XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco – Brasil

Programa Computacional para a Análise de Parâmetros de Linhas de Distribuição

Lucas Terra Vieira[1]	Maurício Sperandio[1]	Diego Issicaba[1]	Jorge Coelho[1]
[1]LabPlan / UFSC			
lucas@labplan.ufsc.br	sperandio@labplan.ufsc.br	issicaba@labplan.ufsc.br	coelho@labplan.ufsc.br

Palavras-chave: Perdas elétricas, ampacidade, programa computacional, sistemas de distribuição.

Resumo: Este trabalho tem como objetivo apresentar um programa computacional, com uma interface gráfica amigável, desenvolvido em linguagem Java, que realiza o cálculo de parâmetros de linhas de distribuição: resistência, indutância, capacitância transversal e a ampacidade. Destaca-se que os alimentadores de distribuição em campo normalmente não possuem cabos padronizados ou não se têm registros em Bancos de Dados. Deste modo suas características elétricas não são tabeladas e sua ampacidade é desconhecida, pois possuem resistência elétrica, estruturas e características geométricas específicas. Ademais, condições ambientais (principalmente temperaturas positivas ou negativas extremas) têm elevada influência nos parâmetros das linhas de distribuição e, conseqüentemente, no valor máximo de corrente que pode circular nestes cabos. Mesmo em se tratando de cabos padronizados a ampacidade informada pelo fabricante é calculada para condições específicas médias e conservativas - temperatura de operação do cabo e ambiente, velocidade do vento, densidade do ar, etc. Desta forma obtém-se um valor de ampacidade que é, normalmente, aquém do que as condições ambientais permitem. Assim este programa é especialmente útil para se obter resultados mais precisos em estudos de fluxo de carga, a fim de se conhecer o perfil de tensão, carregamentos e perdas elétricas de redes de MT.

1. Introdução

Os parâpmetros de interesse de uma linha de distribuição são ilustrados na Figura 1, na qual se apresenta um circuito equivalente de uma linha em análise.

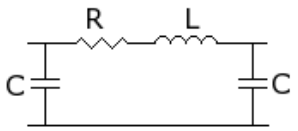

Figura 1 – Circuito equivalente.

Tais parâmetros dependem da geometria espacial das estruturas e alguns outros dados de interesse, como por exemplo a Distância Média Geométrica (*Geometric Mean Distance*). A geometria do problema em estudo é vista na Figura 2 e pode se verificar os fatores geométricos que influenciam na determinação dos parâmetros da linha, são eles: distância das fases entre si, altura da linha em relação ao nível do solo e tipo de cabo a ser utilizado (bitola e material).

Figura 2 – Linha de distribuição típica.

Quanto aos tipos de cabo é importante destacar que em termos de distribuição aérea de energia elétrica existem duas classes de cabo, são estas:

- ACSR – sigla inglesa (*Aluminium Conductor, Steel Reinforced)* para condutor de alumínio com alma de aço.
- AAC – sigla inglesa (*All Aluminium Conductor*) para condutor de alumínio puro.

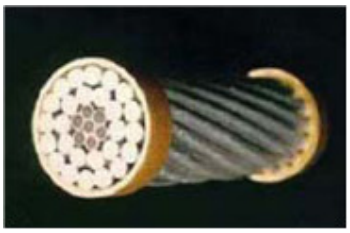

Figura 3 – Condutor ACSR.

A Figura 3 apresenta uma estrutura típica de cabo ACSR, na qual os condutores são torcidos de modo a uniformizar a seção reta do cabo. Por conseguinte, cada camada é torcida em sentido oposto ao anterior, contribuindo para que o cabo não se desenrole e facilitando o empacotamento do mesmo.

Ainda a respeito do cabo é importante informar os seguintes dados para que a determinação dos parâmetros seja feita: raio nominal, GMR (*Geometric Mean Radius* - sigla inglesa pra Raio Médio Geométrico) e resistência em corrente alternada para uma dada temperatura de operação.

2. Teoria de Cálculo

2.1. Resistência

A resistência de um cabo é dada pela relação algébrica entre a resistividade e a área da seção nominal do mesmo, conforme Equação 1.

$$R_{ac} = \frac{\rho}{A}[\Omega / km] \tag{1}$$

Porém, esta relação é precisa apenas para situações em que não existe variação de corrente no cabo ao longo do tempo. Segundo GENERAL CABLE, quando uma corrente alternada percorre um condutor tem-se uma distribuição diferenciada da carga elétrica na seção do cabo. Conforme ilustrado na Figura 4, a carga elétrica tende a se distribuir nas bordas alterando a área efetiva em que circulará a corrente elétrica. Tal fenômeno denomina-se <u>efeito pelicular</u> (ou ainda <u>efeito *skin*</u>). Esse efeito se agrava à medida que se eleva a freqüência da corrente alternada.

Figura 4 – Ilustração do efeito *skin*.

