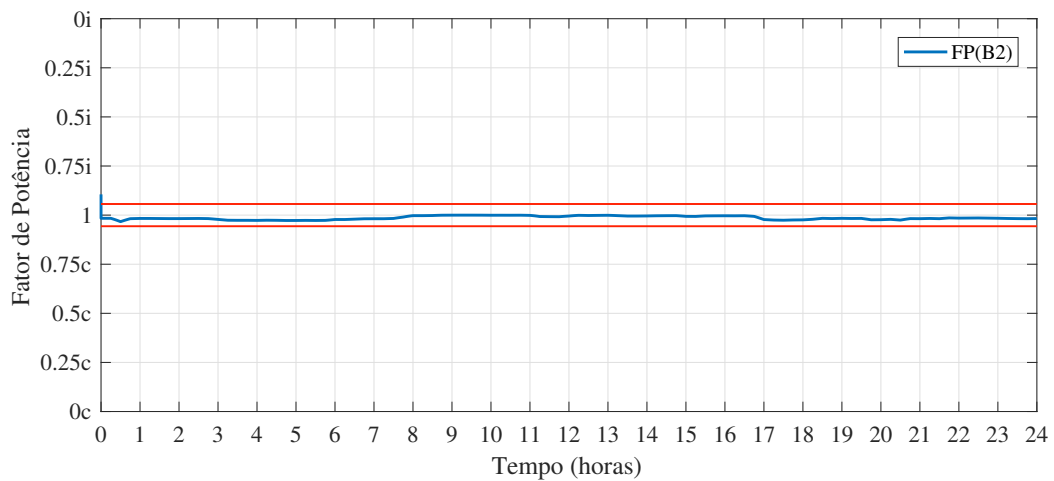


Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.4.2 Fator de Potência do Sistema

A Figura 36 apresenta o FP da Barra 2, onde é possível observar que houve uma melhora nos níveis dessa grandeza ao realizar a injeção de energia reativa, mantendo o FP nos limites admissíveis da norma.

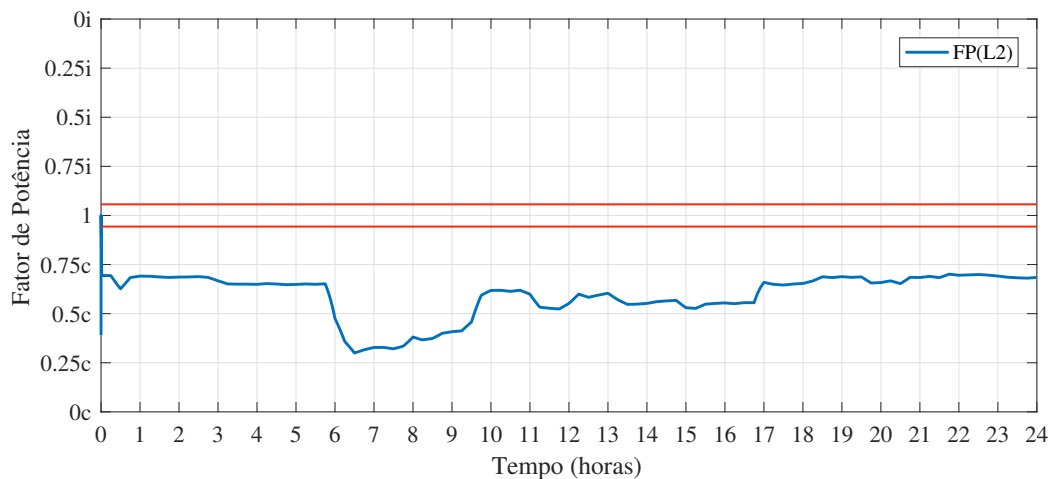
Figura 36 – Fator de Potência na Barra 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar da melhora da tensão ao injetar energia reativa, houve também alterações indesejáveis no comportamento da carga, o que ocasionou o comprometimento do FP da carga. Na Figura 47 é possível observar este fato, o que já era esperado devido a injeção de reativos o FP tornou-se capacitivo e fora dos limites admissíveis.

Figura 37 – Fator de Potência na Carga 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.5 Sistema de 13 Barras IEEE

Para o segundo sistema foi utilizado o sistema teste 13 barras do IEEE, caracterizado por uma rede pequena e que opera com uma tensão de 4,16 kV. Este sistema possui alto carregamento nas cargas, e um grande desequilíbrio entre as fases. Segundo [Costa \(2016\)](#),

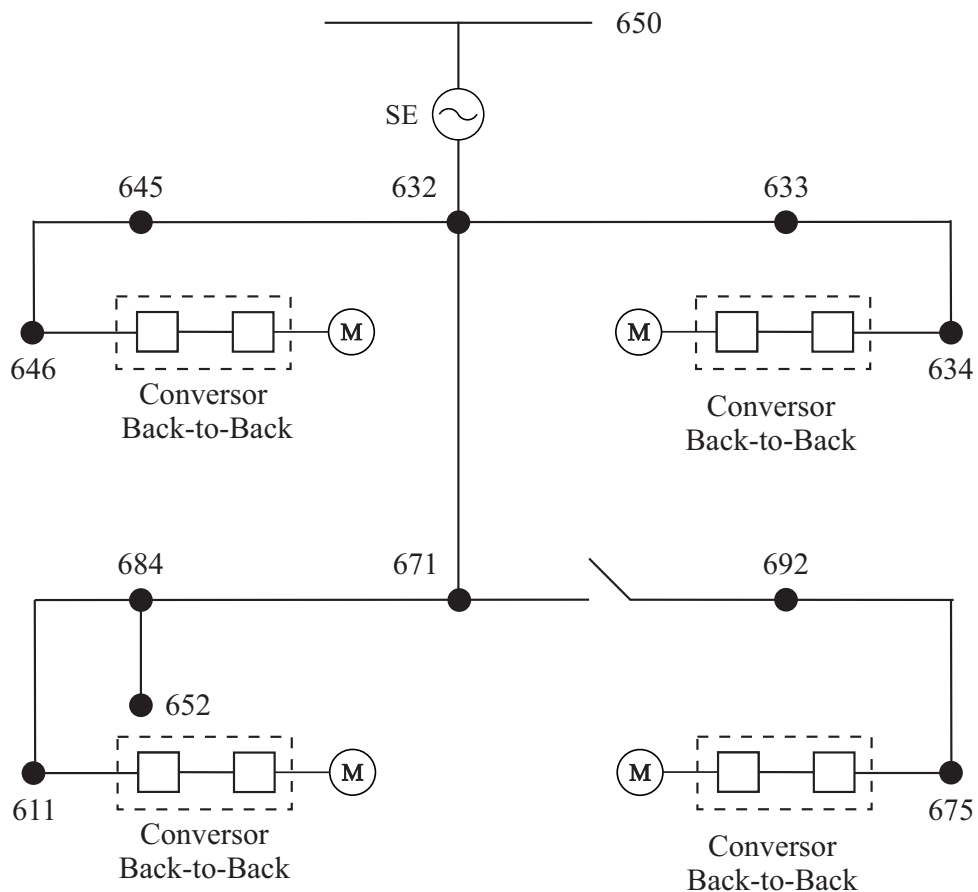
este desequilíbrio ocorre devido a assimetria das linhas de distribuição e pela diferença de potências conectadas em cada fase das cargas.

Esta rede conta com linhas de distribuição aéreas e subterrâneas, com ramais monofásicos e trifásicos, um regulador de tensão, dois bancos de capacitores, um transformador de linha, e suas cargas são desequilibradas (PAULA, 2016).

De forma a realizar os testes o sistema foi modificado para apenas ramais trifásicos e foram adicionados o conversor back-to-back juntamente com a conexão de 6 motores em quatro pontos do sistema. Todas as cargas foram modificadas para serem equilibradas. No modelo utilizado no software MATLAB/Simulink[®] o regulador de tensão entre as barras 650 e 632 não é incluído. Os pontos escolhidos foram dispostos nas barras: Barra 646, Barra 634, Barra 611 e Barra 675.

Na Figura 38 está apresentado o sistema 13 barras IEEE modificado.

Figura 38 – Sistema 13 Barras IEEE Modificado.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 4 apresenta a configuração dos cabos e fases utilizadas no sistema.

Tabela 4 – Dados das configurações das linhas.

Arranjo	Sequência de Fase	Fase ACSR	Neutro ACSR	Tipo
601	B A C N	556,500 26/7	4/0 6/1	Aéreo
602	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1	Aéreo
606	A B C N	250,000 AA, CN	None	Subterrâneo

Fonte: Adaptado de [Kersting \(2001\)](#).

A Tabela 5 apresenta as configuração utilizadas para cada barra do sistema e seu comprimento de linha de distribuição.

