

Desenvolvimento de Sistema de Gerenciamento e Controle de Dados e Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão

L. C. Zanetta Jr, C. E. M. Pereira e E. Fontana

Resumo- O objetivo do projeto é a implementação de um aplicativo para controle de dados e parâmetros elétricos de linhas de transmissão da Cteep. O aplicativo desenvolvido facilita as tarefas de consulta, cálculo e alteração de parâmetros de linha além de permitir o cálculo a partir de medições realizadas pelo SSC (Sistema de supervisão e controle). O aplicativo permite comparações dos parâmetros calculados teoricamente com os parâmetros presentes nos arquivos de entrada dos programas Anarede e Anafas e fornece como dados de saída modelos das linhas para esses programas e também três modelos para o programa ATP.

Palavras-chave—Linhas de transmissão, parâmetros de linha, cálculo experimental.

I. INTRODUÇÃO

A metodologia utilizada foi inicialmente realizar um levantamento bibliográfico sobre métodos de obtenção de parâmetros de linha de transmissão a partir de medições elétricas nos terminais da linha.

Além de alguns métodos vistos nesse levantamento foram propostos alguns métodos que foram avaliados a partir de informações de tensão e corrente calculadas teoricamente. Os métodos eram baseados no equacionamento das grandezas elétricas da linha por meio de quadripólos com a solução das equações, para a obtenção dos parâmetros, sendo feita por otimização, método dos mínimos quadrados ou solução de sistemas de equações não lineares.

Uma característica comum dos métodos propostos é a não necessidade de que as medições de tensão e corrente não estejam sincronizadas já que o SSC fornece dados sem sincronização.

Para avaliar a robustez dos métodos, já que para medições exatas (medições calculadas teoricamente) todos os métodos foram exatos, foi feito um estudo com essas medições sendo acrescidas de erros calculados teoricamente.

A segunda fase do projeto foi o desenvolvimento do aplicativo para controle do banco de dados de linhas da Cteep.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Este trabalho foi financiado pela Cteep – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.

L. C. Zanetta Jr trabalha no LSP-USP Laboratório de Sistemas de Potência da Escola Politécnica da USP (e-mail: lzanetta@pea.usp.br).

E. Fontana trabalha na Cteep – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.

Esse aplicativo foi elaborado com a versão livre Turbo Delphi da Borland.

O aplicativo permite a consulta e cálculo de parâmetros de linha, além de comparação de parâmetros com decks de Anarede e Anafas. O aplicativo fornece como dados de saída, além dos parâmetros da linha, os modelos para uso nos programas Anarede, Anafas e ATP, sendo que para o ATP podem ser escolhidos três diferentes modelos para a linha, incluindo o modelo com parâmetros variáveis com a frequência.

O algoritmo de cálculo experimental de parâmetros incorporado ao aplicativo foi testado a partir de conjuntos de medições realizadas pelo SSC. Os resultados obtidos foram suficientemente satisfatórios, dentro de hipóteses simplificadas que tiveram que ser adotadas.

II. METODOLOGIA DO APLICATIVO

O aplicativo foi desenvolvido para o ambiente Windows na linguagem Delphi, usando a versão livre Turbo Delphi e a linguagem SQL, o banco de dados das linhas da Cteep será parcialmente montado, mas os parâmetros deverão ser calculados conforme a necessidade, devendo também ser ajustados dados como nome e numeração de barras para os programas Anarede e Anafas e as coordenadas das barras para a exibição de mapa das as linhas.

O aplicativo tem os recursos básicos divididos em telas específicas:

- Entrada, consulta de dados e cálculo de parâmetros das linhas
- Entrada e consulta de dados de barras
- Entrada e consulta de dados de condutores e cabos-guarda
- Entrada e consulta de dados de torres
- Visualização de mapas
- Comparação de parâmetros
- Cálculo de parâmetros a partir de medições

O aplicativo foi desenvolvido de forma a facilitar o controle dos dados e parâmetros de forma simples e intuitiva e fornecendo o modelamento das linhas para utilização nos programas Anarede, Anafas e ATP.

A. Modelo do banco de dados

A tabela principal do banco é a tabela de linhas, que se relaciona diretamente com a tabela de condutores, que contém os condutores e cabos-guarda e com a tabela de torres.

A segunda tabela mais importante é a tabela de `para`, permitindo a solução do problema de a linha poder ser de circuito simples ou duplo, sendo que no caso de circuito duplo, a linha pode estar ligada a duas, três ou quatro barras.

