

Software para Automação de Projetos para Proteção de Linhas de Transmissão Aérea, Tensão 69 e 138 kV, Contra Sobretensão de Origem Atmosférica

L.C. Zanetta Jr, C.E.M. Pereira, PEA-USP, W. Pinheiro, COOESA, C.A. Carvalho, J.C. Carneiro CPFL

Resumo- O presente projeto tem como objetivo desenvolver trabalhos de implementação de um aplicativo para análise técnica econômica comparativa de alternativas para redução do índice de desligamentos de linhas de 69 e 138 kV da CPFL devido a descargas atmosféricas.

O aplicativo desenvolvido é baseado num banco de dados que contém possíveis soluções para redução do índice de desligamentos e gerencia as tarefas de criação e análise de alternativas.

Palavras-chave—Linhas de transmissão, descargas atmosféricas, desempenho de linhas, pára-raios ZnO, transitórios eletromagnéticos.

I. INTRODUÇÃO

O presente projeto tem como objetivo desenvolver trabalhos de implementação de um aplicativo computacional para automatização de estudos de redução do índice de desligamentos de linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas, por meio de medidas como aplicação de pára-raios ZnO, redução da resistência de aterramento de torres críticas, instalação de cabos-guarda para determinados tipos de estrutura ou soluções combinadas envolvendo medidas dos três tipos citados. O aplicativo também considera dados de custos da aplicação das medidas e a redução de custos devido à diminuição do número de desligamentos, fornecendo dados como tempo de retorno do investimento, de forma a auxiliar na decisão da alternativa mais conveniente para a redução do índice de desligamentos.

Em relação ao projeto de P&D anterior “Desempenho de Linhas de Transmissão que Utilizam Pára-Raios ZnO”, o qual teve como objetivo desenvolver metodologia e ferramenta computacional para cálculo do desempenho de linhas de transmissão que utilizem pára-raios de ZnO, este projeto tem os seguintes objetivos principais:

- Estabelecer uma correlação entre os desligamentos históricos devido à ação das descargas atmosféricas com o ti-

po da estrutura e sua localização, índice cerâmico da região, resistências de aterramento, bem como efetuar um levantamento criterioso dos trechos críticos de desligamentos por família de linhas;

- Caracterizar os principais parâmetros das estruturas, resistência de aterramento das mesmas e seu impacto nos desligamentos, bem como obter modelos para a impedância característica dos fios de aço nas estruturas de madeira, através de programas computacionais como o CDEGS, disponível na CPFL. Para as estruturas em aço convencionais, os valores típicos estão disponíveis na literatura e também deverão ser comparados com simulações de campos eletromagnéticos. Esta fase do trabalho visa contribuir com uma melhor caracterização dos parâmetros de estruturas, o que se constitui em uma inovação do projeto;
- Determinar por meio de exaustivas simulações, com o auxílio da metodologia desenvolvida no projeto anterior, através de programas de transitórios eletromagnéticos (ATP) e rotinas auxiliares para o cálculo de índices de desempenho, usando os parâmetros das estruturas padronizadas caracterizados acima. Serão obtidos os índices de desempenho esperado das estruturas tanto para a situação sem medidas adicionais de proteção, como pára-raios de linha, para diferentes valores de resistência de aterramento, bem como para o caso de implementação de medidas corretivas de forma otimizada, com a instalação de pára-raios em 1, 2 ou 3 fases na mesma torre. Neste projeto foi dado um enfoque especial às linhas de 69 kV, com problemas sensíveis de desempenho a surto atmosférico.
- De posse do comportamento das famílias de estruturas e resistências de aterramento, frente a sobretensões devidas a descargas atmosféricas, foi desenvolvido um Software para automação de projeto, técnico e econômico, para proteção de linhas de transmissão 69 e 138 kV, contra estas sobretensões, caracterizando-se como uma contribuição inovadora que deverá agilizar decisões, assim como permitir um acompanhamento mais efetivo das soluções implementadas em campo. O aplicativo computacional considera medidas corretivas como aplicação de pára-raios ZnO, redução da resistência de aterramento de torres críticas, instalação de cabos-guarda para determinados tipos de estrutura ou soluções combinadas envol-

Este trabalho foi financiado pela CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz.

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

W. Pinheiro trabalha na COOESA - Cooperativa de Trabalho de Engenheiros, Arquitetos e Técnicos Especializados

C.A. Carvalho e J.C. Carneiro trabalham pela CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz.

vendo os três tipos de medidas citados. O aplicativo também considera dados de custos da aplicação das medidas e a redução de custos devido à diminuição do número de desligamentos, fornecendo informações financeiras como o tempo de retorno do investimento.