Tabela 5 – Dados das linhas.

Barra A	Barra B	Comprimento (km)	Config.
632	645	0.1524	602
632	633	0.1524	602
633	634	0	XFM-1
645	646	0.9144	602
684	652	0.2438	606
632	671	0.6096	601
671	684	0.9144	606
671	680	0.3048	601
671	692	0	Chave
684	611	0.9144	606
692	675	0.1524	606

Fonte: Adaptado de [Kersting \(2001\)](#).

A conexão das cargas foram alteradas para estrela ou delta, e o modelo foi alterado para PQ constante e as fases das barras equilibradas. A Tabela 6 apresenta os dados das cargas do sistema.

Tabela 6 – Dados das cargas.

Barra	Carga		Fase A		Fase B		Fase C	
	Conexão	Modelo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
611	Estrela	PQ	170	80	170	80	170	80
634	Estrela	PQ	120	190	120	190	120	190
645	Estrela	PQ	170	125	170	125	170	125
646	Estrela	PQ	230	132	230	132	230	132
652	Estrela	PQ	128	86	128	86	128	86
671	Delta	PQ	385	220	385	220	385	220
675	Estrela	PQ	68	60	68	60	68	60
692	Delta	PQ	170	150	170	150	170	150
632-671	Estrela	PQ	66	38	66	38	66	38

Fonte: Adaptado de [Kersting \(2001\)](#).

O sistema 13 barras possui dois bancos de capacitores trifásicos, sendo apresentado na Tabela 7 as características dos bancos de capacitores.

Tabela 7 – Dados dos banco de capacitores.

Barra	Fase A	Fase B	Fase C
	kVAr	kVAr	kVAr
675	200	200	200
611	100	100	100

Fonte: Adaptado de [Kersting \(2001\)](#).

Os parâmetros das linhas de distribuição são desequilibrados e são apresentados nas Equações 4.1, 4.2 e 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, onde apresenta os parâmetros de resistência e reatância indutiva e capacitiva utilizados.

$$R_{602} = \begin{bmatrix} 0.4676 & 0.0982 & 0.0969 \\ 0.0982 & 0.4645 & 0.0954 \\ 0.0969 & 0.0954 & 0.4621 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$L_{602} = \begin{bmatrix} 0.0019 & 0.0007 & 0.0008 \\ 0.0007 & 0.0020 & 0.0006 \\ 0.0008 & 0.0006 & 0.0020 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$C_{602} = \begin{bmatrix} 0.9393 & -0.1783 & -0.2786 \\ -0.1783 & 0.8537 & -0.1086 \\ -0.2786 & -0.1086 & 0.8941 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$R_{606} = \begin{bmatrix} 0.3082 & 0.1232 & 0.1100 \\ 0.1232 & 0.3047 & 0.1232 \\ 0.1100 & 0.1232 & 0.3082 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$L_{606} = 1x10^{-3} \begin{bmatrix} 0.7356 & 0.0541 & 0.0236 \\ 0.0541 & 0.6661 & 0.0541 \\ 0.0236 & 0.0541 & 0.7356 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

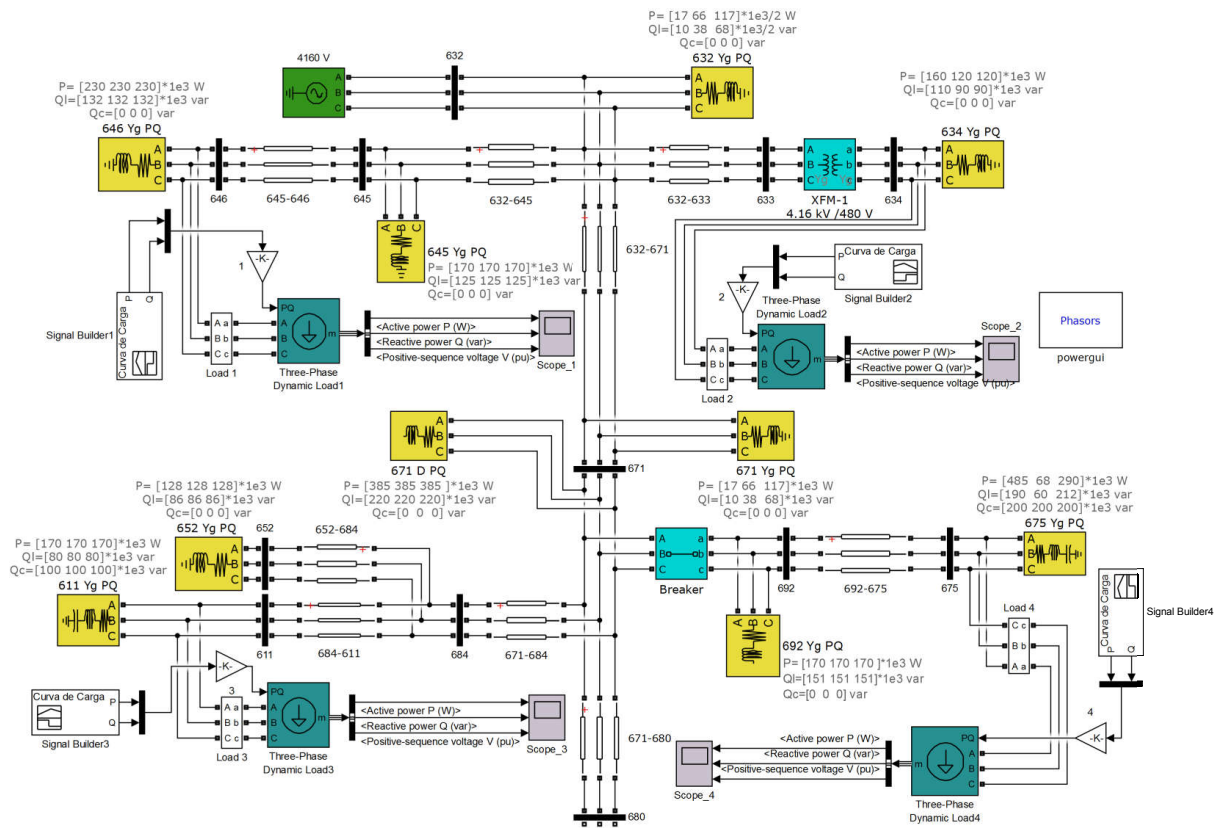
$$C_{606} = 1x10^{-6} \begin{bmatrix} 0.1597 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.1597 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.1597 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Para o sistema 13 barras serão realizados três testes, empregando a mesma curva de carga utilizada no sistema genérico. Para realização da injeção de potência reativa foi utilizada a curva VAR juntamente com o plano PQ apresentados anteriormente. Os motores conectados as barras não possuem compensação local.

- Teste 1 - Todos os motores conectados com Potência Ativa e Potência Reativa;
- Teste 2 - Todos os motores conectados apenas com Potência Ativa;
- Teste 3 - Todos os motores conectados com Potência Ativa e Potência Reativa sendo injetada no sistema.

Para realização da simulação no software foi implementado o sistema em blocos apresentado na Figura 39.

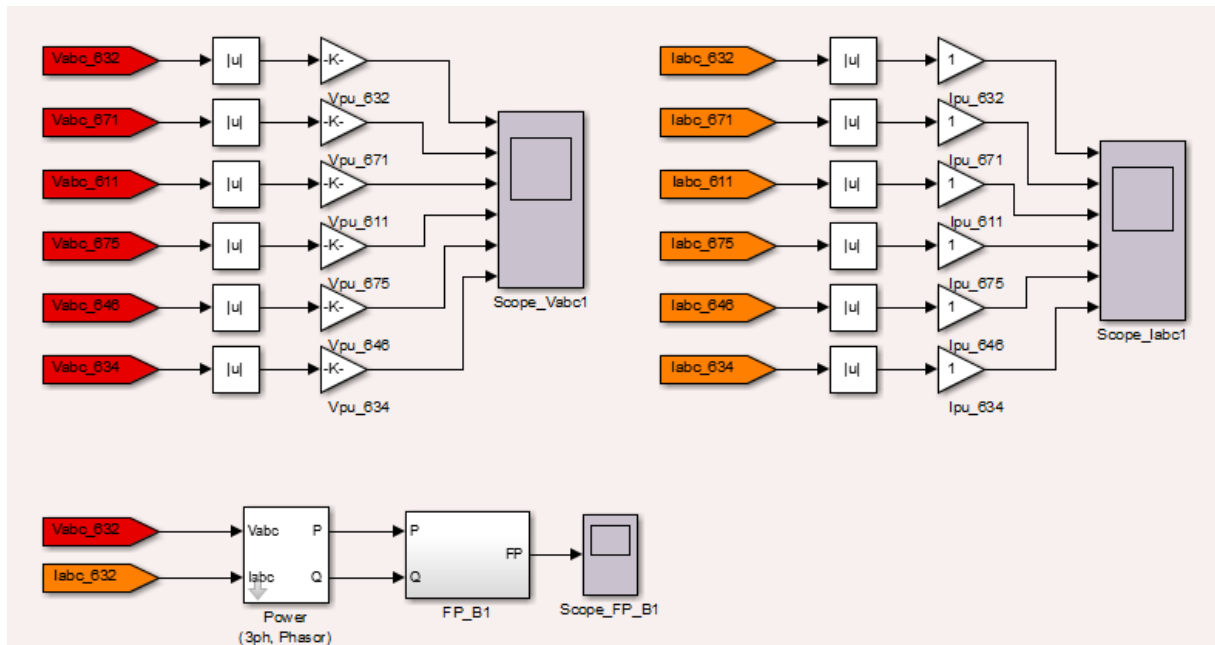
Figura 39 – Sistema 13 barras IEEE Elaborado no software MATLAB/Simulink®.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para realizar as medições necessárias para verificação dos resultados dos testes foram utilizados os blocos de medição como apresentado na 40.