Existe ainda um segundo fator que modifica a resistência de um cabo, o efeito de proximidade. Tal efeito está associado com o campo magnético que estes cabos compartilham. Conforme ilustrado na Figura 5, cargas elétricas tendem a se distribuir de forma concentrada na região em que o campo magnético externo é menos intenso. Isto contribui para que a distribuição de corrente seja diferenciada em relação a um cabo isolado. Por exemplo, existe a situação em que a corrente de cabos próximos circule em direções contrárias. Isto resultará que a metade do cabo nas regiões próximas ao outro possua uma densidade de corrente maior.

Figura 5 – Ilustração do efeito de proximidade.

A expressão empírica que corrige o valor da resistência (obtido inicialmente através da Equação 1) devido ao efeito pelicular e ao efeito de proximidade, é dada pela Equação 2 (GENERAL CABLE).

$$R_{ca} = R_{cc}(1 + Ys + Yp)$$

$$Y_s = \frac{Xs^4}{192 + 0.8Xs^4} \quad \text{onde } X_s^{\,2} = \frac{8\pi f}{R_{cc}} 10^{-4} K_s$$

$$Y_p = \frac{X_p^{\,4}}{192 + 0.8X_p^{\,4}} \left(\frac{d_c}{GMD}\right)^2 \left[0,312\left(\frac{d_c}{GMD}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{X_p^{\,4}}{192 + 0.8X_p^{\,4}} + 0,27} \right] \tag{2}$$

$$\text{onde } X_p^{\,2} = \frac{8\pi f}{R_{cc}} 10^{-4} K_p$$

Em que:

R_{cc} resistência em corrente contínua a uma temperatura [Ω/km];

f freqüência de operação da linha [Hz];

K_s, K_p coeficientes obtidos experimentalmente referentes ao tipo de construção do cabo (vide Tabela 1);

GMD Sigla inglesa para Distância Média Geométrica (*Geometric Mean Distance)* [mm]

d_c diâmetros do condutor [mm].

TABELA 1 - Valores para K_p e K_s (*impregnado)

Tipo de cabo	Kp	Kp*	Ks	Ks*
Setorial	1,0	0,8	1,0	0,8
Encordoado	1,0	0,8	1,0	1,0
Compactado	1,0	0,8	1,0	1,0

O terceiro e último fator que altera a resistência é a temperatura de operação do cabo. Esta alteração é dada por uma relação linear definida na Equação 3 abaixo.

$$R_2 = R_1\left[1 + \alpha(t_1 - t_2)\right] \tag{3}$$

Na qual a denota o coeficiente de variação da resistividade com a temperatura, R_1 é uma resistência de referência para uma dada temperatura t_1 e R_2 é o valor da resistência desejado para uma temperatura t_2.

2.2. Indutância

O fluxo magnético produzido por correntes alternadas produz tanto indutâncias série quanto indutâncias mútua. Esta indutância não produz perda de potência ativa resultando entretanto em uma queda de tensão. Um campo magnético é gerado por uma corrente que circula por um condutor, como expressa matematicamente a lei de Ampère (Equação 4).

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I \tag{4}$$

Resolvendo a Equação 4 com o auxílio da expressão $B=\mu_0\mu_r H$, em que μ_0 e μ_r são respectivamente permeabilidade magnética no vácuo e a permeabilidade relativa, assim como considerando que o fluxo magnético pode ser expresso pelo produto da densidade de fluxo magnético pela seção do elemento tubular do cabo a ser percorrido pela corrente I e, admitindo densidade de corrente uniforme, obtém-se a Equação 5 que representa o fluxo concatenado interno.

$$\lambda_{\text{int}} = \int_0^R \mu_0 \mu_r I \frac{x^3}{2\pi R^4} dx = \frac{\mu_0 \mu_r I}{8\pi} \tag{5}$$

Verifica-se através da Equação 5 que o <u>fluxo concatenado interno é independente de características construtivas do cabo</u> e igual para cabos como alumínio e cobre, visto que a permeabilidade relativa destes materiais é unitária. Portanto, para estes materiais citados a indutância interna é dada por $L_{int}=0{,}5\cdot 10^{-7}$[H/m]. Quanto à indutância devido ao fluxo externo, resolve-se a Equação 4 utilizando a expressão $B=\mu_0\mu_r H$. Desta forma a Equação que contempla a indutância externa é dada por

$$\lambda_{ext} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{D1}^{D2} \frac{1}{x} dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) [Wb/m] \tag{6}$$

Obedecendo ao princípio da superposição a <u>indutância total</u> do cabo (<u>Equação 7</u>) passa a ser dada pela soma das indutâncias externa e interna, considerando a relação entre fluxo e indutância ($L=\lambda I$).

$$L = 0{,}2 \ln\left(\frac{GMD}{GMR}\right) [mH/km] \tag{7}$$

2.3. Capacitância

A capacitância (C) da linha de distribuição se deve à presença de cargas elétricas (Q) e da diferença de potencial entre as linhas adjacentes (V). Estas grandezas se relacionam através da Equação 8.

$$C = \frac{Q}{V} \tag{8}$$

O fato de existirem cargas elétricas circulando ao longo da linha (corrente elétrica) produz um campo elétrico radial ao eixo principal da linha de distribuição. Com a resolução da lei de Gauss (Equação 9), pode-se estabelecer a relação entre campo elétrico e carga elétrica.