II. METODOLOGIA

A metodologia adotada compreende os seguintes tópicos:

- Levantamento do estado da arte e análise bibliográfica, incluindo trabalhos de aplicação de pára-raios ZnO para redução do índice de desligamentos, estudos de confiabilidade de pára-raios e modelamento de elementos da rede para simulação de descargas atmosféricas em programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos.
- Pesquisa inicial, destinada a adquirir todas as informações possíveis sobre dados das diferentes configurações das linhas de transmissão, estruturas, cabos, níveis cerâmicos, resistências de aterramento etc. Análise dos históricos de desligamentos ocorridos por sobretensões atmosféricas, levantamento das regiões críticas, assim como efetuar medições das resistências de aterramento das estruturas críticas.
- Pesquisa aplicada, com a caracterização dos parâmetros das famílias de estruturas padronizadas e seu impacto nos desligamentos, bem como efetuar exaustivas simulações, com o auxílio da metodologia desenvolvida em pesquisa anterior. Aferição de impedâncias características de torres, principalmente as estruturas em madeira, com programas de cálculo de campos eletromagnéticos, que é um aspecto inovador. Análise de resistências de aterramento e medições de casos críticos. Com os parâmetros das estruturas padronizadas caracterizados acima, será obtido o desempenho comparativo esperado das linhas existentes, com a aplicação de pára-raios ZnO em 1, 2 ou 3 fases em uma mesma torre, variando-se a resistência de aterramento. Os resultados deverão ser organizados e tabelados em função de características parame-trizadas
- Elaboração do Software para automação de projetos de proteção de linhas de transmissão 69 e 138 kV, contra sobretensões atmosféricas, utilizando as informações colhidas na fase de simulações. Desse modo, com a informação dos parâmetros da linha em cada projeto, perfil das resistências de aterramento ou resistência média das estruturas, informadas pelo projetista, serão obtidos de forma eficiente os ganhos esperados para cada alternativa, assim como os seus respectivos custos de instalação. Assim, o projetista contará com uma ferramenta auxiliar poderosa para proteção otimizada de

linhas contra descargas atmosféricas, utilizando pára-raios ZnO. Elaboração de um guia de aplicação de pára-raios de linha no sistema CPFL.

Apesar de serem dados em valores absolutos, os índices de desligamentos calculados serão usados no aplicativo para uma análise comparativa de alternativas ou seja, os resultados com aplicação de medidas como instalação de pára-raios

ZnO, redução da RAT e instalação de cabos-guarda, apresentarão melhores desempenhos, que devem ser considerados como ganhos relativos, se comparados ao caso base que não contempla medidas corretivas, uma vez que nem sempre temos dados suficientes para calibrar todos os parâmetros de forma a reproduzir fielmente os resultados de campo.

Dessa forma, eventuais discrepâncias entre os valores fornecidos pelo programa e dados estatísticos reais não prejudicam a verificação da melhor alternativa mesmo se a comparação for feita em termos de valores absolutos, diminuição de custos e tempo de retorno.

A análise dos valores de índice de desligamentos obtidos mostra que os parâmetros mais importantes da linha quanto à influência no índice de desligamentos são:

- dados da torre
- quantidade e localização dos pára-raios
- RAT
- resistividade do solo

Para a base de dados, foram obtidas alguns valores médios representativos, conforme apresentado na tabela 1:

TABELA 1 – VALORES MÉDIOS DE ÍNDICE DE DESLIGAMENTOS. deslig. / 100 km / ano

tensão	pára-raios ZnO	média	desvio padrão
todas	todos os casos	33,326	25,829
	todos os casos	40,359	27,716
	não instalados	60,744	18,300
	fase c	49,593	21,882
	fases b e c	37,481	23,549
69 kV	todos os casos	13,618	21,994
	todos os casos	29,810	24,078
	não instalados	46,578	23,423
	fase c	36,346	20,039
	fases b e c	22,853	18,820
138 kV	fases a, b e c	13,463	19,410

Na tabela 1 verifica-se que os desvios padrão são altos, e isto ocorre porque nessas médias estão incluídos todos os valores de RAT, que é um parâmetro muito importante para o valor do índice de desligamentos. Pode-se verificar também que as linhas de 69 kV apresentam um desempenho frente a descargas atmosféricas pior que as linhas de 138 kV, que também apresentam uma redução maior no índice de desligamentos com a instalação de pára-raios ZnO quando comparada com as linhas de 69 kV.