Figura 40 – Medição das Variáveis no Software MATLAB/Simulink®.



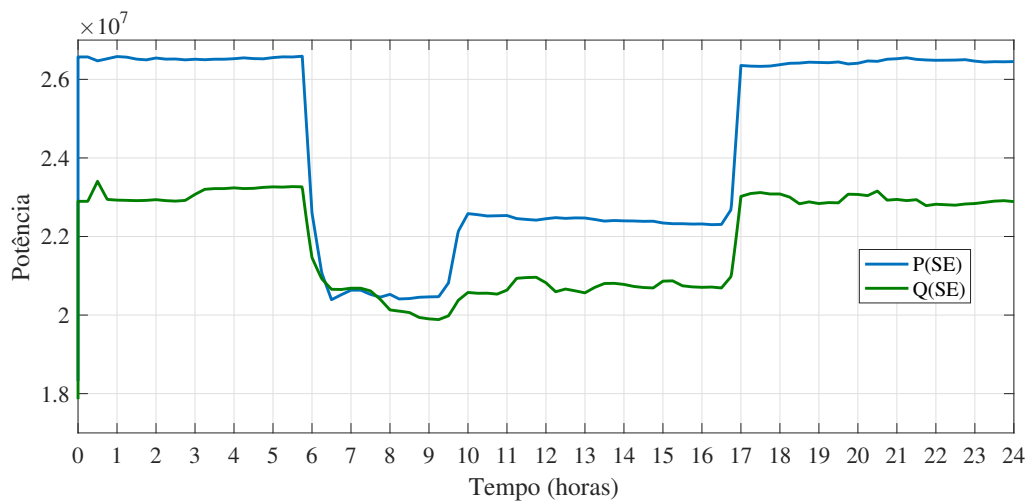
Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.6 Teste 1

O teste 1 consiste nos quatro conversores adicionados sendo estes com potência ativa e reativa oriundas da curva de carga.

A Figura 41 apresenta as potências PQ proveniente da subestação.

Figura 41 – Potência Ativa e Potência Reativa na Subestação.



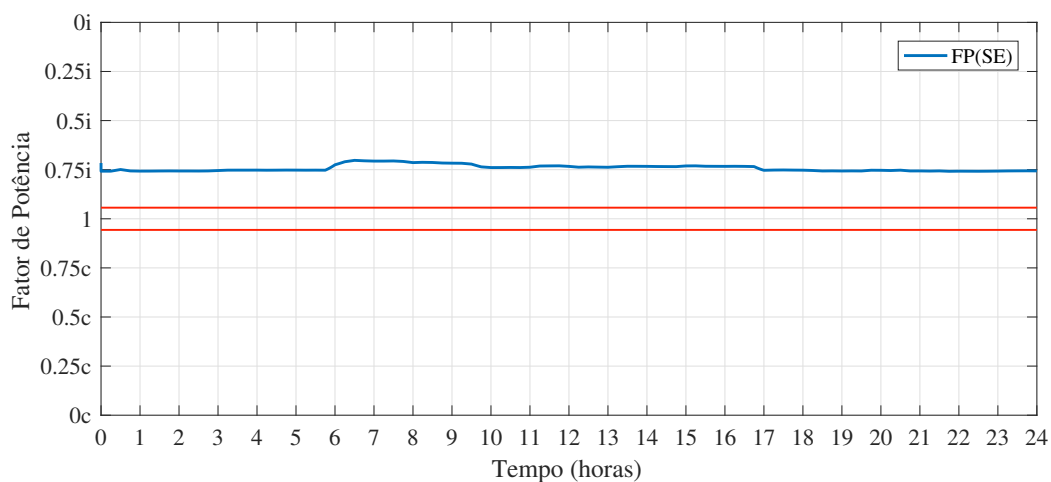
Fonte: Elaborado pela autora.

É possível notar que durante o intervalo de 6 horas à 17 horas ocorre uma elevação

brusca nessas potências ocasionando assim certa variação nas tensões das barras onde os motores estão conectados. Neste período podem ocorrer subtensões, e para corrigir este fato será necessário a injeção de reativos para compensar esta oscilação. No restante do dia, devido a queda que ocorre, podem ocorrer sobretensões, requerendo atuação de outros equipamentos para melhoria dessa oscilação.

A Figura 42 apresenta o fator de potência na subestação, onde o FP apresenta um comportamento indutivo como já esperado devido as potências PQ apresentadas anteriormente.

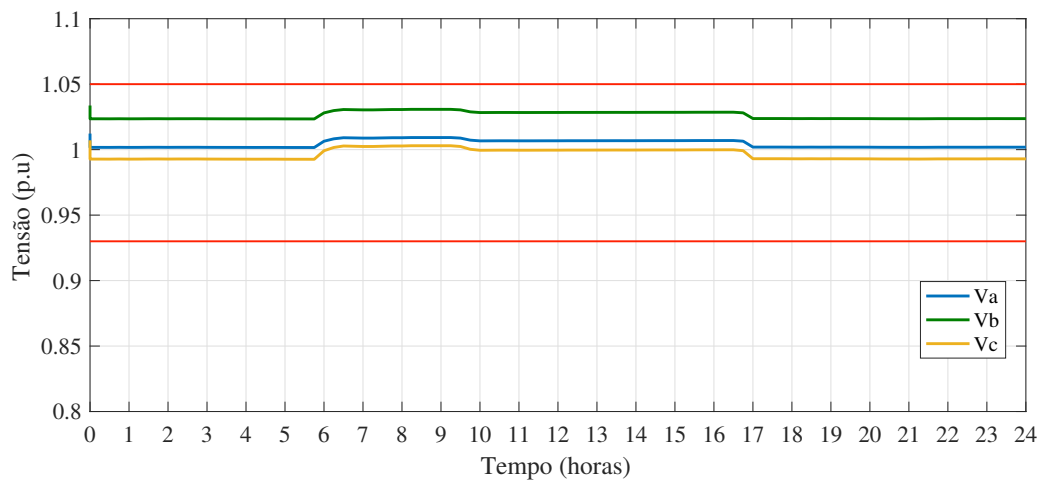
Figura 42 – Fator de Potência na Subestação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Como dito anteriormente, esta é uma rede pequena porém com cargas grandes e que afetam o comportamento das tensões. Na Figura 43 é apresentada a tensão na barra 646 que apresenta todas as fases da tensão dentro dos limites admissíveis da norma.

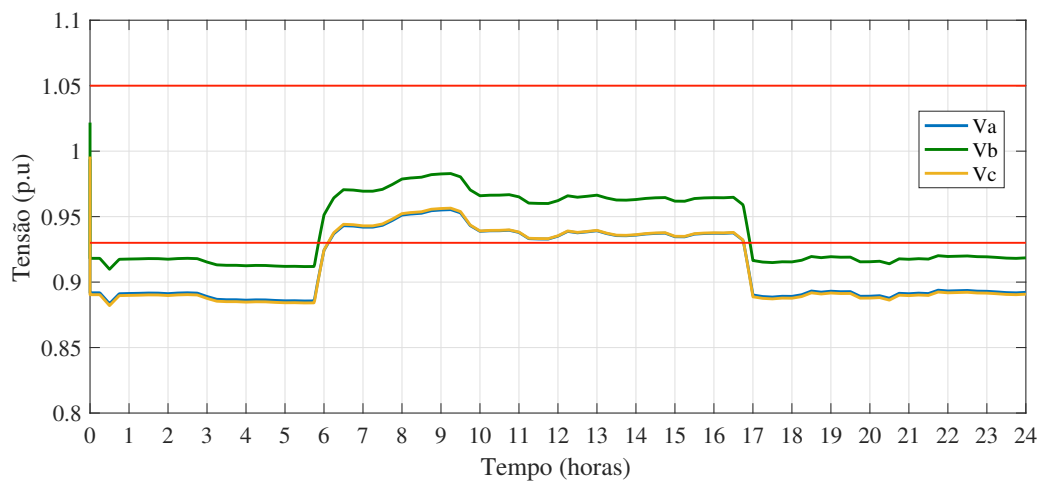
Figura 43 – Tensão na Barra 646.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 44 está apresentada a tensão na barra 634. É possível observar uma queda nos horários onde a potência PQ do sistema encontra-se elevada, mantendo esta grandeza abaixo dos limites apropriados.

