

SENDI 2004
XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

**Metodologia para Avaliação das Perdas Técnicas em Redes de Baixa Tensão Utilizando
Técnicas de Classificação – O Caso da RGE**

A. Méffe	Enerq/EPUSP
C. C. B. de Oliveira	Enerq/EPUSP
H. P. Schmidt	Enerq/EPUSP
G. Abejaneda	RGE
M. M. Marquesan	RGE

E-mail: ameffe@pea.usp.br

Palavras-chave:
cálculo de perdas técnicas
curvas típicas de carga
distribuição de energia elétrica
técnicas de classificação

Brasília, 21 a 24 de novembro de 2004

RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia para estimar as perdas técnicas em circuitos de distribuição de baixa tensão. Ela inclui os modelos para representação da carga e avaliação das perdas e representa uma tentativa de contornar o problema de falta de informações geralmente associado às redes de baixa tensão. Um número significativo de circuitos secundários foi levantado em campo de forma a obter uma amostra de circuitos secundários com dados referentes à topologia que representasse apropriadamente todos os circuitos secundários da população. Técnicas de classificação foram aplicadas à amostra levantada em campo de forma a agrupar os circuitos em famílias ou categorias de circuitos secundários. Um valor invariante chamado *coeficiente de perdas* (que é de importância fundamental neste trabalho) foi calculado para cada circuito da amostra. Um circuito não pertencente à amostra é classificado em uma das famílias previamente encontradas e, então, o coeficiente de perdas da família é atribuído ao circuito em questão, permitindo o cálculo de suas perdas. Este artigo também apresenta e discute os resultados obtidos.

1. INTRODUÇÃO

A RGE – Rio Grande Energia – atende mais de 1.000.000 de consumidores por meio de aproximadamente 400 alimentadores primários e 50.000 circuitos secundários. Em sua base de dados há informações detalhadas de todo o sistema de média tensão, porém o mesmo nível de detalhe não existe para o sistema de baixa tensão. Assim, as áreas de planejamento e de operação da empresa normalmente encontram sérias dificuldades para analisar o sistema de baixa tensão.

Considerando os circuitos secundários, a base de dados da RGE contém as seguintes informações: potência do transformador, tensão primária do transformador, tipo do transformador (monofásico ou trifásico), tipo da área em que o transformador está localizado (urbana ou rural), entre outros dados, sempre concentrados e referentes ao transformador de distribuição. Em particular, a base de dados não contém informações acerca da topologia da rede, cabos utilizados e tampouco comprimentos dos trechos de rede, o que impossibilita a utilização de um programa de fluxo de potência para realizar o cálculo das perdas no circuito secundário.

Este artigo apresenta uma metodologia para estimar as perdas técnicas em redes secundárias quando não são disponíveis informações detalhadas a seu respeito. A metodologia também inclui um modelo para representação da carga. Um número significativo de circuitos secundários foi levantado em campo de modo a estabelecer uma amostra que representasse a população de circuitos secundários da RGE. Para cada um dos circuitos da amostra, foi determinado um coeficiente de perdas. Técnicas de classificação foram aplicadas para agrupar os circuitos da amostra em famílias. Posteriormente, um circuito não pertencente à amostra é classificado em uma das famílias formadas de modo a obter o seu coeficiente de perdas, o qual permite finalmente estimar as perdas do circuito.

O artigo apresenta inicialmente os aspectos gerais da representação da carga e o modelo de avaliação das perdas em detalhe. Em seguida, os modelos de classificação utilizados neste trabalho são descritos. Por fim, a metodologia é aplicada aos circuitos secundários da RGE e os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

2. METODOLOGIA

2.1 Representação da Carga

Neste trabalho, a carga de cada consumidor é representada por uma curva de carga (diária) típica que fornece as demandas ativa e reativa em intervalos de 15 minutos. Tais curvas típicas de carga foram determinadas a partir de um número considerável de medições de vários consumidores. Cada curva típica possui um valor para a média e outro para o desvio padrão para cada intervalo e foi estabelecida para cada classe de consumo (residencial, industrial, comercial e rural), sendo que cada classe de consumo foi dividida em faixas de consumo mensal. Os valores da média e do desvio padrão estão em pu da demanda ativa média mensal, de modo que se pode obter as curvas em kW e kVAr de cada consumidor conhecendo-se apenas seu consumo mensal em kWh e sua curva de carga típica em pu

(determinada a partir da classe de consumo do consumidor e de sua respectiva faixa de consumo).

