



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Procedimentos Inteligentes em Redes de distribuição Elétrica: Anéis parciais em alimentadores Radiais

Emmer Milagres

João Monlevade, MG

2023

Emmer Milagres

**Procedimentos Inteligentes em Redes de
distribuição Elétrica: Anéis parciais em
alimentadores Radiais**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Carlos Henrique da Silva

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M637p Milagres, Emmer.
Procedimentos inteligentes em redes de distribuição elétrica
[manuscrito]: anéis parciais em alimentadores radiais. / Emmer Milagres.
- 2023.
58 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia
Elétrica .

1. Energia elétrica. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Redes elétricas
- Analisadores. 4. Redes elétricas inteligentes. 5. Sistemas de energia
elétrica. I. Silva, Carlos Henrique da. II. Universidade Federal de Ouro
Preto. III. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Emmer Milagres

**Procedimentos Inteligentes em Redes de Distribuição Elétrica:
Anéis parciais em alimentadores Radiais**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Aprovada em 31 de março de 2023

Membros da banca

[Doutor] - Carlos Henrique da Silva - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
[Doutor] - Eben-Ezer Prates da Silveira - Universidade Federal de Itajubá
[Doutor] - Juan Carlos Galvis Manso - Universidade Federal de Ouro Preto

[Carlos Henrique da Silva], orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Henrique da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/04/2023, às 18:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0509100** e o código CRC **D14EFAFC**.

Agradecimentos

Agradeço a meus pais, irmão, irmã, amigos e familiares por estarem sempre me apoiando e incentivando até o fim deste ciclo.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva por ter me orientado e aberto minha mente para novas possibilidades. Obrigado por aceitar me direcionar nesta etapa.

A todos vocês meu sincero obrigado.

*"Conhecimento é poder."
Francis Bacon.*

Resumo

Desde que a energia elétrica começou a ser distribuída comercialmente, a rede elétrica desenvolveu-se de um modelo muito semelhante ao atual. Assim, a rede elétrica, como hoje é disseminada, é pouco confiável, possuindo grandes perdas de transmissão e baixa qualidade de energia elétrica. Um novo conceito de energia elétrica vem sendo implementado nos últimos anos, que é conhecido como *Smart Grids*. Estes são redes inteligentes que possuem grande confiabilidade, trocas de dados com monitoramento em tempo real e consegue fornecer os melhores preços em tempo real entre as concessionárias e clientes. Atualmente as concessionárias manobram a rede de distribuição para malhar o sistema apenas em modo de contingência. Neste contexto, este trabalho apresenta a manobra de fechar três alimentadores em anel parcial na tentativa de se obter o melhor desempenho do sistema, a saber: potência ativa entregue ao cliente final, menores perdas nas linhas e melhor perfil de tensão do sistema. Inicialmente é elaborado um algoritmo com critérios estabelecidos para três situações distintas (anel entre alimentadores mais carregados, menos carregados e maior e menor carregamentos) e, por fim, deve ser feita a interseção destes três algoritmos iniciais. Dessa forma, pretende-se obter a melhor configuração do sistema, verificando se será vantajoso ou não a manobra de fazer o anel parcial entre os alimentadores. Obteve-se resultados satisfatórios, cuja potência ativa entregue aos consumidores aumentou, bem como o perfil de tensão foi melhorado.

Palavras-chave: *Smart Grid*, Sistemas Elétricos de Potência, Potência Ativa, Perfil de Tensão.

Abstract

Since electric power began to be distributed commercially, the electrical grid has developed from a model very similar to the current one. Therefore, the electrical grid, as it is disseminated today, is unreliable, with large transmission losses and low quality of electric power. A new concept of electric power has been implemented in recent years, which is known as Smart Grids. These are intelligent networks that have high reliability, real-time data exchange and can provide the best real-time prices between utilities and customers. Currently, utilities operate the distribution network to mesh the system only in contingency mode. In this context, this paper presents the maneuver of closing three partial ring feeders in an attempt to obtain the best system performance, namely: active power delivered to the end customer, lower losses in the lines, and better voltage profile of the system. Initially, an algorithm with established criteria for three distinct situations (ring between more loaded, less loaded, and higher and lower loads) is developed and, finally, the intersection of these three initial algorithms must be made. In this way, it is intended to obtain the best configuration of the system, verifying whether it will be advantageous or not to maneuver the partial ring between the feeders. Satisfactory results were obtained, with active power delivered to consumers increasing, as well as the voltage profile being improved.

Keywords: *Smart Grids, Loads, Electrical Power System, Active power, Voltage Profile*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Medidor digital	19
Figura 2 – Exemplo de figura criada a partir de um arquivo	19
Figura 3 – Medidor eletromecânico. Fonte: (BHATT, 2021)	19
Figura 4 – Ilustração de um sistema de distribuição em anéis	22
Figura 5 – Região Centro-Sul de Belo Horizonte	23
Figura 6 – Maiores motivadores para implantação de <i>Smart Grids</i> no Brasil. Adaptado de (RIVERA et al., 2013)	24
Figura 7 – Ilustração do alimentador 1, via Simulink	27
Figura 8 – Ilustração do alimentador 2, via Simulink	27
Figura 9 – Ilustração do alimentador 3, via Simulink	28
Figura 10 – Estado Inicial	29
Figura 11 – Cargas do alimentador 1	30
Figura 12 – Carga VSI do alimentador 2	31
Figura 13 – Carga CSI do alimentador 2	31
Figura 14 – Cargas do alimentador 3	32
Figura 15 – Fluxograma do Algoritmo do Anel parcial G2-G3	33
Figura 16 – Ilustração dos alimentadores operando isoladamente - Ciclo 0	34
Figura 17 – Ilustração dos alimentadores em anel parcial dos alimentadores 2 e 3 - Ciclo 15	35
Figura 18 – Ilustração dos alimentadores em anel parcial dos alimentadores 2 e 3 - Ciclo 30	35
Figura 19 – Anel parcial dos alimentadores 2 e 3 após comutação de cargas - Ciclo 45	36
Figura 20 – Fluxograma do Algoritmo do Anel parcial G1-G2	37
Figura 21 – Ilustração dos alimentadores em anel parcial dos alimentadores 1 e 2	38
Figura 22 – Fluxograma do Algoritmo do Anel parcial G1-G3	39
Figura 23 – Ilustração dos alimentadores em anel parcial dos alimentadores 1 e 3	40
Figura 24 – Ponto de interseção dos algoritmos	41
Figura 25 – Fluxograma do Algoritmo do Anel Parcial	42
Figura 26 – Tensão gerada e de terminal de cada alimentador	44
Figura 27 – Tensão no fim de linha de cada alimentador	45
Figura 28 – Tensão de alimentação de cada carga do sistema	45
Figura 29 – Tensão em cada carga nos ciclos 15, 60 e 75	46
Figura 30 – Anel parcial após manobra do banco de capacitores	47
Figura 31 – Configuração para o alimentador 3 ser o mais carregado	50
Figura 32 – Tensão gerada e de terminal de cada alimentador	51
Figura 33 – Tensão no fim de linha de cada alimentador	51

Figura 34 – Tensão de alimentação de cada carga do sistema	52
Figura 35 – Tensão em cada carga nos ciclos 15, 60 e 75	53
Figura 36 – Tensão gerada e de terminal de cada alimentador	55
Figura 37 – Tensão no fim de linha de cada alimentador	55
Figura 38 – Tensão de alimentação de cada carga do sistema	56
Figura 39 – Tensão em cada carga nos ciclos 15, 60 e 75	57

Lista de tabelas

Tabela 1 – Mudança do cenário das redes atuais para <i>Smart Grid</i> . Adaptado de: ASGI - World Economy Forum (2009)	25
Tabela 2 – Parâmetros de potência ativa das cargas e taxa de ocupação do sistema isolado e anel completo	28
Tabela 3 – Parâmetros de potência ativa, tensão e perdas nas linhas	28
Tabela 4 – Parâmetros dos alimentadores	30
Tabela 5 – Parâmetros das cargas	32
Tabela 6 – Parâmetros obtidos após fim da simulação, no Simulink	33
Tabela 7 – Parâmetros obtidos após fim da simulação no Simulink	36
Tabela 8 – Parâmetros obtidos após fim da simulação, no Simulink	38
Tabela 9 – Carregamento dos alimentadores	47
Tabela 10 – Parâmetros obtidos após fim da simulação	48
Tabela 11 – Tensão	49
Tabela 12 – Carregamento dos alimentadores	53
Tabela 13 – Parâmetros obtidos após fim da simulação	54
Tabela 14 – Tensão	54
Tabela 15 – Carregamento dos alimentadores	57
Tabela 16 – Parâmetros obtidos após fim da simulação	58
Tabela 17 – Tensão	58

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Estrutura/Organização do Trabalho	14
2	Revisão Bibliográfica	16
2.1	O que é <i>Smart Grid</i>	16
2.2	Benefícios do <i>Smart Grid</i>	17
2.3	<i>Smart Meters</i>	18
2.3.1	Chaves Estáticas e Tipos de Rede de Distribuição	20
2.3.2	Operação em Anel Fechado	21
2.4	Cenário Mundial	23
2.5	Cenário Brasileiro	24
2.6	Mudança das Redes Atuais para o <i>Smart Grid</i>	25
3	Metodologia	26
3.1	Parâmetros das Unidades Geradoras e Linhas de Distribuição	30
3.2	Modelagem das Cargas Constituintes no <i>Smart Grid</i>	30
3.3	Anel Parcial G2-G3	32
3.4	Anel Parcial G1-G2	36
3.5	Anel Parcial G1-G3	38
3.6	Interseção dos Algoritmos	40
4	Resultados e Discussão	44
4.1	Cargas Originais do Sistema	44
4.2	Validação dos resultados	49
4.2.1	Alimentador 3 com maior Carregamento	49
4.2.2	Troca de Cargas entre Alimentadores 1 e 2	54
5	Conclusão	59
	Referências	60

1 Introdução

1.1 Justificativa

Desde que a energia elétrica começou a ser distribuída comercialmente, no final do século XIX, a rede elétrica se expandiu por todo o globo. Por meio da eletricidade, a humanidade pôde dar um grande salto evolutivo em sua história. Assim, começaram a surgir máquinas elétricas, dispositivos eletrônicos, dispositivos armazenadores de energia, aparelhos eletro-eletrônicos e conversores de energia que deram novas opções de lazer, conforto, segurança, melhorias de condições de trabalho e qualidade de vida à população.

Segundo Butt et al. (2021), a urbanização, os padrões de vida e o avanço da tecnologia aumentaram a demanda de energia necessária. Dessa forma, o alto consumo de eletricidade sem supervisão pode ser um problema quando analisado sob ponto de vista de sustentabilidade e, também, da preservação do meio ambiente no mundo.

Tomando como base uma linha evolutiva das redes elétricas, que são focadas apenas em geração, transmissão e distribuição de energia até os dias atuais, desenvolveu-se a partir de modelo eletromecânico muito semelhante ao atual (RIVERA et al., 2013).

As redes elétricas atuais ainda não são totalmente confiáveis possuindo grandes perdas de transmissão, baixa qualidade de energia, são propensas a quedas de energia e apagões e desestimulam a integração de energia distribuída (BUTT et al., 2021). Ainda segundo Butt et al. (2021), os sistemas de energia tradicionais carecem de um monitoramento e controle em tempo real e contornar os problemas que possam surgir na rede elétrica.

Ao longo do tempo, vêm sendo desenvolvidos estudos para melhoria do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Dessa forma, a rede elétrica visa se tornar mais confiável, eficiente e ser monitorada em tempo real, se comunicando com o fornecedor e cliente. O *Smart Grid* (SG) é uma série de soluções que busca capacitar clientes, melhorar a capacidade das linhas de transmissão e sistemas de distribuição, fornecer os melhores preços em tempo real entre as concessionárias e os clientes, além da maior utilização de fontes de energias renováveis (ALI, 2013). Assim, com um monitoramento em tempo real, o consumidor pode escolher qual a natureza de energia elétrica poderá consumir, de acordo com sua necessidade, dependendo do preço em determinado período do dia, da falta de energia elétrica ou sobrecarregamento de um alimentador e, conseqüentemente, uma má qualidade de energia recebida.

Além da melhoria na segurança, custo, eficiência e confiabilidade, os *Smart Grids* são mais otimizados por área, requerendo menor espaço em comparação com as redes

radiais. A tecnologia pode ser utilizada como micro-redes, que são sistemas de energia elétrica local e integram fontes de energia renovável em uma rede isolada ou conectada à rede principal, e ser conectadas a outras, formando uma grande rede de *Smart Grids* muito mais confiável do que a rede elétrica tradicional (BUTT et al., 2021).

Uma das operações inteligentes, é poder realizar, em conjunto, o anel parcial ou total (anel entre parte dos alimentadores que constituem o sistema) das linhas de distribuição e migrar as cargas do sistema radial para o anel ou do anel para o sistema radial. Dessa forma, este trabalho busca realizar a implantação de anel entre alimentadores e a comutação entre cargas dos alimentadores, por meio de critérios estabelecidos a partir de testes empíricos, a fim de tentar obter o melhor desempenho do sistema, cuja busca será tentar obter maior potência ativa entregue às cargas, menores perdas nas linhas de distribuição e melhor perfil de tensão, uniformizando a tensão que abastece as cargas, no sistema, também, a potência ativa entregue às cargas pelos alimentadores, comparando-se com o sistema radial inicial.

1.2 Objetivos

Os objetivos principais deste trabalho são:

- Apresentar uma breve revisão bibliográfica sobre os *Smart Grids*;
- Estabelecer critérios de quando será vantajoso o fechamento em anel e quando deverá voltar para o sistema radial;
- Desenvolver um algoritmo que faça os alimentadores operarem em paralelo (anel fechado) e realize a comutação de cargas para tentar melhorar o perfil de tensão e a potência ativa entregue às cargas existentes;
- Simular três unidades geradoras idênticas, com linhas de distribuição de diferentes características, que alimentam cargas lineares e não lineares constituintes no *Smart Grid*;
- Avaliar o desempenho operacional dos alimentadores antes e depois do fechamento em anel.

1.3 Estrutura/Organização do Trabalho

O capítulo 2 aborda uma revisão bibliográfica sobre o SG.

O capítulo 3 aborda os materiais e métodos utilizados na concepção da simulação de um SG.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas após a obtenção e análise dos resultados.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 O que é *Smart Grid*

Na literatura, os *Smart grids* são abordados por meio de diferentes concepções, não havendo uma única concepção pré estabelecida por norma. Segundo Gellings (2011), o termo "*Smart Grid*" se refere à modernização do sistema de distribuição de energia elétrica para que monitore, proteja e otimize automaticamente a operação de seus elementos interconectados. Ainda segundo Gellings (2011), o *Smart Grid* é caracterizado por um fluxo de energia elétrica bidirecional de eletricidade e informações para criar uma rede de informações amplamente distribuída e automatizada. Por outro lado, Gharavi e Ghafurian (2011) definem o *Smart Grid* como um sistema elétrico que usa tecnologias de comunicação ciber-segura bidirecional de informação e inteligência computacional de forma integrada em todo o espectro do sistema de energia, desde a geração até o consumidor final.

Algumas das principais características dos SG listadas por Salman (2017) são:

- Otimizar a utilização de ativos e a eficiência operacional;
- Acomodar todas as opções de geração e armazenamento;
- Fornecer qualidade de energia para a gama de necessidades em uma economia digital;
- Antecipar e responder às perturbações do sistema de modo que seja autorreparado;
- Operar com resiliência contra ataques físicos e cibernéticos e desastres naturais;
- Permitir a participação ativa dos consumidores;
- Abilitar novos produtos, serviços e mercados.

Como o *Smart Grid* é flexível, possui capacidade de interconexão rápida e segura de geração distribuída e armazenamento de energia em qualquer ponto do sistema. O *Smart Grid* tem a capacidade de coletar e utilizar dados relacionados à manutenção, permitindo identificar possíveis interrupções na rede antes mesmo que elas ocorram. O *Smart Grid* é interativo e, assim, possui a capacidade de fornecer dados sobre o status do sistema para as operadoras e os clientes. Como a capacidade de comunicação do *Smart Grid* é bidirecional, ele deve possuir a capacidade de se proteger contra ataques cibernéticos e interrupções, o tornando seguro (SALMAN, 2017).

2.2 Benefícios do *Smart Grid*

Salman (2017) separa os benefícios do *Smart Grid* em três categorias. Essas categorias serão organizadas em três partes distintas, como se pode ver abaixo:

- **Benefícios técnicos**

- Melhoria na eficiência energética: essa melhoria é obtida por meio da redução de perdas e redução do pico por meio do controle de demanda de pico;
- Melhoria da confiabilidade de rede: obtida reduzindo a frequência e duração da perda de energia;
- Melhoria da eficiência operacional: alcançada por meio de serviços de controle ativo, automação e gerenciamento em redes de distribuição e capacitando clientes por meio da automação residencial e uso de aparelhos inteligentes;
- Melhoria da segurança: é obtida usando sensores e operações automatizadas, mitigando as ameaças de apagões, além de reduzir a vulnerabilidade da rede de perigos inesperados;
- Qualidade de fornecimento: pode ser alcançada por tecnologias de *Smart Grid*, como sensores, informações bidirecionais e tecnologias de comunicação;
- Melhor conexão e acesso à rede: importante para fontes de energia distribuída, incluindo fontes de energia renováveis e, também, para veículos elétricos.

- **Benefícios ambientais**

- Por meio da redução nas perdas da rede, integração da geração renovável e distribuída e, em conjunto com a maior utilização dos veículos elétricos, obtém-se uma redução nas emissões de carbono na atmosfera;
- Todas as situações mostradas no item acima contribuem, também, para a melhoria da perspectiva das mudanças climáticas.

- **Benefícios no marketing da eletricidade**

- Devido à interação dinâmica do lado do consumidor com o lado das concessionárias, o cliente pode ter controle do preço da fornecedora em todas as faixas de horário do dia e, assim, gerando uma economia ao consumidor final e uma concorrência saudável no mercado de eletricidade.