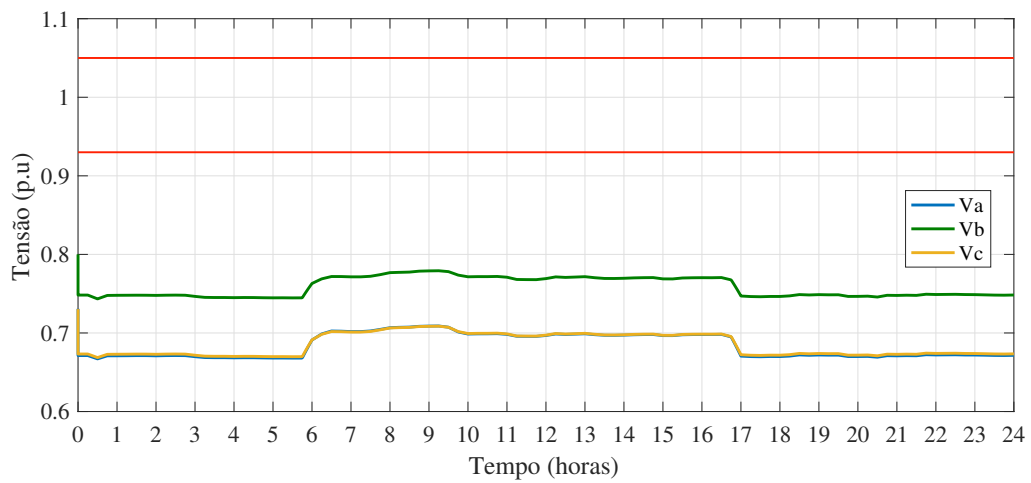
Figura 44 – Tensão na Barra 634.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com o carregamento da linha e o aumento da sua distância em relação a subestação, as tensões do sistema geram variações e desequilíbrios. Na Figura 45 tem-se a tensão na barra 671, esta barra encontra-se antes das barras 611 e 675 que possuem a conexão do conversor e os motores. Os níveis de tensão apresentados nesta barra resultam da conexão dos motores gerando assim uma queda considerável nessa grandeza.

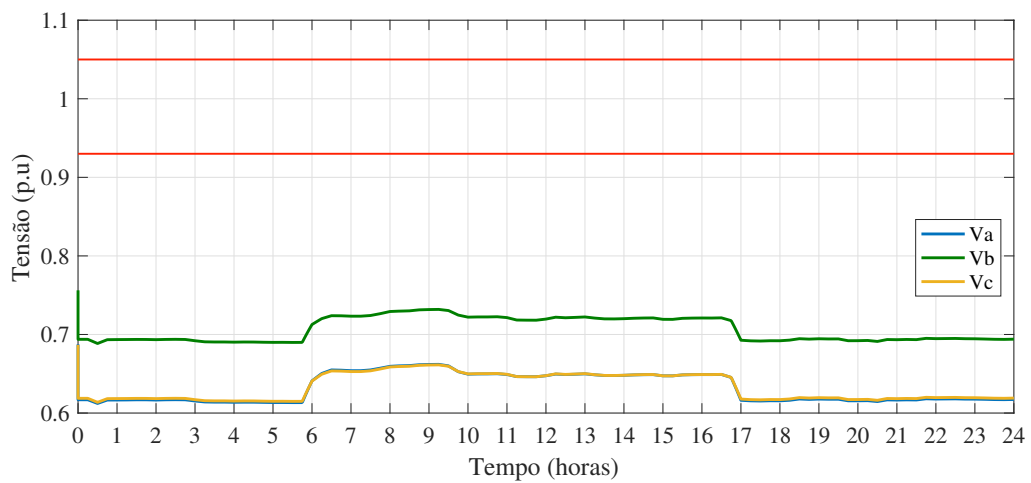
Figura 45 – Tensão na Barra 671.



Fonte: Elaborado pela autora.

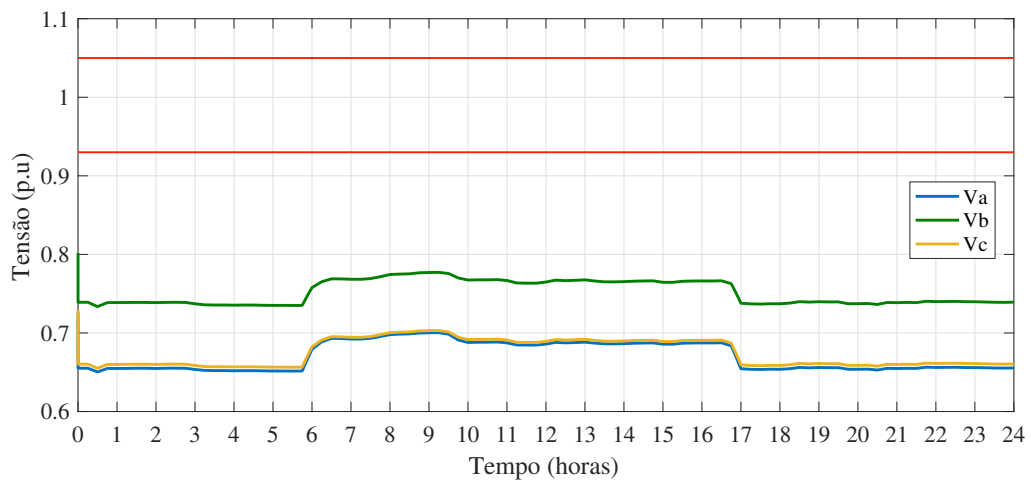
O comportamento das tensões na Figura 46 e Figura 47 é semelhante apresentando níveis de tensão abaixo dos limites admissíveis devido que ambos possuem a conexão de uma carga indutiva elevada.

Figura 46 – Tensão na Barra 611.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 47 – Tensão na Barra 675.



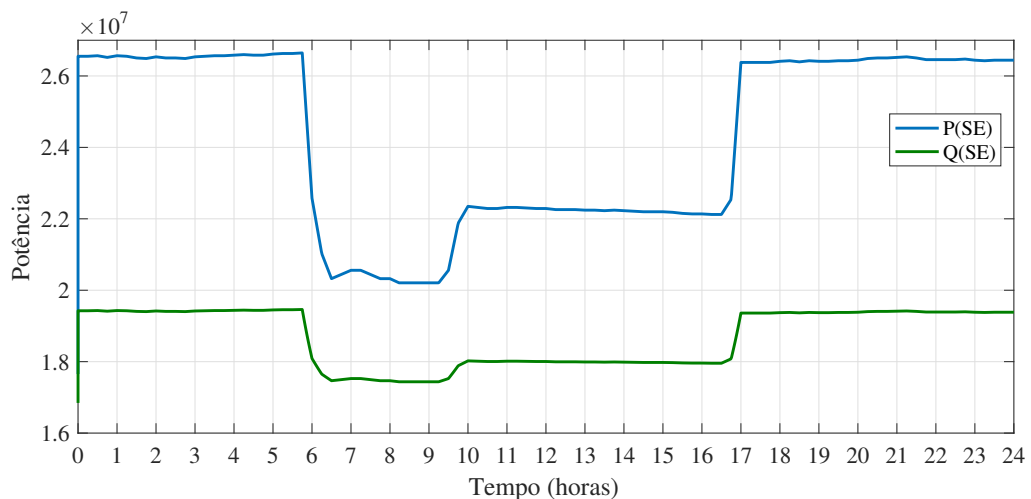
Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.7 Teste 2

O teste 2 consiste nos quatro conversores adicionados sendo estes apenas com potência ativa.

A Figura 48 apresenta as potências PQ proveniente da subestação. É possível notar que a variação tanto de P quanto Q é menor porém ainda ocorre uma queda brusca nestas grandezas durante o período de funcionamento à plena carga dos motores.