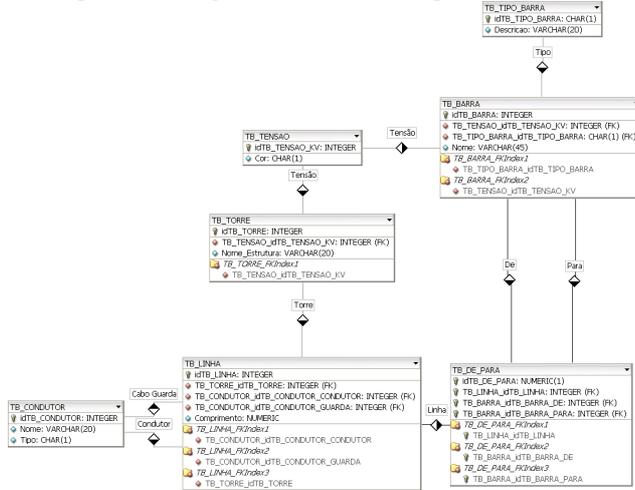


Fig. 1. Modelo do banco de dados.

B. Método experimental adotado

O algoritmo implementado no aplicativo é o apresentado no item 2.1 da nota técnica 2, que por facilidade é apresentado resumidamente a seguir.

A figura 8.2 representa o modelo π da linha e os fasores não sincronizados.

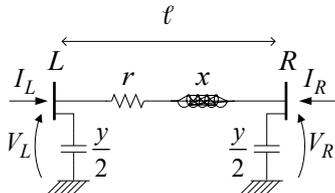


Fig. 2. Linha de transmissão - modelo π .

Esse método direto foi desenvolvido para usar medição sincronizada de fasores, no entanto o sistema de supervisão e controle fornece dados não sincronizados dos dois terminais da linha, sendo necessário fazer a sincronização dos dados dos dois terminais da linha.

A defasagem entre os dois terminais é tratada como um ângulo, não como tempo, podendo-se escrever:

$$\begin{aligned} V'_R &= V_R e^{-j\theta} \\ I'_R &= I_R e^{-j\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

que são os fasores de tensão e corrente do terminal remoto sincronizados:

A defasagem pode ser calculada com a seguinte expressão:

$$\theta = \text{Re} \left(j \ln \left(\frac{V_L - (r + jx) \ell I_L}{V_R} \right) \right) \quad (2)$$

Onde os valores de r e x devem ser os do projeto da linha (calculados a partir da geometria da torre e da resistividade do solo medida ou estimada).

Essa expressão considera o modelo de linha impedância série (π nominal sem capacitâncias: $A=1, B=(r + jx) \ell$):

Os parâmetros de seqüência positiva podem ser obtidos

utilizando-se as seguintes expressões [1], onde se calculam inicialmente a impedância característica e a constante de propagação:

$$Z_c = \sqrt{\frac{V_L^2 - V_R'^2}{I_L^2 - I_R'^2}} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\cosh \left(\frac{V_L I_L - V_R' I_R'}{V_L I_R' - V_R' I_L} \right)}{\ell} \quad (4)$$

onde:

V_L, V_R, I_L, I_R são os fasores de tensão e corrente e corrente nos terminais local e remoto (sincronizados) da linha; ℓ é o comprimento da linha de transmissão.

A partir de (3) e (4) pode-se obter os parâmetros por km sendo a impedância e a admitância shunt da linha da linha por unidade de comprimento dadas por:

$$z = \gamma Z_c \quad \text{e} \quad y = \frac{\gamma}{Z_c} \quad (5)$$

O sistema de supervisão e controle fornece as seguintes informações:

- data e hora da medição
- V_L, V_R Tensões nos terminais local e remoto: kV eficaz de linha (módulo)
- Tensão no terminal: kV eficaz de linha (módulo)
- P_L, P_R, Q_L e Q_R Potências ativas e reativas nos terminais local e remoto (MW e MVar)

A partir desses valores calculam-se as tensões de fase nos terminais e as correntes de linha.

$$V_L = \frac{V_L}{\sqrt{3}}, \quad V'_R = \frac{V_R}{\sqrt{3}} e^{-j\theta}$$

$$I_L = \left(\frac{P_L + jQ_L}{\sqrt{3}V_L} \right)^*, \quad I'_R = \left(\frac{P_R + jQ_R}{\sqrt{3}V_R} \right)^* e^{-j\theta}$$

