



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Caio Marco dos Santos Junqueira

Fluxo de carga em Sistemas de Distribuição: Método da  
Soma de Potências em VBA (Excel)

Campina Grande, Paraíba  
Julho de 2015

Caio Marco dos Santos Junqueira

## Fluxo de Carga em Sistemas de Distribuição: Método da Soma de Potências em VBA (Excel)

*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:

Benemar Alencar de Souza, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Julho de 2015

Caio Marco dos Santos Junqueira

## Fluxo de Carga em Sistemas de Distribuição: Método da Soma de Potências em VBA (Excel)

*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

---

**Professor Benemar Alencar de Souza, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

## Agradecimentos

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por ter me ajudado nessa difícil caminhada na qual me encontro, permitindo superar os obstáculos da vida. Agradeço aos meus amados avós, Estevão Rocha e Joana Severo e pais, Francisca Lúcia e Manoel Junqueira que sempre procuraram me oferecer a melhor educação possível e sempre me incentivaram e deram força para que eu seguisse adiante.

Agradeço também às minhas irmãs, Cora Coralina e Camila Junqueira, à minha namorada Thaís Gomes, aos meus amigos e meus familiares que fizeram e fazem parte dos principais momentos da minha vida, tanto alegres como tristes, e que estão ali para o que eu precisar.

Agradeço ao Professor Benemar Alencar de Souza pela orientação no desenvolvimento deste trabalho e nos ensinamentos transmitidos durante minha vida acadêmica.

Agradeço em especial à Professora Núbia Brito e ao Professor Wellinsílvio Santos que me ajudaram a obter mais conhecimento na graduação e me deram a oportunidade de mostrar o meu trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram para o que eu sou hoje.

*“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e suas realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim.”*

Nikola Tesla

## Resumo

Este trabalho analisa os principais aspectos práticos sobre a utilização de um programa de fluxo de potência para simulação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Faz uso de macros escritas em linguagem VBA (*Virtual Basic for Applications*) do Excel com o intuito de automatizar o processo. Avalia o desempenho do Método da Soma de Potências para aplicações nesses sistemas. Apresenta um procedimento para facilitar o processo de montagem dos dados de forma rápida e confiável (planilha de dados). Fornece procedimentos para a apresentação dos resultados da simulação, visando facilitar o processo de análise por parte do usuário (planilha de relatórios). E finalmente, faz uma comparação com os resultados obtidos em outros trabalhos sobre o Método da Soma de Potências com o objetivo de verificar a confiabilidade do trabalho desenvolvido.

**Palavras-chave:** Fluxo de Potência, Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, VBA, Excel, Método da Soma de Potências.

## Abstract

This work analyzes the main practical aspects about the use of a power flow program for Simulation of Electricity Distribution System. It makes use of macros written in VBA language (Virtual basic for Applications) of Excel in order to automate the process. It Evaluates the Power Sum Method performance for applications on those systems. It presents a procedure to facilitate the assembly process data in a fast and reliable form (data spreadsheet). It provides procedures for the presentation of simulation results in order to facilitate the review process by the user (report spreadsheet). And finally, make a comparison with the results obtained in other works about Power Sum Method in order to verify the reliability of the developed work.

**Keywords:** Load Flow, Load, Electricity Distribution System, VBA, Excel, Power Sum Method.

## Lista de Ilustrações

Figura 1.1 - Diagrama esquemático de um sistema elétrico de potência. ....	7
Figura 1.2 - Sistema radial.....	8
Figura 2.1 - Variáveis em um sistema radial para elaboração dos algoritmos de fluxo de potência. ....	10
Figura 2.2 – Sistema simples com 2 trechos. ....	11
Figura 3.1 – Trecho simples para a formulação matemática do MSP .....	15
Figura 3.2 - Imagem do exemplo de fixação .....	19
Figura 4.1 – As 5 planilhas que compõem a pasta de trabalho .....	24
Figura 4.2 – Planilha MSP (DADOS) para o exemplo de fixação da Figura 3.2.....	25
Figura 4.3 – planilha MSP (RELATÓRIO) para o exemplo de fixação da Figura 3.2 .....	26
Figura 4.4 – MSP após duas iterações para o exemplo de fixação da Figura 3.2.....	26
Figura 5.1 – Alimentador teste de 13 barras.....	27
Figura 5.2 - Sistema de distribuição com 29 trechos .....	29



## Lista de Tabelas

Tabela 2-1 – Relações R/X para cabos utilizados nas redes de distribuição da região Norte-Nordeste.....	10
Tabela 5-1. Dados do Caso1 .....	27
Tabela 5-2. Comparação dos valores encontrados no MATLAB® com os obtidos na PMSP.....	28
Tabela 5-3. Dados do Caso 2 .....	29
Tabela 5-4. Comparação dos valores encontrados no MATLAB com os obtidos na PMSP (tensão). .....	30
Tabela 5-5. Comparação dos valores encontrados no MATLAB com os obtidos na PMSP(perdas).....	30

## Lista de Abreviaturas e Siglas

BT	Baixa Tensão
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
MSP	Método da Soma de Potências
MT	Média Tensão
PMSP	Planilha Método da Soma de Potências
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
MT	Média Tensão

# Sumário

Agradecimentos .....	iv
Resumo .....	1
Abstract .....	2
Lista de Ilustrações .....	3
Lista de Tabelas .....	4
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	5
Sumário .....	6
1 O Sistema Elétrico de Potência .....	7
1.1 O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica .....	7
2 Fluxo de Potência .....	9
2.1 Métodos Numéricos para SDEE.....	11
2.1.1 Método da Escada .....	11
2.1.2 Método da Soma de Correntes.....	12
2.2 Modelagem da Carga .....	12
2.3 Levantamento dos Dados .....	13
3 Método da Soma de Potências .....	14
3.1 Modelo da Rede de Distribuição .....	14
3.2 Formulação Matemática do Problema .....	16
3.3 Algoritmo de Solução .....	18
3.4 Exemplo de Fixação (ALBUQUERQUE, 2005, p. 20).....	19
4 Planilha do Método da Soma de Potências .....	23
4.1 A Linguagem de Programação VBA.....	23
4.2 Quando e Por Que Usar VBA?.....	24
4.3 Descrição da Planilha do Método da Soma de Potências .....	24
4.4 Cálculo do Fluxo de Potência via MSP .....	25
5 Estudo de Casos .....	27
5.1 Caso 1.....	27
5.2 Caso 2.....	28
6 Conclusões .....	30
Bibliografia.....	32
Anexo .....	33

# 1 O Sistema Elétrico de Potência

O sistema elétrico de potência (SEP) é um grande sistema de energia que engloba quatro grandes áreas: geração, transmissão, distribuição e utilização. O aumento crescente da demanda por energia elétrica nas últimas décadas e do número de interligações entre os sistemas elétricos existentes tornaram a operação e o controle dos SEP uma tarefa extremamente complexa.

Atualmente, os SEP representam um dos maiores e mais complexos sistemas já construídos pelo homem, o que exige técnicas e estudos cada vez mais precisos e refinados para construí-los, mantê-los e operá-los. Além disso, eles estão expostos à condições adversas e imprevisíveis que podem levar a situações de falha ou má operação, causando transtornos a todos que dependem da energia elétrica.

Um SEP típico é apresentado de forma esquemática na Figura 1.1 (SOUZA, 1997)

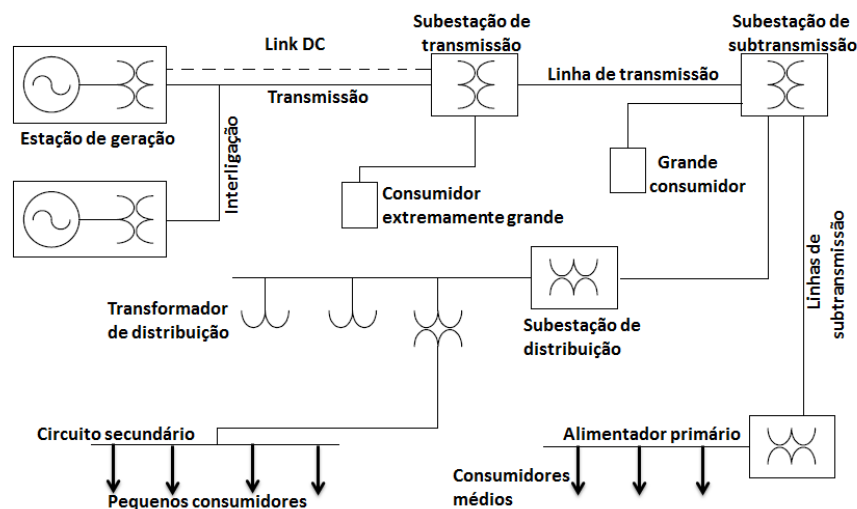


Figura 1.1 - Diagrama esquemático de um sistema elétrico de potência.

## 1.1 O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Um sistema de distribuição de energia elétrica moderno inicia no circuito primário, o qual começa na subestação de transmissão e termina com o serviço secundário do medidor do cliente. A tensão usada é apropriada para distâncias mais curtas e varia entre 2,3 kV e 35 kV (SANTOS, 2013, p. 1) dependendo da distância e da carga a ser suprida.

Circuitos de distribuição são alimentados a partir de um transformador localizado numa subestação, onde a tensão é reduzida para atender as diversas cargas.

Algumas concessionárias concebem aos alimentadores para operarem radialmente, isto é, cada qual com um só ponto de fornecimento em um determinado momento. Existe a possibilidade de transferência de cargas de um alimentador para outro em caso de emergências operacionais. O esquema de operação radial é mostrado na Figura 1.2.