$$2\pi\varepsilon \oint E dS = Q \tag{9}$$

É possível ainda estabelecer uma relação entre a diferença de potencial com o campo elétrico, que fora calculado anteriormente. Tal relação é expressa pela Equação 10.

$$V = \int_{D1}^{D2} \vec{E} d\vec{x} \tag{10}$$

Utilizando-se da Equação 9 e da Equação 10, obtém-se a seguinte equação, na qual **r** representa o raio do cabo.

$$V = \int_{r}^{D2} \frac{q}{\varepsilon 2\pi x} dx = \frac{q}{\varepsilon 2\pi} \ln\left(\frac{D2}{r}\right) \tag{11}$$

Utilizando o princípio da superposição, pode-se calcular a diferença de potencial de uma linha monofásica, conforme a seguir:

$$V_{ab} = V_{ab}^{q_a} + V_{ab}^{q_b} + V_{ab}^{q_c} = \frac{q_a}{2\pi\varepsilon} \ln\frac{D_{12}}{r_a} + \frac{q_b}{2\pi\varepsilon} \ln\frac{r_b}{D_{12}} + \frac{q_c}{2\pi\varepsilon} \ln\frac{D_{23}}{D_{13}} \tag{12}$$

Assim, fazendo uso da Equação 12 e da Equação 8, pode-se obter a <u>capacitância de uma linha trifásica</u>, expressa em (13).

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln\left(\frac{GMD}{r}\right)} \tag{13}$$

De acordo com FAULKENBERRY (1996, p.381-387), é necessário ainda levar em conta o efeito que a Terra produz em relação à capacitância. Tal efeito é no sentido de aumentar a capacitância da linha. Isto se deve ao fato da proximidade da linha de distribuição com o solo alterar os formatos das linhas do campo elétrico que antes foram consideradas como normais às superfícies equipotenciais. À medida que a linha de distribuição se aproxima do solo maior é essa distorção do campo elétrico. Este efeito pode ser corrigido utilizando o método das imagens que propõe espelhar a linha de distribuição em relação ao solo. Finalmente, levando-se em conta o efeito da Terra para linhas trifásicas (Figura 6), a <u>capacitância de uma linha trifásica corrigida</u> é:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln\left(\frac{GMD}{r}\right) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{13}H_{23}}}{H_1 H_1 H_2}\right)} \tag{14}$$

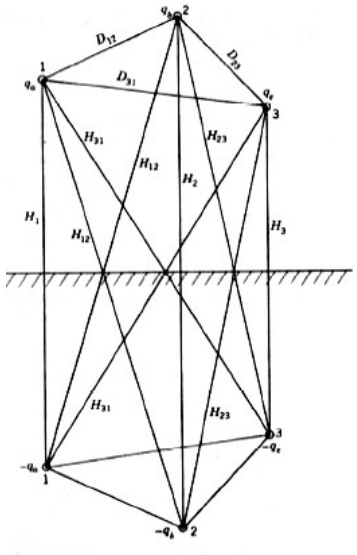

Figura 6 – Método das Imagens.

2.4. Ampacidade

A ampacidade é um parâmetro da linha de distribuição que determina o limite de carregamento de cada cabo. No caso específico de linhas aéreas este parâmetro depende unicamente de questões climáticas (temperatura ambiente, densidade do ar, velocidade do vento e condutividade térmica). Isto é, deve-se obedecer um limite térmico. Desta forma, em regime permanente pode-se estabelecer um equilíbrio entre o calor absorvido e o calor perdido por convecção e irradiação. Isto se traduz matematicamente na Equação 15, de acordo com estudos de KAGAN (2005, p-60-61).

$$Q_{JOULE} + Q_{SOL} = Q_{CONVECÇÃO} + Q_{IRRADIAÇÃO} \tag{15}$$

3. Programa Computacional

O programa computacional foi desenvolvido para o cálculo de parâmetros de linhas de distribuição através de uma interface gráfica amigável. Optou-se por criar pacotes para as duas famílias de cabos mais usados em distribuição de energia elétrica, o AAC e o ACSR. Cada pacote destas famílias de cabo possui diferentes membros. Através de Programação Orientada ao Objeto criou-se classes para cada tipo de cabo. Estas classes possuem apenas atributos, não contendo métodos. Estes atributos são os seguintes: resistência em corrente alternada a 20ºC ou 75ºC em O por quilômetro, raio nominal do condutor em milímetros, GMR (raio médio geométrico) em milímetros e a ampacidade em ampères. Estes dois últimos são dados fornecidos pelo fabricante para os respectivos cabos.

Logo abaixo, o leitor pode constatar uma classe desenvolvida para o cabo *Waxwing* (ACSR) que ilustra os atributos relacionados acima.

```
package ACSR;
public class Waxwing {
   public double resistencia=0.2168;
   public double raio_condutor=7.73;  //mm
   public double ampacidade=449;
   public double GMR= 6.035; //mm

    public Waxwing() {
    }

}
```

Com a seleção do cabo desejado pelo usuário o programa instanciará a respectiva classe coletando os dados necessários do cabo de interesse para que sejam realizados os cálculos pertinentes. Existe ainda uma classe denominada *Calculo* que é responsável pelos cálculos do programa. Esta classe diferentemente da classe de cabos contém apenas métodos e não atributos.

