



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCE-20
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XIV
GRUPO DE ESTUDO DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - GCE**

SISTEMA DE GERÊNCIA DE PERDAS TÉCNICAS - SGPT

**Eng. Avilez Batista de Oliveira Lima*
COELCE**

**Eng. Roberto Garrido de Figueiredo
COELCE**

**Prof. Washington Macedo
PAQTC - PB**

RESUMO

Devido ao interesse da COELCE em conhecer e controlar a evolução das perdas técnicas no seu sistema elétrico de forma mensal, surgiu o desenvolvimento de um sistema computacional que proporciona o gerenciamento e processamento das informações de carregamento e topologia necessárias para tal fim, uma vez que as mesmas possuem um grande volume de dados e precisam ser atualizadas mensalmente para atender o objetivo da empresa. Desta forma, foi concebido o Sistema de Gerência de Perdas Técnicas – SGPT o qual vem sendo utilizado e oferecendo resultados bastante satisfatórios para cada segmento do sistema elétrico da COELCE.

PALAVRAS-CHAVE

Perdas técnicas, sistema de gerenciamento, fluxo de potência, SGPT, gestão de perdas técnicas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Desde o ano de 2000, numa parceria com o Parque Tecnológico da Paraíba – PAQTCPB, a COELCE desenvolveu, aperfeiçoou e vem aplicando uma metodologia bastante eficaz no cálculo das perdas técnicas em todos os segmentos do seu sistema elétrico, a saber, transmissão (69kV), distribuição (13,8kV) e rede secundária (380/220V).

O processo de cálculo das perdas técnicas com um nível de precisão que permita identificar os segmentos com maiores níveis de perdas envolve uma elevada quantidade de trabalho. Além disto, os valores das perdas técnicas variam de forma significativa ao longo de um mesmo sistema, ou seja, variam à medida que

os níveis de carregamento se modificam e também variam de forma significativa devido às mudanças na topologia da rede. Devido a estas características, é de fundamental importância a utilização de ferramentas computacionais que permitam a avaliação e o acompanhamento das perdas técnicas de forma rápida e precisa. Isto deverá tornar mais eficiente a identificação dos pontos críticos em termos de perdas e tornar mais objetivo o processo de seleção das alternativas para redução das mesmas.

Desta forma, este trabalho trata do desenvolvimento da metodologia utilizada para o cálculo das perdas técnicas e do sistema computacional denominado “SISTEMA DE GERENCIAMENTO DAS PERDAS TÉCNICAS – SGPT”, desenvolvido com a finalidade de atender a todas as características de rapidez e precisão exigidas para que seja possível avaliar e acompanhar mensalmente a evolução das perdas técnicas no sistema elétrico da COELCE, além de avaliar os benefícios das ações empreendidas para redução de tais perdas.

O SGPT avalia as perdas em todos os componentes de um determinado regional, isto é: sistema de transmissão (linhas de transmissão e transformadores de força das subestações), alimentadores primários, transformadores MT/BT e rede secundária. Todo o processo é realizado de forma automática, incluindo a emissão de relatórios. Caso haja uma eventual variação na topologia e/ou na carga do sistema, o SGPT proporciona a inserção dos novos dados de forma simples e permite o cálculo dos novos níveis de perdas técnicas de forma rápida e precisa.

2.0 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DAS PERDAS TÉCNICAS

* Avenida Barão de Studart, 2917 - Aldeota - CEP 60127-900 - Fortaleza - CE - BRASIL
Tel.: (085) 216-1357 - Fax: (085) 216-1406 - e-mail: avilez@coelce.com.br

Basicamente, a metodologia desenvolvida para avaliação das perdas técnicas em um sistema elétrico segue o processo mostrado na Figura 1:



FIGURA 1 – PROCESSO BÁSICO PARA AVALIAÇÃO DAS PERDAS TÉCNICAS

A característica fundamental na qual se baseia a metodologia em questão são os dados de mercado que refletem a energia efetivamente medida nos vários pontos de entrega da supridora e nas subestações abaixadoras. Estas informações são obtidas através de medições conforme exemplo mostrado na Figura 2 – (a):

