



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP Instituto de Ciências Exatas
e Aplicadas Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

REDUÇÃO DE REDES ELÉTRICAS PARA ANÁLISE DE FLUXO DE CARGA

PAMELA CARVALHO BERNINI

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
JOÃO MONLEVADE
2020**

Pamela Carvalho Bernini

REDUÇÃO DE REDES ELÉTRICAS PARA ANÁLISE DE FLUXO DE CARGA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito para graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof^o Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich

JOÃO MONLEVADE
2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B528r Bernini, Pamela Carvalho.
Redução de redes elétricas para análise de fluxo de carga.
[manuscrito] / Pamela Carvalho Bernini. - 2020.
67 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Wilingthon Zvietcovich.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia
Elétrica .

1. Carga e distribuição elétrica. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3.
Redes elétricas. 4. Energia elétrica - Controle de perdas. I. Zvietcovich,
Wilingthon. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.31

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pamela Carvalho Bernini
REDUÇÃO DE REDES ELÉTRICAS PARA ANÁLISE DE FLUXO DE CARGA

Membros da banca

Felipe Eduardo Moreira Cota - Mestre - Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Francisco Ricardo Abrantes Couy Baralho - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Wilingthon Guerra Zvietcovich - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP

Versão final
Aprovado em 14 de Agosto de 2020

De acordo

Wilingthon Guerra Zvietcovich



Documento assinado eletronicamente por **Wilingthon Guerra Zvietcovich, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/08/2020, às 10:42, 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 **0074776** e o código CRC **7D245A3D**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.005721/2020-55

SEI nº 0074776

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: - www.ufop.br

RESUMO

Este trabalho trata da construção e implementação de modelos matemáticos para a simplificação de sistemas de distribuição de energia elétrica com o objetivo de reduzir esforços computacionais na análise de fluxo de carga, mais especificamente a estimação das tensões e das perdas elétricas. Na literatura encontram-se diversos trabalhos de otimização que auxiliam o planejamento da operação e expansão de redes elétricas, os quais demandam centenas e até milhares de análises de fluxo de carga. Uma redução do esforço computacional poderia ajudar a melhorar índices de desempenho destas metodologias de otimização. Um exemplo é o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica que demanda centenas de análises de fluxo de carga.

A metodologia proposta é baseada em modelos encontrados na literatura, os quais foram implementados em duas redes, sendo uma de 44 barras e outra de 202 barras. Dos resultados observa-se a eficiência dos modelos.

Palavras-chave: Fluxo de Potência, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Simplificação de Redes Elétricas.

ABSTRACT

This work deals with the construction and implementation of mathematical models for the simplification of electrical energy distribution systems with the objective of reducing computational costs in the analysis of the load flow, in addition to reducing the use of voltages. In the literature covered, several optimization works that assist or plan the operation and expansion of electrical networks, which are the demands of hundreds of hundreds of meters of load flow. A reduction in computational effort can help to improve the performance indexes of these optimization methodologies. One example is the problem of reconfiguring electrical power distribution systems that require high charge flow rates.

The proposed methodology is based in models found in the literature, which were implemented in two networks, one with 44 bars and the other with 202 bars. From the results, the models' efficiency was observed.

Keywords: Power Flow, Electricity Distribution Systems, Simplification of Electric Networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama unifilar de sistema elétrico de potência.....	14
Figura 2: Linha de distribuição	16
Figura 3: Modelo de linha curta.....	16
Figura 4: Modelo π equivalente do transformador.....	17
Figura 5: Subestação de distribuição.....	18
Figura 6: Banco de capacitores	23
Figura 7: Modelo de capacitor shunt.....	23
Figura 8: Cálculo de corrente de carga.....	25
Figura 9: Fluxograma para o método de varredura	27
Figura 10: Modelo de linha para cálculo da queda de tensão e potência	29
Figura 11: Equivalente do modelo – Queda de tensão.....	30
Figura 12: Ramais antes da redução.....	31
Figura 13: Ramais depois da redução – Equivalente	31
Figura 14: Modo de calcular - Forma de redução	32
Figura 15: Equivalente do modelo – perdas de linha	35
Figura 16: Modelo Híbrido	38
Figura 17: Equivalente do modelo - Híbrido	38
Figura 18: Rede de 44 barras com ramais a serem reduzidos	41
Figura 19: Rede de 44 barras com ramais reduzidos por um trecho equivalente	42
Figura 20: Rede de 44 barras com ramais a serem reduzidos	44
Figura 21: Rede de 44 barras com ramais equivalentes	45
Figura 22: Rede de 202 barras.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tensões comuns em sistemas de potência.....	14
Tabela 2: Dados Sub-rede	30
Tabela 3: Valores dos parâmetros da redução da rede elétrica	31
Tabela 4: Resultados das tensões nas barras finais	32
Tabela 5: Valores dos parâmetros da redução da rede elétrica	36
Tabela 6: Resultados das perdas no ramal.....	36
Tabela 7: Valores dos parâmetros da redução da rede elétrica	39
Tabela 8: Resultados das tensões nas barras finais e das perdas do ramal.....	39
Tabela 9: Resultados das tensões para o sistema de 44 barras	42
Tabela 10: Resultados das perdas para o sistema de 44 barras	43
Tabela 11: Resultados das tensões e das perdas para o sistema de 44 barras.....	43
Tabela 12: Resultados das tensões para o sistema de 44 barras	45
Tabela 13: Resultados das perdas para o sistema de 44 barras	46
Tabela 14: Resultados das tensões e das perdas para o sistema de 44 barras.....	46
Tabela 15: Resultados das tensões para o sistema de 202 barras	49
Tabela 16: Resultados das tensões das cinco barras com maior queda de tensão para modelo 1.	49
Tabela 17: Resultados das perdas para o sistema de 202 barras	50
Tabela 18: Resultados das tensões e das perdas para o sistema de 202 barras.....	50
Tabela 19: Resultados das tensões das cinco barras com maior queda de tensão para modelo 3.	51
Tabela 20: Resultados das tensões para o sistema de 202 barras	51
Tabela 21: Resultados das tensões das cinco barras com maior queda de tensão para modelo 1 52	52
Tabela 22: Resultados das perdas para o sistema de 202 barras	53
Tabela 23: Resultados das tensões e das perdas para o sistema de 202 barras.....	53
Tabela 24: Resultados das tensões das cinco barras com maior queda de tensão para modelo 3 55	55
Tabela 25: Resultados das tensões para o sistema de 202 barras carregado	56
Tabela 26: Resultados das perdas para o sistema de 202 barras carregado.....	57
Tabela 27: Resultados das tensões e das perdas para o sistema de 202 barras carregado	57
Tabela 28 - Tempo computacional.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
FPO	Fluxo de potência ótimo
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MT	Média Tensão
p. u.	Por Unidade
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SDEE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
STEE	Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVO E MOTIVAÇÃO.....	9
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	13
2.2	REPRESENTAÇÃO DE LINHAS	15
2.3	MODELO DE TRANSFORMADOR.....	17
2.4	MODELO DE CARGAS	19
2.4.1	MODELO DE CARGA DE POTÊNCIA CONSTANTE.....	19
2.4.2	MODELO DE CARGA DE CORRENTE CONSTANTE	19
2.4.3	MODELO DE CARGA DE IMPEDÂNCIA CONSTANTE	19
2.4.4	MODELO COMBINADO DE CARGA	20
2.5	MODELO DE BANCO DE CAPACITORES	22
2.6	FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	24
2.7	MÉTODO DE VARREDURA.....	24
2.7.1	PROCESSO DE BACKWARD	25
2.7.2	PROCESSO DE FORWARD	26
3	METODOLOGIA – FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	28
3.1	MODELOS MATEMÁTICOS PARA REDUZIR A REDE ELÉTRICA.....	28
3.1.2	MODELO 1 - MODELO DE QUEDA DE TENSÃO	28
3.1.3	MODELO 2 - MODELO DE PERDAS DA LINHA.....	34
3.1.4	MODELO 3 – MODELO HÍBRIDO	37
4	RESULTADOS.....	41
4.1	SISTEMA DE 44 BARRAS	41
4.1.1	CENÁRIO 1: REDUÇÃO DE 4 RAMAIS	41
4.1.2	CENÁRIO 2: REDUÇÃO DE 8 RAMAIS	44
4.2	SISTEMA DE 202 BARRAS	47
4.2.1	CENÁRIO 3: REDUÇÃO DE RAMAIS COM MAIS DE 2 TRECHOS	47
4.2.2	CENÁRIO 4: REDUÇÃO DE RAMAIS COM MAIS DE 1 TRECHO.....	51
4.2.3	CENÁRIO 5: REDE CARREGADA COM REDUÇÃO DE RAMAIS (MÍNIMO 3 BARRAS)	56
5	CONCLUSÕES	59
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	59

6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
7	ANEXOS.....	63

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo da energia elétrica nos últimos tempos gerou a necessidade do desenvolvimento das técnicas de solução para atividades do planejamento da operação e da expansão dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) por parte das concessionárias, uma vez que estas necessitaram construir e administrar sistemas cada vez mais complexos para atender a toda demanda, ao mesmo tempo em que se viram obrigadas a proporcionar um fornecimento confiável e de qualidade aos seus consumidores, com normas cada vez mais exigentes.

Somando-se a estes aspectos está a redução dos custos destas empresas visando garantir o retorno financeiro. Este último aspecto limita as atividades associadas ao planejamento da operação e da expansão do sistema tornando-se um desafio para as empresas desenvolver mais softwares para operar suas redes elétricas.

Dois fatores importantes da operação dos SDEEs e da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) são as perdas elétricas e os níveis de tensão, respectivamente. Esses parâmetros são estimados via técnicas matemáticas, sendo a de maior aplicação, a análise de fluxo de carga, a qual estima os parâmetros da rede. As técnicas utilizadas na literatura consistem em cálculos iterativos, demandando um tempo computacional considerável em sistemas de grande porte.

Por outro lado, diferentes estudos são feitos para melhorar aspectos operativos e de QEE das redes elétricas, sendo estes, por exemplo, reconfiguração de redes elétricas, alocação de banco de capacitores, alocação de reguladores de tensão, planejamento de SDEE, alocação de chaves de proteção e dentre outros; os quais são resolvidos através da otimização utilizando análises de fluxo de carga. A maioria destes estudos, pelo fato de ter um modelo matemático complexo, são solucionados utilizando técnicas metaheurísticas, as quais precisam de centenas e/ou milhares de fluxos de carga.

Diante deste aspecto, surge a ideia de reduzir o tamanho das redes elétricas visando obter os mesmos resultados quando comparados com a rede original, que é o foco deste trabalho. Para isso utilizou-se modelos matemáticos encontrados na literatura, os quais reduzem as redes elétricas para o cálculo de tensão e de perdas elétricas.

1.1 OBJETIVO E MOTIVAÇÃO

O objetivo deste trabalho é utilizar modelos matemáticos para redução do SDEE visando o cálculo das tensões e perdas elétricas via análise de fluxo de carga.

A escolha do tema deste trabalho se dá pelo fato do aumento da complexidade dos SDEEs e do elevado número de trabalhos de otimização que utilizam centenas ou até milhares de fluxos de carga, onde a redução das redes pode trazer um ganho no esforço computacional. Estes trabalhos auxiliam no planejamento da operação e da expansão dos SDEEs.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1, apresenta-se uma introdução geral sobre o tema tratado no contexto do mercado de energia elétrica. Assim como são indicados o objetivo do trabalho e a motivação que levou a desenvolver o mesmo.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados ao tema deste TCC. E são descritos os elementos de um SDEE, seus modelos matemáticos e suas características visando o fluxo de carga. É desenvolvido também, uma análise de fluxo de potência em SDEE usando o método de Varredura (Backward-Forward).

O capítulo 3 descreve de forma detalhada os modelos matemáticos para a redução das redes elétricas.

No capítulo 4 são apresentados os resultados da aplicação dos modelos matemáticos para a redução das redes elétricas em duas redes elétricas.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões a partir dos resultados obtidos e expostos trabalhos futuros propostos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quando se pensa em redução de redes em sistemas elétricos de potência, as técnicas mais comuns para fazer uma análise desejada numa pequena parte da rede, são o Método de Eliminação de Gauss, Redução de Kron e os Processos de Fatoração. A redução de Kron, por exemplo, consiste em eliminar barras dos sistemas com injeção de corrente nula, ou seja, barras que estão conectadas às cargas como impedâncias e barras que não estejam conectadas as fontes geradoras, sendo estes amplamente aplicados aos Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica (STEE). Já este trabalho foca em redução de rede através de equivalente de injeção de potência e equivalente de impedância.

Em (J. B. Ward, 1949), o autor tem por objetivo uma simplificação ainda maior dos circuitos equivalentes para redes de energia extensas, já que apresenta uma complicação crescente na análise de sistemas que estão continuamente se expandindo. O artigo delinea brevemente os métodos de simplificação de redes utilizados e apresenta novos métodos para construir circuitos equivalentes simples que reproduzem com precisão razoável a performance do sistema atual sob condições do fluxo de carga com o método da soma das correntes. O autor indica que o tratamento de cargas do sistema e sua geração como quantidades de correntes constantes dão uma representação realística o suficiente para garantir que qualquer simplificação analisada seja proveitosa.

Em (Vempati et.al., 1987), os autores demonstram meios pelos quais alguns atalhos podem facilitar o trabalho de coleta de dados e codificação simplificando os dados de entrada, consistindo em detalhes de cada componente de equipamento e carga de programas tais como descritos no referencial. O trabalho se justifica pela necessidade de experts de meios para reduzir o consumo de energia. Um método exclusivo é desenvolvido para combinar a queda de tensão de carga distribuída com a solução discreta de perdas de carga distribuídas e se baseiam em modelos de simulação dos diversos componentes de um sistema de distribuição típico. O desenvolvimento deste método combinado está na forma de um tutorial, ilustrando como são os desenvolvimentos dos componentes deste método. Concluiu-se que é possível reduzir muitos alimentadores complexos para modelos simples no estudo de perfis de carga de alimentadores e perdas com erro insignificante. Essa referência foi utilizada como base para a realização deste trabalho, uma vez que os modelos implementados foram encontrados no mesmo.

Em (Antônio Canuto Brandini, 2000) o autor analisa quatro algoritmos de fluxo de carga especializados para sistemas de distribuição radial, os quais são amplamente

utilizados em planejamento e operação de sistemas de distribuição de energia elétrica. No trabalho os algoritmos são analisados do ponto de vista teórico e experimental (testes realizados em três sistemas), concluindo-se que os quatro apresentam uma estratégia similar, aproveitando a topologia radial do sistema elétrico de distribuição, boas características de convergência, sendo que os quatro métodos de fluxo de carga podem ser utilizados em aplicações de problemas relacionados com análise de sistemas de distribuição onde os níveis de carregamento não sejam muito elevados.

Em (Jian Liu et. al., 2004) o trabalho tem como objetivo simplificar a rede de distribuição, uma vez que o grande número de cálculos, grande capacidade de armazenamento, baixa velocidade, dificuldade de convergência e explosão de combinação são problemas encontrados quando se procura solução e otimização de redes de larga escala. Três novos modelos são propostos incluindo modelo de carga equivalente, modelo de densidade de carga equivalente e modelo equivalente discreto de densidade de carga. São demonstrados exemplos em comparação com outras abordagens que indicam a praticabilidade dos métodos propostos.

Em (Fernando Antônio Gruppelli Júnior, 2006) o trabalho tem por objetivo otimizar a análise da contingência em redes georreferenciadas englobando os problemas práticos encontrados, já que devido à análise combinatória do problema não é possível uma análise completa de todas as possibilidades de solução. Para tanto, inicialmente procede a uma simplificação da rede através de *lumped models*. Em seguida, trata-se matematicamente o sistema para que possa ser equacionado e otimizado via Programação Inteira Mista (PIM). Por fim, as propostas são testadas por meio de um método de fluxo de potência que calcula ponto a ponto os parâmetros em redes elétricas de grande porte. O trabalho chegou ao desenvolvimento de um modelo de PIM (programação inteira mista) destinado a auxiliar a resolução do problema de reconfiguração de uma rede de subtransmissão quando ocorrem situações de contingência.

Em (Leonardo W. Oliveira et. al., 2009), os autores têm por objetivo a minimização da perda total de energia considerando diferentes níveis de carregamento pela apresentação de um algoritmo para a reconfiguração ótima do SDEE. O trabalho apresenta um algoritmo para a reconfiguração ótima de sistemas de distribuição considerando-se diferentes níveis de carregamento, sendo as chaves manobráveis modeladas por funções contínuas e os diferentes níveis de carga incorporados em um único problema de fluxo de potência ótimo (FPO). Os autores chegaram à conclusão de que o modelo proposto se mostrou vantajoso para a solução do problema com pequeno

esforço computacional uma vez que o reduzido número de execuções de FPO favoreceu a aplicação deste em sistemas de grande porte considerando-se mais de um nível de carregamento. Neste trabalho está presente a utilização do fluxo de potência com objetivo de reconfiguração do sistema de distribuição. Assim como no trabalho proposto, utilizando-se fluxo de carga para análise de possíveis reconfigurações dos SDEEs em um estudo de planejamento.

