

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUSTAVO SOARES TOBIAS

**CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO VIA
MÉTODO DESACOPLADO ALTERNATIVO**

**CURITIBA
2018**

GUSTAVO SOARES TOBIAS

**CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO VIA
MÉTODO DESACOPLADO ALTERNATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Paraná, como requisito parcial
à obtenção do grau de Engenheiro

Orientador: Prof.Dr. Odilon Luís Tortelli

CURITIBA

2018

**Página reservada para ficha catalográfica que deve ser confeccionada após
apresentação e alterações sugeridas pela banca examinadora.**

Deve ser impressa no verso da folha de rosto.



GUSTAVO SOARES TOBIAS

**CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO VIA
MÉTODO DESACOPLADO ALTERNATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Paraná, como requisito parcial
à obtenção do título do grau de
Engenheiro.

COMISSÃO EXAMINADORA

(Orientador) Prof.Dr. Odilon Luís Tortelli
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Profª Drª. Thelma Solange Piazza Fernandes
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof.Dr. Rafael Martins
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, ____ de _____ de 2018.

Para todas as pessoas que contribuíram
para minha formação, em especial minha

FAMÍLIA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais Dalmi e Eliezer que são os **HERÓIS** da minha vida que com tanta dedicação, ensinamentos, paciência e empatia me tornaram a pessoa que sou hoje e que me ajudaram nos momentos mais difíceis, me dando o apoio, carinho e compreensão necessária nesta caminhada que se está encerrando, não esquecendo, porém da minha irmã e cunhado e todos da minha família.

Ao Eduardo Piacentinni que teve papel fundamental na minha trajetória.

Às várias amizades que conquistei ao longo desses anos na universidade e que com certeza deixará saudades.

Ao meu chefe no estágio Eliton Fuchs e a todos que conheci no PARANA EDUCAÇÃO e na FUNDEPAR, por essa parceria de trabalho de 2 anos que se encerra no estágio, mas que se tornou uma amizade para vida.

Ao meu ex-orientador no Instituto Lactec Lucio de Medeiros e sua equipe, que me acolheram nos meses que passamos juntos.

À todos os professores com quem tive a oportunidade de ter aula e conhecer ao longo desta trajetória da engenharia que eu considero a que revolucionou a humanidade e que sem ela não seríamos o que somos hoje.

Aos professores da área da eletrotécnica e sistemas de energia que é a área que quero seguir e que tenho uma paixão imensa.

A Deus por sempre me ajudar a ter fé, e ultrapassar obstáculos na vida sempre com disposição e alegria para continuar em frente.

Por fim, ao meu orientador Professor Dr. Odilon Luis Tortelli, pelos valiosos ensinamentos, ajuda, paciência e conversas sobre o mundo da engenharia elétrica ao longo deste TCC.

RESUMO

Este trabalho trata de uma abordagem alternativa para o cálculo de fluxo de potência via método desacoplado rápido, visando as mudanças dos sistemas de distribuição que, devido à inserção de geração distribuída, estarão sujeitos a fluxos de potência bidirecionais e podem passar a operar com topologias malhadas. Diante deste cenário, as metodologias existentes para análise de sistemas de distribuição, que consideram somente a ocorrência de fluxos unidirecionais e topologias radiais deverão ser revistas. Assim, neste trabalho, serão considerados os tradicionais métodos desacoplados, consolidados para estudo de sistemas de transmissão, porém com algumas adaptações que permitirão constitui-lo como uma alternativa para a resolução do fluxo de potência em sistemas de distribuição em malha e com fluxos bidirecionais com maior eficiência. O desenvolvimento desta nova alternativa se dará através do uso do toolbox MATPOWER 6.0 em que são adicionadas novas funções para implementação de tais métodos. Com isso será possível o uso deste MATPOWER modificado por outras instituições e sua difusão para estudar novos casos e novas topologias de sistema de distribuição através dessa ferramenta já conhecida e comprovada no campo educacional e de pesquisa. Para demonstrar a eficiência deste método desacoplado alternativo implementado, serão usados três sistemas teste: o primeiro com duas barras, o segundo com 33 barras radial e o último com 69 barras radial. Estes dois últimos são testados com a adição de uma topologia em malha e com malha e geração distribuída. Nos casos abordados é analisado o desempenho quanto ao número de iterações conforme a topologia e as características das linhas de distribuição, notadamente sua relação R/X, que tende a ser alta em sistemas de distribuição, o que é um problema para os métodos desacoplados tradicionais, concebidos para sistemas de transmissão, que apresentam, tipicamente, baixas relações R/X. Através dos diversos testes realizados, é possível observar que a abordagem alternativa implementada apresenta desempenho superior aos métodos desacoplados tradicionais em todos os casos analisados, consolidando-a, portanto, como uma nova ferramenta de estudo promissora para a resolução do fluxo de potência em sistemas de distribuição, tanto para sistemas radiais, como para sistemas que estão condizentes com o futuro do sistema de distribuição, com a presença de geração distribuída.

Palavras-chave: Fluxo de Potência, Método Desacoplado Alternativo, Sistemas de Distribuição, MATPOWER 6.0.

ABSTRACT

This work deals with an alternative approach of the calculation of power flow via fast decoupled method, aiming at the changes of distribution systems that due to iserção of distributed generation, will have two-way power flow and can pass the Have Caracteriticas meshed. Given this scenario, the existing methodologies for distribution system, consider only one-way flow and radial systems. Thus, the decoupled methods consolidated in transmission systems will be used and they can better solve with bi-directional flow mesh systems, but with some changes that will be shown throughout this work and that serves as a Alternative to the power flow resolution in distribution systems. The development of this new alternative will be using MATPOWER 6.0 in which new functions will be added to implement such methods, and with that it is possible to use this MATPOWER modified by other institutions and be disseminated to study new Cases and new system topologies in a tool already known and proven in the field of education and research. To elucidate the efficiency of this unbound alternative method, three systems will be used, being the first with two bars, the second with 33 radial bars and the last with 69 radial bars, in which these last two will be tested with the addition of a mesh topology and with mesh and distributed generation. In the cases addressed will be analyzed the performance of voltage and angles result, performance of the number of iterations according to the topology and the change of R/X relationships that tend to be high in distribution systems and that is a problem faced by the methods Traditional ones that are designed for low R/X relationships present in transmission systems and higher voltage. Analyses and tests, it is possible to observe that the alternative approach, can be superior to the traditional uncoupled methods, in all cases analyzed, thus consolidating as a new alternative to the resolution of power flow in systems of distribution, both for radial systems and for systems that are consistent with the future of the distribution system, with the presence of distributed generation.

Key-words: Load Flow, Alternative Decoupled Method, Distribution System, MATPOWER 6.0.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Divisão dos sistemas de energia elétrica	15
Figura 2 - Exemplo de Sistema de Distribuição.....	15
Figura 3 - Sistema de Subtransmissão	16
Figura 4 - Método Escalonado.	25
Figura 5 - Fluxograma - Método da Soma das Correntes	27
Figura 6 - Fluxograma do Método da Soma das Potências.	30
Figura 7 - Fluxograma do Método de Newton	33
Figura 8 - Fluxograma Método Desacoplado e Desacoplado Rápido	36
Figura 9 - Fluxograma Método Desacoplado Alternativo	44
Figura 10 - Sintaxe MATPOWER - métodos tradicionais e alternativo.....	46
Figura 11 - Sintaxe modificada – <i>mpoption.m</i>	47
Figura 12 - Sintaxe modificada – <i>runpf.m</i>	47
Figura 13 - Sintaxe modificada - <i>runpf.m</i>	48
Figura 14 - função <i>makeG.m</i> - parte da motangem de G' e G''	49
Figura 15 – Processo de modificação do MATPOWER 6.0	50
Figura 16 - Sistema com uma Barra.....	52
Figura 17 - Gráfico: Iterações x Relação R/X – Método Desacoplado Alternativo. ...	56
Figura 18 - Gráfico: Métodos Tradicionais x Métodos Alternativos	57
Figura 19 - Sistema de Distribuição de 33 Barras.	58
Figura 20 - Gráfico - Número de Iterações.....	59
Figura 21 - Gráfico - Tensão nas Barras - Caso 33 Barras Radial.	60
Figura 22 - Gráfico - Tensão nas Barras - Caso 33 Barras Malhado.	60
Figura 23 - Gráfico - Tensão nas Barras - Caso 33 Barras com GD.	61
Figura 24 - Sistema de Distribuição de 69 Barras.	62
Figura 25 – Gráfico: Relação R/X x Variação $R+jX$ – Sistema Radial.....	62
Figura 26 - Gráfico - Iterações Médias com variação de $R+jX$ - Sistema Radial.....	63
Figura 27 - Gráfico: Relação R/X x Variação $R+jX$ - Sistema 69 malhado e mlahado com GD.	64
Figura 28 - Gráfico - Iterações Médias com variação de $R+jX$ - Sistema Malhado.	64
Figura 29 - Gráfico - Iterações Médias com variação de $R+jX$ - Sistema Malhado com GD.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação R/X de Cabos.....	18
Tabela 2 - Uso das variáveis para o fluxo de potência.....	20
Tabela 3 - Faixas de Variação de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia	41
Tabela 4 - Valores corresponde a variação do ângulo de impedância.....	53
Tabela 5 - Iterações Médias - Método Desacoplado Rápido.....	54
Tabela 6 - Iterações Média - Método Desacoplado Rápido Alternativo.....	55
Tabela 7 - Iterações Médias - Várias topologias	59
Tabela 8 - Dados de Barra - Sistema 33 Barras.....	70
Tabela 9 - Dados de Barras com Geração Distribuida.	70
Tabela 10 - Dados de Linha - Sistema 33 barras radial.	71
Tabela 11 - Dados de Linha - Sistema 33 Barras Malhado.	72
Tabela 12 - Valores de Tensão e Ângulo - Sistema Radial.....	73
Tabela 13 - Valores de Tensão e Ângulo - Sistema Malhado.	74
Tabela 14 - Valores de Tensão e Ângulo - Sistema Malhado com GD.	75
Tabela 15 - Dados de Barra - Sistema 69 Barras.....	76
Tabela 16 - Dados de Barras com Geração Distribuida.	76
Tabela 17 - Dados de Linha e relação R/X com X/1 – Sistema Radial.	77
Tabela 18 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,25 - Sistema Radial.	79
Tabela 19 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,50 - Sistema Radial.	81
Tabela 20 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,75 - Sistema Radial.	83
Tabela 21 - Dados de Linha e relação R/X com X/2,0 - Sistema Radial.	85
Tabela 22 - Dados de Linha e relação R/X com X/1 - Sistema Malhado e Malhado-GD.....	87
Tabela 23 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,25 - Sistema Malhado e Malhado-GD.....	89
Tabela 24 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,50 - Sistema Malhado e Malhado-GD.....	91
Tabela 25 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,75 - Sistema Malhado e Malhado-GD.....	93
Tabela 26 - Dados de Linha e relação R/X com X/2,00 - Sistema Malhado e Malhado-GD.....	95

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	JUSTIFICATIVA.....	13
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	14
2	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	15
2.1	SISTEMA DE SUBTRANSMISSÃO.....	16
2.2	SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	16
2.3	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA.....	17
2.4	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA.....	19
3	FLUXO DE POTÊNCIA	20
3.1	PROBLEMATIZAÇÃO	20
3.2	MÉTODOS PARA O CALCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	23
3.2.1	Método Escalonado.....	23
3.2.2	Método da Soma das Correntes	26
3.2.3	Método da Soma das Potências	28
3.3	MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA BASEADOS EM N-R	31
3.3.1	Método de Newton-Raphson	31
3.3.2	Método de Newton Desacoplado e Desacoplado Rápido	34
3.3.2.1	Uso do método desacoplado Rápido em Sistemas de Distribuição.	37
4	MÉTODO ALTERNATIVO	39
4.1	MODELAGEM DO MÉTODO DE FLUXO DE POTÊNCIA DESACOPLADO RÁPIDO ALTERNATIVO.....	39
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO NO MATPOWER 6.0	45
5	TESTE E RESULTADOS	51
5.1	INTRODUÇÃO.....	51
5.2	SISTEMA TESTE COM DUAS BARRA.....	52
5.3	SISTEMA TESTE 33 BARRAS.....	58

5.4	SISTEMA TESTE 69 BARRAS.....	61
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS.....	66
6	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS.....	68
	ANEXO A–DADOS E RESULTADO DO SISTEMA TESTE 33 BARRAS	70
	ANEXO B– DADOS E RESULTADO DO SISTEMA TESTE 69 BARRAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

No atual contexto do setor elétrico, a reesença de geração no lado da demanda será uma realidade cada vez mais corriqueira na qual a busca por novas ferramentas para calcular o fluxo de potência nos sistemas de distribuição dentro deste novo cenário será necessário.

As soluções tradicionais para a análise de sistemas de distribuição são baseadas nas chamadas técnicas de varredura (*Backwar/Forward sweep*), que funcionam prioritariamente em redes radiais e com fluxos unidirecionais. Nessa linha, tem-se como principais métodos, o escalonamento (KERSTING, 2002), soma das correntes (SHIRMOHAMMADI et al., 1988) e a soma das potências (CESPEDES, 1990). A futura realidade do sistema elétrico com geração junto a carga faz com que a rede que esta rede que tradicionalmente opera de forma radial e com fluxo de potência unidirecional, se torne radial com fluxo de potência bidirecional ou dependendo da expansão topológica da rede, se transformem em sistemas malhados. E nestes casos, as metodologias tradicionais para estes sistemas se tornam ineficazes.

Contudo, tem-se encontrado maneiras para contornar esta situação e variações destes métodos estão sendo estudados para o calculo do fluxo de potência em redes de distribuição com geração disitribuida. Um exemplo, é método desacoplado rápido, comumente usado em sistemas de transmissão. Porém observou-se que pode ser usado em sistemas de distribuição como abordou (ZIMMERMAN; CHIANG, 1995) em que apresenta o método desacoplado rápido porém modificando a formulação considerando a injeção de corrente ao invés da formulação de potência original e compara com varios métodos de cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição desbalanceadas em que mostrou a possibilidade deste também ser usado para tal problema. Os trabalhos de (PORTELINHA, 2016),(DURCE et al., 2012),(LOURENCO; LODDI; TORTELLI, 2010) e (TORTELLI et al., 2015) no qual fazem a abordagem da normalização complexa, objetivando obter uma baixa relação R/X para a convergência do método desacoplado rápido comumente usado em sistemas de transmissão. E por fim, o uso da rotação de ângulo da parte diagonal das matrizes de admitâncias visto em (OCHI et al., 2013) e

(SIANIPAR; SETIA; SANTOSA, 2017) no qual, este último compara com o método de varredura considerando a injeção de corrente em (SETIA; SIANIPAR; PARIBO, 2017).

Porém, para este trabalho propõem-se uma alternativa na resolução do modelo desacoplado rápido fazendo o uso das submatrizes jacobianas N e M e comparando seus resultados com o método desacoplado rápido tradicional e o método de Newton-Raphson para a resolução de fluxo de potência em sistemas de distribuição com diferentes topologias, incluindo a inserção de geração distribuída.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento e avaliação de método de cálculo do fluxo de potência para sistemas de distribuição, baseado em abordagem desacoplada alternativa.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Apresentar as principais metodologias de cálculo para o fluxo de potência para sistemas de distribuição;
- b) Modelar do método desacoplado rápido alternativo no contexto dos modernos sistemas de distribuição;
- c) Implementação computacional do método desacoplado rápido alternativo na Plataforma Matpower 6.0.
- d) Avaliação comparativa entre resultados alcançados com método alternativo implementado e o método desacoplado rápido convencional em sistemas teste de distribuição em diferentes condições topológicas e operativas.

1.3 JUSTIFICATIVA

Devido a inserção da geração distribuída (GD) no atual cenário do sistema de distribuição de energia elétrica, técnicas tradicionais para o cálculo do fluxo de potência nesta topologia não detem a eficiência requerida, por consequência deste

fluxo de potência ter agora característica bidirecional, pois o sistema antes radial, agora passa a ter característica de sistemas malhados devido a estas mudanças. Partindo desta premissa, propõe-se uma abordagem alternativa para o cálculo do fluxo de potência para o sistema de distribuição de energia usando o fluxo de potência desacoplado rápido e a comparação deste, frente as abordagens tradicionais. Assim, poder trazer uma nova proposta de cálculo do fluxo de potência no atual contexto do sistema de distribuição de energia elétrica.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1 será visto a problematização, objetivos e justificativa do trabalho

No capítulo 2 é dado uma explicação sobre os sistemas de distribuição, com suas principais características e um resumo dos principais cálculos para o fluxo de potência neste tipo de sistema.

A partir do capítulo 3 irá ser reapresentado o Método do Fluxo de Potência tradicional e suas derivações com a formulação do Desacoplado e Desacoplado Rápido

Para o capítulo 4 irá se mostrar a dedução da formulação do Método Desacoplado Alternativo, partindo das equações gerais do fluxo de potência ativo e reativo.

O capítulo 5 terá uma explicação das metodologias utilizadas, sistemas utilizados e os resultados obtidos e comparação destes com os métodos tradicionais.

No capítulo 6 terá a conclusão sobre o que foi apresentado.

Por fim, no capítulo 7, terá as referências do trabalho seguido pelos anexos em que serão mostrados as configurações e principais informações dos sistemas que serão utilizados.

2 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

O sistema de distribuição de energia elétrica é considerado o último elo que interliga os grandes centros de geração e grupos de linhas de transmissão aos grandes centros de carga. Basicamente este sistema é subdividido em sistemas de subtransmissão, distribuição primária e por fim o sistema de distribuição secundária, como pode ser visto na figura 1 e figura 2.

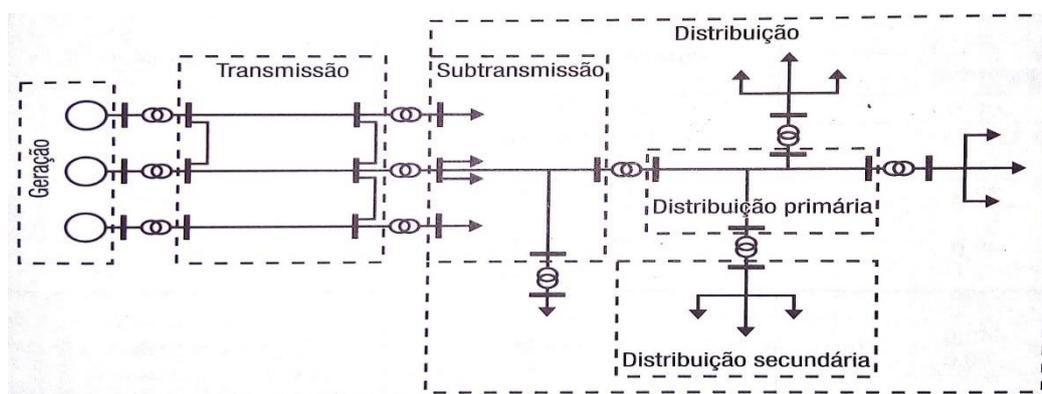


Figura 1 - Divisão dos sistemas de energia elétrica
Fonte: Retirado de (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010), pág. 3.

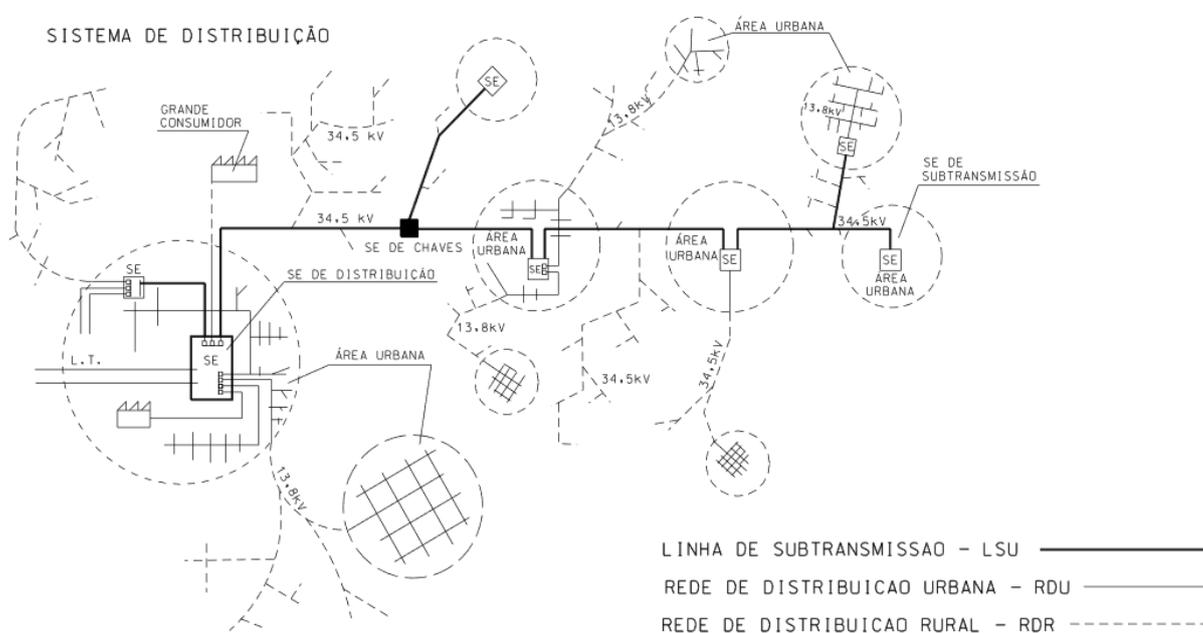


Figura 2 - Exemplo de Sistema de Distribuição
Fonte: Retirado(COPEL, 2013), pág. 24

2.1 SISTEMA DE SUBTRANSMISSÃO

O sistema de subtransmissão de energia é composta basicamente por um conjunto de subestações espalhadas em torno e próximas aos grandes centros consumidores, é a responsável pela interligação entre as subestações de distribuição, que estão presentes nos centros de cargas, e ao sistema de transmissão de energia. Usualmente, estas subestações de subtransmissão recebem linhas de transmissão com tensões maiores que 230kV que são abaixadas para tensões de 138kV, 69kV e em alguns casos em 34,5kV e capacidade de transporte de potência entre 20MW a 150MW e em seguida estas linhas são distribuídas entre as subestações de distribuição (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010).

Este sistema pode ser operado em configuração radial ou em configuração malhada. Um sistema de subtransmissão operando em malha pode ser visto na figura 2.

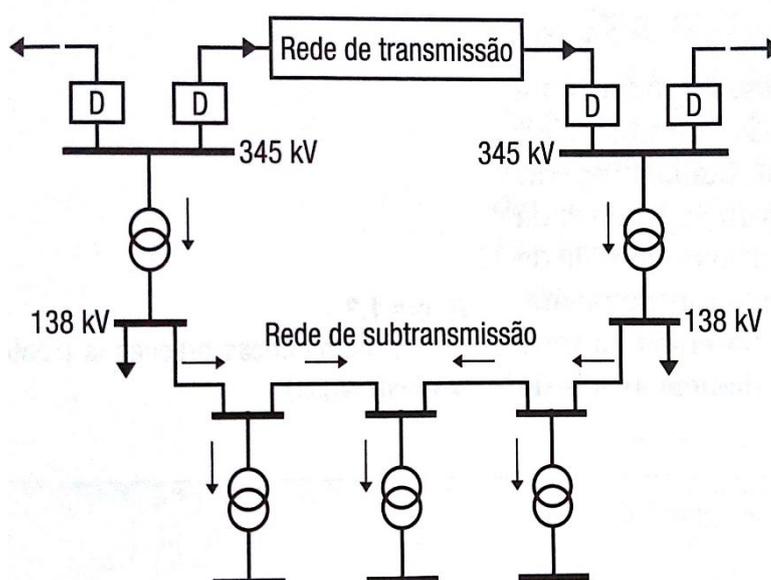


Figura 3 - Sistema de Subtransmissão
Fonte: Retirado de (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010), pág. 8.

2.2 SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO

São subestações abastecidas pelas redes de subtransmissão e é responsável em abaixar a tensão proveniente dessas redes para tensão de distribuição primária. Existem vários arranjos típicos para este tipo de subestação, dependendo da potência que cada um irá operar e na confiabilidade que se quer obter devido a

densidade de carga presente na região na qual estará inserida a subestação (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010).

Nestes arranjos, existe a possibilidade de usar um, dois ou mais transformadores trifásicos ou ainda transformadores monofásicos conectados de maneira a formar uma conexão trifásica. Tipicamente, existem nestas subestações valores de tensão primária de 34,5kV, 23,9kV, 14,4kV, 13,2kV, 12,47kV e em alguns sistemas 4,16kV.(KERSTING, 2002).

2.3 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA

Esta rede se caracteriza por haver um caminho para o fluxo de potência proveniente da fonte que seria o alimentador da subestação de distribuição até o consumidor, ou seja, tem característica de ser um sistema radial. Um sistema de distribuição típico é composto de uma ou mais subestação de distribuição contendo apenas um ou vários alimentadores (KERSTING, 2002). Estas redes radiais podem ter a possibilidade de oferecer transferência de blocos de cargas para outras redes quando solicitado, devido a contingências ou manutenção. Geralmente os troncos principais de um sistema de distribuição primária, empregam condutores de seção até 336,4 MCM. Assim, permitem transporte de potência máxima de 12MVA em 13,8kV, porém ficam limitados por questões de segurança a até 8MVA. Tais redes atendem os consumidores primários e os transformadores de distribuição que suprem a rede secundária (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010).

As redes primárias podem ser divididas em redes primárias aéreas e redes primárias subterrâneas. Em que ambas podem existir com determinados arranjos:

Rede Primária Aéreas:

- Primário radial com socorro;
- Primário Seletivo;

Rede Subterrâneas:

- Primário seletivo;
- Primário operando em malha aberta;
- *Spot network*

Nas redes primárias aéreas as estruturas podem ser constituídas de postes de concreto, cruzetas, isoladores de pinos e utilização de condutores de alumínio com alma de aço CAA ou sem alma de aço CA, conhecida como rede convencional ou

ainda usarem a rede compacta, que utiliza cabos protegidos com uma capa externa de material isolante para prover proteção contra toques de arvores e a utilização de estruturas isolantes menores provendo uma rede com maior confiabilidade e que pode ser usada em espaços com obstáculos que antes não era possível com a rede convencional (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010).