A título de exemplo, as figuras 1 e 2 mostram as curvas típicas de demanda ativa e reativa, respectivamente, para consumidores residenciais com consumo mensal maior ou igual a 500 kWh.

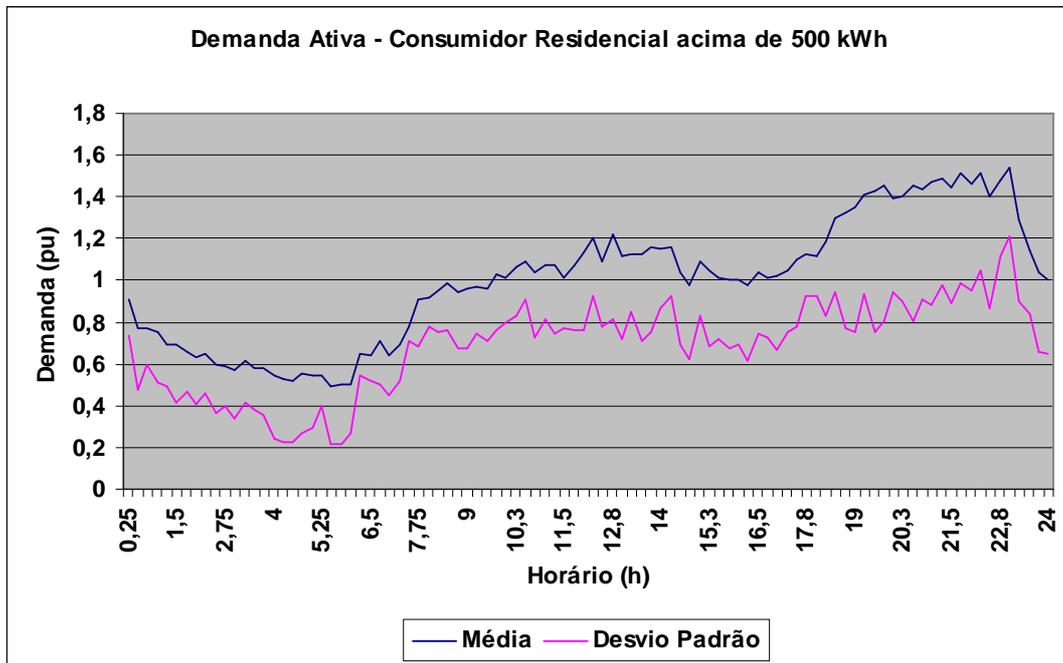


Figura 1. Curva típica de carga em termos de demanda ativa

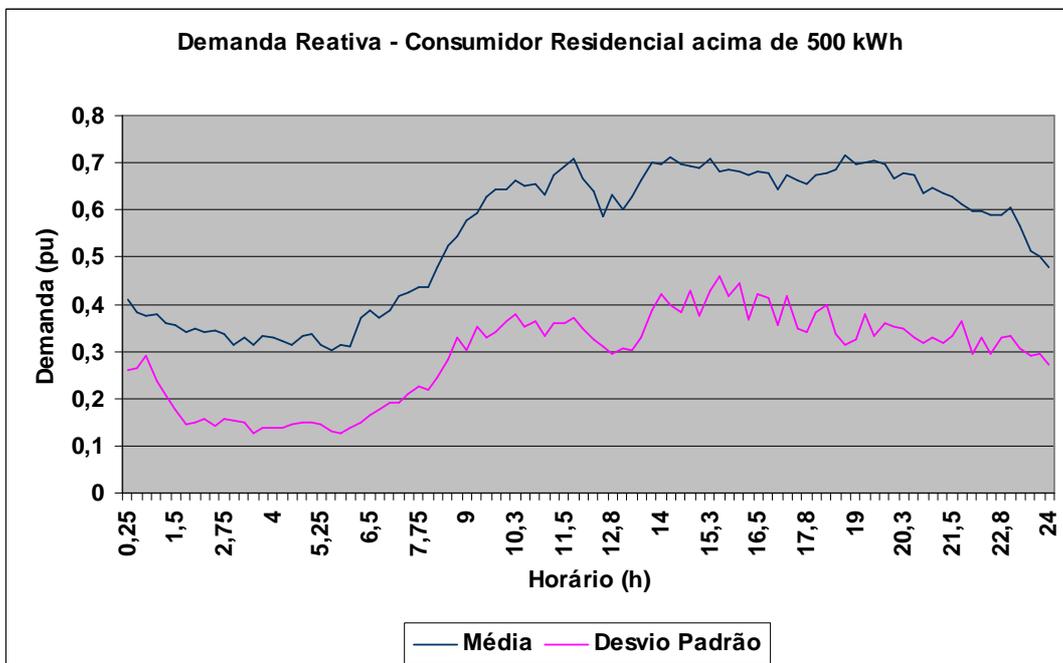


Figura 2. Curva típica de carga em termos de demanda reativa

2.2 Modelo para Avaliação das Perdas

Este trabalho representa uma importante extensão de um trabalho anterior na área de cálculo de

perdas técnicas [1], no qual uma metodologia para cálculo de perdas nos vários segmentos (subestação de distribuição, rede primária, transformador de distribuição, rede secundária, ramal de ligação e medidor de energia) do sistema de distribuição foi desenvolvida.

Entretanto, tal metodologia requer uma descrição detalhada do sistema de distribuição, especialmente no que diz respeito à topologia da rede, bitola dos cabos utilizados e localização dos consumidores, informações essas que não estão disponíveis na base de dados da RGE. Assim, objetivou-se estabelecer um conjunto de circuitos secundários para representar todos os circuitos secundários da empresa.

Para cada circuito secundário, são disponíveis as seguintes informações (atributos) na base de dados:

- Potência nominal do transformador de distribuição [kVA];
- Tipo do transformador (monofásico a 1 bucha, monofásico a 2 buchas ou trifásico);
- Tensão primária do transformador [kV];
- Tipo da área em que o transformador está localizado (urbana ou rural).