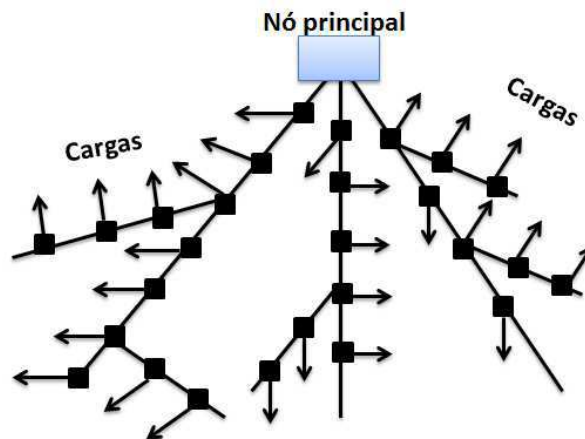


Figura 1.2 - Sistema radial

## 2 FLUXO DE POTÊNCIA

Em qualquer problema onde são utilizados modelos matemáticos e algoritmos numéricos para analisar um sistema físico, a precisão dos resultados é função dos modelos matemáticos utilizados. Na análise de sistemas de potência as soluções encontradas por qualquer algoritmo de fluxo de potência só serão úteis ao usuário se estas soluções proverem resultados que sejam compatíveis em relação aos sistemas reais. Torna-se importante, então, modelar cada componente do sistema tão precisamente quanto possível. Por outro lado, deve-se evitar utilizar modelos extremamente detalhados, pois isso o torna computacionalmente impraticável ou inviável devido à indisponibilidade dos dados dos parâmetros.

Um dos cálculos mais fundamentais relacionados a qualquer SEP é a determinação do estado da rede. Dá-se o nome a este cálculo de fluxo de potência ou fluxo de carga, que consiste essencialmente na determinação das tensões (módulos e ângulos) em todas as barras ou nós do sistema, para uma determinada condição de geração ou carga.

A maioria dos algoritmos de fluxo de potência, utilizados nas concessionárias de energia baseia-se no Método de Newton-Raphson e em suas variantes, que foi desenvolvido especificamente para sistemas de transmissão. Estes sistemas possuem a característica de operar interligado, com linhas paralelas e muitos caminhos redundantes dos pontos de geração para o ponto de carga, formando uma rede malhada. Para sistemas de transmissão, algumas aproximações podem ser feitas, o que permite o desacoplamento entre a potência ativa e reativa e do módulo e ângulo da tensão.

O cálculo de fluxo de potência é utilizado em muitas aplicações, que vão desde o planejamento até a operação dos sistemas. Alguns dos problemas de automação dos sistemas de distribuição relacionados à otimização, como reconfiguração da rede, restauração do serviço e alocação de banco de capacitores, requerem a solução de centenas e até milhares de problemas de fluxo de potência.

Os sistemas de transmissão receberam uma maior ênfase por partes dos pesquisadores, contudo foram propostos alguns algoritmos eficientes na literatura para o problema de fluxo de potência para sistemas de distribuição, que possuem alta relação  $R/X$ , sendo  $R$  e  $X$ , respectivamente, a resistência e a reatância do trecho.

Tabela 2-1 (BARBOSA, 1995, p. 3) apresenta dados a respeito dos cabos típicos das linhas de distribuição primária e das linhas de transmissão.

Tabela 2-1 – Relações  $R/X$  para cabos utilizados nas redes de distribuição da região Norte-Nordeste

Cabos utilizados nas redes primárias 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	450MCM a 900MCM	0,17 a 0,29
ACSR	2 AWG a 266,8 MCM	0,59 a 2	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	-	

Comparando as relações  $R/X$  dos cabos listados, podemos observar que essas relações realmente são maiores para o sistema de distribuição, o que provoca problemas numéricos quando aplicamos os métodos de fluxo de potência utilizados na transmissão aos sistemas de distribuição.

A Figura 2.1 apresenta um diagrama simples de um sistema radial com as variáveis de interesse para elaboração dos algoritmos de fluxo de potência dos SDEE.

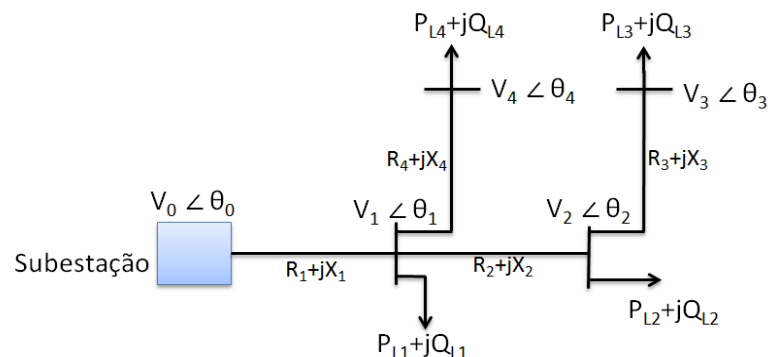


Figura 2.1 - Variáveis em um sistema radial para elaboração dos algoritmos de fluxo de potência.

Diante da necessidade de métodos de solução de fluxo de potência que aliem alta velocidade e confiabilidade, foram desenvolvidos métodos que levam em conta as características específicas dos SDEE e, portanto, apresentam um excelente desempenho quando utilizados para simulação destes sistemas.

Surgiram então, o método escada -“*Ladder*”(Cap. 2), o Método da Soma de Correntes (Cap. 2) e o Método da Soma de Potências (Cap. 3). Estudos comparativos mostraram que o Método da Soma de Potências apresenta-se como a melhor alternativa, por sua velocidade e confiabilidade, mesmo em sistemas muito carregados.

## 2.1 Métodos Numéricos para SDEE

A Figura 2.2 que apresenta o diagrama de um sistema simples será utilizada para ilustrar o desenvolvimento das equações básicas dos métodos deste capítulo.

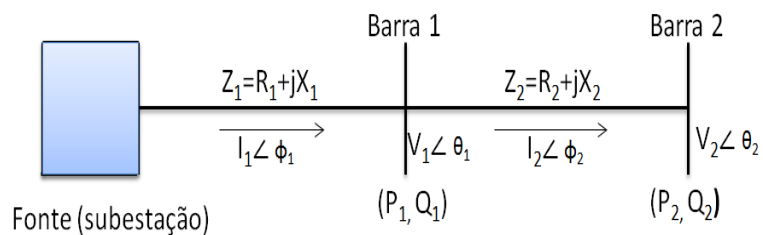


Figura 2.2 – Sistema simples com 2 trechos.

### 2.1.1 Método da Escada (KERSTING, 1976)

Este método consiste em calcular as tensões nodais, percorrendo o sistema de forma inversa (partindo do nó terminal em direção ao nó fonte), adicionando-se as quedas de tensão, até se obter o valor da tensão da fonte.

Começando com uma estimativa inicial de  $\bar{V}_{2(0)}$  (isto é  $k=0$ ) as seguintes equações são obtidas:

$$\bar{I}_{2(k)} = \frac{\bar{S}_2^*}{\bar{V}_{2(k)}} \quad (2.1)$$

$$\bar{V}_{1(k)} = \bar{V}_{2(k)} + \bar{Z}_2 \bar{I}_{2(k)} \quad (2.2)$$

$$\bar{I}_{1(k)} = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{V}_{1(k)}} + \bar{I}_{2(k)} \quad (2.3)$$

$$\bar{V}_{f(k)} = \bar{V}_{1(k)} + \bar{Z}_1 \bar{I}_{1(k)} \quad (2.4)$$

$$\bar{V}_{\text{erro}(k)} = V_f - V_{f(k)} \quad (2.5)$$

$$\bar{V}_{2(k+1)} = V_{2(k)} + V_{\text{erro}(k)}. \quad (2.6)$$



Sendo:  $\bar{V}_f$  o fasor tensão da fonte;  $\bar{V}_{i(k)}$  o fasor tensão da barra  $i$ ;  $k$  o número da iteração;  $\bar{I}_{i(k)}$  o fasor corrente do trecho  $i$ ;  $\bar{S}_i = P_i + Q_i$  a carga complexa conectada no final do trecho  $i$ ;  $\bar{Z}_i = R_i + X_i$  a impedância complexa do trecho  $i$ ;  $P_{pi}$  as perdas ativas no trecho  $i$  e  $P_{qi}$ , as perdas reativas no trecho  $i$ .

Após cada iteração, testa-se a convergência do processo, o que é feito calculando o erro  $\bar{V}_{\text{erro}(k)}$  via Equação (2.5). Se existirem ramos no circuito em estudo, serão realizadas sub-iterações em cada ramal, a partir do ramal principal.

### 2.1.2 Método da Soma de Correntes (SHIRMOHAMMADI, 1987)

Este método consiste em somar as correntes de cada nó, percorrendo o sistema de forma inversa. Usando a Figura 2.2 e começando com uma estimativa inicial para todas as tensões ( $\bar{V}_{i(0)}$ ) as correntes das linhas são calculadas da seguinte forma:

$$\bar{I}_{2(k)} = \frac{\bar{S}_2^*}{\bar{V}_{2(k)}^*} \quad (2.7)$$

$$\bar{I}_{1(k)} = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{V}_{1(k)}^*} + \bar{I}_{2(k)}. \quad (2.8)$$

Neste momento, as tensões dos nós são calculadas através do caminho direto, ou seja, partindo-se do nó fonte caminha-se na direção do nó terminal, portanto:

$$\bar{V}_{1(k+1)} = \bar{V}_f - \bar{Z}_1 \bar{I}_1 \quad (2.9)$$

$$\bar{V}_{2(k+1)} = \bar{V}_{1(k+1)} - \bar{Z}_2 \bar{I}_2. \quad (2.10)$$

A convergência é obtida quando para cada barra é satisfeita a condição a seguir:

$$|\bar{V}_{i(k+1)} - \bar{V}_{i(k)}| \leq \varepsilon, \quad (2.11)$$

sendo,  $\varepsilon$  a tolerância.

## 2.2 Modelagem da Carga

Nos estudos de fluxo de potência, a modelagem da carga e fator de potência influenciam decisivamente na qualidade dos resultados, podendo conduzir a valores imprecisos e até mesmo, a não convergir, à medida que o sistema que se quer analisar apresenta um carregamento elevado. Por outro lado, a dificuldade inerente a determinação do modelo de carga é um fato, considerando a grande variedade da composição da mesma.

