

ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIOS EM REDES DE BAIXA TENSÃO

Nelson Kagan

Marcos R. Gouvêa

Carlos M. V. Tahan

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas
Av. Prof. Luciano Gualberto, Trav. 3, 158, CEP 05508-900 - São Paulo (SP)
e-mail: nelsonk@pea.usp.br

Resumo - Este artigo trata da avaliação de desequilíbrios em redes de distribuição, com maior ênfase para a baixa tensão, focalizando sua importância para os estudos de qualidade de fornecimento de energia elétrica. Uma metodologia abrangente é apresentada, considerando a modelagem da rede por componentes de fase, e a modelagem da carga pelo modelo de corrente constante e por curvas de carga obtidas a partir de estudo relativo aos hábitos de consumo de consumidores residenciais, comerciais e industriais, classificados por faixa de consumo e ramo de atividade. O cálculo elétrico da rede de distribuição, que fornece os índices de desequilíbrio de corrente e tensão, baseia-se no método de Monte Carlo. Obtêm-se assim informações probabilísticas das grandezas envolvidas, com curvas de distribuição de probabilidade associadas.

Palavras-chave - desequilíbrios de tensão e corrente, fluxo de potência trifásico, cálculo elétrico probabilístico.

Abstract - This paper deals with the evaluation of unbalance in distribution systems, with special attention to low voltage networks, and its relevance to further service quality studies. A comprehensive methodology is herein presented, considering the network modeled by phase components and the loads modeled by constant current injections with their corresponding daily curves. Such curves are obtained from a previous study of residential, commercial and industrial customers who are connected to the low voltage network and classified according to their monthly absorbed energy and activity. A three-phase probabilistic load flow provides voltage and current unbalance indices, by using a Monte Carlo based method. The probabilistic information as such indices regard are thence obtained, by presenting the corresponding distribution functions.

Keywords - voltage and current unbalance, three-phase load flow, probabilistic load flow.

1. INTRODUÇÃO

O tema de qualidade de energia elétrica tem se tornado cada vez mais relevante em nossa sociedade, principalmente nas perspectivas do novo ambiente do setor elétrico. Por um lado, estão os consumidores, que são ao mesmo tempo os responsáveis pelas “cargas poluidoras” - que provocam distúrbios e deterioração da qualidade - e aqueles que contam com cargas sensíveis à esta poluição. Por outro lado, estão as empresas concessionárias, que distribuem energia elétrica para os diversos consumidores na rede elétrica, e determinam um certo padrão mínimo de qualidade. Dentro deste enfoque, podem ser enquadrados diversos aspectos importantes da qualidade de energia, desde aqueles fenômenos mais voltados para a qualidade de produto, como harmônicos, *dips* e *sags* de tensão e desequilíbrios de tensão assim como os mais voltados para a qualidade de serviço, como os índices relativos a interrupções de energia, como a END (energia não distribuída), o DEC (duração equivalente por consumidor) e outros.

Este artigo é voltado para o tema de desequilíbrios de corrente e tensão em redes de

distribuição, quando operando em frequência industrial de 60Hz. Este aspecto da qualidade de energia é de extrema importância, principalmente ao serem analisadas as consequências nos equipamentos da rede elétrica. Por exemplo, desequilíbrios de tensão em motores de indução provocam, além da diminuição de desempenho da máquina, o aumento de sua temperatura de trabalho e por consequência diminuição da sua vida útil [1,2]. Um pequeno desequilíbrio de tensão, da ordem de 2%, pode acarretar desequilíbrios de corrente da ordem de 15% e elevação de temperatura de 30°C.

Na rede de distribuição podem ocorrer desequilíbrios de naturezas distintas:

- i. o primeiro aspecto refere-se a assimetria da rede, por características tais como a de não transposição das fases da rede trifásica, ou pelos tipos de transformadores (ou bancos de transformadores) de distribuição utilizados. Neste caso, mesmo que a carga seja perfeitamente equilibrada (desequilíbrio de corrente nulo), serão detectados níveis de desequilíbrio de tensão;
- ii. o segundo aspecto é função da natureza da carga, ou seja, de como os consumidores

(monofásicos, bifásicos ou trifásicos) estão conectados nas fases e neutro da rede de distribuição e com os diferentes níveis de corrente que absorvem em cada instante de tempo da curva de carga diária.