Um conjunto de 187 circuitos secundários (amostra) foi selecionado para levantamento em campo. O tamanho da amostra foi calculado para cada departamento da empresa. Dentro de cada departamento, foi calculada uma amostra para representar os circuitos em área rural e outra para os circuitos em área urbana. Dessa forma, foi possível estabelecer uma amostra que melhor representasse os circuitos secundários existentes na RGE, considerando as particularidades de cada departamento e de cada tipo de área (urbana ou rural). A partir do levantamento em campo e de análise detalhada dos circuitos da amostra, foi possível estabelecer mais dois atributos:

- Comprimento total do circuito secundário [m];
- Coeficiente de perdas [kW/(kVA/m)²].

Basicamente, o objetivo do levantamento em campo de uma amostra de circuitos secundários foi procurar uma relação entre os quatro atributos básicos (potência do transformador, tipo do transformador – monofásico ou trifásico, tensão primária e tipo da área – urbana ou rural) e os dois atributos obtidos a partir desse levantamento (comprimento e coeficiente de perdas). Assim, para um circuito secundário qualquer em que não são conhecidos o comprimento e o coeficiente de perdas, é possível obter esses dois atributos extras de forma a tornar possível o cálculo das perdas.

O coeficiente de perdas CP de um circuito é definido como sendo a perda de demanda no horário de ponta P_{ponta} dividida pelo quadrado do carregamento linear no horário de ponta δ_{ponta} , sendo o carregamento linear em um instante qualquer de tempo δ_i calculado pela demanda nesse instante D_i , dividida pelo comprimento total do circuito l :

$$CP = \frac{P_{ponta}}{\delta_{ponta}^2} = \frac{kW}{\left(\frac{kVA}{m}\right)^2}, \quad (1)$$