Em (Saurav Mohapatra et. al. 2014) os autores estudaram a criação de equivalentes de preservação de limites (LPEs). Há um esforço para desenvolver LPEs para interconexões de sistemas de energia a serem usadas em mercados e estudos de confiabilidade. Os equivalentes existentes para essas interconexões, no entanto, não capturam limites térmicos de linhas equivalentes, o que resulta em seus limites de transmissão serem significativamente diferentes dos limites originais de interconexão. O método de solução proposto é desenvolvido e discutido, sendo que garante uma preservação dos limites de transmissão e é capaz de atribuir estimativas inferiores, melhores e superiores para limites de linha equivalentes e é proposto para uso no desenvolvimento de LPEs.

Em (Di Shi et. al., 2015) os autores tiveram por objetivo propor uma rede equivalente que preserve sua estrutura para modelar grandes sistemas de potência. O trabalho se justifica pela necessidade de novas ferramentas para planejamentos de sistemas tendo em vista as novas políticas ambientais e de geração de energia. O método proposto consiste em agrupar um sistema de energia em zonas baseadas na semelhança de fatores de distribuição de transferência de energia (PTDFs), redução de rede agregando barramentos (geradores/cargas) em uma base zonal e modelação de transações interzonas (fluxos de energia) usando linhas de transmissão equivalentes. Em suas conclusões, a rede de equivalência proposta é testada em um sistema ilustrativo de seis barramentos, bem como nos 62.000 barramentos e 80.000 ramos da Interconexão Oriental (EI).

Em (David Maykon Krepsky Silva, 2016), compara-se dois métodos de análise de fluxo de carga, ambos de varredura amplamente utilizados na literatura com o objetivo de avaliar a velocidade e a convergência, sendo aplicados em redes de 14, 34, 70, 136, 793 e 3373 barras. No trabalho, o autor estuda o método originalmente proposto por Shirmohammadi em 1988, o qual consiste na aplicação direta das leis de Kirchhoff. O segundo método, descrito por CESPEDES em 1990, utiliza a Lei de Ohm. Ambos os métodos se mostram robustos e apresentam desempenho parecido no quesito velocidade. Para sistemas grandes, no entanto, o segundo se mostra mais veloz, sendo proposto um

algoritmo para remoção de barras redundantes que se mostrou capaz de reduzir drasticamente o tempo computacional. Essa referência é correlata ao trabalho, uma vez que é utilizado a redução de barras de sistemas de distribuição para a análise de fluxo de potência, assim como neste trabalho.

De acordo com o capítulo de referências, um grupo de trabalhos [3,4,13,15] aborda o tema de fluxo de potência nos sistemas de distribuição. Outro grupo [7,14] trata do problema de reconfiguração de redes elétricas. O trabalho [18] trata o problema de análise de planejamento de SDEE. Em [16,19] é tratada a simplificação de redes de distribuição, que é o foco principal deste trabalho e serviram como referência base. De [16] foram retirados os modelos equivalentes apresentados e foi realizada a implementação dos mesmos em ambiente MatLab. A partir de [19] foi possível utilizar o fluxo de potência - método de varredura para a redução dos modelos equivalentes para realizar a comparação dos resultados antes e depois da redução. Todos os trabalhos simulam centenas e até milhares de vezes fluxo de carga. Desta forma a importância de se reduzir as redes se torna necessária para melhorar os tempos computacionais.

2.1 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são divididos em geração, transmissão e distribuição, como ilustra a Figura 1, sendo este último segmento responsável por transportar a energia elétrica das subestações, através dos alimentadores até o consumidor final.

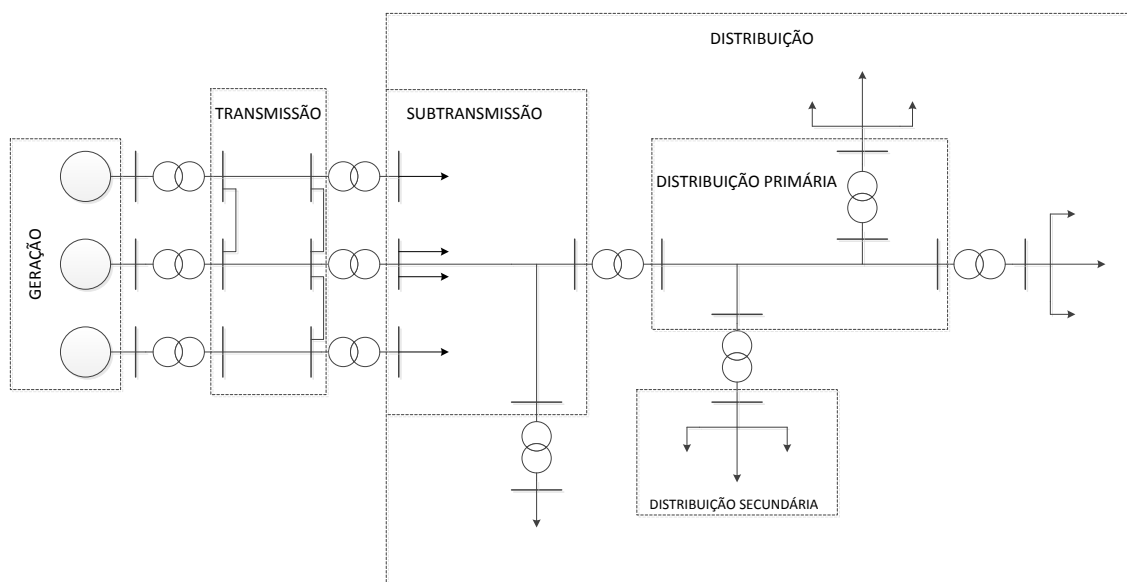
Um dos elementos dos SDEEs são as subestações de distribuição, as quais alimentam as redes de média tensão (MT); na sua grande maioria, no Brasil, com nível de tensão de 13,8 kV. Nestas estão conectados consumidores industriais, comerciais e prédios públicos, assim como transformadores para baixa tensão (BT), que conectam a MT com a BT. Na BT tem-se conectados os consumidores residenciais, comerciais e pequenas indústrias – na sua grande maioria com níveis de tensão de 127 V e 220 V, no Brasil. (GRUPPELLI, 2006). Estas tensões estão normalizadas e ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1: Tensões comuns em sistemas de potência

Tensão (kV)		Campo de Aplicação
Padronizada	Existente	
0,220/0,127	0,110 e 13,8	Distribuição Secundária (BT)
0,380/0,220	0,230/0,115	
13,8	11,9 e 13,8	Distribuição Primária (MT)
34,5	34,5	
34,5	44,0	Subtransmissão (AT)
69,0	69,0	
138	138,0	

Fonte: <https://www.aneel.gov.br/modulo-3> - Acesso ao sistema de distribuição

Figura 1: Diagrama unifilar de sistema elétrico de potência.



Fonte: Kagan (2010)

Devido ao fato da maioria dos consumidores se encontrar na rede de distribuição, os índices de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) são avaliados nesta parte do SEP. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão regulador no Brasil, que estabelece os índices de QEE a serem atingidos pelas concessionárias e estabelece as penalidades caso exista descumprimento dos limites aceitáveis.

Diante do indicado pelas normas, os SDEEs necessitam de um estudo da sua operação. A análise por fluxo de potência é um estudo básico que auxilia na análise mais específica dos SDEEs como automação e gerenciamento da distribuição, planejamento

de reativos, reconfiguração de redes, estimação de estados e otimização no SEP, aplicações essas que necessitam de soluções obtidas com o fluxo de potência empregado repetidas vezes. O fluxo de carga é geralmente empregado no planejamento e projeto de redes, assim como na sua operação. O método de fluxo de potência deve ser rápido e eficiente, para atender as necessidades das suas aplicações.

Para avaliar índices, como por exemplo os níveis de tensão e o cálculo de perdas elétricas, também se faz necessário o uso da análise de fluxo de carga, assim como é tratado neste trabalho.

2.2 REPRESENTAÇÃO DE LINHAS

Em SDEE as linhas (trechos) podem ser representadas por modelos de linhas curtas, considerando que tem um comprimento menor do que 80Km. Elas podem ser monofásicas, bifásicas ou trifásicas e ainda podem ser redes aéreas ou subterrâneas. No Brasil o sistema de distribuição é praticamente todo aéreo, sendo assim ele fica exposto a ação do meio ambiente como raios, vento e tempestades, como pode ser observado na Figura 2. Os SDEEs possuem uma baixa relação reatância/ resistência X/R (na faixa de 0,3 a 2), quando comparados com os sistemas de transmissão. Já nos sistemas de transmissão, devido ao valor elevado das tensões, a reatância é 20 a 30 vezes maior que a resistência, elevando assim a relação X/R (CARVALHO, 2006). O modelo de linha curta é representado na Figura 3.

Figura 2: Linha de distribuição



Fonte: <http://seteengenhariaeletrica.com.br/index.php/2017/04/06/a-distribuicao-de-energia/>

Figura 3: Modelo de linha curta.



Fonte: Stevenson (1986) adaptado pelo autor

E é dada por:

$$I_S = I_R \quad (1)$$

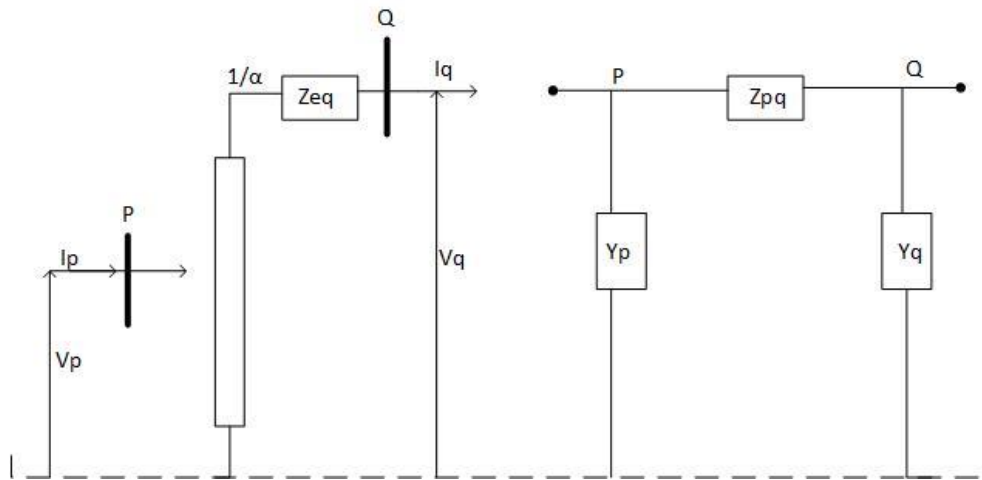
$$V_S = V_R + I_R Z \quad (2)$$

2.3 MODELO DE TRANSFORMADOR

Os transformadores presentes nas subestações de distribuição transformam a tensão da subtransmissão em tensão primária. Ou seja, média tensão, que geralmente opera em 13,8 KV no Brasil. As estações transformadoras e os transformadores de distribuição são responsáveis por converter a tensão primária em tensão secundária para o consumidor final (SILVA, 2016).

Quando um transformador está operando fora do tap nominal, ou seja, quando suas relações de tensão no primário e secundário não coincidem com os valores base, é necessário fazer a modelagem através de um circuito π equivalente, como indicado na Figura 4.

Figura 4: Modelo π equivalente do transformador



Fonte: Kagan (2010) adaptado pelo autor.

A relação de transformação para um transformador

$$V_2 = V_1 \frac{V_{nom2}}{V_{nom1}} \quad (3)$$

Os valores por unidade (PU) são:

$$v_2 = v_1 \frac{V_{nom2} V_{Base1}}{V_{nom1} V_{Base2}} = v_1 a \quad (4)$$

Para determinar o circuito π equivalente tem-se:

$$i_p = i_Q a \quad (5)$$

A equivalência resulta em:

$$\bar{z}_{PQ} = \frac{\bar{z}_{eq}}{a} \quad \bar{y}_Q = (1 - a) \frac{1}{\bar{z}_{eq}} \quad \bar{y}_P = (a - 1) \frac{a}{\bar{z}_{eq}} \quad (6)$$

Figura 5: Subestação de distribuição



Fonte: https://www.youtube.com/watch?v=qAaibXa_X_c

A Figura 5 ilustra uma subestação de 220 kV / 13,8 kV, onde observa-se a saída de vários alimentadores em 13,8 kV, tensão amplamente utilizada no Brasil e classificada como MT.

2.4 MODELO DE CARGAS

Cada equipamento elétrico se comporta de uma maneira diferente quando exposto às variações de níveis de tensão de fornecimento. Este comportamento classifica estes equipamentos em três grupos: potência constante, impedância constante e corrente constante (KAGAN, 2010). Sendo que, a carga equivalente será representada por um modelo combinado de carga ou híbrido em alguns pontos da rede.

2.4.1 MODELO DE CARGA DE POTÊNCIA CONSTANTE

São cargas cuja potências ativa e reativa não variam com o valor da tensão; ou seja, as potências são iguais aos seus valores nominais independentemente do valor da tensão de fornecimento. Esse tipo de carga possui a seguinte expressão para potência:

$$\bar{S}_{const} = S_{const} \angle \varphi = P_{const} + jQ_{const} \quad (7)$$

2.4.2 MODELO DE CARGA DE CORRENTE CONSTANTE

São cargas em que a intensidade da corrente absorvida e o ângulo de fase entre a tensão e a corrente não sofrem variação quando a tensão é variada; ou seja, a corrente continua inalterada, independentemente do valor da tensão. Suas expressões para tensão e corrente são:

$$V_{const} = V_{const} \angle \theta \quad (8)$$

$$I_F = I_{const} \angle \theta_1 - \varphi \quad (9)$$

A potência absorvida por essa carga varia de forma linear com a tensão aplicada a ela, da seguinte forma:

$$\bar{S}_F = \frac{V_F}{V_{const}} \bar{S}_{const} \quad (10)$$

2.4.3 MODELO DE CARGA DE IMPEDÂNCIA CONSTANTE

São cargas em que as impedâncias se mantêm constante, e quando alimentadas com tensão nominal são obtidas a partir das potências ativa e reativa absorvidas pela carga. Como exemplo dessas cargas temos os capacitores, chuveiros e torneiras elétricas. Elas são expressas por:

$$Z_{const} = \frac{V_{const}^2}{S_{const}^*} = \frac{V_{const}^2}{S_{const}^*} \angle \varphi \quad (11)$$

Assim independentemente do valor da tensão aplicada à carga, a potência absorvida pela mesma varia quadraticamente com a tensão aplicada e é dada por:

$$\overline{S}_F = \left(\frac{V_F}{V_{const}} \right)^2 \overline{S}_{const} \quad (12)$$

2.4.4 MODELO COMBINADO DE CARGA

Este modelo é construído a partir da combinação linear entre as equações de corrente dos modelos apresentados anteriormente. A carga é representada pela combinação dos três modelos para determinar a intensidade de corrente em função da tensão da seguinte forma:

$$i_{pot, K} = \frac{K_P}{100} * \frac{p_K - jq_K}{V_{KN}^*} \quad (13)$$

$$i_{cor, K} = \frac{K_I}{100} * i_{Kesp} \frac{V_{KN}^*}{|V_{KN}^*|} \quad (14)$$

$$i_{imp, K} = \frac{K_Z}{100} * \bar{y}_{Kesp} * |V_{KN}^*| \quad (15)$$

Sendo

$$i_{K,esp} = \frac{p_K - jq_K}{V_{Ref}^*} \quad (16)$$

e

$$\bar{y}_{K,esp} = \frac{p_K - jq_K}{V_{Ref}^2} \quad (17)$$

Sabendo que:

K_p : porcentagem da carga de potência constante;

K_I : porcentagem da carga de corrente constante;

K_Z : porcentagem da carga de impedância constante;

2.5 MODELO DE BANCO DE CAPACITORES

Os bancos de capacitores são usados nos sistemas de distribuição com a finalidade de manter o fator de potência o mais próximo da unidade. Segundo determinação da ANEEL, tem um valor tolerável de até 0.92, para não ocorrer multas às concessionárias.

Os transformadores e as linhas do sistema elétrico de potência produzem potência reativa indutiva ou seja, possuem a onda da corrente elétrica atrasada em relação à tensão e isso compromete todo o sistema. Para compensar esse fato; são instalados os bancos de capacitores ou cargas capacitivas, que produzem potência reativa capacitiva com corrente adiantada em relação à tensão, compensando assim a defasagem entre tensão e corrente. A Figura 6 ilustra um banco de capacitores instalado em uma subestação.

Segundo Stevenson (1986), esse procedimento recebe o nome de compensação em série e serve para melhorar o comportamento das linhas de transmissão, fazendo a conexão de um banco de capacitores em série com o condutor de cada fase da linha.

Para que seja possível a mudança de fase entre a tensão e corrente, os capacitores shunts são modelados através de uma susceptância b ligada à referência. Sendo assim, a potência reativa injetada na barra pelo capacitor é dada por:

$$Q = b|V|^2 \quad (18)$$

Onde:

b: Susceptância;

V: Tensão da barra;

Q: Potência reativa.

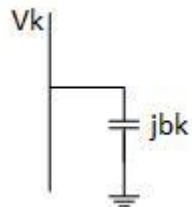
Como pode ser observado pelo modelo do capacitor shunt, representado na Figura 7.

Figura 6: Banco de capacitores



Fonte: <http://www.mp.srv.br/banco-capacitor>

Figura 7: Modelo de capacitor shunt



Fonte: Stevenson (1986) adaptado pelo autor

2.6 FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

As técnicas de estimação de fluxo de potência são de grande importância nos processos de análise de operação e planejamento dos SDEEs pois fornecem informações dos parâmetros elétricos (tensões, perdas, fluxos de potência) fundamentais em certas condições de operação, permitindo desta forma se tomar ações necessárias frente a operações indesejadas. No planejamento, tais informações são utilizadas para prever futuras modificações na estrutura do sistema, estudar contingências, resolver problemas de otimização em SEP, avaliar a confiabilidade de componentes, dentre outros (CARVALHO, 2006).

