



SCE/014

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

## STE II

### ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS – GMI CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

#### DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DAS PERDAS

Ary V. Pinto Jr. CEPEL	Landulfo M. Alvarenga CEPEL	Mauro R. B. Loureiro CEPEL	Júlio C. R. Santos CEPEL	José L. R. Pereira UFJF	Paulo A. N. Garcia UFJF
Jorge R. de Carvalho CERJ	Antonio C. C. Moreira CERJ				

#### RESUMO

Nesse trabalho é proposta uma metodologia para avaliação e otimização das perdas de energia elétrica em sistemas de distribuição. Essa metodologia consiste do cálculo das perdas técnicas através de um fluxo de potência trifásico onde os componentes da rede são representados de forma completa. As perdas comerciais são estimadas através de modelos estatísticos obtidos a partir de medições em campo, simulações e do consumo de energia. Apresenta-se também a filosofia de implementação e a estrutura computacional do programa para análise e otimização das perdas de energia. Este programa vem sendo desenvolvido pelo CEPEL com apoio da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), no âmbito de um projeto patrocinado pela Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro (CERJ), no âmbito dos investimentos em P&D determinados pela ANEEL.

#### PALAVRAS-CHAVE

Perdas de energia, otimização.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A mudança do tradicional modelo cooperativo para um modelo competitivo impõe novas filosofias para a operação e o planejamento dos diversos segmentos do setor elétrico.

Nesse novo cenário, os níveis de perdas se tornaram indicadores de qualidade gerencial das empresas concessionárias de energia elétrica. A redução das

perdas e a manutenção em níveis ótimos tem que ser uma busca contínua em cada empresa.

Dessa forma, a utilização de ferramentas para a realização de estudos relativos às perdas ganharam maior importância. Este trabalho, que vem sendo realizado pelo CEPEL em conjunto com a UFJF e a CERJ, apresenta uma metodologia para a avaliação e otimização das perdas.

#### 2.0 - AVALIAÇÃO DAS PERDAS

O ponto de partida de qualquer processo que vise a otimização das perdas deve ser a quantificação das perdas atuais do sistema. Além de sua quantificação como um todo, as perdas devem ser segregadas por componentes: perdas por trecho de linha, por transformador, etc., e também nas parcelas: perdas comerciais e perdas técnicas. Esta discriminação é importante para orientar as ações a serem desenvolvidas. Como as perdas técnicas podem ser obtidas a partir do modelo elétrico do sistema, a perda comercial será estimada a partir do cálculo das perdas técnicas e das medições realizadas no alimentador.

A metodologia proposta, juntamente com o programa de computador que está sendo desenvolvido, terá como finalidade auxiliar as empresas de distribuição de energia elétrica na avaliação e na otimização das perdas. O programa deverá calcular as perdas ocorridas em cada componente da rede primária e secundária de um circuito da rede. Assim, a partir das especificações de cada componente e das cargas conectadas ao sistema, para cada segmento de tempo

das curvas de carga, serão calculadas as perdas associadas a cada um dos componentes assim como a perda total do circuito simulado. O programa irá também avaliar as parcelas correspondentes às perdas técnicas e comerciais por alimentador do sistema de distribuição.

### 3.0 - OTIMIZAÇÃO DAS PERDAS

Se por um lado as perdas técnicas equivalem a um custo, por outro elas podem ser reduzidas através de investimentos adicionais, onde a otimização dos seus níveis deve ser a meta dos programas de gerenciamento. O nível ótimo de perdas técnicas varia de empresa para empresa e depende, entre outros fatores, da densidade de carga de cada empresa. As perdas comerciais representam uma quebra de receita, e, portanto, devem ser criados programas para sua minimização.