III. APLICATIVO DESENVOLVIDO

O aplicativo é de fácil utilização e os recursos são divididos por telas conforme apresentado a seguir:

- Controle de dados de linha
 - Consulta / Alteração / Inclusão / Exclusão
 - Cálculo de parâmetros
 - Montagem arquivo Line Constants
 - Execução do programa ATP
 - Leitura do arquivo de saída do Line Constants
 - Montagem de trechos de arquivo para os programas Anarede, Anafas e ATP
- Busca de linhas
- Controle de dados de barra, condutores e torres
 - Consulta / Alteração / Inclusão / Exclusão
- Comparação de dados
 - Seleção de decks Anarede e Anafas
 - Busca de linhas
- Visualização do mapa das linhas
 - Seleção por tensão
 - Escolha do "zoom"
 - Visualização de dados básicos de barra e de linha
- Cálculo de parâmetros usando medições P,Q,V

- Seleção do arquivo de medições
- Busca da linha correspondente no banco de dados
- Cálculo dos parâmetros a partir das medições

A. Dados de Linhas

A tela inicial do programa é a seguinte.

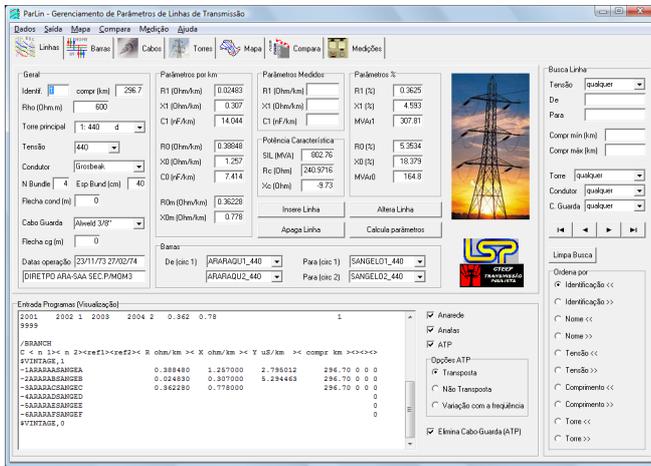


Fig. 3. Tela de dados de linhas.

As funções realizadas nessa tela são as seguintes:

- Busca detalhada de linhas
- Escolha da forma de ordenação da lista de linhas
- Inserção, eliminação e alteração de linha
- Cálculo de parâmetros da linha
- Escolha dos tipos de saída para os aplicativos elétricos

1) Busca detalhada de linhas

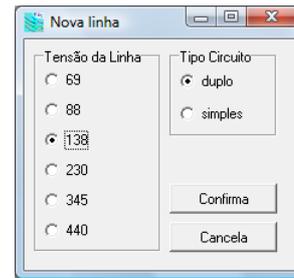
A busca de linhas é feita a partir dos critérios: trecho do nome de barras De e Para, tensão, torre, comprimento, condutor e cabo-guarda. Pode ser feita qualquer combinação de campos.

Um exemplo de busca seria localizar a linha Araraquara-Bauru 440, que pode ser feita por exemplo da seguinte forma, não importando a ordem de De e Para:

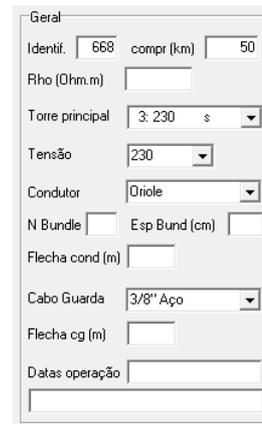


2) Inserção de linha

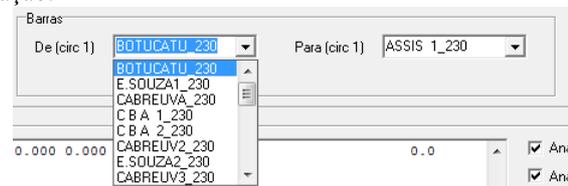
Para incluir uma nova linha no banco de dados usa-se o botão insere linha que carrega a tela de escolha de dados básicos da linha:



A partir da escolha são selecionadas as barras e torres que poderão ser utilizadas. Para esse caso, seriam disponibilizadas para escolha as torres permitidas para a tensão 138 kV com circuito duplo e as barras de 138 kV.



A numeração da linha é criada automaticamente e o usuário deve em seguida definir as seguintes informações, ou preenchendo diretamente ou escolhendo nas caixas de combinação.



Após a definição de todos os dados deve-se gravar as informações no banco de dados e calcular os parâmetros.