2.3 Smart Meters

De acordo com ALFRED (2008), quando o sistema de potência já havia se consolidado, os medidores começaram a ser desenvolvidos e, após uma série de medidores complicados e inviáveis, Oliver B. Shallenberger, um engenheiro eletricista e inventor, fez uma descoberta de um novo medidor por acidente. Quando uma mola caiu dentro de um novo modelo de lâmpada de arco, ele percebeu que algo havia girado. Assim, poderia utilizar os efeitos do campo elétrico das lâmpadas para girar rodas em um metro para medir a carga elétrica. Este modelo, muito mais simples do que os concorrentes, entrou em comercialização em poucos meses.

Nos dias atuais, dois dos medidores utilizados são (BHATT, 2021):

- **Medidor de energia mecânica**

- Possui uma roda giratória de alumínio e muitas rodas dentadas. Com base no fluxo de corrente, a roda maior gira, o que faz com que as outras rodas girem. Essas rotações são convertidas em medições correspondentes no *display*. É uma medida baseada no fenômeno de indução magnética e possui maiores chances de manipulação e roubo.

- **Medidor de energia eletrônico**

- É baseado em microtecnologia digital e não usa peças móveis. Portanto o medidor de energia elétrica é conhecido como medidor de energia estática. O funcionamento é controlado por um circuito integrado especialmente projetado chamado ASIC (Circuito Integrado Especificado por Aplicação). Os dados de entrada são comparados com os dados de referência e, assim, uma taxa de tensão é fornecida à saída. Essa saída é convertida em dados digitais pelos conversores AD (conversor analógico-digital) presente no ASIC. Os dados digitais são convertidos em um valor médio e a saída do ASIC fica disponível como pulsos indicados pelo LED. Esses pulsos são iguais ao kWh médio. Esse sistema é muito mais difícil de se manipular.

As Figuras 1 e 3 apresentam imagens dos dois tipos de medidores citados.

Figura 1 – Medidor digital



Fonte: Adaptado de (BHATT, 2021)

Figura 2 – Exemplo de figura criada a partir de um arquivo



Fonte: Adaptado de (BHATT, 2021)



Figura 3 – Medidor eletromecânico. Fonte: (BHATT, 2021)

De acordo com Salman (2017), os medidores inteligentes são dispositivos digitais que registam o consumo de energia elétrica do cliente em intervalos de uma hora ou menos e comunicam essa informação, diariamente, ao fornecedor de energia para monitoramento e faturamento. Um medidor inteligente pode ser rotulado como “medidor verde”, pois a resposta da demanda que pode levar à redução da emissão de carbono. Facilita uma maior eficiência energética, uma vez que as informações sobre o consumo de energia elétrica do consumidor fazem com que reduzam o uso de energia.

2.3.1 Chaves Estáticas e Tipos de Rede de Distribuição

Nesta seção serão apresentados os principais tipos de rede e como são realizadas as transferências de carga entre as redes de distribuição.

As redes de distribuição primária são originárias das subestações de distribuição e podem ser construídas tanto de forma aérea quanto subterrânea. As redes aéreas são mais comuns devido ao seu menor custo e são utilizadas em áreas com menor densidade de carga, enquanto as redes subterrâneas são mais aplicadas em áreas com maior densidade de carga, como a zona central de uma metrópole. Um componente importante para as linhas de distribuição são as chaves estáticas, que auxiliam na interrupção da energização das linhas de distribuição ou na transferência de blocos de cargas.

Em uma publicação no IEEE, Javed et al. (2015) propuseram analisar o desempenho de uma chave estática de transferência, utilizando o Simulink, para avaliar a eficiência de transferência de carga de uma fonte de energia para outra. Segundo eles, chave de transferência estática é basicamente uma combinação de duas fontes, uma é a fonte preferencial e a outra é a fonte alternativa, uma carga sensível e um esquema lógico de controle e seu desempenho é analisado através do tempo de transferência.

Segundo Kagan et al. (2021), as principais configurações do sistema de distribuição são:

1. Redes Aéreas:

- Primário radial: É uma configuração de rede onde as linhas secundárias são ramificadas a partir do tronco principal e protegidas por fusíveis. Há chaves de seccionamento que operam normalmente fechadas, que permitem isolar blocos de carga para a realização de manutenção corretiva ou preventiva. Além disso, podem ser instaladas chaves que operam abertas e podem ser fechadas durante manobras de transferência de carga. Em caso de defeito em um circuito, o disjuntor de saída é desligado e a equipe de manutenção isola o trecho com defeito, fechando o disjuntor do circuito operacional e a chave normalmente aberta para restabelecer o suprimento de energia aos demais consumidores.

- Primário seletivo: É uma configuração de rede dupla aplicável a redes aéreas e subterrâneas, onde os consumidores são conectados a ambos os circuitos através de chaves de transferência automática. Em caso de emergência, os relés detectam a falta de tensão em seus terminais, verificam a inexistência de defeito na outra rede e comandam a chave para transferir automaticamente para o outro circuito.

2. Redes Subterrâneas:

- Sistema primário em malha aberta: É mais caro do que o sistema radial e é aplicado apenas em áreas com alta densidade de carga. Os consumidores são divididos em dois barramentos com dois dispositivos de comando em cada extremidade e o alimentador é proveniente de duas subestações diferentes. As duas linhas de distribuição são divididas em um ponto com um disjuntor normalmente aberto. Em caso de falha, a rede é isolada e os barramentos desenergizados são supridos pelo disjuntor normalmente aberto. O circuito funciona com metade de sua capacidade em condições normais, mas deve ter reserva para suportar a carga total em caso de contingência.
- *Spot network*: É uma rede de distribuição de energia elétrica em que cada transformador é suprido por dois ou três circuitos, podendo derivar-se de uma única subestação ou mais. Há uma chave especial, chamada NP (*Network protector*), que impede o fluxo de potência no sentido inverso, o que garante alta confiabilidade da rede. No entanto, o sistema tem um custo elevado, o que justifica sua aplicação somente em áreas com alta densidade de carga. Em Brasília, foi implementado um projeto piloto de *Spot network* com dois e três circuitos que se derivam de subestações diferentes.

2.3.2 Operação em Anel Fechado

Os alimentadores em anel, ou em malha, podem oferecer algumas vantagens quando comparados ao sistema radial, como redundância no sistema, originando maior confiabilidade, melhor balanceamento de cargas e menor flutuação de tensão para o consumidor final. O sistema de manobras para a realização do anel pode ser de forma manual ou automática. O sistema manual é mais demorado e a restauração do serviço demora mais tempo, enquanto o automático é mais caro e demanda maior manutenção.

Em 2004, Chen et al. (2004), apresentou em seu artigo, que um sistema elétrico em anel é projetado para lidar com contingências, tais como desligamentos ou saídas não programadas de equipamentos da rede elétrica. As ocorrências mais comuns incluem a saída de linhas de transmissão e/ou distribuição, transformadores, desligamento de cargas ou unidades geradoras. Esse tipo de sistema é capaz de garantir que nenhum cliente

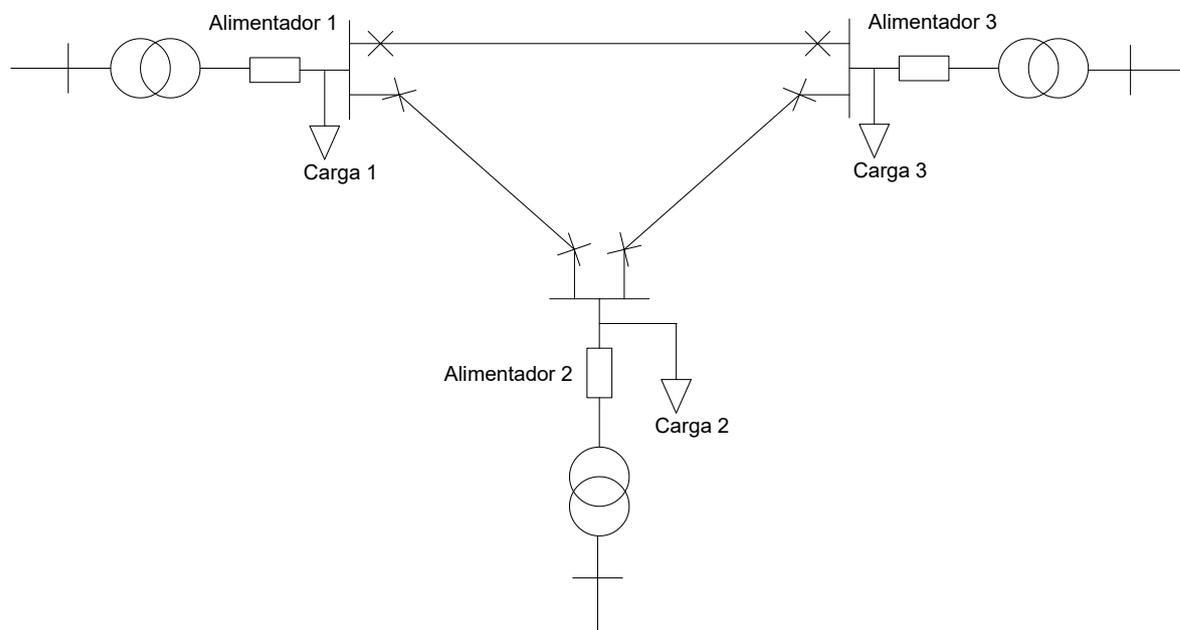
conectado à rede fique sem serviço, assegurando uma maior confiabilidade no fornecimento de energia elétrica.

Na implementação de uma rede elétrica em anel, é necessário atualizar o sistema de proteção, incluindo a substituição dos equipamentos de proteção existentes. Essas atualizações podem aumentar significativamente os custos do projeto, tornando-o menos viável do ponto de vista econômico.

Chen et al. (2004) cita, ainda, que a algumas concessionárias asiáticas já estão modernizando seus sistemas de distribuição para um arranjo em anel, principalmente em regiões metropolitanas, parques industriais e distritos específicos, a fim de aprimorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

A Figura 4 ilustra três alimentadores organizados em anel fechado, onde cada alimentador possui sua carga própria. A topologia do alimentador está em média tensão, porém todo este trabalho referencia o alimentador na baixa tensão. Cada alimentador pode ser inserido, em anel, na rede e abastecer as cargas, em conjunto com outros alimentadores ou individualmente.

Figura 4 – Ilustração de um sistema de distribuição em anéis

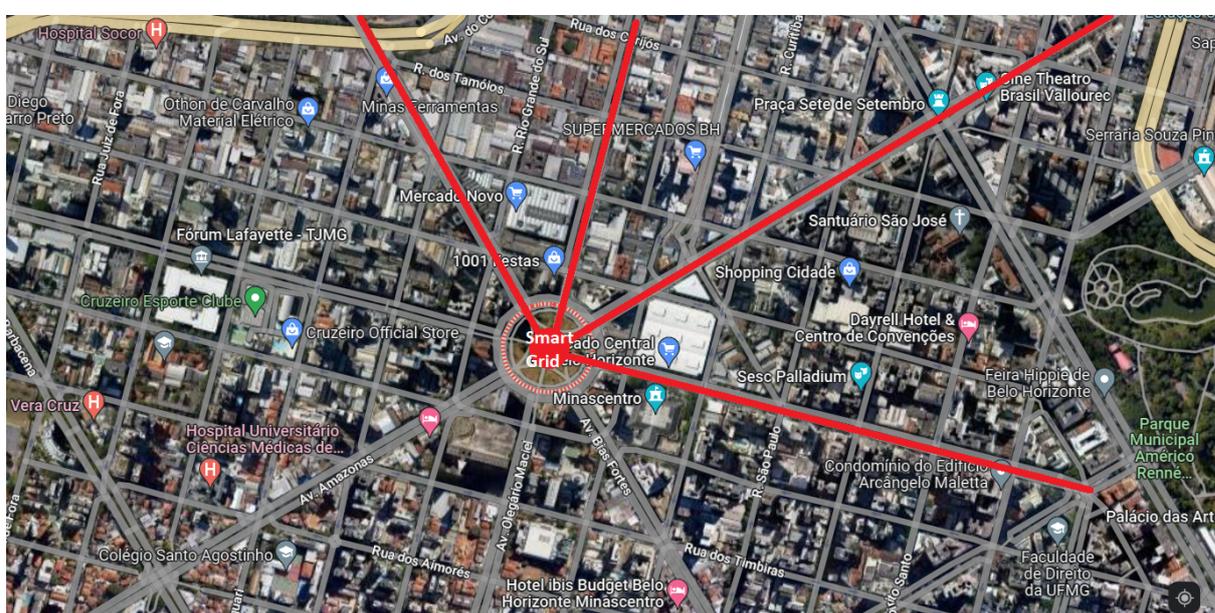


Fonte: Próprio Autor

Atualmente, grandes cidades possuem regiões críticas, nas quais está concentrado um vasto setor comercial e não há mais espaço físico para implantar novas linhas de

distribuição. Dessa forma, uma solução para estes lugares com uma crescente demanda de energia elétrica, é realizar o anel entre alimentadores de distribuição. Assim, pode-se atender uma maior quantidade de clientes, sem necessidade de se modificar a rede. A Figura 5 ilustra a situação anterior, em que está sendo mostrada a praça Raul Soares, em Belo Horizonte - MG, que interliga quatro das principais avenidas da cidade (Olegário Maciel, Amazonas, Augusto de Lima e Bias Fortes) e está situada em uma região fortemente comercial, onde não há muito mais espaço para implementação de novas redes de distribuição. Dessa forma, seria uma boa alternativa a realização do anel entre os alimentadores que acompanham as avenidas, conforme esboçado em vermelho.

Figura 5 – Região Centro-Sul de Belo Horizonte



Fonte: Google Maps

2.4 Cenário Mundial

Segundo Rivera et al. (2013), nos Estados Unidos, em 2009, houve um incentivo de US\$ 4 bilhões para desenvolvimento dos *Smart Grids*. A Califórnia, segundo dados de 2013, substituíram cerca de 97% dos seus medidores. Outros estados que apareceram em situação avançada na aplicação dos *Smart Grids* foram a Flórida, o Colorado e o Texas.

Já na Europa, Rivera et al. (2013) disse que o parlamento europeu fixou como meta a implantação de 80% de medidores inteligentes até 2020. Alguns países europeus estão em situação mais avançada na implementação dos medidores inteligentes. A Itália, por exemplo, possui uma situação privilegiada nesse aspecto, visto que em 2010 possuía 85% dos lares com medidores inteligentes. Já a Suécia dispunha de todos os lares com os medidores novos. A França possuía uma projeção de 95% dos lares de distribuidoras com mais de cem mil clientes até 2016. Espanha, Reino Unido, Noruega e Holanda, até 2012,

não possuíam nem 10% de sua base instalada. Já ABDI (2012) acrescenta que a Espanha, até 2015, pretendia instalar 23 milhões de medidores, em parceria com a Iberdrola.

Tomando a Ásia como ponto, Rivera et al. (2013) diz que a gigante State Grid Corp of China (SGCC) pretende substituir todos seus 360 milhões de medidores até 2020. Já o Japão e a Coreia estavam em estágio de programas piloto. Por outro lado, ABDI (2012) cita que o programa das companhias elétricas japonesas previa o desenvolvimento de *Smart Grids* que contemplem a geração de energia solar, até 2020, enquanto a Coreia do Sul prevê implantação nacional de integração de geradores de energia eólica até 2030.

2.5 Cenário Brasileiro

Em seu trabalho, Rivera et al. (2013) destaca que o Brasil possui cerca de 90% de sua energia gerada vem de fontes renováveis, o consumo de energia per capita é bem inferior ao dos países desenvolvidos (2.200 kWh/habitante contra 12.884 kWh/habitante nos Estados Unidos), possui alto potencial de recursos renováveis e não renováveis não explorados e as tarifas de energia estão entre as mais caras do mundo. Devido à vasta gama de recursos renováveis no Brasil, o fomento de novas tecnologias é inibido.

Ainda em seu trabalho, Rivera et al. (2013) mostra algumas motivações para a implantação dos *Smart Grids*, no Brasil. Essas motivações estão resumidas na Figura 6.

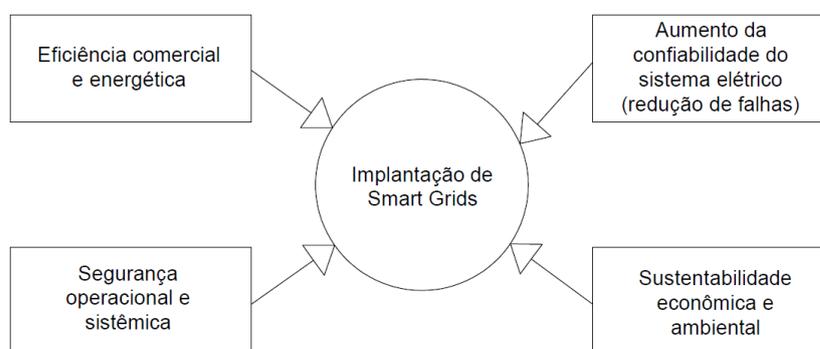


Figura 6 – Maiores motivadores para implantação de *Smart Grids* no Brasil. Adaptado de (RIVERA et al., 2013)

Já ABDI (2012), diz que o panorama brasileiro é um mercado potencial para as tecnologias *Smart Grids*. Conforme previsto pelo Plano Nacional de Eficiência Energética 2030, haverá possibilidade do consumidor gerar e vender a energia produzida excedente para a rede elétrica.

Em seu relatório, ABDI (2012) diz que um dos mais avançados projetos de *Smart Grid* é conduzido pela Light. Baseado em diferentes modelos de medição, o sistema de medição inteligente da Light foi desenvolvido em parceria com o fabricante de medidores CAS Tecnologia e está preparado para funcionamento bidirecional, podendo enviar e

receber mensagens de outros dispositivos. Outra concessionária que iniciou um projeto foi a CEMIG, em Sete Lagoas - MG, que engloba, desde a implantação de medidores inteligentes, até a utilização de veículos elétricos, passando pela automação de redes, geração distribuída e relacionamento com os consumidores.

Outras concessionárias estão investindo em projetos piloto, no Brasil, como o grupo Endesa, a CPFL Energia e a distribuidora CELG. O plano do governo era, até 2021 instalar 64 milhões de medidores eletrônicos, porém a implantação deve ser lenta, atingindo essa meta somente em 2026 (ABDI, 2012).