Nesta rede usa-se bancos de capacitores para controle de reativo das linhas, elos fusíveis para proteção contra curto-circuitos e para-raios para proteção contra surtos na rede, reguladores de tensão, transformadores trifásicos, bifásicos ou monofásicos ou ainda banco de transformadores monofásicos, religadores para maior confiabilidade do sistema e chaves de manobras para operações de manutenção e contingência dos circuitos.

Uma característica importante em sistemas de distribuição é suas relações R/X que são geralmente altas se comparados aos grandes sistemas de transmissão. Como apresentado na tabela 01, em que mostra os valores de R/X dos principais cabos usados nos sistemas de distribuição e transmissão, porém os valores correspondem a valores com impedância em ohms por quilometro. Assim, estes valores podem vir a aumentar com a distância das linhas, no caso dos sistemas de distribuição.

Tabela 1 - Relação R/X de Cabos

Cabos Utilizados nas Redes de Distribuição			Cabos Utilizados nas Redes de Transmissão		
Tipo	Bitola	R/X	Tipo	Bitola	R/X
Cobre	4 AWG a 250 MCM	0,39 a 1,92	Cobre	450 MCM a 900 MCM	0,17 a 0,29
ACSR	2 AWG a 266,8 MCM	0,59 a 2,00	ACSR	556,5 MCM a 1,75 Pol	0,21 a 0,40
ACC	2 AWG a 266,8 MCM	0,57 a 2,08	ACC	-	-

Fonte: o AUTOR - adaptado de (CARVALHO, 2006).

2.4 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA

São as redes provenientes dos transformadores de distribuição, estas redes têm sua tensão baixada da tensão primária para a tensão secundária de 220/127V ou 380/220V em que pode operar de maneira radial ou malhada, na qual abastece os consumidores de baixa tensão que são residências, pequenos comércios e indústrias. Esta rede é a única que não conta com sistemas de proteção e de recursos para atendimento de contingências (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2010).

3 FLUXO DE POTÊNCIA

3.1 PROBLEMATIZAÇÃO

O fluxo de potência é uma ferramenta poderosa para auxiliar no planejamento, expansão e operação do sistema elétrico de potência. Esta solução permite avaliar o estado atual da rede elétrica e auxilia na tomada de decisões e estados futuros da rede, evitando assim problemas de sobrecarga de equipamentos elétricos e linhas de transmissão (PORTELINHA, 2016). Além de ajudar a identificar os mais variados perfis de tensão e no auxílio para a necessidade de colocação de dispositivos para controle das redes elétrica.

Estes cálculos do fluxo de potência são usados em sistemas de transmissão quanto de distribuição e existe inumeros métodos para este fim, cada qual objetivando uma eficiência diferente para determinado perfil da rede.

Como premissa básica, o fluxo de potência serve para encontrar o módulo das tensões e seus ângulos em todas as barras de um sistema. Com estes dados é calculado posteriormente as potências ativas, reativas e injeção de corrente nas linhas de distribuição e transmissão.

Para sua formulação básica o fluxo de potência é confeccionado por um sistema de equações e inequações algébricas não-lineares. Em sua formulação básica a cada barra do sistema são associadas quatro variáveis sendo duas delas as incógnitas desse problema (MONTICELLI, 1983):

V_k – magnitude da tensão nodal (barra K);

θ_k – ângulo da tensão nodal;

P_k – geração líquida (geração menos a carga) de potência ativa;

Q_k – injeção líquida de potência ativa;

Dependendo das variáveis que são usadas como incógnitas nas barras, pode-se elencar três tipos de barras:

Tabela 2 - Uso das variáveis para o fluxo de potência

<i>Tipo de Barras</i>	<i>Variáveis dadas</i>	<i>Variáveis Calculadas</i>
<i>PQ</i>	P_k e Q_k	V_k e θ_k
<i>PV</i>	P_k e V_k	Q_k e θ_k
<i>Referência</i>	V_k e θ_k	P_k e Q_k

Fonte: o AUTOR – retirado de (MONTICELLI, 1983) ,pg. 02

Estas barras representam determinado elemento dentro do sistema sendo que as barras do tipo PQ são consideradas barras de cargas e as barras do tipo PV são consideradas barras de geração. Por último, existe as barras do tipo V θ que são as barras de referência, que além de fornecer a referência angular do sistema é utilizada para fazer o balanço de potência do sistema (MONTICELLI, 1983)

Através da primeira Lei de Kirchhoff se obtém o conjunto de equações da formulação do fluxo de potência. São duas equações representando as potências ativas e reativas injetadas em cada barra do sistema, sendo que as potências ativas e reativas que saem de uma barra deve ser igual as potencias ativas e reativas que entram na barra (MONTICELLI, 1983). Assim, a formulação básica do fluxo de potência é expresso matematicamente por:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad 3.1$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad 3.2$$

Em que:

$k = 1, \dots, NB$, sendo NB o número de barras da rede;

Ω_k – conjunto de barras vizinhas da barra k;

V_k, V_m – magnitudes das tensões das barras terminais do ramo k-m;

θ_k, θ_m – ângulos das tensões das barras terminais do ramo k-m;

P_{km} – fluxo de potência ativa no ramo k-m;

Q_{km} – fluxo de potência reativa no ramo k-m;

Q_k^{sh} – injeção de potência reativa devida ao elemento shunt da barra k;

As injeções de potência ativa e reativa, por conseguinte é dada por:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad 3.3$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad 3.4$$

Em que:

G_{km}, B_{km} – coeficientes reais e imaginários da matriz de admitância;

K – conjunto das barras vizinhas à barra k, incluindo K;

O método para o cálculo do fluxo de potência pode ser dividido em dois subsistemas, após serem definidas as NPQ e NPV que são os números de barras PQ e PV respectivamente.

Para o subsistema 1 são calculados V_k e θ_k das barras PQ e θ_k das barras PV. Trata-se de um sistema com $2NPQ + NPV$ equações algébricas não lineares com mesmo número de incógnitas (MONTICELLI, 1983). O vetor de incógnitas é composto como mostra a equação 3.5. E a equação algébrica do sistema é definido pela equação 3.6.

$$X = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad 3.5$$

$$g(x) = g(V, \theta) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{esp} - P(V, \theta) \\ Q^{esp} - Q(V, \theta) \end{bmatrix} = 0 \quad 3.6$$

Na qual:

ΔP – vetor dos desvios de potência ativa;

ΔQ – vetor dos desvios de potência reativa;

P^{esp} – vetor das injeções de potência ativa especificados nas barras PQ e PV;

Q^{esp} – vetor das injeções de potência reativa especificados nas barras PQ;

P – vetor das injeções de potência ativa calculados por 3.3;

Q – vetor das injeções de potência reativa calculados por 3.4;

Com a resolução do subsistema 1 por algum método de iteração, sendo os mais eficientes o método de Newton e o desacoplado rápido (MONTICELLI, 1983), o subsistema 2 com o conhecimento das incógnitas V_k e θ_k para todas barras, calcula-se P_k e Q_k da barra de referência e Q_k das barras PV. Trata-se de um sistema de dimensão $NPV + 2$ equações, porém o cálculo deste sistema de equações algébricas não lineares é feito de forma explícita e direta usando as equações 3.3 e 3.4.

3.2 MÉTODOS PARA O CALCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Os métodos de fluxo de potência usados em sistema de distribuição que em sua grande maioria abrange sistemas de topologia radial e raramente sistemas malhados, foram concebidas durante os anos (DURCE, 2012). Logo, existem duas vertentes de metodologias sendo a primeira, métodos que abrangem o procedimento de varredura ou também, conhecidos como métodos *Backward/Forward* e a segunda, métodos clássicos utilizados em sistemas de transmissão que foram aperfeiçoados, como por exemplo, o método de Newton e suas versões desacopladas, usados em características restritas em função de parâmetros e topologia do sistema de distribuição(DURCE, 2012). A seguir será apresentado os principais métodos de varreduras para o calculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição.

3.2.1 Método Escalonado

As redes de distribuição por serem em sua maioria radial, técnicas iterativas comumente usadas nos estudos de fluxo de potência em redes de distribuição não são usadas, pois podem não apresentar convergência. Assim técnicas iterativas próprias para este fim são usadas, como o método escalonado (KERSTING, 2002).

Este método é dividido em duas etapas, na qual são realizadas varreduras para trás (*backward sweep*) e depois varreduras para frente (*forward sweep*), considerando para isso um mesmo perfil de tensão para toda a rede começando pela subestação alimentadora. Neste processo de varredura para trás (*backward sweep*) são calculadas as correntes de carga, primeiramente da ultima barra usando a seguinte equação:

$$I_k = \left(\frac{\dot{S}_k^{esp}}{\dot{V}_k} \right)^* \quad 3.7$$

Onde:

k – Varia de Nb (número de barras da rede) até 2;

\dot{S}_k^{esp} – Injeção de potência complexa especificada da barra k;

\dot{V}_k - Tensão complexa da barra k.

Após, determina-se a corrente do ramo entre a barra precedente e a última barra pela aplicação direta da lei das correntes de Kirchhoff:

$$\dot{I}_{k-1,k} = \dot{I}_k + \sum_{b \in A_k} \dot{I}_{k,b} \quad 3.8$$

No qual A_k o conjunto das barras alimentadas pela barra k .

Conhecida a corrente do ramo pode-se encontrar a tensão da barra que precede a última barra com a aplicação da das tensões de Kirchhoff:

$$\dot{V}_{k-1} = \dot{V}_k + Z_{k-1,k} \cdot \dot{I}_{k-1,k} \quad 3.9$$

Estes cálculos são feitos da última barra até a barra anterior a barra da subestação de alimentação.

Como critério de convergência, quando todas as tensões das barras são encontradas, usa-se a diferença das magnitudes das tensões calculadas e especificada do nó da fonte e verificado o critério de tolerância.

$$Erro = \left| |\dot{V}_1| - |\dot{V}_1^{esp}| \right| \quad 3.10$$

Se a convergência não é alcançada a tensão do nó da fonte recebe o valor da tensão especificada:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_1^{esp} \quad 3.11$$

A partir deste momento começa a varredura para frente (*forward sweep*), ou seja, do nó da fonte até o último nó do sistema radial. Atualizando com as novas tensões nas barras, usando a lei das tensões de Kirchhoff com os valores das correntes encontrados na varredura para trás (*backward sweep*):

$$\dot{V}_{k+1} = \dot{V}_k - Z_{k,k+1} \cdot \dot{I}_{k,k+1} \quad 3.12$$

Em que k varia de 1 até N_b-1 e $Z_{k,k+1}$ é a impedância da linha entre a barra k e a barra $k+1$. Isso é repetido até que o critério de convergência seja satisfeito.

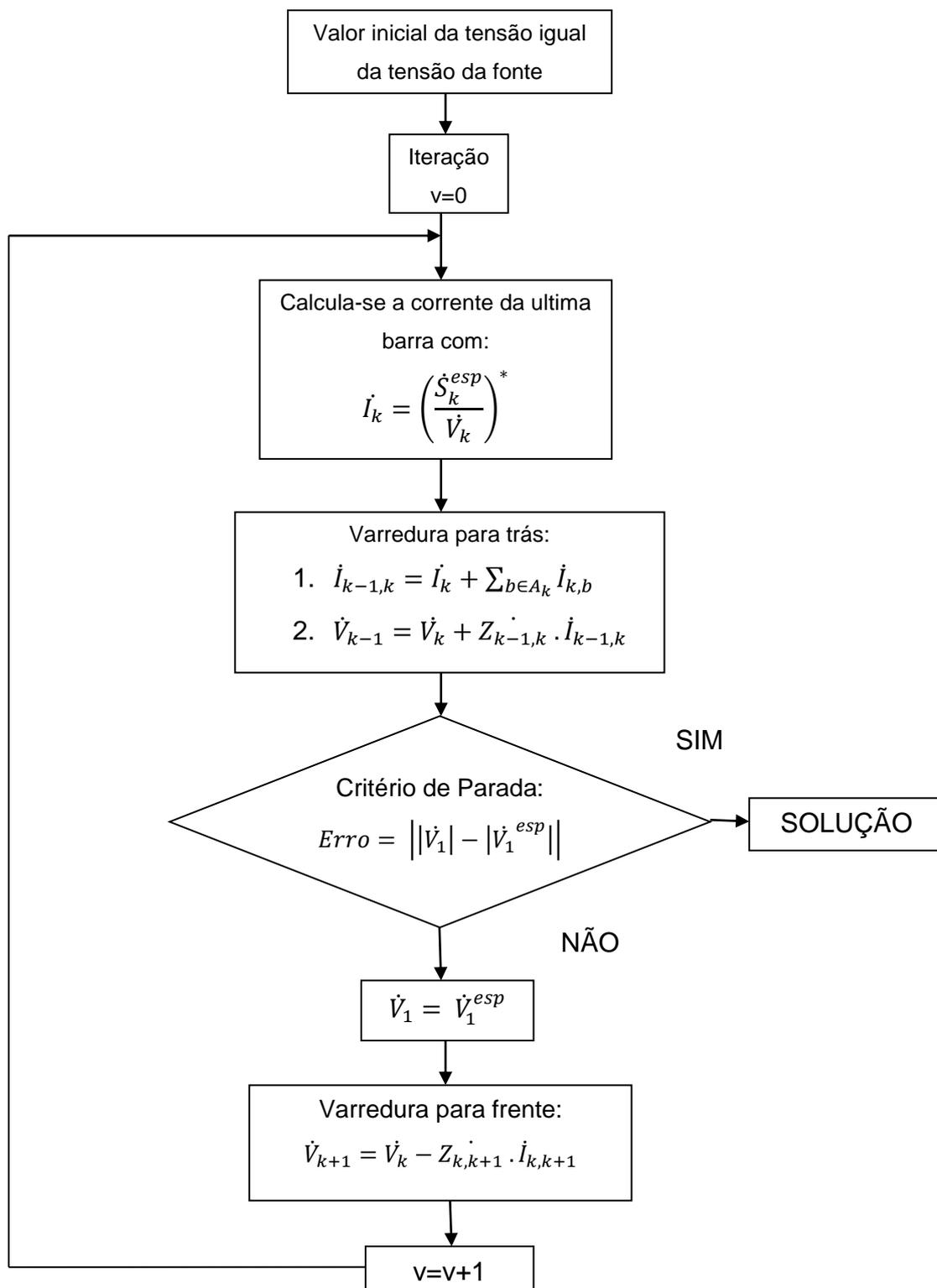


Figura 4 - Método Escalonado.
Fonte: o AUTOR - adaptado de (KERSTING, 2002).

3.2.2 Método da Soma das Correntes

Este método tem por base o método escalonado. Para seu uso, qualquer topologia de rede, é convertida em rede radial, pois caso contrário o método não poderá ser aplicado. O método proposto por (SHIRMOHAMMADI et al., 1988) se baseia nos ramos da rede. Este método tem boas características de convergência e é considerado um dos métodos mais importantes na solução do sistema de distribuição (DURCE, 2012).

O método começa com a escolha do valor inicial da tensão para o nó fonte e que será igual para todas as barras. Após definido isso, é possível determinar as correntes de carga na última barra através da equação 3.13:

$$\dot{I}_k = \left(\frac{\dot{S}_k^{esp}}{\dot{V}_k} \right)^* \quad 3.13$$

Onde:

k – Varia de Nb (número de barras da rede) até 2;

\dot{S}_k^{esp} – Injeção de potência complexa especificada da barra k;

\dot{V}_k - Tensão complexa da barra k.

Depois, começa a varredura para trás (*backward sweep*) e determina-se a corrente do ramo entre a barra precedente e a última barra com a aplicação da lei das correntes de Kirchhoff.

$$\dot{I}_{k-1,k} = \dot{I}_k + \sum_{b \in A_k} \dot{I}_{k,b} \quad 3.14$$

Em que k é o conjunto de barras alimentadas pela barra k.

Conhecido os valores das correntes dos ramos, inicia-se a varredura para frente (*forward sweep*) com a lei das tensões de Kirtchhoff

$$\dot{V}_{k+1} = \dot{V}_k - Z_{k,k+1} \cdot \dot{I}_{k,k+1} \quad 3.15$$

Estes dois procedimentos de varredura é repetido até que se chegue ao critério de parada proposto por (SHIRMOHAMMADI et al., 1988) em que consiste nos máximos desvios de potência ativa e reativa nas barras da rede, através do erro entre as potências calculadas e conhecidas de cada barra, com a injeção de potência de cada barra calculado com:

$$\dot{S}_k = \dot{V}_k \cdot \dot{I}_k^* \quad 3.16$$

E os desvios de potência de todas barras calculados por:

$$\Delta P_k = \text{Re}|\dot{S}_k - \dot{S}_k^{esp}| \quad 3.17$$

$$\Delta Q_k = \text{Im}|\dot{S}_k - \dot{S}_k^{esp}| \quad 3.18$$

Assim, o método é repetido até que se encontre a convergência estabelecida.

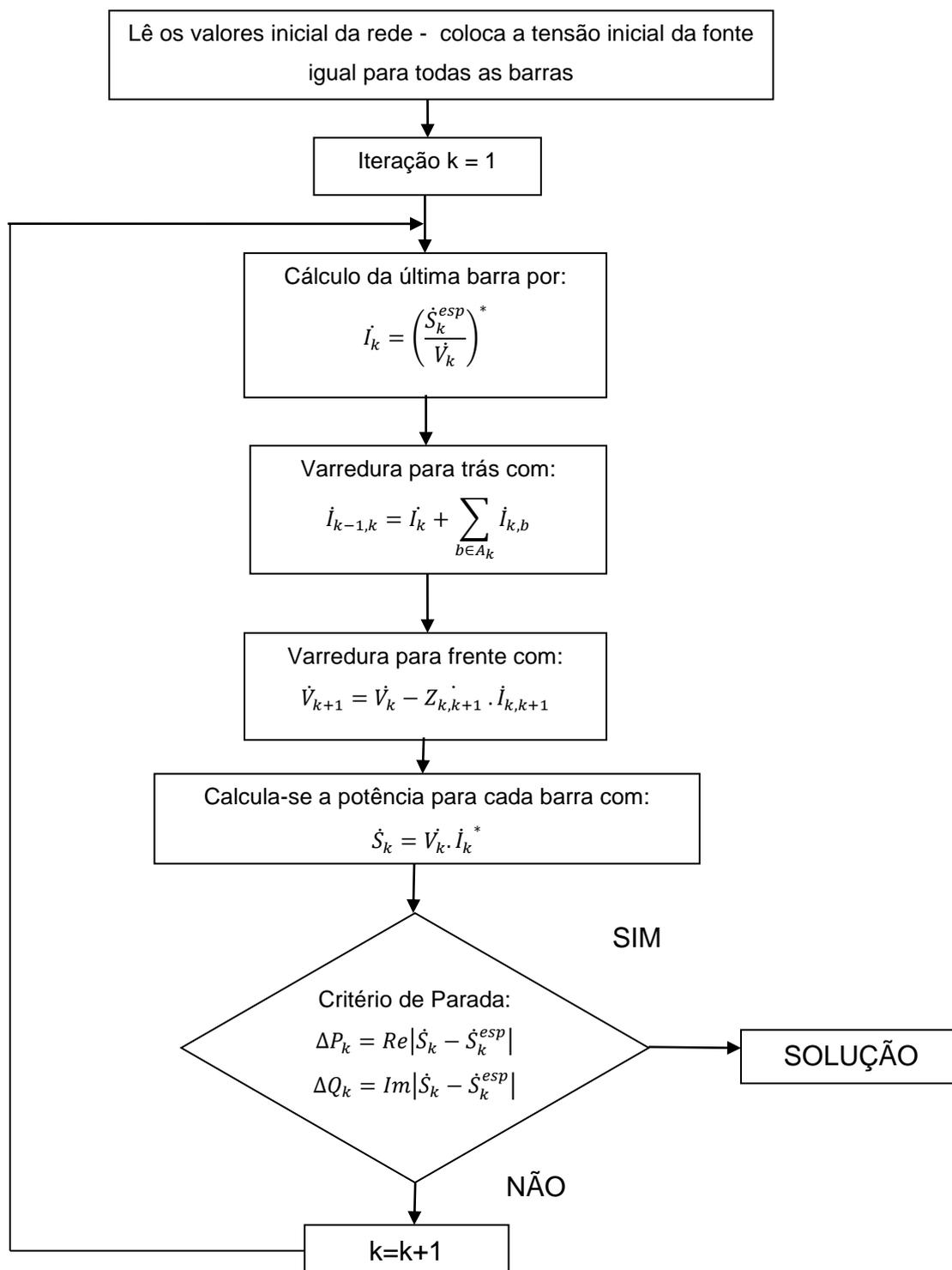


Figura 5 - Fluxograma - Método da Soma das Correntes
Fonte: o AUTOR- adaptado de (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

3.2.3 Método da Soma das Potências

Este método proposto por (CESPEDES, 1990) consiste na equivalência elétrica e na eliminação do ângulo de fase da tensão nas equações que serão resolvidas em que permite a obtenção da solução exata somente com as magnitudes das tensões. O autor faz esta abordagem pois, os ângulos de fases das tensões variam muito pouco e não se faz importante na maioria dos estudos relacionados aos níveis de tensão das redes de distribuição.

Para a resolução deste método, usa-se o valor inicial de tensão da subestação alimentadora e as demais barras assumem este mesmo valor.

Para a varredura para trás (*backward sweep*) e com todas as tensões conhecidas pretende-se determinar a carga equivalente de cada barra da rede, partindo sempre da barra mais distante da subestação distribuidora. Esta carga equivalente é todas as cargas que uma barra alimenta mais a carga que ela mesma está utilizando mais as perdas das linhas. Essa formulação vale tanto para potência ativa e reativa e é dada por:

$$P_k^{eq} = P_k + \sum_{b \in B_k} P_b + \sum_{l \in D_k} P_l^{perdas} \quad 3.19$$

$$Q_k^{eq} = Q_k + \sum_{b \in B_k} Q_b + \sum_{l \in D_k} Q_l^{perdas} \quad 3.20$$

Em que:

k – varia de Nb até 1;

P_k, Q_k – carga ativa e reativa da própria barra k , respectivamente;

P_b, Q_b – carga ativa e reativa da barra alimentada através da barra k , respectivamente;

$P_l^{perdas}, Q_l^{perdas}$ – perdas ativa e reativa na linha alimentada através da barra k , respectivamente;

B_k – conjunto das barras alimentadas através da barra k ;

D_k – conjunto das linhas alimentadas através da barra k ;

As perdas podem ser calculadas por:

$$P_{km}^{perdas} = r_{km} \frac{(P_m^2 + jQ_m^2)}{V_m^2} \quad 3.21$$

$$Q_{km}^{perdas} = x_{km} \frac{(P_m^2 + jQ_m^2)}{V_m^2} \quad 3.22$$

Em que:

k e m – Correspondem às barras terminais dos ramos;

V_k, V_m – Magnitudes de tensão da barra k e m , respectivamente;

r_{km}, x_{km} – resistência e reatância do ramo entre as barras k e m , respectivamente.

Depois de determinado o valor das cargas equivalentes nas barras, faz-se a varredura para frente (*forward sweep*), em que é calculada as novas magnitudes das tensões de cada barra, iniciando da subestação até atingir a barra mais distante.

Assim, a solução da tensão proposta para este problema é resolver para todas as linhas a seguinte equação para a barra que sucede a barra k :

$$V_m^4 + [2(r_{km}P_k^{eq} + x_{km}Q_k^{eq}) - V_k^2]V_m^2 + (P_k^{eq2} + Q_k^{eq2})(r_{km}^2 + x_{km}^2) = 0 \quad 3.23$$

No qual P_k^{eq} e Q_k^{eq} são as cargas equivalentes ativa e reativa da barra k . Apesar de ser uma equação de quarta ordem, sua solução é bastante simples, uma vez que não depende do ângulo de fase da tensão, o que simplifica a formulação.

Para a convergência, uma vez encontrada as novas tensões nas barras, através da equação 3.23 é recalculada as perdas pelas equações 3.21 e 3.22. Se a variação total das perdas entre duas iterações for menor que um valor especificado a iteração para, caso contrário volta para o calculo das potências ativas e reativas da dadas pelas equações 3.19 e 3.20.

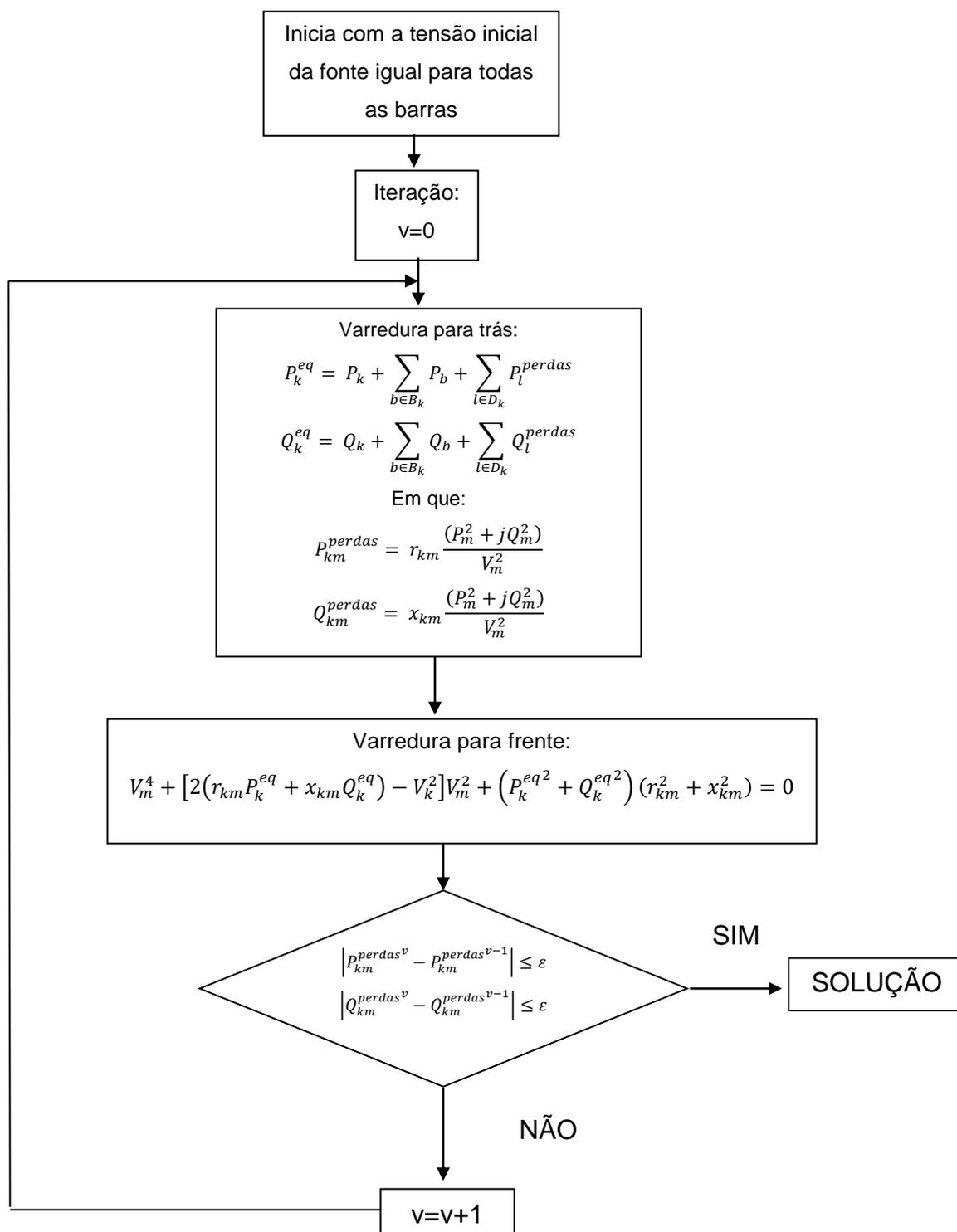


Figura 6 - Fluxograma do Método da Soma das Potências.
Fonte: o AUTOR - adaptado de (CESPEDES, 1990).