O programa consiste de uma janela principal com uma barra de menus no canto superior esquerdo (Figura 7.a-b), onde é possível acessar opções de cálculo e de ajuda.

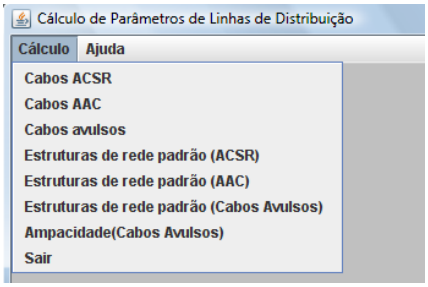

Figura 7.a – Barra de menus.

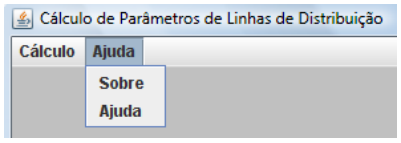

Figura 7.b – Barra de menus.

A partir da barra de menus é possível acessar outras janelas que possuem os campos em que o usuário informará os dados para o cálculo dos parâmetros de acordo como o tipo de cabo desejado. Dispõe-se também de opções de janela para estruturas de rede padrão, nas quais as informações como altura da linha em relação ao solo e espaçamento dos cabos não necessitam ser informados pelo usuário.

A Figura 8 apresenta o fluxograma do programa computacional desenvolvido.

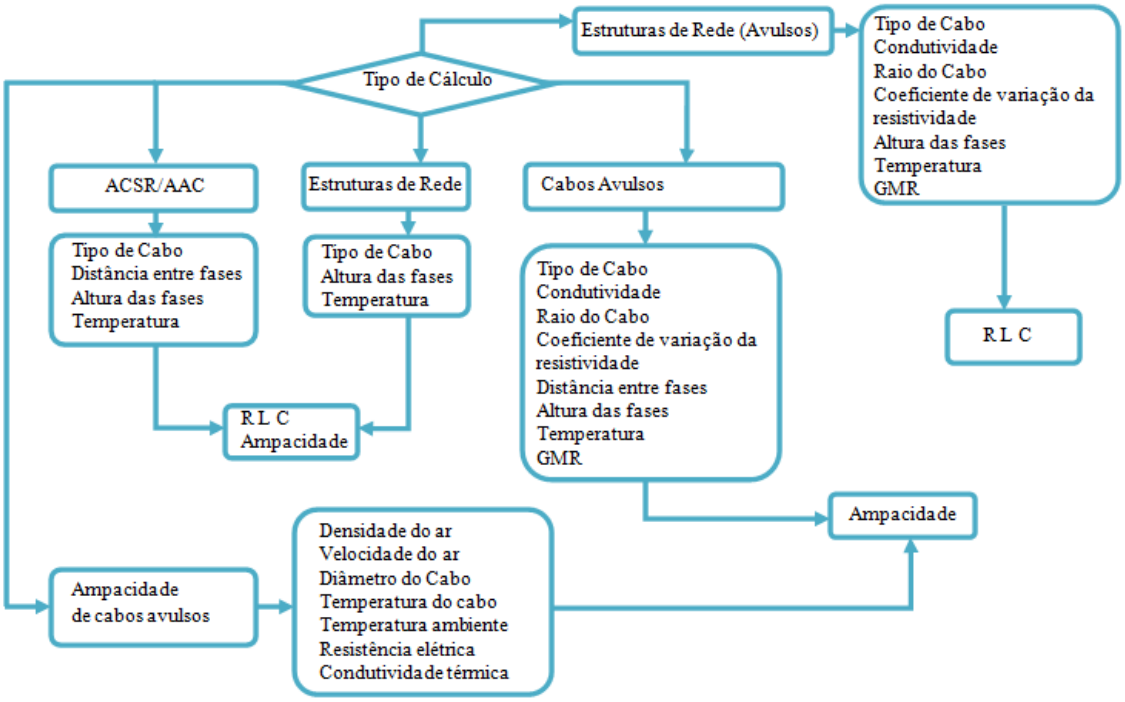

Figura 8 – Fluxograma para Cálculo de Parâmetros de Linhas de Distribuição.

Na Figura 9 pode-se observar a janela para cálculos de parâmetros de cabos ACSR com estruturas padrão. Em uma lista no canto superior esquerdo o usuário encontra à disposição diferentes cabos ACSR. Neste caso basta informar os dados requeridos e escolher o tipo de cabo e estrutura. Com estes dados basta selecionar o botão "Calcula" que os parâmetros serão calculados e exibidos nos respectivos campos no canto inferior esquerdo. Nota-se ainda na Figura 13.a que o dado 'ampacidade' também é informado ao usuário. Este dado é obtido para uma determinada condição do meio dependente de questões climáticas.