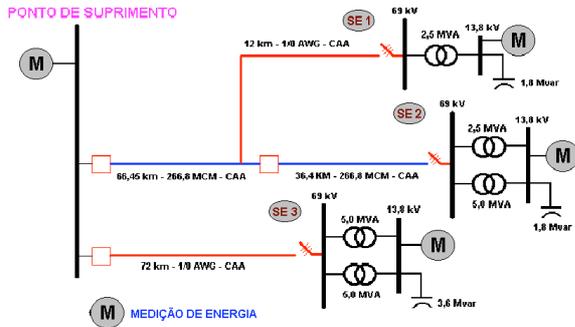
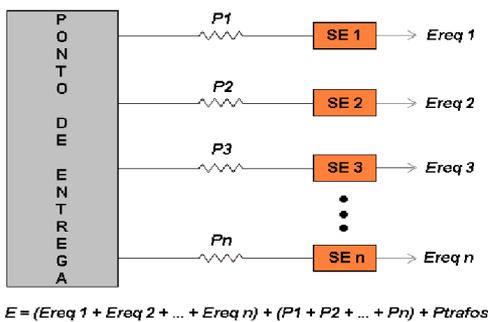


FIGURA 2 – (a) - MEDIÇÃO DE ENERGIA

A energia medida no ponto de suprimento ou regional tem a composição mostrada na Figura 2 – (b):



$$E = (Ereq\ 1 + Ereq\ 2 + \dots + Ereq\ n) + (P1 + P2 + \dots + Pn) + Ptrafos$$

FIGURA 2 – (b) – COMPOSIÇÃO DA ENERGIA MEDIDA NO PONTO DE SUPRIMENTO OU REGIONAL

Dentre outras características importantes desta metodologia, devem ser ressaltadas a simplicidade no tratamento matemático, a montagem eficiente do arquivo de dados para processamento, maior precisão nos resultados e, conseqüentemente, uma maior

eficácia na identificação de pontos críticos em termos de perdas técnicas.

O processamento do arquivo de dados com as informações de topologia e carregamento do sistema é realizado através da simulação do fluxo de potência especialmente desenvolvido para uso na metodologia e que possui características importantes tais como:

- Processamento sequencial de até 8 (oito) períodos do dia;
- Ajuste das cargas em função da grandeza medida e informada;
- Cálculo das perdas de demanda e energia;
- Descrição do comportamento das perdas por trecho do sistema;
- Utilização do método rápido desacoplado;
- Alta capacidade de convergência;
- Utilização do processo de rotação de eixos na simulação do sistema de distribuição, conforme mostrado na Figura 3:

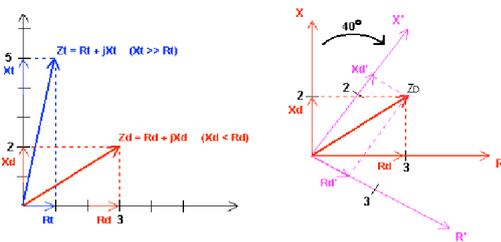


FIGURA 3 – PROCESSO DE ROTAÇÃO DE EIXOS

Para um maior entendimento da aplicação da metodologia desenvolvida, consideremos a avaliação das perdas técnicas nos segmentos do sistema elétrico sob análise.

2.1 Sistema de Transmissão

Os principais fatores responsáveis pelas perdas técnicas no sistema de transmissão são:

- Carregamento e comprimento elevado das linhas de transmissão;
- Fluxo de potência reativa elevado;
- Localização dos pontos de entrega da supridora.

Estas perdas no sistema de transmissão são compostas por duas parcelas: as perdas devido ao efeito Joule nas linhas de transmissão e nos enrolamentos dos transformadores de força e as perdas no ferro dos transformadores de força devido à histerese e correntes parasitas. Esta última parcela das perdas técnicas no sistema de transmissão são consideradas constantes e independentes do carregamento do transformador.

Os dados necessários para o cálculo das perdas técnicas neste segmento do sistema elétrico são aqueles relativos à topologia e ao carregamento do mesmo. Ou seja, para as linhas de transmissão são os dados de bitola dos cabos e comprimento das linhas e, para os transformadores de potência, os dados de potência, impedância, tap e perdas nominais no ferro e no cobre. Já os dados de carregamento necessários referem-se a energia requerida e a curva de carga

média diária por ponto de entrega e por subestação, além dos bancos de capacitores em operação e do fator de potência da carga por subestação.