3.3 MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA BASEADOS EM N-R

3.3.1 Método de Newton-Raphson

O método de iteração de Newton-Raphson serve para resolver o subsistema 1, equação 3.6. Basicamente esta resolução consiste em determinar os vetores de correção Δx a cada iteração, para atualização dos valores de ângulo e módulo da tensão do vetor $x(\theta, V)$ (MONTICELLI, 1983), para isso usa-se o sistema linear a seguir:

$$g(x^v) = -J(x^v) \cdot \Delta x^v \quad 3.24$$

Em que $J(x^v)$ é a matriz Jacobiana associada ao sistema e v é o contador de iterações.

A matriz jacobiana é formada pela derivada parcial de potência ativa e reativa em relação a θ e V , tendo a seguinte característica:

$$J(x) = J(V, \theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta P)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta P)}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}. \quad 3.25$$

No qual as componentes das quatro submatrizes jacobianas **H**, **N**, **M** e **L** são dadas por:

$$H - \begin{cases} H_{km} = \partial P_k / \partial \theta_m = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ H_{kk} = \partial P_k / \partial \theta_k = -Q_k - V_k^2 B_{kk} \end{cases} \quad 3.26$$

$$N - \begin{cases} N_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ N_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = V_k^{-1} (P_k + V_k^2 G_{kk}) \end{cases} \quad 3.27$$

$$M - \begin{cases} M_{km} = \partial Q_k / \partial \theta_m = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ M_{kk} = \partial Q_k / \partial \theta_k = P_k - V_k^2 G_{kk} \end{cases} \quad 3.28$$

$$L - \begin{cases} L_{km} = \partial Q_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ L_{kk} = \partial Q_k / \partial V_k = V_k^{-1} (Q_k + V_k^2 G_{kk}) \end{cases} \quad 3.29$$

Assim o sistema a ser solucionado em cada iteração passa a ser:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^v = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^v \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^v \quad 3.30$$

No qual $\Delta \theta$ e ΔV são atualizados pela equação 3.30 e então inseridos nas equações 3.31 e 3.32 a cada iteração, até que o critério de convergência seja satisfeito, ou seja que $Max\{|\Delta P_k^v|\} \leq \varepsilon_p$ e $Max\{|\Delta Q_k^v|\} \leq \varepsilon_p$, e assim seja encontrado a solução (V^v, Q^v) .

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v \quad 3.31$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad 3.32$$

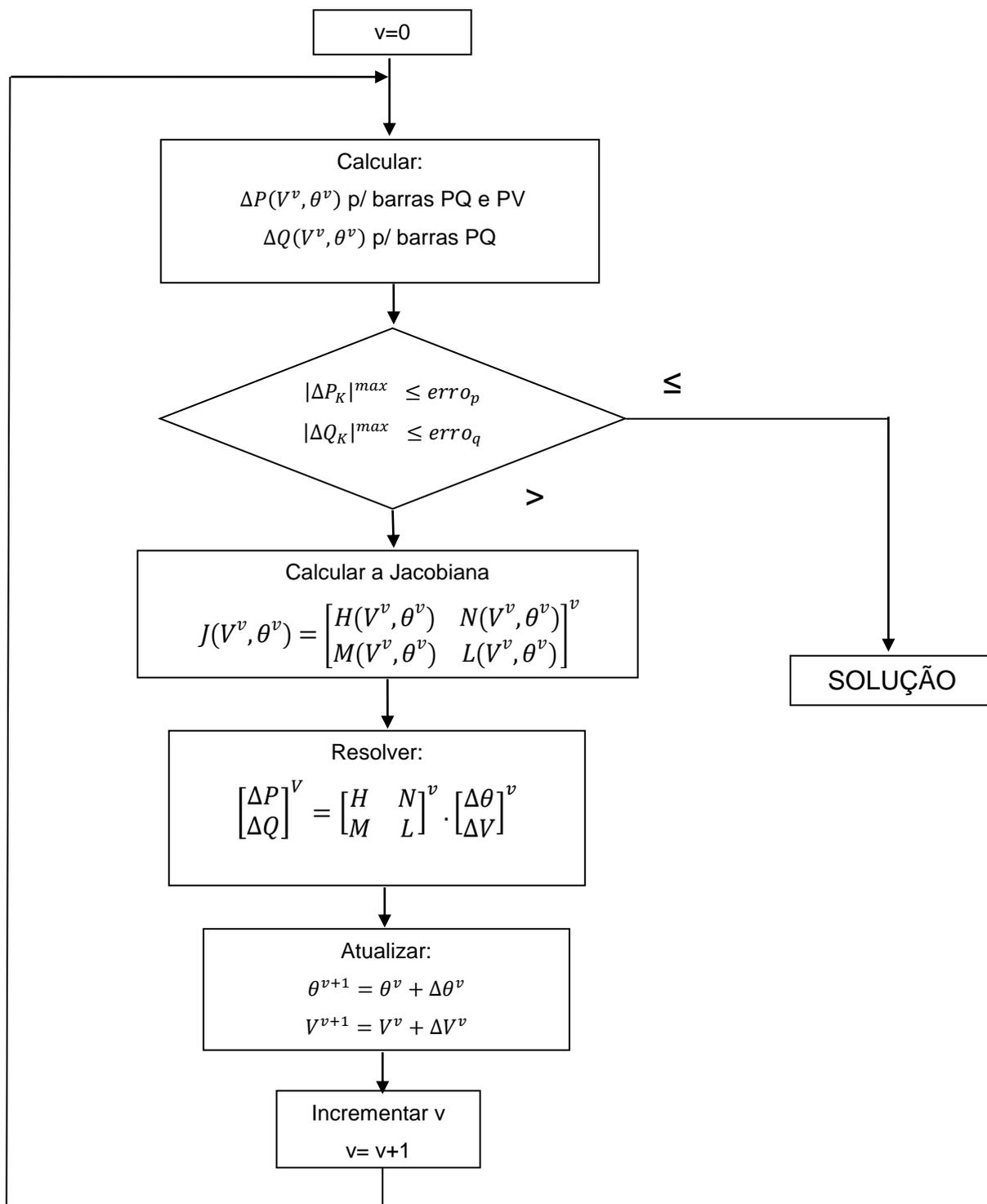


Figura 7 - Fluxograma do Método de Newton
 Fonte: o AUTOR- adaptado de (MONTICELLI, 1983), pág. 84.

3.3.2 Método de Newton Desacoplado e Desacoplado Rápido

O método desacoplado vem do fato do desacoplamento $P\theta - QV$, ou seja, os cálculos de iteração feitas com a equação 3.6 são subdivididos em dois novos subsistemas. Isto é possível, pois em redes de transmissão ($<230\text{kV}$) existe maior sensibilidade nas submatrizes $H(\partial P/\partial\theta)$ e $L(\partial Q/\partial V)$ do que nas submatrizes $N(\partial P/\partial V)$ e $M(\partial Q/\partial\theta)$ (MONTICELLI, 1983) (MONTICELLI e GARCIA, 2011). Logo, as matrizes N e M são feitas iguais a zero. Assim, o método desacoplado se caracteriza por:

$$\Delta P(V^v, \theta^v) = H(V^v, \theta^v)\Delta\theta^v \quad 3.33$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta\theta^v \quad 3.34$$

$$\Delta Q(V^v, \theta^{v+1}) = L(V^v, \theta^{v+1})\Delta V^v \quad 3.35$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad 3.36$$

As equações 3.33 e 3.34 é conhecida como desacoplamento $P\theta$ e as equações 3.35 e 3.36 são conhecidas como desacoplado QV para o método desacoplado. Com relação a este método, existe ainda uma versão normalizada pela tensão, em que pode ter convergência mais rápida para alguns sistemas. Considerando V a matriz diagonal, cujos elementos das magnitudes das tensões das barras PQ do sistemas são feitas diferente de zero. As submatrizes H e L podem ser reescritas como (MONTICELLI, 1983):

$$H = VH' \quad 3.37$$

$$L = VL' \quad 3.38$$

Assim a formulação do método desacoplado normalizado fica:

$$\Delta P(V^v, \theta^v)/V = H'(V^v, \theta^v)\Delta\theta^v \quad 3.39$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta\theta^v \quad 3.40$$

$$\Delta Q(V^v, \theta^{v+1})/V = L'(V^v, \theta^{v+1})\Delta V^v \quad 3.41$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad 3.42$$

Já o método desacoplado rápido parte da formulação do acoplamento normalizado descrita acima, porém esta faz uso de matrizes constantes B' e B'' ao invés das submatrizes H' e L' . Para que isso seja possível são feitas as seguintes considerações (MONTICELLI, 1983):

- θ_{km} pequeno - $\cos \theta_{km} \approx 1$ e $\sin \theta_{km} \approx 0$
- $|B_{km}| \gg |G_{km} \sin \theta_{km}|$
- $|B_{kk} V_k^2| \gg |Q_k|$
- V_k e $V_m \approx 1 \text{ p.u}$

Isto resulta que as submatrizes H' e L' tenham a seguinte característica:

$$\left. \begin{array}{l} H'_{km} \cong -B_{km} \\ H'_{kk} \cong -B_{kk} \end{array} \right\} \rightarrow H' \cong B' \quad 3.43$$

$$\left. \begin{array}{l} L'_{km} \cong -B_{km} \\ L'_{kk} \cong -B_{kk} \end{array} \right\} \rightarrow L' \cong B'' \quad 3.44$$

Em que B' e B'' dependem somente dos parâmetros da rede não dependendo das variáveis de estado do sistema (ângulos e magnitudes das tensões nodais). Essas novas matrizes são similares à matriz de susceptância B com a diferença que B' não possui as linhas e as colunas referentes à barra $V\theta$ e B'' não possui as linhas e colunas das barras PV e $V\theta$. Logo, elas mantêm a mesma estrutura das matrizes H e L (MONTICELLI, 1983) (MONTICELLI e GARCIA, 2011).

Assim as equações deste método são dadas por:

$$\Delta P(V^v, \theta^v)/V = B'(V^v, \theta^v) \Delta \theta^v \quad 3.45$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v \quad 3.46$$

$$\Delta Q(V^v, \theta^{v+1})/V = B''(V^v, \theta^{v+1}) \Delta V^v \quad 3.47$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad 3.48$$

Um melhor desempenho deste método foi observado quando na matriz B' foi desprezada as resistências sérias das linhas e elementos de redes provenientes da potência reativa. Esta versão, ficou conhecida como versão XB (DURCE, 2012). Uma segunda versão importante é a BX em que as resistências são desprezadas na montagem da matriz B'' , ao invés da B' . Outro fator a destacar ainda, é que os elementos *shunt* continuam sendo ignorados em B' , porém em B'' estes passam a ser duplicados (DURCE, 2012).

Em sistemas de transmissão as duas versões possuem convergência semelhantes, porém para sistemas no qual possui relações X/R baixas ou R/X altas como ocorre em sistemas de distribuição de energia a versão BX se mostra tendo uma melhor convergência.

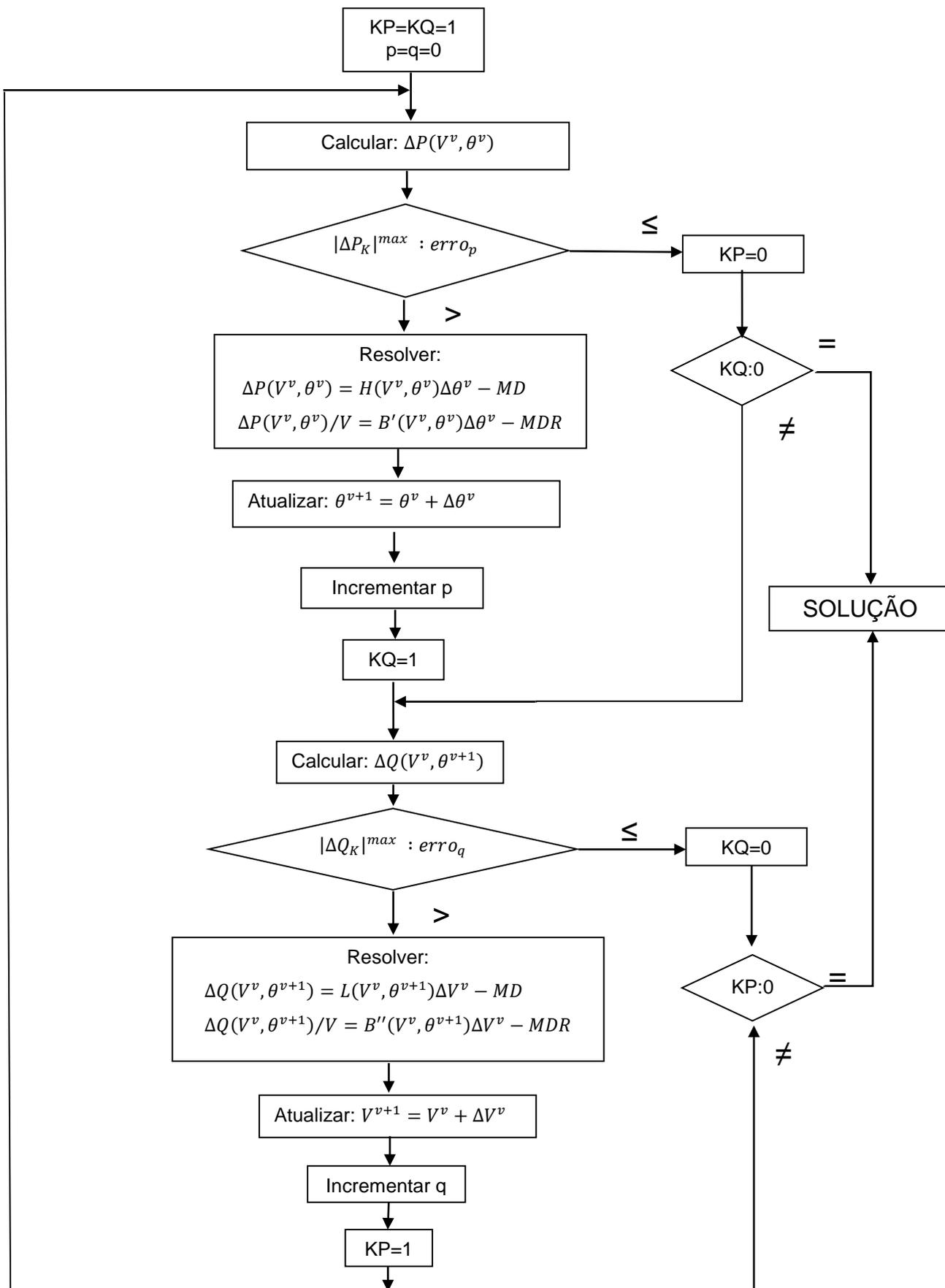


Figura 8 - Fluxograma Método Desacoplado e Desacoplado Rápido
Fonte: Retirado de (MONTICELLI, 1983), pág. 95.

3.3.2.1 Uso do método desacoplado Rápido em Sistemas de Distribuição.

O método desacoplado é muito bem aplicado em sistemas de transmissão, pois possuem relação R/X pequena, fazendo com que o método possa convergir de maneira satisfatória. No caso, de sistemas de distribuição a relação R/X são altas fazendo com que modificação no método original ou novas propostas de metodologia sejam feitas. Recentemente (SIANIPAR; SETIA; SANTOSA, 2017) propôs uma modificação no método desacoplado rápido através da rotação de ângulo nas equações das potências ativas e reativas. O método sugerido não modifica o método desacoplado rápido, mas sim modifica parâmetros da rede mantendo a estrutura do problema a mesma e chegando ao mesmo resultado. Para determinar este ângulo de rotação é usado o somatório do arcotangente entre condutância e susceptância da diagonal da matriz de admitância, dividido pelo número de barras do tipo PQ. Este método foi comparado com o método de varredura em (SETIA; SIANIPAR; PARIBO, 2017) com relação aos números de iterações em dois sistemas de 123 e 37 barras.

Em (PORTELINHA, 2016) , usa a solução do método de fluxo de potência desacoplado rápido em redes de distribuição usando a normalização complexa apresentado por (LOURENCO; LODDI; TORTELLI, 2010), que consiste na criação de uma base complexa, no qual irá surgir um ângulo base para um sistema estudado, que irá ser somado com os ângulo originais do sistema. Esta incrementação deste novo ângulo, proveniente do conceito da rotação dos ângulos entre a resistência e reatância no sistema, irá modificar a relação R/X de tal maneira a deixar este sistema em condições de convergência para o método desacoplado rápido, não afetando o resultado encontrado, uma vez que se trata apenas de uma mudança de base do sistema. Assim, após o cálculo, pode-se voltar a base original do sistema e encontrar o resultado de fato. Este método pode ser usado para calcular o fluxo de potência em sistemas de distribuição e em sistemas em que aparece sistemas de distribuição e transmissão na mesma formulação do calculo de fluxo de potência.

No trabalho de (TORTELLI et al., 2015) faz uso do método desacoplado rápido usando normalização complexa para sistemas de distribuição. Compara-se o número de iterações do método proposto, com o método Newton-Raphson e as versões BX e XB do desacoplado rápido. Mostra-se os ângulos bases ótimos que

podem ser usados em relação ao número de interação em sistemas de distribuição radial, malhados e com geração distribuída.

(DURCE, 2012) apresenta uma formulação do fluxo de potência desacoplado rápido envolvendo os sistemas de distribuição e transmissão, em que os alimentadores do sistemas de distribuição são fisicamente representados, para observar o impacto destes aos sistemas de transmissão e usa-se a formulação de base complexa descrito em (LOURENCO; LODDI; TORTELLI, 2010), para colocar o sistema de distribuição, no qual modifica-se a sua relação R/X, para níveis de transmissão e assim ser possível resolver o fluxo de potência.

Em (OCHI et al., 2013) faz a rotação de fase da matriz de admitância usando para isso um ângulo derivado da subtração entre um ângulo escolhido e o ângulo das componentes da diagonal principal para as barras do tipo P-Q. Além disso usa a modificação da matriz B' do método desacoplado rápido proposto por (RAJICIC; BOSE, 1988) que para compensar a alta relação R/X propõe a inserção de dois coeficientes 0,4 e 0,3, determinados de maneira experimental.

4 MÉTODO ALTERNATIVO

4.1 MODELAGEM DO MÉTODODO DE FLUXO DE POTÊNCIA DESACOPLADO RÁPIDO ALTERNATIVO

Para a modelagem do fluxo de potência alternativo será considerado a formulação básica do fluxo de potência para a resolução do Subproblema 01. Dado pela equação 3.13 e agora rescrita pela equação 4.0

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^V = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^v \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^v \quad 4.0$$

Considerando que seja verdadeira a premissa de assumir que para sistemas que tem como característica tensão menores que 230kV as submatrizes N ($\partial P/\partial V$) e M ($\partial Q/\partial \theta$) tem maior relevância do que as submatrizes H ($\partial P/\partial \theta$) e L ($\partial Q/\partial V$), ou seja, está se assumindo que para sistemas de distribuição (subtransmissão, distribuição) está condição exista. Logo, pode-se fazer as submatrizes H e L são feitas iguais a zero. Assim a equação 4.0 resulta nas equações 4.1 e 4.2

$$\Delta P = N \cdot \Delta V^v \quad 4.1$$

$$\Delta Q = M \cdot \Delta \theta^v \quad 4.2$$

Em que os elementos possuem a seguinte dimensão:

- $\Delta P - [NPQ + NPV]$
- $N - [NPQ + NPV, NPQ]$
- $\Delta V^v - [NPQ, 1]$
- $\Delta Q - [NPQ]$
- $M - [NPQ, NPQ + NPV]$
- $\Delta \theta^v - [NPQ + NPV]$

Assim pode-se escrever o Subsistema 1 através das equações 4.3 a 4.6

$$\Delta P(V^v, \theta^v) = N(V^v, \theta^v) \Delta V^v \quad 4.3$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad 4.4$$

$$\Delta Q(V^v, \theta^{v+1}) = M(V^v, \theta^{v+1}) \Delta \theta^v \quad 4.5$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v \quad 4.6$$

Em que as equações 4.3 e 4.4 são chamados de desacoplamento PV ou seja, faz parte da primeira meia iteração do Subsistema 1 e por sua vez as equações 4.5 e 4.6 são chamados de desacoplamento $Q\theta$ e é segunda meia iteração do Subsistema 1.

Para construir os elementos M e N das expressões será utilizado as expressões gerais do Fluxo de Potência dados por 4.7 e 4.8.

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km} = \sum_{m \in \Omega_k} V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad 4.7$$

$$Q_k = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km} = \sum_{m \in \Omega_k} -V_k^2 b_{km} + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} \quad 4.8$$

E considerando que:

$$G_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} g_{km} \quad 4.9$$

$$G_{km} = -g_{km} \quad 4.10$$

$$B_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} b_{km} \quad 4.11$$

$$B_{km} = -b_{km} \quad 4.12$$

Monta-se os elementos N e M que tem o seguinte resultado:

$$N - \begin{cases} N_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ N_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = 2V_k G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \end{cases} \quad 4.13$$

$$M - \begin{cases} M_{km} = \partial Q_k / \partial \theta_m = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ M_{kk} = \partial Q_k / \partial \theta_k = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \end{cases} \quad 4.14$$

Normalizando as equações 4.1 e 4.2 pela tensão de cada barra, no qual no método tradicional se mostra eficiente para reduzir os números de iterações (MONTICELLI; GARCIA; SAAVEDRA, 1990). Faz com que as equações 4.1 e 4.2 fiquem:

$$\Delta P / V = N / V \cdot \Delta V^v \quad 4.15$$

$$\Delta Q / V = M / V \cdot \Delta \theta^v \quad 4.16$$

Chamando de N' e M' a nova configuração das submatrizes adquiridas é dada por:

$$N' - \begin{cases} N_{km}' = \partial P_k / \partial V_m = (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ N_{kk}' = \partial P_k / \partial V_k = 2G_{kk} + \frac{1}{V_k} \sum_{m \in \Omega_K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \end{cases} \quad 4.17$$

$$M' - \begin{cases} M_{km}' = \partial Q_k / \partial \theta_m = -V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ M_{kk}' = \partial Q_k / \partial \theta_k = \sum_{m \in \Omega_K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \end{cases} \quad 4.18$$

Considerando que:

1. $V_k = V_m \approx 1$ p.u
2. $\theta_{km} \approx 0$

Em que a consideração 1 é dado por conta que em sistemas de distribuição deve-se manter um nível de tensão adequado e com pouca variação e dentro dos padrões estabelecidos como pode ser observado na tabela 3.

Tabela 3 - Faixas de Variação de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia

TENSÃO DE ATENDIMENTO (TA)	FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO DE LEITURA (TL) EM RELAÇÃO À TENSÃO DE REFERÊNCIA (TR)		
	Tensão (V)		
	$\geq 230kV$	$69kV \leq V \leq 230kV$	$1kV \leq V \leq 69kV$
ADEQUADA	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
PRECÁRIA	$0,93TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$	$0,93TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
CRÍTICA	$TL < 0,93TR$ ou $TL > 1,07TR$	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,07TR$	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: o AUTOR – retirado de (ANEEL, 2016) ,pg. 33 - ANEXO I.