III. APLICATIVO DESENVOLVIDO

O software é baseado em um banco de dados que representa a grande maioria das linhas de transmissão da CPFL de 69 kV e 138 kV, incluindo alternativas de melhoria de resistência de aterramento de estruturas e de instalação de pára-raios ZnO, em linhas de 69 e 138 kV e de cabos pára-raios em linhas com torre HS-1-PR de 69 kV.

Os dados necessários da linha sob estudo, a serem informados pelo projetista, para utilização do software são:

- Tipo de torre básica utilizada na linha;
- Condutor utilizado;
- Tabela de locação das torres, com a posição de cada tor-

re em km, a resistência de aterramento e a resistividade do solo para cada torre;

- Configurações de instalação de pára-raios ZnO, ou seja, em uma, duas ou três fases;
- Presença de cabo-guarda (para torre HS-1-PR 69 kV);
- Valores de nível isocerâmico, a serem obtidos no mapa isocerâmico da área de concessão da CPFL.
- Custos de redução de RAT (material e mão de obra);
- Custos de instalação de pára-raios ZnO (material e mão de obra);
- Custos de instalação de cabo-guarda (material, mão de obra e eventual custo necessário para reforço mecânico de alguma estrutura);
- Custo do eventual desligamento da linha para instalação da melhoria;
- Custos das interrupções (temporária e permanente);
- Custo evitado devido ao não pagamento de multa.

Caso o projetista não informe os custos descritos acima o software irá utilizar valores médios constantes no seu banco de dados.

A primeira etapa de utilização do software será a definição dos dados da linha e dos custos. Existe no software uma tabela de locação que poderá ser importada de uma planilha do Excel e salva no formato texto.

A partir da tabela de locação, o software divide a linha em trechos a serem definidos pelo projetista, com valores médios de RAT, resistividade do solo e vão.

O projetista deverá em seguida informar o perfil dos valores de nível isocerâmico ao longo da linha.

A cenário inicial para o cálculo do índice de desligamentos é o caso da linha sem pára-raios ZnO instalados e com os valores medidos de resistividade do solo e RAT.

A partir do cenário inicial serão propostas alternativas para melhoria do índice de desligamentos como, por exemplo, a instalação de pára-raios ZnO, redução da RAT de torres selecionadas ou instalação de cabo guarda (para torre HS-1-PR 69 kV).

As alternativas serão comparadas em termos do custo necessário para a implantação da melhoria e dos custos evitados devido a redução do índice de desligamentos e com o não pagamento de multa, custo e tempo de retorno do valor investido para a redução do índice. A escolha da melhor alternativa será baseada nas prioridades estratégicas da CPFL para cada linha.

A tabela a seguir mostra as possibilidades de combinação entre tipo de torre e condutor.

TABELA 2 – TORRES E CONDUTORES DISPONÍVEIS.

	69 kV	138 kV
torres	HS-1-PR, A, AP-1, J1, P1	K-1, D-1, S-1, HS
condutores	Penguim	Drake, Hawk, Linnet

Os parâmetros disponíveis na tabela 1 cobrem a grande maioria de configurações de linhas da CPFL.

OBS - Para a torre HS-1-PR pode-se utilizar um ou nenhum cabo-guarda.

IV. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O exemplo de aplicação do programa será feito para um caso fictício com uma linha de 69 kV de 7.3 km com estrutura predominante HS-1-PR, inicialmente com cabo-guarda não instalado.

A silhueta da torre HS-1-PR, é apresentada na figura a seguir.

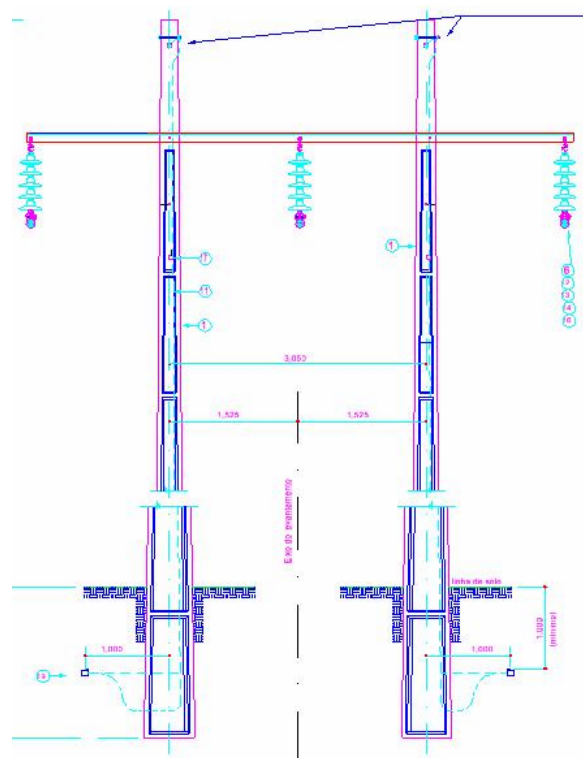


Figura 1. Silhueta da torre HS-1-PR.

