



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ANDRÉIA BISPO DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DO PERFIL DE TENSÃO EM REDE DE  
DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Campina Grande, Paraíba  
Setembro de 2014

ANDRÉIA BISPO DO NASCIMENTO

ANÁLISE DO PERFIL DE TENSÃO EM REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Distribuição de Energia Elétrica

Orientador:

Professor Edmar Candeia Gurjão, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Setembro de 2014

ANDRÉIA BISPO DO NASCIMENTO

# ANÁLISE DO PERFIL DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade  
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Distribuição de Energia Elétrica

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Edmar Candeia Gurjão, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais que foram os idealizadores deste sonho, e me proporcionaram, com muito esforço, todos os meios para então conquistá-lo.

## AGRADECIMENTOS

Decida a obter uma formação superior e tendo a consciência madura de quais seriam os passos que deveria seguir para conquistar esta meta de vida, eu precisei me dedicar com mais esforço e afinco aos meus estudos durante estes últimos cinco anos de universidade como também os três anos de ensino médio.

Em contrapartida, meus pais sonharam por este dia e lutaram por mais de vinte quatro anos para que pudessem me proporcionar a conquista de um diploma de engenharia e uma base sólida para um bom futuro. Não mediram esforços, todas as dificuldades foram vencidas com muita fé em Deus, sempre priorizando a educação em detrimento a qualquer outro luxo ou regalia, vencendo todo sacrifício e fazendo renúncias, sem desanimar, desistir e principalmente sem deixar o amor entre nossa família se abalar.

Desta forma, o meu maior agradecimento é dedicado a eles, Elisdete Vieira Bispo e José Bartolomeu do Nascimento, meus exemplos de vida, minhas inspirações e meu modelo de heróis.

Quero, também, agradecer a cada professor que tive, desde o início da minha formação, pois foram eles que me ajudaram a construir passo a passo o conhecimento que tenho e foram, além de tudo, os meus formadores de opinião e personalidade. Como também, oferecer graças a todos os meus familiares, em especial, André Felipe, Eliane Bispo, João Gomes, Adriana e Adriele Bispo.

*“Só há dúvidas quando temos escolhas e não certezas.”*

André Felipe de Oliveira Silva.



# SUMÁRIO

Resumo .....	ix
Abstract .....	x
Lista de Ilustrações .....	xi
Lista de Tabelas .....	xii
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	xiii
1 Introdução .....	1
2 Geração Distribuída .....	4
2.1 Definição .....	4
2.2 Evolução Histórica da GD .....	5
2.3 Vantagens da GD .....	6
2.4 Desvantagens .....	7
3 Método da Compensação Reativa .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.1 Variação de tensão em uma rede de distribuição convencional ..	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.2 Variação de Tensão em Rede de Distribuição com Geração Distribuída...	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4 Método Backward/Forward Sweep (BFS).....	8
4.1 Cálculo da corrente de carga.....	9
4.2 Backward Sweep.....	10
4.3 Forward Sweep .....	10
4.4 Cálculo das Perdas do Sistema.....	11
4.5 Algoritmo de Solução Backward/Forward Sweep .....	12
5 Estudo de Caso .....	13
5.1 Etapa 1 -Sistema de 4 Barras .....	13
5.2 Etapa 2 – Inserção de Geração distribuída .....	14
5.3 Etapa 3 – Aplicar Método de Compensação Reativa ao sistema de 4 Barras ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.4 Etapa 4 – Método da Compensação Reativa com Geração Distribuída .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
6 Conclusão .....	16
Bibliografia.....	17
APÊNDICE .....	18



## RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade estudar a variação de tensão em um sistema de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão de uma rede comum de energia, devido ao fato que há possibilidade de mudanças no sistema de distribuição e pelo simples fato que o nível de tensão é um dos principais fatores a serem regularmente analisados. A atual mudança consiste no fato que o usuário além de ser consumidor se torna, também, um fornecedor de energia, utilizando as mais variadas formas de conversão de energia em energia elétrica. Ou seja, este trabalho estuda o comportamento da variação de tensão em um sistema sem e com a inserção da Geração Distribuída. Para tal análise, verifica se o método backward/forward pode ser aplicado para ambos cenários com ou sem DG. Além disso, expõe uma breve introdução sobre geração distribuída, define os métodos, os relaciona e avalia seus resultados quando aplicados em um exemplo prático.

**Palavras-chave:** Geração Distribuída, Método Backward/Forward.

## ABSTRACT

The purpose of this paper is just study the drop voltage of distribution networks for medium and lower voltage levels. And analyses it for two cases, the first one when the distribution network is a passive circuit supplying loads and when it is also an active system with power flows and voltage determined by the generation as well as load. So, this work will apply the backward/forward method both scenario and show the results that will be obtained from a practical example.