Dentro deste enfoque, necessitam-se ferramentas que modelem estes dois aspectos, os quais são basicamente tratados neste artigo nos tópicos subseqüentes, correspondendo, respectivamente, à modelagem da rede e à modelagem da carga. Uma vez estabelecidos esses dois pontos importantes da modelagem do problema, apresenta-se o método para resolução do fluxo de potência trifásico que, neste artigo, trata de redes radiais de distribuição. Uma vez avaliadas as grandezas elétricas resultantes da formulação de fluxo de potência, são avaliados os índices de desequilíbrio da rede elétrica, de tensão e corrente. Em seqüência, apresenta-se metodologia para tratar o problema de fluxo de potência de forma probabilística, dado que as curvas de distribuição de probabilidades das demandas instantâneas (medições de 15 em 15 minutos) de cada consumidor da rede secundária são conhecidas. Um exemplo de aplicação ilustra as potencialidades da metodologia proposta.

2. MODELAGEM DA REDE

Neste artigo, o interesse está na rede de baixa tensão, a partir do primário do transformador (ou banco de transformadores) de distribuição, conforme ilustra a figura 1.

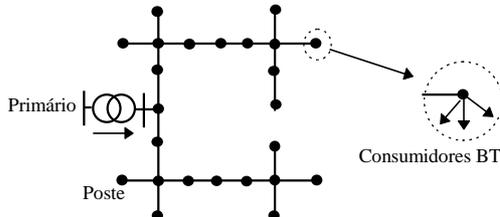


Figura 1 - Rede de Baixa Tensão

Na modelagem da rede devem ser incorporados dois componentes básicos do sistema, quais sejam os trechos da rede secundária e o transformador de distribuição.

Cada trecho da rede secundária, conforme apresentado na figura 2, é tratado a partir da correspondente matriz de impedâncias, cujo cálculo é realizado internamente no modelo (função dos tipos de condutores, da disposição geométrica dos condutores e da resistividade do solo), que relaciona a queda de tensão em cada condutor (fases A, B, C e neutro N) com as correspondentes correntes. Ou seja, sendo ΔV_i e I_i , respectivamente, a queda de tensão e corrente no condutor i de um trecho genérico da rede, Z_{ii} a impedância própria do condutor i e Z_{ij} a

impedância mútua entre os condutores i e j , temos que a relação entre quedas de tensão e correntes num trecho genérico de rede pode ser avaliada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_C \\ \Delta V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AN} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BN} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CN} \\ Z_{NA} & Z_{NB} & Z_{NC} & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_N \end{bmatrix}$$

O cálculo dos elementos da matriz Z acima baseia-se em metodologia detalhada em [3].

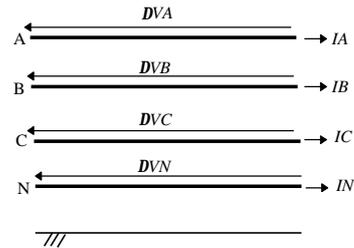


Figura 2 - Trecho de rede secundária

Os transformadores de distribuição são classificados em dois tipos básicos a serem considerados. O primeiro caso, bastante comum nas empresas de distribuição, consiste em transformadores trifásicos, ligados em triângulo no primário e em estrela aterrada no secundário. Nestes casos, por simplicidade, considera-se conhecidas as impedâncias de curto circuito de seqüência positiva (Z_1), negativa ($Z_2 = Z_1$) e nula (Z_0) do transformador, de modo que a relação entre as quedas de tensão e as correntes nas fases do secundário do transformador podem ser avaliadas por:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_0 + 2Z_1 & Z_0 - Z_1 & Z_0 - Z_1 \\ Z_0 - Z_1 & Z_0 + 2Z_1 & Z_0 - Z_1 \\ Z_0 - Z_1 & Z_0 - Z_1 & Z_0 + 2Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

No segundo caso, seriam considerados os bancos de transformadores monofásicos. Como exemplos típicos, podem ser citados os bancos em delta aberto e em delta fechado, que podem ser também tratados por forma matricial, análoga àquela utilizada para os transformadores trifásicos. Por razões de espaço, tais configurações não serão tratadas neste trabalho.