$$\delta_t = \frac{D_t}{l} = \frac{kVA}{m}. \quad (2)$$

O coeficiente de perdas é constante para cada circuito e reflete a topologia do circuito, as resistências dos cabos utilizados e o nível de tensão de uma forma bem compacta e conveniente. Para um circuito trifásico com carregamento uniformemente distribuído, a perda de demanda no horário de ponta é dada por:

$$P_{ponta\ 3} = 3 \cdot r \cdot l \cdot I_{peak}^2 = \frac{r \cdot l^3}{3 \cdot V^2} \cdot \delta_{ponta}^2, \quad (3)$$

na qual r é a resistência por unidade de comprimento [Ω/m] e V é a tensão de linha do circuito [V]. A partir das equações (1) e (3) acima, nota-se que o coeficiente de perdas para um circuito trifásico é dado por:

$$CP_3 = \frac{P_{ponta\ 3}}{\delta_{ponta}^2} = \frac{r \cdot l^3}{3 \cdot V^2}. \quad (4)$$

O coeficiente de perdas foi obtido para cada circuito da amostra a partir dos dados de topologia levantados em campo e considerando um carregamento uniformemente distribuído de 1 kVA/m.

Uma vez que o coeficiente de perdas e o comprimento são conhecidos para um circuito não pertencente à amostra, torna-se fácil estimar a sua perda de demanda em cada instante t a partir das equações (1) e (2) e da curva de carga no transformador. O problema agora é como atribuir os dois atributos extras (coeficiente de perdas e comprimento) a cada circuito secundário não pertencente à amostra.

Para atingir tal objetivo, foram utilizadas algumas técnicas de classificação. O processo de classificação foi conduzido em duas etapas. Em um primeiro passo, as técnicas de classificação foram aplicadas ao conjunto de circuitos secundários da amostra com o objetivo de formar categorias ou famílias de circuitos secundários utilizando critérios de semelhança entre os atributos. Nessa etapa, o

objetivo foi identificar padrões de circuitos secundários, baseados nos circuitos da amostra, com valores médios para o coeficiente de perdas e o comprimento obtidos a partir dos coeficientes de perdas e dos comprimentos dos circuitos dentro de cada família. A esse processo, deu-se o nome de Formação de Famílias.

No segundo passo, as técnicas de classificação foram utilizadas para classificar cada circuito secundário não pertencente à amostra em uma das famílias previamente formadas e, assim, atribuir a cada circuito um comprimento e um coeficiente de perdas de modo que o cálculo de suas perdas seja possível. A esse processo, deu-se o nome de Classificação.

Neste trabalho, foram utilizadas duas técnicas para realizar a formação de famílias e a classificação: o Classificador Hierárquico e o Classificador SOM, que serão apresentados na próxima seção.

3. CLASSIFICAÇÃO DOS CIRCUITOS DE BAIXA TENSÃO

Nesta seção serão discutidos o problema da classificação e os modelos implementados para classificar os circuitos.

Em linhas gerais, o problema da classificação pode ser resumido como sendo um processo que agrupa indivíduos semelhantes de uma população em categorias. Os indivíduos (circuitos secundários) são identificados por um conjunto de atributos, que neste trabalho são os quatro atributos básicos definidos anteriormente. Para isso, é necessário antes definir uma forma de medir a similaridade entre os indivíduos. A seguir, as duas técnicas de classificação empregadas neste trabalho serão apresentadas mais detalhadamente.

3.1 Classificador Hierárquico

A técnica de classificação hierárquica requer que uma ordem de importância para os atributos seja especificada a priori. Então, para o primeiro atributo, um número de categorias é criado; este número é igual ao número de valores possíveis para o primeiro atributo. Para cada categoria formada a partir do primeiro atributo, um número de subcategorias é criado de acordo com o número de valores possíveis para o segundo atributo. Esse processo é repetido para todos os atributos de classificação conforme mostrado na figura 3.

O Classificador Hierárquico adapta-se bem nos casos em que os atributos assumem valores discretos (por exemplo, 13,8 kV e 23,1 kV para a tensão primária dos transformadores). Quando um atributo assume uma faixa de variação contínua (por exemplo, o comprimento), ele tem de ser discretizado em um número adequado de faixas. Deve-se procurar ter o menor número possível de faixas de valores possível, porém sem comprometer a homogeneidade das categorias obtidas.