O fluxo de carga é resolvido através de equações não lineares, sendo as soluções mais adequadas obtidas através de métodos iterativos. Entre eles se destacam Gauss-Seidel (GS), Newton- Raphson (NR) e as derivações do NR como desacoplado rápido (DR) e Linearizado (CC). Porém, os SDEEs possuem algumas características tais como: são sistemas grandes e radiais, possuem uma quantidade maior de elementos, sua relação X/R é baixa, linhas monofásicas, bifásicas ou trifásicas, cargas distribuídas e desequilibradas, geração dispersa, dentre outras. Assim, esses métodos tradicionais de cálculo de fluxo de potência se tornam ineficientes e de difícil convergência. Mas a aplicação dos métodos de Varredura para cálculo do fluxo de carga permite convergência, rapidez de resposta e precisão nos valores estimados de tensão nas barras da rede para os SDEEs. Sendo assim, neste trabalho, será usado o método de varredura Backward-Forward (direta e inversa) para a resolução do fluxo de potência para o problema proposto.

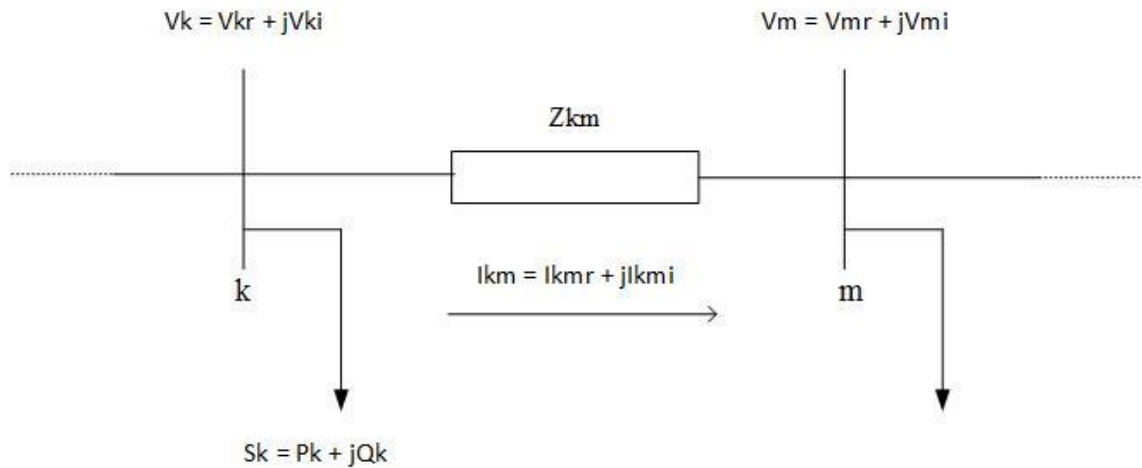
2.7 MÉTODO DE VARREDURA

Segundo Shirmohammadi (1988) o método de varredura tem esse nome por apresentar um processo iterativo que faz um percurso das barras finais em direção à subestação e vice-versa. Consiste em duas etapas, a primeira (backward) inicia nas barras finais na qual são calculadas as correntes em todos os trechos em direção a subestação. Em uma segunda etapa (forward), que é o sentido inverso, as tensões nas barras são atualizadas. É um algoritmo de fluxo de carga radial simples e que apresenta desempenho eficiente para os modelos apresentados nesse trabalho.

2.7.1 PROCESSO DE BACKWARD

A Figura 8 representa um trecho de um sistema de distribuição. A partir deste se define as equações do método de Varredura.

Figura 8: Cálculo de corrente de carga



Fonte: Zvietcovich (2006) adaptado pelo autor

Calcula-se as injeções de correntes em todas as barras onde tem cargas (P_k e Q_k). Por exemplo, para a barra k da Figura 8 o cálculo utiliza as equações 19 e 20, onde I_{Kmr} é a parte real e jI_{Kmi} é a parte imaginária. O valor de V_K na primeira iteração é igual ao valor base da subestação. Nas demais iterações, atualiza-se V_K .

$$I_{Kmr} = \frac{P_K V_{Kr} + Q_K V_{Ki}}{V_{Kr}^2 + V_{Ki}^2} \quad (19)$$

$$jI_{Kmi} = \frac{P_K V_{Ki} + Q_K V_{Kr}}{V_{Kr}^2 + V_{Ki}^2} \quad (20)$$

A partir das injeções de corrente em cada barra calcula-se as correntes em todos os trechos, iniciando-se nas barras finais no sentido da subestação.

A partir das injeções de corrente em cada barra são calculadas as correntes nos trechos pela lei de Kirchoff das correntes. Assim, da Figura 8 a corrente no trecho I_{km} é a soma das correntes nos trechos conectados a jusante no trecho km . Uma vez calculadas

as correntes em todos os trechos, são calculadas as perdas totais do sistema (P_t) se utilizando a seguinte expressão:

$$P_t = \sum_{(k,m) \in \Omega} r_{km} I_{km}^2 \quad (21)$$

Onde:

P_t : perdas elétricas;

r_{km} : resistência do trecho km ;

I_{km} : corrente no trecho km .

A partir da equação 21 calcula-se o índice de convergência Δ , que é dado por:

$$\Delta = |P_{t_ant} - P_{t_atual}| \quad (22)$$

Onde :

Δ : índice de convergência;

P_{t_ant} : perdas da iteração anterior;

P_{t_atual} : perdas da iteração atual.

2.7.2 PROCESSO DE FORWARD

Este processo se inicia na subestação, com valores de correntes calculados na fase BACKWARD e as tensões nas barras são atualizadas no sentido das barras finais.

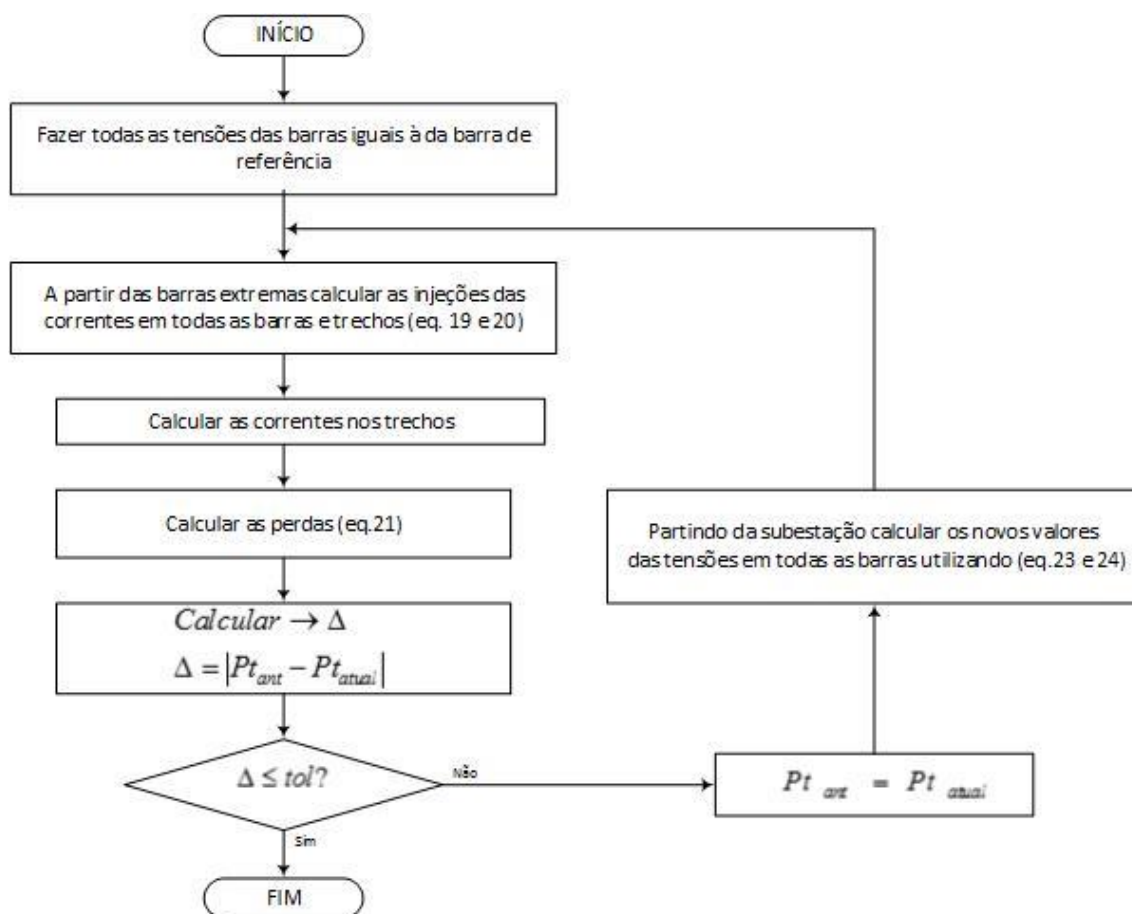
Os cálculos das tensões nodais V_K e V_m da Figura 8 são dadas pelas equações matemáticas 23 e 24. Para realizar o cálculo desta etapa FORWARD, deve-se partir da barra mais próxima da subestação no sentido das barras finais (processo direto). Os termos r_{km} e x_{km} representam a resistência e a reatância da linha km , respectivamente.

$$V_K = V_{Kr} + jV_{Ki} = V_m + (r_{km} + jx_{km})(I_{kmr} + jI_{kmi}) \quad (23)$$

$$V_m = V_{mr} + jV_{mi} = V_k + (r_{km} + jx_{km})(I_{kmr} + jI_{kmi}) \quad (24)$$

A partir do enunciado anterior e visando fazer a implementação computacional foi construído um fluxograma de método de Varredura, ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Fluxograma para o método de varredura



Fonte: Zvietcovich (2006) adaptado pelo autor

3 METODOLOGIA – FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

3.1 MODELOS MATEMÁTICOS PARA REDUZIR A REDE ELÉTRICA

Como mencionado anteriormente, os SDEEs apresentam grande quantidade de elementos, equipamentos, trechos, cargas, dentre outros. A partir destas informações se faz estudos, como, por exemplo, a análise de fluxo de carga, tornando-se eficaz desde o ponto de vista do esforço computacional até quando se trata de avaliar redes de grande porte.

Este esforço computacional pode ser reduzido através da redução do número de trechos da rede elétrica avaliada; ou seja, representar vários trechos por um só trecho. Os modelos de simplificação são voltados para os cálculos das tensões e perdas elétricas (VEMPATI, 1987). Os autores desenvolvem três modelos que na continuação serão detalhados.

3.1.2 MODELO 1 - MODELO DE QUEDA DE TENSÃO

Este modelo tem por objetivo calcular o valor da queda de tensão na última barra do ramal reduzido. Para isso é determinado um ponto (barra) equivalente no ramal a ser reduzido. Associado a este ponto tem-se a potência equivalente nesta barra e a impedância correspondente calculada se utilizando as equações 25 e 26 respectivamente.

$$P_{eq} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (25)$$

$$L_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n [(\sum_{j=1}^i P_j) l_i]}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (26)$$

Onde,

P_{eq} : potência equivalente do trecho a reduzir;

P_i : carga instalada na barra;

L_{eq} : comprimento equivalente do trecho a reduzir;

P_j : carga por unidade de comprimento;

l_i : comprimento;

n : número de barras.

A equação 25 também pode ser expressada em função da impedância através da equação 27.

$$Z_V = \frac{\sum_{i=0}^m Z_i (\sum_{j=i}^m |S_j|)}{|S|} \quad (27)$$

Onde,

Z_V : impedância equivalente;

Z_i : impedância por unidade de comprimento;

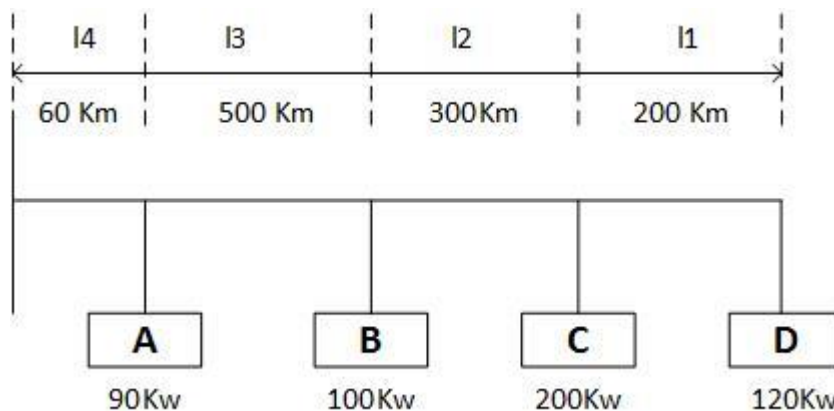
S_j : carga por unidade de comprimento;

S : carga instalada;

m : número de barras.

Com a finalidade de esclarecer estes modelos matemáticos, na continuação se utiliza como exemplo um ramal de um SDEE na Figura 10.

Figura 10: Modelo de linha para cálculo da queda de tensão e potência



Fonte: Vempati (1987) adaptado pelo autor.

Aplicando a equação matemática 25 na Figura 10, obtém-se:

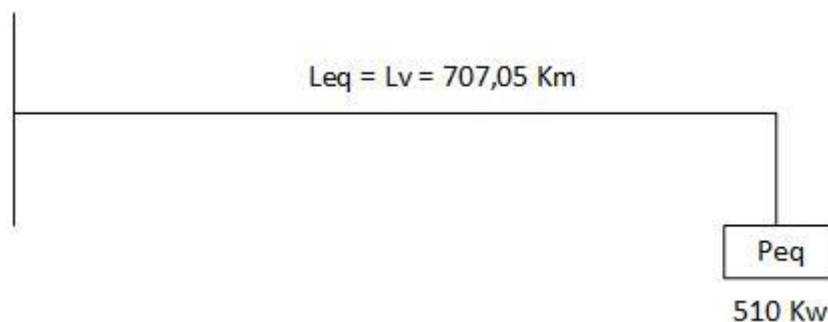
$$P_{eq} = 90 + 100 + 200 + 120 = 510Kw$$

Utilizando a equação 26 tem-se:

$$L_{eq} = \frac{510(60) + 420(500) + 320(300) + 120(200)}{510} = 707,05 \text{ km}$$

A Figura 11 ilustra o equivalente do modelo de queda de tensão.

Figura 11: Equivalente do modelo – Queda de tensão



Fonte: Vempati (1987) adaptado pelo autor.

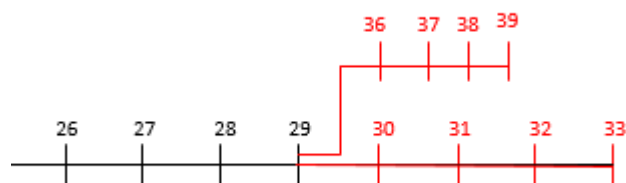
Para exemplificar, considere parte do sistema de 44 barras, ilustrado na Figura 12. Onde os dados desta sub-rede estão ilustrados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados Sub-rede

Barras	Potência (kW)	R (ohm)	X (ohm)
30	200	0.9744	0.9630
31	150	0.3105	0.3619
32	210	0.3410	0.5302
33	60	0.8842	0.5447
-----	-----	-----	-----
36	210	0.8042	0.7006
37	60	0.1640	0.1565
38	50	0.9744	0.9630
39	65	0.5910	0.5260

Fonte: Do autor

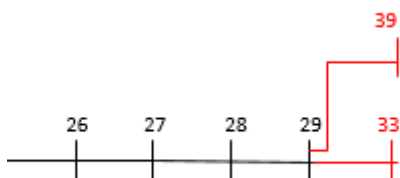
Figura 12: Ramais antes da redução



Fonte: Do autor

Aplicando o modelo, obtém-se o ramal equivalente ilustrado na Figura 13. Aplicando as equações 25 e 27 obtém-se valores dos parâmetros equivalentes indicados na Tabela 3.

Figura 13: Ramais depois da redução – Equivalente



Fonte: Do autor

Tabela 3: Valores dos parâmetros da redução da rede elétrica

Parâmetros	Valores (p.u)
P_{eq} (barra 39)	1,965
Z_V (barra 39)	$1,880 + 1,750i$
P_{eq} (barra 33)	1,173
Z_V (barra 33)	$1,759 + 1,852i$

Fonte: Do autor

Utilizando uma análise de fluxo de carga obteve-se se os resultados indicados na Tabela 4.