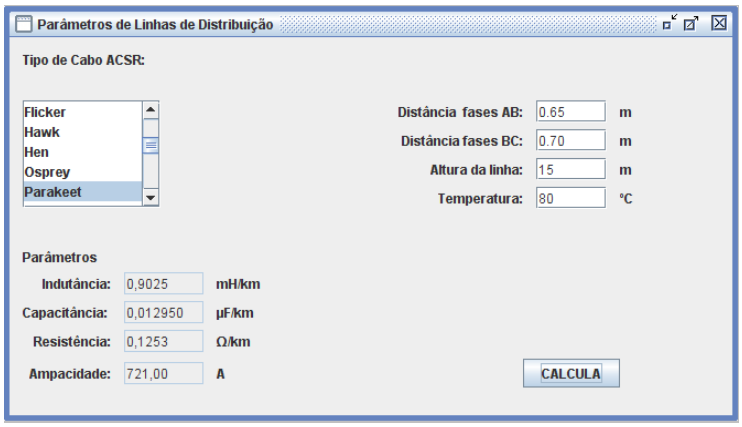

Figura 9 – Janela para Cálculo de parâmetros de cabos ACSR.

4. Resultados

Foram realizados alguns estudos comparativos com diferentes configurações de rede de forma a analisar a sensibilidade dos parâmetros de linha em estudo, ou seja, identificar quais variáveis mais influenciam nos valores da indutância, resistência, capacitância e ampacidade de linhas de distribuição.

Em um primeiro estudo variou-se a altura das estruturas de rede. Sabe-se previamente que a variável altura afetará somente a capacitância, sendo os outros parâmetros livres de sua influência. Observa-se na Figura 10.a que a máxima diferença relativa no valor da capacitância é de 0.016%. Desta forma, a alteração da altura mostra-se desprezível na determinação da capacitância de linhas de distribuição aéreas usuais.

Para identificar a sensibilidade da resistência para com a temperatura, variou-se a temperatura do cabo ACSR *Waxwing* sob o intervalo de 40 ℃ 80 ℃, conforme Figura 10.b. Verificou-se um incremento linear de aproximadamente 1,5% na resistência do cabo a cada 5 ℃.

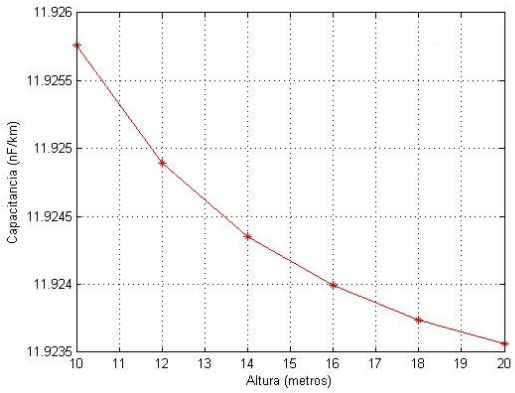

Figura 10.a – Comportamento da capacitância (nF/km) em função da altura de linha com a seguinte configuração: Cabo Waxwing e espaçamento de 0,65 metros entre as fases.

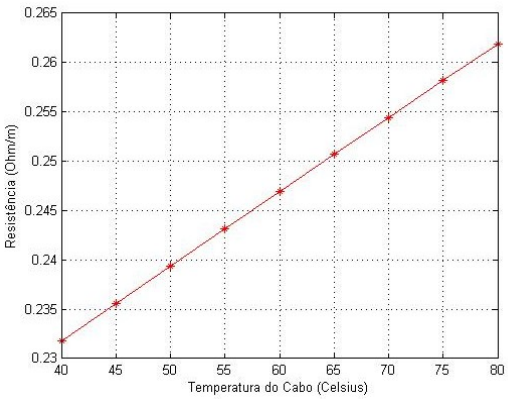

Figura 10.b – Comportamento da resistência em função da temperatura de operação do cabo.

É comum que em uma determinada rede haja uma mudança de estruturas ao longo de um alimentador, isto é, mudanças nas distâncias entre as fases, alterando desta forma o *GMD*. Observa-se na Figura 11.a que a mudança da distância entre fases, com um passo de 0,05 metro e utilizando um cabo *Waxwing*, exerce maior influência para distâncias menores. A partir do momento que as

distâncias se tornam maiores, o aumento desta variável perde a influência no valor da indutância. O mesmo se observa em relação à capacitância, conforme Figura 11.b.

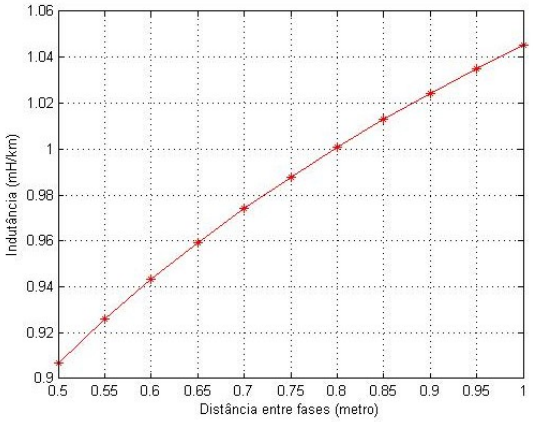

Figura 11.a- Comportamento da indutância em função do distanciamento das fases.