Como a linha não possui cabo-guarda, o índice de desligamentos depende basicamente da geometria da estrutura e do número de descargas para a terra, podendo ser reduzido somente com a instalação de pára-raios ZnO.

Caso seja instalado um cabo-guarda por torre o nível de desligamentos deve cair significativamente.

A instalação de cabo-guarda será comparada, em termos técnicos e econômicos, com a instalação de pára-raios ZnO. Além disso será verificado o ganho com a redução da RAT de torres críticas.

Serão consideradas também alternativas com soluções combinadas.

O nível cerâmico utilizado foi de 80 dias de trovoadas por ano. A seguir tem-se a tabela de locação das torres:

TABELA 3 – TABELA DE LOCAÇÃO DAS TORRES.

n° torre	pos. (km)	RAT (Ω)	rho (Ω.m)	n° torre	pos. (km)	RAT (Ω)	rho (Ω.m)
1	0	52.3	5072	21	3.405	39.9	1019
2	0.05	65.3	5047	22	3.58	22.5	969
3	0.11	35.4	4991	23	3.76	15.1	1068
4	0.262	86.4	4998	24	3.895	37.2	916
5	0.405	60.2	5095	25	4.07	28.5	936
6	0.56	99	4918	26	4.455	39.9	977
7	0.76	57.2	5060	27	4.63	30.6	969
8	0.95	104.2	5097	28	4.81	18.6	951
9	1.135	66.8	5022	29	4.975	42.9	1028
10	1.315	26.3	4955	30	5.3	22.1	1014
11	1.5	50.8	5035	31	5.445	41	1087

12	1.705	45.2	4995
13	1.895	109.7	4915
14	2.075	42	5099
15	2.255	22.6	4967
16	2.435	26.5	4913
17	2.66	91.2	4904
18	2.86	105.9	4902
19	3.035	95	4909
20	3.2	70	4900

32	5.59	15.4	1024
33	5.9	42.5	989
34	6.085	38.1	1073
35	6.4	24.2	951
36	6.575	24.6	1045
37	6.765	27.8	993
38	6.915	41.3	986
39	7.105	24.8	990
40	7.3	30.0	1000

Da tabela de locação verifica-se, quanto à RAT e à resistividade do solo, dois trechos, o primeiro da torre 1 à torre 20 com 3,2 km e o segundo da torre 21 a 40 com 4,1 km.

O programa se inicia com a seguinte tela:

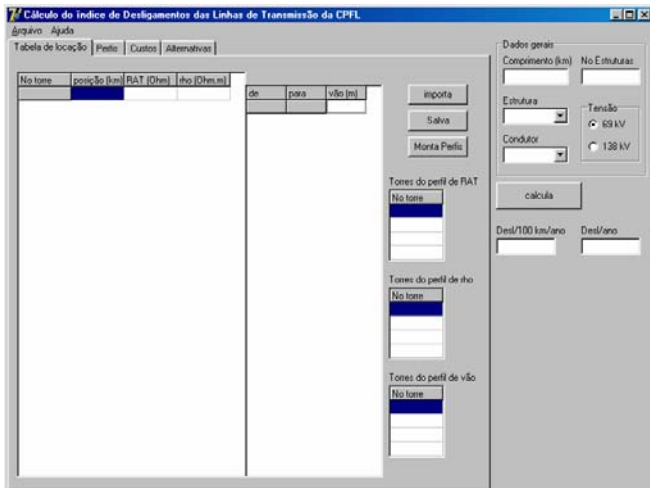


Figura 2. Tela Inicial.

A primeira ação a ser feita é a importação da planilha com a tabela de locação, clicando-se no botão importar.

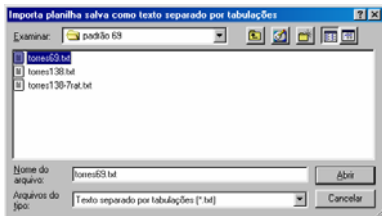


Figura 3. Importação da tabela de locação.

Após a importação, o programa preenche os campos comprimento da linha, número de estruturas e tabela de vãos.