## 2.3 Levantamento dos Dados

Ao contrário do que ocorre nos sistemas de transmissão, onde os dados são obtidos, nos sistemas de distribuição o levantamento de dados representa um problema complexo e trabalhoso, devido à (BARBOSA, 1995, p. 16):

- Grande quantidade de consumidores;
- Grande quantidade de informações;
- Diversidade de dados;
- Falta de medições adequadas, etc.

Este quadro de dificuldades aliado ao crescente interesse das concessionárias de energia elétrica em aumentar a eficiência do seu sistema, tornavam a distribuição uma área de grande necessidade de investimentos em pesquisa, tanto nas concessionárias de energia elétrica como nas universidades.

### 3 MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS (MSP)

Em 1990, Renato Cespedes sugeriu um método para resolver o problema de fluxo de potência em sistemas radiais, o qual tinha os seguintes objetivos básicos (CESPEDES, 1990):

- O módulo da tensão de cada barra deve ser a variável de maior interesse, prevalecendo sobre sua fase. Isto se justifica pelo fato de que, em sistemas de distribuição, a diferença entre as fases das tensões de barra é pequena, de alguns poucos graus.
- O método deve permitir a definição do módulo da tensão em qualquer barra do alimentador (funcionando como uma restrição do problema do fluxo de potência), de modo que o cálculo das demais tensões de barra seja feito em função daquela.
- As cargas nas barras devem ser representadas como função dos respectivos módulos das tensões nas barras.
- O método deve ser aplicado a problemas de fluxo de potência monofásico e trifásico.
- O algoritmo deve ter seu tempo de processamento e convergência compatíveis com outros métodos usualmente utilizados para este problema de fluxo de potência.

A solução do problema de fluxo de carga em um sistema radial usando o MSP consiste em resolver, para cada trecho do alimentador, uma equação de quarto grau em termos da tensão nodal. O processo de cálculo da potência em um dado trecho consiste em somar os valores de potência (e daí vem o nome do método) referentes às cargas e às perdas dos trechos que estão após o trecho em estudo, incluindo a carga própria do mesmo (GUIMARÃES, 2000). Nas seções seguintes é apresentado como o sistema de distribuição é modelado para permitir a resolução do problema, a formulação matemática proveniente deste modelo e a descrição do algoritmo de solução, incluindo um pequeno exemplo de aplicação.

#### 3.1 Modelo da Rede de Distribuição

Para formulação do modelo da rede de distribuição, considera-se o sistema trifásico radial e balanceado, o qual pode ser representado pelo seu equivalente monofásico. As linhas de distribuição são representadas por suas resistências e reatâncias série e as capacitâncias em paralelo podem ser desprezadas, como ocorre na maioria dos casos práticos (DAS, 1995).

As cargas de cada barra, incluindo os capacitores eventualmente instalados para correção de fator de potência, são representadas por suas potências ativa e reativa. Tais cargas podem ser modeladas como sendo de corrente constante, impedância constante ou potência constante, esta última sendo mais comumente utilizada.

Para modelagem da rede de distribuição primária, o alimentador é dividido em várias linhas ou ramos, os quais são limitados por nós ou barras, cada nó representando um ponto onde está instalado o transformador de distribuição. Na Figura 3.1 é apresentado um trecho para a formulação matemática. Considera-se cada trecho como sendo formado pelo ramo correspondente juntamente com o seu nó terminal.

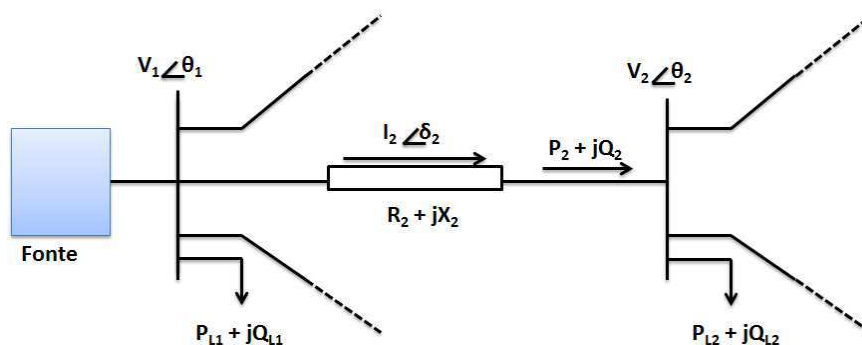


Figura 3.1 – Trecho simples para a formulação matemática do MSP

Na Figura 3.1, as tensões em cada nó são representadas em módulo e fase ( $V_1 \angle \theta_1, V_2 \angle \theta_2$ ), assim como a corrente que atravessa o trecho 2 ( $I_2 \angle \delta_2$ ). A linha do trecho 2 é representada por sua resistência e reatância série ( $R_2 + jX_2$ ), enquanto que a carga existente em cada nó é representada por suas parcelas ativa e reativa ( $P_{L1} + jQ_{L1}, P_{L2} + jQ_{L2}$ ). O fluxo de potência de um determinado trecho ( $P_2 + jQ_2$ ) é definido como aquele que circula ao final do mesmo, logo antes do seu nó terminal, não considerando as perdas correspondentes do trecho ( $\Delta P_2, \Delta Q_2$ ), ou seja, é o fluxo de potência que chega ao final do trecho, já descontadas as perdas do fluxo de potência disponível no início do trecho.

## 3.2 Formulação Matemática do Problema

A partir da Figura 3.1, as seguintes equações podem ser estabelecidas:

$$I_2 = \frac{V_1 \angle \theta_1 - V_2 \angle \theta_2}{R_2 + jX_2} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} S_2 &= V_2 I_2^* \rightarrow S_2^* \\ &= V_2^* I_2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$P_2 - jQ_2 = V_2^* I_2. \quad (3.3)$$

Isolando  $I_2$  na Equação (3.3) e igualando a expressão da Equação (3.1), o seguinte desenvolvimento matemático é obtido:

$$\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} = \frac{V_1 \angle \theta_1 - V_2 \angle \theta_2}{R_2 + jX_2} \quad (3.4)$$

$$V_1 V_2 \angle (\theta_1 - \theta_2) - V_2^2 = (R_2 + jX_2) * (P_2 - jQ_2) \quad (3.5)$$

$$V_1 V_2 [\cos(\theta_1 - \theta_2) + j \operatorname{sen}(\theta_1 - \theta_2)] = (V_2^2 + R_2 P_2 + X_2 Q_2) + j(X_2 P_2 - R_2 Q_2) \quad (3.6)$$

Separando as partes real e imaginária da Equação (3.6), tem-se:

$$V_1 V_2 [\cos(\theta_1 - \theta_2)] = V_2^2 + R_2 P_2 + X_2 Q_2 \quad (3.7)$$

$$V_1 V_2 [\operatorname{sen}(\theta_1 - \theta_2)] = X_2 P_2 - R_2 Q_2. \quad (3.8)$$

Elevando-se ao quadrado e somando-se as Equações (3.7) e

(3.8), obtém-se:

$$\begin{aligned} V_1^2 V_2^2 &= (V_2^2 + R_2 P_2 + X_2 Q_2)^2 + (X_2 P_2 - R_2 Q_2)^2 \\ V_1^2 V_2^2 &= V_2^4 + 2V_2^2(R_2 P_2 + X_2 Q_2) + (R_2 P_2 + X_2 Q_2)^2 + (X_2 P_2 - R_2 Q_2)^2 \\ V_2^4 + 2V_2^2 \left[ (R_2 P_2 + X_2 Q_2) - \frac{1}{2} V_1^2 \right] &+ (R_2^2 P_2^2 + 2R_2 P_2 X_2 Q_2 + X_2^2 Q_2^2) \\ &+ (X_2^2 P_2^2 - 2X_2 P_2 R_2 Q_2 + R_2^2 Q_2^2) = 0 \\ V_2^4 + 2 \left[ (R_2 P_2 + X_2 Q_2) - \frac{1}{2} V_1^2 \right] V_2^2 &+ (R_2^2 + X_2^2)(P_2^2 + Q_2^2) = 0. \end{aligned}$$

A última igualdade pode ser reescrita da seguinte forma:

$$V_2^4 + 2AV_2^2 + B = 0, \quad (3.9)$$

lendo:

$$A = 2 \left[ (R_2 P_2 + X_2 Q_2) - \frac{1}{2} V_1^2 \right] \quad (3.10)$$

$$B = (R_2^2 + X_2^2)(P_2^2 + Q_2^2) \quad (3.11)$$

A Equação (3.9) possui solução direta, não dependendo da fase das tensões dos nós, o que simplifica a formulação do problema. Em SDEE, as fases das tensões não são de grande importância, pois a diferença de fase entre o nó da

subestação (nó fonte) e o último nó do alimentador é de apenas alguns graus. Mesmo a Equação (3.9) possuindo quatro raízes, duas delas são raízes negativas e a solução não fornece um valor de tensão possível de se encontrar na prática.

A solução da Equação (3.9) é obtida da seguinte maneira:

$$V_2^4 + 2AV_2^2 + B = 0 \quad (3-12)$$

$$a = V_2^2 \rightarrow a^2 + 2Aa + B$$

$$a = \frac{-2A \pm \sqrt{4A^2 - 4B}}{2} = -A \pm \sqrt{A^2 - B} \rightarrow a = \sqrt{A^2 - B} - A$$

$$V_2 = \pm\sqrt{a} \rightarrow V_2 = \sqrt{\sqrt{A^2 - B} - A} \quad (3.13)$$

Desta forma, a Equação (3.13) é a solução possível da equação biquadrada (3-12) que fornece o valor dos módulos das tensões nos diversos nós do alimentador. É importante observar, conforme Equação (3.13), que a tensão em um determinado trecho é função dos parâmetros da linha deste trecho ( $R_2$  e  $X_2$ ), do fluxo de potência no mesmo ( $P_2$  e  $Q_2$ ), como também da tensão no trecho do qual se origina o trecho em estudo ( $V_1$ ).