3) Cálculo de parâmetros da linha

Deve-se usar o botão *calcula parâmetros* para calcular os mesmos quando não estão sendo exibidos, o que acontece após alteração de dados da linha ou criação de uma linha nova.

O cálculo de parâmetros é feito pela rotina line constants do programa ATP, que é chamado automaticamente pelo aplicativo ParLin.

O aplicativo lê o arquivo de saída do Line Constants para exibir os parâmetros, gravar no banco de dados e exibir o tipo de saída selecionado pelo usuário, como trechos de decks dos programas Anarede e Anafas.

4) Escolha dos tipos de saída para os aplicativos elétricos

Uma das aplicações do programa é fornecer dados de entrada para aplicativos elétricos como Anarede, Anafas e ATP. Para escolha dos trechos de dados de entrada desses

botão de confirmação ou mover para o próximo condutor, usando os botões de navegação ou as setas do teclado:

Identif.	Nome	Tipo	Descrição	Rcc (Ohm/km)	Dext (cm)	Dint (cm)	MCM	Formação
2	Drake	c	condutor 795.0 MCM 26X7	0.077672	2.8143	1.036	795	26X7
3	Grosbeak	c	condutor 636.0 MCM 26X7	0.096934	2.5146	0.921	636	26X7

Para os cabos-guarda o funcionamento da alteração é o mesmo.

D. Dados de Torres

A tela de controle de dados de torres é a seguinte.

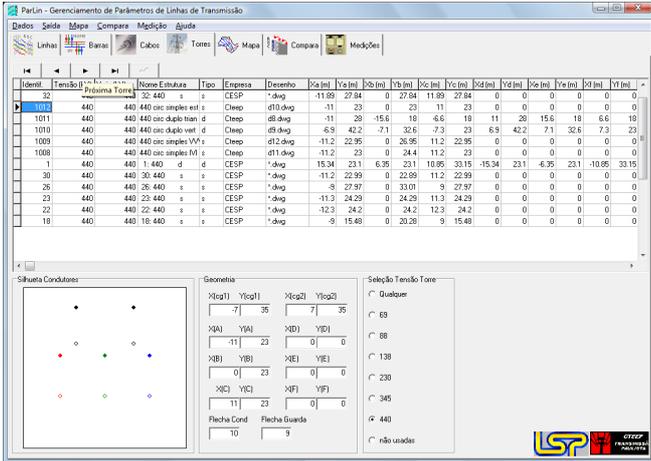


Fig. 6. Tela de dados de torres.

As funções realizadas nessa tela são as seguintes:

- Alteração de dados das torres
- Seleção de torres por tensão
- Visualização da silhueta

1) Alteração de dados das torres

A filosofia é a mesma dos dados de cabos, ou seja, os dados são alterados movendo-se para outra.

E. Mapa

A seguir a tela de controle de visualização do mapa esquemático das linhas e barras.

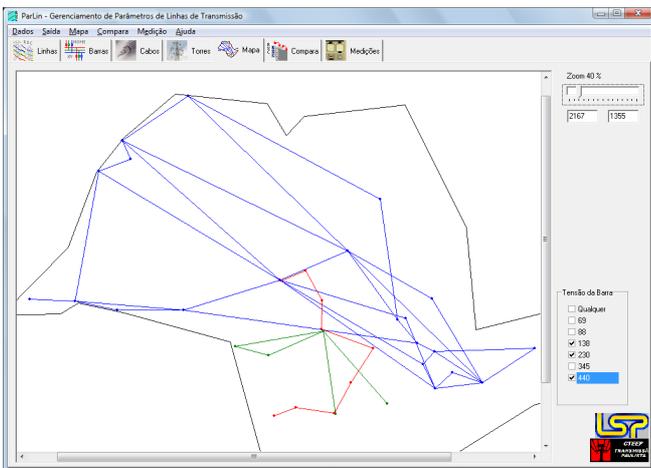


Fig. 7. Tela de visualização do mapa.

As funções realizadas nessa tela são as seguintes:

- Navegação no mapa
- Controle de zoom
- Seleção de tensões

1) Navegação no mapa

A navegação pelo mapa, no caso de zoom alto, em o mapa não cabe na tela, é feita com as barras de rolagem horizontal e vertical.

Ao se passar o mouse próximo a uma barra, é exibido o nome da mesma e ao se clicar próximo a uma linha ou barra, são exibidas algumas informações da barra ou da linha.