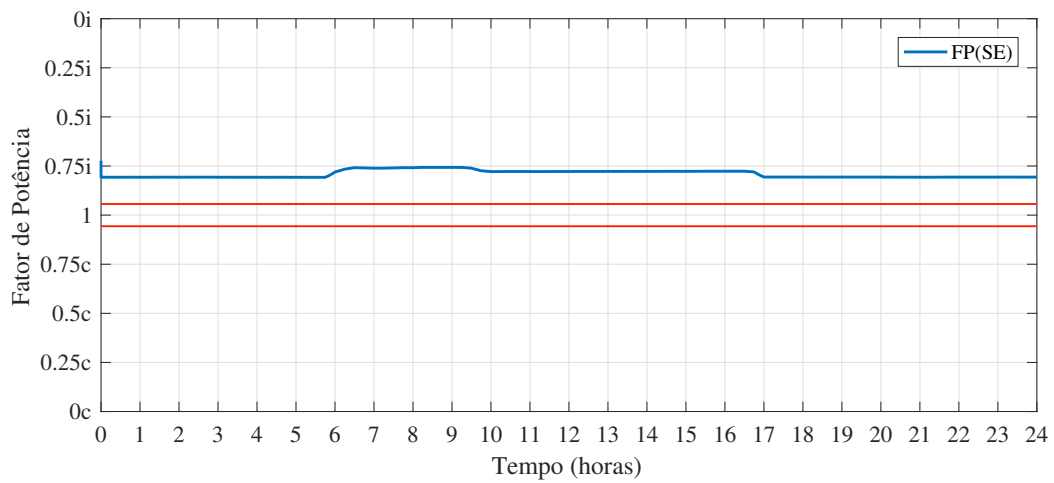
Figura 48 – Potência Ativa e Potência Reativa na Subestação.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 49 apresenta o fator de potência na subestação, onde o FP ainda apresenta comportamento indutivo, com certa queda em relação ao primeiro teste.

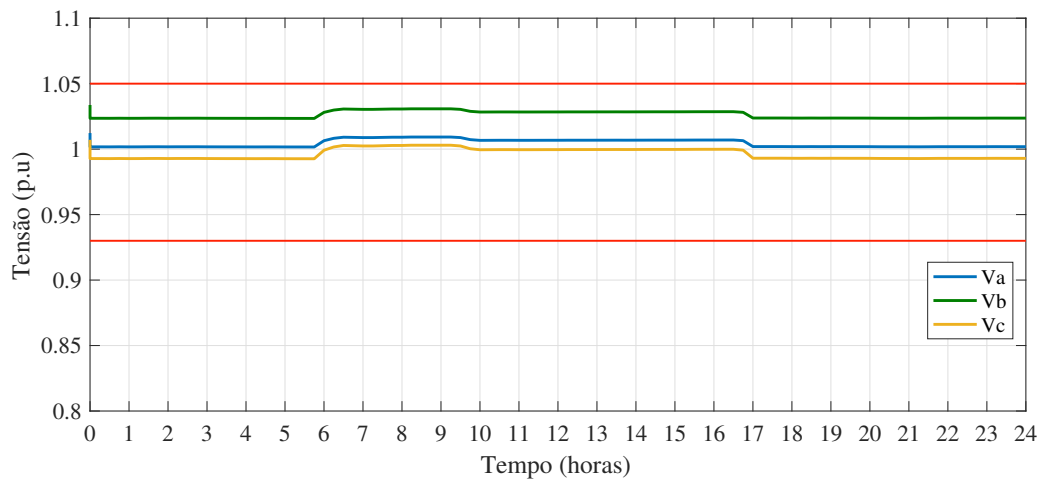
Figura 49 – Fator de Potência na Subestação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 50 é apresentada a tensão na barra 646 que apresenta todas as fases da tensão dentro dos limites admissíveis da norma.

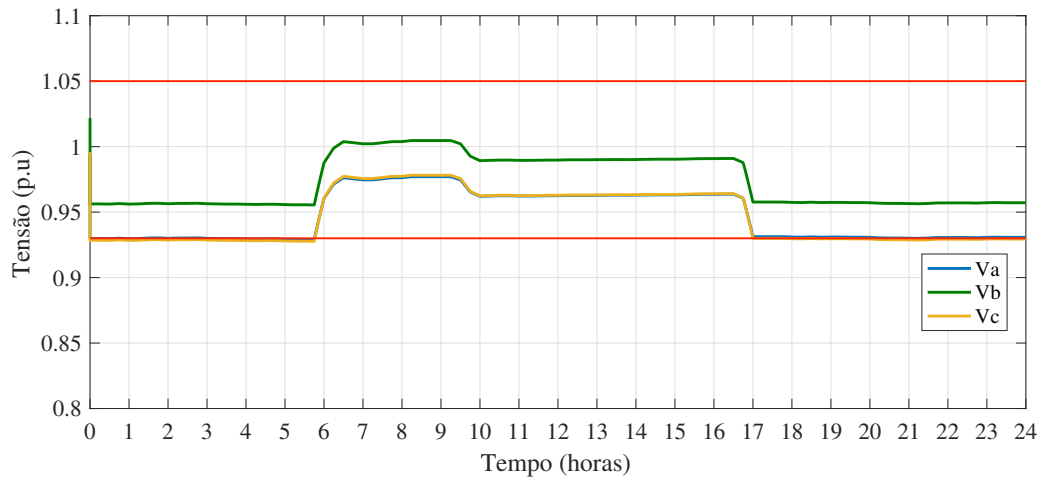
Figura 50 – Tensão na Barra 646.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 51 é apresentada a tensão na barra 634, onde esta se encontra nos limites admissíveis da norma porém com uma leve violação nas fases A e C.

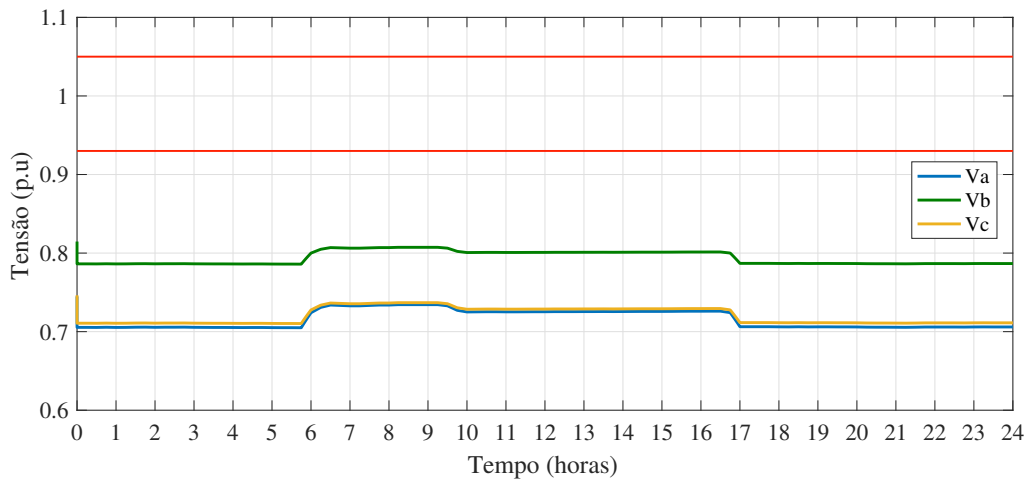
Figura 51 – Tensão na Barra 634.



Fonte: Elaborado pela autora.

A tensão na barra 671 é apresentada na Figura 52 demonstrando um comportamento parecido com o do teste anterior e se mantendo fora dos limites admissíveis.

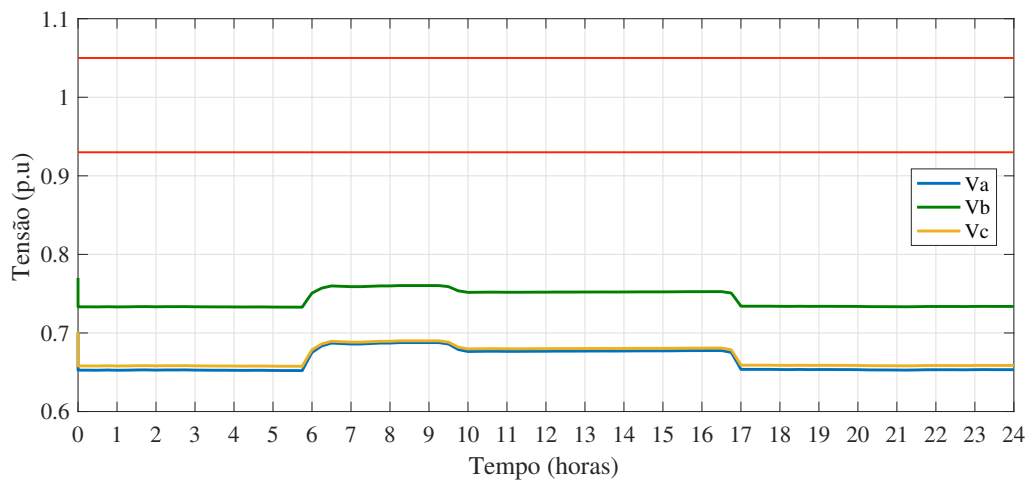
Figura 52 – Tensão na Barra 671.