A formulação matemática utilizada até então, com base na Figura 3.1, foi especificada para o trecho 2. Para um trecho genérico, esta formulação e as que seguem podem ser estendidas sem nenhum problema. Dessa forma, para um trecho genérico  $i$  do alimentador as Equações (3.9), (3.10) e (3.11) são modificadas para as seguintes expressões (ALBUQUERQUE, 2005):

$$V_i^4 + 2AV_i^2 + B = 0, \quad (3.14)$$

sendo:

$$A = 2 \left[ (R_i P_i + X_i Q_i) - \frac{1}{2} V_{(i-1)}^2 \right] \quad (3.15)$$

$$B = (R_i^2 + X_i^2)(P_i^2 + Q_i^2). \quad (3.16)$$

$V_{(i-1)}$  é a tensão na barra na qual o trecho  $i$  se origina.

Com as tensões em todos os nós do alimentador disponíveis, é possível calcular as perdas ativas e reativas em cada trecho utilizando o seguinte desenvolvimento matemático:

$$\Delta P_i = R_i I_i^2 \rightarrow \Delta P_i = R_i \left( \frac{S_i^2}{V_i^2} \right) \quad (3.17)$$

$$\Delta Q_i = X_i I_i^2 \rightarrow \Delta Q_i = X_i \left( \frac{S_i^2}{V_i} \right) \quad . \quad (3.18)$$

Assim, as perdas ativas e reativas em um trecho genérico  $i$  do alimentador são fornecidas pelas seguintes expressões (DAS, 1994):

$$\Delta P_i = R_i \left( \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \quad (3.19)$$

$$\Delta Q_i = X_i \left( \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right). \quad (3.20)$$

Segundo as Equações (3.19) e (3.20), as perdas ativas e reativas dependem, além do módulo da tensão do trecho em estudo, do fluxo de potência no mesmo. Ainda por meio da Figura 3.1, mas agora para um trecho genérico  $i$ , é possível determinar o fluxo de potência ativa e reativa utilizando as seguintes expressões (SOUZA, 2004):

$$P_i = P_{L_i} + \sum_{k=\beta_i} (P_k + \Delta P_k) \quad (3.21)$$

$$Q_i = Q_{L_i} + \sum_{k=\beta_i} (Q_k + \Delta Q_k). \quad (3.22)$$

Sendo:  $P_i$  e  $Q_i$  o fluxo de potência ativa e reativa no trecho  $i$ ;  $P_{L_i}$  e  $Q_{L_i}$  as cargas ativas e reativas instaladas no trecho  $i$ ;  $\Delta P_k$  e  $\Delta Q_k$  as perdas ativas e reativas no trecho  $k$  e  $\beta_i$ , o conjunto de todos os trechos que derivam do trecho  $i$ .

Vale ressaltar, que o fluxo de potência em um trecho não considera as perdas no mesmo, sendo este o fluxo de potência ao final de cada trecho.

### 3.3 Algoritmo de Solução

O MSP é um processo iterativo no qual, a cada iteração, os cálculos seguem duas diferentes direções. O processo iterativo continua até que o critério de convergência estabelecido seja atingido ou até que o número máximo de iterações seja alcançado. Um critério de convergência comumente utilizado é o seguinte: a diferença entre as perdas ativas e reativas totais do alimentador entre duas iterações subsequentes seja inferior à tolerância previamente estabelecida (ALBUQUERQUE, 2005). A Equação (3.23) apresenta este critério de convergência.

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^n \left( \Delta P_{j(i)} - \Delta P_{j(i+1)} \right)^2 + \left( \Delta Q_{j(i)} - \Delta Q_{j(i+1)} \right)^2. \quad (3.23)$$

Sendo:  $\varepsilon$  o erro de convergência, o qual deve ser especificado;  $j$  o número do trecho e  $n$ , a quantidade de trechos. O algoritmo de solução pode ser resumido conforme a seguir:

- i. Inicialmente, considerar nulas as perdas ativa e reativa do alimentador ( $\Delta P_k = 0$  e  $\Delta Q_k = 0$ );
- ii. Calcular as cargas ativas e reativas instaladas no trecho ( $P_{L_i}$ );
- iii. Calcular os fluxos de potência em cada trecho utilizando as Equações (3.19) e (3.20) seguindo a direção das barras terminais para a subestação (fonte);
- iv. Calcular a tensão em cada trecho empregando as Equações (3.14), (3.15) e (3.16) seguindo a direção da subestação para as barras terminais;
- v. Calcular as perdas ativa e reativa em cada trecho empregando as Equações (3.19) e (3.20);
- vi. Repetir os passos iii. e v. enquanto houver variação significativa nas perdas totais do alimentador de uma iteração para outra (analisar o erro de convergência).

### 3.4 Exemplo de Fixação (ALBUQUERQUE, 2005, p. 20)

Determinar o módulo da tensão em cada barra do sistema abaixo e as respectivas perdas de potência ativa e reativa por trecho usando o MSP. A tensão da barra da subestação é de 13,8 kV. As impedâncias de cada trecho e as cargas de cada barra são indicadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Adote  $\text{fp} = 0,8$  e apenas duas iterações no processo.

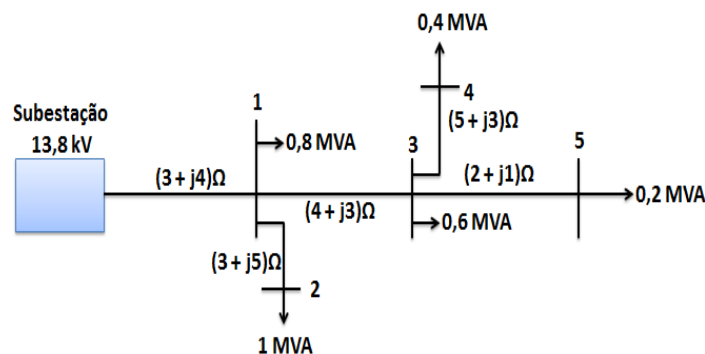


Figura 3.2 - Imagem do exemplo de fixação

**Primeira iteração:**



- i. Perdas ativa e reativa do alimentador iguais a 0 para o número de iteração igual a 0 ( $k = 0$ ), ( $\Delta P_{i(0)} = 0$  e  $\Delta Q_{i(0)} = 0$ ), com  $i$  variando de 1 a 5 (número de trechos);
- ii. Cálculo das cargas ativas e reativas instaladas no trecho;

Trecho 1:

$$P_{L_1} = 0,8 * 0,8 = 0,64$$

$$Q_{L_1} = 0,8 * 0,6 = 0,48$$

Trecho 3:

$$P_{L_3} = 0,6 * 0,8 = 0,48$$

$$Q_{L_3} = 0,6 * 0,6 = 0,36$$

Trecho 5:

$$P_{L_5} = 0,2 * 0,8 = 0,16$$

$$Q_{L_5} = 0,2 * 0,6 = 0,12$$

Trecho 2:

$$P_{L_2} = 1 * 0,8 = 0,8$$

$$Q_{L_2} = 1 * 0,6 = 0,6$$

Trecho 4:

$$P_{L_4} = 0,4 * 0,8 = 0,32$$

$$Q_{L_4} = 0,4 * 0,6 = 0,24$$

- iii. Cálculo dos fluxos de potência em cada trecho utilizando as Equações (3.19) e (3.20) seguindo a direção das barras terminais para a subestação (fonte);

Trecho 5:

$$P_5 = P_{L_5} = 0,16$$

$$Q_5 = Q_{L_5} = 0,12$$

Trecho 3:

$$P_3 = P_{L_3} + P_4 + P_5 = 0,96$$

$$Q_3 = Q_{L_3} + Q_4 + Q_5 = 0,72$$

Trecho 1:

$$P_1 = P_{L_1} + P_2 + P_3 = 2,4$$

$$Q_1 = Q_{L_1} + Q_2 + Q_3 = 1,8$$

Trecho 4:

$$P_4 = P_{L_4} = 0,32$$

$$Q_4 = Q_{L_4} = 0,24$$

Trecho 2:

$$P_2 = P_{L_2} = 0,8$$

$$Q_2 = Q_{L_2} = 0,6$$

- iv. Cálculo da tensão em cada trecho empregando as Equações (3.14), (3.15) e (3.16) seguindo a direção da subestação para as barras terminais;

Trecho 1:

$$A_1 = [(3 * 2,4) + (4 * 1,8)] - \frac{1}{2} (13,8)^2$$

$$A_1 = -80,82 \text{ kV}^2$$

$$B_1 = [(3^2 + 4^2) * (2,4^2 + 1,8^2)]$$

$$B_1 = 225 \text{ kV}^4$$

$$V_1 = \sqrt{\sqrt{(-80,82^2) - 225} - (-80,82)}$$

$$V_1 = 12,66 \text{ kV}$$

Trecho 3:

$$A_3 = [(4 * 0,96) + (3 * 0,72)] - \frac{1}{2} (12,66)^2$$

$$A_3 = -74,12 \text{ kV}^2$$

$$B_3 = [(4^2 + 3^2) * (0,96^2 + 0,72^2)]$$

$$B_3 = 36 \text{ kV}^4$$

$$V_3 = \sqrt{\sqrt{(-74,12^2) - 36} - (-74,12)}$$

$$V_3 = 12,17 \text{ kV}$$

Trecho 5:

$$A_5 = [(2 * 0,16) + (1 * 0,12)] - \frac{1}{2} (12,17)^2$$

$$A_5 = -73,56 \text{ kV}^2$$

$$B_5 = [(1^2 + 2^2) * (0,16^2 + 0,12^2)]$$

$$B_5 = 0,20 \text{ kV}^4$$

$$V_5 = \sqrt{\sqrt{(-73,56^2) - 0,20} - (-73,56)}$$

$$V_5 = 12,13 \text{ kV}$$

Trecho 2:

$$A_2 = [(3 * 0,8) + (5 * 0,6)] - \frac{1}{2} (12,66)^2$$

$$A_2 = -74,72 \text{ kV}^2$$

$$B_2 = [(3^2 + 5^2) * (0,8^2 + 0,6^2)]$$

$$B_2 = 34 \text{ kV}^4$$

$$V_2 = \sqrt{\sqrt{(-74,72^2) - 34} - (-74,72)}$$

$$V_2 = 12,22 \text{ kV}$$

Trecho 4:

$$A_4 = [(5 * 0,32) + (3 * 0,24)] - \frac{1}{2} (12,17)^2$$

$$A_4 = -71,68 \text{ kV}^2$$

$$B_4 = [(5^2 + 3^2) * (0,32^2 + 0,24^2)]$$

$$B_4 = 5,44 \text{ kV}^4$$

$$V_4 = \sqrt{\sqrt{(-71,68^2) - 5,44} - (-71,68)}$$

$$V_4 = 11,97 \text{ kV}$$

- v. Cálculo das perdas ativa e reativa em cada trecho empregando as Equações (3.19) e (3.20);