Uma vez que as categorias foram estabelecidas com o processo de formação de famílias, utilizando os circuitos secundários da amostra e seus seis atributos, o processo de classificação é bem simples. Cada circuito é atribuído a uma família apenas analisando-se os seus quatro atributos básicos, procurando a família cujos atributos básicos combinem com os atributos básicos do circuito a ser classificado.

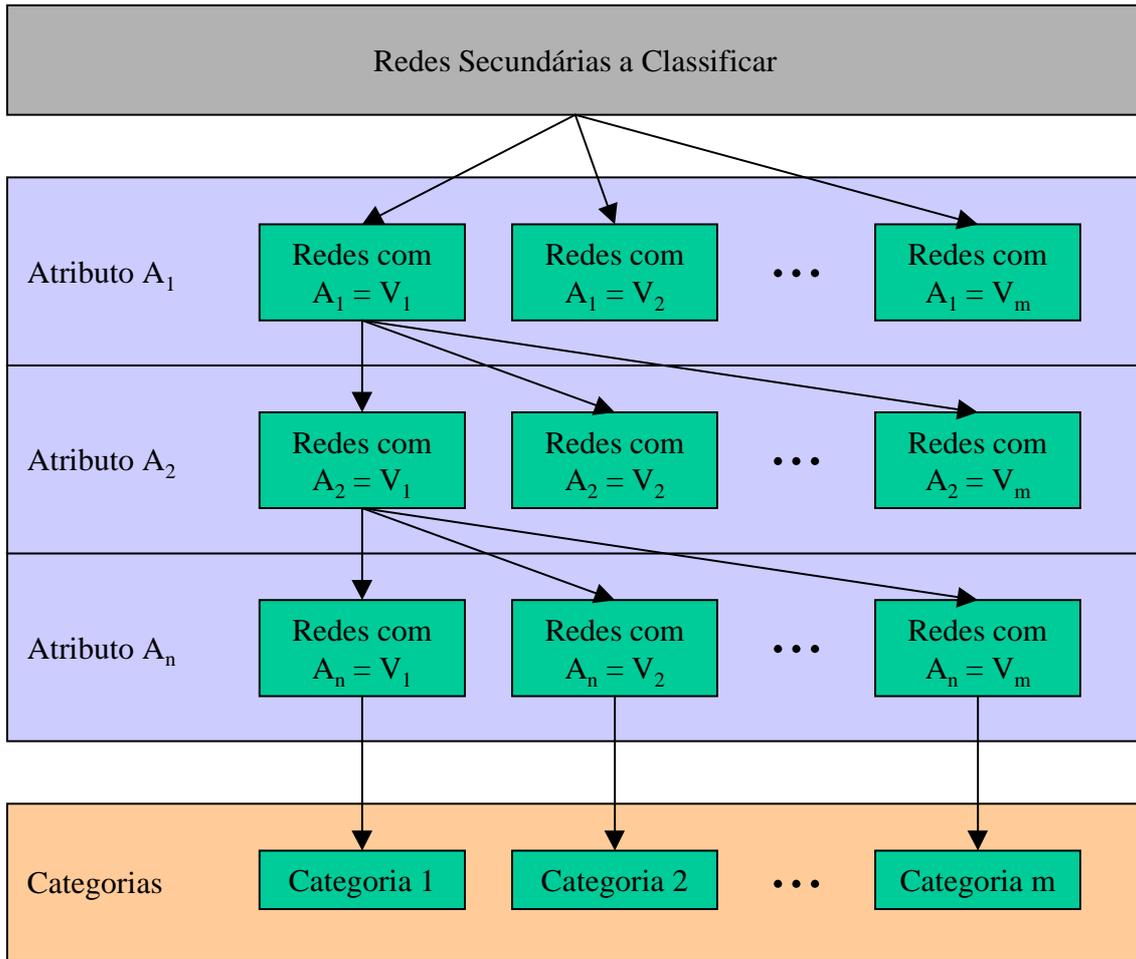


Figura 3. Classificação hierárquica dos circuitos secundários

Dependendo do problema, o classificador hierárquico freqüentemente gera categorias com poucos indivíduos, o que pode ser inconveniente em algumas situações. Nesse caso, um procedimento de reagrupamento das categorias deve ser realizado para que os indivíduos das categorias pequenas sejam reagrupados em outras categorias.