Fonte: Elaborado pela autora.

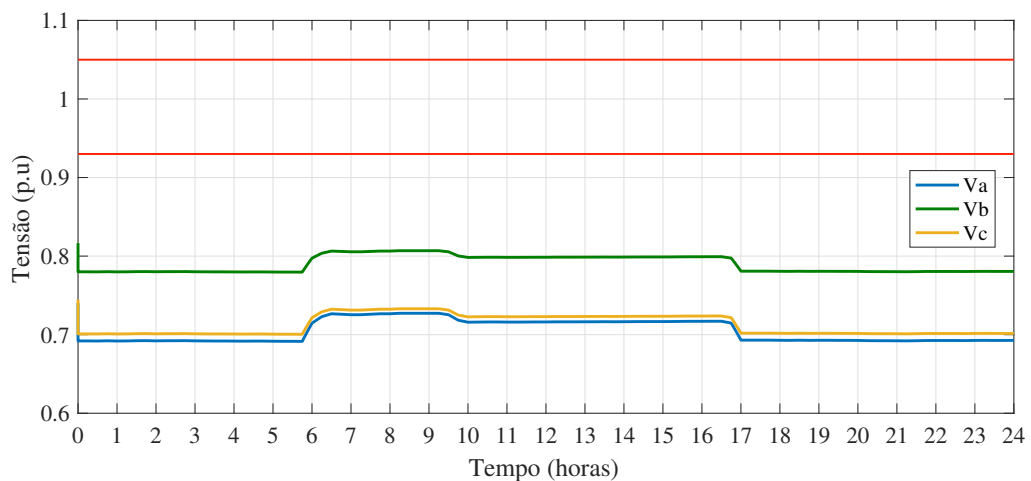
Assim como a Figura 52, a Figura 53 e Figura 54 apresentam um comportamento semelhante, demonstrando que a injeção de reativos na rede é necessária para uma tensão com valores na norma para o melhor desempenho do sistema.

Figura 53 – Tensão na Barra 611.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 54 – Tensão na Barra 675.



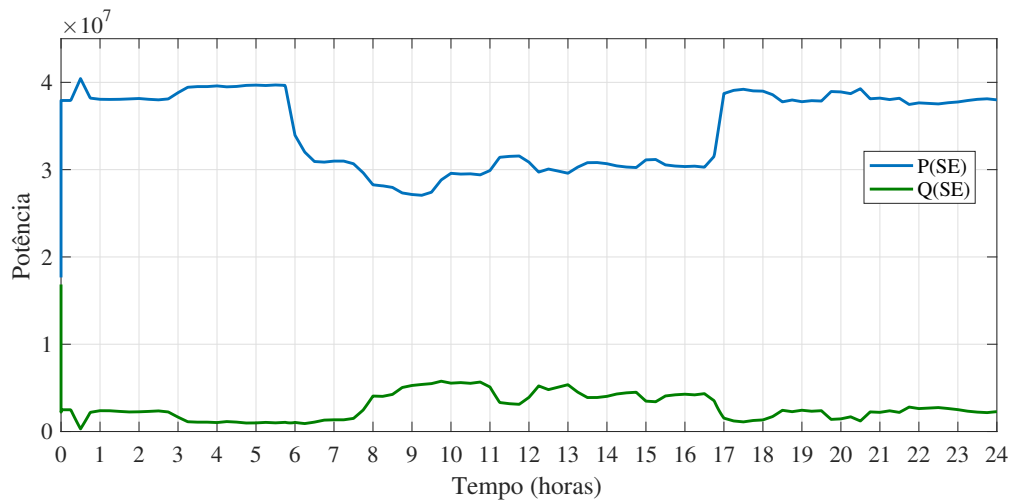
Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.8 Teste 3

O teste 3 consiste nos quatro conversores adicionados sendo injetada potência reativo no sistema para melhoria das tensões e do fator de potência.

A Figura 55 apresenta as potências PQ proveniente da subestação. Observando o comportamento das curvas nota-se que ao injetar reativos, a potência Q apresenta um valor menor.

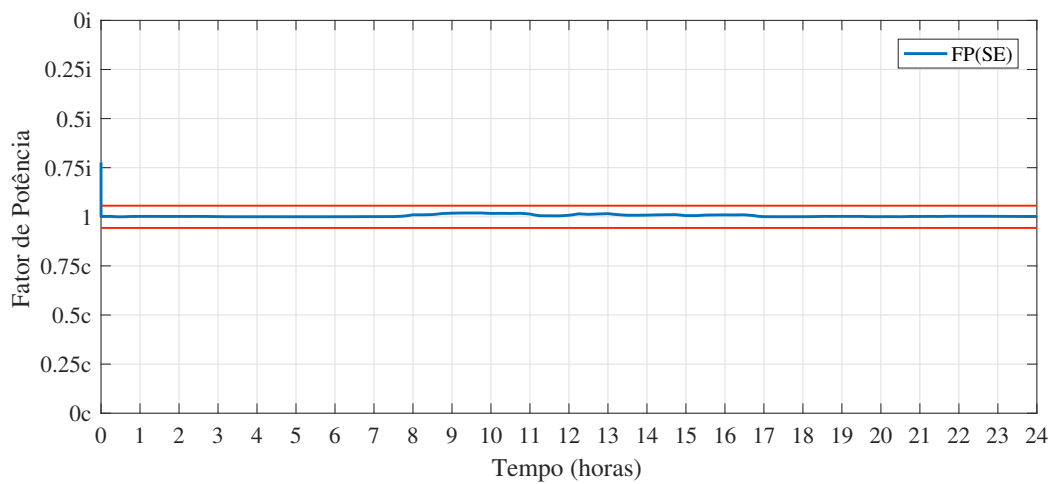
Figura 55 – Potência Ativa e Potência Reativa na Subestação.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 56 apresenta o fator de potência na subestação, onde o FP se comporta como adiantado e atrasado durante o período de 24 horas se mantendo próximo a 1.

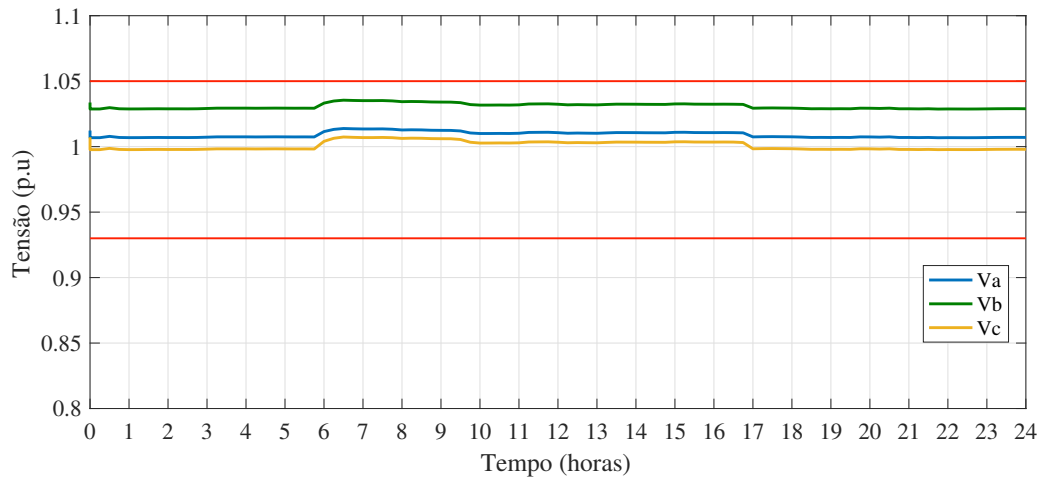
Figura 56 – Fator de Potência na Subestação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao realizar a injeção mínima de Q no sistema, a Figura 57 que já apresentava valores adequados, melhorou ao aumentar seus níveis de tensão.