Considera-se que um componente esteja otimizado quando qualquer ação sobre ele não for mais economicamente viável. Portanto, para que os sistemas permaneçam otimizados, é preciso que as perdas sejam monitoradas continuamente. O programa poderá realizar o cálculo das perdas mensalmente, utilizando-se os novos valores de consumo de energia de cada consumidor. Desta forma, a partir da leitura para o faturamento será possível realizar uma estimativa das perdas no período. Isso permitirá que o acompanhamento das perdas seja feito mês a mês para cada alimentador criando um histórico que poderá ser utilizado para estudos econômicos e financeiros de viabilidade da realização de obras para a otimização das perdas técnicas, ou para projetos de minimização das perdas comerciais. O cálculo das perdas deverá ser utilizado também para o acompanhamento dos resultados das ações realizadas para redução das perdas.

A forma de implementação do programa lhe confere uma forte característica de rapidez, possibilitando a simulação de redes com grande número de componentes em tempos bem reduzidos, abrindo a possibilidade de se desenvolver algoritmos para o suporte à otimização das redes em relação às perdas técnicas que necessitem recalculas as perdas um número elevado de vezes.

O aumento da eficiência energética em cada sistema de distribuição pode auxiliar na melhoria da qualidade de energia, uma vez que perdas elevadas estão às vezes associadas a redes sobrecarregadas, com problemas de nível de tensão e interrupção do fornecimento.

### 4.0 - METODOLOGIA

Para se obter uma metodologia e ferramentas bem calibradas à realidade da concessionária, está sendo realizado um conjunto de medições, no alimentador, nos transformadores de distribuição, nas redes secundárias e nos consumidores. Os dados obtidos com essas medições passarão por um tratamento

estatístico para que sejam utilizados pelo programa. Estas medições serão realizadas apenas para a calibração dos modelos utilizados nos cálculos.

A avaliação das perdas será realizada enfocando-se a necessidade de se segregar as perdas nas parcelas correspondentes às perdas técnicas e às perdas comerciais. O método utilizado para avaliação das perdas está representado de forma esquemática na Figura 1.

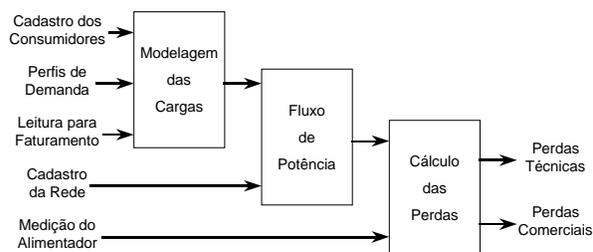


FIGURA 1 - Diagrama de blocos.

O sistema de avaliação é composto por três blocos principais: Modelagem das Cargas, Fluxo de Potência e Cálculo das Perdas, que serão descritos a seguir.

#### 4.1 Modelagem das Cargas

É o bloco responsável pela descrição de todas as cargas presentes no circuito em análise, fornecendo as curvas de carga dos consumidores de acordo com sua classificação e consumo mensal de energia.

Este módulo possui três entradas e uma saída. As entradas são: Cadastro dos Consumidores, Perfis de Demanda e Leitura para Faturamento. A saída é uma lista de curvas de carga de todas as cargas presentes na rede a ser analisada.

O Cadastro dos Consumidores fornece as informações que são importantes para a modelagem das cargas: posição de ligação do consumidor à rede, fases da rede às quais o consumidor está conectado, ramo de atividade, etc.

Os Perfis de Demanda fornecem as curvas de cargas típicas de acordo com as características de cada grupo de consumidores, resultantes do tratamento estatístico das medições de suas curvas de carga durante um período mínimo de observação.

A Leitura para Faturamento fornece os dados de consumo mensal para cada consumidor individual e as datas de realização das respectivas leituras, permitindo que se procedam as correções necessárias para se fechar o balanço de energia dentro de um determinado período de tempo.

O processo de Modelagem das Cargas efetuará a ponderação dos perfis característicos das cargas a partir das informações de consumos mensais corrigidos, fornecendo para o bloco de Fluxo de

Potência, para cada consumidor do cadastro, o correspondente valor da carga em cada intervalo de tempo considerado.