3. MODELAGEM DA CARGA

A modelagem da carga envolve dois aspectos importantes: o primeiro referente ao tratamento da curva de carga de cada consumidor e o segundo referente a variação da potência ou corrente absorvida com a variação da tensão.

As curvas de carga típicas são obtidas a partir de estudo dos hábitos de consumo [4], identificadas a partir do tipo de consumidor, isto é, categorias residencial, comercial ou industrial.

Para consumidores residenciais, a partir do consumo típico mensal, pode-se determinar a curva de carga típica, que é dividida em faixas de consumo. Tais consumidores foram divididos em quatro faixas, quais sejam: de 0 a 200 kWh, de 200 a 400 kWh, de 400 a 500 kWh e acima de 500 kWh mensais. Na figura 3 apresenta-se um exemplo de curva de carga residencial, com valores médios e de desvio padrão da demanda em intervalos de 15 minutos, de um consumidor que absorve 350 kWh por mês.

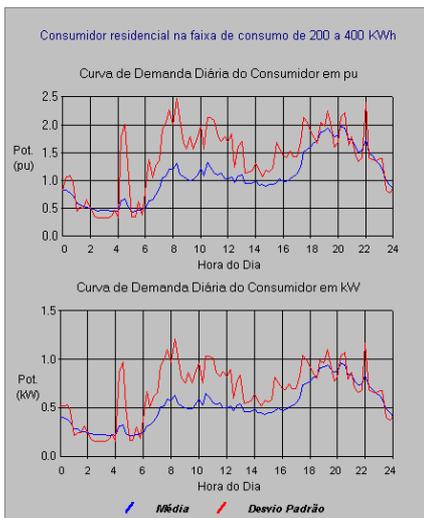


Figura 3 - Curva de Carga: Consumidor Residencial

Para consumidores comerciais e industriais, deve ser fornecido ainda o código de atividade, o que define a correspondente característica de hábito de consumo. A partir do consumo mensal, determinam-se as curvas de carga diárias correspondentes.

Quanto ao segundo aspecto, assume-se que as cargas são do tipo corrente constante, isto é, o módulo da corrente e o fator de potência destas são invariantes com o correspondente módulo da tensão. Este tipo de modelagem é bastante aceitável em redes de distribuição, que contam com composição de diferentes equipamentos.

Por hipótese, supõe-se conhecida a distribuição dos consumidores (com correspondentes consumo e tipo/ código de atividade) nas fases da rede, o que tende a ser uma informação cada vez mais acessível com o desenvolvimento de sistemas de bancos de dados nas empresas de distribuição. Além disso, cargas especiais (por exemplo, máquinas de Raio X) a serem ligadas à rede podem ser simuladas a partir do conhecimento de suas potência ativa e reativa e do tipo de ligação (bifásica, trifásica), sendo estas agregadas aos demais consumidores da rede, supridos por um único transformador.

4. FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO

A partir dos modelos para tratamento da carga e da rede, pode-se proceder ao desenvolvimento de metodologia para o cálculo de fluxo de potência, por componentes de fase, da rede elétrica. Consideram-se conhecidos ainda a tensão no primário do transformador de distribuição e o fator de potência dos consumidores de baixa tensão.

Uma vez conhecidas as matrizes de elementos de trechos de rede e do transformador de distribuição, que relacionam queda de tensão com as correntes nas fases (e neutro), pode-se trabalhar com o sistema radial desbalanceado como se fosse balanceado, com a diferença básica que a queda de tensão e/ou corrente por trecho, que antes eram escalares, passam a ser vetores de quatro posições, correspondentes às três fases e ao neutro.

Assim sendo, conhecendo-se os vetores de correntes de carga, pode-se partir dos trechos de final de rede, acumulando os valores de corrente e calculando-se as quedas de tensão em cada um dos condutores de fase e de neutro através das matrizes de elementos. A partir das quedas de tensão em cada um dos trechos da rede e, conhecendo-se a tensão na barra de média tensão do transformador de distribuição, pode-se avaliar as tensões em todos os pontos da rede calculando-se progressivamente as tensões partindo-se do primário do transformador em direção às cargas de final de linha. Uma vez avaliadas as tensões, verifica-se a convergência do processo, isto é, se as diferenças de módulos de tensões da iteração atual e anterior são menores que determinada tolerância. Caso não ocorra, o procedimento é repetido, conforme ilustrado no diagrama da figura 4.