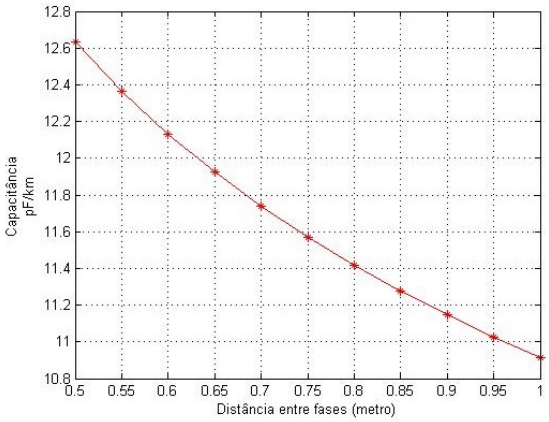

Figura 11.b - Comportamento da capacitância em função do distanciamento das fases.

Também é comum que ao longo da rede haja mudança da bitola dos cabos, causando mudanças na indutância e capacitância devido à alteração do GMR e do raio. Observando-se as Figuras 12.a-b, constata-se que o aumento do *GMR* e do raio têm menor influência quando o valor dessas variáveis crescem. Outro parâmetro que se modifica com escolha do cabo é a resistência que chega a se alterar em 41,6% do valor da resistência para uma mesma temperatura de operação, ao se comparar um cabo *Waxwing* (raio= 7,73mm) e um cabo *Grossbeak* (raio= 12,57 mm).

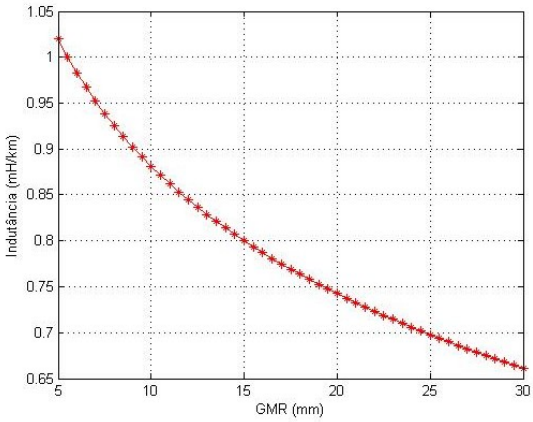

Figura 12.a - Comportamento da indutância em função do *GMR*.

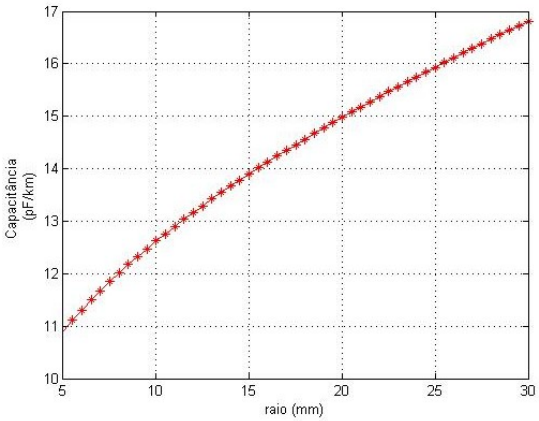

Figura 12.b - Comportamento da capacitância em função do raio.

A respeito da mudança de cabos pode-se optar pela utilização de cabos AAC e cabos ACSR ao longo do alimentador. Esta opção pode produzir mudanças que podem ser constatadas inspecionando as Figuras 13.a-c., na qual os parâmetros indutância e capacitância podem variar em torno de 14%. Entretanto a resistência diminuiu significativamente em 66% no exemplo. Comparando-se com os cabos ACSR a máxima diferença relativa na resistência obtida foi de 318%, nos casos estudados.

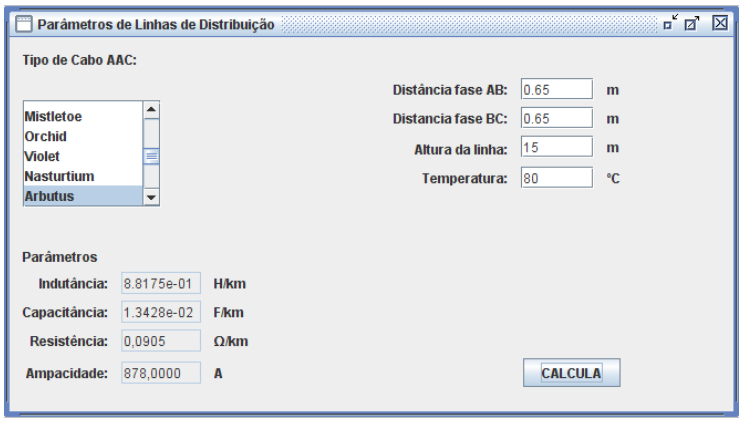

Figura 13.a – Cabo *Arbutus*. Dados: Resistência de 0,0905 ohm (a 80 °C), raio do condutor de 13,03 mm, GMR de 9.967 mm.

Com respeito à ampacidade dos cabos, verifica-se pela Equação 15 que se trata de um parâmetro dependente da densidade do ar, condutividade térmica, temperatura ambiente, temperatura do cabo, velocidade do cabo, diâmetro do cabo e resistência elétrica do cabo. As variáveis com maior possibilidade de variação são o diâmetro e a resistência – devido à troca de cabo (bitola e/ou material), a velocidade do vento e a temperatura ambiente – devido à sazonalidade destes eventos.