A curva de carga média diária referida acima é obtida através da média de todas as medições hora-a-hora de demanda no ponto de entrega e de corrente nas subestações. No ponto de entrega é utilizada para estimar os patamares de duração dos períodos ao longo do dia para processamento do fluxo de potência. Vale salientar que estes patamares são determinados através da análise do comportamento da curva de carga do ponto de entrega e são aplicados na análise de todas as subestações pertencentes ao mesmo. Já para as subestações, a curva de carga é utilizada para a determinação dos níveis de carregamento ao longo do dia.

Na Figura 4 – (a), temos mostrada a curva de carga média diária típica de demanda para um determinado ponto de entrega ou regional do sistema elétrico da COELCE:

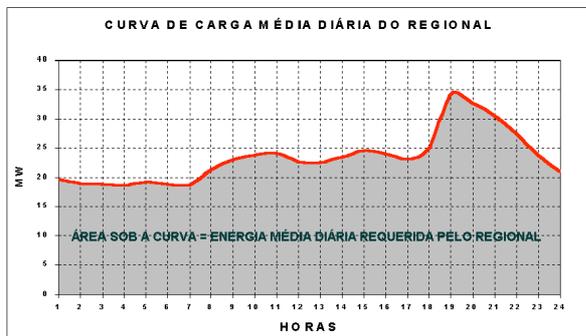


FIGURA 4 – (a) – CURVA DE CARGA MÉDIA DIÁRIA TÍPICA DO REGIONAL

Já na Figura 4 – (b), temos mostrada a curva equivalente discretizada em patamares de análise a serem utilizados no processamento do fluxo de potência:

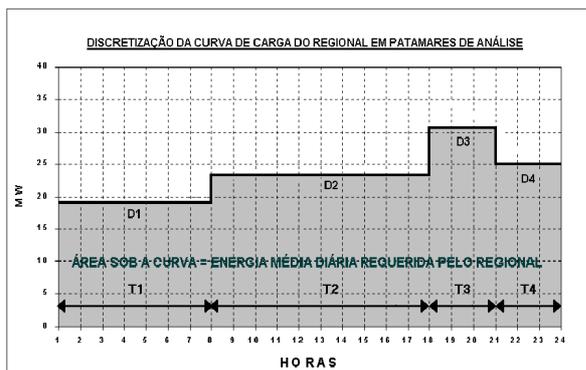


FIGURA 4 – (b) – CURVA DE CARGA MÉDIA DIÁRIA EQUIVALENTE DISCRETIZADA DO REGIONAL

É importante observar que a área sob a curva de carga média diária e sob a equivalente discretizada, corresponderá a energia requerida pelo regional informada pela área de mercado, conforme a exigência da metodologia desenvolvida. Os valores de demanda ao longo do dia, D1, D2, D3 e D4, são calculados de forma a se obter esta equivalência em termos de energia requerida.

Nas subestações pertencentes ao regional, a curva de carga média diária refere-se a corrente medida no barramento de 13,8kV das mesmas. Como dito anteriormente, os períodos de duração dos patamares aplicados às curvas de carga das subestações são os mesmos definidos na curva de carga do regional. Na Figura 5, temos mostrada a curva de carga média diária típica de corrente para uma subestação do sistema elétrico da COELCE submetida aos mesmos períodos definidos na curva de carga do regional

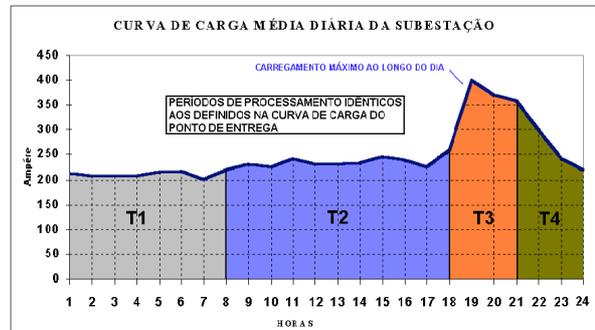


FIGURA 5 – CURVA DE CARGA MÉDIA DIÁRIA TÍPICA DA SUBESTAÇÃO

Após a obtenção de todos os dados de topologia e carregamento para todos os pontos de suprimento ou regionais que compõem o sistema de transmissão, o próximo passo é a montagem dos arquivos de dados para a posterior simulação do fluxo de potência e obtenção das perdas técnicas nas linhas e nos transformadores de força.