**Keywords:** Distributed Generation, Backward/Forward Method.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: Ramo de um Sistema de Distribuição.....	9
Figura 4.1: Sistema de 4 Barras .....	13

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Método Backward/Forward para Sistema de 4 Barras.....	14
Tabela 4.2: Método Backward/Forward para Sistema de 4 Barras com DG.....	15

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INEE – Instituto Nacional de Energia Elétrica.

GD – Geração Distribuída.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

$\Delta V$  – Queda de tensão.

$V_k$  – Tensão na barra k.

$V_m$  – Tensão na barra m.

$I_k$  – Corrente na barra k.

$S_k$  – Potência aparente na barra k.

$F_m$  – Conjunto de barras alimentadas pela barra m.

$P_{km}$  – Potência ativa no ramo k-m.

$Q_{km}$  – Potência reativa no ramo k-m.



# 1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro e mundial recentemente tem sido alvo de grandes mudanças, seja por sua modernização, proveniente do uso de novas tecnologias, da sua automatização, substituição de equipamentos obsoletos, pela busca por maior eficiência energética, assim como pela incessante procura por novas fontes energéticas limpas e renováveis que viessem substituir o consumo de petróleo. Será que o aumento do consumo de energia foi o principal motivador para tais transformações?

De acordo com o *Balanço Energético Nacional 2013*, o consumo de energia elétrica entre os anos de 2012 e 2013 tem apresentado significativo aumento de 12,7%. O consumo residencial, por exemplo, apresentou crescimento de 2,1%, o setor industrial registrou uma ligeira alta de 0,3%, já os demais setores, público, agropecuário, comercial e transporte em comparação com o ano anterior apresentou variação positiva de 6,9%.

Estes resultados podem ser aliados com os índices de crescimento populacional divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE dos últimos anos. Assim, pode-se observar que a partir do momento em que há um número maior de habitantes, há uma maior demanda por alimento, transporte, educação, saúde, o consumo de bens e serviços, as indústrias são forçadas a aumentar a produção, entre outros. Todavia, para que haja esse desenvolvimento é de fundamental importância que haja gasto de energia, principalmente energia elétrica, comprovado pelos índices acima citados.

E a partir do momento em que o consumo de energia elétrica se intensifica é preciso avaliar as nossas matrizes energéticas e verificar se elas são capazes de suprir esta demanda, caso contrário, surge a necessidade de ampliação. Logo, para se aumentar a geração de energia elétrica de um país é preciso fazer o uso de duas alternativas, em primeiro lugar repotencializar as fontes já existentes, caminho este que requer muitas das mudanças a cima, demandando gastos exorbitantes, ou então construir novas usinas de conversão de energia em energia elétrica.

Atualmente, nos projetos de engenharia que envolvem a construção de novas unidades de geração de energia elétrica, o principal critério que deve ser analisado é a

questão ambiental. Ou seja, é preciso construir projetos que agridam o mínimo possível o meio ambiente. Foi, portanto, este pensamento que motivou o aumento por estudos e desenvolvimento de pesquisas científicas que descobrissem novas fontes de energia elétrica, além da hidráulica, derivadas da lenha e carvão vegetal ou do petróleo, e que tivessem uma geração de potência significativa em comparação com as já existentes.

Foi a partir de então que se deu, não o surgimento, mas sim a intensificação, desenvolvimento e modernização de usinas de energia que tivessem como fonte principal a energia eólica, solar, nuclear e de biocombustíveis.

Posteriormente, observou-se também que essa produção de energia não precisava ser produzida em larga escala. Qualquer indivíduo poderia possuir em sua residência, por exemplo, um sistema de conversão de energia, tal como placas solares, e então satisfazer o seu consumo pessoal. Em consequência, levantou-se a possibilidade de esse mesmo indivíduo decidir vender, comercializar ou disponibilizar, para outro usuário que necessitasse, a energia remanescente.

Para sanar este problema, surge então a necessidade de uma completa mudança no sistema elétrico, dá-se início a uma nova era, a era da Geração Distribuída – GD. A rede elétrica não mais se comportará de forma ativa, isto é, apenas fornecendo potência as cargas. Agora faz-se necessidade de mudar o sistema para que ele possa ser capaz de atuar nos casos em que seja preciso fornecer ou receber energia de pontos que ora podem ser cargas, ora podem ser fontes de geração.

Desta forma, a interconexão de GDs ao sistema elétrico de distribuição solicitará das concessionárias de energia, o desenvolvimento de novas tecnologias, medidores, sistemas de proteção, sincronismo entre fontes geradoras, o surgimento de leis, normas e regulamentos, interfaces de comunicação entre pontos de geração, carga e equipamentos, uma contínua análise do comportamento do sistema, entre outros.