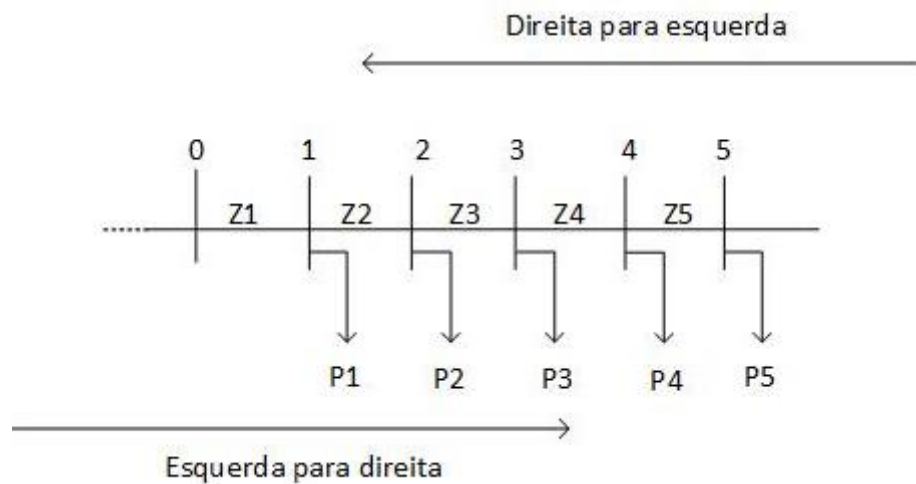
Tabela 4: Resultados das tensões nas barras finais

Parâmetro	V p. u.
Barra 39 (Figura 12) antes da redução	0.9236p. u.
Barra 39 (Figura 13) após a redução	0.9239p. u.
Barra 33 (Figura 12) antes da redução	0.92155p. u.
Barra 33 (Figura 13) após a redução	0.92157p. u.

Fonte: Do autor

Foram implementadas três formas de aplicação da equação 27, detalhadas a partir da Figura 14.

Figura 14: Modo de calcular - Forma de redução



Fonte: Do autor

FORMA 1: Da esquerda (lado da subestação) para direita (lado da barra final). Para exemplificar tem-se para a Figura 14 a expressão:

$$Z_v = \frac{\sum_{i=0}^m Z_i (\sum_{j=i}^m |S_j|)}{|S|} \quad (28)$$

$$Z_v$$

$$= \frac{((P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) \cdot Z_1) + ((P_2 + P_3 + P_4 + P_5) \cdot Z_2) + ((P_3 + P_4 + P_5) \cdot Z_3) + ((P_4 + P_5) \cdot Z_4) + ((P_5) \cdot Z_5)}{P}$$

FORMA 2: O cálculo da impedância é feita, calculando-se primeiro a parte real e depois a parte imaginária, Da esquerda (lado da subestação) para direita (lado da barra final) através das seguintes expressões:

Para a parte real:

$$R_v = \frac{\sum_{i=0}^m R_i (\sum_{j=i}^m |P_j|)}{|P|} \quad (29)$$

$$R_v = \frac{((P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) \cdot R_1) + ((P_2 + P_3 + P_4 + P_5) \cdot R_2) + ((P_3 + P_4 + P_5) \cdot R_3) + ((P_4 + P_5) \cdot R_4) + ((P_5) \cdot R_5)}{|P|}$$

Para a parte imaginária:

$$X_v = \frac{\sum_{i=0}^m X_i (\sum_{j=i}^m |Q_j|)}{|Q|} \quad (30)$$

$$X_v = \frac{((Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5) \cdot X_1) + ((Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5) \cdot X_2) + ((Q_3 + Q_4 + Q_5) \cdot X_3) + ((Q_4 + Q_5) \cdot X_4) + ((Q_5) \cdot X_5)}{|Q|}$$

FORMA 3: Da direita (lado da barra final) para esquerda (lado da subestação). Para exemplificar tem-se para a Figura 14 a expressão:

$$Z_v = \frac{\sum_{i=m}^0 Z_i (\sum_{j=i}^0 |S_j|)}{|S|} \quad (31)$$

$$Z_v = \frac{((P_5 + P_4 + P_3 + P_2 + P_1) \cdot Z_5) + ((P_4 + P_3 + P_2 + P_1) \cdot Z_4) + ((P_3 + P_2 + P_1) \cdot Z_3) + ((P_2 + P_1) \cdot Z_2) + ((P_1) \cdot Z_1)}{P}$$

3.1.3 MODELO 2 - MODELO DE PERDAS DA LINHA

Este modelo considera também quando as cargas forem dispersas e tem por objetivo calcular o valor da perda do ramal a ser reduzido utilizando o trecho equivalente.

Para determinar este ponto de carga utiliza-se novamente a equação 25 para o cálculo da potência equivalente, e utiliza-se a equação 32 para o cálculo do comprimento equivalente.

$$L_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n [(\sum_{j=1}^i P_j)^2 l_i]}{[\sum_{i=1}^n P_i]^2} \quad (32)$$

A equação 32 também pode ser expressa em função da impedância através da equação 33.

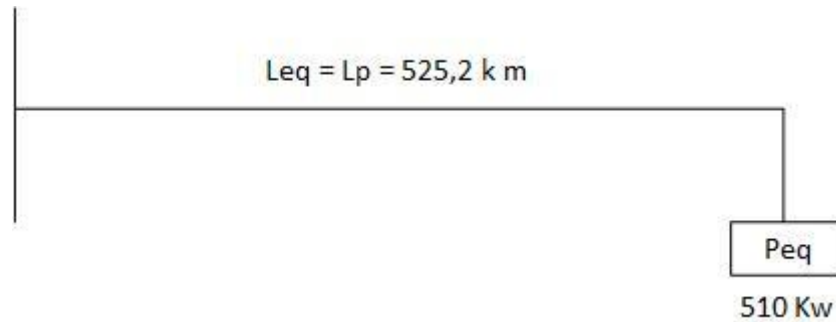
$$Z_p = \frac{\sum_{i=0}^m Z_i \left((\sum_{j=i}^m S_j)^2 \right)}{|S|^2} \quad (33)$$

Para o exemplo da Figura 10, tem se:

$$L_{eq} = \frac{510^2(60) + 420^2(500) + 320^2(300) + 120^2(200)}{510^2} = 525,2 \text{ km}$$

A Figura 15 ilustra o equivalente do modelo das perdas de linha.

Figura 15: Equivalente do modelo – perdas de linha



Fonte: Vempati (1987) adaptado pelo autor.

FORMA 1: Da esquerda (lado da subestação) para direita (lado da barra final). Para exemplificar tem-se para a Figura 14 a expressão:

$$Z_p = \frac{\sum_{i=0}^m Z_i \left(\left(\sum_{j=i}^m S_j \right)^2 \right)}{|S|^2} \quad (34)$$

$$Z_p = \frac{((P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5)^2) \cdot Z_1 + ((P_2 + P_3 + P_4 + P_5)^2) \cdot Z_2 + ((P_3 + P_4 + P_5)^2) \cdot Z_3 + ((P_4 + P_5)^2) \cdot Z_4 + ((P_5)^2) \cdot Z_5}{P}$$

FORMA 2: O cálculo da impedância é feita, através do cálculo da parte real e depois da parte imaginária, através das seguintes expressões:

Para a parte real:

$$R_p = \frac{\sum_{i=0}^m R_i \left(\sum_{j=i}^m |P_j| \right)}{|P|} \quad (35)$$

Para a parte imaginária:

$$X_p = \frac{\sum_{i=0}^m X_i \left(\sum_{j=i}^m |Q_j| \right)}{|Q|} \quad (36)$$

FORMA 3: Da direita (lado da barra final) para esquerda (lado da subestação). Para exemplificar tem-se para a Figura 14 a expressão:

$$Z_p = \frac{\sum_{i=m}^0 Z_i \left(\left(\sum_{j=i}^0 S_j \right)^2 \right)}{|S|^2} \quad (37)$$

$$Z_p = \frac{((P_5 + P_4 + P_3 + P_2 + P_1)^2) \cdot Z_5 + ((P_4 + P_3 + P_2 + P_1)^2) \cdot Z_4 + ((P_3 + P_2 + P_1)^2) \cdot Z_3 + ((P_2 + P_1)^2) \cdot Z_2 + ((P_1)^2) \cdot Z_1}{P}$$

Considerando as Figuras 12 e 13 e os dados da Tabela 2 tem – se nas Tabelas 5 e 6 os resultados para este modelo apresentado.

Tabela 5: Valores dos parâmetros da redução da rede elétrica

Parâmetros	Valores (p.u)
P_{eq} (barra 39)	1,613
Z_p (barra 39)	1,547 + 1,494i
P_{eq} (barra 33)	1,007
Z_p (barra 33)	1,506 + 1,677i

Fonte: Do autor

Utilizando uma análise de fluxo de carga obteve-se se os resultados indicados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados das perdas no ramal

Parâmetro	$ \Delta P kW$
Antes da redução (Figura 12)	259,6
Após a redução (Figura 13)	259,2

Fonte: Do autor

3.1.4 MODELO 3 – MODELO HÍBRIDO

Este modelo, assim como os anteriores, considera também cargas dispersas e tem por objetivo calcular o valor da queda de tensão e o valor da perda de linha no ponto no qual foi calculado o equivalente de carga. Ou seja, é a combinação dos cálculos dos modelos apresentados anteriormente, e são dados pelos seguintes parâmetros.

$$K = \frac{L_V - L_P}{L - L_V} \quad (38)$$

$$K_1 = \frac{LL_P - L_V^2}{L^2 - 2LL_V + LL_P} \quad (39)$$

Onde:

K: é uma constante associada a carga;

K_1 : é uma constante associada ao comprimento;

L: comprimento total.

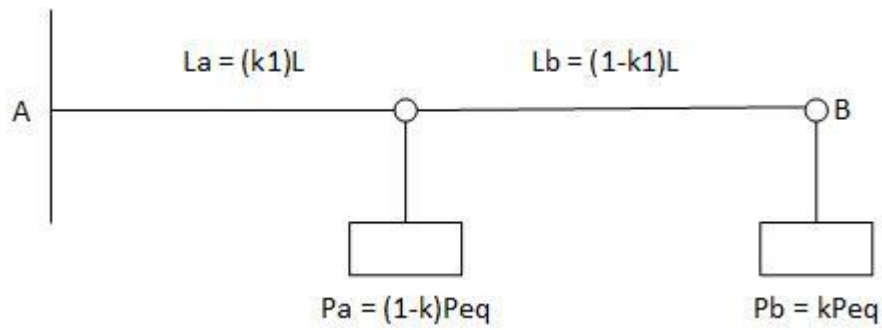
As equações 38 e 39 também podem ser expressas em função da impedância através das equações 40 e 41.

$$K = \frac{Z_V - Z_P}{Z - Z_V} \quad (40)$$

$$K_1 = \frac{ZZ_P - Z_V^2}{Z^2 - 2ZZ_V + ZZ_P} \quad (41)$$

A figura 16 representa um modelo híbrido.

Figura 16: Modelo Híbrido



Fonte: Vempati (1987) adaptado pelo autor.

Utilizando as equações 38 e 39

$$K = \frac{707,05 - 525,2}{1060 - 707,05} = 0,51$$

$$K_1 = \frac{1060 * 525,2 - 707,05^2}{1060^2 - 2 * 1060 * 707,05 + 1060 * 525,2} = 0,31$$

Assim

$$L_a = 0,31 * 1060 = 328,6 \text{ Km}$$

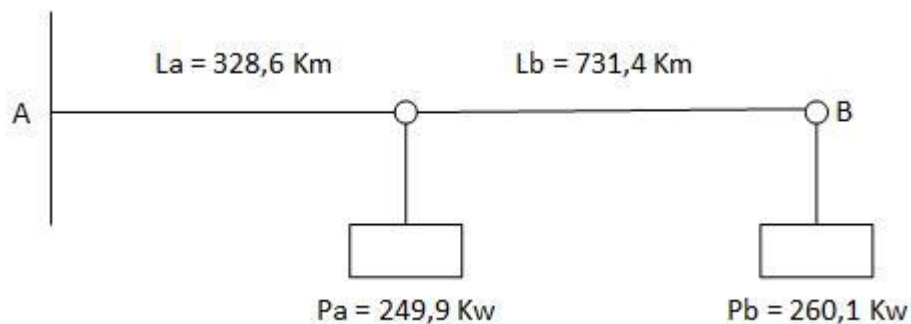
$$P_a = (1 - 0,51)510 = 249,9 \text{ Kw}$$

$$L_b = (1 - 0,31)1060 = 731,4 \text{ Km}$$

$$P_b = 0,51 * 510 = 260,1 \text{ Kw}$$

A Figura 17 ilustra o equivalente do modelo híbrido.

Figura 17: Equivalente do modelo - Híbrido



Fonte: Vempati (1987) adaptado pelo autor.

Considerando as Figuras 12 e 13 e os dados da Tabela 2, tem – se nas Tabelas 7 e 8 os resultados para este modelo apresentado.

Tabela 7: Valores dos parâmetros da redução da rede elétrica

Parâmetros	Valores (p.u)
P_{eq} (barra 39)	2,468
P_{eq} (barra 33)	4,851
Z_v	1,566
Z_p	1,382
Z	2,084

Fonte: Do autor

Utilizando uma análise de fluxo de carga obteve-se se os resultados indicados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados das tensões nas barras finais e das perdas do ramal

Parâmetro	 V p. u.
Barra 39 (Figura 12) antes da redução	0.923 p. u.
Barra 39 (Figura 13) após a redução	0.921 p. u.
Barra 33 (Figura 12) antes da redução	0.92155p. u.
Barra 33 (Figura 13) após a redução	0.92152 p. u.
Parâmetro	 \Delta P kW
Antes da redução (Figura 12)	259,6
Após a redução (Figura 13)	259,2

Fonte: Do autor

A modelagem descrita é uma forma de simplificar os ramais de uma rede em sistemas de distribuição. É possível introduzir os sistemas GIS, para redes de grande porte, para se obter melhores resultados nas simulações envolvendo o cálculo do fluxo de potência. Uma vez que, com a utilização dessa tecnologia, os sistemas mantêm sua referência geográfica inalterada, ou seja, a parcela da rede que não sofre a simplificação não sofre também alteração nas referências geográficas (GRUPPELLI et al, 2002).

Estudos mais recentes mostram que três novos modelos foram criados por (LIU, et al, 2004) para simplificar a análise de distribuição de redes: modelo de carga equivalente (ELM), modelo de densidade de carga equivalente (ELDM) e modelo de densidade de carga equivalente discreta (DELDM). Os modelos são baseados em

medições de tensão e corrente obtidos nas saídas dos alimentadores e em pontos intermediários; porém, esses modelos não são utilizados atualmente, porque essas medições ainda não foram implementadas nas linhas e nos alimentadores.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos modelos de redução de redes elétricas demonstrados no capítulo anterior. O método de Varredura foi implementado computacionalmente no software Matlab versão R2015a no computador HP Pavilion g series, Intel Core i3-370M, 2GB de RAM, 500GB HDD velocidade de processamento. Para avaliar os modelos duas redes do IEE foram utilizadas, uma de menor porte com 44 barras e outra de maior porte com 202 barras.

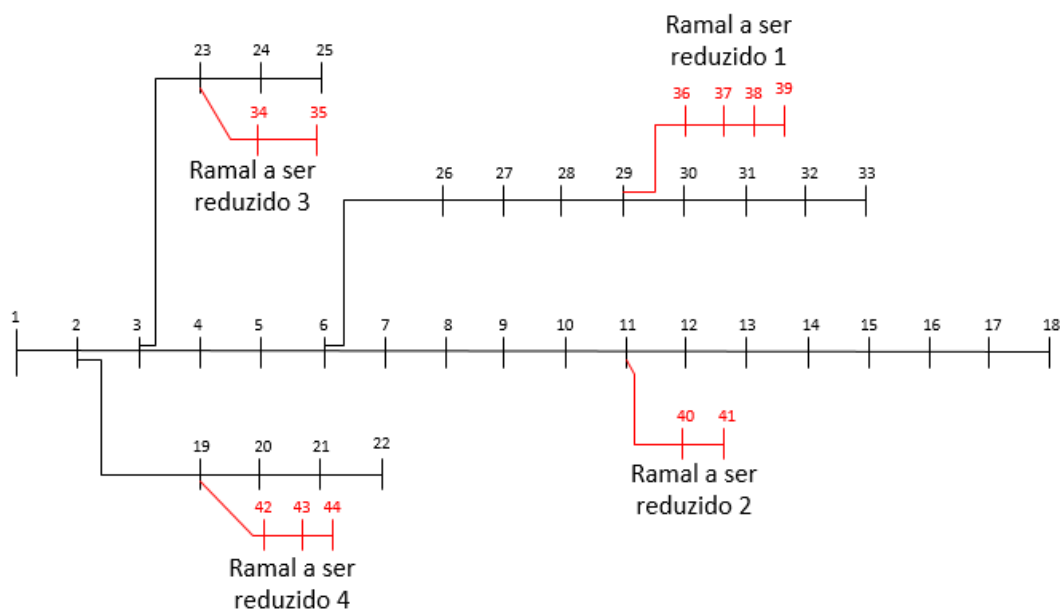
4.1 SISTEMA DE 44 BARRAS

O sistema é mostrado na Figura 18. O mesmo apresenta 44 barras e 43 trechos com uma potência total igual a 4360 kW. Foram considerados 2 cenários os quais são detalhados a seguir.