2.2 Sistema de Distribuição

Em um sistema de distribuição, as perdas técnicas, assim como na transmissão, são devidas ao efeito Joule e ao ferro que constitui o núcleo dos transformadores. Ocorrem de forma significativa nos seguintes componentes:

- Alimentadores primários;
- Transformadores;
- Rede secundária;
- Ramais de ligação;
- Medidores;
- Mistas (conexões, correntes de fuga, efeito corona, etc.)

Na metodologia utilizada, as perdas técnicas são calculadas separadamente em cada um dos componentes citados acima.

Para a avaliação das perdas técnicas nos alimentadores primários, os dados de topologia e de carregamento necessários à montagem do arquivo de dados para processamento do fluxo de potência são os seguintes:

- Energia média requerida por cada subestação;
- Medições de corrente hora-a-hora na saída dos alimentadores;
- Tensões na barra de 13,8kV de cada subestação em carga máxima e mínima;
- Potência, fator de utilização, fator de potência e localização de cada transformador ao longo dos alimentadores;

- Demanda, fator de potência e curva de carga diária dos consumidores especiais;
- Bitola e comprimento das linhas de distribuição (alimentadores).

O fluxo de potência irá processar os arquivos contendo todas as informações formatadas, ajustando os valores das cargas informadas de modo a compatibilizá-los com os valores de corrente na saída dos alimentadores. Uma importante observação é que a energia medida na barra de 13,8kV das subestações é proporcionalmente dividida pelos seus respectivos alimentadores em função do carregamento dos mesmos, de forma que sempre tenhamos a referência de energia de acordo com os dados de mercado.

No processo de levantamento dos dados, os transformadores conectados aos alimentadores são classificados de acordo com as seguintes categorias:

- TRANSFORMADORES URBANOS – Suprem circuitos secundários (residências, microempresas, etc.)
- TRANSFORMADORES PARTICULARES – Suprem consumidores exclusivos (edifícios, condomínios, etc.)
- TRANSFORMADORES RURAIS – Suprem consumidores rurais.
- TRANSFORMADORES GRUPO A – Suprem consumidores de grande porte (grandes empresas).

Na Figura 6, temos mostrado um exemplo de distribuição típica de transformadores ao longo de um alimentador de 13,8kV:

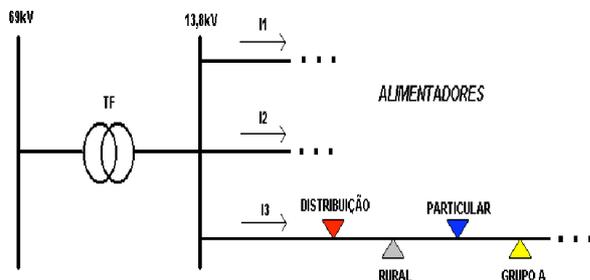


FIGURA 6 – TRANSFORMADORES AO LONGO DE UM ALIMENTADOR TÍPICO DE 13,8kV

As perdas técnicas nos transformadores são compostas por duas parcelas: perdas no núcleo e perdas nos enrolamentos. No núcleo, estas perdas são consideradas constantes e dependentes apenas da potência do transformador. São devidas às correntes parasitas (Foucault) e histerese magnética. Nos enrolamentos, estas perdas dependem diretamente do nível de carregamento do transformador e são devidas ao efeito Joule.

Em síntese, a metodologia para avaliação das perdas técnicas no sistema de distribuição consiste no levantamento da curva de carga de corrente hora-a-hora dos alimentadores, na qual será aplicado o mesmo processo de discretização em patamares de análise, onde cada alimentador terá sua curva de carga discretizada em função do tipo de carregamento, ou seja, podemos ter os alimentadores pertencentes a

uma mesma subestação utilizando durações de patamares de análise totalmente diferente entre si. A exigência da metodologia é que a somatória da energia dos alimentadores, estimada individualmente, seja igual a energia medida no barramento de 13,8kV da subestação.

Da mesma forma que no segmento de transmissão, todos estes dados irão compor um arquivo que será utilizado para a simulação do fluxo de potência e, portanto, tendo como resultado as perdas de energia segmentadas nos componentes do sistema de distribuição onde as mesmas ocorrem de forma mais expressiva.

3.0 - O SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PERDAS TÉCNICAS – S.G.P.T.