#### 4.2 Fluxo de Potência

Para o cálculo do fluxo de potência foi utilizado o método de injeção de correntes [1]. A implementação computacional desta metodologia vem sendo realizada adotando-se modelagem orientada a objetos sendo a linguagem de programação o visual C++. Com isso, uma ferramenta computacional onde agrega-se velocidade de processamento, robustez numérica e uma interface gráfica adequada é obtida. Dessa forma, redes de dimensão elevada são simuladas em um curto espaço de tempo. Esta característica é muito importante, principalmente para viabilizar a execução dos algoritmos de otimização que podem exigir que o fluxo de potência seja executado muitas vezes.

Como mostrado na Figura 1, o Fluxo de Potência processa as informações resultantes da modelagem das cargas em conjunto com as informações obtidas do cadastro da rede. O cadastro da rede contém informações sobre os parâmetros dos diversos componentes da rede e de sua conectividade elétrica, por exemplo: as bitolas e os comprimentos dos cabos e a configuração geométrica das linhas primária e secundária, as características dos transformadores de distribuição, a forma de ligação à rede de todas as cargas do circuito, etc.

#### 4.3 Cálculo das Perdas

A partir dos resultados dos fluxos de potência, este módulo calcula as perdas ocorridas em cada componente da rede primária e secundária de um circuito da rede. Assim, a partir das especificações de cada componente e das cargas conectadas ao sistema são calculadas, para cada segmento das curvas de carga, as perdas associadas a cada um dos componentes da rede, assim como a perda total do circuito simulado.

O programa apresenta uma interface de fácil utilização para a entrada de dados (descrição da rede e curvas de carga) bem como uma interface gráfica para a saída de dados onde pode-se obter o perfil diário de tensões em um dado nó da rede, as perdas no sistema e em seus componentes, etc.

A partir do somatório das perdas técnicas ocorridas em todo o alimentador ao longo de um período de tempo considerado, realiza-se uma estimativa das perdas comerciais através do balanço entre as medições realizadas no alimentador, a energia faturada e as perdas técnicas.

### 5.0 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

#### 5.1 Filosofia de Implementação Computacional

O desenvolvimento de programas computacionais para análise e operação de sistemas elétricos deve ser

realizado observando-se a estrutura de funcionamento e gerenciamento desses sistemas.

A Figura 2 mostra um diagrama esquemático proposto por Gönen [2] para implementação computacional de um programa de análises de sistemas de distribuição, onde diversas ferramentas interagem dinamicamente entre si e com o banco de dados. Mais externamente estão localizadas as ferramentas de análise, enquanto internamente, encontram-se os diversos dados necessários para execução dessas ferramentas. No anel interior é realizado o gerenciamento dos dados, ou seja, a comunicação entre as ferramentas de análise e os dados, enquanto a interface com os usuários se dá no anel externo.

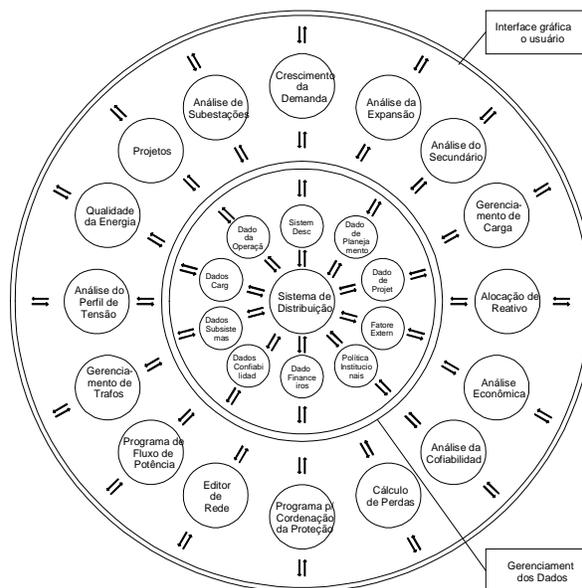


FIGURA 2 - Diagrama para programas de análises de sistemas de distribuição.