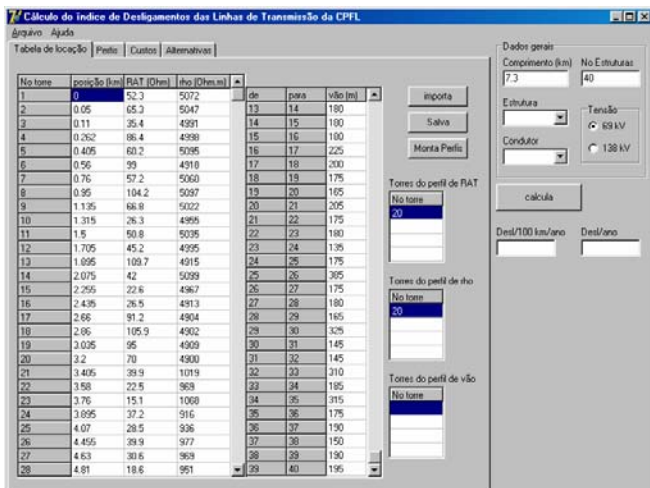


Figura 4. Tela da tabela de locação.

Como a linha será dividida em trechos, devido a diferenças claras nos valores de RAT e resistividade, nos campos Torres do perfil de RAT e Torres do perfil de rho foram inseridos o número da torre imediatamente anterior à mudança de trecho (trecho 1: torres 1 a 20, trecho 2: torres 21 a 40).

Com a definição dos trechos, que pode ser feita de forma independente para RAT, rho e vão, deve-se clicar no botão Monta Perfis, para cálculo da média dos trechos. Em seguida a programa alterna automaticamente para a tela de perfis, que tem o seguinte aspecto:

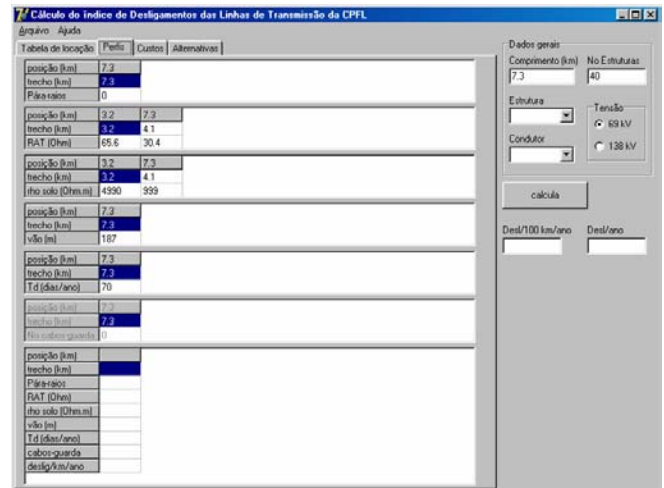


Figura 5. Tela de perfis.

Deve ser informado o tipo de estrutura e condutor e o nível cerâmico, que inicialmente é preenchido com o valor 70. Antes de se iniciar os cálculos de índice de desligamentos, deve-se preencher ou verificar os valores nos campos da tela de custos, que já apresenta valores indicativos que no entanto podem ser alterados pelo usuário, inclusive a multa evitada que inicialmente é considerada nula.

É importante salientar que o custo de interrupções indicado não inclui a energia não fornecida mas somente as tarefas de eliminação do defeito e restabelecimento da linha.

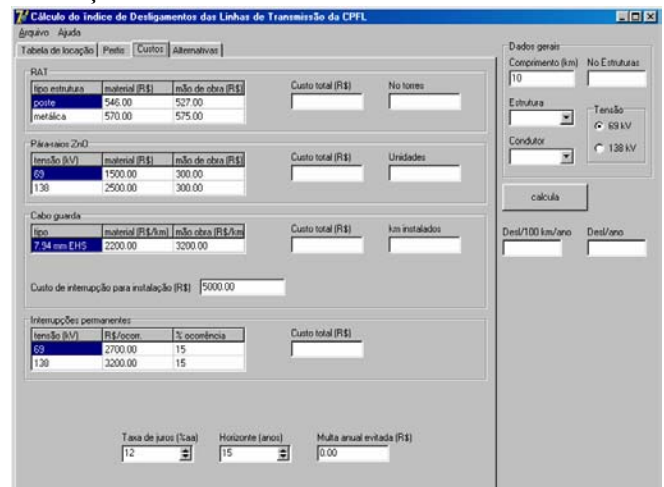


Figura 6. Tela de custos.