3.2 Classificador SOM

A técnica de classificação SOM – *Self Organizing Map* – foi desenvolvida na área de Redes Neurais Artificiais [2], [3]. Ela consiste de uma rede de *unidades de processamento* interconectadas. A figura 4 mostra a estrutura de uma unidade de processamento.

A unidade genérica j da figura 4 possui n entradas (I_1, I_2, \dots, I_n), uma saída Y_j e um identificador de categoria (ID). A unidade também possui um peso associado à cada entrada ($W_{1j}, W_{2j}, \dots, W_{nj}$). O número n representa o número de atributos. Os indivíduos (circuitos secundários, no presente caso) são representados por vetores de entrada da seguinte forma:

$$I = [I_1 \quad I_2 \quad \dots \quad I_n]. \quad (5)$$

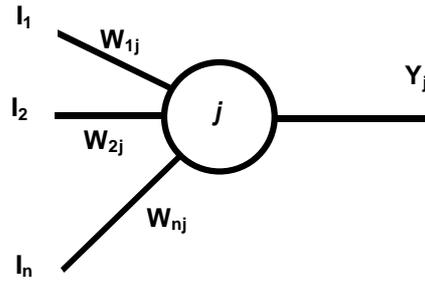


Figura 4. Unidade de processamento j do SOM

Para um vetor de entrada em particular, cada entrada I_i é o valor do i -ésimo atributo desse vetor. Cada unidade de processamento representa uma categoria. Os atributos da categoria são armazenados no vetor de pesos da categoria:

$$W_j = [W_{1j} \quad W_{2j} \quad \dots \quad W_{nj}] \quad (6)$$

Finalmente, a saída na unidade j para um dado vetor de entrada é a distância euclidiana entre o vetor de entrada e o vetor de pesos da unidade:

$$Y_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - W_{ij})^2} \quad (7)$$

Uma rede SOM consiste de m unidades similares à unidade mostrada na figura 4. Isso significa que a rede é capaz de definir automaticamente até m categorias para um dado conjunto de indivíduos a ser classificado.

Uma rede SOM pode operar em dois modos diferentes: treinamento e classificação. No treinamento, os pesos são iniciados com valores arbitrários e um conjunto de treinamento (contendo quantidade e tipos adequados de vetores de treinamento) é apresentado à rede. Os pesos são, então, ajustados de acordo com o algoritmo de treinamento [3]. Esse ajuste dos pesos significa que as fronteiras das categorias são automaticamente estabelecidas a partir das informações contidas no conjunto de treinamento. Uma vez que o treinamento é completado, um identificador de categoria (ID) é manualmente atribuído a cada unidade. O treinamento da rede SOM é o tipo não supervisionado porque o identificador da categoria é atribuído somente após o fim do processamento.

No modo de classificação, os vetores de entrada são aplicados a uma rede SOM previamente treinada. Para um dado vetor de entrada, a unidade com a menor distância euclidiana é chamada unidade vencedora e sua categoria é atribuída ao vetor de entrada (no modo de classificação, não são realizadas correções nos pesos).

4. RESULTADOS

Esta seção apresenta e discute alguns resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta aos circuitos secundários da RGE.

Utilizando a metodologia proposta, foi calculada a curva de carga (média e desvio padrão) no transformador 333.6-216 a partir dos dados de faturamento e das curvas típicas de carga de seus consumidores. Conhecendo-se a curva de carga típica em pu de um consumidor e sua energia faturada, sua curva de carga em kW é facilmente obtida multiplicando todos os seus pontos pela demanda média do consumidor, calculada a partir da energia faturada. A curva de carga calculada no transformador é obtida somando-se as curvas de carga em kW de todos os seus consumidores.