E a consideração 2 pela razão que os ângulos entre uma barra k e outra m é consideravelmente pequeno em sistemas de distribuição típicos. Logo as submatrizes N' e M' são reduzidas para:

$$N' - \begin{cases} N_{km}' = G_{km} \\ N_{kk}' = 2G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_K} G_{km} \end{cases} \quad 4.19$$

$$M' - \begin{cases} M_{km}' = -G_{km} \\ M_{kk}' = \sum_{m \in \Omega_K} G_{km} \end{cases} \quad 4.20$$

Comparando os resultados das equações 4.19 e 4.20 com as definições 4.9 e 4.10, fazendo as devidas substituições tem-se como resultado:

$$N' - \begin{cases} N'_{km} = G_{km} \\ N'_{kk} = G_{kk} \end{cases} \quad 4.21$$

$$M' - \begin{cases} M'_{km} = -G_{km} \\ M'_{kk} = -G_{kk} \end{cases} \quad 4.22$$

As constantes criadas pelas equações 4.19 e 4.20 denomina-se como G' e G'' , semelhante ao que acontece com as constantes B' e B'' do Método Desacoplado Tradicional. Logo, substituindo N' e M' por G' e G'' , tem-se:

$$G' - \begin{cases} G'_{km} = G_{km} = -g_{km} \\ G'_{kk} = G_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} g_{km} \end{cases} \quad 4.23$$

$$G'' - \begin{cases} G''_{km} = -G_{km} = g_{km} \\ G''_{kk} = -G_{kk} = -\sum_{m \in \Omega_k} g_{km} \end{cases} \quad 4.24$$

Assim, a formulação final do Método Desacoplado Rápido Alternativo é rescrita a partir das equações 4.23 e 4.25 como:

$$\Delta P/V = G' \cdot \Delta V^v \quad 4.25$$

$$\Delta Q/V = G'' \cdot \Delta \theta^v \quad 4.26$$

Este modelo em que se usa as admitâncias será conhecido como o modelo GG. Assim, através da formulação apresentada pelas equações 4.23 a 4.26, pode-se derivar outros modelos para a formulação das matrizes G' e G'' , desconsiderando as indutâncias das linhas de distribuição. Logo, pode-se derivar três outros modelos que serão objeto de estudo neste trabalho. O modelo RG, em que se desconsidera as indutâncias das linhas na submatriz G' e as admitâncias na submatriz G'' , o modelo GR em que se considera as admitâncias na submatriz G' e desconsidera as indutâncias na submatriz G'' . Por fim, o modelo RR em que se desconsidera as indutâncias em ambas as submatrizes G' e G'' . Com isso, os três modelos adicionais de montagem das submatrizes G' e G'' são:

Modelo RG:

$$G' - \begin{cases} G'_{km} = G_{km} = -1/r_{km} \\ G'_{kk} = G_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} 1/r_{km} \end{cases} \quad 4.23$$

$$G'' - \begin{cases} G''_{km} = -G_{km} = g_{km} \\ G''_{kk} = -G_{kk} = -\sum_{m \in \Omega_k} g_{km} \end{cases} \quad 4.24$$

Modelo GR:

$$G' - \begin{cases} G'_{km} = G_{km} = -g_{km} \\ G'_{kk} = G_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} g_{km} \end{cases} \quad 4.23$$

$$G'' - \begin{cases} G''_{km} = -G_{km} = 1/r_{km} \\ G''_{kk} = -G_{kk} = -\sum_{m \in \Omega_k} 1/r_{km} \end{cases} \quad 4.24$$

Modelo RR:

$$G' - \begin{cases} G'_{km} = G_{km} = -1/r_{km} \\ G'_{kk} = G_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} 1/r_{km} \end{cases} \quad 4.23$$

$$G'' - \begin{cases} G''_{km} = -G_{km} = -1/r_{km} \\ G''_{kk} = -G_{kk} = -\sum_{m \in \Omega_k} 1/r_{km} \end{cases} \quad 4.24$$

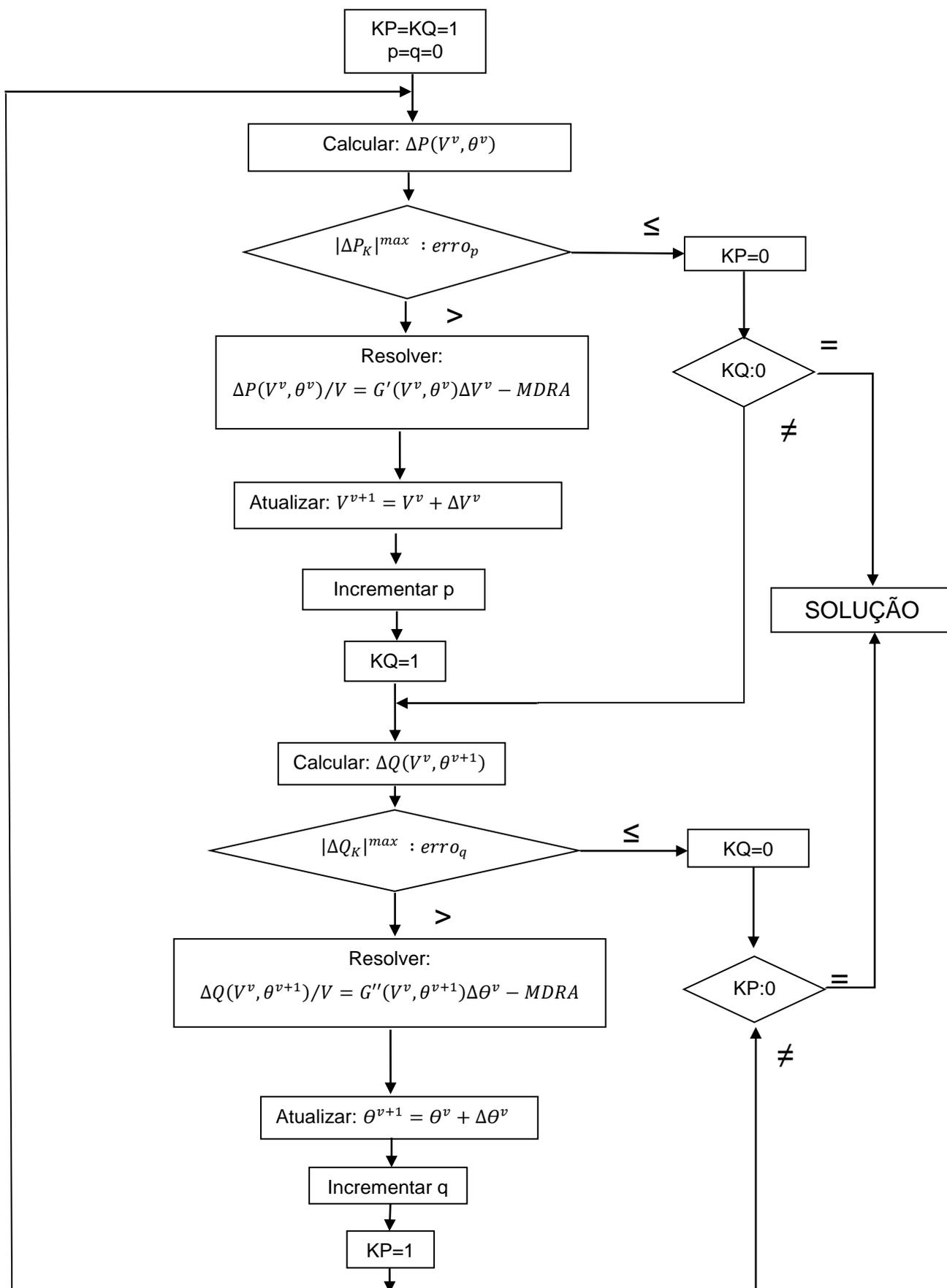


Figura 9 - Fluxograma Método Desacoplado Alternativo
Fonte: o AUTOR.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO NO MATPOWER

6.0

O MATPOWER é uma ferramenta de resolução de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo, baseado na programação usada no Matlab® e de código aberto (ZIMMERMAN; MURILLO-SANCHEZ; THOMAS, 2011). É usada em forma de *package* do Matlab®, possuindo várias funções no formato *.m* que usando a linguagem de programação de alto nível empregada no Matlab pode ser facilmente modificada, desde que se entenda toda a estrutura de programação do mesmo. Esta ferramenta foi desenvolvida por Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez e Robert J. Thomas. Sua versão atual é a 6.0 e tem sido ao longo do tempo atualizada, conforme novas contribuições de outras pessoas vão acontecendo ao software.

A inserção dos sistemas de duas barras, 33 barras e 69 barras são colocados através de *function mpc = case* em que *mpc* é a variável de estrutura do MATPOWER, ou seja, ela que será chamada ou retornada quando chamada uma função correspondente a um sistema teste que for adicionado ao MATPOWER. Nesta *function mpc = case* são colocados os dados de todas as barras, linhas e geração do sistema.

Para adicionar as novas funções para o fluxo de potência alternativo e suas versões RG, GR, GG e RR, foram manipuladas as funções *mpoption.m*, *runpf.m* e criadas as funções *makeG.m* e *fdpalt.m*, sendo a primeira responsável por montar a matriz de admitância, e a segunda por fazer o cálculo do fluxo de potência alternativo. As manipulações ocorridas em *mpoption.m*, que é responsável pelas opções do programa MATPOWER, foram no intuito de elas poderem serem chamadas dentro do programa MATPOWER, para assim serem calculadas via o comando *runpf.m* em que teve na sua modificação a adição das duas funções *makeG.m* e *fdpalt.m*. Logo a sintaxe usada é a mesma usada para calcular os métodos de Newton e desacoplados existentes que é mostrado na figura 10.

```

mpop= mption('pf.alg','NR');
runpf('case69_malha',mpop);
%%desacoplado rapido normal XB
mpop= mption('pf.alg','FDXB');
runpf('case69_malha',mpop);
%%desacoplado rapido1 BX
mpop= mption('pf.alg','FDBX');
runpf('case69_malha',mpop);
%%desacoplado rapido alternativo RG
mpop= mption('pf.alg','FDRG');
runpf('case69_malha',mpop);
%%desacoplado rapido alternatvio GR
mpop= mption('pf.alg','FDGR');
runpf('case69_malha',mpop);

```

Figura 10 - Sintaxe MATPOWER - métodos tradicionais e alternativo.
Fonte: o AUTOR.

Em que *mpop* tem a seguinte sintaxe:

mpop = mption('nome da opção que se quer mudar 01 ',' variável da opção que se queira escolher 01', nome da opção que se quer mudar 02 ',' variável da opção que se queira escolher 02',..., nome da opção que se quer mudar n ',' variável da opção que se queira escolher n');

Assim, é possível setar vários parâmetros para calcular o fluxo de potência como por exemplo, o tipo de fluxo de potência que se quer calcular, a maneira como mostrar os resultados, a tolerância de erro, número máximo de iterações, e que dados quer que se mostre na tela. Após a seleção das opções para rodar o fluxo de potência a variável *mpop*, que recebe todas as opções, é inserida como variável de entrada na função *runpf* que possui como sintaxe:

runpf('nomedocaso',mpop);

Com isso, é possível rodar o fluxo de potência em suas diferentes opções. As mudanças estruturais em *mption* e *runpf* podem ser conferidas nas figuras 11, 12 e 13 respectivamente.


```

%% run the power flow
switch alg
  case 'NR'
    [V, success, iterations] = newtonpf(Ybus, Sbus, V0, ref, pv, pq, mpopt);
  case {'FDXB', 'FDBX'}
    [Bp, Bpp] = makeB(baseMVA, bus, branch, alg);
    [V, success, iterations] = fdcpf(Ybus, Sbus, V0, Bp, Bpp, ref, pv, pq, mpopt);

%%-----
  case {'FDRG', 'FDGR', 'FDRR', 'FDGG'}
    [Gp, Gpp] = makeG(baseMVA, bus, branch, alg);

    [V, success, iterations] = fdpfalt(Ybus, Sbus, V0, Gp, Gpp, B, ref, pv, pq, mpopt);
%%-----
  case 'GS'
    if (~isempty(mpopopt.exp.sys_wide_zip_loads.pw) && ...
        any(mpopopt.exp.sys_wide_zip_loads.pw(2:3))) || ...
        (~isempty(mpopopt.exp.sys_wide_zip_loads.qw) && ...
        any(mpopopt.exp.sys_wide_zip_loads.qw(2:3))))
      warning('runpf: Gauss-Seidel algorithm does not support ZIP load model. Converting to cc');
      mpopt = mpooption(mpopopt, 'exp.sys_wide_zip_loads', ...
        struct('pw', [], 'qw', []));
    end
    [V, success, iterations] = gausspf(Ybus, Sbus([],)), V0, ref, pv, pq, mpopt);
  otherwise
    error('runpf: Only Newton's method, fast-decoupled, and Gauss-Seidel power flow algorithms');
end
its = its + iterations;

```

Figura 13 - Sintaxe modificada - *runpf.m*.
Fonte: o AUTOR.

Para a confecção das funções *makeG.m* e *fdpfalt.m* foi usada a base das funções *makeB.m* e *fdcpf.m* já presente no MATPOWER. Como se observa na figura 13, a função *makeG.m* irá ter como dado de entrada a base do sistema, dados das barras, dados de linha e a variável *alg* que é a responsável por dizer para a função que tipo de G' e G'' ela irá montar, conforme o método escolhido. Dentro da função *makeG.m* ela irá montar a $Ybarra$ através de outra função presente no MATPOWER chamada de *makeYbarra.m* e assim pegar a parte real positiva da $Ybarra$ para montar a G' e o negativo da parte real para a G'' , e de acordo com as opções dadas pela variável *alg*, que é recebida pela função *runpf.m* através do *mopotion.m*, ela irá montar as G' e G'' ou com o inverso da resistência ou com a admitância das linhas. As modificações podem ser vistas na figura 14.

```

%%----- form Gp (G prime) -----
temp_branch = branch;           %% modify a copy of branch
temp_bus = bus;                 %% modify a copy of bus
temp_bus(:, BS) = zeros(nb, 1); %% zero out shunts at buses
temp_branch(:, BR_B) = zeros(nl, 1); %% zero out line charging shunts
temp_branch(:, TAP) = ones(nl, 1); %% cancel out taps
if strcmp(alg, 'FDRG') %% if RG method

    temp_branch(:, BR_X) = zeros(nl, 1);
end
%%-----if RR method
if strcmp(alg, 'FDRR')           %% if RR method
    temp_branch(:, BR_X) = zeros(nl, 1); %% zero out line reactance
end
%%-----if GG method
if strcmp(alg, 'FDGG')           %% if GG method
    temp_branch = branch; %% zero out line reactance
end

Gp = real( makeYbus(baseMVA, temp_bus, temp_branch) );

%%----- form Gpp (G double prime) -----
if nargin == 2 %% como a função possui dois argumentos a função nargin sempre será igual a 2 e entrar
    temp_branch = branch;           %% modify a copy of branch
    temp_branch(:, SHIFT) = zeros(nl, 1); %% zero out phase shifters
    if strcmp(alg, 'FDGR')           %% if GR method
        temp_branch(:, BR_X) = zeros(nl, 1); %% zero out line reactance
    end
    %%-----if RR method
if strcmp(alg, 'FDRR')           %% if RR method
    temp_branch(:, BR_X) = zeros(nl, 1); %% zero out line reactance
end
%%-----if GG method
if strcmp(alg, 'FDGG')           %% if GG method
    temp_branch = branch ; %% zero out line reactance
end
    Gpp = -real( makeYbus(baseMVA, bus, temp_branch) );
end

```

Figura 14 - função makeG.m - parte da montagem de G' e G''
Fonte: o AUTOR.

Por fim a função *fdpalt.m*. responsável pelo fluxo de potência alternativo, irá receber as G' e G'' confeccionadas por *makeG.m*. Íra reduzir essas matrizes e colocar em ordem nas linhas e colunas primeiramente com as barras PV e depois as barras PQ , para ficar no formato de resolução para as meias iterações P-V e Q- Θ . Para o cálculo de cada iteração é usado a fatoração LU, que tem menor esforço computacional se comparado com a simples inversão das matrizes G' e G'' em cada meia iteração. O processo iterativo se repete até chegar a tolerância requerida, que neste caso é de 1×10^{-8} ou se atingir o número máximo de iterações que é igual a 30. Na figura 15 é mostrado todo o processo de inserção destas novas funções de maneira simplificada.

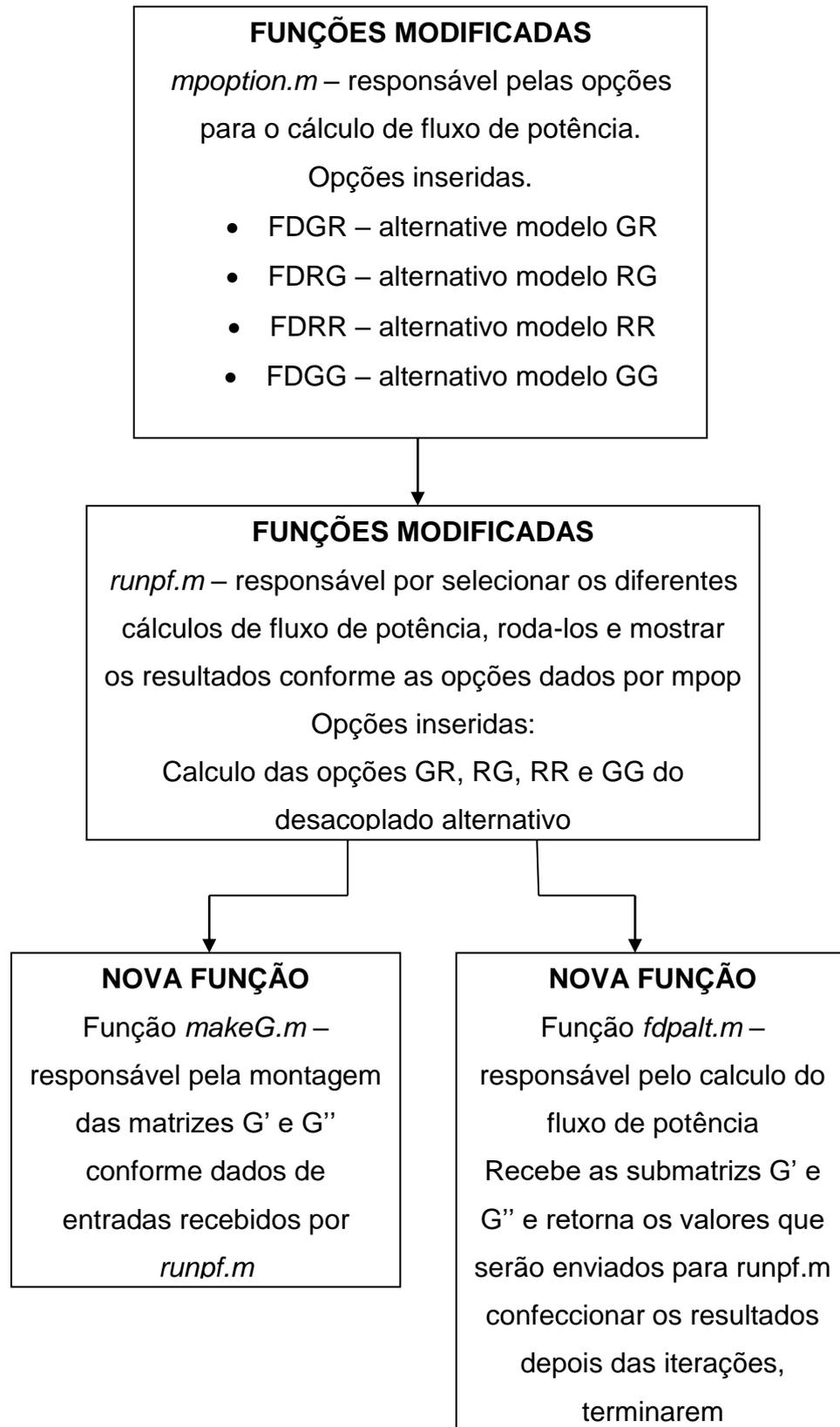


Figura 15 – Processo de modificação do MATPOWER 6.0
Fonte: o AUTOR.

5 TESTE E RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Para mostrar o desempenho do método alternativo proposto será usado três sistemas, sendo o primeiro um sistema de duas barras para mostrar o número de iterações dos métodos existentes e alternativo, conforme se varia o ângulo entre a resistência e a reatância e conseqüente variação da relação R/X. O segundo sistema será um sistema radial com 33 barras em que será avaliado o número de iterações conforme a topologia do sistema e será avaliado os níveis de tensão de cada barra para as três topologias, comparando os valores dado pelo método alternativo com o já consolidado método de Newton, assim averiguar se possui divergência nos valores, o que pode levar a uma alteração significativa dos resultados do fluxo de potência. Por fim, será considerado um sistema de 69 barras radial em que será avaliado o número de iterações conforme divide-se a reatância de todas as linhas por um conjunto de constantes de forma a alterar a relação R/X e observar a eficiência frente aos métodos desacoplados tradicionalmente conhecido.

Os resultados apresentados foram obtidos via MATPOWER 6.0, sendo o método de Newton e Desacoplados versões XB e BX usando funções presentes dentro do MATPOWER. Já os métodos alternativos nas suas versões RG, GR, GG, RR foram cálculos via implementação das novas funções criadas para o método desacoplado alternativo, inserida dentro do MATPOWER 6.0. Além disso, todos os métodos desacoplados apresentados estão configurados para um número máximo de 30 iterações, e o método de Newton para o limite de 10 iterações, e a tolerância usada para os valores dos *mismatches* é de 1×10^{-8} .

5.2 SISTEMA TESTE COM DUAS BARRA

O sistema de duas barras é composto pela barra 01(Referência), uma linha de transmissão em que o módulo da impedância é $|Z| = 0,1 pu$, e por fim a barra 02 com uma carga do tipo PQ, em que a potência ativa é de 47MW e a potência reativa é de 20MVAr tendo um fator de potência de 0,92, como esta ilustrada na figura 16.

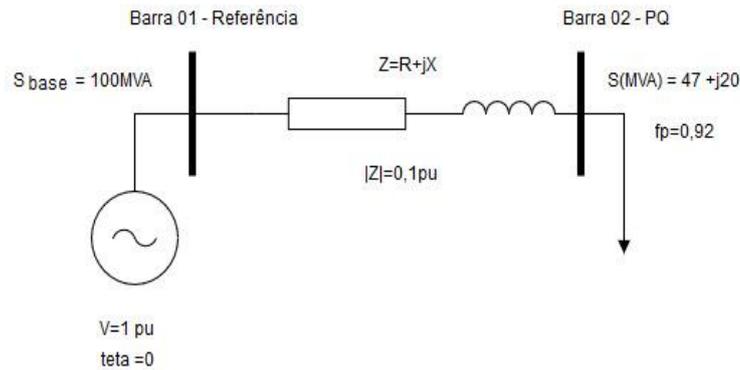


Figura 16 - Sistema com uma Barra.
Fonte: o AUTOR.

Este sistema tem o propósito de avaliar o número de iteração dos métodos desacoplados e o desacoplado alternativo, quanto a variação das relações R/X por meio da modificação entre o ângulo de impedância Θ , considerando que a linha seja do tipo indutiva e seu ângulo varie de forma que as relações R/X tenham características de sistemas de distribuição, que tem pouca presença indutiva, para sistemas de transmissão, que possuem baixa presença resistiva. A variação deste ângulo e os valores de R, X, a relação R/X e X/R, mais comumente tratada em sistemas de transmissão de grande porte, são mostradas na tabela 4.

Tabela 4 - Valores correspondente a variação do ângulo de impedância

$\theta(\text{graus})$	$R(\text{pu})$	$X(\text{pu})$	R/X	X/R
0	0,1000	0,0000		0
5	0,0996	0,0087	11,4301	0,0875
10	0,0985	0,0174	5,6713	0,1763
15	0,0966	0,0259	3,7321	0,2679
20	0,0940	0,0342	2,7475	0,3640
25	0,0906	0,0423	2,1445	0,4663
30	0,0866	0,0500	1,7321	0,5774
35	0,0819	0,0574	1,4281	0,7002
40	0,0766	0,0643	1,1918	0,8391
45	0,0707	0,0707	1,0000	1,0000
50	0,0643	0,0766	0,8391	1,1918
55	0,0574	0,0819	0,7002	1,4281
60	0,0500	0,0866	0,5774	1,7321
65	0,0423	0,0906	0,4663	2,1445
70	0,0342	0,0940	0,3640	2,7475
75	0,0259	0,0966	0,2679	3,7321
80	0,0174	0,0985	0,1763	5,6713
85	0,0087	0,0996	0,0875	11,4301
90	0,0000	0,1000	0,0000	Inf.

Fonte: o AUTOR.

Para cada um dos valores de resistência e reatância apresentados na tabela 4, foi adquirido os valores médios das iterações dos métodos desacoplado e desacoplado alternativo e que está mostrado na tabela 5 e tabela 6. O método de Newton também foi usado e em todos os casos obtiveram valores de 3 iterações.

Ao se verificar os valores de iterações médias da tabela XX do método desacoplado rápido, constata-se que conforme as relações R/X elevam-se e saem de relações R/X presente em sistemas de transmissão de grande porte e partem para relações de sistemas de distribuição, estes métodos perdem eficiência nos números de iterações, até finalmente não convergir nos casos em que a relação R/X chega acima de 11 e no caso ideal de a linha de distribuição ser puramente resistiva.

Tabela 5 - Iterações Médias - Método Desacoplado Rápido

Desacoplado Rápido		
	<i>XB</i>	<i>BX</i>
<i>R/X</i>	<i>Iterações Médias</i>	<i>Iterações Médias</i>
0,0000	5,0	5,0
0,0875	4,5	5,0
0,1763	5,5	5,0
0,2679	6,0	5,5
0,3640	6,5	6,0
0,4663	7,0	7,0
0,5774	8,0	7,5
0,7002	8,0	8,0
0,8391	8,5	8,5
1,0000	9,5	9,0
1,1918	10,0	9,5
1,4281	10,0	9,5
1,7321	12,0	9,5
2,1445	12,0	8,5
2,7475	12,0	11,5
3,7321	16,0	13,5
5,6713	19,0	19,5
11,4301	30,0	NC
Inf.	NC	NC

Fonte: o AUTOR.

Em se tratando do método alternativo, todas as versões convergem, como observado na tabela 6 e no gráfico apresentado na figura 16, chegando ao valor de iterações médias de 6,5 no caso ideal de possuir uma linha puramente resistiva. Contudo, observa-se a deficiência dos modelos RR e GG por começarem a convergirem em relações R/X acima de 1,1 e em valores altos de iterações médias, se comparado com os modelos RG e GR. A partir destes valores de R/X o ganho apresentado pelos métodos RR e GG não foi significativo, entretanto os métodos RG e GR indica uma melhor capacidade de iteração nas relações R/X que atingem patamares mais adequados à realidade de sistemas de distribuição, indicando num primeiro momento, ser uma boa alternativa aos métodos tradicionais.

Tabela 6 - Iterações Média - Método Desacoplado Rápido Alternativo

Desacoplado Rápido Alternativo				
	<i>RG</i>	<i>GR</i>	<i>RR</i>	<i>GG</i>
<i>R/X</i>	<i>Iterações Médias</i>	<i>Iterações Médias</i>	<i>Iterações Médias</i>	<i>Iterações Médias</i>
0,0000	NC	NC	NC	NC
0,0875	NC	NC	NC	NC
0,1763	NC	29,5	NC	NC
0,2679	19,0	23,5	NC	NC
0,3640	16,0	18,5	NC	NC
0,4663	12,0	16,5	NC	NC
0,5774	12,0	13,5	NC	NC
0,7002	11,0	13,5	NC	NC
0,8391	10,0	11,0	NC	NC
1,0000	9,0	11,0	NC	NC
1,1918	8,5	9,5	26,0	NC
1,4281	8,0	9,5	20,5	18,5
1,7321	7,5	8,5	14,0	11,5
2,1445	7,0	7,5	11,0	9,0
2,7475	7,0	7,0	9,5	7,0
3,7321	6,5	6,5	8,0	5,0
5,6713	6,5	6,0	6,5	5,5
11,4301	6,5	6,0	6,5	6,0
Inf.	6,5	6,5	6,5	6,5

Fonte: o AUTOR.