Vislumbrando o desenvolvimento de uma ferramenta para gerenciamento dos sistemas de distribuição (DMS – Distribution Management Systems) [3] a implementação computacional da metodologia proposta neste trabalho está sendo modelada adotando-se os conceitos de Orientação a Objetos, através da Técnica de Modelagem a Objetos (TMO). A Modelagem Orientada a Objetos (MOO) é uma nova metodologia de desenvolvimento de programas computacionais, utilizando-se modelos fundamentados em conceitos do mundo real. A estrutura básica é o objeto, que combina a estrutura e o comportamento dos dados em uma única entidade [3]. A linguagem de programação adotada é o C++.

#### 5.2 Estrutura de Classes do Programa para Cálculo de Perdas

A Figura 3 mostra o relacionamento entre as classes envolvidas na análise de perdas técnicas.

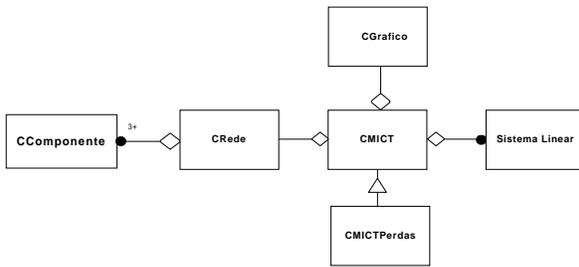


FIGURA 3 - Diagrama global de classes.

Nesta estrutura, o gerenciamento da rede elétrica é realizado pelas classes CComponente e CRede, as classes CMICT e Sistema\_Linear calculam o fluxo de carga, a classe CGrafico permite a análise gráfica dos resultados e a classe CMICTPerdas possibilita a análise das perdas por períodos. A seguir descreve-se com mais detalhe a função das classe mostradas na Figura 3.

### 5.2.1 Classe CComponente

Esta é uma classe abstrata, ou seja, serve apenas como classe base e é responsável pelo armazenamento dos componentes de uma rede elétrica, dos dados e métodos genéricos juntamente com os métodos utilizados por todas as classes dela derivada.

A estrutura de relacionamento entre a classe CComponente e as classes que representam os elementos passivos da rede é mostrada na Figura 4. Como pode ser visto, os componentes da rede são modelados de acordo com suas estruturas físicas, resultando em três classes base: classe CBarra, classe CSerie e classe CDerivacao.

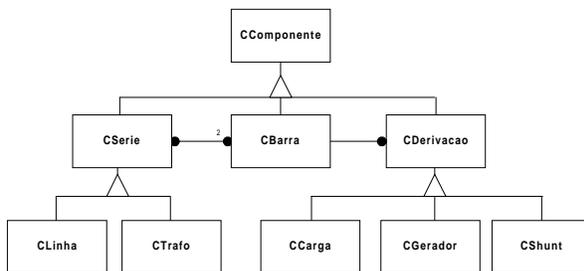


FIGURA 4 - Estrutura de relacionamento da classe CComponente.

A classe CBarra é derivada diretamente da classe CComponente. Nela são armazenadas todas as informações relativas às barras e todas as posições de memória dos componentes a ela conectados. O armazenamento das posições de memória é realizado através de vetores de ponteiros. Uma característica importante é que uma barra pode estar associada a vários elementos, sejam eles série, derivação ou, como será mostrado adiante, controles.

A classe CSerie também é derivada diretamente da classe CComponente. Possui todos os dados de CComponente, mais alguns elementos e métodos comuns aos componentes série de uma rede elétrica. Como em um sistema elétrico um elemento série só pode estar conectado entre duas barras, os objetos desta classe estão ligados a dois objetos pertencentes à classe CBarra. As classes derivadas de CSerie descrevem os elementos físicos propriamente ditos, enquanto a classe CLinha representa as linhas de transmissão e os alimentadores e a classe CTrafo representa os diversos tipos de transformadores..