4.1.1 CENÁRIO 1: REDUÇÃO DE 4 RAMAIS

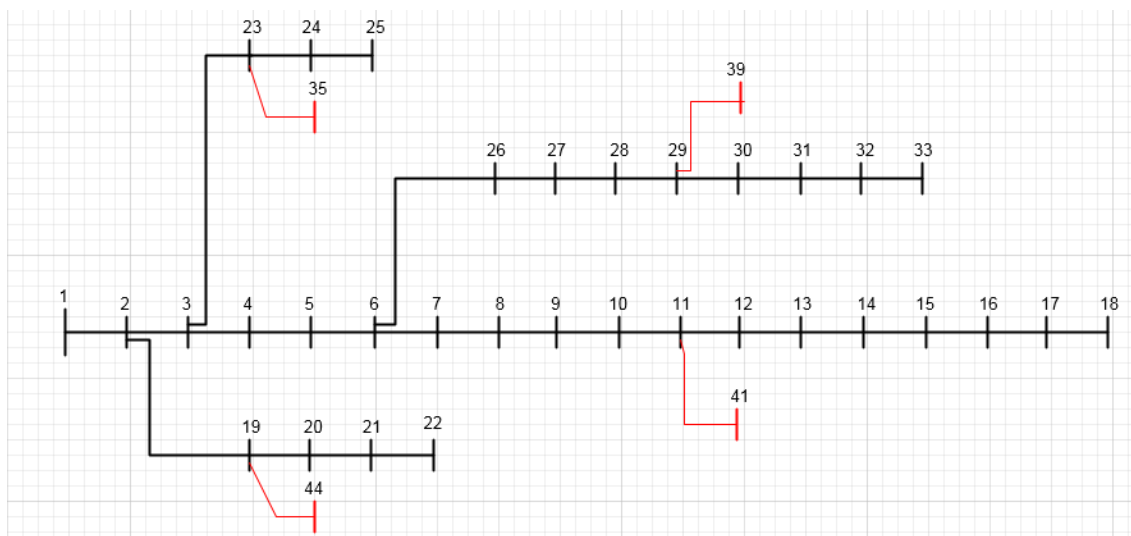
Os trechos pintados em vermelho na Figura 18, são aqueles ramais a serem reduzidos por um equivalente, montando a um total de 4 ramais como ilustra a Figura 19. A menor tensão obtida na rede original é de 0.921 p.u. na barra 39. Os resultados são ilustrados nas Tabelas 9, 10 e 11.

Figura 18: Rede de 44 barras com ramais a serem reduzidos



Fonte: Do autor.

Figura 19: Rede de 44 barras com ramais reduzidos por um trecho equivalente



Fonte: Do autor

4.1.1.1 MODELO 1 – TIPO DE CÁLCULO: TENSÕES

Tabela 9: Resultados das tensões para o sistema de 44 barras

Formas de implementação	$ V $ p.u. (antes da redução)	$ V $ p.u. (depois da redução)	$ V $ p.u. (antes da redução)	$ V $ p.u. (depois da redução)
FORMA 1**	$V_{39} = 0.9236$	$V_{39} = 0.9239$	$V_{33} = 0.92155$	$V_{33} = 0.92157$
	$V_{41} = 0.922$	$V_{41} = 0.920$	$V_{18} = 0.90793$	$V_{18} = 0.90792$
	$V_{35} = 0.980$	$V_{35} = 0.979$	$V_{25} = 0.9709749$	$V_{25} = 0.9709748$
	$V_{44} = 0.9946$	$V_{44} = 0.9941$	$V_{22} = 0.9906809$	$V_{22} = 0.9906807$
FORMA 2	$V_{39} = 0.923$	$V_{39} = 0.921$	$V_{33} = 0.92155$	$V_{33} = 0.92156$
	$V_{41} = 0.9220$	$V_{41} = 0.9225$	$V_{18} = 0.90793$	$V_{18} = 0.90792$
	$V_{35} = 0.9801$	$V_{35} = 0.9807$	$V_{25} = 0.9709749$	$V_{25} = 0.9709745$
	$V_{44} = 0.9946$	$V_{44} = 0.9945$	$V_{22} = 0.9906809$	$V_{22} = 0.9906808$
FORMA 3	$V_{39} = 0.923$	$V_{39} = 0.921$	$V_{33} = 0.92155$	$V_{33} = 0.92152$
	$V_{41} = 0.9220$	$V_{41} = 0.9222$	$V_{18} = 0.90793$	$V_{18} = 0.90791$
	$V_{35} = 0.9801$	$V_{35} = 0.9803$	$V_{25} = 0.9709749$	$V_{25} = 0.970970$
	$V_{44} = 0.9946$	$V_{44} = 0.9945$	$V_{22} = 0.9906809$	$V_{22} = 0.9906802$

Fonte: Do autor.

**O critério de escolha da quantidade de casas decimais para a comparação dos resultados entre antes e depois da redução dos ramais foi eleito a partir do número onde eles começam a fazer uma diferença. Por esse motivo existe uma grande variação da quantidade de números após a vírgula entre os resultados.

4.1.1.2 MODELO 2 – TIPO DE CÁLCULO: PERDAS

Tabela 10: Resultados das perdas para o sistema de 44 barras

Formas de implementação	$ \Delta P kW$ (Antes da redução)	$ \Delta P kW$ (Depois da redução)	Diferença (%)
FORMA 1	259,6	259,2	0,004
FORMA 2	259,6	259,2	0,004
FORMA 3	259,6	260,4	0,008

Fonte: Do autor.

4.1.1.3 MODELO 3 – TIPO DE CÁLCULO: HÍBRIDO (TENSÕES E PERDAS)

Tabela 11: Resultados das tensões e das perdas para o sistema de 44 barras

Formas de implementação	$ V p.u.$ (antes da redução)	$ V p.u.$ (depois da redução)	$ V p.u.$ (antes da redução)	$ V p.u.$ (depois da redução)
FORMA 1	$V_{39} = 0.923$	$V_{39} = 0.925$	$V_{33} = 0.92155$	$V_{33} = 0.92158$
	$V_{41} = 0.922$	$V_{41} = 0.921$	$V_{18} = 0.90793$	$V_{18} = 0.90794$
	$V_{35} = 0.980$	$V_{35} = 0.979$	$V_{25} = 0.970974$	$V_{25} = 0.970975$
	$V_{44} = 0.9946$	$V_{44} = 0.9945$	$V_{22} = 0.990680$	$V_{22} = 0.990681$
FORMA 2	$V_{39} = 0.923$	$V_{39} = 0.922$	$V_{33} = 0.92155$	$V_{33} = 0.921551$
	$V_{41} = 0.922$	$V_{41} = 0.923$	$V_{18} = 0.90793$	$V_{18} = 0.907931$
	$V_{35} = 0.9801$	$V_{35} = 0.9802$	$V_{25} = 0.970974$	$V_{25} = 0.9709742$
	$V_{44} = 0.9946$	$V_{44} = 0.9949$	$V_{22} = 0.990680$	$V_{22} = 0.9906808$
FORMA 3	$V_{39} = 0.923$	$V_{39} = 0.921$	$V_{33} = 0.92155$	$V_{33} = 0.92153$
	$V_{41} = 0.922$	$V_{41} = 0.924$	$V_{18} = 0.90793$	$V_{18} = 0.90792$
	$V_{35} = 0.9801$	$V_{35} = 0.9803$	$V_{25} = 0.970974$	$V_{25} = 0.970972$
	$V_{44} = 0.994$	$V_{44} = 0.995$	$V_{22} = 0.9906809$	$V_{22} = 0.9906806$

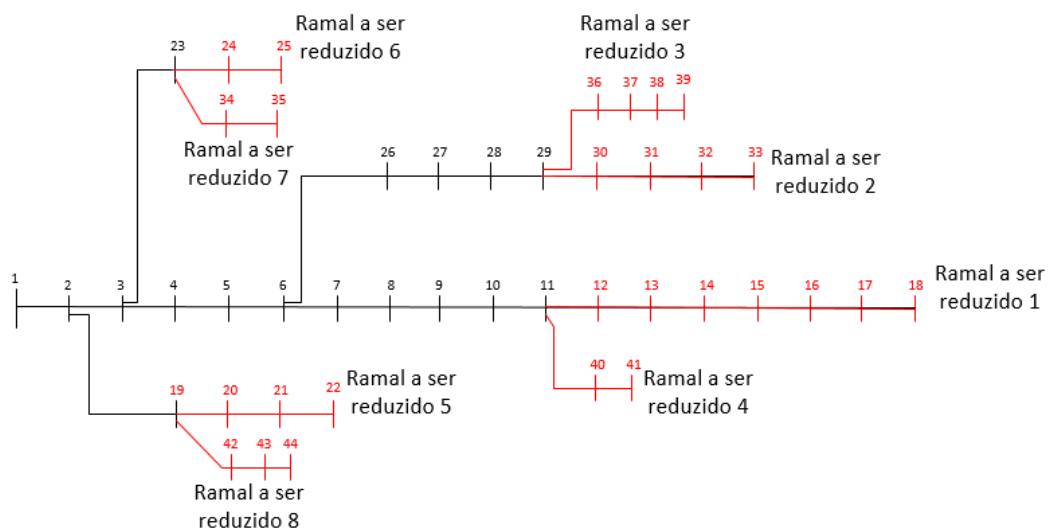
PERDAS			
Formas de implementação	$ \Delta P _{original}$ (Kw) (antes da redução)	$ \Delta P _{nova}$ (Kw) (Depois da redução)	Diferença entre valores (%)
FORMA 1	259,6	256,4	0,032
FORMA 2	259,6	259,8	0,002
FORMA 3	259,6	260,3	0,007

Fonte: Do autor.

4.1.2 CENÁRIO 2: REDUÇÃO DE 8 RAMAIS

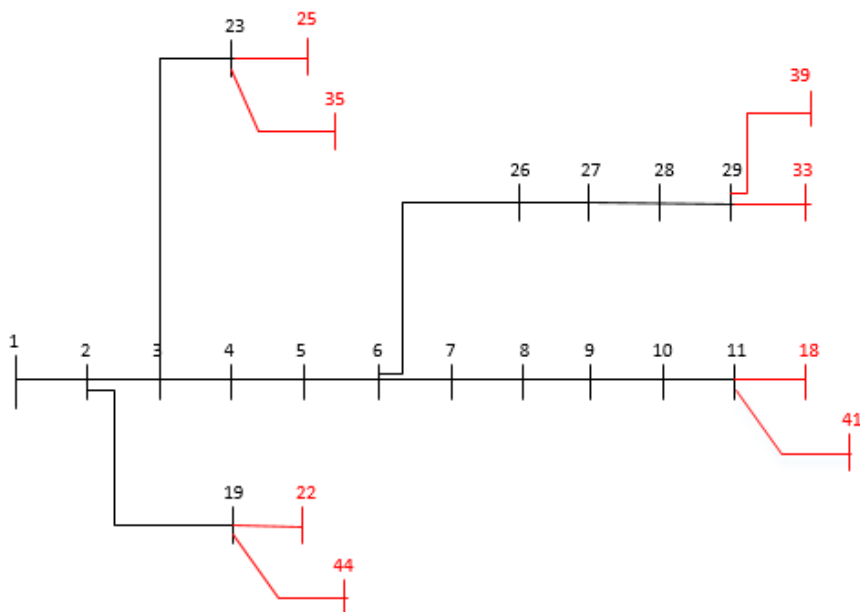
Os trechos pintados em vermelho da Figura 20 são aqueles ramaís a serem reduzidos por um equivalente, um total de 8 ramaís - como ilustra a Figura 21. A menor tensão obtida na rede original é de 0.904 p.u. na barra 18. Os resultados são ilustrados nas Tabelas 12, 13 e 14.

Figura 20: Rede de 44 barras com ramaís a serem reduzidos



Fonte: Do autor

Figura 21: Rede de 44 barras com ramais equivalentes



Fonte: Do autor

4.1.2.1 MODELO 1 – TIPO DE CÁLCULO: TENSÕES

Tabela 12: Resultados das tensões para o sistema de 44 barras

Formas de implementação	$ V $ p.u. (antes da redução)	$ V $ p.u. (depois da redução)	$ V $ p.u. (antes da redução)	$ V $ p.u. (depois da redução)
FORMA 1	$V_{18} = 0.907$	$V_{18} = 0.904$	$V_{22} = 0.990$	$V_{22} = 0.991$
	$V_{33} = 0.92155$	$V_{33} = 0.9153$	$V_{25} = 0.97097$	$V_{25} = 0.97095$
	$V_{39} = 0.92365$	$V_{39} = 0.92362$	$V_{35} = 0.9801$	$V_{35} = 0.9807$
	$V_{41} = 0.922$	$V_{41} = 0.920$	$V_{44} = 0.9946$	$V_{44} = 0.9941$
FORMA 2	$V_{18} = 0.907$	$V_{18} = 0.908$	$V_{22} = 0.9905$	$V_{22} = 0.9906$
	$V_{33} = 0.921$	$V_{33} = 0.925$	$V_{25} = 0.97097$	$V_{25} = 0.97093$
	$V_{39} = 0.923$	$V_{39} = 0.921$	$V_{35} = 0.9801$	$V_{35} = 0.9806$
	$V_{41} = 0.9224$	$V_{41} = 0.9223$	$V_{44} = 0.9946$	$V_{44} = 0.9945$
FORMA 3	$V_{18} = 0.9078$	$V_{18} = 0.9079$	$V_{22} = 0.9905$	$V_{22} = 0.9906$
	$V_{33} = 0.921$	$V_{33} = 0.923$	$V_{25} = 0.97097$	$V_{25} = 0.97093$
	$V_{39} = 0.923$	$V_{39} = 0.921$	$V_{35} = 0.9801$	$V_{35} = 0.9802$
	$V_{41} = 0.9221$	$V_{41} = 0.9220$	$V_{44} = 0.9946$	$V_{44} = 0.9945$

Fonte: Do autor.

4.1.2.2 MODELO 2 – TIPO DE CÁLCULO: PERDAS

Tabela 13: Resultados das perdas para o sistema de 44 barras

Formas de implementação	$ \Delta P _{original}$ (Kw) (antes da redução)	$ \Delta P _{nova}$ (Depois da redução)	Diferença entre valores (%)
FORMA 1	259,63	266,19	0,065
FORMA 2	259,63	261,46	0,018
FORMA 3	259,63	261,13	0,015

Fonte: Do autor.

4.1.2.3 MODELO 3 – TIPO DE CÁLCULO: HÍBRIDO (TENSÕES E PERDAS)

Tabela 14: Resultados das tensões e das perdas para o sistema de 44 barras

Formas de implementação	$ V $ p.u. (antes da redução)	$ V $ p.u. (depois da redução)	$ V $ p.u. (antes da redução)	$ V $ p.u. (depois da redução)
FORMA 1	$V_{18} = 0.907$	$V_{18} = 0.914$	$V_{22} = 0.990$	$V_{22} = 0.993$
	$V_{33} = 0.921$	$V_{33} = 0.920$	$V_{25} = 0.970$	$V_{25} = 0.974$
	$V_{39} = 0.923$	$V_{39} = 0.925$	$V_{35} = 0.980$	$V_{35} = 0.979$
	$V_{41} = 0.922$	$V_{41} = 0.921$	$V_{44} = 0.9946$	$V_{44} = 0.9945$
FORMA 2	$V_{18} = 0.907$	$V_{18} = 0.914$	$V_{22} = 0.990$	$V_{22} = 0.991$
	$V_{33} = 0.921$	$V_{33} = 0.923$	$V_{25} = 0.970$	$V_{25} = 0.971$
	$V_{39} = 0.923$	$V_{39} = 0.922$	$V_{35} = 0.9801$	$V_{35} = 0.9802$
	$V_{41} = 0.922$	$V_{41} = 0.923$	$V_{44} = 0.9946$	$V_{44} = 0.9949$
FORMA 3	$V_{18} = 0.907$	$V_{18} = 0.916$	$V_{22} = 0.990$	$V_{22} = 0.991$
	$V_{33} = 0.921$	$V_{33} = 0.925$	$V_{25} = 0.970$	$V_{25} = 0.974$
	$V_{39} = 0.923$	$V_{39} = 0.921$	$V_{35} = 0.9801$	$V_{35} = 0.9803$
	$V_{41} = 0.922$	$V_{41} = 0.924$	$V_{44} = 0.994$	$V_{44} = 0.995$

PERDAS			
Formas de implementação	$ \Delta P _{original}$ (Kw) (antes da redução)	$ \Delta P _{nova}$ (Depois da redução)	Diferença entre valores (%)
FORMA 1	259,63	246,42	0,13
FORMA 2	259,63	242,62	0,17
FORMA 3	259,63	244,40	0,15

Fonte: Do autor.