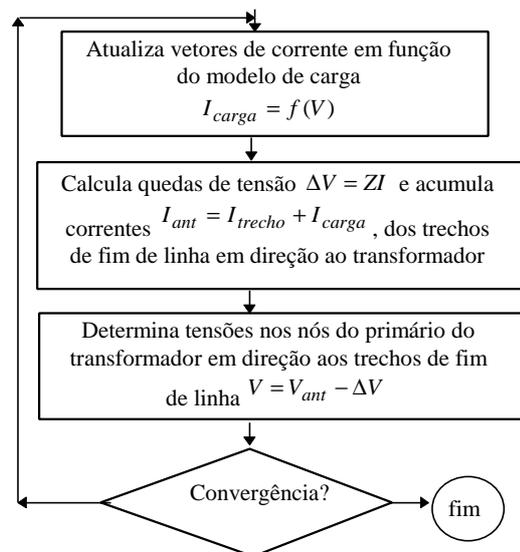


Figura 4 - Diagrama de blocos fluxo de potência trifásico

A partir da determinação, em cada fase, das tensões nodais e das correntes por trecho, podem ser avaliados os índices de desequilíbrio de tensão,

f_{desV} , e de corrente, f_{desI} que, neste trabalho, foram baseados na norma NEMA:

$$f_{desV} = \frac{\max(|V_{AB} - \bar{V}|, |V_{BC} - \bar{V}|, |V_{CA} - \bar{V}|)}{\bar{V}}$$

$$f_{desI} = \frac{\max(|I_A - \bar{I}|, |I_B - \bar{I}|, |I_C - \bar{I}|)}{\bar{I}}$$

$$\text{com } \bar{I} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \text{ e } \bar{V} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3}$$

5. METODOLOGIA PROBABILÍSTICA

Conforme pode-se notar da figura 3, as informações de demanda instantânea (em intervalos de 15 minutos) de um dado consumidor ligado na rede secundária são probabilísticas, no sentido que são conhecidos os valores médios e de desvio padrão de demanda em cada instante. Na verdade, é ainda mais relevante o conhecimento das curvas de distribuição de probabilidade da demanda instantânea. Neste sentido, para os consumidores residenciais, procedeu-se, a partir das medições individuais, a avaliação da curva de distribuição de probabilidades, no intervalo de ponta. Na figura 5 apresenta-se as curvas de densidade e acumulada, adotadas para utilização nas simulações com os consumidores residenciais.

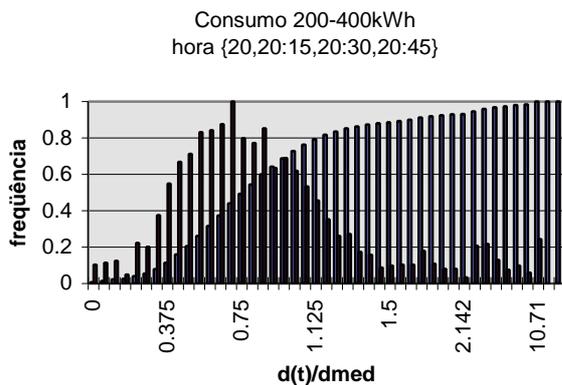


Figura 5 - Curva de distribuição de probabilidades, horário de ponta, para consumidores residenciais

Quanto aos consumidores comerciais e industriais, dado seus valores de desvio padrão bem mais reduzidos em relação às correspondentes médias, adotou-se curvas de distribuição gaussianas (normais).