No caso em que se deseja analisar o comportamento de um sistema elétrico é preciso levantar basicamente os seguintes estudos técnicos: fluxo de potência, curto circuito e proteção da rede.

Pensando neste novo cenário em que a rede de distribuição de energia irá atuar e nos estudos técnicos que serão primordiais para a aplicação da GD, decidiu-se desenvolver este trabalho para estudar um dos tópicos essenciais para o sistema elétrico que é a atuação da variação de tensão quando houver interconexão.

Antes de mostrar matematicamente como será o estudo do comportamento da tensão, faz-se necessário uma breve discussão e abordagem sobre o que é geração



distribuída, uma retrospectiva história para justificar a sua existência. Serão levantados também, questões que tornam a aplicação da Geração Distribuída Vantajosa, como também pontos que são caracterizados como desvantagens. Após esta breve ambientação sobre o tema, será exposto o Método Backwar/Forward e sua fundamentação matemática, o que permite, então fazer em seguida um estudo de um exemplo prático, no caso para um sistema de distribuição com apenas quatro barras, e analisar o que ocorre sem DG e com DG. Por fim, será exposto as conclusões dos resultados obtidos.

## 2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

### 2.1 DEFINIÇÃO

“Em geral se considera como ‘geração distribuída’ qualquer fonte geradora com produção destinada, em sua maior parte, a cargas locais ou próximas, alimentadas sem necessidade de transporte da energia através da rede de transmissão.[..]” (INEE, 2011).

A geração distribuída não é mais que a produção de energia com geradores elétricos situados junto ou nas proximidades do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia. Estes deverão produzir potências relativamente baixas, tipicamente na ordem dos 15 kW a 10 MW, para a alimentação de cargas locais. O conceito envolve os equipamentos de controle, sistemas que articulam o funcionamento dos geradores e o eventual controle de cargas, para uma adaptação à oferta.

A geração distribuída é, pois, uma solução alternativa à geração centralizada de energia, que as companhias do setor energético devem ter em consideração para poderem chegar a boas soluções para os problemas de produção e fornecimento de energia.

A produção de energia elétrica, em grandes quantidades para satisfazer as várias necessidades do consumo, tem sido obtida tradicionalmente com recurso a centros eletroprodutores de dimensões consideráveis:

- i. Centrais térmicas de turbina a vapor;
- ii. Centrais de turbina a gás;
- iii. Motores de combustão interna;
- iv. Centrais hidroelétricas;
- v. Centrais nucleares.

Em contraposição às centrais convencionais e como meios complementares e alternativos de produção de energia elétrica, aparecem novos tipos de centrais cujo desenvolvimento e estudo têm merecido o maior interesse, em vista da atual e futura situação das reservas energéticas dos combustíveis para as centrais convencionais, bem como de preocupações relativas à poluição do ambiente.

Estas formas de produção de energia de menor dimensão são englobadas no conceito de geração distribuída que pode incluir várias formas de produção de energia elétrica, quer sejam de fontes renováveis ou não. Destas destacam-se nomeadamente:

- i. Microturbinas a gás;
- ii. Pilhas de células de combustível;
- iii. Grupo gerador Diesel;
- iv. Co-geração;
- v. Minihídricas;
- vi. Centrais de Biomassa;
- vii. Foto-voltaicas;
- viii. Eólicas

## 2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA GD

A produção de energia elétrica no local de consumo, pela falta de redes de transporte e tecnologia, quer fosse destinada à indústria, ao comércio, às residências ou à agricultura, foi a prática na primeira metade do século XX.

Com as melhorias técnicas nos transformadores e nas linhas de transporte de energia, com tensões cada vez maiores, passou a ser possível transportar mais potência, o que também proporcionou o desenvolvimento de geradores com uma capacidade de produção de energia cada vez mais elevada, o que fez com que o rendimento dos processos de produção de energia fossem melhorados.

A produção de energia centralizada a partir das grandes centrais produtoras passa a ser a prática dominante face à GD, permitindo grandes economias de escala.

Este tipo de produção assenta em investimentos grandes, com instalações de enormes dimensões, indivisíveis e com pouca flexibilidade, que logicamente irá interferir com o modelo de exploração do sector elétrico, que, em muitos países opera com o regime de monopólio resultante da necessidade de expandir a rede elétrica ao maior número de clientes possível. Neste tipo de ambiente não liberalizado interessa que a produção centralizada se mantenha, sob o pretexto das economias de escala, sendo a geração distribuída confinada a situações onde o consumidor está isolado da rede.