F. Comparação de parâmetros

A tela de comparação de parâmetros é a seguinte:

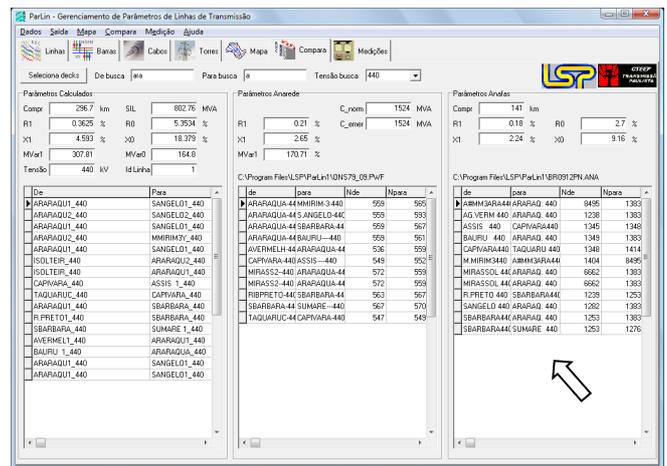


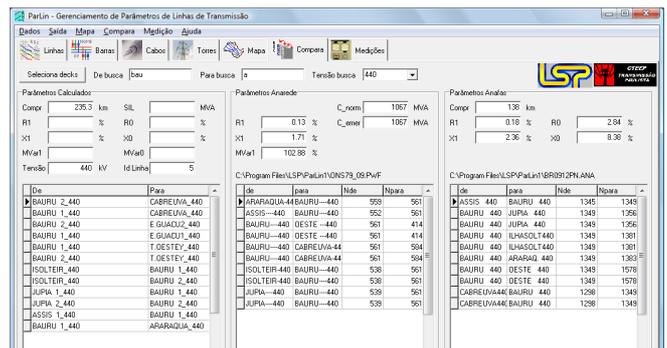
Fig. 8. Tela de comparação de parâmetros.

As funções realizadas nessa tela são as seguintes:

- Seleção de decks de Anafas e Anafas
- Busca de linhas por tensão e extremidade

1) Busca de linhas por tensão e extremidade

Um exemplo de utilização é a comparação de parâmetros da linha Bauru – Araraquara 440, onde a lista vai se reduzindo assim que os critérios vão ficando mais específicos:



Pode-se verificar para essa linha que os dados calculados e os presentes nos decks do ONS são bastante próximos.

G. Cálculo de parâmetros a partir de medições

As medições realizadas pelo SSC são fornecidas em formato Excel e salvas em arquivo texto, podendo ser lidos pelo aplicativo ParLin.

A seguir a tela de cálculo de parâmetros a partir das medições do SSC:

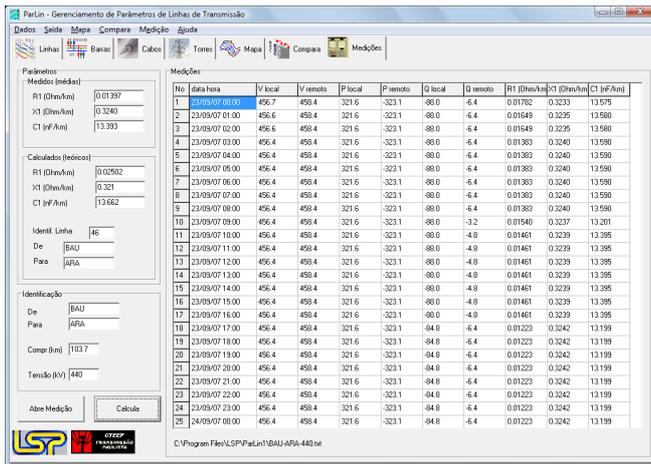


Fig. 9. Tela de cálculo de parâmetros a partir de medições.

As funções realizadas nessa tela são as seguintes:

- Abertura do arquivo de medições
- Localização da linha no banco de dados (se necessário)
- Cálculo experimental dos parâmetros

Para o caso da linha Embu Guaçu-Aldeia da Serra 345, no arquivo de medições a identificação é EMG-SUL, devendo *De* e *Para* ser alterados manualmente para GUA e SER por exemplo.

Os parâmetros são calculados para cada medição mas é feito o cálculo da média dos parâmetros, que são apresentados em:

Parâmetros

Medidas (médias)

R1 (Ohm/km) 0.01397

X1 (Ohm/km) 0.3240

C1 (nF/km) 13.393

Esses parâmetros médios calculados são gravados no banco de dados podendo ser vistos na tela de linhas. Para linhas sem medições disponíveis ou utilizadas esses dados ficam em branco na tela de linhas.