Para essa linha considera-se que o índice de desligamentos será reduzido de forma a se evitar uma multa anual de R\$ 30.000,00 e que a cada desligamento haverá um custo de

energia não fornecida de R\$ 20.000,00 devendo o campo R\$/ocorr. para a tensão de 69 kV ser alterado de 27.00.00 para 227.00.00.

O custo de interrupção para instalação será considerado igual à da energia não fornecida em uma interrupção permanente, ou seja R\$ 20.000,00.

Deve-se então clicar no botão calcula para obter o índice de desligamentos do caso base, com o programa abrindo a seguir a tela de alternativas.

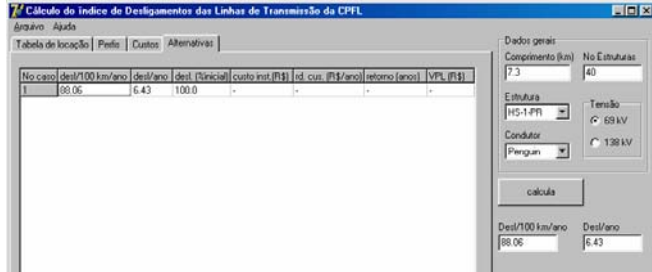


Figura 7. Tela de alternativas.

Pode-se a qualquer momento alternar entre as telas, clicando-se no título das páginas, abaixo do menu.

Voltando-se à tela de perfis, tem-se:

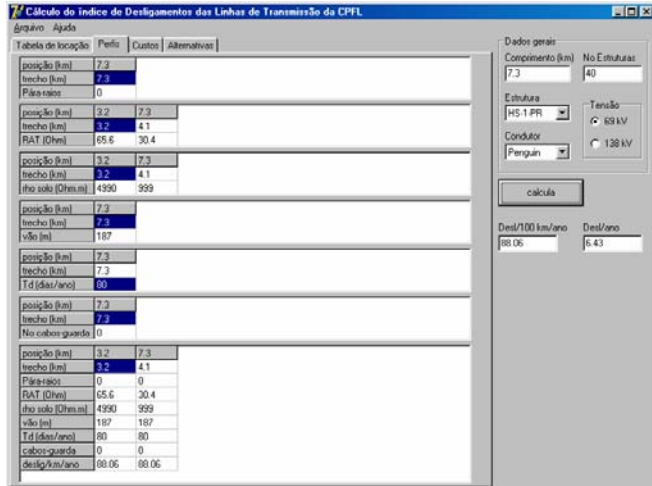


Figura 8. Tela de perfis com o perfil global calculado.

Nota-se que para os dois trechos, o índice de desligamentos é o mesmo. Isso ocorre pois para a linha sem cabo-guarda o aterramento praticamente não influencia no índice de desligamentos, quando não há pára-raios ZnO instalados.

A primeira alternativa a ser analisada é a instalação de um cabo-guarda ao longo de toda a linha, alterando-se de 0 para 1 o campo de No. cabos-guarda na tela de perfis para o trecho único de 7.3 km.

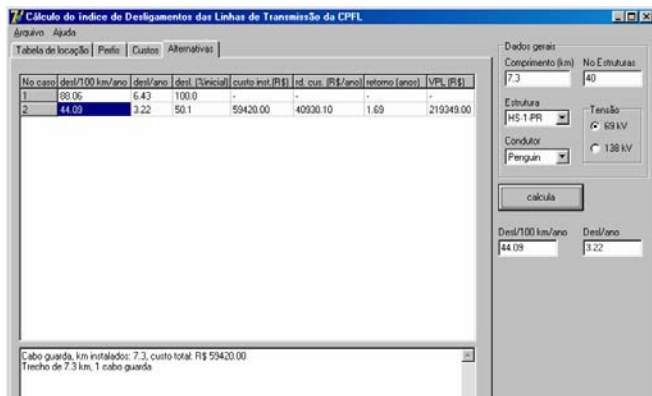


Figura 9. Tela de alternativas com o caso base e a alternativa 1.

A tela de alternativas mostra o caso base e a primeira alternativa, incluindo comentários detalhados do caso atual ou do caso clicado na tabela de alternativas.

Voltando-se à tela de perfis, verifica-se que a instalação do cabo-guarda foi mais efetiva para o trecho de linha com RAT mais baixo, de forma que a segunda alternativa consiste em instalar cabo-guarda somente das torres 21 a 40.