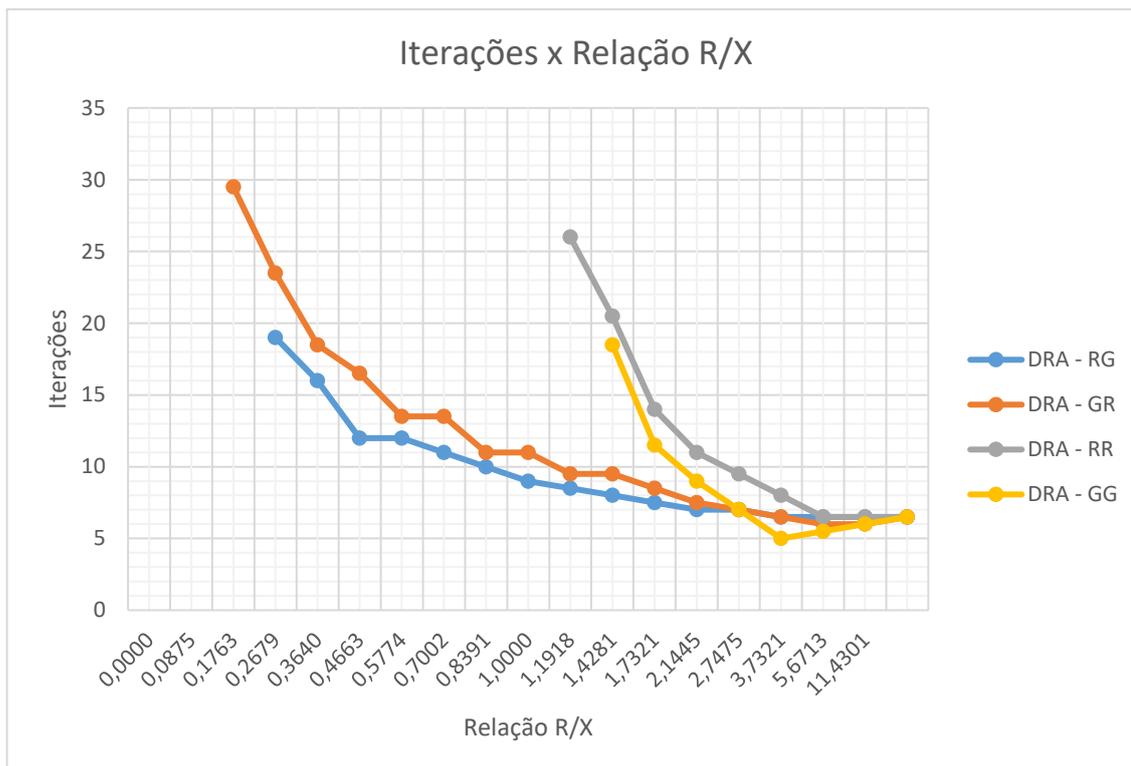


Figura 17 - Gráfico: Iterações x Relação R/X – Método Desacoplado Alternativo.
Fonte: o AUTOR.

A partir das informações contidas nas tabelas 5 e 6 e na figura 17, e verificando valores de iterações médias dos modelos RG e GR, verifica-se que ambos são consideravelmente melhores que os modelos RR e GG. Portanto, é possível comparar os melhores modelos do método desacoplado alternativo com os métodos desacoplados tradicionais, conforme mostra o gráfico da figura 18.

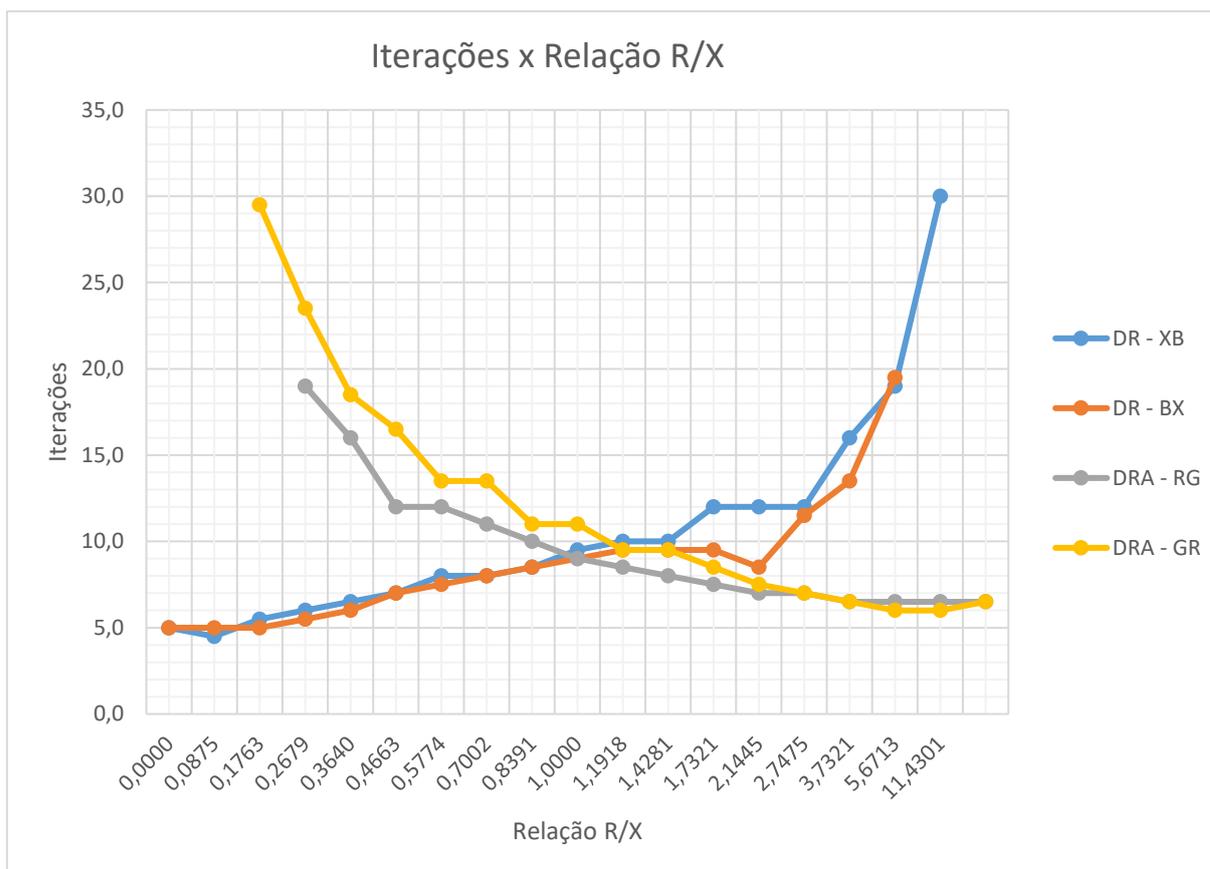


Figura 18 - Gráfico: Métodos Tradicionais x Métodos Alternativos
Fonte: o AUTOR.

Assim, se constata-se um ganho considerável dos métodos alternativos em relação aos métodos tradicionais conforme a relação R/X aumenta ou a relação X/R diminui, e se aproxima de um sistema de distribuição, principalmente na faixa de relações R/X de 1,1918 a 3,7321 que se aproximaria dos valores típicos das relações usadas nos cabos dos alimentadores do sistema de distribuição. E em contrapartida reforça a versatilidade dos métodos tradicionais que foram concebidos justamente para sistemas de baixa relação R/X, típicos de sistemas de transmissão >230kV.

5.3 SISTEMA TESTE 33 BARRAS

Para o sistema de 33 barras será analisado suas iterações médias entre os métodos desacoplados tradicionais e o desacoplado alternativo. E será aferido os valores dos módulos de tensão e os ângulos gerados em cada barra dos métodos desacoplados alternativo nas suas versões RG e GR, usando o já consolidado método de Newton e assim observar se ocorre alguma discrepância entre os valores apresentados, e poder aferir a consistência dos resultados apresentados via método alternativo.

Os sistemas testes são divididos em três topologia distintas sendo a primeira topologia a radial, apresentada na figura 19, a segunda, uma topologia em malha interligando as barras 8-21, 9-15, 12-22, 18-33 e 25-29 possuindo o mesmo valor de impedância $Z = 0,34107 + j5302 \Omega$. Por fim, a terceira configuração será a adição de geração distribuída(GD) nas barras 5 e 18, através de barras do tipo PQ injetando estes valores no sistema. A relação R/X média do sistema na topologia radial é de 1,3926 e na topologia malhada com e sem GD e de 1,2913. Todos os dados de barras, linhas e resultados numéricos apresentados graficamente, podem ser averiguados no ANEXO A.

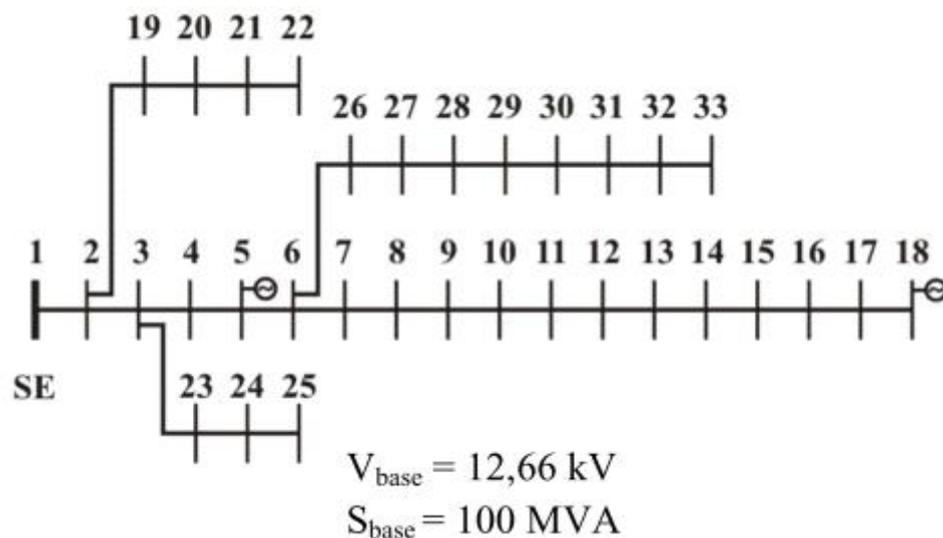


Figura 19 - Sistema de Distribuição de 33 Barras.
 Fonte: (EMINOGLU; GÖZEL; HOCAOGLU, 2010).

Para a primeira análise, em que se mostra o desempenho do método desacoplado alternativo frente as diferentes topologias de rede e aos outros métodos, é apresentado a tabela 7 e a figura 20.

Tabela 7 - Iterações Médias - Várias topologias

Iterações Médias			
Métodos	Caso 33 Radial	Caso 33 com Malha	Caso 33 com Malha e GD
NR	3	3	3
DR-XB	12	9	9
DR-BX	11,5	9	8,5
DRA-RG	10	8,5	8,5
DRA-GR	9,5	9	7,5

Fonte: o AUTOR.

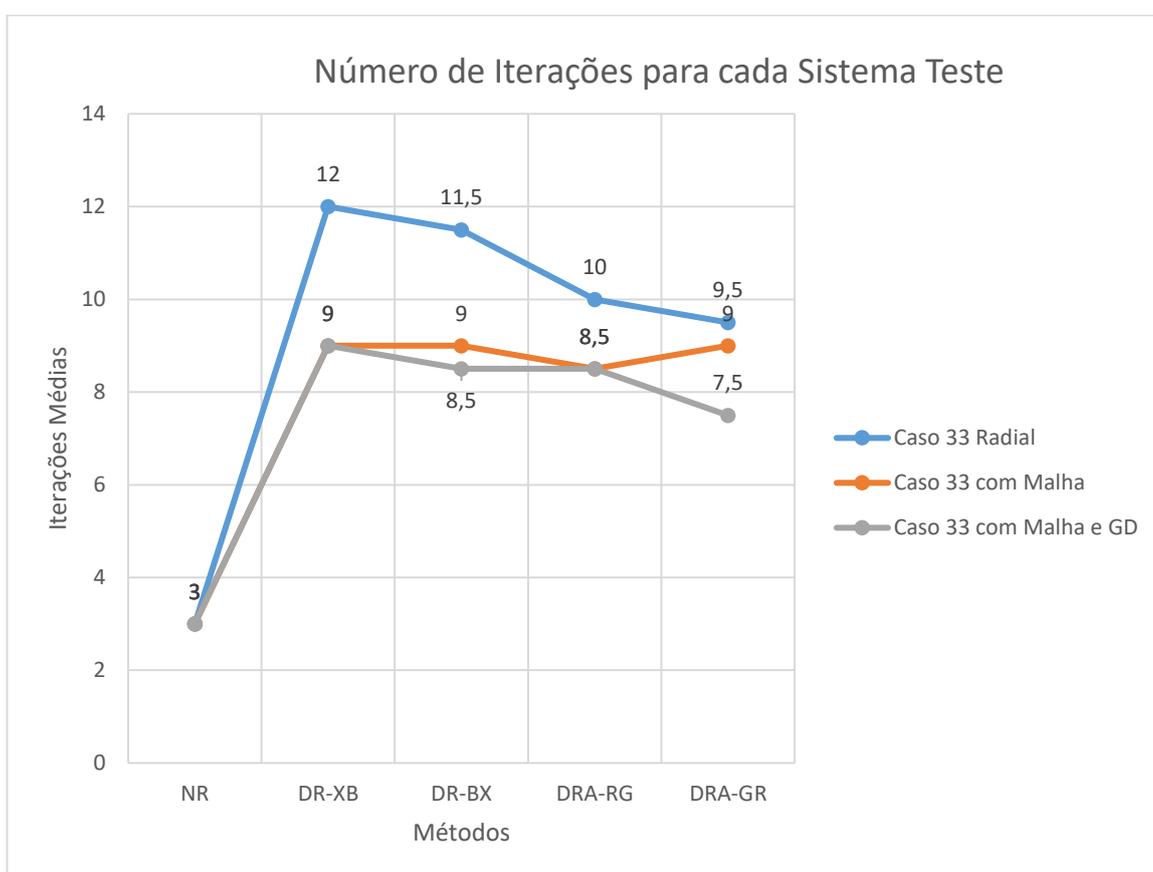


Figura 20 - Gráfico - Número de Iterações
Fonte: o AUTOR.

Através dos dados apresentados, nota-se a eficácia no número de iterações dos métodos desacoplados modelos RG e GR, nos três casos apresentados. Importante salientar a boa convergência ao se analisar o cenário mais provável dos sistemas de distribuição em que se considera a inserção de geração distribuída, em

que o método GR é o que apresenta a menor iteração média dos métodos analisados.

Na segunda análise é comparado os valores do módulo da tensão e os ângulos presentes em cada barra encontrados via método desacoplado alternativo e o método de Newton. Os gráficos em que mostra a tensão em cada barra para as topologias radiais, malhada e malhada com GD esta apresentada nas figuras 21, 22 e 23 respectivamente. No ANEXO A estes valores estão mostrados até a quinta casa decimal depois da virgula.

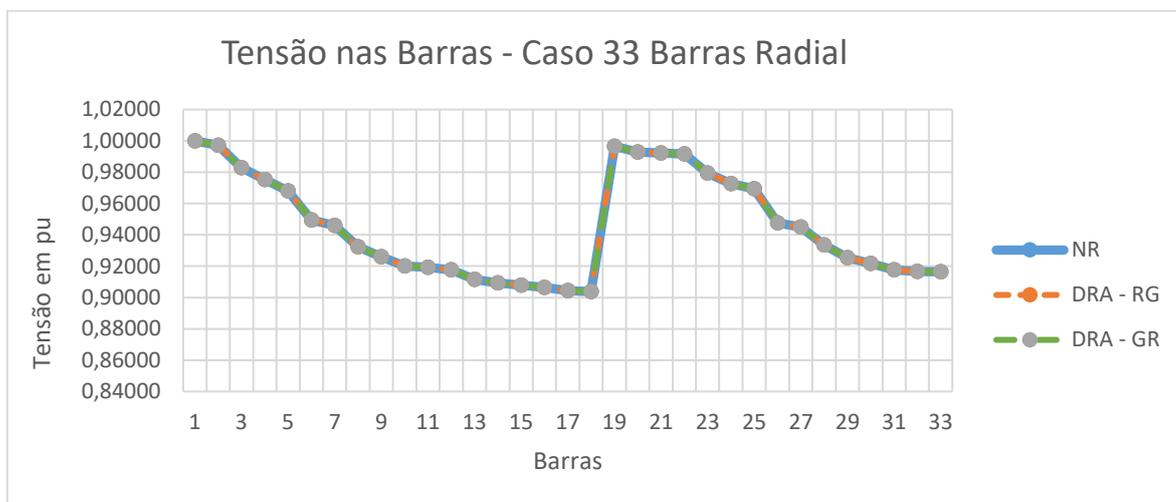


Figura 21 - Gráfico - Tensão nas Barras - Caso 33 Barras Radial.
Fonte: o AUTOR.

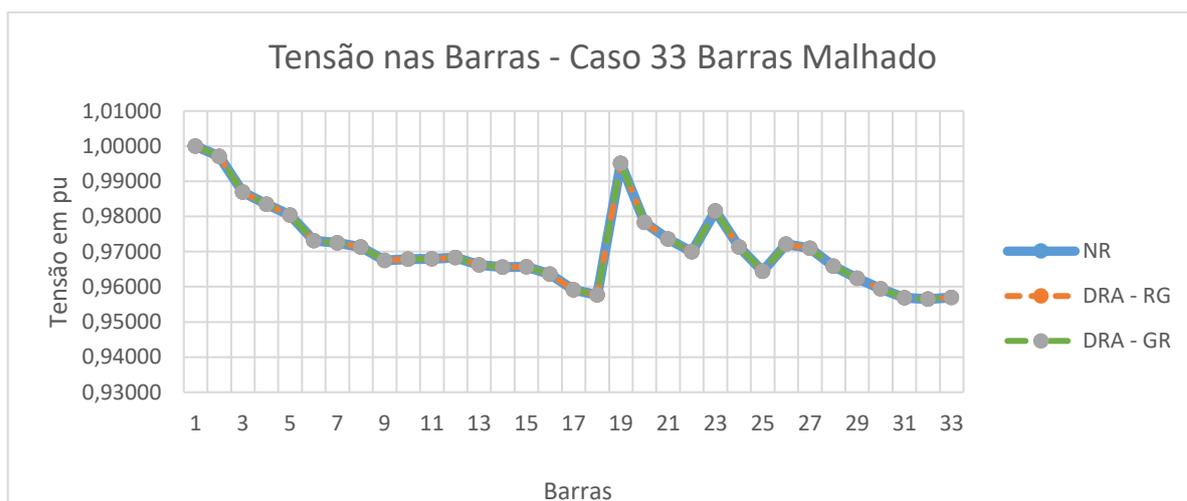


Figura 22 - Gráfico - Tensão nas Barras - Caso 33 Barras Malhado.
Fonte: o AUTOR.

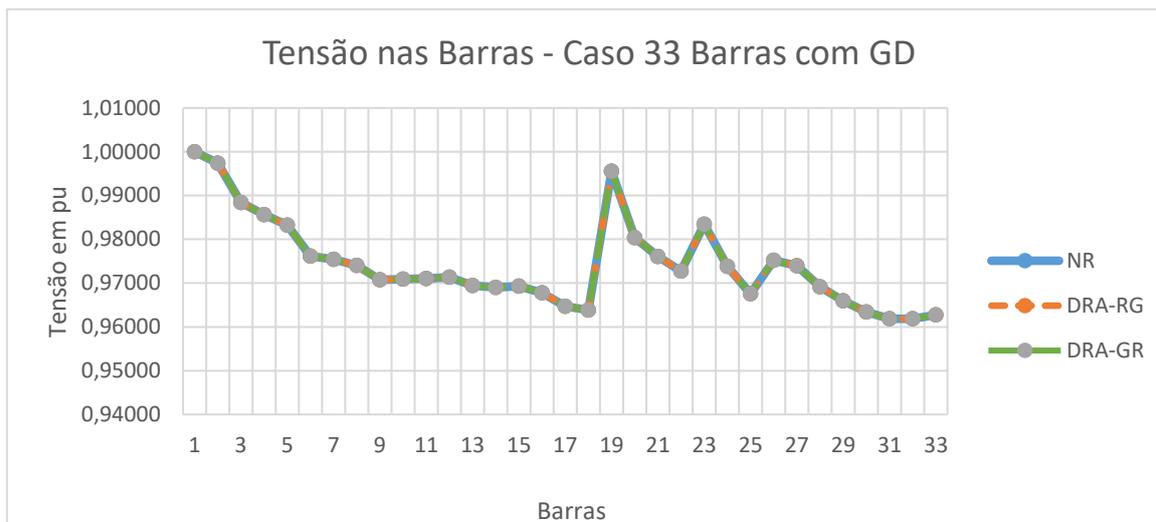


Figura 23 - Gráfico - Tensão nas Barras - Caso 33 Barras com GD.
Fonte: o AUTOR.

Através dos gráficos constata-se a capacidade do método desacoplado alternativo proposto apresentar valores de tensão igual ao conseguido com o método de Newton, que é um método mais tradicional e robusto para fazer este comparativo, não entrando no mérito do esforço computacional deste.

5.4 SISTEMA TESTE 69 BARRAS

No sistema de 69 barras mostrado na figura 24, será analisado a relação de iterações médias dos métodos desacoplados tradicional e alternativo com a variação da relação R/X, dividindo a parte reativa por determinadas constantes, com isso, aumentando a relação R/X de cada linha e de todo sistema. Assim, será possível analisar o comportamento desses métodos em um sistema de distribuição.

Será considerado três topologias, sendo a primeira, o sistema radial a segunda um sistema em malha considerando a interligação entre as barras 15-68, 16-27, 22-25, 35-47, 37-51-50-67, 52-43, 52-65, 59-46, 67-20 e 69-53 com o valor de impedância de $Z = 0,3475 + j01621\Omega$. Por fim, a ultima topologia será acrescentado geração distribuída nas barras 7, 27, 40, e 60 através de barras do tipo PQ injetando potência no sistema. Em relação aos valores R/X médios do sistema, quando considerado o sistema radial, está fica em 2,0964, já para ao sistema em malha é de 2,0797. Os valores das relações médias de todo sistema considerando a mudança da reatância nas linhas, está mostrado na figura 25.

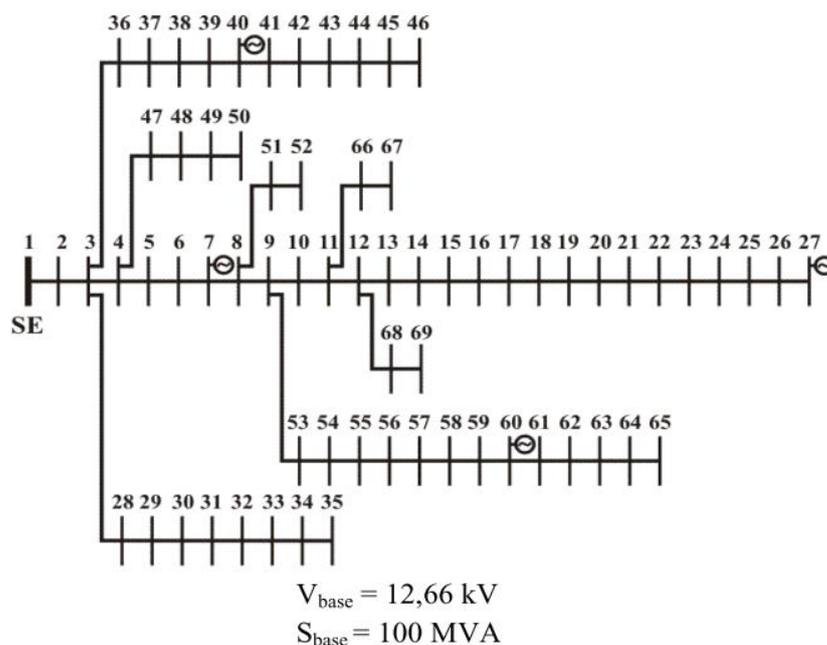


Figura 24 - Sistema de Distribuição de 69 Barras.
 Fonte: (EMINOGLU; GÖZEL; HOCAOGLU, 2010).

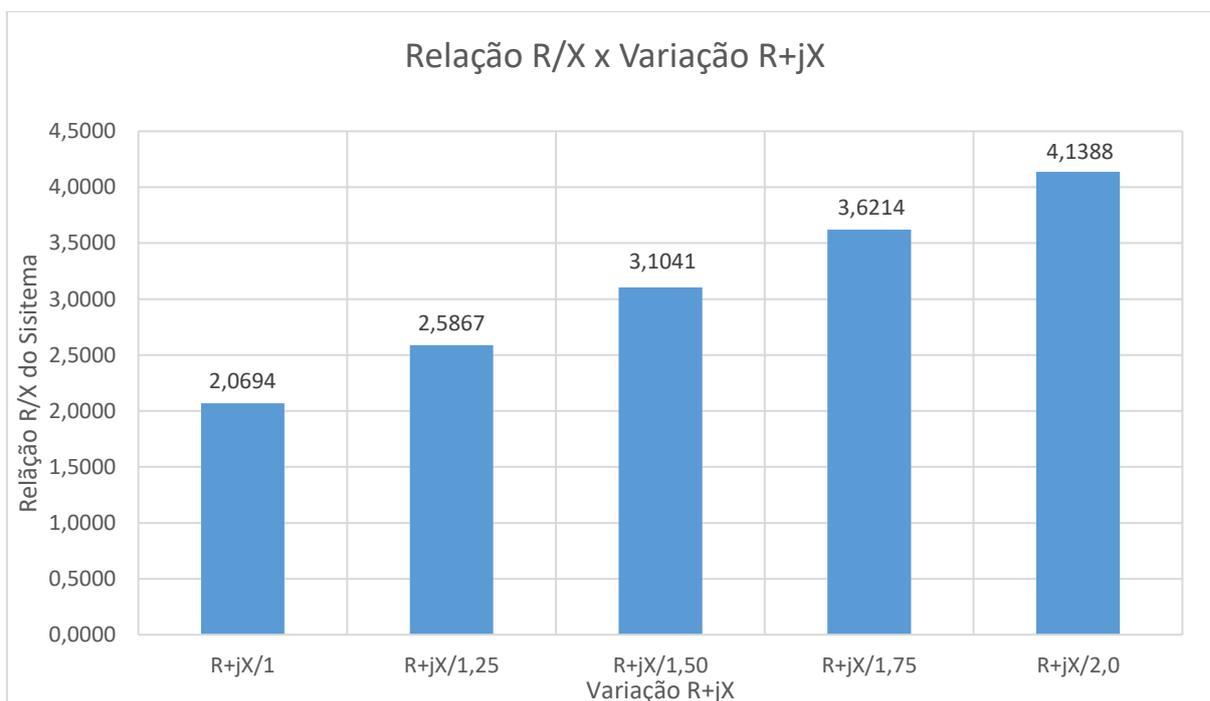


Figura 25 – Gráfico: Relação R/X x Variação R+jX – Sistema Radial
 Fonte: o AUTOR.