Antes do desenvolvimento do sistema em questão, a metodologia para o cálculo das perdas técnicas era aplicada através de softwares que, apesar de sua enorme precisão de cálculo, não tinham condições de proporcionar um processamento simultâneo dos arquivos de dados de topologia e carregamento necessários ao cálculo. Além disso, a interface com o usuário era extremamente deficiente, o que aumentava o risco de erros durante o processo de entrada de dados. O processamento destes arquivos era realizado um a um e eram utilizados softwares diferentes para a montagem dos arquivos de dados, para a simulação de fluxo de potência, para o cálculo das perdas técnicas nos transformadores de distribuição, para o cálculo das perdas técnicas na rede secundária e para o desenho dos diagramas unifilares.

Desta forma, surgiu o S.G.P.T cuja proposta era solucionar todos estes problemas, agregando num só sistema computacional, todas as ferramentas necessárias para o cálculo das perdas técnicas com a mesma precisão e proporcionando uma grande vantagem no tocante às facilidades de organização e confiabilidade dos arquivos de dados envolvidos no processo.

O SGPT é formado por um conjunto de rotinas computacionais e interfaces bastante amigáveis com o usuário, interagindo entre si, tendo como objetivo principal, o cálculo estratificado e o acompanhamento mensal dos valores das perdas técnicas dos sistemas de transmissão, distribuição e rede secundária da COELCE. Possui, também, em sua estrutura de programação, rotinas exclusivas para a execução sequencial e ininterrupta de fluxo de potência em todos os segmentos do sistema elétrico.

Uma série de características particulares deste sistema computacional que o torna extremamente eficiente no cálculo das perdas técnicas são, entre várias:

- Facilidade na montagem do banco de dados;
- Processamento automático, seqüencial e ininterrupto de todos os fluxos de potência;
- Emissão automática de relatórios;
- Interface gráfica com interação dinâmica com o banco de dados;
- Simplicidade para realização de alterações de carregamento e topologia com novo cálculo das perdas técnicas contemplando estas alterações
- Precisão, rapidez e a agilidade na realização das tarefas que possibilitam a tomada de decisão

rápida e segura com relação às alternativas a serem utilizadas para a redução das perdas técnicas em todos os segmentos do sistema elétrico.

Basicamente, o S.G.P.T divide-se em dois módulos: o de cadastro de dados e o gráfico. Nos tópicos a seguir, passaremos a explanação dos mesmos

3.1 Módulo de Cadastro de Dados

Como visto durante o detalhamento da metodologia utilizada para o cálculo das perdas técnicas, o volume de informações relativas ao carregamento e a topologia dos segmentos do sistema elétrico é muito grande. Desta forma, tornou-se imprescindível a criação de uma ferramenta de cadastro de informações que proporcionasse um eficiente controle dos dados a serem processados. Este módulo permite que as informações relativas a cada mês do ano sejam cadastradas individualmente para cada regional de operação, subestações, alimentadores e rede secundária. Na Figura 7, temos a tela inicial de cadastro de informações em um determinado mês escolhido:

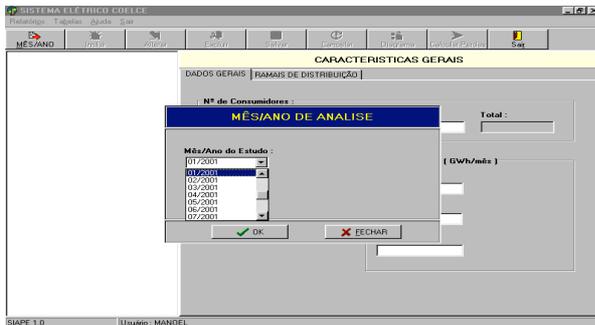


FIGURA 7 – TELA COM A OPÇÃO DE ESCOLHA PARA O MÊS DE CADASTRO

A partir deste ponto, inicia-se o cadastro dos dados de forma hierárquica, ou seja, inicialmente cadastramos um regional pertencente ao sistema elétrico, depois uma subestação pertencente ao regional, depois um alimentador pertencente à subestação e, por último, a rede secundária associada aos transformadores de distribuição dos alimentadores.