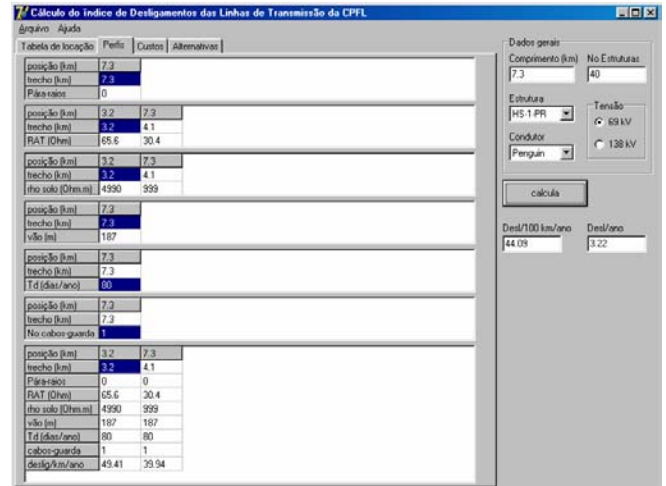


Figura 10. Tela de perfis, verificação com os cabos guarda.

Ao se clicar com o botão direito do mouse sobre qualquer campo dos perfis de pára-raios, nível cerâmico e cabos-guarda surge um menu que permite a inclusão e exclusão de trechos. Após a alteração do perfil de cabos-guarda tem-se:

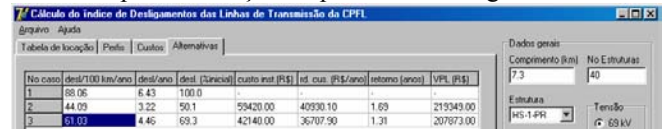


Figura 11. Tela de alternativas com o caso base e as alternativas 1 e 2.

O custo da alternativa é aproximadamente 2/3 e a redução de custo é praticamente a mesma.

Outra alternativa a ser considerada é a instalação somente de pára-raios ZnO em toda a linha, com uma unidade por torre.



Figura 12. Tela de alternativas com o caso base e as alternativas 1 a 3.

A diminuição do número de desligamentos é pequena, sendo testadas as alternativas de 2 ou 3 pára-raios ZnO por torre:

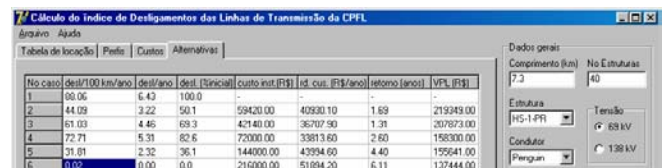


Figura 13. Tela de alternativas com o caso base e as alternativas 1 a 5.

É proposta também a alternativa combinada de se reduzir a RAT de torres com RAT maior que 70 Ω, para o valor de

30 Ω juntamente com a instalação de cabo-guarda em toda a linha.

A alteração de RAT deve ser feita na tela Tabela de locação e após a alteração deve-se clicar novamente no botão monta perfis, e se for desejado, pode-se gravar em arquivo uma planilha com as alterações na resistência de aterramento.

Quando a alterações na RAT de torres, o programa mostra na tela de alternativas as alterações realizadas.

No caso	dist/100 km/ano	dist/ano	dist. (km)	custo inst. (R\$)	of. cus. (R\$/ano)	retorno (ano)	VPL (R\$)
1	88.06	6.43	100.0				
2	44.09	3.22	50.1	59420.00	40930.10	1.69	219349.00
3	61.03	4.46	69.3	42140.00	36707.90	1.21	207673.00
4	72.71	5.39	86.3	72000.00	33813.60	2.60	190300.00
5	31.61	2.32	36.1	144000.00	43994.60	4.40	195641.00
6	0.02	0.00	0.0	216000.00	51894.20	6.11	137444.00
7	41.30	3.02	46.9	66004.00	41611.10	1.93	215404.00

Cabo guarda, km instalado: 7.3, custo total: R\$ 59420.00
 Trecho de 7.3 km, 1 cabo guarda
 Resultados de aterramento, torres alteradas: 8, custo total R\$ 9584.00
 torre 4, in: 86.4, fim: 30, redução de 55.4 Ohm
 torre 6, in: 99, fim: 30, redução de 69 Ohm
 torre 8, in: 104.2, fim: 30, redução de 74.2 Ohm
 torre 13, in: 103.7, fim: 30, redução de 73.7 Ohm
 torre 17, in: 91.2, fim: 30, redução de 61.2 Ohm
 torre 18, in: 105.9, fim: 30, redução de 75.9 Ohm
 torre 19, in: 95, fim: 30, redução de 65 Ohm
 torre 20, in: 70, fim: 30, redução de 40 Ohm

Figura 14. Tela de alternativas com o caso base e as alternativas 1 a 6.