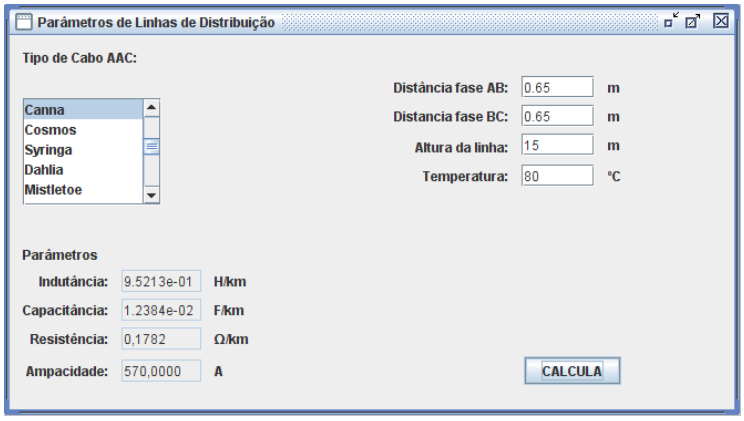

Figura 13.b – Cabo *Canna*. Dados: Resistência igual a 0,1782 ohm (a 80 °C), raio do condutor igual a 9,19 mm, GMR igual a 7,01 mm.

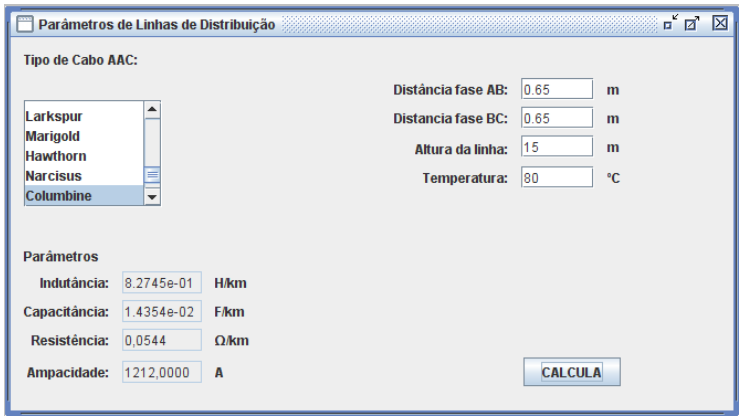

Figura 13.c – Cabo *Columbine*. Dados: Resistência de 0.0544 ohm (a 80 °C), raio do condutor de 17,02 mm, GMR de 13,076 mm.

As Figuras 15 e 16 foram obtidas sob as seguintes condições de operação: densidade do ar igual a 1,17 kg/m^3, diâmetro do cabo igual a 20 mm, resistência igual a 0,2 **Ω**, temperatura do cabo igual a 80 ℃ e temperatura ambiente igual a 30 ℃.

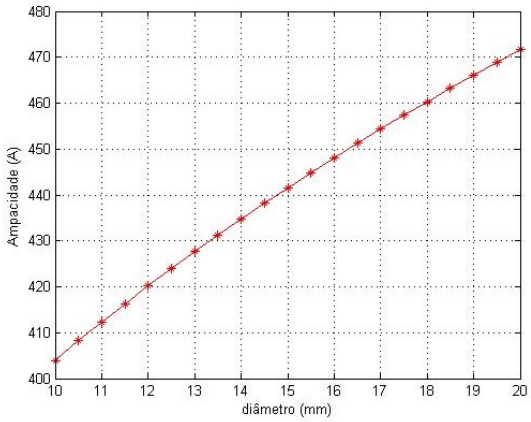

Figura 14.a - Dependência da ampacidade em relação ao diâmetro do cabo.

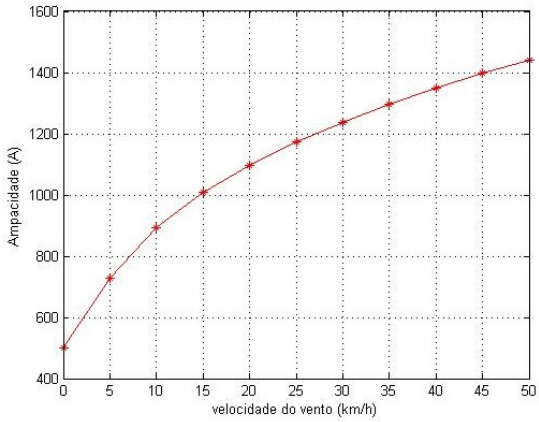

Figura 14.b - Dependência da ampacidade em relação à velocidade do vento.

A Figura 15.a evidencia que o aumento da bitola do cabo permite um maior fluxo de corrente e que há uma relação aproximadamente linear entre ampacidade e o diâmetro do cabo. De fato, o aumento da bitola do cabo permite que este irradie calor com maior facilidade resultando em uma circulação de corrente maior em relação a um cabo de menor bitola. A Figura 14.b mostra que o vento possui uma função de fluido refrigerante para o cabo, permitindo que circule uma quantidade maior de carga elétrica com o aumento da velocidade do vento.