Trecho 1:

$$\Delta P_1 = 3 * \left( \frac{2,4^2 * 1,8^2}{12,66^2} \right) = 0,1685 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_1 = 4 * \left( \frac{2,4^2 * 1,8^2}{12,66^2} \right) = 0,2247 \text{ Mvar}$$

Trecho 2:

$$\Delta P_2 = 3 * \left( \frac{0,8^2 * 0,6^2}{12,22^2} \right) = 0,0201 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_2 = 5 * \left( \frac{0,8^2 * 0,6^2}{12,22^2} \right) = 0,0335 \text{ Mvar}$$

Trecho 3:

$$\Delta P_3 = 4 * \left( \frac{0,96^2 * 0,72^2}{12,17^2} \right) = 0,0389 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_3 = 3 * \left( \frac{0,96^2 * 0,72^2}{12,17^2} \right) = 0,0292 \text{ Mvar}$$

Trecho 4:

$$\Delta P_4 = 5 * \left( \frac{0,32^2 * 0,24^2}{11,97^2} \right) = 0,0056 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_4 = 3 * \left( \frac{0,32^2 * 0,24^2}{11,97^2} \right) = 0,0033 \text{ Mvar}$$

Trecho 5:

$$\Delta P_5 = 2 * \left( \frac{0,16^2 * 0,12^2}{12,13^2} \right) = 0,0005 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_5 = 1 * \left( \frac{0,16^2 * 0,12^2}{12,13^2} \right) = 0,0003 \text{ Mvar}$$

### Segunda iteração:

- iii. Cálculo das cargas ativas e reativas instaladas no trecho;

Trecho 5:

$$P_5 = P_{L_5} = 0,16$$

$$Q_5 = Q_{L_5} = 0,12$$

Trecho 4:

$$P_4 = P_{L_4} = 0,32$$

$$Q_4 = Q_{L_4} = 0,24$$

Trecho 3:

$$P_3 = P_{L_3} + (P_4 + \Delta P_4) + (P_5 + \Delta P_5) = 0,966$$

$$Q_3 = Q_{L_3} + (Q_4 + \Delta Q_4) + (Q_5 + \Delta Q_5) = 0,724$$

Trecho 2:

$$P_2 = P_{L_2} = 0,8$$

$$Q_2 = Q_{L_2} = 0,6$$

Trecho 1:

$$P_1 = P_{L_1} + (P_2 + \Delta P_2) + (P_3 + \Delta P_3) = 2,465$$

$$Q_1 = Q_{L_1} + (Q_2 + \Delta Q_2) + (Q_3 + \Delta Q_3) = 1,866$$

- iv. Cálculo da tensão em cada trecho empregando as Equações (3.14), (3.15) e (3.16) seguindo a direção da subestação para as barras terminais;

Trecho 1:

$$A_1 = [(3 * 2,465) + (4 * 1,866)] - \frac{1}{2} (13,8)^2$$

$$A_1 = -80,36 \text{ kV}^2$$

$$B_1 = [(3^2 + 4^2) * (2,465^2 + 1,866^2)]$$

$$B_1 = 239 \text{ kV}^4$$

$$V_1 = \sqrt{\sqrt{(-80,36^2) - 239} - (-80,36)}$$

$$V_1 = 12,62 \text{ kV}$$

Trecho 2:

$$A_2 = [(3 * 0,8) + (5 * 0,6)] - \frac{1}{2} (12,62)^2$$

$$A_2 = -74,21 \text{ kV}^2$$

$$B_2 = [(3^2 + 5^2) * (0,8^2 + 0,6^2)]$$

$$B_2 = 34 \text{ kV}^4$$

$$V_2 = \sqrt{\sqrt{(-74,21)^2 - 34} - (-74,21)}$$

$$V_2 = 12,17 \text{ kV}$$

Trecho 3:

$$A_3 = [(4 * 0,966) + (3 * 0,724)] - \frac{1}{2}(12,62)^2$$

$$A_3 = -73,57 \text{ kV}^2$$

$$B_3 = [(4^2 + 3^2) * (0,966^2 + 0,724^2)]$$

$$B_3 = 36,43 \text{ kV}^4$$

$$V_3 = \sqrt{\sqrt{(-73,57^2) - 36,43} - (-73,57)}$$

$$V_3 = 12,12 \text{ kV}$$

Trecho 5:

$$A_5 = [(2 * 0,16) + (1 * 0,12)] - \frac{1}{2}(12,12)^2$$

$$A_5 = -73,01 \text{ kV}^2$$

$$B_5 = [(1^2 + 2^2) * (0,16^2 + 0,12^2)]$$

$$B_5 = 0,20 \text{ kV}^4$$

$$V_5 = \sqrt{\sqrt{(-73,01^2) - 0,20} - (-73,01)}$$

$$V_5 = 12,08 \text{ kV}$$

Trecho 4:

$$A_4 = [(5 * 0,32) + (3 * 0,24)] - \frac{1}{2}(12,12)^2$$

$$A_4 = -71,13 \text{ kV}^2$$

$$B_4 = [(5^2 + 3^2) * (0,32^2 + 0,24^2)]$$

$$B_4 = 5,44 \text{ kV}^4$$

$$V_4 = \sqrt{\sqrt{(-71,13^2) - 5,44} - (-71,13)}$$

$$V_4 = 11,93 \text{ kV}$$

v. Cálculo das perdas ativa e reativa em cada trecho empregando as Equações (3.19)e (3.20);

Trecho 1:

$$\Delta P_1 = 3 * \left( \frac{2,465^2 * 1,866^2}{12,62^2} \right) = 0,1801 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_1 = 4 * \left( \frac{2,465^2 * 1,866^2}{12,62^2} \right) = 0,2402 \text{ Mvar}$$

Trecho 2:

$$\Delta P_2 = 3 * \left( \frac{0,8^2 * 0,6^2}{12,17^2} \right) = 0,0202 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_2 = 5 * \left( \frac{0,8^2 * 0,6^2}{12,17^2} \right) = 0,0337 \text{ Mvar}$$

Trecho 3:

$$\Delta P_3 = 4 * \left( \frac{0,966^2 * 0,724^2}{12,12^2} \right) = 0,0397 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_3 = 3 * \left( \frac{0,966^2 * 0,724^2}{12,12^2} \right) = 0,0298 \text{ Mvar}$$

Trecho 4:

$$\Delta P_4 = 5 * \left( \frac{0,32^2 * 0,24^2}{11,93^2} \right) = 0,0056 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_4 = 3 * \left( \frac{0,32^2 * 0,24^2}{11,93^2} \right) = 0,0034 \text{ Mvar}$$

Trecho 5:

$$\Delta P_5 = 2 * \left( \frac{0,16^2 * 0,12^2}{12,08^2} \right) = 0,0005 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_5 = 1 * \left( \frac{0,16^2 * 0,12^2}{12,08^2} \right) = 0,0003 \text{ Mvar}$$

vi. Cálculo do erro de convergência entre a primeira e segunda iteração de acordo com a Equação (3.23);

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^5 (\Delta P_{i(2)} - \Delta P_{i(1)})^2 + (\Delta Q_{i(2)} - \Delta Q_{i(1)})^2$$

$$\varepsilon = 0,000424$$

## 4 PLANILHA DO MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS

Como visto no exemplo de fixação, o cálculo das tensões nas barras e dos fluxos de potências nos trechos é trabalhoso, até mesmo para um sistema pequeno e com poucas iterações. Para sistemas mais complexos, os cálculos se tornam cada vez maior, tornando inviável fazê-los manualmente. A PMSP, desenvolvida neste trabalho, tem por objetivo automatizar o processo através do cadastro (em tabelas) de informações dos diversos circuitos na área de distribuição elétrica, de modo que o usuário dispense o menor tempo possível, agilizando e tornando mais eficiente o processo dos cálculos pelo MSP.

A PMSP é uma planilha eletrônica habilitada para macros, desenvolvida no Microsoft® Excel® 2010. A PMSP é usada para calcular a tensão nas barras, fluxo de potência e perdas ativas e reativas nos trechos dos sistemas de distribuição energia elétrica do tipo radial.

A PMSP foi desenvolvida em linguagem *Visual Basic for Applications*, VBA, e faz uso de planilhas bem definidas para facilitar a inserção dos dados de maneira simples e botões com algumas funções que serão definidas mais adiante.

### 4.1 A Linguagem de Programação VBA

VBA (*Visual Basic for Applications*) é um aplicativo da linguagem de programação Visual Basic, da Microsoft, incorporada na suíte de aplicativos do Microsoft® Office. Ele pode ser usado para controlar muitos dos aspectos da aplicação Office, incluindo a manipulação da GUI (*Graphic User Interface*) tais como menus e barra de ferramentas e o trabalho com formulários desenhados pelo usuário ou com caixas de diálogo. O VBA é uma linguagem muito rica em funcionalidades, contudo tem algumas limitações dentre as quais (SANTOS, 2013, p. 27):

- Suporte limitado a funções *callback*;
- Linguagem interpretada;

- Sem suporte à encapsulamento.