Mas, este panorama tem vindo a ser mudado devido às crises petrolíferas que começaram nos anos 70, ajudando fortemente ao aparecimento da co-geração e, mais timidamente, de outras formas de produção de energia local e consequentemente distribuída.

Nos anos 90, passou a existir competição no serviço de energia elétrica estimulando todos os participantes a apresentarem custos competitivos. Como resultado da transformação deste mercado, passam a ser produzidos novos equipamentos, sendo aumentada a atratividade em geração distribuída.

Por vezes, a introdução desta produção, em boa parte dos países, é bastante lenta, pois a transformação do mercado dá-se a taxas reduzidas, por um lado, e, por outro, porque a produção centralizada exigiu fortes investimentos e estes têm de ser pagos, o que dificulta a liberalização do sector, logo a competição.

## 2.3 VANTAGENS DA GD

A proximidade do local de consumo ao de produção vai fazer com que a geração distribuída tenha algumas vantagens, trazendo benefícios para os consumidores ou para as empresas. Pode-se destacar:

- i. Diminuição das perdas na rede de transmissão e distribuição, logo redução dos custos, bem como menor investimento para reforçar o sistema e as estruturas da rede;
- ii. Redução de investimentos financeiros para a implantação de novas unidades geradoras, para satisfazer a demanda por energia elétrica;
- iii. Diminuição dos riscos de planejamento, de projeto e riscos ambientais, devido o menor tamanho das unidades de produção de energia e flexibilidade de soluções;
- iv. A existência de reserva (de geração) distribuída permite um aumento da estabilidade do sistema elétrico como um todo;
- v. Aumento da qualidade e confiabilidade do serviço aos consumidores próximo à produção local, por provir de fontes não sujeitas a falhas na transmissão e distribuição. A garantia da continuidade do serviço é um fator determinante para vários setores industriais e empresas de serviço da

nossa economia, e, essencialmente, onde a interrupção de serviço é economicamente inaceitável, ou em sistemas onde possa colocar em risco, quer a segurança humana quer a área envolvente.

- vi. A geração distribuída têm um tempo de implantação menor, comparativamente à geração centralizada, e reforços das respectivas redes, logo permite uma resposta mais rápida ao crescimento da procura.
- vii. As necessidades energéticas particulares dos clientes podem ser satisfeitas de forma personalizada.
- viii. Com o recurso a políticas de gestão adequadas, permite efetuar poupanças nas faturas energética, com a produção de energia durante os picos de consumo e ou nas horas de ponta, tornando mais rápida a amortização dos investimentos.
- ix. Permite que a energia elétrica seja disponibilizada em áreas sensíveis, do ponto de vista ambiental, com recurso a técnicas que permitem uma elevada eficiência e reduzida emissão de poluentes.
- x. A energia elétrica pode ser disponibilizada em locais remotos sem infraestruturas de transmissão e distribuição, onde é bastante cara a instalação.
- xi. Existe uma oportunidade para os potenciais concorrentes de entrada no mercado da energia, com um custo relativamente baixo.
- xii. A diminuição dos impactos ambientais da produção de energia elétrica.
- xiii. Aumento da eficiência energética.

## 2.4 DESVANTAGENS

As desvantagens da geração distribuída devem ser levadas em consideração, e tem, principalmente, como causas o aumento do número de entidades envolvidas e a separação das funções de distribuição e comercial.

Assim pode se considerar as seguintes desvantagens:

- i. O planeamento e a operação do sistema elétrico ficam mais complexos.
- ii. Vai existir um aumento da complexidade administrativa, comercial e contratual.

- iii. Aumento da complexidade nos procedimentos, na realização de manutenções e nas medidas de segurança a serem tomadas.
- iv. As entidades responsáveis pelas redes de transporte e distribuição necessitam se equipar com ferramentas de análise para avaliação do impacto das fontes de geração distribuída, ligadas à rede, quer sob o ponto de vista de confiabilidade de fornecimento, quer estabilidade de operação e qualidade de tensão.
- v. Necessidade de controle conjunto da operação de concessionárias e produtores independentes.
- vi. Propagação de falhas e perturbações, podendo acarretar o desligamento da linha.
- vii. Falhas de comunicação devido à descentralização de comandos e decisões;

### 3 MÉTODO BACKWARD/FORWARD SWEEP (BFS)

Nesta seção serão apresentados os aspectos teóricos relacionados ao algoritmo de fluxo de carga para redes de distribuição Backward/Forward Sweep.