2.6 Mudança das Redes Atuais para o *Smart Grid*

Para ASGI-WORLD ECONOMY FORUM (2009), uma mudança do cenário atual da rede tradicional para o *Smart Grid* deve acontecer de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Mudança do cenário das redes atuais para *Smart Grid*. Adaptado de: ASGI - World Economy Forum (2009)

Rede Atual	<i>Smart Grid</i>
Analogico/Eletromecânico	Digital/microprocessador
Centralizado (geradores)	Descentralizada (geração)
Reativo (propenso a falhas e <i>blackouts</i>)	Proativa
Manual (restauração de campo)	Semi-automatizado, automatizado (regeneração automática)
Preço único	Preço em tempo real
Escolha limitada do consumidor	Múltiplos produtos para o consumidor
Uma via de comunicação (se houver)	Comunicação bidirecional/integrada
Poucos sensores	Sensores e monitores ubíquos
Restauração manual	Manutenção baseada em desempenho e condição
Transparência limitada com consumidores e reguladores	Transparência com consumidores e reguladores
Controle limitado sobre o fluxo de potência	Sistema de controle pervasivos
Confiabilidade estimada	Confiabilidade preditiva

3 Metodologia

O Módulo 8 do Prodist classifica a tensão de atendimento como adequada, precária ou crítica (PRODIST, 2021). Portanto, quanto mais próximo da tensão nominal estiver o fornecimento de tensão, pelo alimentador, melhor será e mais distante estará de problemas com a qualidade da energia elétrica.

O sistema a ser verificado constitui de três alimentadores contendo os mesmos parâmetros de impedância, alimentando, cada um, duas cargas distintas, por meio de três linhas de distribuição diferentes. O alimentador está em média tensão, porém sempre refletido, nesta análise, em baixa tensão. Ele inicialmente se encontra com os alimentadores operando isoladamente e, possivelmente, não possui a melhor distribuição de cargas para entregar a maior potência ativa ao cliente final, fazendo com que a concessionária deixe de ter um faturamento maior.

O sistema radial e em anel completo foi simulado, via Simulink, para a obtenção dos seguintes parâmetros:

- Potência ativa entregue às cargas (PL11, PL12, PL21, PL22, PL31, PL32);
- Taxa de ocupação em cada gerador (TO(G1), TO(G2), TO(G3));
- Potência ativa total disponível no sistema (Pot. Disp);
- Potência ativa total entregue às cargas (Pot. Cargas);
- Tensão média que abastece todas as cargas (\bar{V});
- Perdas nas linhas (I^2);

O sistema simulado é apresentado nas Figura 7, Figura 8, Figura 9. Como pode ser observado, cada carga possui três chaves estáticas que permitem a transferência de cargas entre os alimentadores. Além disso, cada linha possui uma chave estática, que pode ser aberta ou fechada, possibilitando a formação ou interrupção do anel na rede.

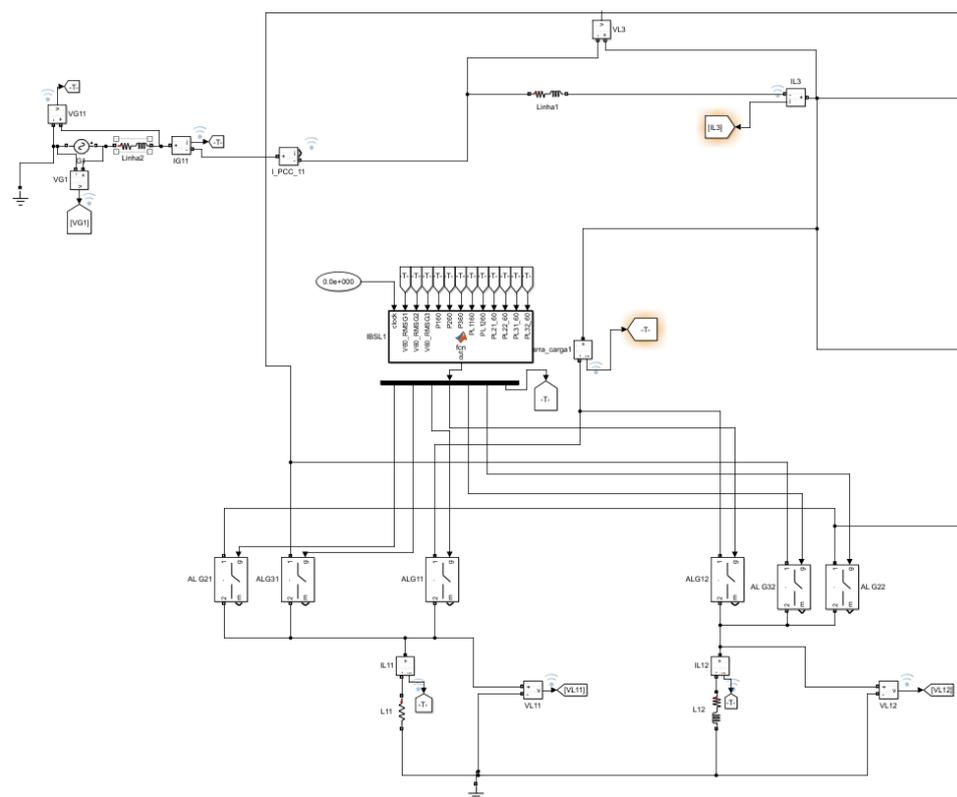


Figura 7 – Ilustração do alimentador 1, via Simulink

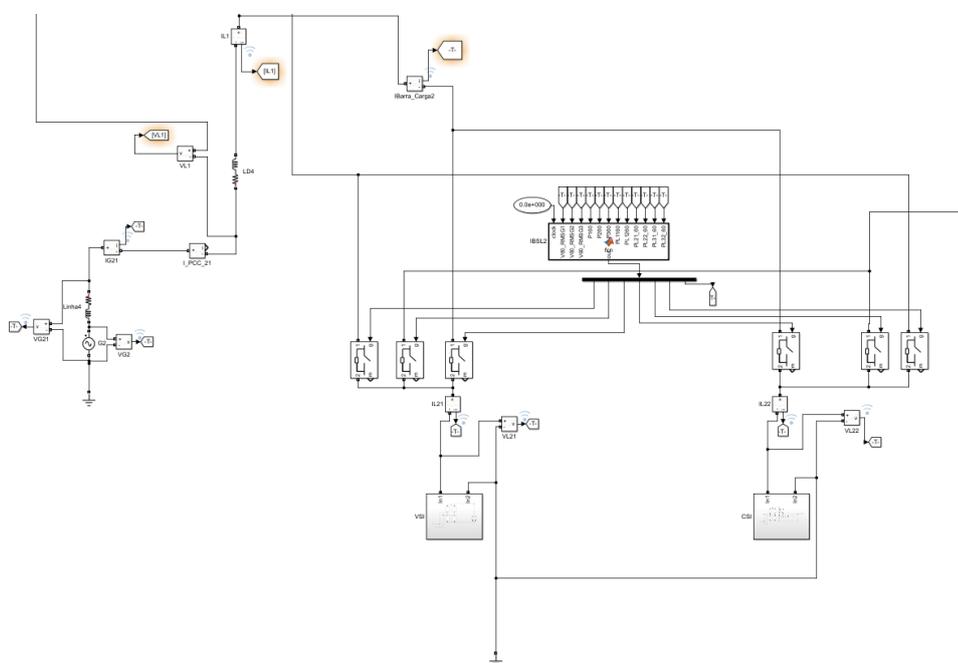


Figura 8 – Ilustração do alimentador 2, via Simulink

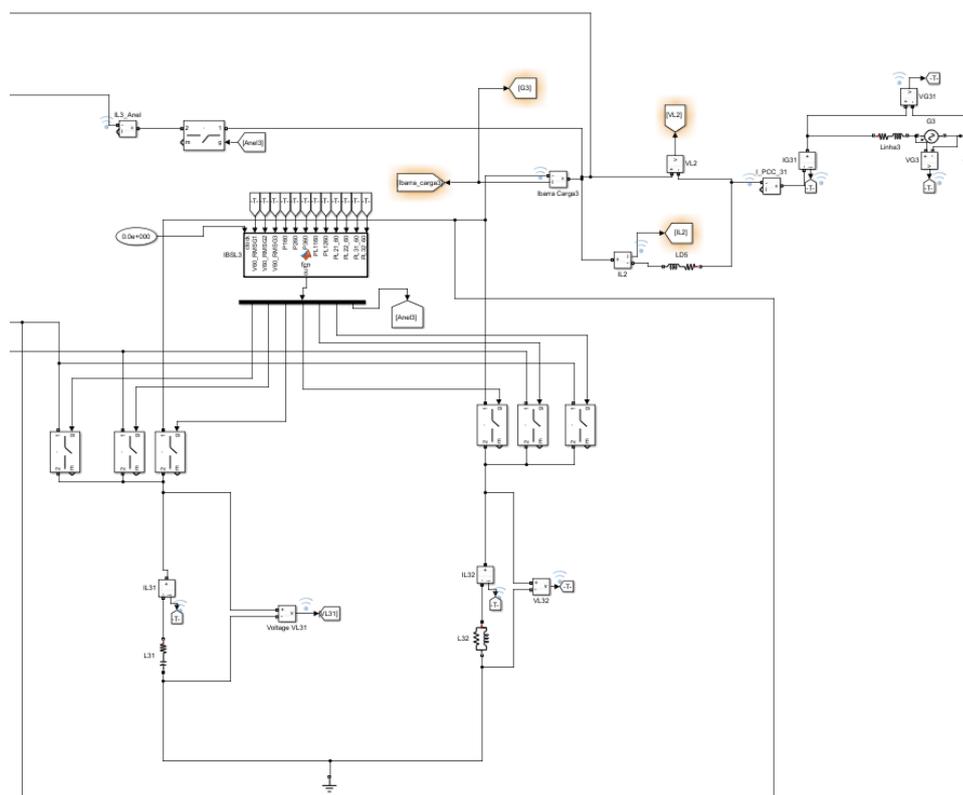


Figura 9 – Ilustração do alimentador 3, via Simulink

Como pode ser observado na Tabela 2 a taxa de ocupação (TO) dos alimentadores está desnivelada quando comparado o ponto do alimentador 1, que possui TO de 97,74% e o alimentador 3, com TO de 20,34%. Quando se faz o anel completo, entre os três alimentadores, a TO se torna mais balanceada, minimizando a diferença anterior.

A Tabela 3 apresenta a taxa de variação de potência ativa gerada e entregue às cargas, indicando um acréscimo de 0,68% entregue ao consumidor (Pot. Cargas), aumentando o faturamento.

Tabela 2 – Parâmetros de potência ativa das cargas e taxa de ocupação do sistema isolado e anel completo

	PL11	PL12	PL21	PL22	PL31	PL32	TO(G1)	TO(G2)	TO(G3)
Sistema Isolado	2870	1913	2679	1159	0	1012	97,74	77,38	20,34
G1-G2-G3	2919	1946	2692	1164	0	977	86,32	46,24	64,20

Tabela 3 – Parâmetros de potência ativa, tensão e perdas nas linhas

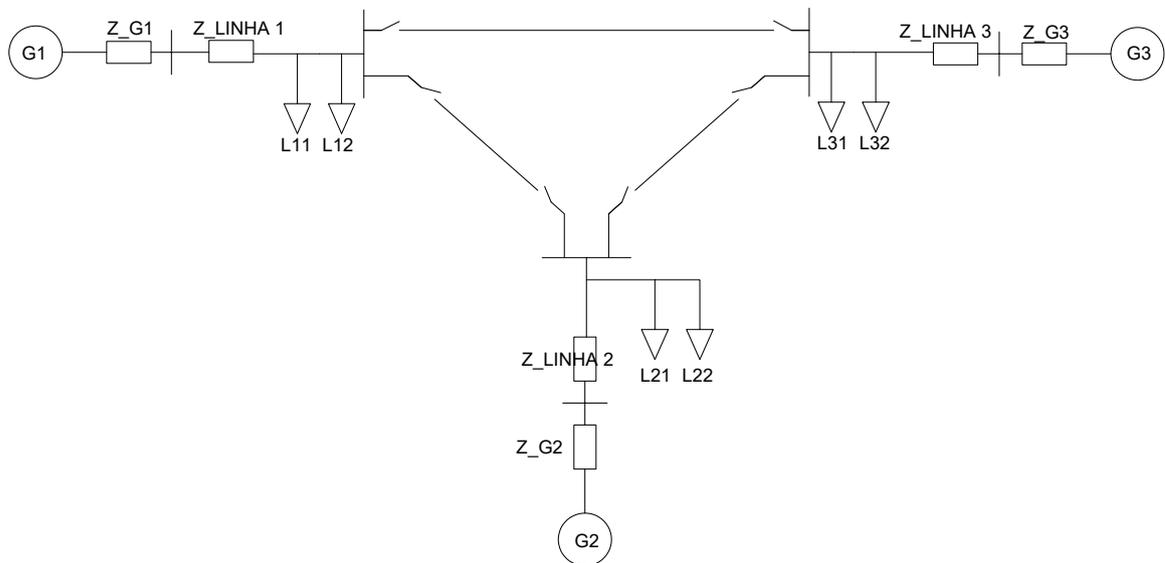
	Pot. Disp. (W)	Pot. Disp. (%)	Pot. Cargas (W)	Pot. Cargas (%)	V (V)	V(%)	I ² (A)	I ² (%)
Sistema Isolado	9773	-	9633	-	217,9	-	892,52	-
G1-G2-G3	9838	0,67	9698	0,68	217,0	-0,4	901,41	1,00

A partir de testes empíricos, foi elaborado um algoritmo para tomada de decisão de quando se realizar a manobra para formar um anel na rede de distribuição ou a manobra de formação do anel será desfeita e assim, o sistema voltar a ser radial.

Foi elaborado um algoritmo para cada situação de anel parcial (G1-G2, G2-G3, G3-G1) e, por fim, realizou-se a interseção dos três algoritmos. Todas as medições, por meio de medidores de tensão e corrente nos terminais dos geradores, finais das linhas de distribuição, barras de cargas e linhas que podem interligar os alimentadores, são feitas em regime permanente, após estabilização do sistema em cada manobra.

Uma ilustração dos três alimentadores é mostrada nas Figura 10, em seu estado inicial. No estado inicial, todos os disjuntores para a implementação do anel fechado estão abertos, indicando que os alimentadores operam isoladamente e abastecem suas próprias cargas. Por meio da figura, é possível visualizar que os disjuntores podem ser fechados, por meio de manobras, e fazer com que os alimentadores trabalhem em conjunto no abastecimento das cargas. Assim, os alimentadores podem trabalhar de forma isolada, anel parcial ou anel completo (G1-G2-G3), para tentar otimizar a entrega de potência ativa às cargas, melhorar o perfil de tensão entregue a todas as cargas e reduzir as perdas nas linhas. Ainda há a possibilidade de se trabalhar em conjunto a formação do anel e transferência de banco de capacitores para a tentativa de redução de perdas nas linhas e aumentar a potência ativa entregue às cargas.

Figura 10 – Estado Inicial



3.1 Parâmetros das Unidades Geradoras e Linhas de Distribuição

Cada gerador possui impedâncias iguais para sua modelagem e suas linhas de distribuição possuem parâmetros diferentes. Na Tabela 4 são descritos os parâmetros de cada alimentador e cada linha de distribuição, onde R é o valor em mili-ohms da resistência, L é o valor em mili-Henry da indutância, X/R é o fator indicativo se o alimentador ou linha de distribuição possui predominância resistiva ou indutiva e S é a potência nominal de cada alimentador.

Tabela 4 – Parâmetros dos alimentadores

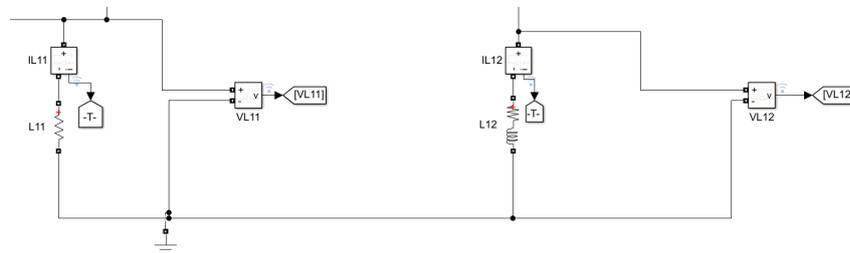
	R (m Ω)	L (mH)	X/R	S (kVA)
Gerador 1	100	0,1	0,377	5
Gerador 2	100	0,1	0,377	5
Gerador 3	100	0,1	0,377	5
Linha 1	100	0,1	0,377	-
Linha 2	0,1	1	3777,911	-
Linha 3	1	0,7	263,894	-

Quanto às linhas de distribuição, pode-se verificar que a linha 1 é a mais forte, pois possui a menor o fator X/R , indicando predominância resistiva. A linha 2 é a mais fraca, pois possui o fator X/R muito maior do que os outros, indicando predominância altamente indutiva. Já o linha 3 é intermediária, pois possui um fator X/R , intermediário entre as outras duas, ainda que seja predominantemente indutiva.

3.2 Modelagem das Cargas Constituintes no *Smart Grid*

A Figura 11 ilustra as cargas que pertencem ao alimentador 1.

Figura 11 – Cargas do alimentador 1



As Figura 12 e Figura 13, apresentam as cargas contidas no alimentador 2.