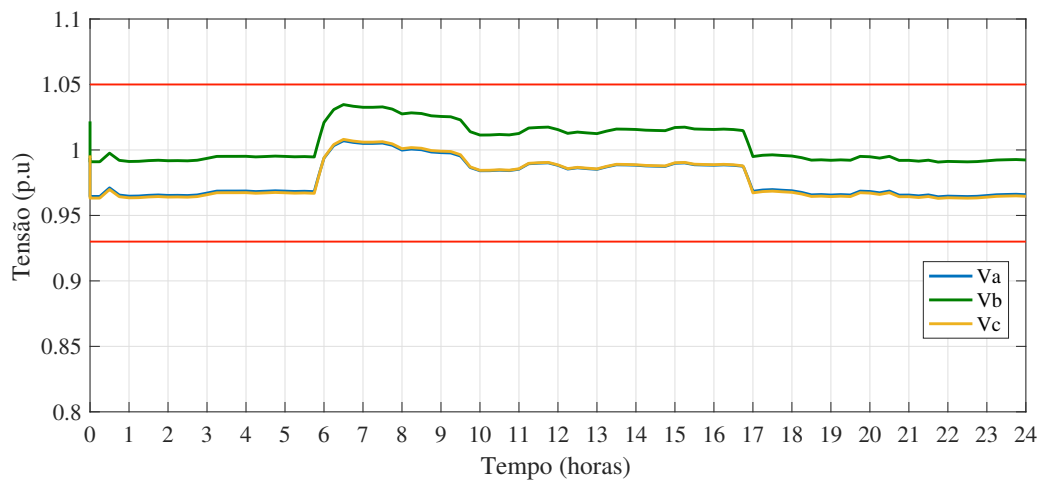
Figura 57 – Tensão na Barra 646.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 58 é apresentada a tensão na barra 634, onde esta se encontra nos limites admissíveis da norma, melhorando ainda mais seus valores sem ocorrer violação em nenhuma das fases.

Figura 58 – Tensão na Barra 634.

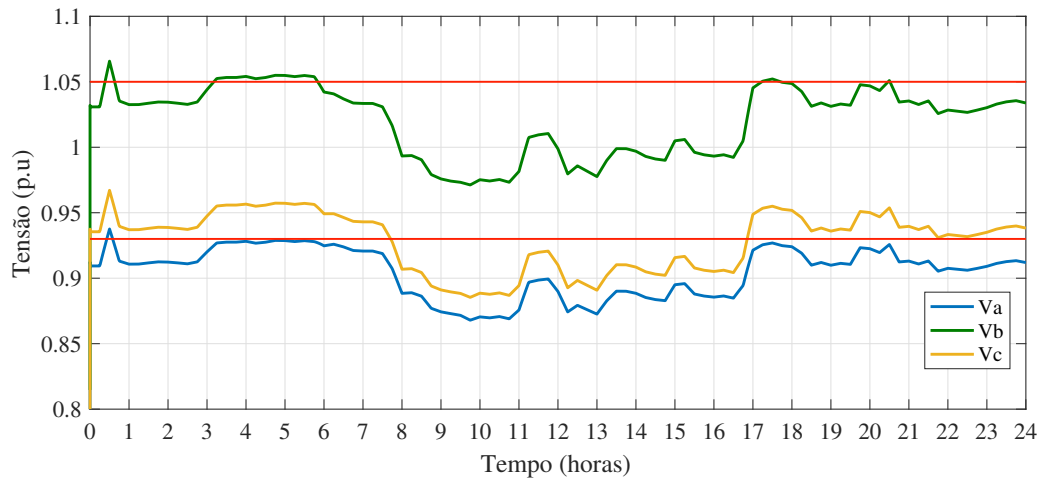


Fonte: Elaborado pela autora.

Para que as tensões nas barras 671, 611 e 675 apresentassem uma melhora em seus níveis de tensão foi necessário a injeção de potência Q maior que nas outras barras devido a sua grande violação. Ainda assim, devido a carga conectada nessas barras, há uma variação que afeta o comportamento dessa grandeza assim como o funcionamento apropriado dos motores conectados nestas barras.

A Figura 59 apresenta a tensão na barra 671, onde apenas a fase B encontra-se sem violação. Apesar disso, houve uma melhora na amplitude das outras fases porém seria necessário uso de outros elementos para extinguir as violações.

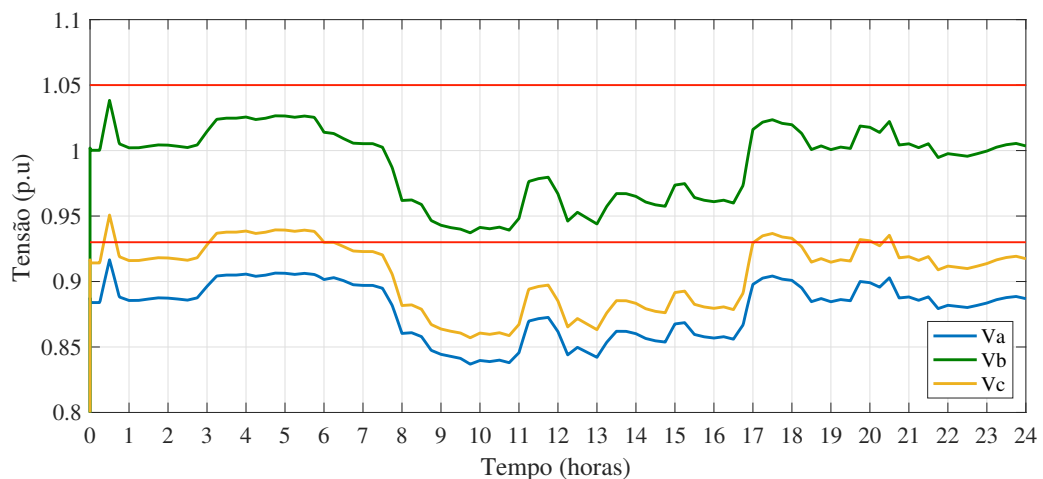
Figura 59 – Tensão na Barra 671.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 60 esta apresentada a tensão na barra 611, que mostra uma melhora nos níveis de tensão, porém ocorrem violações em em duas fases durante o funcionamento do sistema.

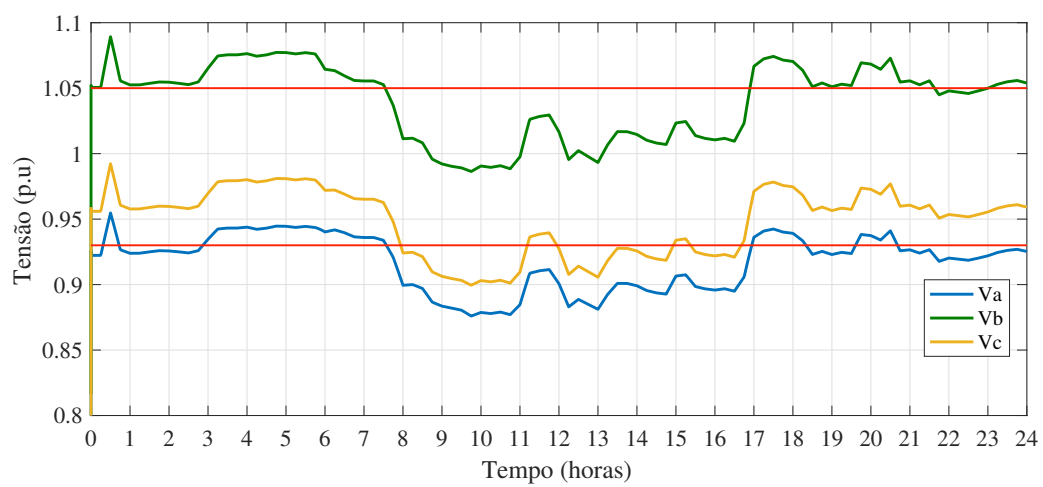
Figura 60 – Tensão na Barra 611.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 61 apresenta o comportamento da tensão na barra 675, ocorrendo melhora nos níveis de tensão porém ainda assim apresentando violação em certos pontos do sistema.

Figura 61 – Tensão na Barra 675.



Fonte: Elaborado pela autora.

5 Considerações Finais

5.1 Conclusão

A partir do desenvolvimento deste trabalho foi possível apresentar a importância do assunto abordado. Atualmente, a qualidade de energia na rede rural é um assunto relevante de estudo em consequência dos problemas de oscilações de tensão. Esses problemas afetam a produção de arroz, assim como a qualidade de vida das pessoas que vivem no meio rural. Com isso, muitos agricultores acabam encontrando barreiras devido à baixa qualidade de energia para o investimento na área de irrigação e agroindústria.

Este presente trabalho propôs uma análise da qualidade de energia do meio rural, essa, feita a partir da estratégia de gerenciamento da partida de motores de indução para o controle de tensão. Diante disso, foi proposto no Capítulo 3 uma metodologia para alcançar o objetivo principal, utilizando um conversor back-to-back consistindo em dois conversores, um funciona como retificador e outro como inversor, sendo interligados por um barramento CC, os mesmos trabalham para o gerenciamento da partida dos motores de indução. Então, para auxiliar no ajuste de reativos foram utilizadas a curva Volt/VAr e o plano PQ para, assim, controlar a tensão e mantê-la nos limites permitidos do PRODIST, observando as restrições dos inversores de frequência quanto a utilização da injeção de potência reativa.