A metodologia probabilística adotada baseia-se no Método de Monte Carlo, que parte da execução de um número suficiente de ensaios, identificando possíveis cenários de demandas diversificadas de todos os consumidores da rede secundária, a partir de geração de números aleatórios. Tal geração de números aleatórios pode ser executada em micro-computadores a partir de rotina específica. Assim, sorteando-se um número real entre 0 e 1 e conhecendo-se a curva de

distribuição de probabilidades acumulada (Figura 5), pode-se avaliar um valor de demanda instantânea de um dado consumidor a partir da frequência acumulada. Isto equivale a dizer que, se fossem executados um número muito elevado de sorteios, a frequência de ocorrência de valores descreveria uma distribuição de probabilidades que reproduz aquela curva fornecida. Para cada ensaio (ou cenário) gerado a partir de sorteios de números aleatórios em cada consumidor, podem ser avaliados os valores de carregamentos e quedas de tensão na rede, utilizando-se a metodologia descrita no item 4 deste artigo. Conhecidos o número de ensaios, pode-se construir o histograma destas variáveis, dividindo-se em faixas entre os valores mínimo e máximo de cada variável e, para cada faixa, avaliando-se o número de ocorrências. A frequência de cada faixa fica então facilmente determinada pela relação entre o número de ocorrências e o número total de ensaios. Para melhor monitoração do método de Monte Carlo, em termos da convergência do processo, é comum dividir o número total de ensaios em grupos. Por exemplo, são realizados 10 grupos de 100 ensaios e, para cada grupo, monitora-se os parâmetros elétricos de interesse. Quando os valores médio e de desvio padrão param de variar, entre dois grupos consecutivos, existe indicação de convergência do processo com relação a estas variáveis. A figura 6 a seguir ilustra o procedimento adotado.

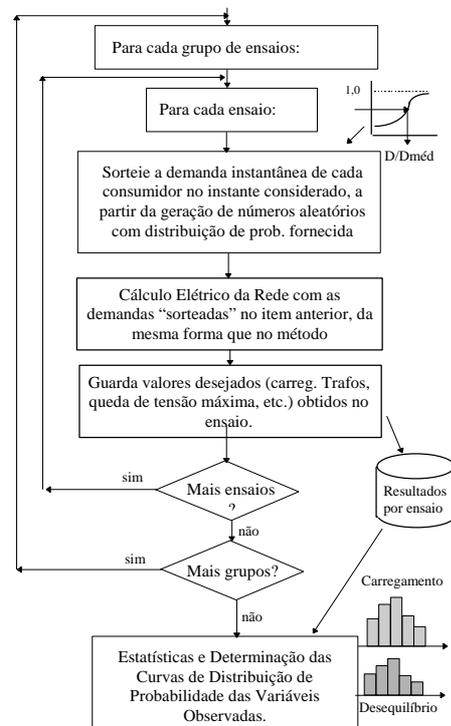


Figura 6 - Metodologia Probabilística

6. EXEMPLO ILUSTRATIVO

Na figura 7 apresenta-se uma rede de distribuição secundária, que alimenta 78

consumidores na baixa tensão (67,5% de consumo residencial e o restante de comercial), conectados nos postes 1 a 14. A rede é suprida por um transformador trifásico, em ligação delta-estrela aterrado, 13,8/0,22 kV de 100 kVA. Neste exemplo ilustrativo, são simuladas duas situações opostas. A primeira, caso 1, corresponde à pior situação, na qual assume-se que todos os consumidores bifásicos estejam ligados entre as fases AB. Na segunda situação, caso 2, estes consumidores passam a ser supridos, ciclicamente, pelas três fases.

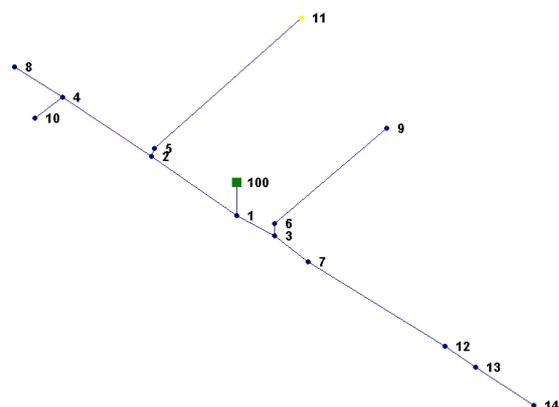


Figura 7 - Rede exemplo

O caso 1 foi simulado no pico do sistema (20:15h), utilizando o método de Monte Carlo, com o qual foi determinado o máximo índice de desequilíbrio na rede, cujo valor variou entre 3,97% e 10,44%, com valor médio de 5,64%, conforme mostrado na figura 8.