O algoritmo geral do método BFS consiste em dois passos básicos, a varredura – backward – onde são calculadas as correntes ou fluxos de potência com as possíveis atualizações das tensões e a varredura – forward – que realiza os cálculos das quedas de tensão com as atualizações das correntes ou fluxos de potência. Esses passos são repetidos até que se obtenha a convergência do algoritmo.

O processo de resolução inicia determinando o valor da tensão em todas as barras da rede de distribuição, normalmente estes valores são na primeira iteração iguais a tensão da barra de referência, ou seja, mesma tensão do alimentador. Após a tensão definida calculam-se as correntes de carga das barras.

Partindo das últimas barras de cada ramo, é realizado o somatório das correntes das cargas (processo backward), até a chegada na barra da subestação, encontrando a corrente total da rede de distribuição.

Então, usando os valores das correntes dos ramos e partindo da subestação calculam-se os novos valores das tensões em todas as barras do sistema (processo

forward). Utilizando estes valores de tensão atualizado, cada barra com a sua tensão, dá-se início a próxima iteração recalculando as novas correntes do sistema, novas potência e novas tensões.

Esse processo se repete até que a convergência seja atingida ou algum critério de parada seja satisfeito, como por exemplo, um determinado número de iterações.

Neste trabalho iremos definir como critério de parada o fato que a diferença entre a soma das potência de todas as barras na iteração atual com a soma na iteração anterior seja menor que um valor de tolerância admitido.

### 3.1 CÁLCULO DA CORRENTE DE CARGA

A figura 3.1 apresenta duas barras de um sistema de distribuição radial. Assim, a carga da barra k é representada por  $S_k = P_k + jQ_k$  e a tensão fasorial da barra é dada por  $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$ . Portanto, a corrente da carga será:

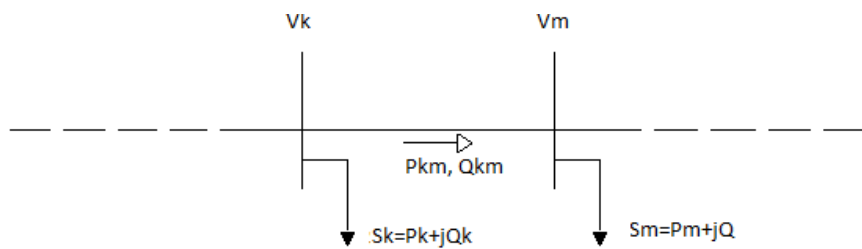


Figura 3.1: Ramo de um Sistema de Distribuição.

$$I_k = \frac{S_k^*}{V_k} \quad (1)$$

$V_k$  é o valor de tensão na barra k. Na primeira iteração considera-se que todas as barras tenham nível de tensão igual ao nível de tensão do alimentador, pois ele é a referência do sistema.

Fazendo  $I_k = I_{kr} + jI_{ki}$ , e igualando com a relação anterior podemos separar as componentes real e imaginária da corrente da carga, ou seja:

$$I_{kr} = R I_k \quad (2)$$

$$I_{ki} = I I_k$$

### 3.2 BACKWARD SWEEP

O processo Backward Sweep consiste na somatória das correntes das cargas para se determinar as correntes dos ramos. Então começando nas últimas barras de cada ramo e deslocando em direção da subestação, pode-se calcular a corrente em cada ramo  $I_{km}$  da seguinte forma:

$$I_{km} = I_m + \sum_{j \in F_m} I_{mj} \quad (3)$$

Onde,  $F_m$  é o conjunto das barras alimentadas pela barra  $m$ .

A corrente  $I_{km}$  pode ser separada na parte real e imaginária, da seguinte forma:

$$I_{km_r} = R I_{km} \quad (4)$$

$$I_{km_i} = I I_{km}$$

Desta forma, após obter os valores de corrente em cada ramo. Com os valores de corrente, é possível calcular os novos valores de tensão em cada barra, usando a equação (1).

### 3.3 FORWARD SWEEP

Partindo da subestação em direção as últimas barras de cada ramo, são calculadas as tensões das barras, da seguinte forma:



$$V_m = V_k - V_{km} \cdot I_m \quad (5)$$

Onde:

$$Z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (6)$$

Que pode ser separada na parte real e imaginária da seguinte forma:

$$V_{kmr} = R V_{km} \quad (7)$$

$$V_{kmi} = I V_{km}$$

Da relação anterior, pode-se deduzir facilmente:

$$V_{mr} = V_{kr} - r_{km} \cdot I_{kmr} + x_{km} \cdot I_{kmi} \quad (8)$$

$$V_{mi} = V_{ki} - r_{km} \cdot I_{kmi} - x_{km} \cdot I_{kmr}$$

### 3.4 CÁLCULO DAS PERDAS DO SISTEMA

O critério de parada utilizado será a diferença das perdas ativa entre duas iterações consecutivas. Para calcular as perdas ativas e reativas de um determinado ramo do sistema temos que:

$$S_{km_p} = P_{km_p} + Q_{km_p} = Z_{km} \cdot I_{km}^2 \quad (9)$$

$$S_{km_p} = (r_{km} + jx_{km}) \cdot I_{km}^2 \quad (10)$$

Da Eq. (23) determina-se a perda ativa e reativa no ramo k-m:

$$P_{km_p} = r_{km} \cdot I_{km}^2 \quad (11)$$

$$Q_{km_p} = x_{km} \cdot I_{km}^2 \quad (12)$$

As Eq. (24) e (25) podem ser generalizadas para todos os ramos do sistema. Assim as perdas ativas e reativas do sistema assumem a seguinte forma:

$$P_{pT} = \sum_{(k,m \in \Omega)} r_{km} \cdot I_{km}^2 \quad (13)$$

$$(14)$$

$$Q_{pT} = \sum_{(k,m \in \Omega)} x_{km} \cdot I_{km}^2$$

Onde  $\Omega$  representa o conjunto de todos os ramos do sistema.

### 3.5 ALGORITMO DE SOLUÇÃO BACKWARD/FORWARD SWEEP

O algoritmo de solução do método pode ser representado da seguinte maneira:

- 1) Leitura dos dados e condições iniciais;
- 2) A tensão em todas as barras, na primeira iteração será igual a tensão do alimentador (referência), nas iterações subsequentes os valores de tensão são atualizados e iguais àqueles obtidos na iteração anterior;
- 3) Admitir que a potencia total do sistema seja nula, ou seja,  $P_{per1} = 0$ .
- 4) A partir das barras extremas calcular as correntes de carga em todas as barras, Eq. (1) e as correntes nos ramos, Eq. (3) – Backward.
- 5) Calcular as perdas ativas do sistema através d Eq. (13). Fazer,  $P_{per2} = P_{pt}$ .
- 6) Se  $\Delta P_{per} = P_{per1} - P_{per2} \leq \mathcal{E}$ , uma tolerância especificada, parar o processo, senão fazer  $P_{per1} = P_{per2}$ .
- 7) Calcular os novos valores de tensão das barras, iniciando da subestação e utilizando os valores de correntes calculados na iteração Eq.(8) – Forward. Voltar ao passo (2).

## 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 ETAPA 1 -SISTEMA DE 4 BARRAS

O propósito inicial foi, a partir dos dados disponíveis no trabalho “Estudo Comparativo de Fluxo de potência para Sistemas de Distribuição Radial” tentar reproduzir o exemplo de sistema de quatro barras, utilizando o método Backward-Forward, para então obter os mesmo resultados.

Assim, aplicando os dados do sistema e elaborando uma rotina no Matlab®, foi possível obter resultados similares. A seguir encontra-se uma tabela com o comparativo dos resultados.

O sistema de 4 barras está exposto na figura 5.1, possuindo as seguintes características:

- i. 1 barra subestação;
- ii. 3 barras de carga;
- iii. 3 linhas de distribuição

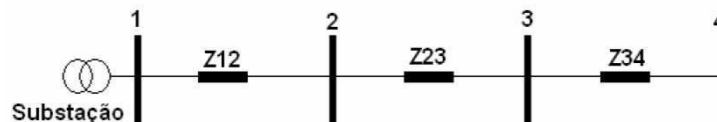


Figura 4.1: Sistema de 4 Barras

Os dados, em p.u., da rede são:

$$V_1 = 1,05 + j0,0 \text{ (referência).}$$

$$S_2 = 1,28 + j1,28;$$

$$S_3 = 0,32 + j0,16;$$

$$S_4 = 1,60 + j0,80;$$

$$Z_{12} = 0,0236 + j 0,0233;$$

$$Z_{23} = 0,003 + j0,0002;$$

$$Z_{34} = 0,0051 + j0,0005;$$

Utilizando como critério de parada a diferença entre potência ativa total entre duas iterações consecutivas, menor que 0,0001. Os valores de tensão em cada barra são:

	Resultados obtidos no Trabalho de Referência		Resultados Obtidos neste Trabalho	
	V(pu)	Ang(°)	V(pu)	Ang(°)
<b>V1</b>	1,05	0	1,05	0
<b>V2</b>	0,9085	-1,32	0,9086	-1,3328
<b>V3</b>	0,9077	-1,33	0,9078	-1,3397
<b>V4</b>	0,8981	-1,10	0,8982	-1,1098

Tabela4.1: Método Backward/Forward para Sistema de 4 Barras.