Figura 12 – Carga VSI do alimentador 2

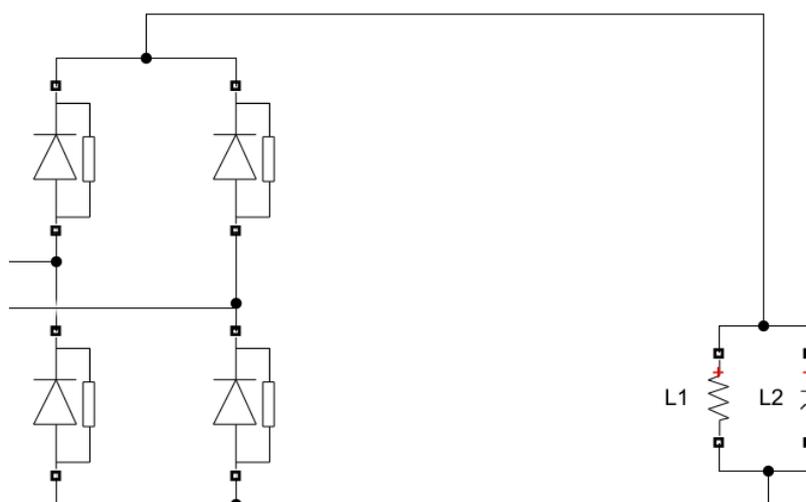
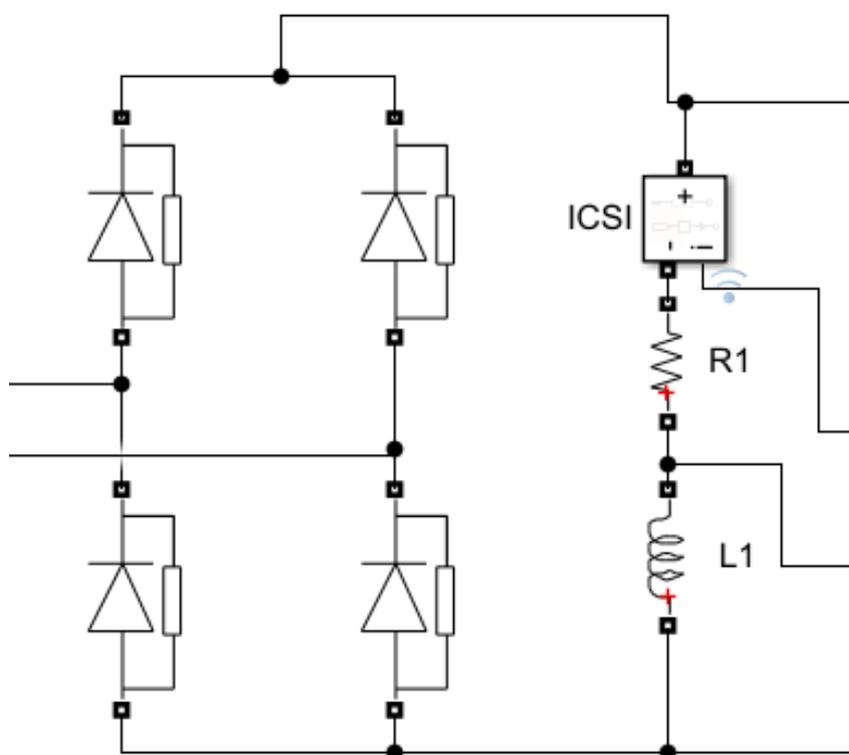
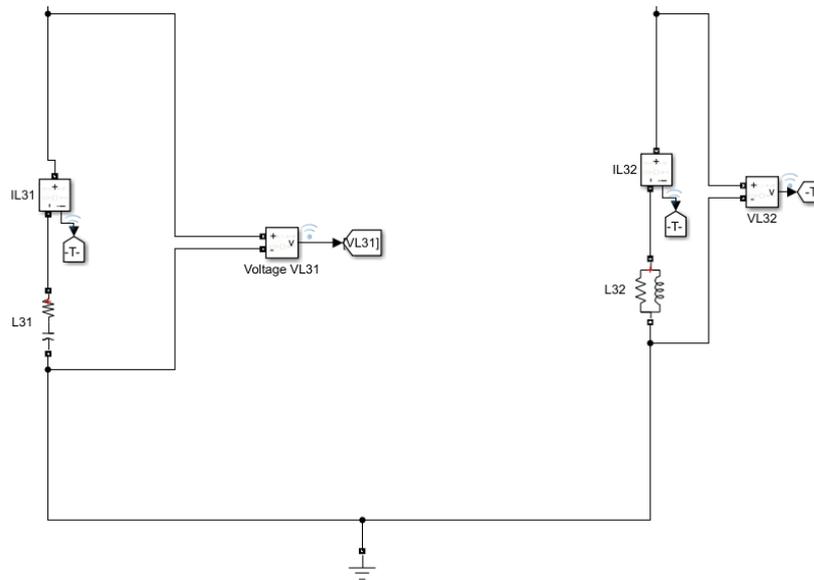


Figura 13 – Carga CSI do alimentador 2



Já a Figura 14, ilustra as cargas contidas no alimentador 3.

Figura 14 – Cargas do alimentador 3



A modelagem das cargas foi realizada como impedância constante e, assim, aumentando a tensão de abastecimento, a potência nominal entregue aumenta. A modelagem segue o mesmo padrão obtido para os alimentadores e suas respectivas linhas de distribuição. Cada carga possui sua peculiaridade, o que a torna única no sistema. A Tabela 5 ilustra os parâmetros das cargas, que foram adotados de forma genérica, a fim de se obter cargas dos mais diversos tipos no sistema.

Tabela 5 – Parâmetros das cargas

Carga	R (Ω)	L (mH)	C (mF)	S (kVA)
L11	16,13	0	0	3
L12	18,15	27,80	0	2,3
L21	32,03	0	0,94	4,6
L22	32,5	1	0	1,33
L31	0	0	0,16	3
L32	48,4	74	0	2

Ainda pela Tabela 5, R representa a resistência da carga, L representa a indutância da carga, C representa a capacitância da carga e S representa a potência nominal de cada carga. As cargas L12, L31 e L32 possuem elementos reativos. A carga L11 é uma carga puramente resistiva, enquanto as cargas L21 e L22 são cargas não lineares (conversores eletrônicos), um VSI (*Voltage Source Inverter*) e um CSI (*Current Source Inverter*).

3.3 Anel Parcial G2-G3

Em um primeiro momento, é obtido um algoritmo para o fechamento do anel parcial entre os alimentadores 2 e 3. Foi buscado, neste algoritmo, a formação de um anel

entre os dois alimentadores com menor TO do sistema e tentar obter a maior potência ativa entregue às cargas, em comparação com o sistema radial, e uma TO abaixo de 90% em todos os alimentadores.

A 6 apresenta os parâmetros obtidos por meio da simulação, via Simulink, a qual foram utilizados os critérios para a elaboração do algoritmo.

Tabela 6 – Parâmetros obtidos após fim da simulação, no Simulink

	Pot. Disp. (W)	Pot. Disp. (%)	Pot. Cargas (W)	Pot. Cargas (%)	TO(G1)	TO(G2)	TO(G3)
Sistema Isolado	9773	-	9633	-	97,74	77,38	20,34
G2-G3	9878	1,07	9746	1,17	97,74	43,22	56,60
G2-G3 <- L11	9972	2,04	9882	2,58	39,64	68,76	91,04
G2-G3 <- L11 -> L32	10061	2,95	9929	3,07	59,40	61,84	79,98
Mudança Banco Cap.	9965	1,96	9877	2,53	59,28	59,66	80,36
G1-G2-G3	9838	0,67	9698	0,68	86,32	46,24	64,20

O fluxograma representado na Figura 15 ilustra os passos do algoritmo utilizado para a tomada de decisões no fechamento do anel parcial entre os alimentadores 2 e 3. As simulações estão divididas a cada 15 ciclos, para estabilização do sistema. O sistema se inicia com os alimentadores operando de forma isolada. Quando chega no ciclo 15, as variáveis (taxa de ocupação, potência ativa entregue às cargas, corrente da linha) são lidas, em que a tomada de decisão acontece a taxa de ocupação, ganho de potência ativa ou perdas nas linhas, quando aplicáveis.

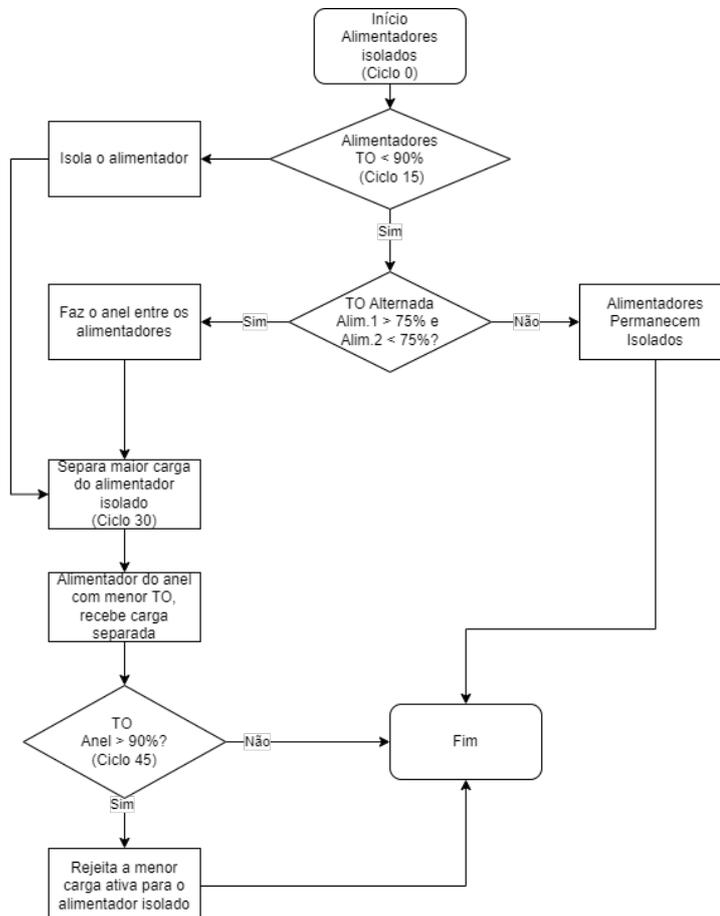


Figura 15 – Fluxograma do Algoritmo do Anel parcial G2-G3

Pelo fluxograma apresentado, pode-se verificar os seguintes pontos:

1. Em todo o sistema há medidores de tensão e corrente. Nos terminais dos geradores, no final das linhas de distribuição, nas barras de cargas e nas linhas que interligam os alimentadores;
2. O algoritmo inicia-se no ciclo zero, onde todos os alimentadores operam isoladamente. A Figura 16 ilustra como estão dispostas as cargas nos alimentadores, neste ciclo.

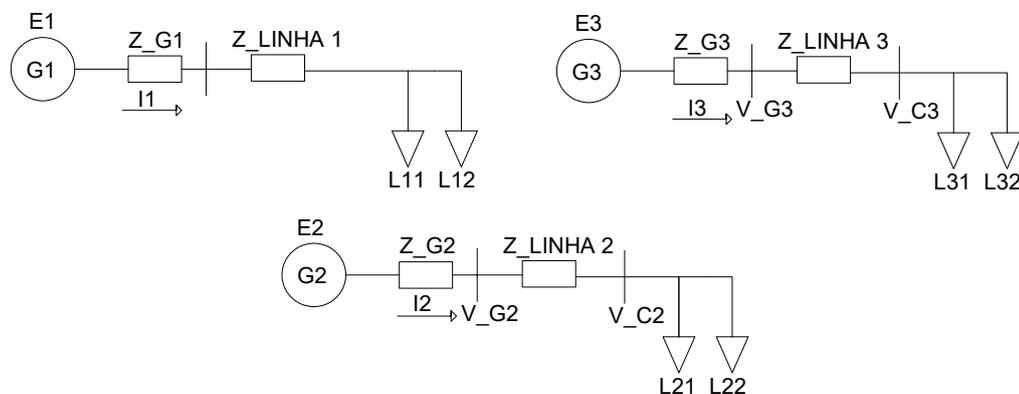


Figura 16 – Ilustração dos alimentadores operando isoladamente - Ciclo 0

3. Após 15 ciclos da simulação são selecionados os dois alimentadores com maior carregamento, que não possuam TO acima de 90%.
4. No mesmo ciclo, verifica-se se um dos alimentadores selecionados possui carregamento superior a 75% e o outro inferior a 75%. Caso positivo, realiza-se o anel destes dois alimentadores. Se não, encerra-se o processo. Após a operação em anel, os alimentadores abastecem as cargas de acordo com a Figura 17.

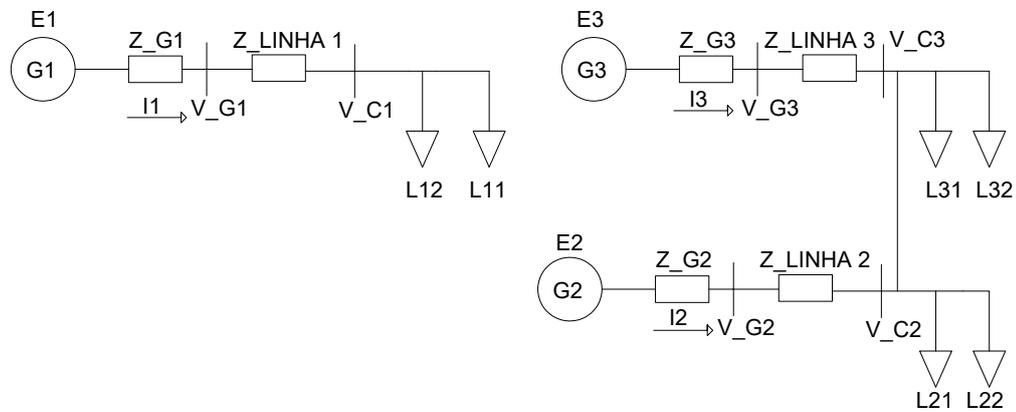


Figura 17 – Ilustração dos alimentadores em anel parcial dos alimentadores 2 e 3 - Ciclo 15

- No ciclo 30, verifica-se se o carregamento do alimentador isolado é maior do que 90%. Caso positivo, a maior carga ativa do alimentador é comutada para o alimentador com menor taxa de ocupação do anel. A nova configuração é ilustrada na Figura 18.

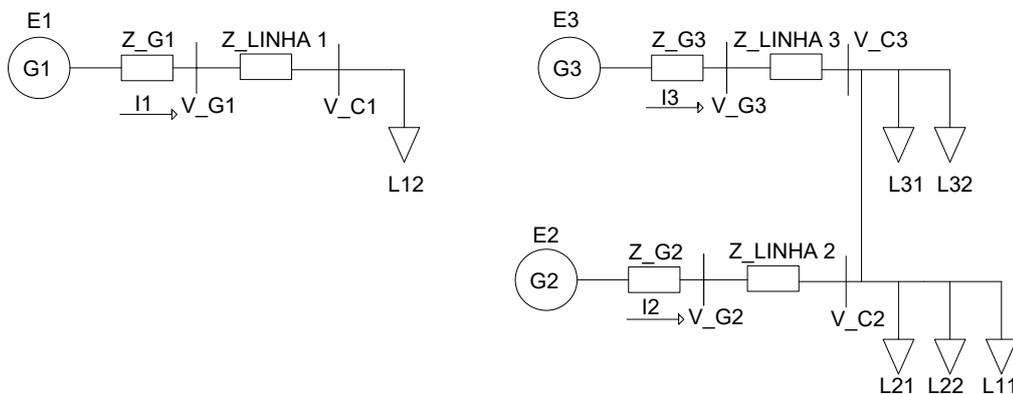


Figura 18 – Ilustração dos alimentadores em anel parcial dos alimentadores 2 e 3 - Ciclo 30

6. No ciclo 45, é verificado se algum alimentador do anel possui carregamento acima de 90%. Se possuir, a menor carga ativa do anel é rejeitada (comutada) para o alimentador isolado. Assim, a configuração final é apresentada conforme a Figura 19.

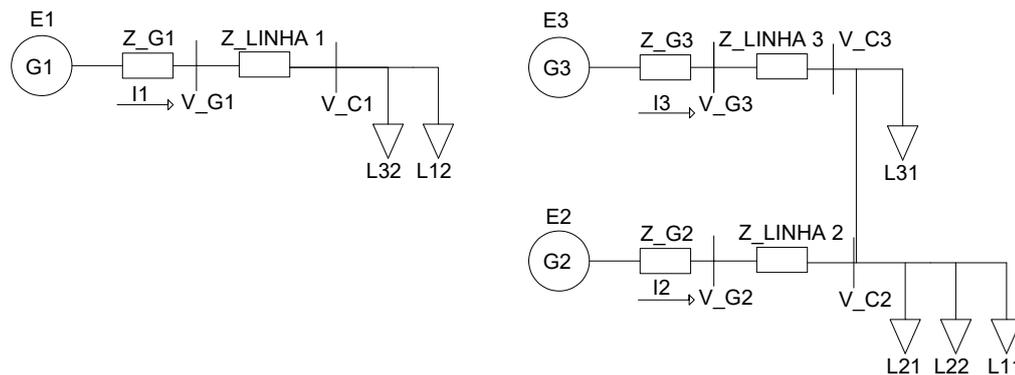


Figura 19 – Anel parcial dos alimentadores 2 e 3 após comutação de cargas - Ciclo 45

7. Por fim, após o ciclo 60, é possível realizar manobras com o banco de capacitores (L31), em conjunto com a realização do anel, para tentar melhorar o perfil de tensão do sistema e, por conseguinte, aumentar a potência ativa entregue às cargas finais.

3.4 Anel Parcial G1-G2

O segundo algoritmo a ser elaborado, foi do anel parcial entre os alimentadores 1 e 2. Foi procurado realizar o anel entre os alimentadores com maior TO, ambos acima de 75%. Ainda foi procurado o ponto que entregasse a maior potência ativa disponível para o sistema e obter uma TO menor do que 90% em todos os alimentadores.

Os resultados obtidos após esta simulação e tomados como base para a elaboração do algoritmo estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros obtidos após fim da simulação no Simulink

	Pot. Disp. (W)	Pot. Disp. (%)	TOG1	TOG2	TOG3	V (V)	V(%)	P ² (A)	P ² (%)
Sistema Isolado	9773	-	97,74	77,38	20,34	217,9	-	892,52	-
G1-G2	9778	0,05	127,60	47,62	20,34	217,3	-0,26	1157,82	29,72
G1-G2 -> L11	9921	1,51	86,82	31,00	80,60	218,1	0,08	866,31	-2,94
G1-G2-G3	9838	0,67	86,32	46,24	64,20	217,0	-0,40	901,41	1,00

O fluxograma apresentado na Figura 20 ilustra o algoritmo utilizado para a tomada de decisões no fechamento do anel parcial entres os alimentadores 1 e 2.