Nota-se que conforme se divide a impedância pelas constantes apresentadas no gráfico da figura 25, a relação R/X média do sistema sobe, como era de se esperar. Logo, para cada um destes valores de relações R/X do sistema foi analisado as iterações médias entre os métodos desacoplado tradicionais e do

alternativo nas versões RG e GR. O resultado destas iterações está ilustrado no gráfico da figura 26. Os resultados com as relações de R/X e valores de suas impedâncias em pu para cada linha do sistema pode ser verificado no ANEXO B.

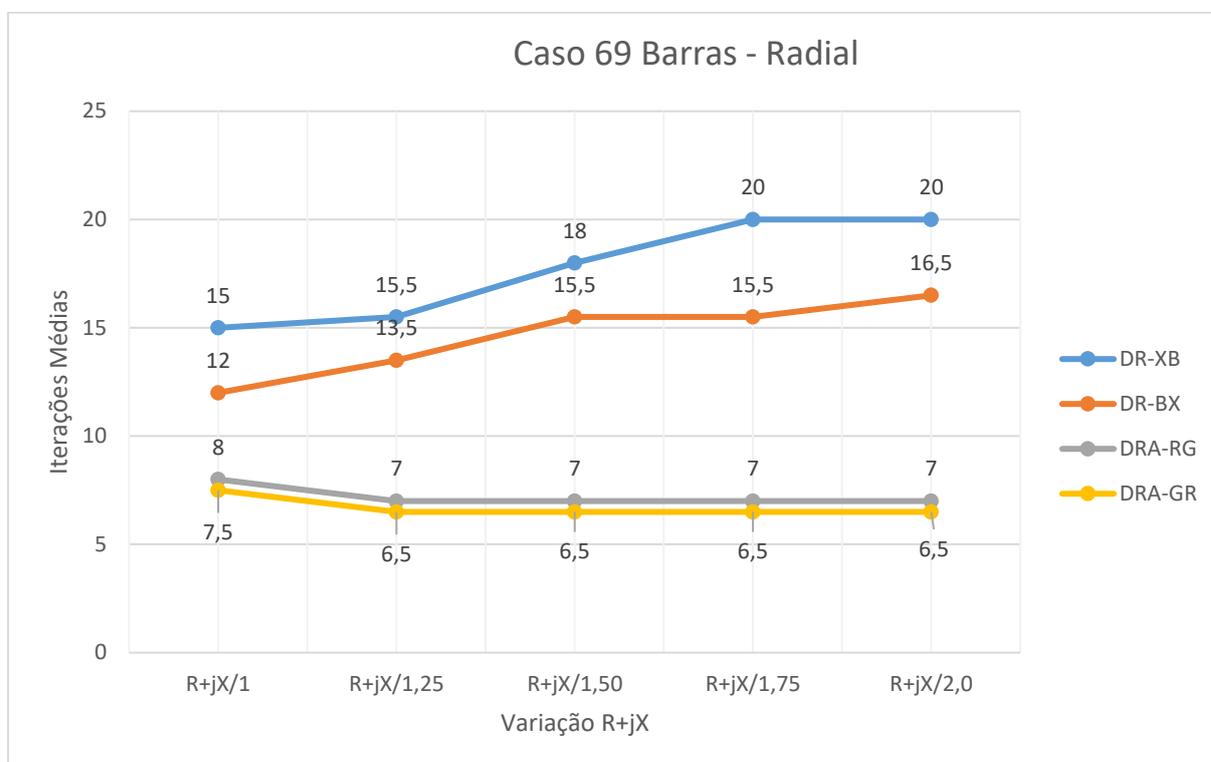


Figura 26 - Gráfico - Iterações Médias com variação de R+jX - Sistema Radial
Fonte: o AUTOR.

É possível constatar com o gráfico apresentado na figura 26, que os métodos desacoplados alternativos possuem uma excelente iteração média, para a topologia radial e conforme a relação R/X aumenta acaba não tendo uma melhora mais significativa do que 7 e 6,5 para os modelos RG e GR respectivamente. Em contrapartida os métodos desacoplados apresentam considerável piora no desempenho.

Para o sistema malhado e malhado com geração distribuída a relação R/X média esta apresentada no gráfico da figura 27. Em que se percebesse pouca variação das relações R/X médias, quando foi inserida as malhas ao sistema.

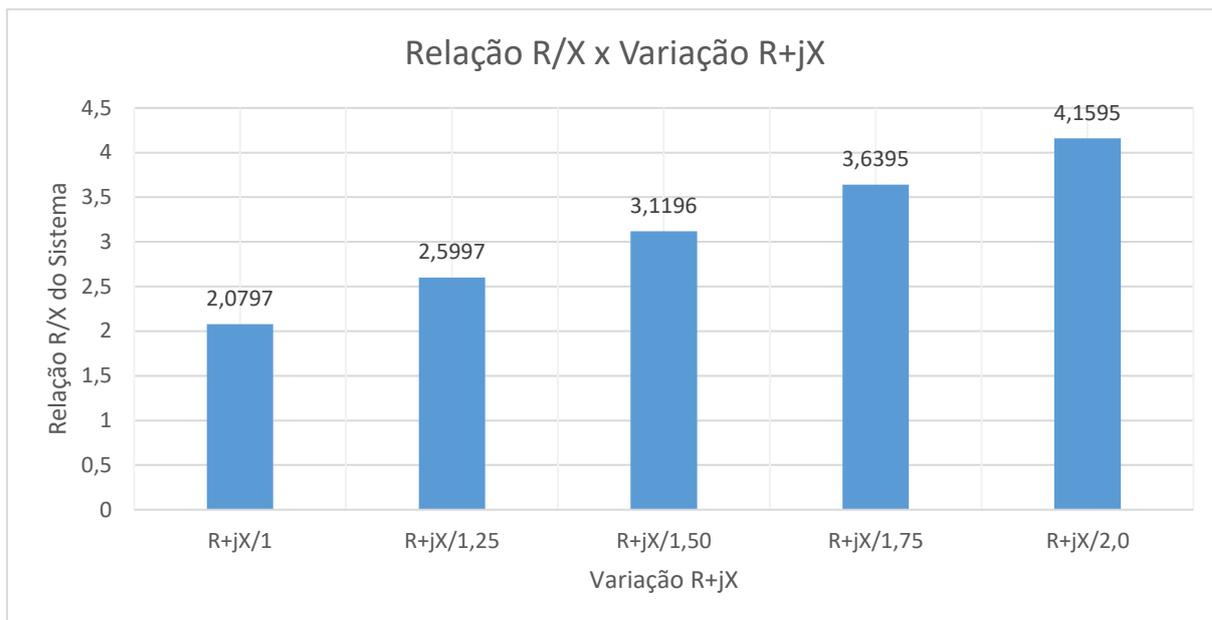


Figura 27 - Gráfico: Relação R/X x Variação R+jX - Sistema 69 malhado e malhado com GD.
Fonte: o AUTOR.

E assim como foi analisado no sistema radial, está apresentado nos gráficos das figuras 28 e 29 o número de iterações médias para cada método, no sistema malhado e malhado com GD respectivamente. Os resultados das relações R/X para cada linha desse sistema em pu pode ser averiguado no ANEXO B.

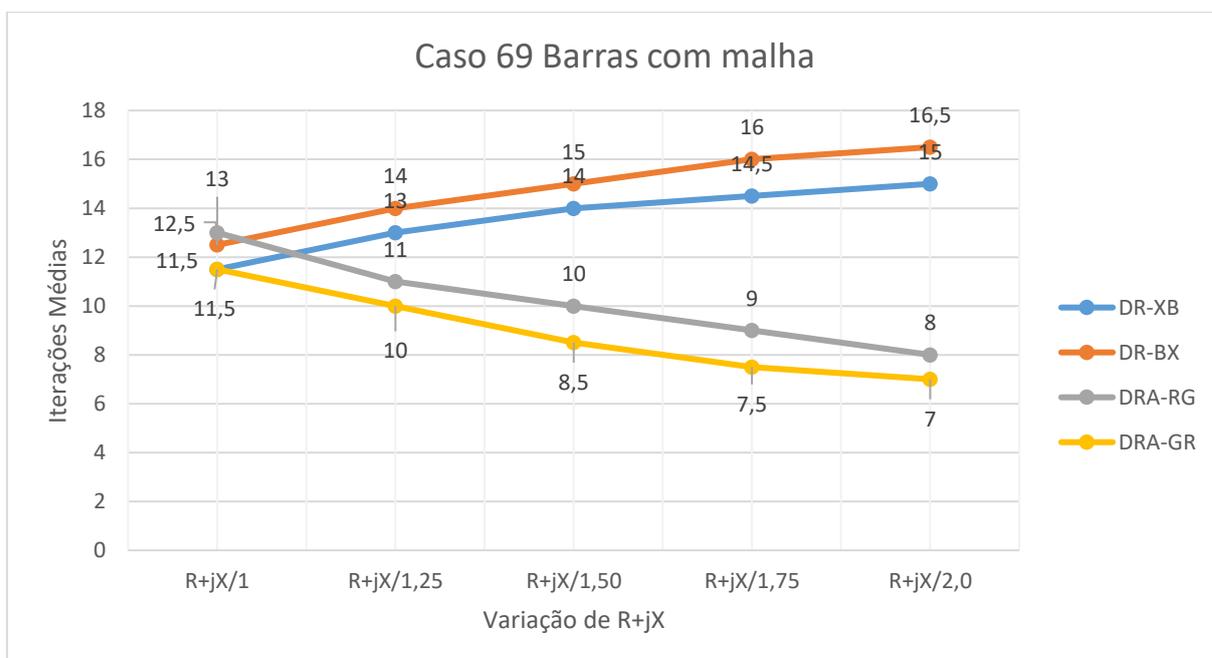


Figura 28 - Gráfico - Iterações Médias com variação de R+jX - Sistema Malhado.
Fonte: o AUTOR.

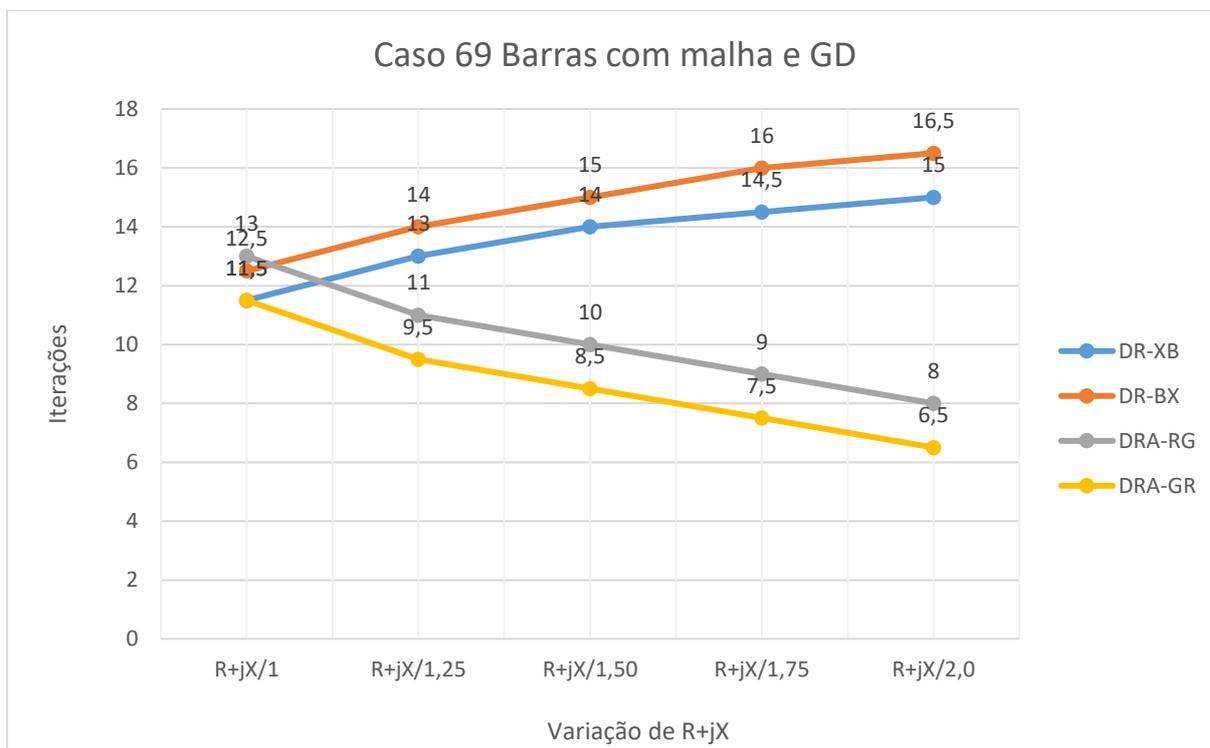


Figura 29 - Gráfico - Iterações Médias com variação de R+jX - Sistema Malhado com GD.
Fonte: o AUTOR.

Nota-se que para ambas as topologias o número de iterações médias no primeiro caso R+jX/1 todos os métodos obtiveram ligeira semelhança, sendo que com modelo XB do desacoplado e o modelo GR do desacoplado alternativo obteve-se, o mesmo resultado de 11,5 iterações médias. Já o modelo RG do desacoplado alternativo resolveu o sistema em 13 iterações médias, seguido do modelo BX do desacoplado tradicional. Entretanto, a partir das próximas variações da reatância do sistema e consequente aumento das relações R/X, o método alternativo mostra-se eficiente. No qual, o modelo RG conseguiu resolver o sistema com os mesmos números de iterações, tanto com o sistema malhado quanto na presença de geração distribuída. Já o modelo GR, possui uma ligeira eficácia no sistema malhado em que se considera a geração distribuída. Porém, ambos apresentaram significativa eficiência se comparado com os desacoplados tradicionais.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS

A partir dos casos apresentados, o método alternativo se saiu melhor que os métodos desacoplados tradicionais, principalmente com sistemas em que a relação R/X ficam na casa de 1,19 a 5,5 quando analisado no caso de duas barras.

Já para o sistema de 33 barras em suas diferentes topologias e com relações R/X no sistema radial de 1,3929 e do sistema malhado de 1,2913, além de terem valores de tensão e ângulo iguais ao se comparar com o método de Newton, obtiveram um número de iterações médias melhores que o modelo XB e BX para a topologia radial. Na topologia malhada e malhada com GD os métodos desacoplados tradicionais e os alternativos tiveram certa semelhança, porém com número de iterações médias menores que os modelos tradicionais, sendo que para o malhado com GD o modelo GR se mostrou o mais eficiente.

Para o sistema de 69 barras que já possui uma relação R/X de 2,0964 para o sistema radial e de 2,0797 para o sistema em malha. Foi testado as três topologias e alterando o valor da reatância das linhas do sistema para que a relação R/X aumenta-se. Os métodos alternativos tiveram considerável vantagem na topologia radial. Caso semelhante ocorreu nas topologias em malha e malha com GD, porém tendo somente uma ligeira vantagem para ambos os modelos alternativos, no caso considerando $R+jX/1$.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado uma formulação alternativa do método desacoplado rápido com o objetivo de ser aplicado a sistemas de distribuição de energia sujeitos a uma participação crescente da geração distribuída e, que, em função disso passem da tradicional topologia radial com fluxo de potência unidirecional, para uma estrutura de rede em malha com fluxos de potência bidirecionais.

Está formulação alternativa, constitui-se na mudança das matrizes do desacoplado rápido tradicional, tendo em vista o acoplamento P-V Q- Θ mais evidente em sistemas de distribuição.

Verifica-se que o método alternativo apresentado nas suas versões RG e GR teve excelente desempenho nos casos analisados, tendo uma ligeira vantagem para a versão GR. Tais métodos apresentaram melhores resultados, quando comparados aos métodos desacoplados tradicionais, principalmente com sistemas em que a relação R/X é mais elevada.

O uso do MATPOWER 6.0 e sua modificação foi de grande importância para a consolidação dos resultados e por ser um software livre e reconhecido no meio educacional e de pesquisa, as funções aqui desenvolvidas poderão ser usadas em outras instituições e assim, poder difundir o conhecimento desta metodologia alternativa e fomentar a criação de novos estudos e aprimoramentos.

Por fim, conclui-se que a metodologia alternativa proposta neste trabalho é um eficiente caminho para a resolução do fluxo de potência em sistemas de distribuição, tanto na sua topologia radial e mais tradicional, quanto nas topologias com geração distribuída e que são as tendências futuras para esses sistemas, além do conhecimento a ser difundido para outras instituições ao conceber esta metodologia numa plataforma consolidada como o toolbox MATPOWER 6.0.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, p. 1–76, 2016.
- CARVALHO, M. R. **Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2006.
- CESPEDES, R. New method for the analysis of distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 1, p. 391–396, 1990.
- COPEL. **NTC 841100 - Projeto de Redes de Distribuição Compacta Protegida**. Curitiba: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/83841DCD1DC0624E032574F1005C9007/\\$FILE/Ntc RDC - Mai13.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/83841DCD1DC0624E032574F1005C9007/$FILE/Ntc%20RDC%20-%20Mai13.pdf)>.
- DURCE, C. C. et al. Complex normalization to perform power flow analysis in emerging distribution systems. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe**, n. 1, p. 1–6, 2012.
- DURCE, C. C. **Normalização Complexa e Cálculo de Fluxo de Potência para Sistemas Elétricos Emergentes**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2012.
- EMINOGLU, U.; GÖZEL, T.; HOCAOGLU, M. H. DSPFAP: Distribution systems power flow analysis package using matlab graphical user interface (GUI). **Computer Applications in Engineering Education**, v. 18, n. 1, p. 1–13, 2010.
- KERSTING, W. H. **Distribution system modelling and analysis**. [s.l.: s.n.].
- LOURENCO, E.; LODDI, T.; TORTELLI, O. Unified load flow analysis for emerging distribution systems. **Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)**, p. 1–7, 2010.
- MONTICELLI, A.; GARCIA, A.; SAAVEDRA, O. R. Fast decoupled load flow: Hypothesis, derivations, and testing. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 4, p. 1425–1431, 1990.
- OCHI, T. et al. The development and the application of fast decoupled load flow method for distribution systems with high R/X ratios lines. **2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2013**, p. 1–6, 2013.
- PORTELINHA, R. K. **Fluxo de Potência Desacoplado Rápido Trifásico para Redes de Distribuição**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2016.
- RAJICIC, D.; BOSE, A. Modification to the fast decoupled power flow for networks

with high R/X ratios. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 743–746, 1988.

SETIA, G. A.; SIANIPAR, G. H. M.; PARIBO, R. T. The performance comparison between fast decoupled and backward-forward sweep in solving distribution systems. **3rd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2016**, p. 247–251, 2017.

SHIRMOHAMMADI, D. et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988.

SIANIPAR, G. H. M.; SETIA, G. A.; SANTOSA, M. F. Implementation of Axis Rotation Fast Decoupled Load Flow on distribution systems. **3rd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2016**, p. 257–261, 2017.

TORTELLI, O. L. et al. Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex PU normalization. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 3, p. 1351–1358, 2015.

ZIMMERMAN, R. D.; CHIANG, H. D. Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 4, p. 2045–2052, 1995.

ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SANCHEZ, C. E.; THOMAS, R. J. MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, n. 1, p. 12–19, 2011.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de Energia Elétrica**. 2ª. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. 2ª. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2011.

ANEXO A-DADOS E RESULTADO DO SISTEMA TESTE 33 BARRAS

Tabela 8 - Dados de Barra - Sistema 33 Barras.

DADOS DE BARRA		
Barra	Pd(MVA)	Qd(Mvar)
1	0	0
2	0,1	0,06
3	0,09	0,04
4	0,12	0,08
5	0,06	0,03
6	0,06	0,02
7	0,2	0,1
8	0,2	0,1
9	0,06	0,02
10	0,06	0,02
11	0,045	0,03
12	0,06	0,035
13	0,06	0,035
14	0,12	0,08
15	0,06	0,01
16	0,06	0,02
17	0,06	0,02
18	0,09	0,04
19	0,09	0,04
20	0,09	0,04
21	0,09	0,04
22	0,09	0,04
23	0,09	0,05
24	0,42	0,2
25	0,42	0,2
26	0,06	0,025
27	0,06	0,025
28	0,06	0,02
29	0,12	0,07
30	0,2	0,6
31	0,15	0,07
32	0,21	0,1
33	0,06	0,04

Fonte: o AUTOR.

Tabela 9 - Dados de Barras com Geração Distribuída.

Barras GD	Pg (MW)	Qg(Mvar)
5	0,2	0,1
18	0,2	0,1

Fonte: o AUTOR.

Tabela 10 - Dados de Linha - Sistema 33 barras radial.

DADOS DE LINHA						
De	Para	R(pu)	X(pu)	R(Ω)	X(Ω)	RELAÇÃO R/X
1	2	0,0575	0,0293	0,09216	0,04696	1,9625
2	3	0,3076	0,1566	0,49301	0,25099	1,9642
3	4	0,2284	0,1163	0,36607	0,18640	1,9639
4	5	0,2378	0,1211	0,38114	0,19409	1,9637
5	6	0,511	0,4411	0,81901	0,70698	1,1585
6	7	0,1168	0,3861	0,18720	0,61882	0,3025
7	8	1,068	0,771	1,71174	1,23572	1,3852
8	9	0,6426	0,4617	1,02993	0,73999	1,3918
9	10	0,6514	0,4617	1,04404	0,73999	1,4109
10	11	0,1227	0,0406	0,19666	0,06507	3,0222
11	12	0,2336	0,0772	0,37440	0,12373	3,0259
12	13	0,9159	0,7206	1,46796	1,15495	1,2710
13	14	0,3379	0,4448	0,54157	0,71291	0,7597
14	15	0,3687	0,3282	0,59094	0,52602	1,1234
15	16	0,4656	0,34	0,74624	0,54494	1,3694
16	17	0,8042	1,0738	1,28894	1,72104	0,7489
17	18	0,4567	0,3581	0,73198	0,57395	1,2753
2	19	0,1023	0,0976	0,16396	0,15643	1,0482
19	20	0,9385	0,8457	1,50419	1,35545	1,1097
20	21	0,2555	0,2985	0,40950	0,47842	0,8559
21	22	0,4423	0,5848	0,70890	0,93729	0,7563
3	23	0,2815	0,1924	0,45118	0,30837	1,4631
23	24	0,5603	0,4424	0,89802	0,70906	1,2665
24	25	0,559	0,4374	0,89594	0,70105	1,2780
6	26	0,1267	0,0645	0,20307	0,10338	1,9643
26	27	0,1773	0,0903	0,28417	0,14473	1,9635
27	28	0,6607	0,5826	1,05894	0,93377	1,1341
28	29	0,5018	0,4371	0,80426	0,70056	1,1480
29	30	0,3166	0,1613	0,50743	0,25852	1,9628
30	31	0,608	0,6008	0,97448	0,96294	1,0120
31	32	0,1937	0,2258	0,31045	0,36190	0,8578
32	33	0,2128	0,3308	0,34107	0,53019	0,6433

Fonte: o AUTOR.

Tabela 11 - Dados de Linha - Sistema 33 Barras Malhado.

DADOS DE LINHA						
De	Para	R(pu)	X(pu)	R(Ω)	X(Ω)	RELAÇÃO R/X
1	2	0,0575	0,0293	0,09216	0,0470	1,9625
2	3	0,3076	0,1566	0,49301	0,2510	1,9642
3	4	0,2284	0,1163	0,36607	0,1864	1,9639
4	5	0,2378	0,1211	0,38114	0,1941	1,9637
5	6	0,511	0,4411	0,81901	0,7070	1,1585
6	7	0,1168	0,3861	0,18720	0,6188	0,3025
7	8	1,068	0,771	1,71174	1,2357	1,3852
8	9	0,6426	0,4617	1,02993	0,7400	1,3918
9	10	0,6514	0,4617	1,04404	0,7400	1,4109
10	11	0,1227	0,0406	0,19666	0,0651	3,0222
11	12	0,2336	0,0772	0,37440	0,1237	3,0259
12	13	0,9159	0,7206	1,46796	1,1549	1,2710
13	14	0,3379	0,4448	0,54157	0,7129	0,7597
14	15	0,3687	0,3282	0,59094	0,5260	1,1234
15	16	0,4656	0,34	0,74624	0,5449	1,3694
16	17	0,8042	1,0738	1,28894	1,7210	0,7489
17	18	0,4567	0,3581	0,73198	0,5739	1,2753
2	19	0,1023	0,0976	0,16396	0,1564	1,0482
19	20	0,9385	0,8457	1,50419	1,3555	1,1097
20	21	0,2555	0,2985	0,40950	0,4784	0,8559
21	22	0,4423	0,5848	0,70890	0,9373	0,7563
3	23	0,2815	0,1924	0,45118	0,3084	1,4631
23	24	0,5603	0,4424	0,89802	0,7091	1,2665
24	25	0,559	0,4374	0,89594	0,7010	1,2780
6	26	0,1267	0,0645	0,20307	0,1034	1,9643
26	27	0,1773	0,0903	0,28417	0,1447	1,9635
27	28	0,6607	0,5826	1,05894	0,9338	1,1341
28	29	0,5018	0,4371	0,80426	0,7006	1,1480
29	30	0,3166	0,1613	0,50743	0,2585	1,9628
30	31	0,608	0,6008	0,97448	0,9629	1,0120
31	32	0,1937	0,2258	0,31045	0,3619	0,8578
32	33	0,2128	0,3308	0,34107	0,5302	0,6433
8	21	0,2128	0,3308	0,34107	0,5302	0,6433
12	22	0,2128	0,3308	0,34107	0,5302	0,6433
9	15	0,2128	0,3308	0,34107	0,5302	0,6433
25	29	0,2128	0,3308	0,34107	0,5302	0,6433
18	33	0,2128	0,3308	0,34107	0,5302	0,6433

Fonte: o AUTOR.