Da mesma forma que CBarra e CSerie, a classe CDerivacao é derivada diretamente da classe CComponente, possuindo os elementos e métodos comuns aos componentes conectados em derivação numa rede elétrica. Os objetos desta classe podem estar ligados a um único objeto barra, enquanto uma barra pode possuir nenhuma, uma ou várias ligações com elementos em derivação. Igualmente à classe CSerie, os elementos derivados de CDerivacao representam as entidades físicas conectadas em derivação.

A classe CCarga representa as cargas conectadas às barras de um sistema. Nela estão presentes os modelos de carga assim como as possíveis conexões com a rede. Os objetos desta classe só podem ser conectados a um único objeto barra. Muito semelhante à CCarga, a classe CGerador representa as unidades geradoras e co-geradoras e a classe CShunt representa os elementos estáticos em derivação, ou seja, capacitores e indutores em derivação.

### 5.2.2 Classe CRede

Esta classe possui como objetivo a montagem e manutenção de uma rede elétrica. Nenhuma tarefa relacionada à solução do sistema algébrico é executada por esta classe, sendo ela composta (agregada) de classes derivadas de CComponente.

Dessa forma os objetos relativos aos componentes de uma rede elétrica são criados a partir da classe CComponente enquanto a classe CRede armazena e monta o sistema elétrico.

### 5.2.3 Classe Sistema\_Linear

A classe Sistema\_Linear foi desenvolvida em [4] e tem como objetivo a ordenação, fatoração e solução de sistemas lineares esparsos de grande porte. Essa classe mostrou-se altamente modular e flexível, permitindo sua aplicação em diversas ferramentas computacionais. Além disso, possui um excelente desempenho computacional.

### 5.2.4 Classe CMICT

Nesta classe é resolvido o fluxo de carga pelo método de injeção de corrente trifásico MICT [5]. A classe CMICT possui duas outras classes agregadas, CRede e Sistema\_Linear. A partir de uma rede montada por

CRede, a classe CMICT monta o sistema de equações lineares e as envia para a classe Sistema\_Linear que soluciona o conjunto de equações retornando o vetor solução. A partir desse ponto, realizam-se as atualizações e verifica-se a convergência. Nesta classe são realizados todos os cálculos relativos à rede elétrica (perdas, corrente nas linhas, etc.).

#### 5.2.5 Classe CMICTPerdas

A classe CMICTPerdas é derivada da classe CMICT e possibilita a análise das perdas por períodos, armazena os resultados de diversos fluxos de carga e retorna os resultados através de relatórios.

#### 5.2.6 Classe CGrafico

A classe CGrafico, é agregada à classe CMICT e possibilita a análise gráfica dos resultados armazenados nas classes CMICT e CMICTPerdas.

### 6.0 - CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho uma nova metodologia para cálculo e análise das perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Nessa metodologia, as perdas técnicas são calculadas, a partir de curvas de carga, para cada componente do sistema e as perdas comerciais estimadas através do balanço entre medições em campo, energia faturada e cálculo das perdas técnicas.

A implementação computacional da metodologia vem sendo realizada adotando-se orientação a objetos, dando grande flexibilidade e modularidade, o que permite a inclusão de novas funções através de classes agregadas de forma semelhante à análise de perdas

Como extensão deste projeto pretende-se propor o desenvolvimento de um módulo para otimização das perdas técnicas de um alimentador.

### 7.0 - REFERÊNCIAS

(5) GARCIA, P. N. ET AL (2000). Three-phase Power Flow Calculations Using the Current Injection Method. IEEE Transactions on Power Systems, May 2000.

(2) GÖNEN, T. (1986). Electric Power Distribution Systems Engineering, McGraw-Hill - Series in Electrical Engineering.

(3) ZHU, J., D.L. LUBKEMAN (1997). Object-Oriented Development of Software Systems for Power Systems Simulations. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, May.

(4) RUMBAUGH, J. ET AL (1994). Modelagem e Projetos Baseados em Objetos. Editora Campus.

(5) ARAÚJO, L. R. (2000). Aplicação de Técnicas de Modelagem Orientada a Objetos a Sistemas Lineares Esparsos. Tese de mestrado, UFJF, Brasil.