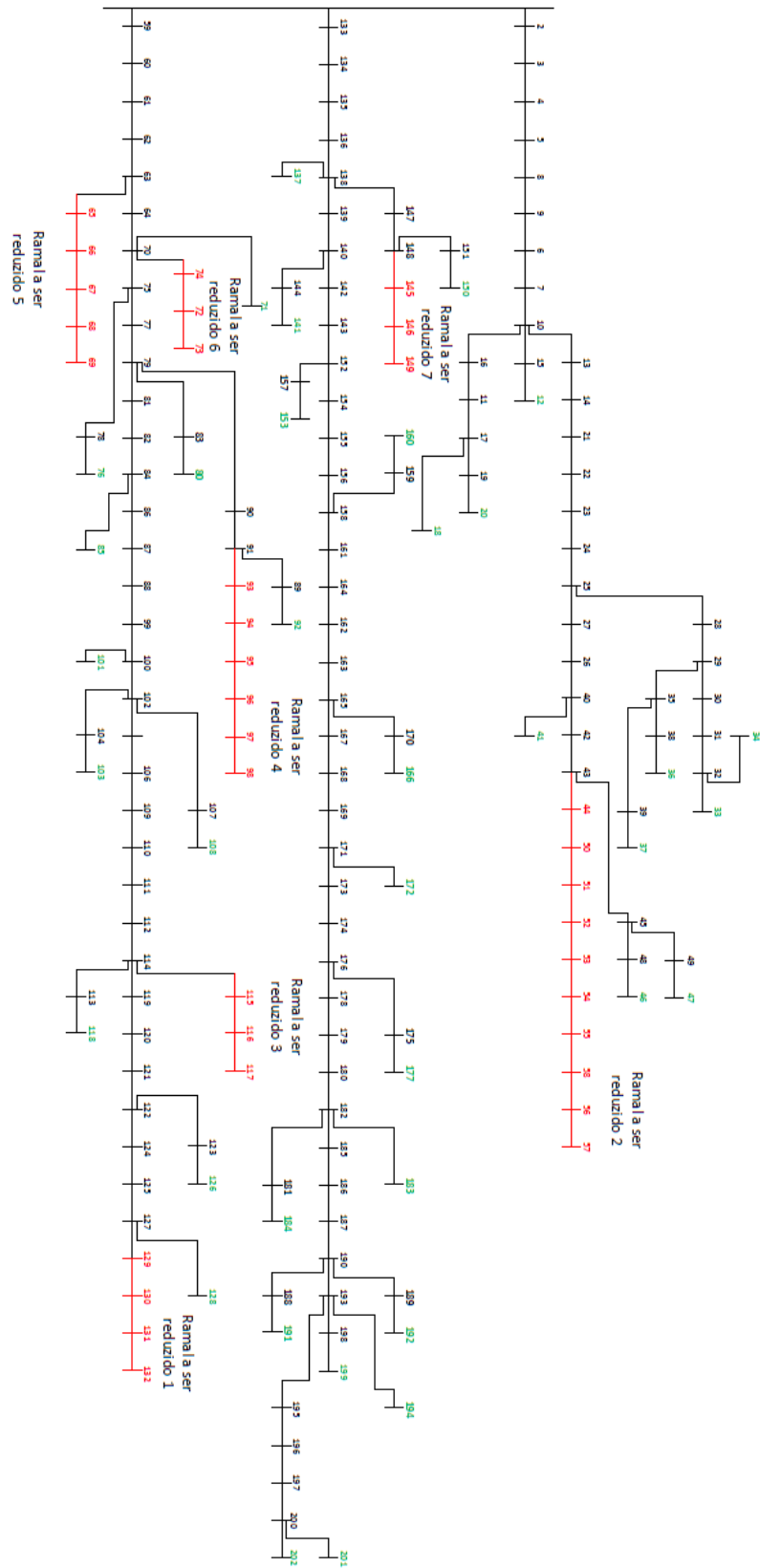
4.2 SISTEMA DE 202 BARRAS

O sistema é mostrado na Figura 22. O mesmo apresenta 202 barras e 201 trechos com uma potência total igual a 27571,99 kW. Foram considerados 3 cenários os quais são detalhados a seguir.

4.2.1 CENÁRIO 3: REDUÇÃO DE RAMAIS COM MAIS DE 2 TRECHOS

Os trechos pintados em vermelho na Figura 22 são aqueles ramais a serem reduzidos por um equivalente, um total de 7 ramais. As barras descritas na cor verde, representam as barras finais de todo o sistema. Para este cenário estabeleceu-se a seguinte restrição, serão reduzidos ramais com possuem uma quantidade de barras maior ou igual a três. A menor tensão obtida na rede original é de 0.93027 p.u. na barra 132. Os resultados são ilustrados nas tabelas 15, 16, 17, 18 e 19.

Figura 22: Rede de 202 barras



Fonte: Do autor

4.2.1.1 MODELO 1 – TIPO DE CÁLCULO: TENSÕES

Tabela 15: Resultados das tensões para o sistema de 202 barras

Forma de redução	 V p.u.	V₁₃₂	V₅₇	V₁₁₇	V₉₈	V₆₉	V₇₃	V₁₄₉
FORMA 1	Antes*	0.9302	0.946	0.93429	0.94669	0.96055	0.95666	0.9687
	Depois*	0.9304	0.945	0.93427	0.94660	0.96053	0.95668	0.95668
FORMA 2	Antes*	0.93025	0.94623	0.934299	0.94669	0.960554	0.956663	0.96879
	Depois*	0.93027	0.94621	0.934295	0.94668	0.960551	0.956660	0.968798
FORMA 3	Antes*	0.930256	0.94623	0.934299	0.94669	0.960554	0.956663	0.968795
	Depois*	0.930252	0.94621	0.934295	0.94668	0.960551	0.956660	0.968796

Antes* é antes da simplificação da rede

Depois* é depois da simplificação da rede

Fonte: Do autor.

A Tabela 16 ilustra os resultados das tensões nas cinco barras com maior queda de tensão, representadas em verde na Figura 22. Já os valores de todas as tensões são ilustrados no Anexo A.

Tabela 16: Resultados das tensões das cinco barras com maior queda de tensão para modelo 1.

Forma de redução	 V p.u.	V₁₃₇	V₁₅₀	V₁₂	V₁₈	V₂₀
FORMA 1	Antes*	0.9689624	0.96883517	0.96844	0.96819	0.9677
	Depois*	0.9689625	0.96883518	0.96840	0.96815	0.9676
FORMA 2	Antes*	0.9689624	0.96883517	0.96844	0.96819	0.9677
	Depois*	0.9689625	0.96883518	0.96843	0.9681816	0.9670
FORMA 3	Antes*	0.9689624	0.96883517	0.96844	0.96819	0.9677
	Depois*	0.9689624	0.96883518	0.9684304	0.96818	0.9678

Fonte: Do autor.

4.2.1.2 MODELO 2 – TIPO DE CÁLCULO: PERDAS

Tabela 17: Resultados das perdas para o sistema de 202 barras

Formas de implementação	$ \Delta P _{original}$ (kW) (antes da redução)	$ \Delta P _{nova}$ (Depois da redução)	Diferença entre valores (%)
FORMA 1	546,3	555,1	0,088
FORMA 2	546,3	546,2	0,001
FORMA 3	546,3	546,4	0,001

Fonte: Do autor.

4.2.1.3 MODELO 3 – TIPO DE CÁLCULO: HÍBRIDO (TENSÕES E PERDAS)

Tabela 18: Resultados das tensões e das perdas para o sistema de 202 barras

Forma de redução	V p.u.	V ₁₃₂	V ₅₇	V ₁₁₇	V ₉₈	V ₆₉	V ₇₃	V ₁₄₉
FORMA 1	Antes*	0.9302	0.946	0.93429	0.94669	0.96055	0.95666	0.9687
	Depois*	0.9308	0.9464	0.9344	0.947	0.96054	0.95668	0.9688
FORMA 2	Antes*	0.93025	0.94623	0.934299	0.94669	0.960554	0.956663	0.96879
	Depois*	0.927	0.950	0.931	0.9468	0.9608	0.95664	0.96876
FORMA 3	Antes*	0.930256	0.94623	0.934299	0.94669	0.960554	0.956663	0.968795
	Depois*	0.9307	0.948	0.9344	0.947	0.9606	0.9563404	0.9686

PERDAS			
Formas de implementação	$ \Delta P _{original}$ (Kw) (antes da redução)	$ \Delta P _{nova}$ (Depois da redução)	Diferença entre valores (%)
FORMA 1	546,3	543,4	0,029
FORMA 2	546,3	545,2	0,011
FORMA 3	546,3	542,9	0,034

Fonte: Do autor.

A Tabela 19 ilustra os resultados das tensões nas cinco barras com maior queda de tensão, representadas em verde na Figura 22. Já os valores de todas as tensões são ilustrados no Anexo A.

Tabela 19: Resultados das tensões das cinco barras com maior queda de tensão para modelo 3.

Forma de redução	 V p.u.	V₁₃₇	V₁₅₀	V₁₂	V₁₈	V₂₀
FORMA 1	Antes*	0.9689624	0.96883517	0.96844	0.96819	0.9677
	Depois*	0.9689625	0.96883518	0.96841	0.96816	0.9676
FORMA 2	Antes*	0.9689624	0.96883517	0.96844	0.96819	0.9677
	Depois*	0.9689625	0.968835179	0.96841	0.96816	0.9676
FORMA 3	Antes*	0.9689624	0.96883517	0.96844	0.96819	0.9677
	Depois*	0.9689625	0.968835179	0.96843	0.96818	0.96770

Fonte: Do autor.

4.2.2 CENÁRIO 4: REDUÇÃO DE RAMAIS COM MAIS DE 1 TRECHO

Os ramais da Figura 22 que possuem mais de 1 barra serão reduzidos por um equivalente, apresentando-se um total de 28 ramais. A menor tensão obtida na rede original é de 0.93025 p.u. na barra 132. Os resultados são ilustrados nas tabelas 20, 21, 22, 23 e 24.

4.2.2.1 MODELO 1 – TIPO DE CÁLCULO: TENSÕES

Tabela 20: Resultados das tensões para o sistema de 202 barras

Forma de redução	 V p.u.	V₁₃₂	V₁₉₉	V₁₉₁	V₁₉₂	V₁₂₆	V₁₈₄	V₅₇
FORMA 1	Antes*	0.9302	0.9344	0.9363895	0.9362334	0.93258	0.9388134	0.946
	Depois*	0.9304	0.9343	0.9363893	0.9362332	0.93255	0.9388132	0.945
FORMA 2	Antes*	0.93025	0.93446427	0.93638958	0.9362334	0.93258	0.93881348	0.94623
	Depois*	0.93027	0.93446420	0.93638952	0.9362333	0.93257	0.93881342	0.94621
FORMA 3	Antes*	0.930256	0.93446427	0.93638958	0.9362334	0.93258	0.93881348	0.94623
	Depois*	0.930252	0.93446420	0.93638952	0.9362333	0.93257	0.93881342	0.94621
Forma de redução	 V p.u.	V₁₁₇	V₁₁₈	V₁₇₇	V₄₆	V₄₇	V₃₆	V₃₇
FORMA 1	Antes*	0.93429	0.934643	0.9406022	0.95017	0.95027	0.95359	0.9536
	Depois*	0.93427	0.934640	0.9406020	0.95010	0.95020	0.95353	0.9535
FORMA 2	Antes*	0.934299	0.93464	0.94060226	0.95017	0.95027	0.95359	0.9536
	Depois*	0.934295	0.93463	0.94060221	0.95015	0.95025	0.95357	0.9535
FORMA 3	Antes*	0.934299	0.93464	0.94060226	0.95017	0.95027	0.95359	0.9536
	Depois*	0.934295	0.93463	0.94060221	0.95015	0.95025	0.95357	0.9535

Tabela 20.1: Continuação dos Resultados Tabela 20

Forma de redução	 V p.u.	V₁₀₈	V₁₆₆	V₉₈	V₁₆₀	V₂₀	V₉₂	V₈₀
FORMA 1	Antes*	0.939399	0.947907	0.94669	0.95572	0.9677	0.947416	0.94833
	Depois*	0.939390	0.947906	0.94660	0.95571	0.9679	0.947412	0.94832
FORMA 2	Antes*	0.939399	0.94790708	0.94669	0.95572429	0.96771	0.947416	0.94833
	Depois*	0.939395	0.94790704	0.94668	0.95572425	0.96770	0.947412	0.94832
FORMA 3	Antes*	0.939399	0.94790708	0.94669	0.95572429	0.96771	0.947416	0.94833
	Depois*	0.939395	0.94790704	0.94668	0.95572425	0.96770	0.947412	0.94832
Forma de redução	 V p.u.	V₁₅₃	V₁₂	V₆₉	V₇₃	V₇₆	V₁₄₉	V₁₄₁
FORMA 1	Antes*	0.9602549	0.96844	0.96055	0.95666	0.951864	0.96864	0.9645231
	Depois*	0.9602548	0.96840	0.96053	0.95668	0.951861	0.96868	0.9645230
FORMA 2	Antes*	0.96025495	0.96844	0.960554	0.956663	0.951864	0.968643	0.9645231
	Depois*	0.96025491	0.96843	0.960551	0.956660	0.951860	0.968642	0.9645230
FORMA 3	Antes*	0.96025495	0.96844	0.960554	0.956663	0.951864	0.968643	0.9645231
	Depois*	0.96025491	0.96843	0.960551	0.956660	0.951860	0.968642	0.9686954

Fonte: Do autor.

A Tabela 21 ilustra os resultados das tensões nas cinco barras com maior queda de tensão, representadas em verde na Figura 22. Já os valores de todas as tensões são ilustrados no Anexo A.

Tabela 21: Resultados das tensões das cinco barras com maior queda de tensão para modelo 1

Forma de redução	 V p.u.	V₁₃₇	V₁₈	V₇₁	V₃₃	V₃₄
FORMA 1	Antes*	0.96896249	0.96819	0.956655	0.95288	0.9528
	Depois*	0.0096896241	0.96815	0.956652	0.95282	0.9527
FORMA 2	Antes*	0.96896249	0.96819	0.956655	0.95288	0.95283
	Depois*	0.96896247	0.96818	0.956652	0.95286	0.95281
FORMA 3	Antes*	0.96896249	0.96819	0.956655	0.95288	0.95283
	Depois*	0.96896247	0.96818	0.956652	0.95286	0.95281

Fonte: Do autor.

4.2.2.2 MODELO 2 – TIPO DE CÁLCULO: PERDAS

Tabela 22: Resultados das perdas para o sistema de 202 barras

Formas de implementação	$ \Delta P _{original}$ (Kw) (antes da redução)	$ \Delta P _{nova}$ (Depois da redução)	Diferença entre valores (%)
FORMA 1	546,3	555,0	0,09
FORMA 2	546,3	546,2	0,001
FORMA 3	546,3	546,3	0

Fonte: Do autor.

4.2.2.3 MODELO 3 – TIPO DE CÁLCULO: HÍBRIDO (TENSÕES E PERDAS)

Tabela 23: Resultados das tensões e das perdas para o sistema de 202 barras

Forma de redução	$ V $ p.u.	V_{132}	V_{199}	V_{191}	V_{192}	V_{126}	V_{184}	V_{57}
FORMA 1	Antes*	0.9302	0.9344	0.9363895	0.9362334	0.93258	0.9388134	0.946
	Depois*	0.9308	0.9346	0.93653	0.9364	0.9326	0.93896	0.9464
FORMA 2	Antes*	0.93025	0.93446427	0.93638958	0.9362334	0.93258	0.93881348	0.94623
	Depois*	0.9305	0.9346	0.93653	0.9364	0.9326	0.93896	0.9461
FORMA 3	Antes*	0.930256	0.93446427	0.93638958	0.9362334	0.93258	0.93881348	0.94623
	Depois*	0.9307	0.9346	0.93653	0.9364	0.9326	0.93896	0.948
Forma de redução	$ V $ p.u.	V_{117}	V_{118}	V_{177}	V_{46}	V_{47}	V_{36}	V_{37}
FORMA 1	Antes*	0.93429	0.934643	0.9406022	0.95017	0.95027	0.95359	0.9536
	Depois*	0.9344	0.93465	0.94077	0.95018	0.95023	0.95356	0.9535
FORMA 2	Antes*	0.934299	0.93464	0.94060226	0.95017	0.95027	0.95359	0.9536
	Depois*	0.9343	0.93465	0.94077	0.950173	0.95022	0.95355	0.9535
FORMA 3	Antes*	0.934299	0.93464	0.94060226	0.95017	0.95027	0.95359	0.9536
	Depois*	0.9344	0.93465	0.94077	0.9502	0.950271	0.953599	0.9536033

Tabela 23.1: Continuação dos resultados Tabela 23

Forma de redução	V p.u.	V ₁₀₈	V ₁₆₆	V ₉₈	V ₁₆₀	V ₂₀	V ₉₂	V ₈₀
FORMA 1	Antes*	0.939399	0.947907	0.94669	0.95572	0.9677	0.947416	0.94833
	Depois*	0.9394	0.9481	0.947	0.95585	0.968	0.94744	0.9484
FORMA 2	Antes*	0.939399	0.94790708	0.94669	0.95572429	0.96771	0.947416	0.94833
	Depois*	0.9394	0.9481	0.9468	0.95585	0.9679	0.94744	0.96038
FORMA 3	Antes*	0.939399	0.94790708	0.94669	0.95572429	0.96771	0.947416	0.94833
	Depois*	0.9394	0.9481	0.947	0.95585	0.9679	0.94744	0.9484
Forma de redução	V p.u.	V ₁₅₃	V ₁₂	V ₆₉	V ₇₃	V ₇₆	V ₁₄₉	V ₁₄₁
FORMA 1	Antes*	0.9602549	0.96844	0.96055	0.95666	0.951864	0.96864	0.9645231
	Depois*	0.96038	0.9685	0.9606	0.95668	0.952	0.9688	0.96465
FORMA 2	Antes*	0.96025495	0.96844	0.960554	0.956663	0.951864	0.968643	0.9645231
	Depois*	0.96038	0.9685	0.9606	0.95668	0.952	0.9688	0.96465
FORMA 3	Antes*	0.96025495	0.96844	0.960554	0.956663	0.951864	0.968643	0.9645231
	Depois*	0.96038	0.9685	0.9606	0.95668	0.952	0.9688	0.96465

PERDAS			
Forma de redução	$ \Delta P _{original}$ (Kw) (antes da redução)	$ \Delta P _{nova}$ (Depois da redução)	Diferença entre valores (%)
1	545,43	551,77	0,06
2	545,43	542,05	0,034
3	545,43	547,20	0,02

Fonte: Do autor.