Como pode ser observado, a rotina utilizada conseguiu reproduzir fielmente o exemplo disposto no Trabalho de referência acima citado, obtendo, desta forma, resultados similares. Observou-se também que o módulo da queda de tensão entre a barra 1 e a barra 4 é igual a 0,1531 pu.

## 4.2 ETAPA 2 – INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A partir da rotina elaborada na etapa 1, disponível em anexo, fez-se adaptação para então observar o comportamento do sistema quando houver a inserção de uma fonte de geração de energia na barra 4.

A ideia principal é observar que quando inserimos uma fonte geradora a sua corrente terá sentido oposto em comparação ao da carga. Ou seja, a partir da equação (3) observamos que a corrente na barra 4 da figura (4.1) será igual a soma das correntes que vão para as cargas subtraída da corrente que chega na barra, fornecida pela fonte geradora.

Para este novo cenário considerou-se a inserção de uma fonte geradora de energia elétrica na barra 4 da figura (4.1), a mesma terá a seguinte característica:

$$S_{DG} = 1,6 + 0,8j \text{ pu}$$

Este valor foi escolhido como sendo igual ao que a carga na barra 4 apresenta, pois uma vez que o que consome é igual ao que é fornecido à barra 4, é possível concluir que a

corrente no ramo será nula. Logo, a corrente igual a zero é um critério a ser usado para ter certeza que os resultados obtidos na rotina estão corretos.

Após a execução das iterações de cálculos no Matlab®, obteve-se os resultados a seguir:

	Resultados sem GD		Resultados com GD	
	V(pu)	Ang(°)	V(pu)	Ang(°)
<b>V1</b>	1,05	0	1,05	0
<b>V2</b>	0,9086	-1,3328	0,9770	-0,1841
<b>V3</b>	0,9078	-1,3397	0,9769	-0,1851
<b>V4</b>	0,8982	-1,1098	0,9769	-0,1851

Tabela 5.2: Método Backward/Forward para Sistema de 4 Barras com GD.

É, então, possível observar que ao inserir uma fonte geradora de energia elétrica que fornece a barra 4 a mesma potência ativa que é consumida pela carga nela existente a corrente na barra quatro será nula e o valor da tensão na barra 4 terá o mesmo valor que o da barra 3. Logo, os resultados obtidos foram iguais aos que se esperava.

Concluiu-se também que a inserção desta fonte geradora na barra 4 fez com que a queda de tensão entre a barra 1 e a barra 4 diminuísse. Ou seja, sem GD obteve-se 0,1531pu de queda de tensão e com GD obteve-se 0,0732 pu.

Por conseguinte, a inserção de fontes geradoras em um sistema de distribuição permitirão um aumento no nível de tensão, reduzindo as quedas de tensão e tornando o seu perfil constante ao longo do trecho. É então, necessário um controle da quantidade de fontes que serão inseridas, seus valores de potência, e o instante em que este acoplamento irá acontecer, para que não ocorra uma brusca variação de tensão vindo a danificar equipamentos e comprometer a confiabilidade do sistema.

## 5 CONCLUSÃO

Ao término deste trabalho pode-se observar que todos os objetivos almejados foram alcançados. Explicou-se um pouco sobre geração distribuída, definiu-se o método proposto para o cálculo da queda de tensão, – Backward/Forward – e então, fez-se o estudo de caso.

No estudo de caso, a partir de um exemplo prático, que foi o sistema de 4 barras, foi possível estudar a queda de tensão do sistema aplicando o método aqui proposto. E em seguida, adicionou-se uma fonte de geração distribuída na barra 4 e mais uma vez analisou-se o comportamento da tensão.

Tanto para o sistema sem GD quanto com GD foi possível observar que os valores de tensão obtidos estiveram próximos ao valor de tensão do alimentador. E que no instante em que inseriu-se a DG a diferença de tensão entre a barra 1 e a barra 4 aumentou, sendo este, portanto, um ponto positivo. Pois a DG contribuiu na qualidade do nível de tensão na barra 4.