Para o regional, os dados a serem cadastrados com base mensal são os seguintes:

- Identificação (nome, sigla e número da barra);
- Tensão base, energia suprida e tensão de operação;
- Curva de carga diária de demanda;

Após o cadastro dos dados para o regional, teremos como principal produto a curva de carga média diária para o regional, sobre a qual serão definidos os períodos dos patamares de análise diários e estimadas as demandas equivalentes em função da energia suprida. Deste ponto, segue-se com a inclusão de uma subestação e o posterior cadastro dos dados referentes à mesma, tais como:

- Identificação (nome, sigla, número das barras de alta e média tensão);

- Transformadores de força (potência instalada, tap, reatância, etc);
- Curva de carga diária associada a cada barramento de média tensão;
- Demanda máxima mensal e energia média mensal requerida pela subestação;
- Bancos de capacitores fixos e/ou automáticos;

Da mesma forma, teremos como produtos principais dos dados cadastrados, a curva de carga média diária da subestação, sobre a qual será calculado o carregamento durante os quatro períodos do dia e os valores das demandas que serão utilizadas para a simulação do fluxo de potência. Após cadastrados os dados da subestação, segue-se com a inclusão de um alimentador, cujos dados básicos serão:

- Identificação (sigla e número do barramento no qual está conectado);
- Curva de carga diária de corrente

Os produtos obtidos com os dados acima são a curva de carga de corrente média diária do alimentador, sobre a qual serão definidos os períodos de análise em função da sua forma de carregamento para que sejam calculados os parâmetros de corrente necessários à simulação do fluxo de potência e a parcela de energia proporcional à energia total medida no barramento de 13,8kV da subestação na qual o alimentador está conectado.

Finalmente, teremos o cadastro da rede secundária representativa do regional e em função da potência dos transformadores de distribuição. Os dados de curva de carga diária de corrente darão origem, da mesma forma que nos alimentadores, aos dados de corrente e demanda de potência ativa e reativa ao longo do dia e que serão utilizados na simulação do fluxo de potência.

3.2 Módulo Gráfico

Até o momento foram vistos os procedimentos para a inserção das informações no SGPT relacionadas às características e o carregamento do sistema elétrico com o objetivo de se obter o valor das perdas técnicas em todos os seus segmentos. Para que este cálculo de perdas técnicas seja possível, os dados de topologia da transmissão, distribuição e rede secundária também deverão ser informados ao SGPT. Com o objetivo de tornar esta tarefa a mais simples possível, foi desenvolvido o "Módulo Gráfico do SGPT" para os três segmentos do sistema elétrico.

Após desenhada toda a topologia do sistema elétrico, teremos finalizado todo o processo de preparação de dados necessários ao cálculo das perdas técnicas, restando apenas realizar o comando que irá interligar todo o módulo gráfico com o módulo de cadastro, simulando todos os fluxos de potências necessários ao cálculo das referidas perdas de forma sequencial, automática e ininterrupta.

As topologias que serão informadas ao SGPT através de seu módulo gráfico dizem respeito, na transmissão, à configuração das linhas de transmissão e subestações, e, na distribuição, à configuração dos alimentadores e rede secundária. Ao selecionarmos qualquer regional ou qualquer alimentador, no módulo de cadastro, teremos a sua ligação com seu respectivo diagrama unifilar através do caminho indicado na caixa

“Arquivo de Diagrama”, presente nas telas de cadastro. Na Figura 7 a seguir, temos mostrado um exemplo de diagrama típico:

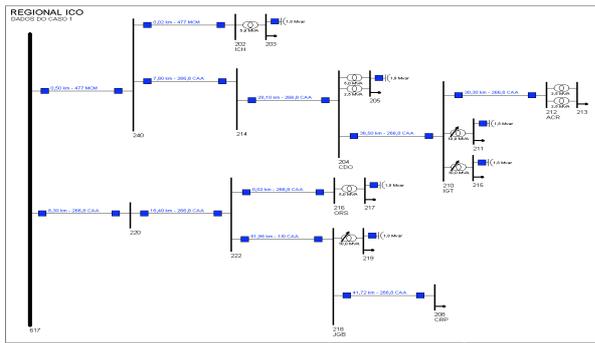


FIGURA 7 – DIAGRAMA DE REGIONAL TÍPICO

Como se pode observar, cada subestação cadastrada é representada por uma barra e são ligadas através das linhas de transmissão com a representação dos disjuntores, bancos de capacitores e transformadores. O SGPT conta com um recurso muito útil que permite inserir a subestação completa automaticamente, ou seja, converte graficamente os dados cadastrados inicialmente, sem a necessidade de ter que desenhar cada componente individualmente.