Comparando-se o caso 7 com o 2, que diferem somente nos valores de RAT, verifica-se que o ganho com a redução de RAT é relativamente baixo.

Não há limite no número de alternativas a serem avaliadas e a decisão da melhor alternativa deve ser tomada levando em conta critérios da empresa e as informações técnicas e econômicas apresentadas na tabela de casos.

V. CONCLUSÕES

O resultado final alcançado está no programa aplicativo desenvolvido, que utiliza uma base de dados específica para as linhas da CPFL e permite uma análise das alternativas com muita facilidade, pois o projetista necessita apenas definir hipóteses na redução do índice de desligamentos e ajustar ou atualizar alguns valores de custos que já tem estimativas fornecidas pelo aplicativo. Tarefas como consulta a geometria de torres, dados de cabos, montagem de arquivos para o programa ATP, geração da curva limite e utilização de programa para cálculo do índice de desligamentos não são necessárias com a utilização deste aplicativo.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Convênio PEA/COOESA/CPFL Nota Técnica 1: Revisão da Bibliografia – Análise dos Dados das LT's da CPFL, 2004.
- [2] Convênio PEA/COOESA/CPFL Nota Técnica 2: Parte 1 - Análise da Influência de Parâmetros no Índice de Desligamentos, 2004.
- [3] Convênio PEA/COOESA/CPFL Nota Técnica 2: Parte 2 - Parte 2 - Metodologia de Cálculo de Impedância de Surto de Torres, 2004.
- [4] Convênio PEA/COOESA/CPFL Nota Técnica 3: Medições de Resistência de Aterramento em Linhas de Transmissão de 138/69 kV, 2004.
- [5] Convênio PEA/COOESA/CPFL Nota Técnica 4: Índices de Desligamentos das Linhas de Transmissão da CPFL, 2004.
- [6] Convênio PEA/COOESA/CPFL Roteiro de Proteção contra Sobretenção, 2004.
- [7] Convênio PEA/COOESA/CPFL Relatório Técnico 1: Banco de Dados de Custos de Instalação de Proteção e dos Desligamentos Envolvidos, 2004.
- [8] HILEMAM, A.R. "Application of Arresters to Transmission Lines," *CIGRÉ Progress Report: TF3 WG 33.11*, Bruxelas, Aug. 1992.
- [9] CHISHOLM, W. A.; CHOW, Y. L.; SRIVASTAVA, K.D. "Lightning surge response of transmission towers," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v. 102, n. 9, p. 3232-3242, Sep. 1983.
- [10] GRANT, I.S. et al. "A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 104, n.4, p. 919-932, April 1985.
- [11] IMECE, A.F. et al. "Modeling guidelines for fast front transients," *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n.1, p. 493-505, Jan.1996.
- [12] ERIKSSON, A. et al "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, Proceedings, p. 01-33, Oct. 1991.
- [13] ZANETTA, L.C., JR.; PEREIRA, C. E. M. "Application studies of line arresters in partially shielded 138-kV transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 1, p. 95-100, Jan. 2003.
- [14] SADOVIC, S. et al. "Use of Line Surge Arresters for the Improvement of the Lightning Performance of 63 kV and 90 kV Shielded and Unshielded Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.12, N. 3, July 1997.
- [15] ROCHA, A.C.O.; DE FRANCO, J.L.; CARMO, L.S.; CHERCHIGLIA, L.C.L. "Aplicação de pára-raios para a melhoria do desempenho de linhas de transmissão de 230 kV," *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, XVI SNPTEE, Campinas, Outubro 2001.
- [16] CÂMARA, A.S.B. et al. "Protection Against Lightning Surges Provided by Line Arresters – FURNAS Experience on 138 kV System," *V International Symposium on Lightning Protection*, Proceedings, São Paulo, May 1999.
- [17] SHIGENO, T. "Experience and effectiveness of application of transmission line arresters," *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific*. IEEE/PES, v. 1, p. 636-639, Oct. 2002.
- [18] ANDERSON, J.G. "Lightning performance of transmission lines," *EPRI. Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*, Palo Alto, Electric Power Institute, Cap. 12, p. 545-597, 1982.
- [19] BABA, Y.; ISHII, M. "Numerical Electromagnetic Field Analysis of Tower Surge Response," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 12 n. 1, January 1997.
- [20] CDEGS *CDEGS User's Primers: Current Distribution, Electromagnetic Interference, Grounding and Soil Structure Analysis*, SES Safe Engineering Services & Technologies Ltd., 2000.