O transformador 333.6-216 também possuía medições de curva de carga realizadas por um período de 10 dias. Com as curvas de carga medidas, foi possível calcular uma curva de carga média (com respectivo desvio padrão) para comparar com a curva de carga calculada.

A figura 5 mostra os valores médios e de desvio padrão das curvas de carga calculada e medida no transformador 333.6-216, que foi usado para validar o modelo de representação da carga, entre outros transformadores. Nota-se uma boa aderência entre as curvas medida e calculada, principalmente quando se consideram as curvas de desvio padrão.

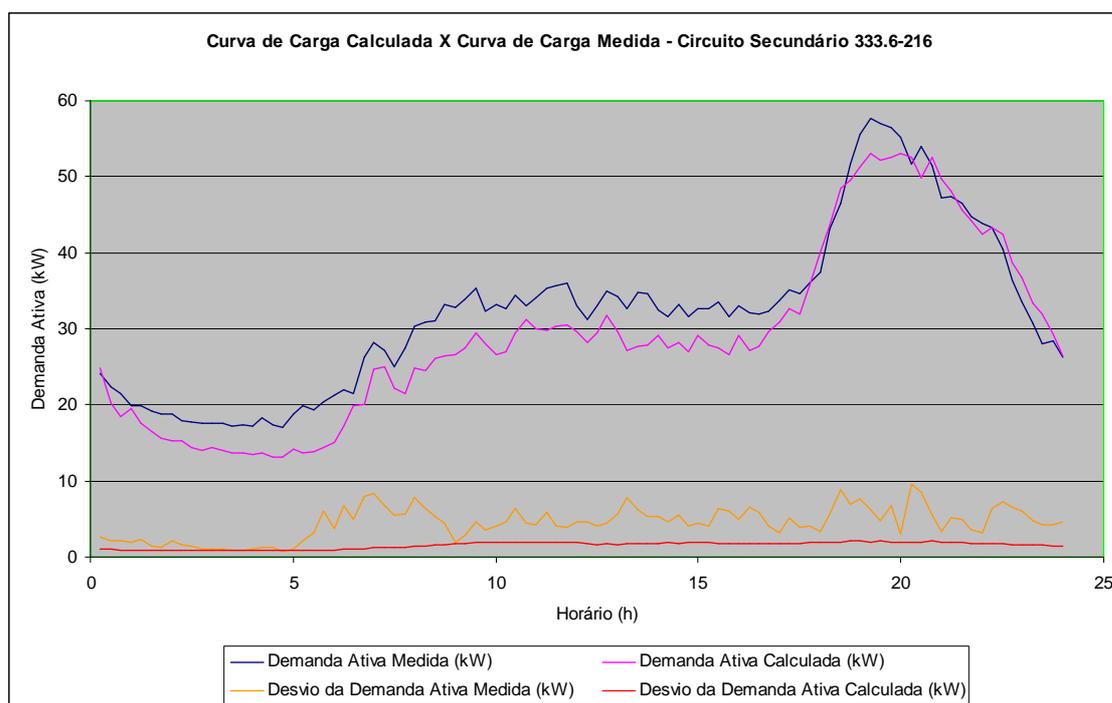


Figura 5. Curvas de carga medida e calculada

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos com o Classificador SOM. O conjunto da amostra foi dividido em dois grupos: o conjunto de treinamento, com 165 circuitos secundários e o conjunto de teste, com 22 circuitos secundários (total de 187 circuitos). Durante o treinamento, os 165 circuitos do conjunto de treinamento foram classificados em 120 categorias. Esse número relativamente alto

resulta da grande diversidade observada entre os circuitos da amostra, o que é confirmada pela não existência de padrões de redes secundárias na empresa. A tabela 1 mostra os dados das categorias 11 e 45, os quais serão usados para discutir os resultados da classificação.

Tabela 1. Categorias formadas pela rede SOM

Categoria	Potência [kVA]	Tensão Primária [kV]	Tipo da Área	Coefficiente de Perdas Médio [kW/(kVA/m)²]	Comprimento Médio [m]
11	75	23,1	Urbana	208,6	413,0
45	45	13,8	Urbana	1357,3	810,9

A tabela 2 mostra as categorias e os dados atribuídos aos circuitos secundários 3315.4-246 e 1615.2-83, ambos pertencentes ao conjunto de teste.