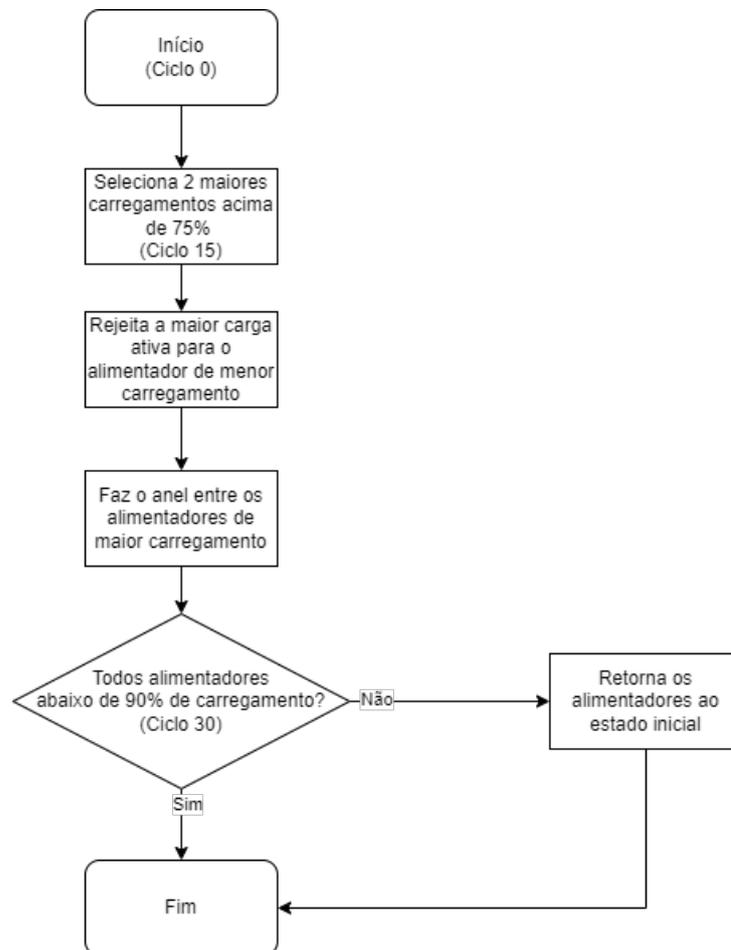


Figura 20 – Fluxograma do Algoritmo do Anel parcial G1-G2

Este fluxograma apresentado apresenta uma forma mais simples do que o anterior, devido à natureza das cargas iniciais, e não haver outra solução possível após o trigésimo ciclo que não manobrar o banco de capacitores. Assim, verifica-se os seguintes pontos:

1. O algoritmo inicia-se no ciclo zero, onde todos os alimentadores operam isoladamente, como foi apresentado no fluxograma do anel parcial G2-G3.
2. Após 15 ciclos da simulação, quando o sistema estabiliza, são selecionados os dois alimentadores com maior carregamento, que estejam com uma taxa de ocupação acima de 75%.
3. No mesmo ciclo, a maior carga ativa entre estes dois alimentadores é rejeitada para o alimentador de menor carregamento do sistema e, posteriormente, realiza-se o anel entre os alimentadores de maior carregamento. Após a operação em anel, os alimentadores abastecem as cargas de acordo com a Figura 21.

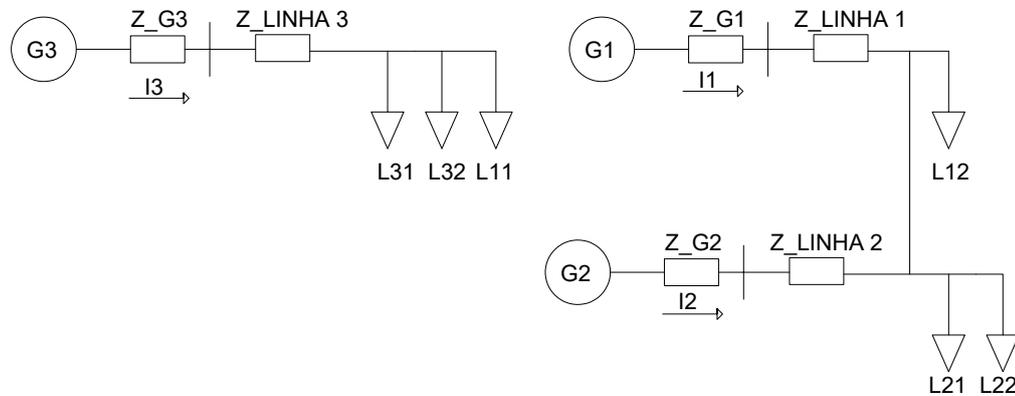


Figura 21 – Ilustração dos alimentadores em anel parcial dos alimentadores 1 e 2

4. Após o ciclo 30, é possível realizar manobras com o banco de capacitores (L31).

3.5 Anel Parcial G1-G3

O terceiro algoritmo elaborado é do anel parcial entre os alimentadores 1 e 3. Para este sistema foi buscado realizar o anel entre os alimentadores de maior e menor TO, obter a maior potência ativa disponível nos terminais dos geradores e redução de perdas nas linhas acima de 10%.

Os resultados obtidos tomados para a elaboração do algoritmo, nesta etapa, é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros obtidos após fim da simulação, no Simulink

	Pot. Disp. (W)	Pot. Disp. (%)	TOG1	TOG2	TOG3	$I^2(A)$	$I^2(\%)$
Sistema Isolado	9773	-	97,74	77,38	20,34	892,52	-
G1-G3	9792	0,19	127,60	47,62	20,34	775,30	-13,13
G1-G2-G3	9838	0,67	86,32	46,24	64,20	901,41	1,00

O fluxograma apresentado na Figura 22 ilustra o algoritmo utilizado para a tomada de decisões no fechamento do anel parcial entres os alimentadores 1 e 2.

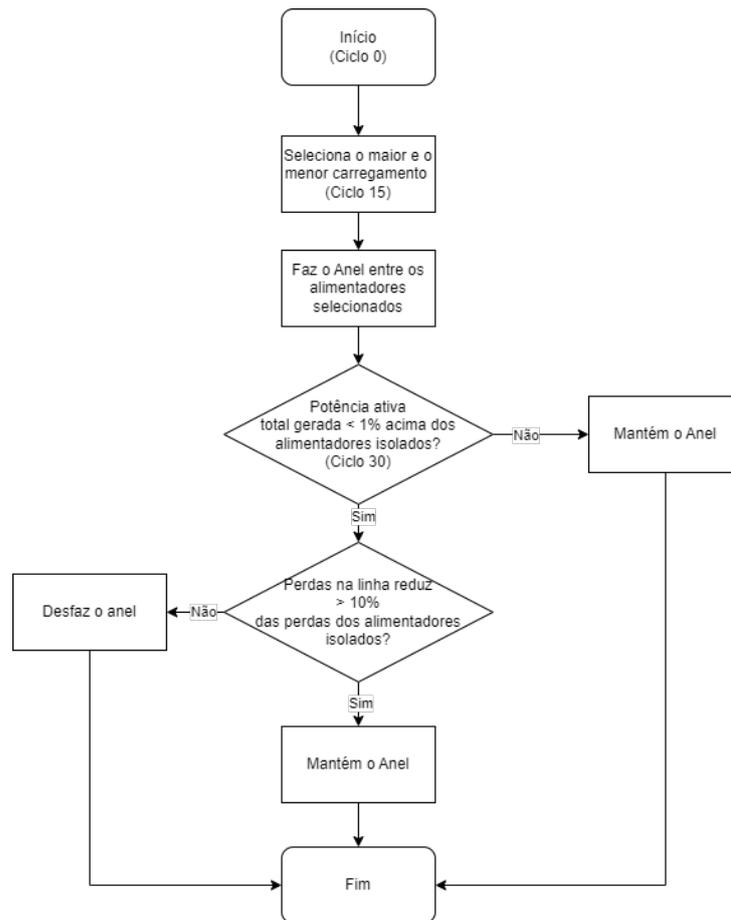


Figura 22 – Fluxograma do Algoritmo do Anel parcial G1-G3

Este fluxograma apresentado apresenta o algoritmo que encontrou os melhores resultados para o anel parcial dos alimentadores 1 e 3. Dessa forma, pontua-se:

1. Inicia-se no ciclo zero, onde todos os alimentadores operam isoladamente, como foi apresentado no fluxograma do anel parcial G2-G3.
2. Após 15 ciclos, são selecionados os alimentadores com maior e menor carregamentos e fecha-se o anel entre eles. Após a operação em anel, os alimentadores abastecem as cargas de acordo com a Figura 23.

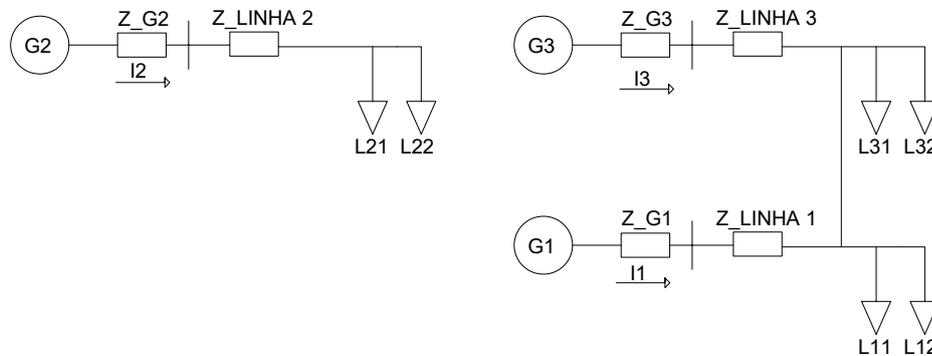


Figura 23 – Ilustração dos alimentadores em anel parcial dos alimentadores 1 e 3

3. Após o ciclo 30 é verificado se o ganho de potência ativa entregue às cargas, está acima de 1% superior ao entregue pelo conjunto no sistema isolado. Caso contrário, verifica-se se as perdas na linha de distribuição são reduzidas em mais de 10% das perdas nas linhas do sistema isolado. Se positivo, mantém o anel. Se não, volta ao estado isolado original.
4. Por fim, após o ciclo 45, é possível realizar manobras com o banco de capacitores (L31) para tentar melhorar o perfil de tensão nas cargas.

3.6 Interseção dos Algoritmos

Estabelecidos os critérios para realizar o anel parcial em cada etapa, realiza-se a interseção dos algoritmos, a qual busca-se adquirir o ponto ótimo para cada distribuição de cargas diante dos alimentadores verificados. Esta interseção é representada pela Figura 24, onde a hachura amarela representa a interseção da seção 3.3 e 3.5. A azul, a interseção entre 3.3 e 3.4. O verde, entre 3.4 e 3.5. E o vermelho, representa a interseção entre os três algoritmos.

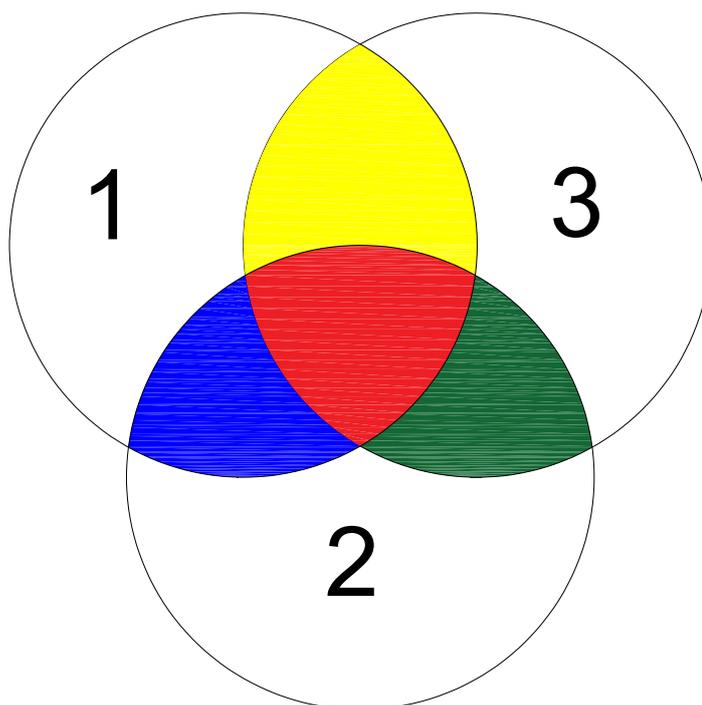


Figura 24 – Ponto de interseção dos algoritmos

O fluxograma ilustrando a interseção dos algoritmos e construindo o caminho final de tomada de decisões, é apresentado na Figura 25.

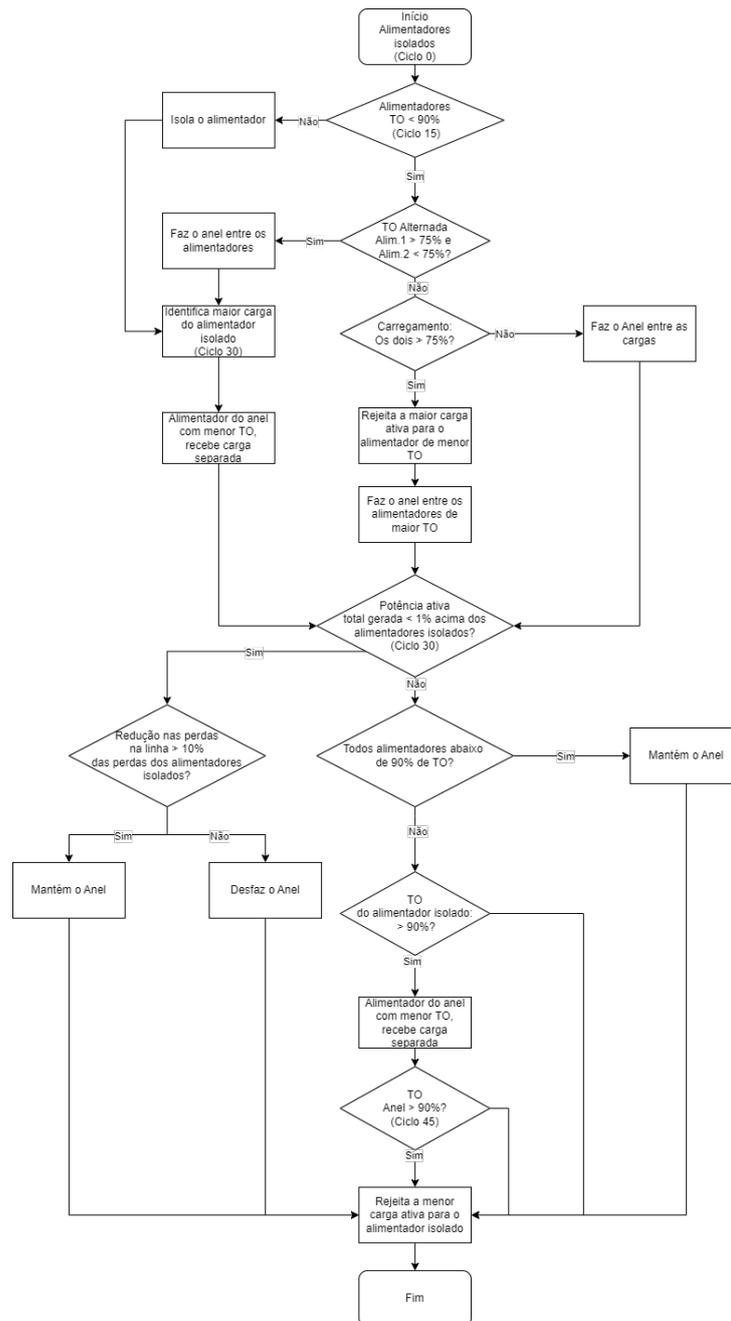


Figura 25 – Fluxograma do Algoritmo do Anel Parcial

O fluxograma apresentado tem como objetivo determinar a melhor opção na tomada de decisão, levando em consideração a disposição das cargas nos alimentadores. Ele é um algoritmo que ajuda a escolher a melhor alternativa, considerando os diferentes cenários possíveis e as informações disponíveis sobre a distribuição das cargas.

1. Inicia-se no ciclo zero, onde todos os alimentadores operam isoladamente, como foi apresentado no fluxograma do anel parcial G2-G3.
2. Após 15 ciclos, são selecionados os alimentadores com maiores carregamentos, que possuem uma taxa de ocupação menor do que 90%.

3. O algoritmo verifica a taxa de ocupação dos alimentadores. Se um estiver acima de 75% e o outro abaixo, conecta-os em anel. Se ambos estiverem acima de 75%, a carga mais representativa é movida para o alimentador menos ocupado e, em seguida, os alimentadores são conectados em anel. Se ambos estiverem abaixo de 75%, apenas conecta-os em anel.
4. Depois de 30 ciclos, verifica-se se a potência gerada é inferior a 1% em relação ao sistema isolado e se as perdas nas linhas são reduzidas em mais de 10%. Se sim, mantém-se o anel. Caso contrário, desfaz-se o anel. Se a potência gerada for maior do que 1%, verifica-se se todos os alimentadores têm menos de 90% de ocupação. Se sim, mantém-se o anel e encerra-se o processo. Caso contrário, transfere-se a maior carga do alimentador mais carregado para o menos carregado no anel.
5. No ciclo 45, verifica-se se a taxa de ocupação de uma das cargas do anel é maior do que 90%. Caso positivo, rejeita-se a menor carga ativa para o alimentador isolado. Caso negativo, encerra-se o processo.
6. Após o ciclo 60, é possível realizar manobras com o banco de capacitores (L31) para tentar melhorar o perfil de tensão nas cargas, menor perdas nas linhas de distribuição e maior potência ativa entregue às cargas finais (consumidor final).

4 Resultados e Discussão

O sistema foi simulado no Simulink, com fechamento automático dos alimentadores em anel e transferência automática de cargas entre eles, usando o algoritmo final. O objetivo é melhorar o perfil de tensão (tornando a tensão entregue às cargas finais mais uniformes) e, assim, maximizar a potência ativa fornecida às cargas. Para validar os resultados, foram simuladas três situações diferentes, em que cada alimentador foi inicialmente considerado como o mais carregado.