IV. AVALIAÇÃO DO ALGORITMO DE CÁLCULO EXPERIMENTAL

Foram feitos testes para as quatro planilhas de medições recebidas, para a linha Nova Avandava - São José do Rio Preto 138 kV circuito duplo, para a linha Bauru-Araquara 440 kV, circuito simples e para a linha Embu Guaçu - Aldeia da Serra, 345 kV, circuito duplo.

O formato do arquivo texto, gerado a partir da planilha é o seguinte, normalmente compreendendo o dia inteiro, amostrado a cada 30 ou 60 minutos:

	R1		X1		C1	
	Ω/km	Erro %	Ω/km	Erro %	nF/km	Erro %
Teórico	0,09802	-	0,461	-	9,58	-
Circ 1	0,14537	48,3	0,4703	2,0	11,006	14,9
Circ 2	0,14483	47,8	0,4714	2,2	11,651	21,6

Tabela 10.3 – Comparação parâmetros– NAV – SJR 138.

	R1		X1		C1	
	Ω/km	Erro %	Ω/km	Erro %	nF/km	Erro %
Teórico	0,02502	-	0,321	-	13,622	-
Medido	0,01397	-44,2	0,3240	0,9	13,393	-1,7

Tabela 10.5 – Comparação parâmetros– BAU-ARA 440.

	R1		X1		C1	
	Ω/km	Erro %	Ω/km	Erro %	nF/km	Erro %
Teórico	0,0397	-	0,364	-	12,254	-
Medido	0,03857	-2,8	0,3685	1,2	14,209	15,9

Tabela 10.7 – Comparação parâmetros– EMG-SUL 345, circ 1.

Os resultados mostraram o método de obtenção experimental de parâmetros implementado no aplicativo apresentou resultados relativamente satisfatórios, com erros maiores para as resistências, com os parâmetros obtidos não diferindo muito dos valores calculados teoricamente, principalmente as reatâncias em que foram obtidos valores bastante precisos, com erro máximo de 2,2%. A grande vantagem do algoritmo implementado no aplicativo é que o mesmo usa fórmulas diretas sem a necessidade de uso de técnicas de otimização.

Além disso, como não há disponibilidade de medições feitas por PMU's foi possível utilizar dados não sincronizados fornecidos pelo SSC (Sistema de Supervisão e Controle), sendo feita uma sincronização que utiliza os parâmetros teóricos da linha.

V. CONCLUSÕES

Os objetivos do projeto foram alcançados, sendo disponibilizado para a Cteep um aplicativo de controle de parâmetros dos dados das linhas, com o banco de dados preenchido a partir da conversão do banco de dados recebido no formato texto.

O aplicativo contém um módulo para cálculo de parâmetros de seqüência positiva com base nas medições do SSC sendo esses parâmetros gravados no banco de dados.

O aplicativo fornece recursos como comparação de parâmetros com decks dos programas Anarede e Anafas, para os quais fornece os modelos de cada linha.

O programa também realiza o modelamento da linha para o programa ATP conforme o tipo de modelo escolhido pelo usuário.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Jiang, J.A.; Yang, J. Z.; Lin, Y. H.; Liu, C. H.; Ma, J.C.; "An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines Part I: Theory and Algorithms," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 2, April 2000, pp 486-493.
- [2] Shengfang, L.; Chunju, F.; Weiyong, Y.; Cai Huarong; Li, K.K.; "A new phase measurement unit (PMU) based fault location algorithm for double circuit lines," Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, 2004. vol. 1, 5-8 April 2004 pp.188 – 191.
- [3] ATP – *Alternative Transients Program*, Leuven, 1982.
- [4] Cepel – *Anarede – Programa de Análise de Redes*.
- [5] Cepel – *Anafas – Programa de Análise de Falhas Assimétricas*.
- [6] Mathworks. Matlab, High-performance numeric computation and visualization software: Reference guide, .Imprensa Natick, Mass, 1992.Nota 1 Cteep param
- [7] Convênio Cteep-FUSP Desenvolvimento de Sistema de Gerenciamento e Controle de Dados e Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão, Nota Técnica 1 - Revisão bibliográfica, 2007.
- [8] Convênio Cteep-FUSP Desenvolvimento de Sistema de Gerenciamento e Controle de Dados e Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão, Manual do Aplicativo ParLin, 2007.