Outro ponto que se pode destacar, é que a partir deste trabalho é possível entender que antes de se inserir uma fonte de tensão no sistema de distribuição, faz-se necessário um estudo de fluxo de potência para então poder obter conclusões a cerca das alterações que uma GD irá provocar no nível de tensão. Pois, caso este estudo antecipado não seja efetuado, a inserção demasiada de DG's provocará um comprometimento na confiabilidade do sistema.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] M. A. Mahmud, M. J. Hossain, H. R. Pota e A.B.M. Nasiruzzaman. “Voltage Control of Distribution Networks with Distributed Generation using Reactive Power Compensation”. Publicado no 37º Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 novembro, 2011.
- [2] ANTÓNIO, F. M. S; MIGUEL, F. S. M. S. Geração Distribuída versus Centralizada. Instituto Politécnico de Viseu. p. 15.
- [3] Balanço Energético Nacional 2013. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética-EPE, 2013. Anual.
- [4] **O que é Geração Distribuída.** Instituto Nacional de Energia Elétrica-INEE, 2014. Disponível em: [http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp?Cat=gd](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp?Cat=gd). Acesso em: 16 jul.2014.
- [5] C. L. Masters, “Voltage rise: the big issue when connecting embedded generation to long 11kV overhead lines,” IET Power Engineering Journal, vol. 16, no.2, pg. 5-12, 2002.
- [6] W. H. Kersting, Distribution System Modeling and Analysis. London: CRC Press, Segunda Edição, 2007.
- [7] F. M. Gonzalez-Longatt, “Impact of Distributed Generation over Power Losses on Distribution System,” In Proc. Of 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 9-11 Oct, 2007.
- [8] B. A. de Souza, “Fluxo de Carga em Sistemas de Distribuição Radiais com Geração Distribuída: Método da Soma de Potência Modificado,” IEEE Latin America Transactions, vol. 4, no. 3, Maio 2006.
- [9] B. A. de Souza, “Distribuição de Energia Elétrica,” Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1997, 144 p.
- [10] CARVALHO, M. R. “Estudo e Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Radial.”, Universidade de São Paulo, 2006
- .

# APÊNDICE

## 1. Código da ETAPA 1:

```

clear all;
v1 = 1.05;
v2 = v1;
v3 = v1;
v4 = v1;
s2 = 1.28 + 1.28*i;
s3 = 0.32 + 0.16*i;
s4 = 1.6 + 0.8*i;
z12 = 0.0236 + 0.0233*i;
z23 = 0.0003 + 0.0002*i;
z34 = 0.0051 + 0.0005*i;
delta = 1;
pper1 = 0
i = 0;
while (abs(delta)>0.00001)
    i34 = conj(s4/v4);
    i23 = conj(s3/v3) + i34;
    i12 = conj(s2/v2) + i23;
    p12 = real(z12)*((abs(i12))^2);
    p23 = real(z23)*((abs(i23))^2);
    p34 = real(z34)*((abs(i34))^2);
    q12 = imag(z12)*((abs(i12))^2);
    q23 = imag(z23)*((abs(i23))^2);
    q34 = imag(z34)*((abs(i34))^2);
    ptot = p12 + p23+ p34
    qtot = q12 + q23+ q34;
    deltap = abs(pper1 - ptot);
    v2 = v1 - z12*i12;
    v3 = v2 - z23*i23;
    v4 = v3 - z34*i34;
    delta = (pper1 - ptot);
    pper1 = ptot;
    i = i+1;
end
mv2 = abs(v2)
av2 = angle(v2)*180/pi
mv3 = abs(v3)
av3 = angle(v3)*180/pi
mv4 = abs(v4)
av4 = angle(v4)*180/pi
delta1 = abs(v1-v4)

```



## 2. Código da ETAPA 2:

```

clc;
clear all;
v1 = 1.05;
v2 = v1;
v3 = v1;
v4 = v1;
s2 = 1.28 + 1.28*i;
s3 = 0.32 + 0.16*i;
s4 = 1.6 + 0.8*i;
sGD = 1.6 + 0.8*i;
z12 = 0.0236 + 0.0233*i;
z23 = 0.0003 + 0.0002*i;
z34 = 0.0051 + 0.0005*i;
delta = 1;
pper1 = 0
i = 0;
while (abs(delta)>0.00001)
    i34 = conj(s4/v4) - conj(sGD/v4);
    i23 = conj(s3/v3) + i34;
    i12 = conj(s2/v2) + i23;
    p12 = real(z12)*((abs(i12))^2);
    p23 = real(z23)*((abs(i23))^2);
    p34 = real(z34)*((abs(i34))^2);
    q12 = imag(z12)*((abs(i12))^2);
    q23 = imag(z23)*((abs(i23))^2);
    q34 = imag(z34)*((abs(i34))^2);
    ptot = p12 + p23+ p34
    qtot = q12 + q23+ q34
    deltap = abs(pper1 - ptot);
    v2 = v1 - z12*i12;
    v3 = v2 - z23*i23;
    v4 = v3 - z34*i34;
    delta = (pper1 - ptot);
    pper1 = ptot;
    i = i+1;

end
mv2 = abs(v2)
av2 = angle(v2)*180/pi
mv3 = abs(v3)
av3 = angle(v3)*180/pi
mv4 = abs(v4)
av4 = angle(v4)*180/pi
i34
delta1 = abs(v1-v4)

```