Os aplicativos do *Microsoft® Office* oferecem um conjunto muito rico de recursos que fornecem muitas maneiras diferentes de criar, formatar e fazer diversas tarefas com documentos, e-mail, bancos de dados, planilhas e apresentações. Estas características são extensíveis, o que significa que as operações que são executadas usando o *mouse*, teclado e caixas de diálogo também podem ser realizados por meio de *scripts* VBA.

## 4.2 Quando e Por Que Usar VBA?

Existem três razões principais pela escolha da programação em VBA (SANTOS, 2013, p. 28):

- VBA é eficiente na execução de tarefas repetitivas que demandam precisão na inserção de dados seja em banco de dados, planilhas ou formatação de textos longos no Word;
- Possibilidade de simplificação de tarefas complexas através do uso de GUI nas quais o usuário seleciona uma combinação de valores deixando-o alheio às operações de cálculo, pesquisa, e manipulação de dados;
- Pode-se usar a programação em VBA para interagir com os pormenores de duas ou mais aplicações do Office, ao mesmo tempo e, em seguida, modificar o conteúdo de uma aplicação com base no teor em outro.

## 4.3 Descrição da Planilha do Método da Soma de Potências

A pasta de trabalho é composta por cinco planilhas (Figura 4.1), cada uma com uma função específica cujas principais características serão apresentadas a seguir.



Figura 4.1 – As cinco planilhas que compõem a pasta de trabalho

### 1. Planilha **APRESENTAÇÃO**

Apresenta a tela inicial da pasta de trabalho, com algumas informações sobre o autor, orientador e versão da planilha.

## 2. Planilha **INSTRUÇÕES**

Apresenta de maneira geral, como utilizar a pasta de trabalho, informando onde devem ser inseridos os dados da linha de distribuição (planilha dados), como e para quê deve ser usado cada botão da planilha relatório.

## 3. Planilha **INFORMAÇÕES**

Fornecer algumas informações sobre o MSP, apresentando algumas equações que são recorrentes durante o processo iterativo.

## 4. Planilha **DADOS**

Recebe o detalhamento dos trechos da rede de distribuição: perdas nos trechos e potência da carga. Além disso, é informada a tensão da fonte ( $V_0$ ) e o fator de potência.

## 5. Planilha **RELATÓRIO**

É a mais dinâmica de todas. Possui três botões (“Zerar”, “Mudança na rede de distribuição” e “Iteração”) que juntos, são responsáveis computar o MSP. Além disso, apresenta a variação do fluxo de potência e das tensões em cada trecho durante as iterações. O erro também é apresentado.

### 4.4 Cálculo do Fluxo de Potência via MSP

A PMSP foi desenvolvida para calcular os valores das tensões e o fluxo de potência em cada trecho em redes de distribuição de energia elétrica de média tensão (MT) e de baixa tensão (BT). As etapas descritas a seguir ilustram a sequência de ações que deve ser executadas para efetuar este cálculo.

- i. Abrir a planilha **DADOS** e preencher com os valores especificados da linha de distribuição. Para o caso do exemplo de fixação da Figura 3.2, tem-se:

DETALHAMENTO DOS TRECHOS									
TRECHO		PERDAS		CARGA			COMPRIMENTO	TENSÃO DA FONTE	FATOR DE POTÊNCIA
BARRA DE ORIGEM DE (i)	BARRA DE DESTINO PARA (j)	R(Ω/km)	XL(Ω/km)	SL(MVA)	PL(MW)	QL(Mvar)	DO TRECHO (km)	$V_0$ (kV)	
0	1	3	4	0,8			1,00000	13,8	0,8
1	2	3	5	1			1,00000		
1	3	4	3	0,6			1,00000		
3	4	5	3	0,4			1,00000		
3	5	2	1	0,2			1,00000		

Figura 4.2 – Planilha MSP (DADOS) para o exemplo de fixação da Figura 3.2

- ii. Depois de preenchida, o usuário deve abrir a planilha **RELATÓRIO** e apertar o botão **MUDANÇA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO**. As potências ativas e reativas da carga são automaticamente preenchidas (o usuário pode informar apenas estas potências). O fluxo de potência em cada trecho é também apresentado, só que este aparece na planilha **RELATÓRIO** como apresentado na Figura 4.3.

Relatório												
ZERAR		MUDANÇA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO						ITERAÇÃO				
BARRA DE ORIGEM	BARRA DE DESTINO	PERDAS ATIVAS E REATIVAS		FLUXO DE POTÊNCIA		A	B	TENSÃO NO BARRAMENTO DESTINO	PERDAS ATIVAS E REATIVAS		ITERAÇÕES	ERRO
DE(i)	PARA(j)	$\Delta P_i$ (MW)	$\Delta Q_i$ (Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)	(kW) <sup>2</sup>	(kV) <sup>4</sup>	V(kV)	$\Delta P_{i+1}$ (MW)	$\Delta Q_{i+1}$ (Mvar)		
0	1	0,000	0,000	2,400	1,800	-80,82	225,00	12,66	0,1685	0,2247	0	0
1	2	0,000	0,000	0,800	0,600	-74,72	34,00	12,22	0,0201	0,0335		
1	3	0,000	0,000	0,960	0,720	-74,12	36,00	12,17	0,0389	0,0292		
3	4	0,000	0,000	0,320	0,240	-71,68	5,44	11,97	0,0056	0,0033		
3	5	0,000	0,000	0,160	0,120	-73,56	0,20	12,13	0,0005	0,0003		

Figura 4.3 – planilha MSP (RELATÓRIO) para o exemplo de fixação da Figura 3.2

- iii. Depois disso, o processo iterativo deve ser iniciado pressionando o botão **ITERAÇÃO** na planilha **RELATÓRIO**. A Figura 4.4 apresenta a PMSP após duas iterações. O erro é analisado e comparado com o exemplo feito manualmente.

Relatório												
ZERAR		MUDANÇA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO						ITERAÇÃO				
BARRA DE ORIGEM	BARRA DE DESTINO	PERDAS ATIVAS E REATIVAS		FLUXO DE POTÊNCIA		A	B	TENSÃO NO BARRAMENTO DESTINO	PERDAS ATIVAS E REATIVAS		ITERAÇÕES	ERRO
DE(i)	PARA(j)	$\Delta P_i$ (MW)	$\Delta Q_i$ (Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)	(kW) <sup>2</sup>	(kV) <sup>4</sup>	V(kV)	$\Delta P_{i+1}$ (MW)	$\Delta Q_{i+1}$ (Mvar)		
0	1	0,180	0,240	2,466	1,867	-80,35	239,20	12,62	0,1803	0,2404	2	0,00042473
1	2	0,020	0,034	0,800	0,600	-74,20	34,00	12,17	0,0202	0,0337		
1	3	0,040	0,030	0,966	0,724	-73,57	36,43	12,12	0,0397	0,0298		
3	4	0,006	0,003	0,320	0,240	-71,12	5,44	11,93	0,0056	0,0034		
3	5	0,001	0,000	0,160	0,120	-73,00	0,20	12,08	0,0005	0,0003		

Figura 4.4 – MSP após duas iterações para o exemplo de fixação da Figura 3.2

## 5 Estudo de Casos

Serão apresentados a seguir, estudos de casos que objetivam comparar os resultados obtidos utilizando o MATLAB e os resultados obtidos por meio da Planilha do MSP.

### 5.1 Caso 1

Apresenta-se a seguir uma aplicação do MSP para um alimentador radial de treze barras (KERSTING, 2000), representado na Figura 5.1. Na Tabela 5-1 são apresentados os dados de cada trecho do alimentador: as cargas ativas e reativas, a resistência e reatância série da linha por unidade de comprimento e o comprimento da linha. (ALBUQUERQUE, 2005). O alimentador é formado por doze trechos, tendo um ramo principal e várias barras de derivação. A tensão na subestação é de 4,16 kV. Para este exemplo, a tolerância especificada foi de 0,0001.

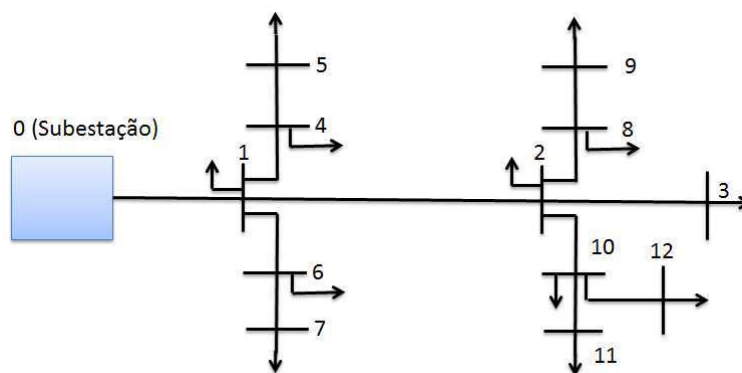


Figura 5.1 – Alimentador teste de 13 barras

Tabela 5-1. Dados do Caso1

Trecho	Carga		Impedância		Comprimento (mi)
	$P_L$ (kW)	$Q_L$ (kvar)	$R$ ( $\Omega$ /mi)	$X$ ( $\Omega$ /mi)	
1	66,67	38,67	0,1860000	0,421105820	0,378788
2	0,00	0,00	0,1860000	0,421105820	0,378788
3	0,00	0,00	0,1860000	0,421105820	0,189394
4	0,00	0,00	0,5920000	0,581000000	0,094697
5	133,33	96,67	0,5068800	0,921600000	0,000000
6	56,67	41,67	1,1200000	0,656000000	0,094697
7	76,67	44,00	1,1200000	0,656000000	0,056818



8	56,67	50,33	0,0000010	0,00000100	0,000000
9	281,00	154,00	0,4100000	0,49368104	0,094697
10	0,00	0,00	1,1200000	0,65600000	0,056818
11	56,67	26,67	1,1200000	0,65600000	0,056818
12	0,00	0,00	1,1200000	0,6560000	0,151515

A Tabela 5-2 apresenta um comparativo entre os valores que foram encontrados no trabalho de João Marcelo Albuquerque (2005, p. 11), realizados no MATLAB®, e os valores obtidos na PMSP. Esta comparação serve para testar a confiabilidade da PMSP.