A Tabela 24 ilustra os resultados das tensões nas cinco barras com maior queda de tensão, representadas em verde na Figura 22. Já os valores de todas as tensões são ilustrados no Anexo A.

Tabela 24: Resultados das tensões das cinco barras com maior queda de tensão para modelo 3

Forma de redução	 V p.u.	V₁₃₇	V₁₈	V₇₁	V₃₃	V₃₄
FORMA 1	Antes*	0.9689624	0.96819	0.9566550	0.95288	0.9528
	Depois*	0.9689628	0.96816	0.9566555	0.95284	0.9527
FORMA 2	Antes*	0.9689624	0.96819	0.956655	0.95288	0.9528
	Depois*	0.9689628	0.96816	0.956654	0.95283	0.9527
FORMA 3	Antes*	0.9689624	0.96819	0.9566550	0.952888	0.95283
	Depois*	0.9689628	0.96818	0.9566557	0.952880	0.95282

Fonte: Do autor.

4.2.3 CENÁRIO 5: REDE CARREGADA COM REDUÇÃO DE RAMAIS (MÍNIMO 3 BARRAS)

Neste cenário, a rede elétrica foi carregada com um valor igual a três vezes o valor de carga. Foram reduzidos ramais com possuem uma quantidade de barras maior ou igual a três.. A menor tensão obtida na rede original é de 0.7730 p.u. na barra 132. Os resultados são ilustrados nas tabelas 25, 26 e 27.

4.2.3.1 MODELO 1 – TIPO DE CÁLCULO: TENSÕES

Tabela 25: Resultados das tensões para o sistema de 202 barras carregado

Formas de implementação	V p.u. (antes da redução)	V p.u. (depois da redução)	V p.u. (antes da redução)	V p.u. (depois da redução)
FORMA 1	$V_{132} = 0.7731$	$V_{132} = 0.7738$	$V_{69} = 0.87188$	$V_{69} = 0.87180$
	$V_{57} = 0.828$	$V_{57} = 0.825$	$V_{73} = 0.85925$	$V_{73} = 0.85929$
	$V_{117} = 0.7864$	$V_{117} = 0.7862$	$V_{149} = 0.8986$	$V_{149} = 0.8987$
	$V_{98} = 0.8273$	$V_{98} = 0.8270$	-----	-----
FORMA 2	$V_{132} = 0.7731$	$V_{132} = 0.7732$	$V_{69} = 0.87188$	$V_{69} = 0.87185$
	$V_{57} = 0.8287$	$V_{57} = 0.8284$	$V_{73} = 0.85925$	$V_{73} = 0.85921$
	$V_{117} = 0.7864$	$V_{117} = 0.7863$	$V_{149} = 0.8986$	$V_{149} = 0.8986$
	$V_{98} = 0.8273$	$V_{98} = 0.8272$	-----	-----
FORMA 3	$V_{132} = 0.7731$	$V_{132} = 0.7730$	$V_{69} = 0.87188$	$V_{69} = 0.87185$
	$V_{57} = 0.8287$	$V_{57} = 0.8284$	$V_{73} = 0.85925$	$V_{73} = 0.85921$
	$V_{117} = 0.7864$	$V_{117} = 0.7863$	$V_{149} = 0.8986$	$V_{149} = 0.8986$
	$V_{98} = 0.8273$	$V_{98} = 0.8272$	-----	-----

Fonte: Do autor.

4.2.3.2 MODELO 2 – TIPO DE CÁLCULO: PERDAS

Tabela 26: Resultados das perdas para o sistema de 202 barras carregado

Formas de implementação	$ \Delta P _{original}$ (Kw) (antes da redução)	$ \Delta P _{nova}$ (Depois da redução)	Diferença entre valores (%)
FORMA 1	5864,50	5964,95	1
FORMA 2	5864,50	5861,19	0,033
FORMA 3	5864,50	5864,43	0,0007

Fonte: Do autor.

4.2.3.3 MODELO 3 – TIPO DE CÁLCULO: HÍBRIDO (TENSÕES E PERDAS)

Tabela 27: Resultados das tensões e das perdas para o sistema de 202 barras carregado

Formas de implementação	$ V $ p.u. (antes da redução)	$ V $ p.u. (depois da redução)	$ V $ p.u. (antes da redução)	$ V $ p.u. (depois da redução)
FORMA 1	$V_{132} = 0.773$	$V_{132} = 0.775$	$V_{69} = 0.871$	$V_{69} = 0.872$
	$V_{57} = 0.828$	$V_{57} = 0.829$	$V_{73} = 0.8592$	$V_{73} = 0.8593$
	$V_{117} = 0.7864$	$V_{117} = 0.7867$	$V_{149} = 0.8986$	$V_{149} = 0.8987$
	$V_{98} = 0.827$	$V_{98} = 0.828$	-----	-----
FORMA 2	$V_{132} = 0.773$	$V_{132} = 0.774$	$V_{69} = 0.871$	$V_{69} = 0.872$
	$V_{57} = 0.8287$	$V_{57} = 0.8281$	$V_{73} = 0.85925$	$V_{73} = 0.85929$
	$V_{117} = 0.7864$	$V_{117} = 0.7866$	$V_{149} = 0.8986$	$V_{149} = 0.8987$
	$V_{98} = 0.8273$	$V_{98} = 0.8278$	-----	-----
FORMA 3	$V_{132} = 0.773$	$V_{132} = 0.774$	$V_{69} = 0.871$	$V_{69} = 0.872$
	$V_{57} = 0.828$	$V_{57} = 0.835$	$V_{73} = 0.8592$	$V_{73} = 0.8593$
	$V_{117} = 0.7864$	$V_{117} = 0.7869$	$V_{149} = 0.8986$	$V_{149} = 0.8987$
	$V_{98} = 0.827$	$V_{98} = 0.828$	-----	-----

PERDAS			
Formas de implementação	$ \Delta P _{original}$ (Kw) (antes da redução)	$ \Delta P _{nova}$ (Depois da redução)	Diferença entre valores (%)
FORMA 1	5864,50	5840,84	0,24
FORMA 2	5864,50	5849,07	0,15
FORMA 3	5864,50	5830,15	0,34

Fonte: Do autor.

A Tabela 28 demonstra os tempos computacionais do fluxo de potência com uma repetição de mil vezes para comparação dos resultados de antes e depois da redução dos ramais para todos os cenários descritos anteriormente.

O menor valor do tempo computacional após a redução dos ramais, visa a otimização dos processos, tornando o algoritmo mais eficiente e a prática da redução de redes aplicável, garantindo o ganho no esforço computacional.

Tabela 28 - Tempo computacional

Cenário	Número de fluxos rodados	Tempo utilizado em segundos		Diferença entre valores (%)
		Antes da redução	Após a redução	
1	1000	0.0213	0.0196	0,17
2	1000	0.0216	0.0165	0,51
3	1000	0.0777	0.06932	0,84
4	1000	0.0772	0.06931	0,79

Fonte: Do autor.

5 CONCLUSÕES

Os modelos de simplificação mostram-se adequados ao objetivo do trabalho, uma vez que, os valores das tensões e das perdas obtidos antes da redução são muito próximos dos valores obtidos após a redução. Os erros no cálculo das perdas e das tensões foram mínimos demonstrando que as reduções são adequadas para utilização nos SDEEs, levando em conta que são sistemas com muitas incertezas. Para o sistema onde a rede foi sobrecarregada foi possível analisar que a queda de tensão é maior que 10% e que os valores das perdas são bem maiores, quando comparados aos resultados das redes não sobrecarregadas.

O método do fluxo de potência utilizado também se mostrou adequado, uma vez que apresenta rapidez nos cálculos, converge com facilidade e com resultados definidos.

O algoritmo implementado pode trazer benefícios para o planejamento de redes e expansão dos SDEEs, pois através dele é possível realizar simulações e auxiliar no processo de tomada de decisões, inclusive alternativas para reconfiguração para um sistema em casos de contingência.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Otimizar o algoritmo do método de redução das barras e aplicar em redes reais de grande porte;
- Realizar testes em redes de grande porte, visando reduzir o tempo computacional do fluxo de potência;
- Tratar as informações utilizando curvas de distribuição de modo a obter resultados de forma estatística;
- Fazer mapeamento/cadastramento das redes nos sistemas GIS;
- Avaliar os resultados para o tempo computacional analisando a tolerância do algoritmo implementado;

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso: 10 de dezembro 2019.
- [2] BARBORA, L. R. Integração entre sistema de informação geográfica e sistema de projeto de redes de distribuição. 2008. Dissertação (mestre em engenharia elétrica) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [3] BRANDINI, A. C. Análise crítica de algoritmos de fluxo de carga usados em sistemas de distribuição radial. 2000. Dissertação (mestre em engenharia elétrica) – Faculdade de engenharia da Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.
- [4] CARVALHO, M. R. Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial. 2006. Dissertação (mestre em engenharia elétrica) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [5] CESPEDES, R. New Method for the Analysis of distribution networks. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 5, n. 1, 1990.
- [6] DE CARLI, EJ. Utilização de grafos na simplificação de redes de distribuição de energia. Monografia UFPR, 2002.
- [7] DE RESENDE BARBOSA, C. H. N. Reconfiguração e restauração ótima e sistema de distribuição primaria de energia elétrica. 2012. Tese (Doutor em engenharia elétrica) – Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [8] GRUPPELLI, F. A. Otimização da análise da contingência em sistema de subtransmissão 34,5kv a partir de uma rede georreferenciada. 2006. Dissertação (mestre em ciências) – Universidade tecnológica federal do Paraná, Curitiba.
- [9] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.; ROBBA, E.; Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. 2 ed. São Paulo: Edagr Blucher, 2010.

- [10] LIU, Jian et al. Power flow analysis on simplified feeder modeling. IEEE Transactions on Power delivery, v. 19, n. 1, p. 279-287, 2004.
- [11] MOHAMED, M; MAMDOUH, A. A robust quasi-direct continuous power-flow analysis using two-bus equivalents for voltage stability analysis os radial distribution systems. Electr Eng 100:47-57, 2018.
- [12] MOHAPATRA, Saurav; JANG, Wonhyeok; OVERBYE, Thomas J. Equivalent line limit calculation for power system equivalent networks. IEEE Transactions on Power Systems, v. 29, n. 5, p. 2338-2346, 2014.
- [13] MONTICELLI, A. J. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. Editora Edgard Blucher Ltda, 1983.
- [14] OLIVEIRA, Leonardo W. et al. Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição para minimização de perdas de energia. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, v. 20, n. 2, p. 233-246, 2009.
- [15] PEREIRA, M. Otimização de Fluxo de Potência em Redes Elétricas com o UPFC. 2008. 120f. 2008. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em sistemas de potência)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [16] SILVA, K. D. Fluxo de potência para sistemas de distribuição considerando redução de barras. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia e Urbanismo Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
- [17] SHI, Di; TYLAVSKY, Daniel J. A novel bus-aggregation-based structure-preserving power system equivalent. IEEE Transactions on Power Systems, v. 30, n. 4, p. 1977-1986, 2014.

[18] SPERANDIO, M. Planejamento da automação de sistemas de manobra em redes de distribuição. 2008. Tese (Doutor em engenharia elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[19] VEMPATI, N. et al. Simplified feeder modeling for loadflow calculations. IEEE transactions on power systems, v. 2, n. 1, p. 168-174, 1987.

[20] WARD, James B. Equivalent circuits for power-flow studies. Electrical Engineering, v. 68, n. 9, p. 794-794, 1949.

7 ANEXOS

ANEXO A: Tensões finais

Resultados das tensões nas barras finais para o sistema de 202 barras com mais de 2 trechos para modelo 1

Forma de redução: 1					
 V p.u (antes da redução)	 V p.u (depois da redução)	 V p.u (antes da redução)	 V p.u (depois da redução)	 V p.u (antes da redução)	 V p.u (depois da redução)
V₁₂ = 0.96844	V₁₂ = 0.96840	V₈₀ = 0. 94833	V₈₀=0.94832	V₁₅₃ = 0.96037666	V₁₅₃ =0.96037667
V₁₈ = 0.96819	V₁₈ = 0.96815	V₈₅ = 0.945405	V₈₅ =0.945402	V₁₆₀ = 0.9558462	V₁₆₀ =0.9558463
V₂₀ = 0.9677	V₂₀ = 0.9676	V₉₂ = 0.947416	V₉₂ = 0.947412	V₁₆₆ = 0.94802960	V₁₆₆ =0.94802961
V₃₃ = 0.95288	V₃₃ = 0.95282	V₁₀₁ = 0.940128	V₁₀₁= 0.940125	V₁₇₂ = 0.94502602	V₁₇₂ =0.94502603
V₃₄ = 0.9528	V₃₄ = 0.9527	V₁₀₃ = 0.939438	V₁₀₃ =0.939435	V₁₇₇ = 0.94072527	V₁₇₇ =0.94072529
V₃₆ = 0.95359	V₃₆ = 0.953531	V₁₀₈ = 0.939399	V₁₀₈ =0.939395	V₁₈₃ = 0.93890950	V₁₈₃ =0.93890951
V₃₇ = 0.9536	V₃₇ = 0.9535	V₁₁₈ = 0.934643	V₁₁₈ =0. 934640	V₁₈₄ = 0. 93893661	V₁₈₄ =0.93893662
V₄₁ = 0.95117	V₄₁ = 0.95110	V₁₂₆ = 0. 932583	V₁₂₆ =0.932580	V₁₉₁ = 0.93651288	V₁₉₁ =0.93651289
V₄₆ = 0.95017	V₄₆ = 0.95010	V₁₂₈ = 0.931344	V₁₂₈ =0.931340	V₁₉₂ = 0.93635670	V₁₉₂ =0.93635671
V₄₇ = 0.950	V₄₇ = 0.956	V₁₃₇ = 0.9689624	V₁₃₇ =0.9689625	V₁₉₄ = 0.93451767	V₁₉₄ =0.93451768
V₇₁ = 0.956	V₇₁ = 0.950	V₁₄₁ =0.96464454	V₁₄₁=0.96464455	V₁₉₉ = 0.9345876	V₁₉₉=0.9345877
V₇₆ = .951864	V₇₆ = 0.951861	V₁₅₀ =0.96883517	V₁₅₀ =0.96883518	V₂₀₁ = 0. 9321693	V₂₀₁ =0.9321694
				V₂₀₂ = 0.93182094	V₂₀₂ =0.93182095
Forma de redução: 2					
V₁₂ = 0.96844	V₁₂ = 0.96843	V₈₀ = 0. 94833	V₈₀=0.94832	V₁₅₃ = 0.96037666	V₁₅₃ =0.96037667
V₁₈ = 0.96819	V₁₈=0.9681816	V₈₅ = 0.945405	V₈₅ =0.945401	V₁₆₀ = 0.9558462	V₁₆₀ =0.9558463
V₂₀ = 0.9677	V₂₀ =0.9670	V₉₂ = 0.947416	V₉₂ =0.947412	V₁₆₆ = 0.94802960	V₁₆₆ =0.94802960
V₃₃ = 0.95288	V₃₃ =0.95286	V₁₀₁ = 0.940128	V₁₀₁ =0.940124	V₁₇₂ = 0.94502602	V₁₇₂ =0.94502602
V₃₄ = 0.9528	V₃₄ =0.9521	V₁₀₃ = 0.939438	V₁₀₃ =0.939434	V₁₇₇ = 0.94072527	V₁₇₇ =0.94072527
V₃₆ = 0.95359	V₃₆ = 0.95357	V₁₀₈ = 0.939399	V₁₀₈ =0.939395	V₁₈₃ = 0.93890950	V₁₈₃ =0.93890950
V₃₇ = 0.9536	V₃₇ =0.9535	V₁₁₈ = 0.93464	V₁₁₈ =0.93463	V₁₈₄ = 0. 93893661	V₁₈₄ =0.93893661
V₄₁ = 0.95117	V₄₁ =0.95115	V₁₂₆ = 0. 93258	V₁₂₆ =0.93257	V₁₉₁ = 0.93651288	V₁₉₁ =0.93651288
V₄₆ = 0.95017	V₄₆ =0.95015	V₁₂₈ = 0.931344	V₁₂₈ =0.931340	V₁₉₂ = 0.93635670	V₁₉₂ =0.93635670
V₄₇ = 0.950	V₄₇ =0.952	V₁₃₇ = 0.9689624	V₁₃₇ =0.9689625	V₁₉₄ = 0.93451767	V₁₉₄ =0.93451767
V₇₁ = 0.956	V₇₁ =0.955	V₁₄₁ =0.96464454	V₁₄₁ =0.96464455	V₁₉₉ = 0.9345876	V₁₉₉ =0.9345876
V₇₆ = .951864	V₇₆ =0.951861	V₁₅₀ = 0.96883517	V₁₅₀ =0.96883518	V₂₀₁ = 0. 9321693	V₂₀₁ =0.93216939
				V₂₀₂ = 0.93182094	V₂₀₂ =0.93182094