Tabela 12 - Valores de Tensão e Ângulo - Sistema Radial.

Caso 33 Barras Radial						
Barra	NR		RG		GR	
	<i>Mag(pu)</i>	<i>Ang(deg)</i>	<i>Mag(pu)</i>	<i>Ang(deg)</i>	<i>Mag(pu)</i>	<i>Ang(deg)</i>
1	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000
2	0,99703	0,01462	0,99703	0,01462	0,99703	0,01462
3	0,98290	0,09698	0,98290	0,09698	0,98290	0,09698
4	0,97539	0,16314	0,97539	0,16314	0,97539	0,16314
5	0,96796	0,23034	0,96796	0,23034	0,96796	0,23034
6	0,94948	0,13621	0,94948	0,13621	0,94948	0,13621
7	0,94596	-0,09549	0,94596	-0,09549	0,94596	-0,09549
8	0,93230	-0,24916	0,93230	-0,24916	0,93230	-0,24916
9	0,92596	-0,32368	0,92596	-0,32368	0,92596	-0,32368
10	0,92009	-0,38744	0,92009	-0,38744	0,92009	-0,38744
11	0,91922	-0,38005	0,91922	-0,38005	0,91922	-0,38005
12	0,91771	-0,36830	0,91771	-0,36830	0,91771	-0,36830
13	0,91153	-0,46145	0,91153	-0,46145	0,91153	-0,46145
14	0,90924	-0,54175	0,90924	-0,54175	0,90924	-0,54175
15	0,90781	-0,58021	0,90781	-0,58021	0,90781	-0,58021
16	0,90643	-0,60393	0,90643	-0,60393	0,90643	-0,60394
17	0,90438	-0,68280	0,90438	-0,68280	0,90438	-0,68280
18	0,90377	-0,69259	0,90377	-0,69259	0,90377	-0,69259
19	0,99650	0,00380	0,99650	0,00380	0,99650	0,00380
20	0,99292	-0,06319	0,99292	-0,06319	0,99292	-0,06319
21	0,99222	-0,08255	0,99222	-0,08255	0,99222	-0,08255
22	0,99158	-0,10289	0,99158	-0,10289	0,99158	-0,10289
23	0,97931	0,06599	0,97931	0,06599	0,97931	0,06599
24	0,97264	-0,02274	0,97264	-0,02274	0,97264	-0,02274
25	0,96931	-0,06644	0,96931	-0,06644	0,96931	-0,06644
26	0,94755	0,17571	0,94755	0,17571	0,94755	0,17571
27	0,94499	0,23187	0,94499	0,23187	0,94499	0,23187
28	0,93354	0,31480	0,93354	0,31480	0,93354	0,31480
29	0,92532	0,39277	0,92532	0,39277	0,92532	0,39277
30	0,92177	0,49805	0,92177	0,49805	0,92177	0,49805
31	0,91760	0,41363	0,91760	0,41363	0,91760	0,41363
32	0,91669	0,39058	0,91669	0,39058	0,91669	0,39057
33	0,91641	0,38284	0,91641	0,38284	0,91641	0,38284

Fonte: o AUTOR.

Tabela 13 - Valores de Tensão e Ângulo - Sistema Malhado.

Caso 33 Barras Malhado						
Barra	NR		RG		GR	
	<i>Mag(pu)</i>	<i>Ang(deg)</i>	<i>Mag(pu)</i>	<i>Ang(deg)</i>	<i>Mag(pu)</i>	<i>Ang(deg)</i>
1	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000
2	0,99710	0,01428	0,99710	0,01428	0,99710	0,01428
3	0,98688	0,04904	0,98688	0,04904	0,98688	0,04904
4	0,98351	0,05204	0,98351	0,05204	0,98351	0,05204
5	0,98038	0,05251	0,98038	0,05251	0,98038	0,05251
6	0,97315	-0,05073	0,97315	-0,05073	0,97315	-0,05073
7	0,97249	-0,12463	0,97249	-0,12463	0,97249	-0,12463
8	0,97127	-0,21051	0,97127	-0,21051	0,97127	-0,21051
9	0,96746	-0,22623	0,96746	-0,22623	0,96746	-0,22623
10	0,96783	-0,24726	0,96783	-0,24726	0,96783	-0,24726
11	0,96796	-0,25158	0,96796	-0,25158	0,96796	-0,25158
12	0,96833	-0,26196	0,96833	-0,26196	0,96833	-0,26196
13	0,96618	-0,26111	0,96618	-0,26111	0,96618	-0,26111
14	0,96554	-0,26704	0,96554	-0,26704	0,96554	-0,26704
15	0,96571	-0,25973	0,96571	-0,25973	0,96571	-0,25973
16	0,96355	-0,23371	0,96355	-0,23371	0,96355	-0,23371
17	0,95917	-0,23339	0,95917	-0,23339	0,95917	-0,23339
18	0,95770	-0,19607	0,95770	-0,19607	0,95770	-0,19607
19	0,99510	-0,00272	0,99510	-0,00272	0,99510	-0,00272
20	0,97832	-0,10499	0,97832	-0,10498	0,97832	-0,10499
21	0,97358	-0,16683	0,97358	-0,16683	0,97358	-0,16683
22	0,96991	-0,23139	0,96991	-0,23139	0,96991	-0,23139
23	0,98158	0,04123	0,98158	0,04123	0,98158	0,04123
24	0,97128	-0,01321	0,97128	-0,01321	0,97128	-0,01321
25	0,96436	-0,02164	0,96436	-0,02164	0,96436	-0,02164
26	0,97216	-0,04172	0,97216	-0,04172	0,97216	-0,04172
27	0,97090	-0,02850	0,97090	-0,02850	0,97090	-0,02850
28	0,96581	-0,04248	0,96581	-0,04248	0,96581	-0,04248
29	0,96237	-0,04176	0,96237	-0,04176	0,96237	-0,04176
30	0,95940	0,02170	0,95940	0,02170	0,95940	0,02170
31	0,95684	-0,11450	0,95684	-0,11451	0,95684	-0,11451
32	0,95649	-0,15356	0,95649	-0,15357	0,95649	-0,15356
33	0,95696	-0,17837	0,95696	-0,17838	0,95696	-0,17837

Fonte: o AUTOR.

Tabela 14 - Valores de Tensão e Ângulo - Sistema Malhado com GD.

Caso 33 Barras Malhado com GD						
Barra	NR		RG		GR	
	<i>Mag(pu)</i>	<i>Ang(deg)</i>	<i>Mag(pu)</i>	<i>Ang(deg)</i>	<i>Mag(pu)</i>	<i>Ang(deg)</i>
1	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000
2	0,99741	0,01426	0,99741	0,01426	0,99741	0,01426
3	0,98840	0,05207	0,98840	0,05207	0,98840	0,05207
4	0,98567	0,05781	0,98567	0,05781	0,98567	0,05781
5	0,98322	0,06115	0,98322	0,06115	0,98322	0,06115
6	0,97613	-0,03294	0,97613	-0,03294	0,97613	-0,03294
7	0,97540	-0,10592	0,97540	-0,10592	0,97540	-0,10592
8	0,97404	-0,18277	0,97404	-0,18277	0,97404	-0,18277
9	0,97073	-0,19329	0,97073	-0,19329	0,97073	-0,19329
10	0,97093	-0,21432	0,97093	-0,21432	0,97093	-0,21432
11	0,97102	-0,21814	0,97102	-0,21814	0,97102	-0,21814
12	0,97134	-0,22756	0,97134	-0,22756	0,97134	-0,22756
13	0,96948	-0,22363	0,96948	-0,22363	0,96948	-0,22363
14	0,96898	-0,22599	0,96898	-0,22599	0,96898	-0,22599
15	0,96927	-0,21698	0,96927	-0,21698	0,96927	-0,21698
16	0,96774	-0,18579	0,96774	-0,18579	0,96774	-0,18579
17	0,96471	-0,14822	0,96471	-0,14822	0,96471	-0,14822
18	0,96387	-0,10455	0,96387	-0,10455	0,96387	-0,10455
19	0,99558	-0,00114	0,99558	-0,00114	0,99558	-0,00114
20	0,98035	-0,09121	0,98035	-0,09121	0,98035	-0,09121
21	0,97608	-0,14544	0,97608	-0,14544	0,97608	-0,14544
22	0,97275	-0,20204	0,97275	-0,20204	0,97275	-0,20204
23	0,98344	0,04620	0,98344	0,04620	0,98344	0,04620
24	0,97383	-0,00118	0,97383	-0,00118	0,97383	-0,00118
25	0,96758	-0,00285	0,96758	-0,00285	0,96758	-0,00285
26	0,97518	-0,02361	0,97518	-0,02361	0,97518	-0,02361
27	0,97399	-0,00995	0,97399	-0,00995	0,97399	-0,00995
28	0,96917	-0,01759	0,96917	-0,01759	0,96917	-0,01759
29	0,96593	-0,01219	0,96593	-0,01219	0,96593	-0,01219
30	0,96341	0,05139	0,96341	0,05139	0,96341	0,05139
31	0,96186	-0,06303	0,96186	-0,06303	0,96186	-0,06303
32	0,96184	-0,09284	0,96184	-0,09284	0,96184	-0,09284
33	0,96272	-0,10221	0,96272	-0,10221	0,96272	-0,10221

Fonte: o AUTOR.

ANEXO B- DADOS E RESULTADO DO SISTEMA TESTE 69 BARRAS

Tabela 15 - Dados de Barra - Sistema 69 Barras.

DADOS DE BARRAS SISTEMA 69 BARRAS					
Barra	Pd(MW)	Qd(Mvar)	Barra	Pd(MW)	Qd(Mvar)
1	0,0000	0,0000	36	0,0260	0,0186
2	0,0000	0,0000	37	0,0260	0,0186
3	0,0000	0,0000	38	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	39	0,0240	0,0170
5	0,0000	0,0000	40	0,0240	0,0170
6	0,0026	0,0022	41	0,0012	0,0010
7	0,0404	0,0300	42	0,0000	0,0000
8	0,0750	0,0540	43	0,0060	0,0043
9	0,0300	0,0220	44	0,0000	0,0000
10	0,0280	0,0190	45	0,0392	0,0263
11	0,1450	0,1040	46	0,0392	0,0263
12	0,1450	0,1040	47	0,0000	0,0000
13	0,0080	0,0055	48	0,0790	0,0564
14	0,0080	0,0055	49	0,3847	0,2745
15	0,0000	0,0000	50	0,3847	0,2745
16	0,0455	0,0300	51	0,0405	0,0283
17	0,0600	0,0350	52	0,0036	0,0027
18	0,0600	0,0350	53	0,0043	0,0035
19	0,0000	0,0000	54	0,0264	0,0190
20	0,0010	0,0006	55	0,0240	0,0172
21	0,1140	0,0810	56	0,0000	0,0000
22	0,0053	0,0035	57	0,0000	0,0000
23	0,0000	0,0000	58	0,0000	0,0000
24	0,0280	0,0200	59	0,1000	0,0720
25	0,0000	0,0000	60	0,0000	0,0000
26	0,0140	0,0100	61	1,2440	0,8880
27	0,0140	0,0100	62	0,0320	0,0230
28	0,0260	0,0185	63	0,0000	0,0000
29	0,0260	0,0185	64	0,2270	0,1620
30	0,0000	0,0000	65	0,0590	0,0420
31	0,0000	0,0000	66	0,0180	0,0130
32	0,0000	0,0000	67	0,0180	0,0130
33	0,0140	0,0100	68	0,0280	0,0200
34	0,0195	0,0140	69	0,0280	0,0200
35	0,0060	0,0040			

Fonte: o AUTOR.

Tabela 16 - Dados de Barras com Geração Distribuída.

Barras GD	Pg (MW)	Qg(Mvar)
7	0,2	0,1
27	0,2	0,1
40	0,2	0,1
60	0,2	0,1

Fonte: o AUTOR.

Tabela 17 - Dados de Linha e relação R/X com X/1 – Sistema Radial.

DADOS DE LINHA			R+jX/1		
Trecho	De	Para	R(pu)	X(pu)	Relação R/X
1	1	2	0,00031	0,00069	0,4545
2	2	3	0,00031	0,00069	0,4545
3	3	4	0,00087	0,00218	0,4000
4	4	5	0,01572	0,01828	0,8601
5	5	6	0,22842	0,11630	1,9641
6	6	7	0,23778	0,12110	1,9634
7	7	8	0,05753	0,02932	1,9617
8	8	9	0,03082	0,01572	1,9603
9	9	10	0,51099	0,16890	3,0255
10	10	11	0,11680	0,03862	3,0242
11	11	12	0,44380	0,14668	3,0255
12	12	13	0,64264	0,21213	3,0294
13	13	14	0,65144	0,21519	3,0273
14	14	15	0,66011	0,21812	3,0263
15	15	16	0,12273	0,04062	3,0215
16	16	17	0,23360	0,07718	3,0267
17	17	18	0,00287	0,00100	2,8750
18	18	19	0,20440	0,06757	3,0249
19	19	20	0,13140	0,04343	3,0259
20	20	21	0,21313	0,07038	3,0284
21	21	22	0,00867	0,00287	3,0217
22	22	23	0,09933	0,03282	3,0266
23	23	24	0,21613	0,07138	3,0280
24	24	25	0,46720	0,15442	3,0255
25	25	26	0,19273	0,06370	3,0255
26	26	27	0,10813	0,03569	3,0297
27	3	28	0,00268	0,00668	0,4019
28	28	29	0,03993	0,09758	0,4092
29	29	30	0,24820	0,08198	3,0274
30	30	31	0,04380	0,01448	3,0259
31	31	32	0,21900	0,07238	3,0259
32	32	33	0,52354	0,17570	2,9798
33	33	34	1,06560	0,35233	3,0244
34	34	35	0,91960	0,30404	3,0246
35	3	36	0,00268	0,00668	0,4019
36	36	37	0,03993	0,09758	0,4092
37	37	38	0,06570	0,07668	0,8568
38	38	39	0,01903	0,02209	0,8616
39	39	40	0,00112	0,00131	0,8571
40	40	41	0,45440	0,53090	0,8559
41	41	42	0,19342	0,22599	0,8559
42	42	43	0,02558	0,02982	0,8577

43	43	44	0,00568	0,00718	0,7913
44	44	45	0,06788	0,08573	0,7918
45	45	46	0,00062	0,00069	0,9091
46	4	47	0,00212	0,00518	0,4096
47	47	48	0,05310	0,13003	0,4083
48	48	49	0,18081	0,44243	0,4087
49	49	50	0,05129	0,12553	0,4085
50	8	51	0,05790	0,02951	1,9619
51	51	52	0,20708	0,06951	2,9794
52	9	53	0,10863	0,05528	1,9650
53	53	54	0,12672	0,06451	1,9642
54	54	55	0,17732	0,09028	1,9641
55	55	56	0,17551	0,08941	1,9630
56	56	57	0,99204	0,33299	2,9792
57	57	58	0,48903	0,16409	2,9802
58	58	59	0,18980	0,06283	3,0209
59	59	60	0,24090	0,07312	3,2944
60	60	61	0,31658	0,16128	1,9629
61	61	62	0,06083	0,03088	1,9697
62	62	63	0,09053	0,04598	1,9688
63	63	64	0,44330	0,22580	1,9632
64	64	65	0,64951	0,33081	1,9634
65	11	66	0,12553	0,03812	3,2930
66	66	67	0,00287	0,00087	3,2857
67	12	68	0,46133	0,15249	3,0254
68	68	69	0,00287	0,00100	2,8750

Fonte: o AUTOR.

Tabela 18 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,25 - Sistema Radial.

DADOS DE LINHA			R+jX/1,25		
Trecho	De	Para	R(pu)	X(pu)	Relação R/X
1	1	2	0,00031	0,00055	0,5682
2	2	3	0,00031	0,00055	0,5682
3	3	4	0,00087	0,00175	0,5000
4	4	5	0,01572	0,01462	1,0751
5	5	6	0,22842	0,09304	2,4551
6	6	7	0,23778	0,09688	2,4543
7	7	8	0,05753	0,02346	2,4521
8	8	9	0,03082	0,01258	2,4504
9	9	10	0,51099	0,13512	3,7819
10	10	11	0,11680	0,03090	3,7803
11	11	12	0,44380	0,11735	3,7819
12	12	13	0,64264	0,16971	3,7868
13	13	14	0,65144	0,17215	3,7841
14	14	15	0,66011	0,17450	3,7829
15	15	16	0,12273	0,03249	3,7769
16	16	17	0,23360	0,06174	3,7833
17	17	18	0,00287	0,00080	3,5938
18	18	19	0,20440	0,05406	3,7812
19	19	20	0,13140	0,03474	3,7823
20	20	21	0,21313	0,05630	3,7855
21	21	22	0,00867	0,00230	3,7772
22	22	23	0,09933	0,02625	3,7833
23	23	24	0,21613	0,05710	3,7850
24	24	25	0,46720	0,12354	3,7818
25	25	26	0,19273	0,05096	3,7818
26	26	27	0,10813	0,02855	3,7872
27	3	28	0,00268	0,00534	0,5023
28	28	29	0,03993	0,07807	0,5115
29	29	30	0,24820	0,06559	3,7842
30	30	31	0,04380	0,01158	3,7823
31	31	32	0,21900	0,05790	3,7823
32	32	33	0,52354	0,14056	3,7247
33	33	34	1,06560	0,28186	3,7805
34	34	35	0,91960	0,24323	3,7808
35	3	36	0,00268	0,00534	0,5023
36	36	37	0,03993	0,07807	0,5115
37	37	38	0,06570	0,06134	1,0710
38	38	39	0,01903	0,01767	1,0770
39	39	40	0,00112	0,00105	1,0714

40	40	41	0,45440	0,42472	1,0699
41	41	42	0,19342	0,18079	1,0699
42	42	43	0,02558	0,02386	1,0722
43	43	44	0,00568	0,00574	0,9891
44	44	45	0,06788	0,06858	0,9898
45	45	46	0,00062	0,00055	1,1364
46	4	47	0,00212	0,00414	0,5120
47	47	48	0,05310	0,10402	0,5104
48	48	49	0,18081	0,35394	0,5109
49	49	50	0,05129	0,10043	0,5107
50	8	51	0,05790	0,02361	2,4524
51	51	52	0,20708	0,05560	3,7242
52	9	53	0,10863	0,04422	2,4563
53	53	54	0,12672	0,05161	2,4553
54	54	55	0,17732	0,07223	2,4551
55	55	56	0,17551	0,07153	2,4538
56	56	57	0,99204	0,26639	3,7240
57	57	58	0,48903	0,13127	3,7253
58	58	59	0,18980	0,05026	3,7761
59	59	60	0,24090	0,05850	4,1180
60	60	61	0,31658	0,12903	2,4536
61	61	62	0,06083	0,02471	2,4621
62	62	63	0,09053	0,03679	2,4610
63	63	64	0,44330	0,18064	2,4541
64	64	65	0,64951	0,26464	2,4543
65	11	66	0,12553	0,03050	4,1162
66	66	67	0,00287	0,00070	4,1071
67	12	68	0,46133	0,12199	3,7817
68	68	69	0,00287	0,00080	3,5938

Fonte: o AUTOR.

Tabela 19 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,50 - Sistema Radial.

DADOS DE LINHA			R+jX/1,50		
Trecho	De	Para	R(pu)	X(pu)	Relação R/X
1	1	2	0,00031	0,00046	0,6818
2	2	3	0,00031	0,00046	0,6818
3	3	4	0,00087	0,00146	0,6000
4	4	5	0,01572	0,01219	1,2901
5	5	6	0,22842	0,07753	2,9461
6	6	7	0,23778	0,08074	2,9451
7	7	8	0,05753	0,01955	2,9426
8	8	9	0,03082	0,01048	2,9405
9	9	10	0,51099	0,11260	4,5382
10	10	11	0,11680	0,02575	4,5363
11	11	12	0,44380	0,09779	4,5383
12	12	13	0,64264	0,14142	4,5441
13	13	14	0,65144	0,14346	4,5409
14	14	15	0,66011	0,14542	4,5395
15	15	16	0,12273	0,02708	4,5323
16	16	17	0,23360	0,05145	4,5400
17	17	18	0,00287	0,00067	4,3125
18	18	19	0,20440	0,04505	4,5374
19	19	20	0,13140	0,02895	4,5388
20	20	21	0,21313	0,04692	4,5426
21	21	22	0,00867	0,00191	4,5326
22	22	23	0,09933	0,02188	4,5399
23	23	24	0,21613	0,04758	4,5420
24	24	25	0,46720	0,10295	4,5382
25	25	26	0,19273	0,04247	4,5382
26	26	27	0,10813	0,02379	4,5446
27	3	28	0,00268	0,00445	0,6028
28	28	29	0,03993	0,06505	0,6138
29	29	30	0,24820	0,05466	4,5411
30	30	31	0,04380	0,00965	4,5388
31	31	32	0,21900	0,04825	4,5388
32	32	33	0,52354	0,11713	4,4696
33	33	34	1,06560	0,23489	4,5367
34	34	35	0,91960	0,20269	4,5369
35	3	36	0,00268	0,00445	0,6028
36	36	37	0,03993	0,06505	0,6138
37	37	38	0,06570	0,05112	1,2852
38	38	39	0,01903	0,01472	1,2924
39	39	40	0,00112	0,00087	1,2857
40	40	41	0,45440	0,35393	1,2839
41	41	42	0,19342	0,15066	1,2838

42	42	43	0,02558	0,01988	1,2866
43	43	44	0,00568	0,00478	1,1870
44	44	45	0,06788	0,05715	1,1878
45	45	46	0,00062	0,00046	1,3636
46	4	47	0,00212	0,00345	0,6145
47	47	48	0,05310	0,08668	0,6125
48	48	49	0,18081	0,29495	0,6130
49	49	50	0,05129	0,08369	0,6128
50	8	51	0,05790	0,01967	2,9429
51	51	52	0,20708	0,04634	4,4690
52	9	53	0,10863	0,03685	2,9475
53	53	54	0,12672	0,04301	2,9463
54	54	55	0,17732	0,06019	2,9461
55	55	56	0,17551	0,05961	2,9445
56	56	57	0,99204	0,22199	4,4688
57	57	58	0,48903	0,10939	4,4703
58	58	59	0,18980	0,04189	4,5313
59	59	60	0,24090	0,04875	4,9416
60	60	61	0,31658	0,10752	2,9443
61	61	62	0,06083	0,02059	2,9545
62	62	63	0,09053	0,03066	2,9532
63	63	64	0,44330	0,15053	2,9449
64	64	65	0,64951	0,22054	2,9451
65	11	66	0,12553	0,02541	4,9394
66	66	67	0,00287	0,00058	4,9286
67	12	68	0,46133	0,10166	4,5381
68	68	69	0,00287	0,00067	4,3125

Fonte: o AUTOR.

Tabela 20 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,75 - Sistema Radial.

DADOS DE LINHA			R+jX/1,75		
Trecho	De	Para	R(pu)	X(pu)	Relação R/X
1	1	2	0,00031	0,00039	0,79545
2	2	3	0,00031	0,00039	0,79545
3	3	4	0,00087	0,00125	0,70000
4	4	5	0,01572	0,01045	1,50512
5	5	6	0,22842	0,06646	3,43710
6	6	7	0,23778	0,06920	3,43599
7	7	8	0,05753	0,01676	3,43298
8	8	9	0,03082	0,00898	3,43056
9	9	10	0,51099	0,09651	5,29461
10	10	11	0,11680	0,02207	5,29241
11	11	12	0,44380	0,08382	5,29466
12	12	13	0,64264	0,12122	5,30147
13	13	14	0,65144	0,12297	5,29769
14	14	15	0,66011	0,12464	5,29605
15	15	16	0,12273	0,02321	5,28763
16	16	17	0,23360	0,04410	5,29669
17	17	18	0,00287	0,00057	5,03125
18	18	19	0,20440	0,03861	5,29363
19	19	20	0,13140	0,02481	5,29526
20	20	21	0,21313	0,04022	5,29965
21	21	22	0,00867	0,00164	5,28804
22	22	23	0,09933	0,01875	5,29658
23	23	24	0,21613	0,04079	5,29895
24	24	25	0,46720	0,08824	5,29455
25	25	26	0,19273	0,03640	5,29456
26	26	27	0,10813	0,02039	5,30201
27	3	28	0,00268	0,00381	0,70327
28	28	29	0,03993	0,05576	0,71611
29	29	30	0,24820	0,04685	5,29795
30	30	31	0,04380	0,00827	5,29526
31	31	32	0,21900	0,04136	5,29526
32	32	33	0,52354	0,10040	5,21458
33	33	34	1,06560	0,20133	5,29277
34	34	35	0,91960	0,17374	5,29309
35	3	36	0,00268	0,00381	0,70327
36	36	37	0,03993	0,05576	0,71611
37	37	38	0,06570	0,04382	1,49939
38	38	39	0,01903	0,01262	1,50777
39	39	40	0,00112	0,00075	1,50000
40	40	41	0,45440	0,30337	1,49786

41	41	42	0,19342	0,12913	1,49779
42	42	43	0,02558	0,01704	1,50105
43	43	44	0,00568	0,00410	1,38478
44	44	45	0,06788	0,04899	1,38574
45	45	46	0,00062	0,00039	1,59091
46	4	47	0,00212	0,00296	0,71687
47	47	48	0,05310	0,07430	0,71461
48	48	49	0,18081	0,25281	0,71520
49	49	50	0,05129	0,07173	0,71496
50	8	51	0,05790	0,01686	3,43340
51	51	52	0,20708	0,03972	5,21387
52	9	53	0,10863	0,03159	3,43877
53	53	54	0,12672	0,03687	3,43738
54	54	55	0,17732	0,05159	3,43711
55	55	56	0,17551	0,05109	3,43528
56	56	57	0,99204	0,19028	5,21360
57	57	58	0,48903	0,09377	5,21540
58	58	59	0,18980	0,03590	5,28649
59	59	60	0,24090	0,04179	5,76515
60	60	61	0,31658	0,09216	3,43501
61	61	62	0,06083	0,01765	3,44697
62	62	63	0,09053	0,02628	3,44539
63	63	64	0,44330	0,12903	3,43569
64	64	65	0,64951	0,18903	3,43597
65	11	66	0,12553	0,02178	5,76268
66	66	67	0,00287	0,00050	5,75000
67	12	68	0,46133	0,08714	5,29439
68	68	69	0,00287	0,00057	5,03125

Fonte: o AUTOR.