4.1 Cargas Originais do Sistema

O sistema base se iniciou com o alimentador 1 como sendo o mais carregado, enquanto o alimentador 3 foi o menos carregado. Ao final dos 75 ciclos, pode-se verificar nas Figura 26, Figura 27 e Figura 28, o perfil da tensão de terminal, fim de linha e a tensão que alimenta cada uma das cargas do conjunto. É possível notar que o perfil de tensão em todos os pontos melhorou, conseguindo uma maior uniformidade, minimizando a grande lacuna anteriormente existente, quando os alimentadores operavam de forma isolada.

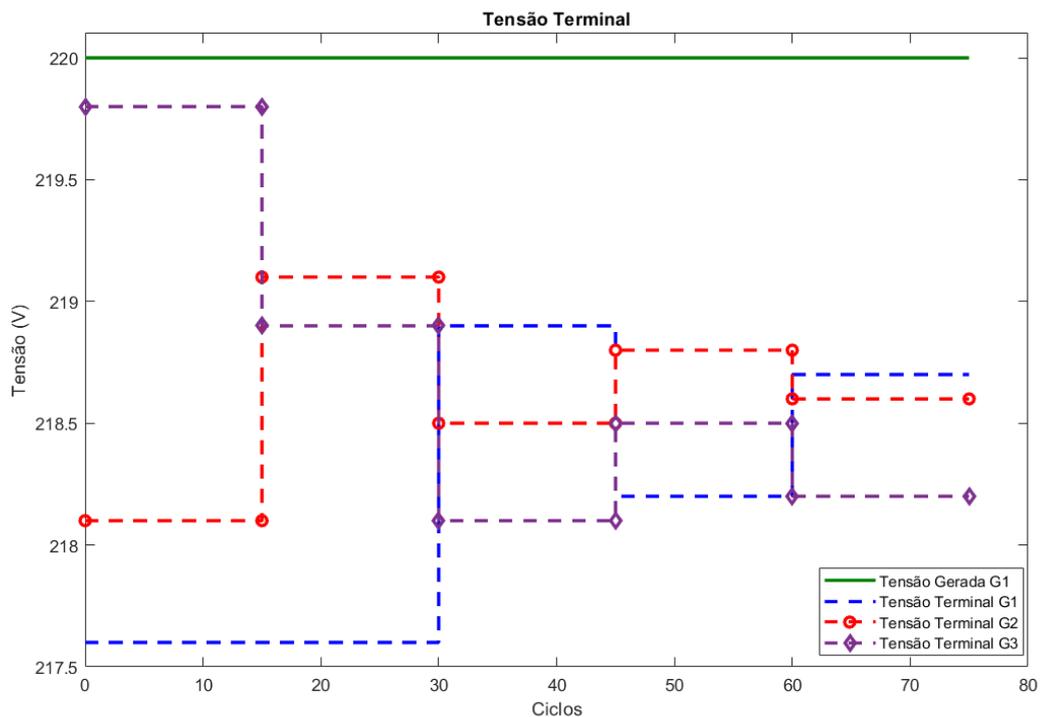


Figura 26 – Tensão gerada e de terminal de cada alimentador

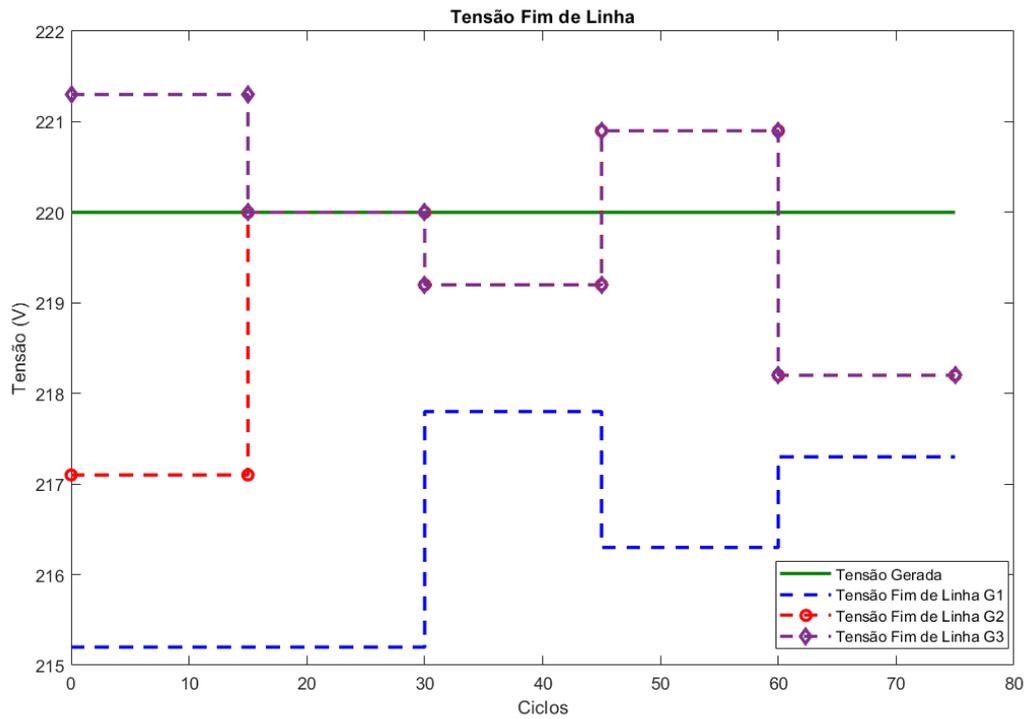


Figura 27 – Tensão no fim de linha de cada alimentador

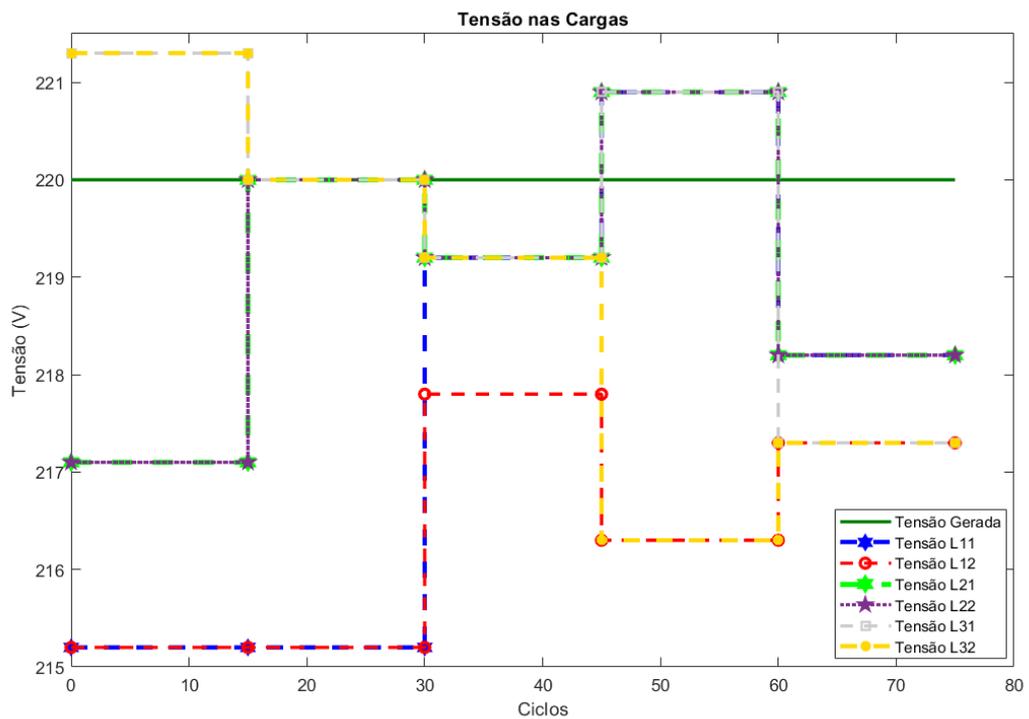


Figura 28 – Tensão de alimentação de cada carga do sistema

A Figura 29 apresenta a tensão nas cargas nos ciclos 15, 60 e 75 (alimentadores isolados, final da manobra do anel e manobra do banco de capacitores), cujos momentos

são os alimentadores atuando de forma isolada, o final do algoritmo após fechamento do anel e comutação de cargas e manobra manual do banco de capacitores. Nela, pode-se verificar a maior uniformidade da tensão que chega em cada carga ao se manobrar o banco de capacitores. A partir deste gráfico é possível verificar que a tensão média que chega nas cargas é superior à tensão média dos alimentadores isolados, cerca de 1,5V. Já a tensão média quando se reposiciona o banco de capacitores fica abaixo do sistema isolado, embora a discrepância entre as maiores e menores tensões entregues seja mitigada.

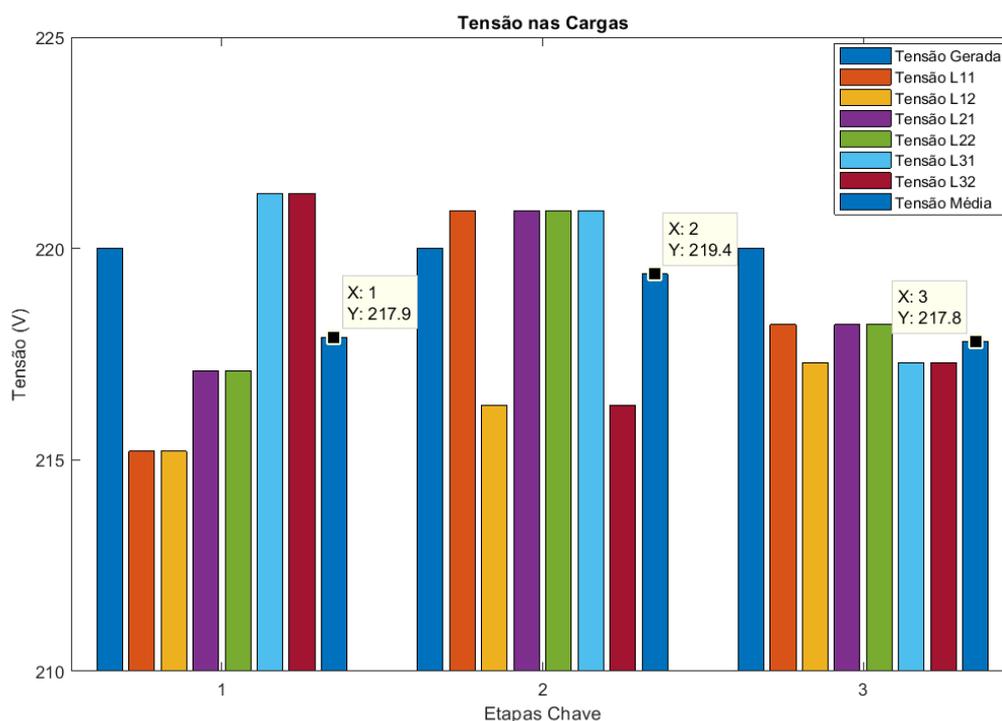


Figura 29 – Tensão em cada carga nos ciclos 15, 60 e 75

A Tabela 9 ilustra o comportamento do algoritmo para a configuração do sistema e, no final, ilustra os resultados obtidos após realizar a malha do sistema completo.

- Nos primeiros quinze ciclos o sistema operou de forma isolada, com cada alimentador abastecendo suas cargas nativas, como ilustrado na Figura 16;
- Entre os ciclos quinze e trinta, o algoritmo detectou o carregamento de todos os alimentadores e escolheu os dois maiores, desde que estes não estivessem com carregamento acima de 90% do nominal, para realizar a malha, apresentado na Figura 17;
- Como o objetivo era melhorar o perfil de tensão e aliviar o carregamento dos alimentadores, entre os ciclos trinta e quarenta e cinco, o algoritmo identifica que o alimentador isolado está com carregamento acima de 90% e transfere a maior carga

do alimentador 1 para o alimentador menos carregado (alimentador 2 recebe a carga L11), conforme a Figura 18;

- Entre os ciclos quarenta e cinco e sessenta, identifica-se que o alimentador 3 possui taxa de ocupação acima de 90% e, assim, o sistema transfere (rejeita) a menor carga ativa no sistema malhado para o alimentador que se encontra isolado, conforme ilustrado na Figura 19;
- Realizando esta última manobra, percebe-se que a taxa de ocupação (TO) dos alimentadores está melhor distribuída, com nenhum alimentador operando a plena carga e possibilitando a recepção de outra eventual carga ativa que possa instalar no sistema sem a ocorrência de sobrecarga;
- Após 60 ciclos, é realizada uma manobra de transferência do banco de capacitores (carga PL31) em conjunto com o sistema malhado, conforme ilustrado na Figura 30, para verificar se há melhoria no perfil de tensão ou redução de perdas nas linhas.

Tabela 9 – Carregamento dos alimentadores

	PL11	PL12	PL21	PL22	PL31	PL32	TO(G1)	TO(G2)	TO(G3)
Sistema Isolado	2870	1913	2679	1159	0	1012	97,74	77,38	20,34
G2-G3	2870	1913	2781	1182	0	1000	97,74	43,22	56,60
G2-G3 <- L11	2979	1960	2771	1179	0	993	39,64	68,76	91,04
G2-G3 <- L11 -> L32	3023	1934	2810	1195	0	967	59,40	61,84	79,98
Mudança Banco Cap.	2951	1952	2824	1174	0	976	59,28	59,66	80,36
G1-G2-G3	2919	1946	2692	1164	0	977	86,32	46,24	64,20

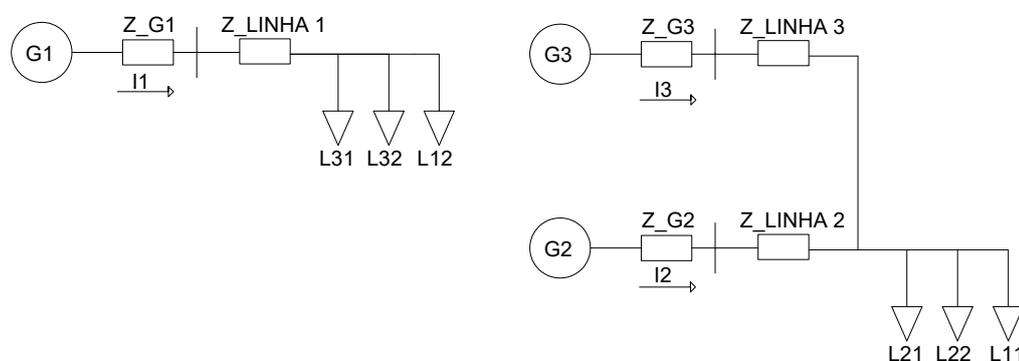


Figura 30 – Anel parcial após manobra do banco de capacitores

O próximo ponto a se destacar é sobre a disponibilidade de potência ativa que o sistema pode entregar às cargas e quanto de potência ativa é entregue às cargas, efetivamente. A Tabela 10 ilustra a potência ativa que o sistema consegue entregar, a potência ativa entregue às cargas do sistema, a tensão média em cada mudança de estado do sistema e as perdas médias nas linhas em cada mudança de estado do sistema. Todo o comparativo percentual apresentado na tabela está sendo realizado em relação ao sistema isolado. A tabela apresenta uma melhoria no perfil de tensão, após o anel receber a carga L11 e comutar a carga L32 para o alimentador isolado (G2-G3 <- L11 -> L32), aumentando a tensão de alimentação média das cargas em 0,69%, além de melhorar a potência ativa disponível e a entregue às cargas em 2,95% e 3,07%, respectivamente, antes de realocar o banco de capacitores. Estes dados de potência ativa, principalmente a potência ativa entregue ao cliente final, significam um aumento de faturamento considerável para uma concessionária de energia. Comutando o banco de capacitores para o anel parcial, nota-se uma piora nos perfis de tensão, porém há perdas nas linhas significativamente menores. Enquanto há um aumento de perdas nas linhas, após o anel e a comutação das cargas ativas de 9,33% em relação ao sistema isolado, a inclusão do banco de capacitores no anel faz com que as perdas nas linhas reduzam em 21,50% em relação ao sistema isolado. Esta etapa de transferência do banco de capacitores após a formação do anel foi bastante significativa, pois, além de aumentar a potência ativa entregue às cargas em 2,53%, ainda alivia as linhas de distribuição de forma que pode abastecer outras cargas pela mesma linha, sem necessidade de alterar a rede ou parametrizar toda a linha de distribuição.

A Tabela 10 ilustra, ainda, que a realização de uma malha entre os três alimentadores para este sistema não é vantajosa, já que não há ganho em cima do anel parcial G2-G3 que justifique a realização dessa malha. Mesmo que haja a comparação com o sistema isolado, o sistema em anel fechado completo não justificaria o esforço para ter um ganho de potência entregue de apenas 0,68%.

Tabela 10 – Parâmetros obtidos após fim da simulação

	Pot. Disp. (W)	Pot. Disp. (%)	Pot. Cargas (W)	Pot. Cargas (%)	V (V)	V(%)	I^2 (A)	I^2 (%)
Sistema Isolado	9773	-	9633	-	217,9	-	892,52	-
G2-G3	9878	1,07	9746	1,17	218,4	0,24	805,17	-9,79
G2-G3 <- L11	9972	2,04	9882	2,58	219,0	0,50	798,70	-0,80
G2-G3 <- L11 -> L32	10061	2,95	9929	3,07	219,4	0,69	975,77	9,33
Mudança Banco Cap.	9965	1,96	9877	2,53	217,8	-0,05	700,64	-21,50
G1-G2-G3	9838	0,67	9698	0,68	217,0	-0,4	901,41	1,00

Pode-se verificar, pela Tabela 11, que após o fechamento do anel parcial, juntamente com a comutação de cargas, fez com que a discrepância entre as cargas sendo abastecidas com maior tensão e as com menor tensão foi reduzida. Ainda, após a manobra com o banco de capacitores, a tensão que cada carga recebe fica bem equalizada.