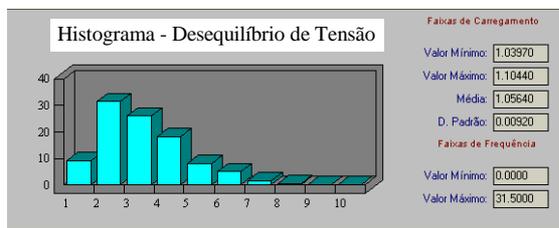
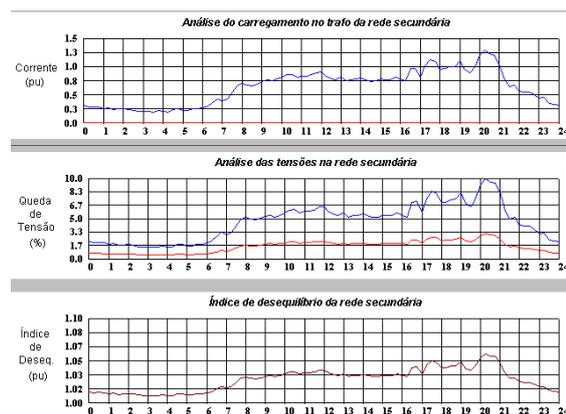


Figura 8 - Curva de Distribuição de Probabilidades: Índice de Desequilíbrio de Tensão

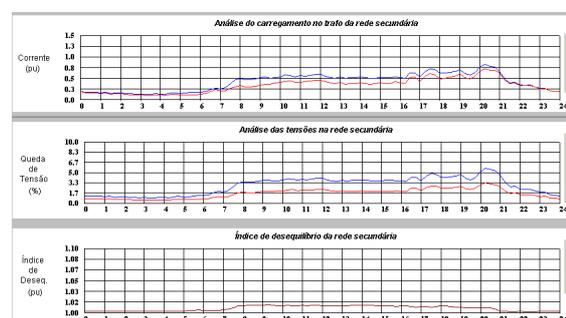
Na figura 9.a apresenta-se, para este caso, os valores de carregamento no transformador, queda de tensão média e máxima na rede e o desequilíbrio de tensão durante as 24 horas do dia. Nesta situação, o transformador apresenta desequilíbrio de corrente altíssimo, dado que em uma de suas fases não há corrente. Este fato também provoca alto índice de desequilíbrio de tensão e de queda de tensão na rede de distribuição.

No caso 2, conforme mostrado na figura 9.b, a situação de desequilíbrio comprova-se mais amena: o índice de desequilíbrio passa para um valor não superior a 2% durante o dia. A queda de tensão sofre diminuição acentuada e os carregamentos nas fases dos transformadores tornam-se quase que

totalmente iguais (a figura mostra os carregamentos máximo e mínimo nas fases do transformador).



a. caso 1



b. caso 2

Figura 9 - Variação diária de índices médios

7. CONCLUSÕES

Este artigo mostrou um método probabilístico para a determinação de níveis de desequilíbrio em redes de baixa tensão. Os dados necessários à utilização do modelo tornam-se cada vez mais disponíveis nas empresas de distribuição, o que permitirá a aplicação desta metodologia em diversos estudos que tratam deste aspecto da qualidade de energia elétrica. A extensão da metodologia para redes de média e alta tensão está sendo tratada pelos autores.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Woll, R. F. Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-11, n.1, pp 38-42, Jan/Feb 1975.
- [2] Paulillo, G. Um Compensador Eletromagnético de Desequilíbrios de Tensão, Dissertação de Mestrado, EFEI, Dezembro de 1996.
- [3] Jardini, J. A. Aplicação de Computadores Digitais para Cálculo de Parâmetros Elétricos de Linhas, EPUSP, 1970.
- [4] Jardini, J. A.; Tahan, C.M.V et al - Residential and Commercial Daily Load Curves Representation by Statistical Functions for Engineering Studies, CIRED, Bruxelas, 1995.