Tabela 21 - Dados de Linha e relação R/X com X/2,0 - Sistema Radial.

DADOS DE LINHA			R+jX/2		
Trecho	De	Para	R(pu)	X(pu)	Relação R/X
1	1	2	0,00031	0,00034	0,9091
2	2	3	0,00031	0,00034	0,9091
3	3	4	0,00087	0,00109	0,8000
4	4	5	0,01572	0,00914	1,7201
5	5	6	0,22842	0,05815	3,9281
6	6	7	0,23778	0,06055	3,9268
7	7	8	0,05753	0,01466	3,9234
8	8	9	0,03082	0,00786	3,9206
9	9	10	0,51099	0,08445	6,0510
10	10	11	0,11680	0,01931	6,0485
11	11	12	0,44380	0,07334	6,0510
12	12	13	0,64264	0,10607	6,0588
13	13	14	0,65144	0,10760	6,0545
14	14	15	0,66011	0,10906	6,0526
15	15	16	0,12273	0,02031	6,0430
16	16	17	0,23360	0,03859	6,0534
17	17	18	0,00287	0,00050	5,7500
18	18	19	0,20440	0,03379	6,0499
19	19	20	0,13140	0,02171	6,0517
20	20	21	0,21313	0,03519	6,0567
21	21	22	0,00867	0,00144	6,0435
22	22	23	0,09933	0,01641	6,0532
23	23	24	0,21613	0,03569	6,0559
24	24	25	0,46720	0,07721	6,0509
25	25	26	0,19273	0,03185	6,0509
26	26	27	0,10813	0,01784	6,0594
27	3	28	0,00268	0,00334	0,8037
28	28	29	0,03993	0,04879	0,8184
29	29	30	0,24820	0,04099	6,0548
30	30	31	0,04380	0,00724	6,0517
31	31	32	0,21900	0,03619	6,0517
32	32	33	0,52354	0,08785	5,9595
33	33	34	1,06560	0,17617	6,0489
34	34	35	0,91960	0,15202	6,0493
35	3	36	0,00268	0,00334	0,8037
36	36	37	0,03993	0,04879	0,8184
37	37	38	0,06570	0,03834	1,7136
38	38	39	0,01903	0,01104	1,7232
39	39	40	0,00112	0,00066	1,7143
40	40	41	0,45440	0,26545	1,7118
41	41	42	0,19342	0,11299	1,7118

42	42	43	0,02558	0,01491	1,7155
43	43	44	0,00568	0,00359	1,5826
44	44	45	0,06788	0,04286	1,5837
45	45	46	0,00062	0,00034	1,8182
46	4	47	0,00212	0,00259	0,8193
47	47	48	0,05310	0,06501	0,8167
48	48	49	0,18081	0,22121	0,8174
49	49	50	0,05129	0,06277	0,8171
50	8	51	0,05790	0,01476	3,9239
51	51	52	0,20708	0,03475	5,9587
52	9	53	0,10863	0,02764	3,9300
53	53	54	0,12672	0,03226	3,9284
54	54	55	0,17732	0,04514	3,9281
55	55	56	0,17551	0,04470	3,9260
56	56	57	0,99204	0,16649	5,9584
57	57	58	0,48903	0,08205	5,9605
58	58	59	0,18980	0,03141	6,0417
59	59	60	0,24090	0,03656	6,5887
60	60	61	0,31658	0,08064	3,9257
61	61	62	0,06083	0,01544	3,9394
62	62	63	0,09053	0,02299	3,9376
63	63	64	0,44330	0,11290	3,9265
64	64	65	0,64951	0,16540	3,9268
65	11	66	0,12553	0,01906	6,5859
66	66	67	0,00287	0,00044	6,5714
67	12	68	0,46133	0,07624	6,0507
68	68	69	0,00287	0,00050	5,7500

Fonte: o AUTOR.

Tabela 22 - Dados de Linha e relação R/X com X/1 - Sistema Malhado e Malhado-GD.

DADOS DE LINHA			R+jX/1		
Trecho	De	Para	R(pu)	X(pu)	Relação R/X
1	1	2	0,00031	0,00069	0,4545
2	2	3	0,00031	0,00069	0,4545
3	3	4	0,00087	0,00218	0,4000
4	4	5	0,01572	0,01828	0,8601
5	5	6	0,22842	0,11630	1,9641
6	6	7	0,23778	0,12110	1,9634
7	7	8	0,05753	0,02932	1,9617
8	8	9	0,03082	0,01572	1,9603
9	9	10	0,51099	0,16890	3,0255
10	10	11	0,11680	0,03862	3,0242
11	11	12	0,44380	0,14668	3,0255
12	12	13	0,64264	0,21213	3,0294
13	13	14	0,65144	0,21519	3,0273
14	14	15	0,66011	0,21812	3,0263
15	15	16	0,12273	0,04062	3,0215
16	16	17	0,23360	0,07718	3,0267
17	17	18	0,00287	0,00100	2,8750
18	18	19	0,20440	0,06757	3,0249
19	19	20	0,13140	0,04343	3,0259
20	20	21	0,21313	0,07038	3,0284
21	21	22	0,00867	0,00287	3,0217
22	22	23	0,09933	0,03282	3,0266
23	23	24	0,21613	0,07138	3,0280
24	24	25	0,46720	0,15442	3,0255
25	25	26	0,19273	0,06370	3,0255
26	26	27	0,10813	0,03569	3,0297
27	3	28	0,00268	0,00668	0,4019
28	28	29	0,03993	0,09758	0,4092
29	29	30	0,24820	0,08198	3,0274
30	30	31	0,04380	0,01448	3,0259
31	31	32	0,21900	0,07238	3,0259
32	32	33	0,52354	0,17570	2,9798
33	33	34	1,06560	0,35233	3,0244
34	34	35	0,91960	0,30404	3,0246
35	3	36	0,00268	0,00668	0,4019
36	36	37	0,03993	0,09758	0,4092
37	37	38	0,06570	0,07668	0,8568
38	38	39	0,01903	0,02209	0,8616
39	39	40	0,00112	0,00131	0,8571
40	40	41	0,45440	0,53090	0,8559
41	41	42	0,19342	0,22599	0,8559
42	42	43	0,02558	0,02982	0,8577

43	43	44	<i>0,00568</i>	<i>0,00718</i>	<i>0,7913</i>
44	44	45	<i>0,06788</i>	<i>0,08573</i>	<i>0,7918</i>
45	45	46	<i>0,00062</i>	<i>0,00069</i>	<i>0,9091</i>
46	4	47	<i>0,00212</i>	<i>0,00518</i>	<i>0,4096</i>
47	47	48	<i>0,05310</i>	<i>0,13003</i>	<i>0,4083</i>
48	48	49	<i>0,18081</i>	<i>0,44243</i>	<i>0,4087</i>
49	49	50	<i>0,05129</i>	<i>0,12553</i>	<i>0,4085</i>
50	8	51	<i>0,05790</i>	<i>0,02951</i>	<i>1,9619</i>
51	51	52	<i>0,20708</i>	<i>0,06951</i>	<i>2,9794</i>
52	9	53	<i>0,10863</i>	<i>0,05528</i>	<i>1,9650</i>
53	53	54	<i>0,12672</i>	<i>0,06451</i>	<i>1,9642</i>
54	54	55	<i>0,17732</i>	<i>0,09028</i>	<i>1,9641</i>
55	55	56	<i>0,17551</i>	<i>0,08941</i>	<i>1,9630</i>
56	56	57	<i>0,99204</i>	<i>0,33299</i>	<i>2,9792</i>
57	57	58	<i>0,48903</i>	<i>0,16409</i>	<i>2,9802</i>
58	58	59	<i>0,18980</i>	<i>0,06283</i>	<i>3,0209</i>
59	59	60	<i>0,24090</i>	<i>0,07312</i>	<i>3,2944</i>
60	60	61	<i>0,31658</i>	<i>0,16128</i>	<i>1,9629</i>
61	61	62	<i>0,06083</i>	<i>0,03088</i>	<i>1,9697</i>
62	62	63	<i>0,09053</i>	<i>0,04598</i>	<i>1,9688</i>
63	63	64	<i>0,44330</i>	<i>0,22580</i>	<i>1,9632</i>
64	64	65	<i>0,64951</i>	<i>0,33081</i>	<i>1,9634</i>
65	11	66	<i>0,12553</i>	<i>0,03812</i>	<i>3,2930</i>
66	66	67	<i>0,00287</i>	<i>0,00087</i>	<i>3,2857</i>
67	12	68	<i>0,46133</i>	<i>0,15249</i>	<i>3,0254</i>
68	68	69	<i>0,00287</i>	<i>0,00100</i>	<i>2,8750</i>
69	35	47	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>
70	50	67	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>
72	67	20	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>
72	37	51	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>
73	52	43	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>
74	52	65	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>
75	69	53	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>
76	59	46	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>
77	15	68	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>
78	16	27	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>
79	22	25	<i>0,21681</i>	<i>0,10114</i>	<i>2,1437</i>

Fonte: o AUTOR.

Tabela 23 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,25 - Sistema Malhado e Malhado-GD.

DADOS DE LINHA			R+jX/1,25		
Trecho	De	Para	R(pu)	X(pu)	Relação R/X
1	1	2	0,000312	0,0005491	0,5682
2	2	3	0,000312	0,0005491	0,5682
3	3	4	0,0008735	0,001747	0,5000
4	4	5	0,0157229	0,0146248	1,0751
5	5	6	0,228419	0,0930397	2,4551
6	6	7	0,2377779	0,0968831	2,4543
7	7	8	0,0575259	0,0234596	2,4521
8	8	9	0,0308219	0,0125783	2,4504
9	9	10	0,5109948	0,1351173	3,7819
10	10	11	0,1167988	0,0308968	3,7803
11	11	12	0,4437981	0,1173479	3,7819
12	12	13	0,642643	0,1697077	3,7868
13	13	14	0,6514404	0,1721535	3,7841
14	14	15	0,660113	0,1744994	3,7829
15	15	16	0,1227261	0,032494	3,7769
16	16	17	0,2335976	0,0617436	3,7833
17	17	18	0,0028701	0,0007986	3,5938
18	18	19	0,2043979	0,0540569	3,7812
19	19	20	0,1313987	0,0347402	3,7823
20	20	21	0,2131329	0,056303	3,7855
21	21	22	0,0086726	0,002296	3,7772
22	22	23	0,0993289	0,0262548	3,7833
23	23	24	0,2161277	0,0571016	3,7850
24	24	25	0,4671953	0,1235372	3,7818
25	25	26	0,1927305	0,0509622	3,7818
26	26	27	0,1081263	0,0285508	3,7872
27	3	28	0,0026829	0,0053408	0,5023
28	28	29	0,0399312	0,0780655	0,5115
29	29	30	0,2481975	0,065587	3,7842
30	30	31	0,0437996	0,0115801	3,7823
31	31	32	0,2189978	0,0579003	3,7823
32	32	33	0,5235357	0,1405579	3,7247
33	33	34	1,065602	0,2818645	3,7805
34	34	35	0,9196035	0,243231	3,7808
35	3	36	0,0026829	0,0053408	0,5023
36	36	37	0,0399312	0,0780655	0,5115
37	37	38	0,0656993	0,0613443	1,0710
38	38	39	0,0190297	0,0176696	1,0770
39	39	40	0,0011231	0,0010482	1,0714
40	40	41	0,4544048	0,4247184	1,0699

41	41	42	0,1934168	0,1807886	1,0699
42	42	43	0,0255809	0,0238589	1,0722
43	43	44	0,0056777	0,0057401	0,9891
44	44	45	0,0678831	0,0685819	0,9898
45	45	46	0,0006239	0,0005491	1,1364
46	4	47	0,0021213	0,0041429	0,5120
47	47	48	0,053096	0,1040208	0,5104
48	48	49	0,1808135	0,3539403	0,5109
49	49	50	0,0512867	0,100427	0,5107
50	8	51	0,0579003	0,0236093	2,4524
51	51	52	0,2070808	0,0556042	3,7242
52	9	53	0,1086254	0,0442238	2,4563
53	53	54	0,1267192	0,0516111	2,4553
54	54	55	0,1773196	0,0722256	2,4551
55	55	56	0,1755102	0,0715268	2,4538
56	56	57	0,9920412	0,2663911	3,7240
57	57	58	0,4890326	0,1312739	3,7253
58	58	59	0,1897981	0,0502634	3,7761
59	59	60	0,2408976	0,0584992	4,1180
60	60	61	0,3165797	0,1290277	2,4536
61	61	62	0,0608327	0,0247074	2,4621
62	62	63	0,0905316	0,0367866	2,4610
63	63	64	0,4432989	0,1806388	2,4541
64	64	65	0,6495062	0,2646442	2,4543
65	11	66	0,1255338	0,0304975	4,1162
66	66	67	0,0028701	0,0006988	4,1071
67	12	68	0,4613304	0,1219899	3,7817
68	68	69	0,0028701	0,0007986	3,5938
69	35	47	0,216814	0,0809106	2,6797
70	50	67	0,216814	0,0809106	2,6797
72	67	20	0,216814	0,0809106	2,6797
72	37	51	0,216814	0,0809106	2,6797
73	52	43	0,216814	0,0809106	2,6797
74	52	65	0,216814	0,0809106	2,6797
75	69	53	0,216814	0,0809106	2,6797
76	59	46	0,216814	0,0809106	2,6797
77	15	68	0,216814	0,0809106	2,6797
78	16	27	0,216814	0,0809106	2,6797
79	22	25	0,216814	0,0809106	2,6797

Fonte: o AUTOR.

Tabela 24 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,50 - Sistema Malhado e Malhado-GD.

DADOS DE LINHA			R+jX/1,50		
Trecho	De	Para	R(pu)	X(pu)	Relação R/X
1	1	2	0,00031	0,00046	0,68182
2	2	3	0,00031	0,00046	0,68182
3	3	4	0,00087	0,00146	0,60000
4	4	5	0,01572	0,01219	1,29010
5	5	6	0,22842	0,07753	2,94608
6	6	7	0,23778	0,08074	2,94513
7	7	8	0,05753	0,01955	2,94255
8	8	9	0,03082	0,01048	2,94048
9	9	10	0,51099	0,11260	4,53823
10	10	11	0,11680	0,02575	4,53635
11	11	12	0,44380	0,09779	4,53828
12	12	13	0,64264	0,14142	4,54412
13	13	14	0,65144	0,14346	4,54088
14	14	15	0,66011	0,14542	4,53947
15	15	16	0,12273	0,02708	4,53226
16	16	17	0,23360	0,05145	4,54002
17	17	18	0,00287	0,00067	4,31250
18	18	19	0,20440	0,04505	4,53740
19	19	20	0,13140	0,02895	4,53879
20	20	21	0,21313	0,04692	4,54255
21	21	22	0,00867	0,00191	4,53261
22	22	23	0,09933	0,02188	4,53992
23	23	24	0,21613	0,04758	4,54196
24	24	25	0,46720	0,10295	4,53818
25	25	26	0,19273	0,04247	4,53820
26	26	27	0,10813	0,02379	4,54458
27	3	28	0,00268	0,00445	0,60280
28	28	29	0,03993	0,06505	0,61381
29	29	30	0,24820	0,05466	4,54110
30	30	31	0,04380	0,00965	4,53879
31	31	32	0,21900	0,04825	4,53879
32	32	33	0,52354	0,11713	4,46964
33	33	34	1,06560	0,23489	4,53666
34	34	35	0,91960	0,20269	4,53694
35	3	36	0,00268	0,00445	0,60280
36	36	37	0,03993	0,06505	0,61381
37	37	38	0,06570	0,05112	1,28519
38	38	39	0,01903	0,01472	1,29237
39	39	40	0,00112	0,00087	1,28571
40	40	41	0,45440	0,35393	1,28388
41	41	42	0,19342	0,15066	1,28382
42	42	43	0,02558	0,01988	1,28661

43	43	44	0,00568	0,00478	1,18696
44	44	45	0,06788	0,05715	1,18777
45	45	46	0,00062	0,00046	1,36364
46	4	47	0,00212	0,00345	0,61446
47	47	48	0,05310	0,08668	0,61252
48	48	49	0,18081	0,29495	0,61303
49	49	50	0,05129	0,08369	0,61282
50	8	51	0,05790	0,01967	2,94292
51	51	52	0,20708	0,04634	4,46903
52	9	53	0,10863	0,03685	2,94752
53	53	54	0,12672	0,04301	2,94632
54	54	55	0,17732	0,06019	2,94610
55	55	56	0,17551	0,05961	2,94452
56	56	57	0,99204	0,22199	4,46880
57	57	58	0,48903	0,10939	4,47034
58	58	59	0,18980	0,04189	4,53128
59	59	60	0,24090	0,04875	4,94155
60	60	61	0,31658	0,10752	2,94429
61	61	62	0,06083	0,02059	2,95455
62	62	63	0,09053	0,03066	2,95319
63	63	64	0,44330	0,15053	2,94487
64	64	65	0,64951	0,22054	2,94512
65	11	66	0,12553	0,02541	4,93944
66	66	67	0,00287	0,00058	4,92857
67	12	68	0,46133	0,10166	4,53805
68	68	69	0,00287	0,00067	4,31250
69	35	47	0,21681	0,06743	3,21561
70	50	67	0,21681	0,06743	3,21561
72	67	20	0,21681	0,06743	3,21561
72	37	51	0,21681	0,06743	3,21561
73	52	43	0,21681	0,06743	3,21561
74	52	65	0,21681	0,06743	3,21561
75	69	53	0,21681	0,06743	3,21561
76	59	46	0,21681	0,06743	3,21561
77	15	68	0,21681	0,06743	3,21561
78	16	27	0,21681	0,06743	3,21561
79	22	25	0,21681	0,06743	3,21561

Fonte: o AUTOR.

Tabela 25 - Dados de Linha e relação R/X com X/1,75 - Sistema Malhado e Malhado-GD.

DADOS DE LINHA			R+jX/1,75		
Trecho	De	Para	R(pu)	X(pu)	Relação R/X
1	1	2	0,00031	0,00039	0,7955
2	2	3	0,00031	0,00039	0,7955
3	3	4	0,00087	0,00125	0,7000
4	4	5	0,01572	0,01045	1,5051
5	5	6	0,22842	0,06646	3,4371
6	6	7	0,23778	0,06920	3,4360
7	7	8	0,05753	0,01676	3,4330
8	8	9	0,03082	0,00898	3,4306
9	9	10	0,51099	0,09651	5,2946
10	10	11	0,11680	0,02207	5,2924
11	11	12	0,44380	0,08382	5,2947
12	12	13	0,64264	0,12122	5,3015
13	13	14	0,65144	0,12297	5,2977
14	14	15	0,66011	0,12464	5,2961
15	15	16	0,12273	0,02321	5,2876
16	16	17	0,23360	0,04410	5,2967
17	17	18	0,00287	0,00057	5,0313
18	18	19	0,20440	0,03861	5,2936
19	19	20	0,13140	0,02481	5,2953
20	20	21	0,21313	0,04022	5,2996
21	21	22	0,00867	0,00164	5,2880
22	22	23	0,09933	0,01875	5,2966
23	23	24	0,21613	0,04079	5,2990
24	24	25	0,46720	0,08824	5,2945
25	25	26	0,19273	0,03640	5,2946
26	26	27	0,10813	0,02039	5,3020
27	3	28	0,00268	0,00381	0,7033
28	28	29	0,03993	0,05576	0,7161
29	29	30	0,24820	0,04685	5,2979
30	30	31	0,04380	0,00827	5,2953
31	31	32	0,21900	0,04136	5,2953
32	32	33	0,52354	0,10040	5,2146
33	33	34	1,06560	0,20133	5,2928
34	34	35	0,91960	0,17374	5,2931
35	3	36	0,00268	0,00381	0,7033
36	36	37	0,03993	0,05576	0,7161
37	37	38	0,06570	0,04382	1,4994
38	38	39	0,01903	0,01262	1,5078
39	39	40	0,00112	0,00075	1,5000
40	40	41	0,45440	0,30337	1,4979
41	41	42	0,19342	0,12913	1,4978

42	42	43	0,02558	0,01704	1,5010
43	43	44	0,00568	0,00410	1,3848
44	44	45	0,06788	0,04899	1,3857
45	45	46	0,00062	0,00039	1,5909
46	4	47	0,00212	0,00296	0,7169
47	47	48	0,05310	0,07430	0,7146
48	48	49	0,18081	0,25281	0,7152
49	49	50	0,05129	0,07173	0,7150
50	8	51	0,05790	0,01686	3,4334
51	51	52	0,20708	0,03972	5,2139
52	9	53	0,10863	0,03159	3,4388
53	53	54	0,12672	0,03687	3,4374
54	54	55	0,17732	0,05159	3,4371
55	55	56	0,17551	0,05109	3,4353
56	56	57	0,99204	0,19028	5,2136
57	57	58	0,48903	0,09377	5,2154
58	58	59	0,18980	0,03590	5,2865
59	59	60	0,24090	0,04179	5,7651
60	60	61	0,31658	0,09216	3,4350
61	61	62	0,06083	0,01765	3,4470
62	62	63	0,09053	0,02628	3,4454
63	63	64	0,44330	0,12903	3,4357
64	64	65	0,64951	0,18903	3,4360
65	11	66	0,12553	0,02178	5,7627
66	66	67	0,00287	0,00050	5,7500
67	12	68	0,46133	0,08714	5,2944
68	68	69	0,00287	0,00057	5,0313
69	35	47	0,21681	0,05779	3,7515
70	50	67	0,21681	0,05779	3,7515
72	67	20	0,21681	0,05779	3,7515
72	37	51	0,21681	0,05779	3,7515
73	52	43	0,21681	0,05779	3,7515
74	52	65	0,21681	0,05779	3,7515
75	69	53	0,21681	0,05779	3,7515
76	59	46	0,21681	0,05779	3,7515
77	15	68	0,21681	0,05779	3,7515
78	16	27	0,21681	0,05779	3,7515
79	22	25	0,21681	0,05779	3,7515

Fonte: o AUTOR.

Tabela 26 - Dados de Linha e relação R/X com X/2,00 - Sistema Malhado e Malhado-GD.

DADOS DE LINHA			R+jX/2		
Trecho	De	Para	R(pu)	X(pu)	Relação R/X
1	1	2	0,00031	0,00034	0,9091
2	2	3	0,00031	0,00034	0,9091
3	3	4	0,00087	0,00109	0,8000
4	4	5	0,01572	0,00914	1,7201
5	5	6	0,22842	0,05815	3,9281
6	6	7	0,23778	0,06055	3,9268
7	7	8	0,05753	0,01466	3,9234
8	8	9	0,03082	0,00786	3,9206
9	9	10	0,51099	0,08445	6,0510
10	10	11	0,11680	0,01931	6,0485
11	11	12	0,44380	0,07334	6,0510
12	12	13	0,64264	0,10607	6,0588
13	13	14	0,65144	0,10760	6,0545
14	14	15	0,66011	0,10906	6,0526
15	15	16	0,12273	0,02031	6,0430
16	16	17	0,23360	0,03859	6,0534
17	17	18	0,00287	0,00050	5,7500
18	18	19	0,20440	0,03379	6,0499
19	19	20	0,13140	0,02171	6,0517
20	20	21	0,21313	0,03519	6,0567
21	21	22	0,00867	0,00144	6,0435
22	22	23	0,09933	0,01641	6,0532
23	23	24	0,21613	0,03569	6,0559
24	24	25	0,46720	0,07721	6,0509
25	25	26	0,19273	0,03185	6,0509
26	26	27	0,10813	0,01784	6,0594
27	3	28	0,00268	0,00334	0,8037
28	28	29	0,03993	0,04879	0,8184
29	29	30	0,24820	0,04099	6,0548
30	30	31	0,04380	0,00724	6,0517
31	31	32	0,21900	0,03619	6,0517
32	32	33	0,52354	0,08785	5,9595
33	33	34	1,06560	0,17617	6,0489
34	34	35	0,91960	0,15202	6,0493
35	3	36	0,00268	0,00334	0,8037
36	36	37	0,03993	0,04879	0,8184
37	37	38	0,06570	0,03834	1,7136
38	38	39	0,01903	0,01104	1,7232
39	39	40	0,00112	0,00066	1,7143
40	40	41	0,45440	0,26545	1,7118
41	41	42	0,19342	0,11299	1,7118
42	42	43	0,02558	0,01491	1,7155

43	43	44	0,00568	0,00359	1,5826
44	44	45	0,06788	0,04286	1,5837
45	45	46	0,00062	0,00034	1,8182
46	4	47	0,00212	0,00259	0,8193
47	47	48	0,05310	0,06501	0,8167
48	48	49	0,18081	0,22121	0,8174
49	49	50	0,05129	0,06277	0,8171
50	8	51	0,05790	0,01476	3,9239
51	51	52	0,20708	0,03475	5,9587
52	9	53	0,10863	0,02764	3,9300
53	53	54	0,12672	0,03226	3,9284
54	54	55	0,17732	0,04514	3,9281
55	55	56	0,17551	0,04470	3,9260
56	56	57	0,99204	0,16649	5,9584
57	57	58	0,48903	0,08205	5,9605
58	58	59	0,18980	0,03141	6,0417
59	59	60	0,24090	0,03656	6,5887
60	60	61	0,31658	0,08064	3,9257
61	61	62	0,06083	0,01544	3,9394
62	62	63	0,09053	0,02299	3,9376
63	63	64	0,44330	0,11290	3,9265
64	64	65	0,64951	0,16540	3,9268
65	11	66	0,12553	0,01906	6,5859
66	66	67	0,00287	0,00044	6,5714
67	12	68	0,46133	0,07624	6,0507
68	68	69	0,00287	0,00050	5,7500
69	35	47	0,21681	0,05057	4,2875
70	50	67	0,21681	0,05057	4,2875
72	67	20	0,21681	0,05057	4,2875
72	37	51	0,21681	0,05057	4,2875
73	52	43	0,21681	0,05057	4,2875
74	52	65	0,21681	0,05057	4,2875
75	69	53	0,21681	0,05057	4,2875
76	59	46	0,21681	0,05057	4,2875
77	15	68	0,21681	0,05057	4,2875
78	16	27	0,21681	0,05057	4,2875
79	22	25	0,21681	0,05057	4,2875

Fonte: o AUTOR.