Tabela 5-2. Comparação dos valores encontrados no MATLAB® com os obtidos na PMSP.

Trecho	Tensão (kV)		Fluxo de Potência				Perdas			
	MATLAB	PMSP	P(kW)		Q(kvar)		$\Delta P$ (kW)		$\Delta Q$ (kvar)	
			MATLAB	PMSP	MATLAB	PMSP	MATLAB	PMSP	MATLAB	PMSP
1	4,12989	4,12995	729,8987	729,0914	455,9613	454,4794	3,05948	3,04893	6,92669	6,90281
2	4,11415	4,11421	394,5989	394,6055	231,3014	231,3014	0,87082	0,87081	1,97155	1,97152
3	4,11415	4,11421	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
4	4,12676	4,12685	134,1553	133,3300	98,16195	96,6700	0,09097	0,0893	0,08927	0,08761
5	4,08840	4,12690*	133,3330	133,3300	96,66670	96,6700	0,82248	0*	1,49541	0*
6	4,12517	4,12536	133,3626	133,3692	85,68386	85,68712	0,15661	0,15661	0,09173	0,091733
7	4,12358	4,12378	76,66670	76,67000	44,00000	44,00000	0,02929	0,029243	0,01716	0,01712
8	4,11415	4,11435	337,9027	337,9060	204,6174	204,6141	0,00001	0,00000	0,00001	0,00000
9	4,10974	4,10994	281,0000	281,0000	154,0000	154,0000	0,23603	0,23602	0,28420	0,28419
10	4,11303	4,11323	56,68146	56,68476	26,67535	26,67864	0,01476	0,014763	0,00865	0,00864
11	4,11191	4,11211	56,66670	56,67000	26,66670	26,67000	0,01476	0,01476	0,00865	0,00864
12	4,11303	4,11323	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

\* Resultado do MATLAB® fora do esperado

O erro relativo para todas as comparações não chegou a 0,002%.

## 5.2 Caso 2

Neste caso, utilizou-se o sistema apresentado por Renato Cespedes no seu artigo “*New Method for the Analysis of Distribution Network*”, em 1990, no qual o MSP foi apresentado à comunidade acadêmica pela primeira vez.

Na

Tabela 5-3 são apresentados os dados de cada trecho do alimentador: as cargas ativas e reativas, a resistência e reatância série da linha em por unidade (p.u.). A tensão na subestação é de 1,05 p.u.. Para este exemplo, a tolerância especificada foi de 0,001. (CESPEDES, 1990)

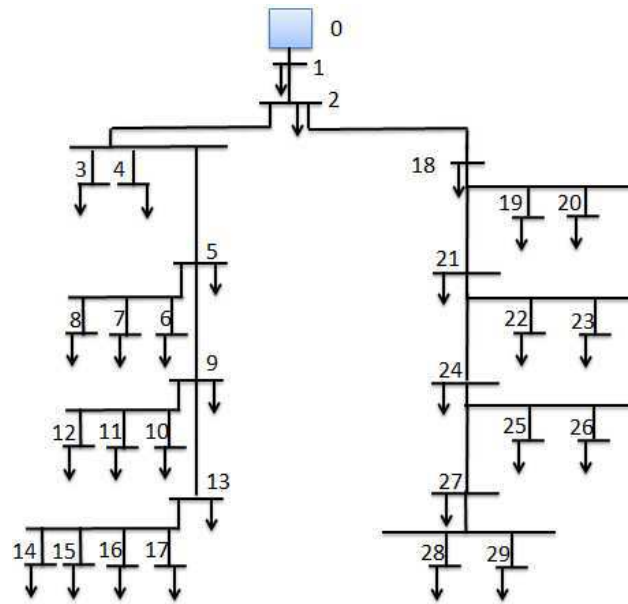


Figura 5.2 - Sistema de distribuição com 29 trechos

Tabela 5-3. Dados do Caso 2

Trecho	Carga		Impedância	
	$P_L(\text{pu})$	$Q_L(\text{pu})$	$R(\text{pu})$	$X(\text{pu})$
1	0	0	0,0236	0,0233
2	0	0	0,0003	0,0002
3	0,16	0,08	0,0051	0,0005
4	0,16	0,08	0,0062	0,0006
5	0	0	0,0032	0,0011
6	0,16	0,08	0,003	0,0003
7	0,16	0,08	0,003	0,0003
8	0,16	0,08	0,0079	0,0008
9	0	0	0,0013	0,0008
10	0,16	0,08	0,0033	0,0003
11	0,16	0,08	0,005	0,0005
12	0,16	0,08	0,0027	0,0003
13	0	0	0,0008	0,0005
14	0,16	0,08	0,0025	0,0003
15	0,16	0,08	0,0026	0,0003
16	0,16	0,08	0,0065	0,0007
17	0,16	0,08	0,0041	0,0004
18	0	0	0,0012	0,0007
19	0,16	0,08	0,0011	0,0001
20	0,16	0,08	0,0061	0,0006
21	0	0	0,0012	0,0008
22	0,16	0,08	0,0008	0,0003
23	0,16	0,08	0,0034	0,0003
24	0	0	0,0009	0,0005
25	0,16	0,08	0,003	0,0003
26	0,16	0,08	0,0032	0,0003
27	0	0	0,0009	0,0006
28	0,16	0,08	0,006	0,0007
29	0,16	0,08	0,0016	0,0002

A Tabela 5-4 apresenta um comparativo entre os valores que foram encontrados no trabalho de Renato Cespedes e os valores obtidos na PMSP.

Tabela 5-4. Comparação dos valores encontrados no MATLAB com os obtidos na PMSP (tensão).

Tensão (pu)			Tensão (pu)		
Trecho	Cespedes	PMSP	Trecho	Cespedes	PMSP
1	0,926474	0,926457	16	0,914711	0,914499
2	0,925186	0,925063	17	0,915146	0,914946
3	0,924259	0,924137	18	0,923047	0,922908
4	0,924060	0,923937	19	0,922839	0,922709
5	0,918671	0,918513	20	0,921936	0,921797
6	0,918127	0,917964	21	0,921415	0,921238
7	0,918127	0,917964	22	0,921253	0,921073
8	0,917229	0,917064	23	0,920792	0,920621
9	0,916616	0,916432	24	0,920597	0,920438
10	0,916010	0,915830	25	0,920056	0,919890
11	0,915693	0,915515	26	0,920015	0,919855
12	0,916115	0,915935	27	0,920176	0,920020
13	0,915899	0,915698	28	0,919065	0,918915
14	0,915441	0,915235	29	0,919886	0,919725
15	0,915418	0,915217			

Tabela 5-5. Comparação dos valores encontrados no MATLAB com os obtidos na PMSP(perdas)

Perdas totais (antes a 1ª iteração)			
Ativas		Reativas	
Cespedes	PMSP	Cespedes	PMSP
0,38489	0,38577	0,36598	0,36592

O erro relativo para todas as comparações não chegou a 0,002%.

## 6 Conclusões

Neste trabalho foram apresentados estudos de caso que ilustram o uso da planilha do Método da Soma de Potências. Foi utilizado, o Excel<sup>®</sup> 2010 que se mostrou uma ferramenta extremamente útil, permitindo automatizar todo o processo de cálculo e exigindo do usuário apenas algumas informações de entrada. Os cálculos baseiam-se nas equações aproximadas desenvolvidas no capítulo 3.

O *Visual Basic* é uma linguagem de programação madura. Ao longo dos anos sofreu muitas atualizações e melhorias tanto em performance quando na adição de

novos recursos e integração com ferramentas de programação modernas. VBA nada mais é do que uma versão moderna do *Visual Basic* portado para a plataforma *Office*. Trata-se de uma linguagem poderosíssima quando usada para os propósitos aos quais se destina.

## Bibliografia

ALBUQUERQUE, J. M. C.. “*Distribuição de energia elétrica: fluxo de carga em sistemas de distribuição*”, 2005.

BARBOSA, A. S., *Fluxo de potência em sistemas de distribuição: Aplicações práticas*. Campina Grande: UFCG, 1995.

CESPEDES, R.. “*New method for the analysis of distribution networks*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, 1990.

DAS, D., KOTHARI, D. P., KALAM, A.. “Simple and efficient method for load flow solutions of radial distribution systems”. Electrical & Power Systems, Vol. 17, No. 5, pp. 335 – 346, 1995.

GUIMARÃES, M. K. A.. “*Uma implementação vetorial do método da soma de potência para aplicação a redes de distribuição*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica - UFPB, Campina Grande, Maio de 2000.

KERSTING, W.H. & MENDIVE, D.L. “*An application of Ladder Network Theory to the Solution of Three-phase Radial Load Flow Problems*”, IEEE Winter Power Meeting, New York, 1976.

KERSTING, W. H.. “Radial distribution test feeders”. IEEE Distribution System Analysis Subcommittee Report, in 2000 PES Summer Meeting, 2000.

RAJAGOPALAN, S.. “*A new computacional algorithm for load flow study of radial distribution system*”, Computer and Electr. Eng. Vol. 5, pp. 225-231, Pergamon Press, 1978

SANTOS, E. N. A., “*Cálculo de queda de tensão e perdas em redes de distribuição de energia elétrica*”. Campina Grande: UFCG, 2013.

SHIRMOHAMMADI, D. et alii. “*A Compensation Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Tansmition Network*”, PICA Conference, 1987.

SOUZA, B. A., *Distribuição de Energia Elétrica, Apostila*. Campina Grande: UFPB, 1997.