A temperatura é uma variável que pode variar de uma maneira bastante intensa durante um mesmo dia influenciando na ampacidade do cabo. Há uma relação linear entre ampacidade e temperatura ambiente (Figura 15.a). Se a temperatura decai a ampacidade sofre um aumento devido ao resfriamento provocado ao cabo pelo ambiente.

Como pode se observar na Figura 15.b a mudança de resistência elétrica do cabo é a alteração que resultou em maiores valores de ampacidade. Nota-se também que com o aumento da resistência essa influência na ampacidade tende a diminuir.

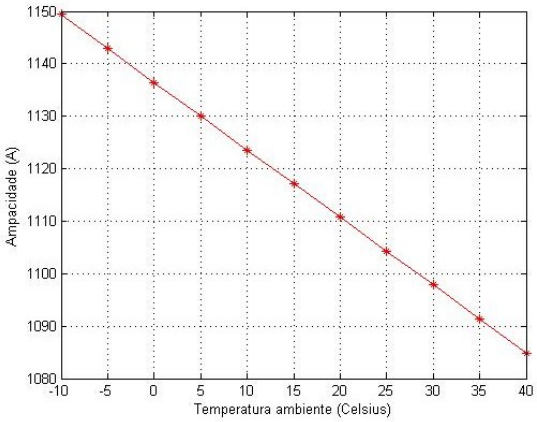

Figura 15.a - Dependência da ampacidade em relação à temperatura ambiente.

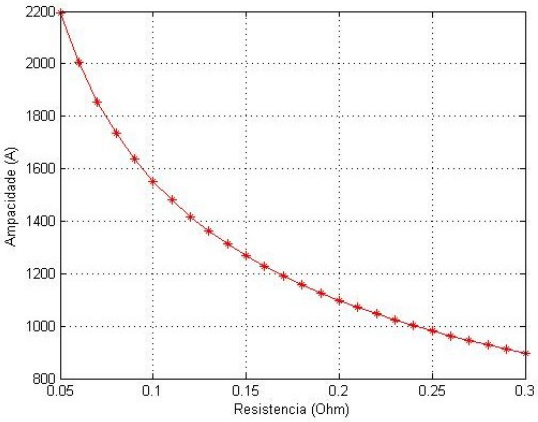

Figura 15.b - Dependência da ampacidade em relação à resistência.

5. Conclusões

Neste aplicativo destaca-se a sua portabilidade – independência de plataforma, podendo ser utilizado desde em equipamentos portáteis desde *handhelds* a computadores de mesa – e o fato de possuir uma interface gráfica que torna o cálculo de parâmetros de linhas de distribuição mais rápido e flexível. É interessante ressaltar que este programa não se limita aos cabos tabelados usualmente utilizados nas redes elétricas, pois há a opção de estabelecer os parâmetros de um cabo específico, principalmente no que diz respeito à resistência elétrica e à ampacidade. Há ainda a possibilidade do cálculo da ampacidade de cabos já tabelados para diferentes condições climáticas, uma vez que a ampacidade destes cabos é fornecida para condições específicas de velocidade do vento, temperatura e densidade do ar.

Quanto aos estudos feitos em relação à sensibilidade dos parâmetros de linha, a capacitância se mostrou pouco sensível às mudanças na altura das estruturas de linhas aéreas de distribuição, podendo esta variável ser desprezada nos cálculos. A resistência elétrica se mostrou pouco sensível à temperatura de operação do cabo, mas não se deve desprezá-la pois variações extremas de temperatura são possíveis e afetam a resistência de forma mais perceptível. A variação do distanciamento entre as fases leva a mudanças aproximadamente lineares para a capacitância e indutância, porém essa alteração tem pouca importância, visto que é incomum um espaçamento maior que 1,5 metros. O parâmetro que está suscetível a maiores mudanças é a ampacidade, pois esta é dependente de fatores climáticos que constantemente se alteram ao longo do dia. A velocidade do vento se mostrou relevante pois esta colabora para que não haja um desbalanço no limite térmico e assim maior corrente é admitida pelo cabo.

Finalmente no seu dia-a-dia na operação dos sistemas de distribuição, o operador não dispõe de todos os valores tabelados dos parâmetros de linha. Então, a principal aplicação do programa computacional está relacionada à obtenção destes parâmetros de linha. Conseqüentemente, haverá uma maior exatidão no cálculo de perdas e segurança na determinação do carregamento máximo dos alimentadores, entre outros.

6. Referências

GENERAL CABLE, AC Resistence, Skin and Proximity Effect. Acesso em 13/03/2008 www.generalcable.co.nz.

CASTRO, Carlos A.; Apostila de Sistemas de Energia I, UNICAMP. Acesso em 13/03/2008, disponível em: www.dsee.fee.unicamp.br/~ccastro.

FAULKENBERRY, Luces M; COFFER, Walter – Electrical Power Distribution and Transmission. Prentice-Hall, 1996, p. 361-387.

KAGAN, Nelson – Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Edgard Blücher, 2005, p-60-61.

CAMARGO, C. Celso de Brasil – Transmissão de Energia Elétrica Aspectos Fundamentais. Editora da UFSC, 2006, p. 107-114.