Forma de redução: 3					
$V_{12} = 0.96844$	$V_{12}=0.9684304$	$V_{80} = 0. 94833$	$V_{80}=0.94832$	$V_{153} = 0.96037666$	$V_{153}=0.96037666$
$V_{18} = 0.96819$	$V_{18}=0.96818$	$V_{85} = 0.945405$	$V_{85} = 0. 945401$	$V_{160} = 0.9558462$	$V_{160}=0.9558462$
$V_{20} = 0.9677$	$V_{20}=0.9677$	$V_{92} = 0.947416$	$V_{92}=0.947412$	$V_{166} = 0.94802960$	$V_{166}=0.94802960$
$V_{33} = 0.95288$	$V_{33}=0.95286$	$V_{101} = 0.940128$	$V_{101}=0.940124$	$V_{172} = 0.94502602$	$V_{172}=0.94502602$
$V_{34} = 0.9528$	$V_{34}=0.9528$	$V_{103} = 0.939438$	$V_{103}=0.939434$	$V_{177} = 0.94072527$	$V_{177}=0.94072527$
$V_{36} = 0.95359$	$V_{36}=0. 95357$	$V_{108} = 0.939399$	$V_{108}=0. 9393954$	$V_{183} = 0.93890950$	$V_{183}=0.93890950$
$V_{37} = 0.9536$	$V_{37}=0. 9535$	$V_{118} = 0.934643$	$V_{118}=0. 93463$	$V_{184} = 0. 93893661$	$V_{184}=0.93893661$
$V_{41} = 0.95117$	$V_{41}=0. 95115$	$V_{126} = 0. 93258$	$V_{126}=0. 93257$	$V_{191} = 0.93651288$	$V_{191}=0.93651288$
$V_{46} = 0.95017$	$V_{46}=0. 95015$	$V_{128} = 0.931344$	$V_{128}=0.931340$	$V_{192} = 0.93635670$	$V_{192}=0.93635670$
$V_{47} = 0.950$	$V_{47}=0.950$	$V_{137} = 0.9689624$	$V_{137}=0.9689624$	$V_{194} = 0.93451767$	$V_{194}=0.93451767$
$V_{71} = 0.956$	$V_{71}=0.956$	$V_{141}=0.96464454$	$V_{141}=0.96464454$	$V_{199} = 0.9345876$	$V_{199}=0.9345876$
$V_{76} = .951864$	$V_{76}=0.951860$	$V_{150}= 0.96883517$	$V_{150}=0.96883517$	$V_{201} = 0. 9321693$	$V_{201}=0.9321693$
				$V_{202} = 0.93182094$	$V_{202}=0.93182094$

Resultados das tensões nas barras finais para o sistema de 202 barras com mais de 2 trechos para modelo 3

Forma de redução: 1					
$ V $ p.u (antes da redução)	$ V $ p.u (depois da redução)	$ V $ p.u (antes da redução)	$ V $ p.u (depois da redução)	$ V $ p.u (antes da redução)	$ V $ p.u (depois da redução)
$V_{12} = 0.96844$	$V_{12} = 0.96841$	$V_{80} = 0.94833$	$V_{80} = 0.94832$	$V_{153} = 0.96037666$	$V_{153} = 0.96037667$
$V_{18} = 0.96819$	$V_{18} = 0.96816$	$V_{85} = 0.9454053$	$V_{85} = 0.9454052$	$V_{160} = 0.9558462$	$V_{160} = 0.9558463$
$V_{20} = 0.9677$	$V_{20} = 0.9676$	$V_{92} = 0.9474164$	$V_{92} = 0.9474160$	$V_{166} = 0.94802960$	$V_{166} = 0.94802961$
$V_{33} = 0.95288$	$V_{33} = 0.95284$	$V_{101} = 0.94012866$	$V_{101} = 0.94012863$	$V_{172} = 0.94502602$	$V_{172} = 0.94502603$
$V_{34} = 0.9528$	$V_{34} = 0.9527$	$V_{103} = .9394384$	$V_{103} = 0.9394385$	$V_{177} = 0.94072527$	$V_{177} = 0.940725$
$V_{36} = 0.95359$	$V_{36} = 0.95355$	$V_{108} = 0.9393993$	$V_{108} = 0.9393992$	$V_{183} = 0.93890950$	$V_{183} = 0.93890951$
$V_{37} = 0.9536$	$V_{37} = 0.9535$	$V_{118} = 0.934643$	$V_{118} = 0.934644$	$V_{184} = 0.93893661$	$V_{184} = 0.93893662$
$V_{41} = 0.95117$	$V_{41} = 0.95113$	$V_{126} = 0.9325837$	$V_{126} = 0.9325839$	$V_{191} = 0.936512880$	$V_{191}=0.936512889$
$V_{46} = 0.95017$	$V_{46} = 0.95012$	$V_{128} = 0.9313444$	$V_{128} = 0.9313447$	$V_{192} =0.936356700$	$V_{192}=0.936356709$
$V_{47} = 0.95027$	$V_{47} = 0.95022$	$V_{137} = 0.9689624$	$V_{137} = 0.9689625$	$V_{194} =0.93451767$	$V_{194} =0.93451768$
$V_{71} = 0.956655$	$V_{71} = 0.956654$	$V_{141}=0.964644540$	$V_{141}=0.964644549$	$V_{199} =0.9345876$	$V_{199} =0.9345877$
$V_{76} = 0.9518642$	$V_{76}=0.9518640$	$V_{150}=0.96883517$	$V_{150}=0.96883518$	$V_{201} =0.9321693$	$V_{201} =0.9321694$
				$V_{202} =0.93182094$	$V_{202} =0.93182095$
Forma de redução: 2					

$V_{12}=0.96844$	$V_{12}=0.96841$	$V_{80}=0.94833$	$V_{80}=0.94832$	$V_{153}=0.960376661$	$V_{153}=0.960376668$
$V_{18}=0.96819$	$V_{18}=0.96816$	$V_{85}=0.945405$	$V_{85}=0.945403$	$V_{160}=0.9558462$	$V_{160}=0.9558463$
$V_{20}=0.9677$	$V_{20}=0.9676$	$V_{92}=0.947416$	$V_{92}=0.947414$	$V_{166}=0.94802960$	$V_{166}=0.94802961$
$V_{33}=0.95288$	$V_{33}=0.95283$	$V_{101}=0.940128$	$V_{101}=0.940126$	$V_{172}=0.94502602$	$V_{172}=0.94502603$
$V_{34}=0.9528$	$V_{34}=0.9527$	$V_{103}=0.939438$	$V_{103}=0.939436$	$V_{177}=0.94072527$	$V_{177}=0.94072528$
$V_{36}=0.95359$	$V_{36}=0.95354$	$V_{108}=0.939399$	$V_{108}=0.939397$	$V_{183}=0.93890950$	$V_{183}=0.93890951$
$V_{37}=0.9536$	$V_{37}=0.9535$	$V_{118}=0.934643$	$V_{118}=0.934641$	$V_{184}=0.93893661$	$V_{184}=0.93893662$
$V_{41}=0.95117$	$V_{41}=0.95111$	$V_{126}=0.932583$	$V_{126}=0.932581$	$V_{191}=0.936512880$	$V_{191}=0.936512887$
$V_{46}=0.95017$	$V_{46}=0.95011$	$V_{128}=0.931344$	$V_{128}=0.931342$	$V_{192}=0.936356700$	$V_{192}=0.936356707$
$V_{47}=0.95027$	$V_{47}=0.95021$	$V_{137}=0.9689624$	$V_{137}=0.9689625$	$V_{194}=0.93451767$	$V_{194}=0.93451768$
$V_{71}=0.956655$	$V_{71}=0.956653$	$V_{141}=0.964644540$	$V_{141}=0.964644547$	$V_{199}=0.9345876$	$V_{199}=0.9345877$
$V_{76}=0.951864$	$V_{76}=0.951862$	$V_{150}=0.968835171$	$V_{150}=0.968835179$	$V_{201}=0.9321693$	$V_{201}=0.9321694$
				$V_{202}=0.93182094$	$V_{202}=0.93182095$

Forma de redução: 3

$V_{12}=0.96844$	$V_{12}=0.96843$	$V_{80}=0.94833004$	$V_{80}=0.94833005$	$V_{153}=0.960376661$	$V_{153}=0.960376668$
$V_{18}=0.96819$	$V_{18}=0.96818$	$V_{85}=0.94540538$	$V_{85}=0.94540539$	$V_{160}=0.9558462$	$V_{160}=0.9558463$
$V_{20}=0.96771$	$V_{20}=0.96770$	$V_{92}=0.94741647$	$V_{92}=0.94741648$	$V_{166}=0.94802960$	$V_{166}=0.94802961$
$V_{33}=0.95288$	$V_{33}=0.95287$	$V_{101}=0.94012866$	$V_{101}=0.94012867$	$V_{172}=0.94502602$	$V_{172}=0.94502603$
$V_{34}=0.95283$	$V_{34}=0.95282$	$V_{103}=0.93943855$	$V_{103}=0.93943856$	$V_{177}=0.94072527$	$V_{177}=0.94072528$
$V_{36}=0.95359$	$V_{36}=0.95358$	$V_{108}=0.93939930$	$V_{108}=0.93939931$	$V_{183}=0.93890950$	$V_{183}=0.93890951$
$V_{37}=0.9536$	$V_{37}=0.9535$	$V_{118}=0.934643$	$V_{118}=0.934644$	$V_{184}=0.93893661$	$V_{184}=0.93893662$
$V_{41}=0.95117$	$V_{41}=0.95116$	$V_{126}=0.93258374$	$V_{126}=0.93258376$	$V_{191}=0.936512880$	$V_{191}=0.936512887$
$V_{46}=0.95017$	$V_{46}=0.95016$	$V_{128}=0.93134446$	$V_{128}=0.93134448$	$V_{192}=0.936356700$	$V_{192}=0.936356707$
$V_{47}=0.95027$	$V_{47}=0.95026$	$V_{137}=0.9689624$	$V_{137}=0.9689625$	$V_{194}=0.93451767$	$V_{194}=0.93451768$
$V_{71}=0.95665508$	$V_{71}=0.95665509$	$V_{141}=0.964644540$	$V_{141}=0.964644547$	$V_{199}=0.9345876$	$V_{199}=0.9345877$
$V_{76}=0.951864212$	$V_{76}=0.951864218$	$V_{150}=0.968835171$	$V_{150}=0.968835179$	$V_{201}=0.9321693$	$V_{201}=0.9321694$
				$V_{202}=0.93182094$	$V_{202}=0.93182095$

Resultados das tensões nas barras finais para o sistema de 202 barras com mais de 1 trecho para modelo 1

Forma de redução: 1			
 V p.u (antes da redução)	 V p.u (depois da redução)	 V p.u (antes da redução)	 V p.u (depois da redução)
V₁₈ =0.96819	V₁₈ =0.96815	V₁₂₈ = 0.931344	V₁₂₈ = 0.931340
V₃₃ =0.95288	V₃₃ =0.95282	V₁₃₇ = 0.96896249	V₁₃₇ = 0.0096896241
V₃₄ =0.9528	V₃₄ =0.9527	V₁₇₂ = 0.94502602	V₁₇₂ = 0.9450258605
V₄₁ = 0.95117	V₄₁ = 0.95110	V₁₈₃ = 0.9389095	V₁₈₃ = 0.9389093
V₇₁ =0.956655	V₇₁ =0.956652	V₁₉₄ = 0.9345176	V₁₉₄ = 0.9345174
V₈₅ = 0.945405	V₈₅ = 0.945401	V₂₀₁ = 0.9321693	V₂₀₁ = 0.00932169
V₁₀₁ = 0.940128	V₁₀₁ = 0.940125	V₂₀₂ = 0.9318209	V₂₀₂ = 0.9318207
Forma de redução: 2			
V₁₈ =0.96819	V₁₈ =0.96818	V₁₂₈ = 0.931344	V₁₂₈ = 0.931340
V₃₃ =0.95288	V₃₃ =0.95286	V₁₃₇ = 0.96896249	V₁₃₇ = 0.96896247
V₃₄ =0.95283	V₃₄ =0.95281	V₁₇₂ = 0.945026	V₁₇₂ = 0.945025
V₄₁ = 0.95117	V₄₁ = 0.95115	V₁₈₃ = 0.9389095	V₁₈₃ = 0.009389094
V₇₁ =0.956655	V₇₁ =0.956652	V₁₉₄ = 0.93451767	V₁₉₄ = 0.93451761
V₈₅ = 0.945405	V₈₅ = 0.945401	V₂₀₁ = 0.93216939	V₂₀₁ = 0.93216933
V₁₀₁ = 0.940128	V₁₀₁ = 0.940124	V₂₀₂ = 0.9318209	V₂₀₂ = 0.9318208
Forma de redução: 3			
V₁₈ =0.96819	V₁₈ =0.96818	V₁₂₈ = 0.93134	V₁₂₈ = 0.93133
V₃₃ =0.95288	V₃₃ =0.95286	V₁₃₇ = 0.96896249	V₁₃₇ = 0.96896247
V₃₄ =0.95283	V₃₄ =0.95281	V₁₇₂ = 0.945026	V₁₇₂ = 0.945025
V₄₁ = 0.95117	V₄₁ = 0.95115	V₁₈₃ = 0.9389095	V₁₈₃ = 0.9389094
V₇₁ =0.956655	V₇₁ =0.956652	V₁₉₄ = 0.93451767	V₁₉₄ = 0.93451761
V₈₅ = 0.945405	V₈₅ = 0.945401	V₂₀₁ = 0.93216939	V₂₀₁ = 0.93216933
V₁₀₁ = 0.940128	V₁₀₁ = 0.940124	V₂₀₂ = 0.9318209	V₂₀₂ = 0.9318208

Resultados das tensões nas barras finais para o sistema de 202 barras com mais de 1 trecho para modelo 3

Forma de redução: 1			
V p.u (antes da redução)	V p.u (depois da redução)	V p.u (antes da redução)	V p.u (depois da redução)
V ₁₈ =0.96819	V ₁₈ =0.96816	V ₁₂₈ = 0.931344	V ₁₂₈ = 0.931345
V ₃₃ =0.95288	V ₃₃ =0.95284	V ₁₃₇ = 0.9689624	V ₁₃₇ = 0.9689628
V ₃₄ =0.9528	V ₃₄ =0.9527	V ₁₇₂ = 0.9450260	V ₁₇₂ = 0.9450266
V ₄₁ = 0.95117	V ₄₁ = 0.95113	V ₁₈₃ = 0.93890	V ₁₈₃ = 0.93891
V ₇₁ =0.9566550	V ₇₁ =0.9566555	V ₁₉₄ = 0.934517	V ₁₉₄ = 0.934518
V ₈₅ = 0.9454053	V ₈₅ = 0.9454059	V ₂₀₁ = 0.93216	V ₂₀₁ = 0.93217
V ₁₀₁ = 0.940128	V ₁₀₁ = 0.940129	V ₂₀₂ = 0.931820	V ₂₀₂ = 0.931821
Forma de redução: 2			
V ₁₈ =0.96819	V ₁₈ =0.96816	V ₁₂₈ = 0.931344	V ₁₂₈ = 0.931342
V ₃₃ =0.95288	V ₃₃ =0.95283	V ₁₃₇ = 0.9689624	V ₁₃₇ = 0.9689628
V ₃₄ =0.9528	V ₃₄ =0.9527	V ₁₇₂ = 0.9450260	V ₁₇₂ = 0.9450266
V ₄₁ = 0.95117	V ₄₁ = 0.95112	V ₁₈₃ = 0.93890	V ₁₈₃ = 0.93891
V ₇₁ =0.956655	V ₇₁ =0.956654	V ₁₉₄ = 0.934517	V ₁₉₄ = 0.934518
V ₈₅ = 0.945405	V ₈₅ = 0.945404	V ₂₀₁ = 0.93216	V ₂₀₁ = 0.93217
V ₁₀₁ = 0.940128	V ₁₀₁ = 0.940127	V ₂₀₂ = 0.931820	V ₂₀₂ = 0.931821
Forma de redução: 3			
V ₁₈ =0.96819	V ₁₈ =0.96818	V ₁₂₈ = 0.931344	V ₁₂₈ = 0.931345
V ₃₃ =0.952888	V ₃₃ =0.952880	V ₁₃₇ = 0.9689624	V ₁₃₇ = 0.9689628
V ₃₄ =0.95283	V ₃₄ =0.95282	V ₁₇₂ = 0.9450260	V ₁₇₂ = 0.9450266
V ₄₁ = 0.95117	V ₄₁ = 0.95116	V ₁₈₃ = 0.93890	V ₁₈₃ = 0.93891
V ₇₁ =0.9566550	V ₇₁ =0.9566557	V ₁₉₄ = 0.934517	V ₁₉₄ = 0.934518
V ₈₅ = 0.945405	V ₈₅ = 0.945406	V ₂₀₁ = 0.93216	V ₂₀₁ = 0.93217
V ₁₀₁ = 0.940128	V ₁₀₁ = 0.940129	V ₂₀₂ = 0.931820	V ₂₀₂ = 0.931821



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado **“Redução de redes elétricas para análise de fluxo de carga”** é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 17 de Agosto de 2020.

Pamela Laricvalho Bernini

Nome completo do(a) aluno(a)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica

ANEXO XI - DECLARAÇÃO DE CONFERÊNCIA DA VERSÃO FINAL

Declaro que conferi a versão final a ser entregue pela aluna PAMELA CARVALHO BERNINI, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado REDUÇÃO DE REDES ELÉTRICAS PARA ANÁLISE DE FLUXO DE CARGA quanto à conformidade nos seguintes itens:

1. A monografia corresponde a versão final, estando de acordo com as sugestões e correções sugeridas pela banca e seguindo as normas ABNT;
2. A versão final da monografia inclui a ata de defesa (Anexo IV - apenas verso), a ficha catalográfica e o termo de responsabilidade (ANEXO X -) devidamente assinado.

João Monlevade, 14 de agosto de 2020

Profº Dr. Wilington Guerra Zvietcovich