Tabela 11 – Tensão

	Isolado	Anel G2-G3 <- L11 -> L32	Mudança Banco Caç
V_L11 (V)	215,2	220,9	218,2
V_L12 (V)	215,2	216,3	217,3
V_L21 (V)	217,1	220,9	218,2
V_L22 (V)	217,1	220,9	218,2
V_L31 (V)	221,3	220,9	217,3
V_L32 (V)	221,3	216,3	217,3
V_L11 (%)	-	2,65	1,39
V_L12 (%)	-	0,5	1,0
V_L21 (%)	-	1,75	0,5
V_L22 (%)	-	1,75	0,5
V_L31 (%)	-	-0,2	-1,8
V_L32 (%)	-	-2,3	-1,8

Assim, pode-se verificar que a formação do anel parcial entre alimentadores pode ser uma opção altamente benéfica para aumentar a potência ativa entregue aos clientes finais e melhorar o perfil de tensão entregue a eles. Além disso, a manobra manual do banco de capacitores também pode ser uma grande aliada na melhoria do perfil de tensão, reduzindo as perdas nas linhas de forma significativa, como observado neste caso.

4.2 Validação dos resultados

4.2.1 Alimentador 3 com maior Carregamento

Para validar os resultados, utilizou-se a troca de cargas entre os alimentadores para que o alimentador 3 possuísse a maior TO. A nova configuração pode ser visualizada na Figura 31.

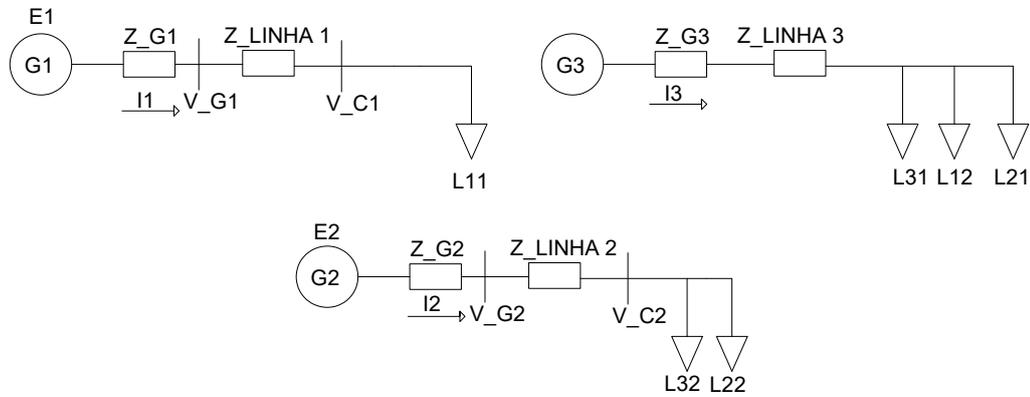


Figura 31 – Configuração para o alimentador 3 ser o mais carregado

Após o ciclo de número 30, o algoritmo verificou que o ganho de potência ativa gerada foi menor do que 1% e, assim, removeu o anel, voltando ao estado original do sistema. O perfil de tensão ao longo do número de ciclos pode ser visualizado nas Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

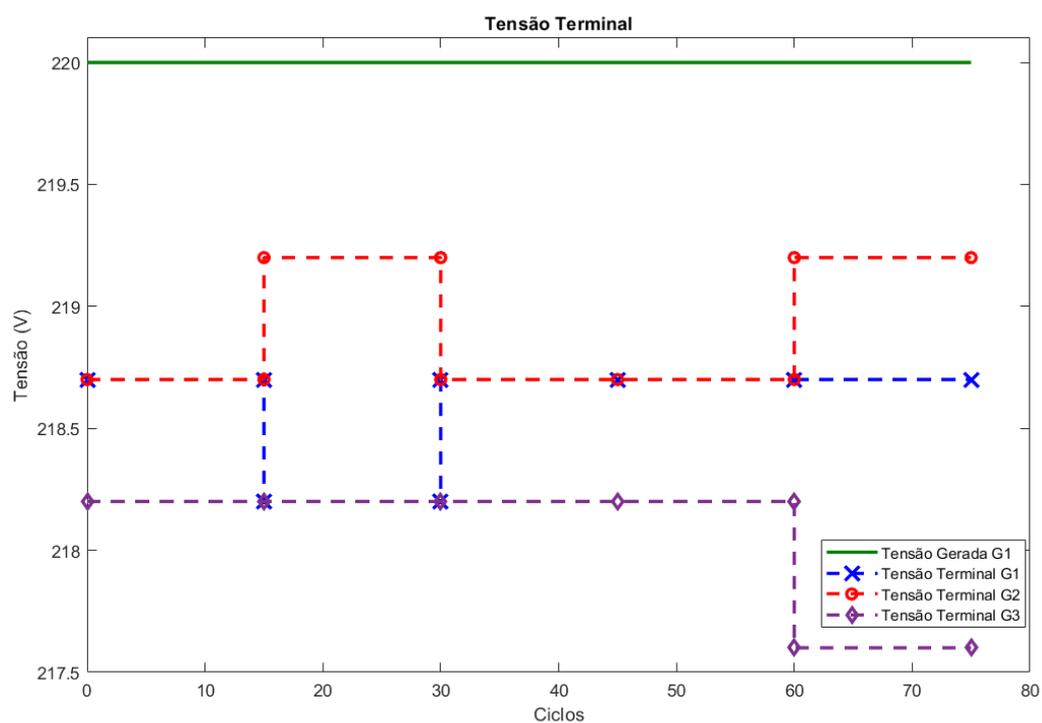


Figura 32 – Tensão gerada e de terminal de cada alimentador

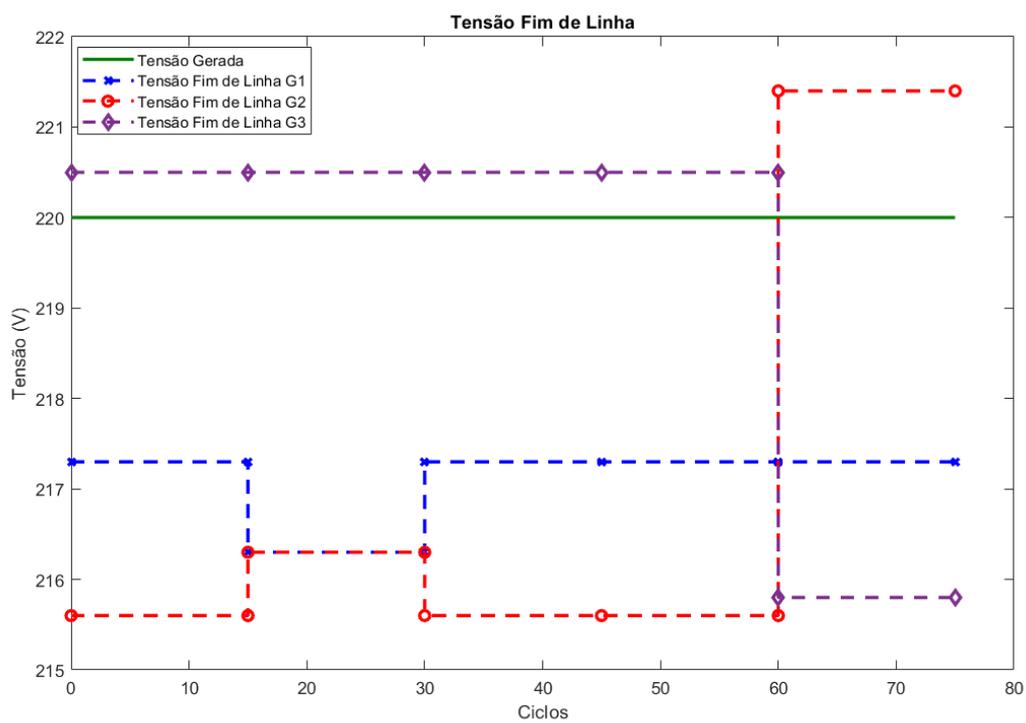


Figura 33 – Tensão no fim de linha de cada alimentador

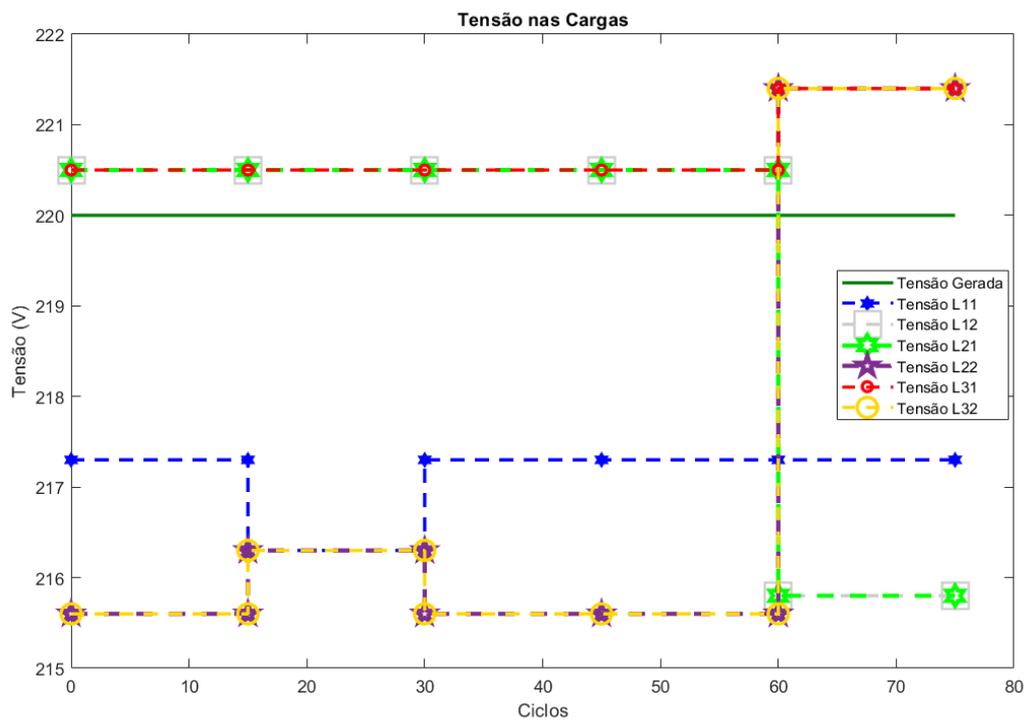


Figura 34 – Tensão de alimentação de cada carga do sistema

A Figura 35 apresenta a tensão nas cargas nos ciclos 15, 30 e 75. Como não houve a formação do anel no resultado final, pode-se verificar que a mudança do banco de capacitores para o alimentador 2 (possui cargas não lineares e não compartilha o mesmo alimentador com o banco) fez com que a tensão média entregue às cargas fosse aumentada, porém a diferença entre a tensão de maior intensidade aumentou em relação à de menor intensidade.

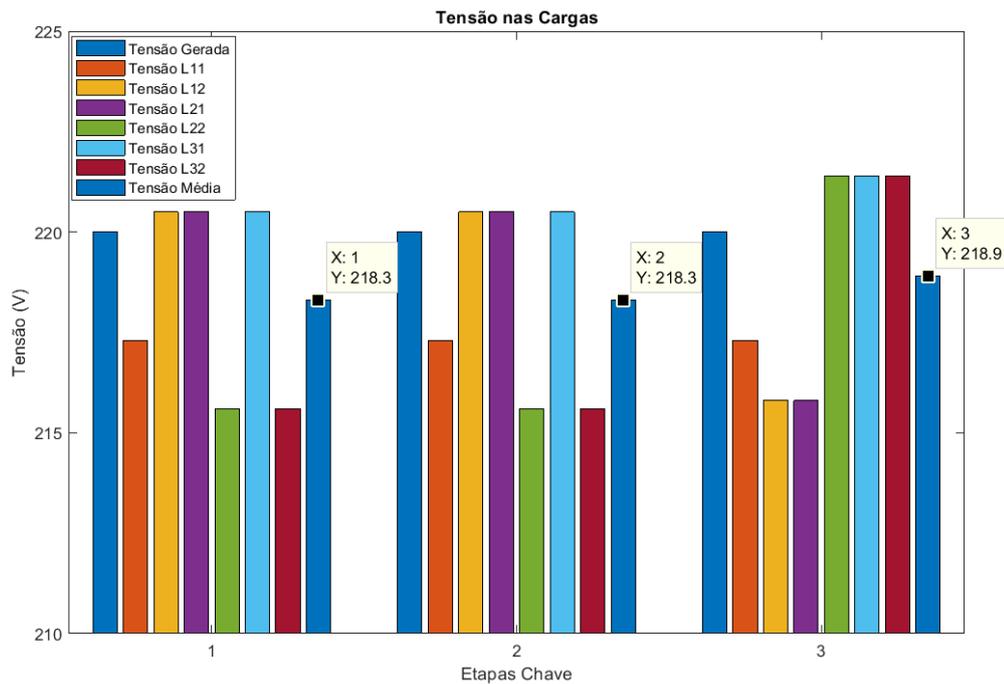


Figura 35 – Tensão em cada carga nos ciclos 15, 60 e 75

A Tabela 12 apresenta o comportamento do algoritmo para a configuração do sistema, bem como os resultados obtidos após a realização da malha do sistema completo. Observa-se que, nessa ocasião, quando o sistema se encontrava isolado, a manobra com o banco de capacitores não apresentou melhorias na TO.

Tabela 12 – Carregamento dos alimentadores

	PL11	PL12	PL21	PL22	PL31	PL32	TO(G1)	TO(G2)	TO(G3)
Sistema Isolado	2927	2009	2726	1135	0	960	59,26	42,24	95,82
G1-G2	2901	2009	2726	1155	0	966,9	80,22	21,74	95,82
Mudança Banco Cap.	2927	1924	2698	1208	0	1013	59,26	44,68	93,46
G1-G2-G3	2919	1946	2692	1164	0	977	86,32	46,24	64,20

Analisando a Tabela 13, é possível verificar que não houve ganho efetivo na potência ativa disponível para o sistema, nem mesmo na entregue às cargas. Embora o banco de capacitores não tenha conseguido melhorar o perfil de tensão de todas as cargas, pode-se verificar que houve uma redução de perdas na linha de distribuição, possibilitando transportar mais corrente em 8,43%, quando comparado ao sistema isolado, com um ganho mínimo de potência entregue às cargas. Dessa forma, o algoritmo se comportou da forma esperada, não demandando energia desnecessária para uma situação onde não valeria o esforço de se realizar manobra para a formação do anel parcial. Ainda assim, se necessitar transportar mais corrente pela linha, para a chegada de novas cargas, é possível realizar a comutação manual do banco de capacitores.

A Tabela 13 ilustra, ainda, que a realização de uma malha entre os três alimentadores para este sistema não é vantajosa, já que não há ganho em nenhum parâmetro quando comparado ao sistema isolado.

Tabela 13 – Parâmetros obtidos após fim da simulação

	Pot. Disp. (W)	Pot. Disp. (%)	Pot. Cargas (W)	Pot. Cargas (%)	V (V)	V(%)	I ² (A)	I ² (%)
Sistema Isolado	9866	-	9757	-	218,33	-	892,59	-
G1-G2	9889	0,23	9757,9	0,01	218,4	0,03	963,74	7,97
Mudança Banco Cap.	9870	0,04	9770	0,13	218,85	0,24	817,33	-8,43
G1-G2-G3	9838	-0,28	9698	-0,61	217,0	-0,4	901,41	1,00

Pode-se verificar, pela Tabela 17, que após o fechamento do anel parcial, houve um ganho de tensão nas cargas que são abastecidas pelos alimentadores em anel, porém, como já apresentado na Tabela 13, as cargas não recebem mais potência ativa e, assim, a geração não obtém ganhos reais. Após a comutação do banco de capacitores, embora haja uma redução nas perdas nas linhas, há cargas que são abastecidas 2,1% menos de tensão, enquanto outras são abastecidas por 2,7% mais de tensão. A diferença aumenta em relação a quando o sistema está isolado e, a manobra do banco de capacitores, para este caso, tem que ser bem programada para não trazer prejuízos ao cliente final

Tabela 14 – Tensão

	Isolado	Anel G1-G2	Mudança Banco Caç
V_L11 (V)	217,3	216,3	217,3
V_L12 (V)	220,5	220,5	215,8
V_L21 (V)	220,5	220,5	215,8
V_L22 (V)	215,6	216,3	221,4
V_L31 (V)	220,5	220,5	221,4
V_L32 (V)	215,6	216,3	221,4
V_L11 (%)	-	0,5	-
V_L12 (%)	-	-	-2,1
V_L21 (%)	-	-	-2,1
V_L22 (%)	-	0,3	2,7
V_L31 (%)	-	-	0,4
V_L32 (%)	-	0,3	2,7

4.2.2 Troca de Cargas entre Alimentadores 1 e 2

Para esta situação, utilizando as cargas obtidas para o sistema, ignorou-se a parte do algoritmo que necessita ter um ganho de potência ativa acima de 1%, pois todas as outras trocas de carga caíam na situação do **item 4.2.1** e, assim, não seria possível validar se o algoritmo funcionaria em todas as situações. Dessa forma, o alimentador 2 se encontra como sendo o mais carregado do sistema. Ao final dos 75 ciclos, pode-se verificar nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38, o perfil da tensão de terminal, fim de linha e a tensão que alimenta cada uma das cargas do sistema. É possível notar que o perfil de tensão em todos os pontos melhorou, principalmente quando realizou-se a manobra do banco de capacitores. Para este caso, confirma-se que, quando utilizado de forma correta, a comutação do banco de capacitores pode ser um grande aliado na melhoria do perfil de tensão, após executado o anel parcial.