Deste modo, para o sistema genérico, no teste 1 o sistema apresentava tensões abaixo dos limites adequados permitidos pelo Módulo 8 do PRODIST e, devido o acionamento dos motores conectados a barra 2, o fator de potência encontrava-se como indutivo. Logo, ao efetuar o controle com o auxílio da injeção de potência reativa, como apresentado no Teste 3, os níveis de tensão da barra 2 passaram a não apresentar violação, estando dentro da faixa adequada de tensão. E o fator de potência na carga 2, onde foi conectada o conversor juntamente com o motor apresentou um FP capacitivo, porém com uma certa variação. Dessa forma, apresentando que o controle a partir da conexão do conversor back-to-back e injeção de reativos trabalhou de forma satisfatória, proporcionando os ajustes necessários para que a tensão estivesse nos limites admissíveis da norma.

O segundo cenário utilizado foi o sistema de 13 barras da IEEE que consiste em uma rede pequena, porém bastante carregada. Para esse sistema, adicionou-se quatro conversores a fim de verificar se o método proposto é adequado. Neste caso, considerou-se que o sistema é desequilibrado, com linhas de distribuição de pequenas distâncias, cargas PQ constantes e apresenta dois bancos de capacitores. Assim, no teste 1, foi analisado o comportamento da rede apenas com o acionamento dos motores. O fator de potência

dessa rede apresentava um comportamento indutivo como já esperado, devido as cargas PQ que a rede apresentava. Os níveis de tensão das barras onde foram conectadas os conversores apresentavam certa violação, necessitando de um controle para compensação destes valores.

No teste 3, efetuou-se o controle proposto nesse trabalho de forma a melhorar os níveis de tensão. O fator de potência da subestação após o controle apresentou-se melhor, estando dentro dos limites admissíveis pelo PRODIST. A tensão na barra 634 apresentou uma melhora nos seus níveis, encontrando-se dentro dos limites adequados. Em alguns casos, como na barra 671, o controle da injeção de reativos não corrigiu totalmente os níveis de tensão, e em certo ponto houve ultrapassagem dos limites máximos permitidos. Isso pode ser atribuído a fatores como limitações do sistema 13 barras da IEEE para as condições impostas, assim como certa limitação da injeção de potência reativa. Assim, para realizar melhora nesses níveis de tensão seria necessário a utilização de outros equipamentos, como por exemplo um regulador de tensão.

Dessa forma, o método de controle proposto apresentou resultados satisfatórios no sistema genérico e no sistema 13 barras, mesmo em função dos ajustes realizados não terem sido totalmente adequados neste segundo sistema, pois houve violação dos níveis admitidos pela norma.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, apresentam-se as seguintes propostas:

- Melhorar o método de injeção de potência reativa para adequar os níveis de tensão ao estabelecido na norma;
- Utilizar controle de injeção de reativo variável;
- Levar em consideração o fator de potência na técnica de controle;
- Utilizar uma técnica de controle global para condicionar o controle local apresentado.

Referências

- ANEEL. **Ouvidoria Setorial em Números - Aspectos Técnicos e Comerciais**. [S.l.]: ANEEL, 2015. 174 p.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 2018.
- ANICETO, D. M. Importância da correção do fator de potência nas instalações elétricas industriais. **Revista Online Especialize**, 2016.
- ARRUDA, E. F. de. **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada wavelet**. Monografia (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- BAXTER, R. et al. **Subcomissão de Energia Elétrica - Relatório**. [S.l.], 2015. v. 39, n. 5, 122 p.
- BELISKI, L. M.; SCARABELOT, L. T.; RAMPINELLI, G. A. Análise da Qualidade de Energia Elétrica de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída em Unidades Prosumidoras Residenciais. 2018.
- BRUM, A. L.; PORTELA, E. F. M. **As Estratégias De Competitividade Para a Cadeia Produtiva Do Arroz**. 2007.
- BRUNA, B. P. D. et al. Estudo de Acionamentos das Chaves de Partidas Elétricas. In: . [S.l.: s.n.], 2012.
- CAMARGO, I. **Motor de Indução Trifásico (MIT)**. [S.l.], 2006.
- CANCIO, L. D. **Avaliação da Eficiência Energética em Sistemas de Irrigação Mecanizados nas Lavouras de Arroz da Fronteira Oeste**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.
- CASTRO, R. A. **Análise de Viabilidade de Troca de Motores Elétricos Superdimensionados e a Influência da Energia Reativa**. Monografia (Pós Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- COSTA, A. A. M. da. Estudo do Impacto da Geração Fotovoltaica nos Níveis de Tensão em Rede de Distribuição. 2016.
- CRISPIM, K. S. **Estudo do Controle do Conversor Back-to-Back para Conversão de Frequências**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- DRANKA, G. G. **Análise de oscilações de tensão devido à partida de motores elétricos de grande porte em redes elétricas industriais com multialimentadores**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012.

- DUGAN, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2003.
- ELECTRA, A. e. d. p. **Máquinas Elétricas**. [S.l.], 2007. 44 p.
- FELBER, L. A. **Regulação de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica**. 138 p. Tese (Dissertação de Pós Graduação) — Universidade Federal de Itajubá, 2010.
- FERREIRA, T. H. D. **Proposta de método para reduzir a sobrecarga no inversor durante a partida de um motor de indução utilizando um Flywheel**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- GONÇALVES, F. R. **Análise da Partida do Motor de Indução Trifásico pelo Método dos Elementos Finitos**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- IRGA, I. R. G. D. A. **Boletim de Resultados da Lavoura de Arroz Safra 2017/2018**. 2017.
- IVANOV, T. C. **Caracterização Da Qualidade De Energia Elétrica No Setor Rural do Estado do Paraná**. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- JUNIOR, E. A. **Estratégia de Conversor para Interligação de Sistemas de Geração Eólica à Rede Elétrica**. Monografia (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- KAEHLER, J. W. M. et al. Impacto da Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento de Água Utilizados para Irrigação das Lavouras de Arroz do Rio Grande do Sul: Uma Abordagem Demanda x Oferta de Energia. In: . [S.l.: s.n.], 2013.
- KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. In: **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**. Columbus, OH, USA: IEEE, 2001. v. 2. ISBN 0-7803-6672-7.
- LAMB, J.; MIRAFZAL, B. **Active and reactive power operational region for grid-interactive cascaded h-bridge multilevel converters**. 2016.
- LAMB, J.; MIRAFZAL, B. Grid-Interactive Cascaded H-Bridge Multilevel Converter PQ Plane Operating Region Analysis. 2017.
- MAIA, R. M. **Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia**. Monografia (Pós Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.
- MASCHERONI, J. M.; LICHTBLAY, M.; GERARDI, D. **Guia de Aplicação Inversores de Frequência**. [S.l.], 2007. v. 134.
- MATEUS, V. Graduação em Engenharia Elétrica, **Fator de Potencia**. 2001.
- MEHL, E. L. M. **Qualidade da Energia Elétrica**. 2013. 2013 p.
- PARAGINSKI, A. L.; SOUZA, R. S. **Uma Análise sobre a Distribuição de Energia Elétrica no Meio Rural na Fronteira Oeste do RS**. 2010. 13 p.

- PAULA, G. R. de. Modelagem e Análise Estática de um Alimentador Real da CPFL Paulista. 2016.
- PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M. **Capítulo VII - Flutuações de tensão**. 2016. 1 – 8 p.
- PIRES, W. D. L. **WEG Guia Técnico - Motores de indução alimentados por conversores de frequência PWM**. 2006.
- RODRIGUES, L. C. P. **Técnicas Para a Detecção , Classificação E Localização No Tempo Das Variações De Tensão De Curta e Longa Duração**. Monografia (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- SARMANHO, U. A. S. **Influência Dos Distúrbios Elétricos Em Média Tensão Na Qualidade De Energia - Estudo Em Um Influência Dos Distúrbios Elétricos Em Média Tensão Na Qualidade De Energia**. Monografia (Pós Graduação em Engenharia Elétrica) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- SILVA, J. V. **Estudo da estabilidade de tensão em redes de distribuição com geração distribuída**. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- SIQUEIRA, E. C. D. **Estudo investigativo da flutuação de tensão causada pela presença de um forno elétrico a arco**. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, 2017.
- SPATTI, D. H. et al. Regulação automática de tensão em transformadores de subestação de distribuição usando implementação fuzzy. In: . [S.l.: s.n.], 2011.
- URTUBI, I. d. L. V. **Partida de motores de indução com limitação supercondutora : estudo conceitual e por simulação**. Monografia (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
- VENDRAMETO, H. V. **Análise das Perturbações de Qualidade de Energia em Sistemas de Distribuição e a Adequação as Tendências Regulatórias do PRODIST**. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2015.