## ANEXO

```
Option Explicit
Sub MSP()
Dim a As Integer, i As Integer, j As Integer
a = 0
```

```
'Inicializa na planilha Relatório
Sheets("Relatório").Select
```

```
'Limpa todas as células quando houver uma mudança na rede de distribuição
For i = 8 To 100
  For j = 2 To 12
    Cells(i, j).ClearContents
  Next j
Next i
```

```
'Passa o número de trechos
Call contador(a)
```

```
'Zera os valores das perdas e de iteração
Call Zerar
End Sub
```

```
Sub contador(a)
Dim IsEmp As Boolean, IsEmp2 As Boolean
Dim i As Integer, j As Integer
Dim fp As Double
fp = Sheets("Dados").Cells(8, 11).Value
```

```
'Testa qual linha é vazia
For i = 0 To 100
  ActiveCell = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 2).Value
  IsEmp = IsEmpty(ActiveCell)
  If IsEmp = True Then
    Exit For
  Else
    End If
Next i
```

```
a = i - 1
'Acha Pc e Qc a partir de S
IsEmp2 = IsEmpty(Sheets("Dados").Cells(8, 6).Value)
If (IsEmp2 = False) Then
  For j = 0 To a - 1
    Sheets("Dados").Cells(8 + j, 7).Value = Sheets("Dados").Cells(8 + j,
6).Value * fp
```

```

        Sheets("Dados").Cells(8 + j, 8).Value = Sheets("Dados").Cells(8 + j,
6).Value * Sqr(1 - fp ^ 2)
    Next j
End If

```

```

Call PQtrecho(a)
Call AeB(a)
End Sub

```

```

Sub Iteracao()
Dim IsEmp As Boolean
Dim cont As Integer
Dim a As Double

```

```

Sheets("Relatório").Select

```

```

'Incrementa o valor da iteração
Cells(8, 13).Value = Cells(8, 13).Value + 1

```

```

Range("B8").Select
IsEmp = IsEmpty(ActiveCell)

```

```

For cont = 0 To 100
    If IsEmp = True Then
        Exit For
    Else
        IsEmp = IsEmpty(ActiveCell.Offset(cont, 0))
    End If
Next cont

```

```

a = cont - 1

```

```

Call Pro_iterativo(a)
Call PQtrecho(a)
Call AeB(a)
End Sub

```

```

Sub Zerar()
Dim IsEmp As Boolean
Dim i As Integer, cont As Integer
Dim a As Integer
a = 0

```

```

Sheets("Relatório").Select

```

```

For i = 0 To 100
    ActiveCell = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 2).Value
    IsEmp = IsEmpty(ActiveCell)
    If IsEmp = True Then
        Exit For
    End If
Next i

```

```

Else
End If
Next i

a = i - 1
For cont = 1 To a
    Cells(cont + 7, 4).Value = 0
    Cells(cont + 7, 5).Value = 0
Next cont
Cells(8, 13).Value = 0
Cells(8, 14).Value = 0

Call PQtrecho(a)
Call AeB(a)
End Sub

Sub PQtrecho(a)
    Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, l As Integer
    Dim m As Integer, n As Integer, h As Integer, v As Integer
    Dim de(100) As Integer, para(100) As Integer, nivel(100) As Integer
    Dim R(100) As Double, X(100) As Double, Pl(100) As Double, Ql(100) As
Double
    Dim DelP(100) As Double, DelQ(100) As Double
    Dim pq As Integer
    Dim fluxp(100) As Double, fluxpf1(100) As Double
    Dim fluxq(100) As Double, fluxqf1(100) As Double

    Sheets("Relatório").Select

    'Zera todas as variáveis
    For i = 1 To a
        de(i) = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 2).Value
        para(i) = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 3).Value

        'Multiplica (ohm/comprimento)*(comprimento)
        R(i) = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 4).Value * Sheets("Dados").Cells(i + 7,
9).Value
        X(i) = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 5).Value * Sheets("Dados").Cells(i + 7,
9).Value

        Pl(i) = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 7).Value
        Ql(i) = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 8).Value
        DelP(i) = Cells(i + 7, 4).Value
        DelQ(i) = Cells(i + 7, 5).Value
        Cells(i + 7, 2).Value = de(i)
        Cells(i + 7, 3).Value = para(i)
    Next i

    ' Zerando todos os vetores para os cálculos dos fluxos de potência
    For pq = 0 To a

```



```

nível(pq) = 0
fluxp(pq) = 0
fluxpf1(pq) = 0
fluxq(pq) = 0
fluxqf1(pq) = 0
Next pq

' Cálculo dos níveis dos trechos
' Cálculo feito do primeiro ao último nível (0 indica a subestação)
For j = 1 To a
  If (de(j) = 0) Then
    nível(j) = 1
  Else
    If (de(j) = de(j - 1)) Then
      nível(j) = nível(j - 1)
    Else
      For v = a To 1 Step -1
        If (de(j) = para(v)) Then
          nível(j) = nível(v) + 1
        End If
      Next v
    End If
  End If
  Sheets("Dados").Cells(j + 7, 1).Value = nível(j)
Next j

' Cálculo do fluxo de potência ativa nos trechos
' Nível(a) é o valor de nível máximo e os fluxos devem ser calculado a partir
do maior nível
For k = nível(a) To 1 Step -1
  For l = a To 1 Step -1
    If (nível(l) = k) Then
      For m = a To 1 Step -1
        If (de(l) = para(m)) Then
          fluxp(m) = fluxp(m) + Pl(l) + fluxp(l)
          fluxp(m) = fluxp(m) + DelP(l)
          fluxq(m) = fluxq(m) + Ql(l) + fluxq(l)
          fluxq(m) = fluxq(m) + DelQ(l)
        End If
      Next m
    End If
  Next l
Next k

' Soma com a potência da carga no trecho
For n = 1 To a
  fluxpf1(n) = fluxp(n) + Pl(n)
  fluxqf1(n) = fluxq(n) + Ql(n)
  Cells(n + 7, 6).Value = fluxpf1(n)
  Cells(n + 7, 7).Value = fluxqf1(n)

```

```

Next n
End Sub

Sub AeB(a)
  Dim de(100) As Integer, para(100) As Integer, nivel(100) As Integer
  Dim R(100) As Double, X(100) As Double, P(100) As Double, Q(100) As
Double
  Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, l As Integer, auxperdas As
Integer
  Dim v(100) As Double, A1(100) As Double, B(100) As Double

  Sheets("Relatório").Select

  v(0) = Sheets("Dados").Cells(8, 10).Value * 10 ^ 3

  For i = 1 To a
    de(i) = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 2).Value
    para(i) = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 3).Value
    R(i) = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 4).Value * Sheets("Dados").Cells(i +
7, 9).Value
    X(i) = Sheets("Dados").Cells(i + 7, 5).Value * Sheets("Dados").Cells(i +
7, 9).Value
    P(i) = Cells(i + 7, 6).Value
    Q(i) = Cells(i + 7, 7).Value
  Next i

  For j = 1 To a

    If (de(j) = 0) Then
      nivel(j) = 1
    Else
      If (de(j) = de(j - 1)) Then
        nivel(j) = nivel(j - 1)
      Else
        nivel(j) = nivel(j - 1) + 1
      End If
    End If
  Next j

  ' Cálcula os valores de A, B e V
  For k = 1 To a
    If (nivel(k) = 1) Then
      A1(k) = ((R(k) * P(k)) + (X(k) * Q(k))) * 10 ^ 6 - (0.5 * v(0) ^ 2)
    Else
      For l = 1 To a
        If (de(k) = para(l)) Then
          A1(k) = ((R(k) * P(k)) + (X(k) * Q(k))) * 10 ^ 6 - (0.5 * v(l) ^ 2)
        Exit For
      Else
      End If
    End If
  Next k
End Sub

```

```

Next l
End If

```

```

Cells(k + 7, 8).Value = A1(k) / 10 ^ 6
B(k) = (R(k) ^ 2 + X(k) ^ 2) * (P(k) ^ 2 + (Q(k) ^ 2)) * 10 ^ 12
Cells(k + 7, 9).Value = B(k) / 10 ^ 12
v(k) = Sqr(Sqr(A1(k) ^ 2 - B(k)) - A1(k))
Cells(k + 7, 10).Value = v(k) / 10 ^ 3

```

```

Next k
auxperdas = a

```

```

Call Perdas(auxperdas, v, R, X, P, Q)
End Sub

```

```

Sub Perdas(auxperdas, v, R, X, P, Q)
Dim i As Integer
Dim DelP(100) As Double, DelQ(100) As Double
Sheets("Relatório").Select

```

'Calcula os valores das perdas

```

For i = 1 To auxperdas
DelP(i) = R(i) * (P(i) ^ 2 + Q(i) ^ 2) / v(i) ^ 2
Cells(i + 7, 11).Value = DelP(i) * 10 ^ 6
DelQ(i) = X(i) * (P(i) ^ 2 + Q(i) ^ 2) / v(i) ^ 2
Cells(i + 7, 12).Value = DelQ(i) * 10 ^ 6

```

```

Next i
End Sub

```

```

Sub Pro_iterativo(a)
Dim DelP1(100) As Double, DelP(100) As Double
Dim DelQ1(100) As Double, DelQ(100) As Double
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer
Dim S1 As Double, S2 As Double, S3 As Double, S4 As Double
Dim erro As Double

```

```

Sheets("Relatório").Select

```

```

For i = 1 To a
DelP1(i) = Cells(i + 7, 11).Value
DelQ1(i) = Cells(i + 7, 12).Value
DelP(i) = Cells(i + 7, 4).Value
DelQ(i) = Cells(i + 7, 5).Value

```

```

Next i

```

```

For j = 1 To a
S1 = S1 + DelP1(j)
S2 = S2 + DelQ1(j)
S3 = S3 + DelP(j)
S4 = S4 + DelQ(j)

```

```

Next j

```

'Calcula o erro entre duas iterações  
erro = (S1 - S3) ^ 2 + (S2 - S4) ^ 2

Cells(8, 14).Value = erro

'DelP(i)=DelP1(i)

For k = 1 To a

Cells(k + 7, 4).Value = DelP1(k)

Cells(k + 7, 5).Value = DelQ1(k)

Next k

End Sub