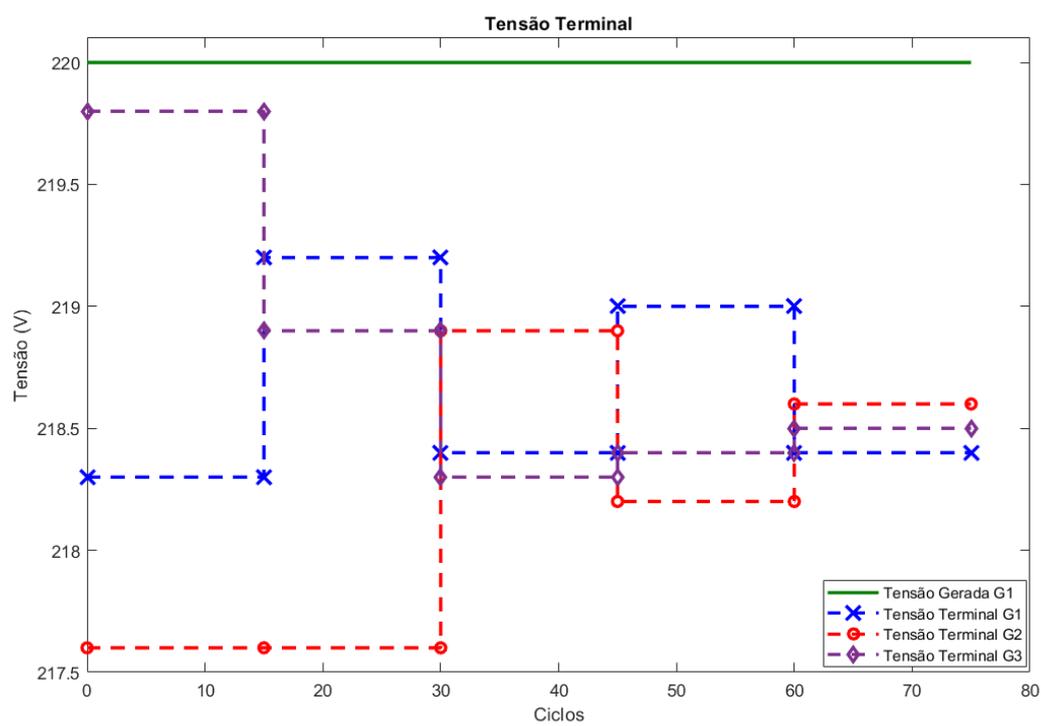


Figura 36 – Tensão gerada e de terminal de cada alimentador

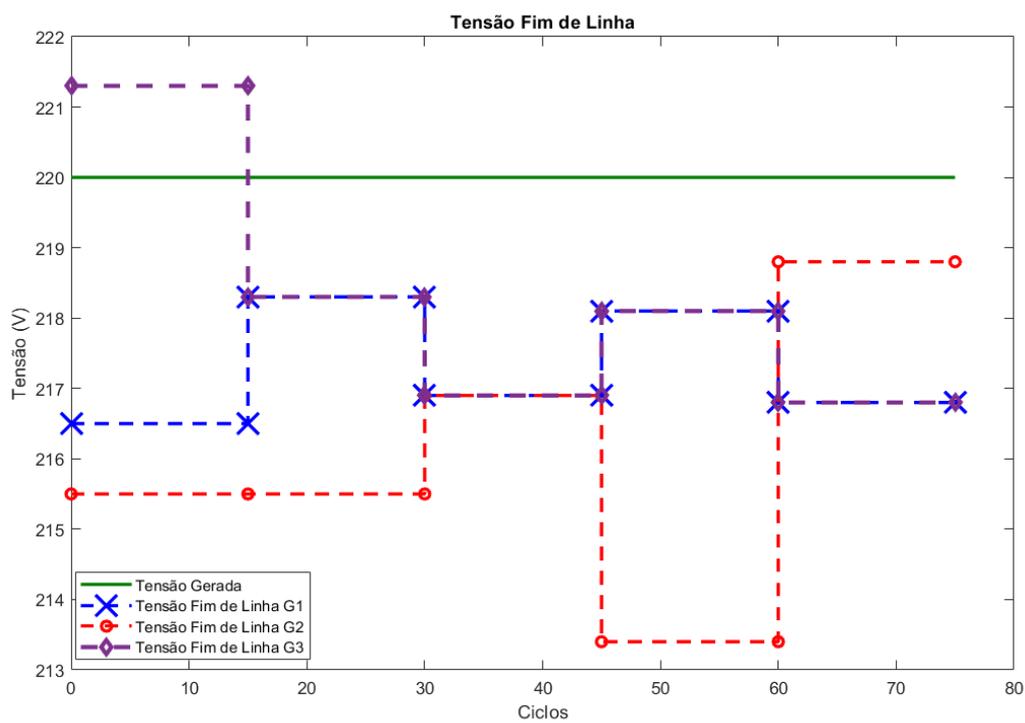


Figura 37 – Tensão no fim de linha de cada alimentador

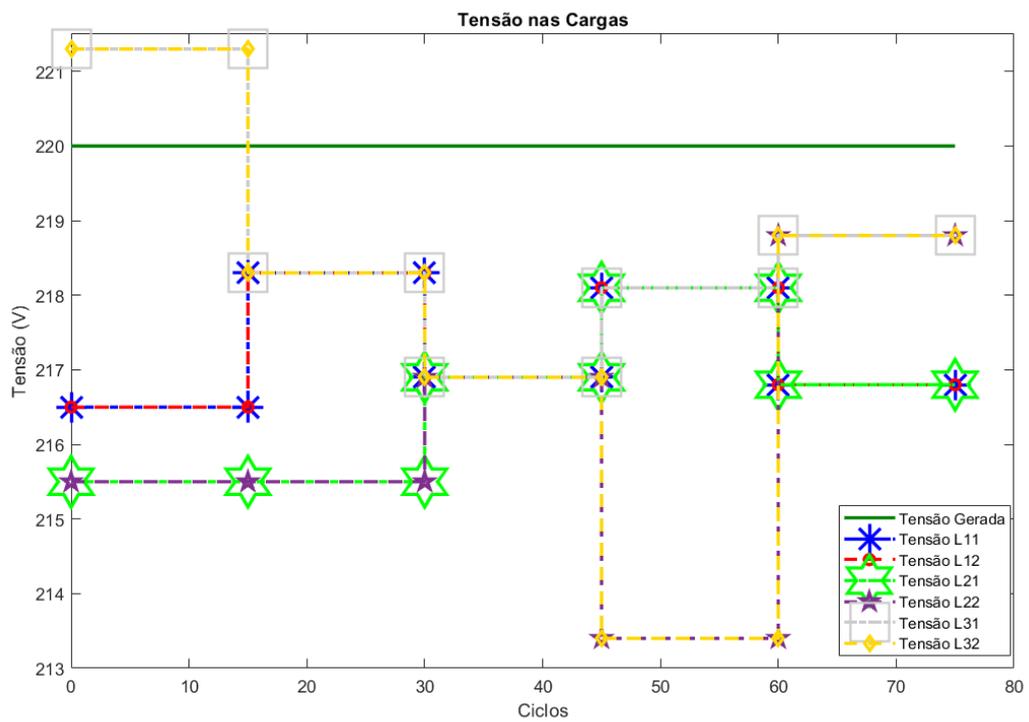


Figura 38 – Tensão de alimentação de cada carga do sistema

A Figura 39 apresenta o gráfico de barras para a tensão em cada carga nos ciclos 15, 60 e 75. Assim como no caso em que o alimentador 1 possui a maior TO, no **item 4.1**, é possível verificar que houve uma maior equalização entre a tensão que abastece as cargas perfil (melhora o perfil de tensão do sistema), enquanto a tensão média entregue às cargas permaneceu a mesma do início, após a manobra com o banco de capacitores.

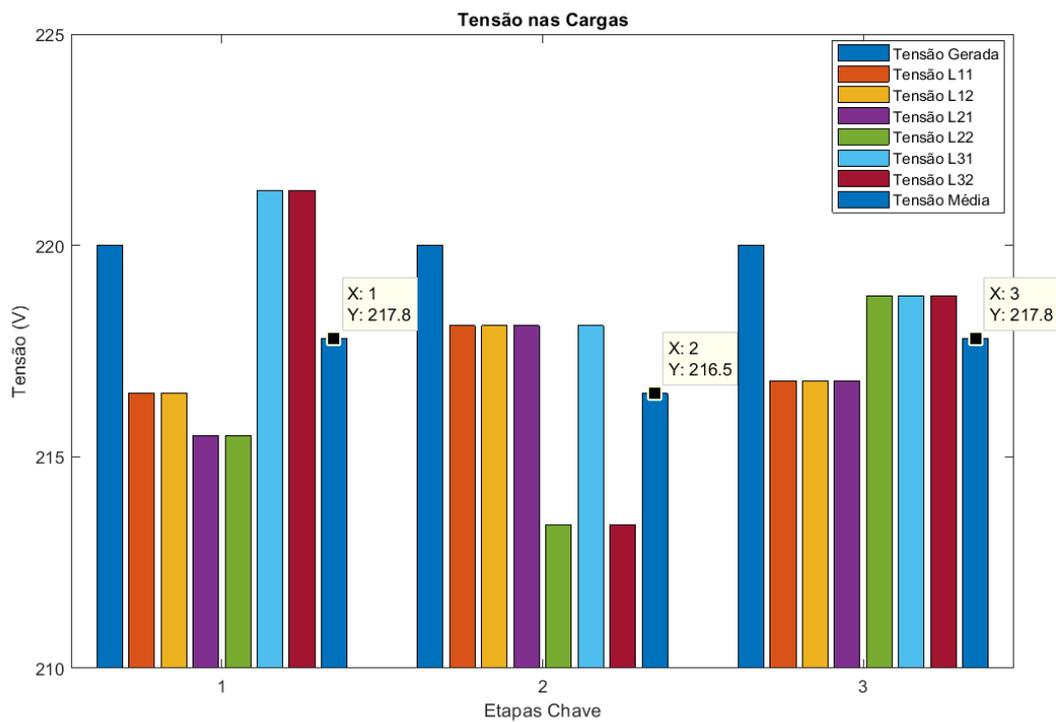


Figura 39 – Tensão em cada carga nos ciclos 15, 60 e 75

O algoritmo se comportou da mesma forma do descrito no **item 4.1** e não será detalhado novamente.

A Tabela 15 ilustra o comportamento do algoritmo para a configuração do sistema e, no final, ilustra os resultados obtidos após realizar a malha do sistema completo. É possível afirmar que a TO melhorou em relação ao sistema isolado. Dessa forma, outros possíveis clientes poderiam ser abastecidos por estes geradores.

Tabela 15 – Carregamento dos alimentadores

	PL11	PL12	PL21	PL22	PL31	PL32	TO(G1)	TO(G2)	TO(G3)
Sistema Isolado	2712	1158	2878	1918	0	1012	78,68	96,96	20,36
G3-G1	2724	1178	2878	1918	0	984,9	53,46	96,96	45,48
G3-G1 <- L21	2684	1163	2916	1945	0	972	90,2	39,1	67,46
G2-G3 <- L21 -> L32	2714	1175	2948	1881	0	940,5	71,10	57,10	68,30
Mudança Banco Cap.	2713	1162	2914	1978	0	988,9	83,76	59,70	54,12
G1-G2-G3	2919	1946	2692	1164	0	977	86,32	46,24	64,20

Analisando a Tabela 16. verifica-se que, após a simulação terminar, há uma perda de potência ativa entregue às cargas e um grande aumento de perdas nas linhas. Este fato pode ser contornado manobrando o banco de capacitores para o alimentador isolado que, neste caso, houve um ganho interessante na potência ativa entregue às cargas e uma redução nas perdas nas linhas de 21,50%, o que é muito significativo.

Tabela 16 – Parâmetros obtidos após fim da simulação

	Pot. Disp. (W)	Pot. Disp. (%)	Pot. Cargas (W)	Pot. Cargas (%)	V (V)	V(%)	I ² (A)	I ² (%)
Sistema Isolado	9800	-	9678	-	217,8	-	898,19	-
G1-G3	9795	-0,05	9682,9	0,05	217,4	-0,18	879,46	-9,79
G1-G3 <- L21	9838	0,39	9680	0,02	216,9	-0,40	951,5	5,94
G1-G3 <- L21 -> L32	9838	0,26	9658,5	-0,20	216,5	0,57	1117,60	9,33
Mudança Banco Cap.	9879	0,80	9755,9	0,80	217,8	0,02	805,43	-21,50
G1-G2-G3	9838	0,67	9698	0,68	217,0	-0,4	901,41	1,00

Pode-se verificar, pela Tabela 17, que após o fechamento do anel parcial e a comutação de cargas, a discrepância entre as tensões que abastecem as cargas foi reduzida. Com a mudança manobra do banco de capacitores, a tensão em cada carga ficou ainda mais equalizada. Embora o perfil de tensão tenha melhorado, em média, nas cargas, existem cargas que chegaram a ter uma grande redução na tensão disponibilizada inicialmente, de até 3,57%. Este problema foi parcialmente sanado com a comutação do banco de capacitores.

Tabela 17 – Tensão

	Isolado	Anel G1-G3 <- L21 -> L32	Mudança Banco Cap
V_L11 (V)	216,5	218,1	216,8
V_L12 (V)	216,5	218,1	216,8
V_L21 (V)	215,5	218,1	216,8
V_L22 (V)	215,5	213,4	218,8
V_L31 (V)	221,3	218,1	218,8
V_L32 (V)	221,3	213,4	218,8
V_L11 (%)	-	0,14	0,23
V_L12 (%)	-	0,14	0,23
V_L21 (%)	-	1,21	0,6
V_L22 (%)	-	-0,97	-1,53
V_L31 (%)	-	-1,45	-1,13
V_L32 (%)	-	-3,57	-1,13

Dessa forma, pode-se verificar que o algoritmo funciona para todas as situações destacadas neste trabalho. Se o ganho de potência ativa entregue às cargas não for suficiente para ter um gasto de energia para realizar a manobra de fechamento do anel, ele volta o sistema para o estado inicial. Se a entrega de potência ativa for vantajosa no fechamento do anel, o algoritmo mantém o anel e realiza as comutações necessárias.

5 Conclusão

Ainda hoje, não há como premissa tornar o sistema radial em parcialmente malhado para se tornar mais eficiente ou melhorar o perfil de tensão nos consumidores. Além disso, o anel não é realizado, atualmente, para redistribuir cargas entre alimentadores.

Este trabalho buscou mostrar que a operação em anel parcial entre alimentadores por longo período de tempo pode trazer benefícios em um ambiente que não é muito explorado por grandes concessionárias. Foi possível verificar que, realizando o anel parcial, pode-se conseguir ganhos consideráveis na potência entregue aos consumidores, aumentando o faturamento do fornecedor de energia elétrica. Ainda, pôde-se verificar que, manobrando um banco de capacitores da maneira correta, ainda pode aliviar as linhas de distribuição, permitindo alimentar novos consumidores sem a necessidade de uma reparametrização das linhas.

Vale ressaltar que a manobra nos sistemas entre alimentadores não pode ser generalizada e, assim, devem ser realizados outros estudos, preferencialmente caso a caso, pois, cada linha de distribuição possui sua peculiaridade, bem como os geradores de diferentes naturezas. Assim como foi apresentado um caso onde foram obtidos ganhos consideráveis, um outro caso apresentado mostrou que o ganho de potência ativa por meio da realização da malha no sistema nem sempre compensa o custo para realizar esta manobra.

Em resumo, a implementação de *Smart Grids* e a estratégia de anéis parciais em alimentadores são importantes evoluções na rede elétrica, permitindo um gerenciamento mais eficiente e confiável do sistema, além de trazer a otimização entre aumento de potência ativa entregue ao consumidor, por parte do anel parcial, e as redução das perdas nas linhas de distribuição, devido ao banco de capacitores. A utilização de algoritmos precisos e bem desenvolvidos é fundamental para determinar a melhor configuração do sistema em cada situação específica.

Para trabalhos futuros, sugere-se a elaboração de algoritmos heurísticos para realizar a varredura de todo o sistema e otimizar a rede malhada de forma a obter um sistema ainda mais eficiente quanto à qualidade de energia e perdas nas linhas de distribuição.

Referências

- ABDI. *Tendências no mundo e no Brasil e possibilidades de desenvolvimento produtivo e tecnológico, Relatório de acompanhamento setorial – Smart Grid*. 2012. Disponível em: <https://www.eco.unicamp.br/neit/images/stories/arquivos/Relatorios_NEIT/Smart-Grid-Marco-de-2012.pdf>. 24, 25
- ALFRED, R. *Aug. 14, 1888: I Sing the Meter Electric*. 2008. <https://www.wired.com/2008/08/dayintech-0814/>. Acesso em: 28/11/2021. 18
- ALI, A. S. *Smart grids: opportunities, developments, and trends*. [S.l.]: Springer, 2013. 13
- ASGI-WORLD ECONOMY FORUM. *Accelerating Smart Grid Investments*. 2009. <http://www3.weforum.org/docs/WEF_SmartGrid_Investments_Report_2009.pdf>. Acesso em: 28/11/2021. 25
- BHATT, A. *Electronic Energy Meter or Electricity Meter*. 2021. <https://www.engineersgarage.com/electronic-energy-meter-or-electricity-meter/>. Acesso em: 28/11/2021. 9, 18, 19
- BUTT, O. M.; ZULQARNAIN, M.; BUTT, T. M. Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network. *Ain Shams Engineering Journal*, Elsevier, v. 12, n. 1, p. 687–695, 2021. 13, 14
- CHEN, T.-H. et al. Feasibility study of upgrading primary feeders from radial and open-loop to normally closed-loop arrangement. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 1308–1316, 2004. 21, 22
- GELLINGS, C. Estimating the costs and benefits of the smart grid: a preliminary estimate of the investment requirements and the resultant benefits of a fully functioning smart grid. *Electric Power Research Institute (EPRI), Technical Report (1022519)*, v. 1, 2011. 16
- GHARAVI, H.; GHAFURIAN, R. Smart grid: The electric energy system of the future [scanning the issue]. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, n. 6, p. 917–921, 2011. 16
- JAVED, M. R.; MAHMOOD, T.; CHOUDHRY, M. A. Performance analysis of static transfer switch using matlab/simulink. In: IEEE. *2015 Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*. [S.l.], 2015. p. 1–5. 20
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; ROBBA, E. J. *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. [S.l.]: Editora Blucher, 2021. 20
- PRODIST. *MÓDULO 8 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, Revisão 12*. 2021. https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_12/342ff02a-8eab-2480-a135-e31ed2d7db47. Acesso em: 28/11/2021. 26
- RIVERA, R.; ESPOSITO, A. S.; TEIXEIRA, I. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2013. 9, 13, 23, 24

SALMAN, S. K. *Introduction to the smart grid: Concepts, technologies and evolution*. [S.l.]: IET, 2017. v. 94. 16, 17, 20