De forma semelhante ao procedimento utilizado para o sistema de transmissão, serão informadas neste módulo as topologias do sistema de distribuição, ou seja, a configuração dos alimentadores e rede secundária, conforme pode ser visto nas Figuras 8 e 9 a seguir:

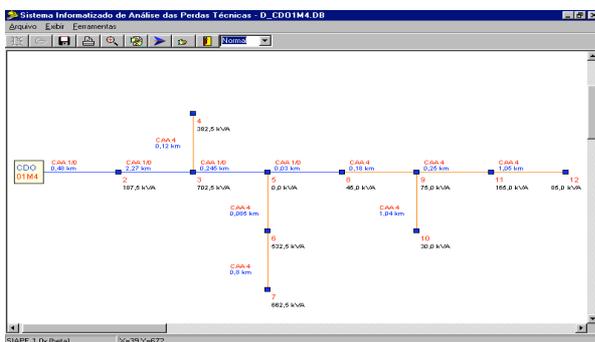


FIGURA 8 – DIAGRAMA DE ALIMENTADOR TÍPICO

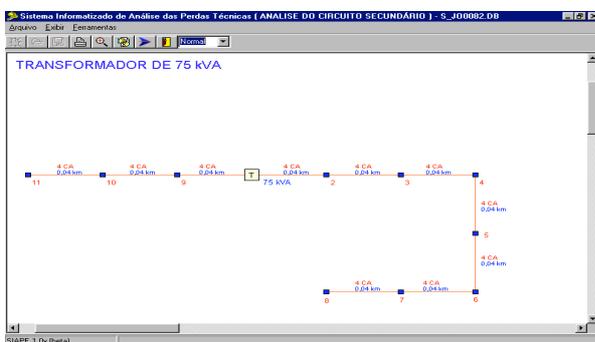


FIGURA 9 – DIAGRAMA DE REDE SECUNDÁRIA TÍPICO

4.0 - RELATÓRIOS GERADOS

O SGPT possui uma série de relatórios que possibilita uma análise detalhada dos resultados obtidos após o processamento. Estes relatórios são gerados automaticamente, a partir do momento em que se inicia o processo de cálculo das perdas técnicas.

Além dos relatórios gerados, o SGPT viabiliza informações diretamente sobre os diagramas em todos os segmentos do sistema elétrico após a conclusão do processo de simulação de fluxo de potência. Como exemplo destas informações, temos:

TRANSMISSÃO: Topologia do circuito, valor das perdas técnicas mensais nos trechos, resumo das perdas, fluxo de potência ativa e reativa, corrente nos trechos, tensão nas barras, potência da carga e uma animação mostrando o sentido do fluxo de potência ativa e reativa que percorre o sistema.

DISTRIBUIÇÃO: Topologia do alimentador, valor das perdas técnicas mensais nos trechos, carga instalada por barra, fluxo de potência ativa e reativa, corrente nos trechos, tensão nas barras e limite de carregamento dos condutores.

REDE SECUNDÁRIA: Topologia do circuito secundário, valor das perdas técnicas mensais nos trechos, carga instalada por barra, fluxo de potência ativa e reativa, corrente nos trechos, tensão nas barras e limite de carregamento dos condutores.

5.0 - CONCLUSÃO

O presente trabalho teve a intenção de mostrar todas as etapas do desenvolvimento do Sistema de Gerenciamento das Perdas Técnicas – SGPT e da metodologia para cálculo das perdas técnicas nos diversos segmentos do sistema elétrico da empresa e que vem sendo utilizada e aperfeiçoada pela COELCE. Além disto, procurou-se deixar claro todas as ferramentas de engenharia e informática utilizadas no desenvolvimento de uma ferramenta do porte do SGPT dedicado ao cálculo e gerenciamento mensal ou anual das perdas técnicas e que contribuirá, a curto prazo, de forma bastante significativa com subsídios para a otimização do sistema elétrico em termos de planejamento e eficiência energética.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) LIMA, A., Sistema de Gerência de Perdas Técnicas – Trabalho para Obtenção do Título de Pós-Graduação em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica pela UNIFOR – Universidade de Fortaleza
- (2) WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION : Electric Utility Engineering Reference Book – Distribution Systems, Vol 3 – East Pittsburgh, 1965.
- (3) STOTT, B. & ALSAC, O., Fast Decoupled Load Flow, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 93, May – June 1974.
- (4) MACEDO, W. E. & BARBOSA, A. S. - Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição : Aplicações Práticas . XII SENDI – Recife, Outubro de 1994.