Tabela 2. Resultados da classificação realizada pela rede SOM

Circuito	Potência [kVA]	Tensão Primária [kV]	Tipo da Área	Coefficiente de Perdas Médio [kW/(kVA/m)²]	Comprimento [m]	Categoria
3315.4-246	45	13,8	Urbana	9,7	173,4	45
1615.2-83	75	23,1	Urbana	101,5	506,9	11

Pelas tabelas 2 e 1, pode-se notar que o circuito 3315.4-246 foi classificado em uma categoria que não o representa apropriadamente, indicando que um refinamento no treinamento da rede SOM é necessário. Por outro lado, o circuito 1615.2-83 foi classificado adequadamente. É importante notar que o coeficiente de perdas varia de 1 a 20.000, aproximadamente, e o comprimento varia de 30 a 3.200.

Para o Classificador Hierárquico, 180 circuitos da amostra foram utilizados para formar famílias (95 famílias foram formadas). Os outros 7 circuitos foram utilizados para validação. A tabela 3 mostra os dados das categorias 45 e 75 que serão utilizados para discutir os resultados da classificação.

Tabela 3. Famílias formadas com o classificador hierárquico

Categoria	Potência [kVA]	Tensão Primária [kV]	Tipo da Área	Coefficiente de Perdas Médio [kW/(kVA/m)²]	Comprimento Médio [m]
45	45	13,8	Urbana	6,8	157,0
75	75	23,1	Urbana	207,9	501,0

Neste caso, o circuito 3315.4-246 foi atribuído à categoria 45 e o circuito 1615.2-83 à categoria 75. Analisando-se esses resultados e os dados dos circuitos na tabela 2, nota-se que os dois circuitos foram atribuídos a famílias que os representam apropriadamente.

Finalmente, o circuito 3315.4-246 foi utilizado para validar a metodologia de cálculo de perdas como um todo. Para esse circuito, foram calculadas as perdas de demanda e de energia (base diária) com a

metodologia proposta e com um fluxo de potência. Para efeito de comparação, foram utilizados o coeficiente de perdas e o comprimento reais do circuito ao invés dos valores médios da família 45, que foi a família atribuída ao circuito pelo classificador hierárquico. Isso foi feito para avaliar como o coeficiente de perdas contribuiria para o erro total obtido com a aplicação da metodologia (cálculo com coeficiente de perdas e comprimento da família atribuída ao circuito), eliminando-se assim o erro introduzido pela classificação. Os resultados para este caso são apresentados na tabela 4.

Apesar de os resultados na tabela 4 mostrarem boa aderência entre os valores estimados com a metodologia proposta e aqueles obtidos pelo fluxo de potência, alguns fatos devem ser considerados para explicar a diferença entre eles. Primeiro, no cálculo do coeficiente de perdas, considerou-se que todos os trechos do circuito secundário possuíam o mesmo comprimento, igual ao comprimento médio por trecho (comprimento total do circuito dividido pelo número de trechos). Segundo, o modelo considera que a carga está uniformemente distribuída ao longo do circuito, o que não é verdade, pois a carga (consumidores) está sempre concentrada nos postes do circuito. Finalmente, deve-se notar que uma validação deve contemplar um número razoável de circuitos de referência para que se possa fazer uma conclusão consistente.

Tabela 4. Cálculo de perdas para o circuito 3315.4-246

Método Utilizado	Perdas	
	de Energia [kWh]	de Demanda [W]
Metodologia Proposta	45,5	170,4
Fluxo de Potência	39,0	161,4

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma nova metodologia para estimar as perdas de demanda e de energia em circuitos secundários. A metodologia representa uma tentativa de contornar a falta de informações geralmente associadas às redes secundárias. A metodologia foi baseada em um estudo realizado em um conjunto reduzido de circuitos secundários e na extrapolação de alguns parâmetros (coeficiente de perdas e comprimento) para todos os circuitos secundários da população.

Os resultados mostram que o modelo de representação da carga, o qual usa o conceito de curvas típicas de carga produz resultados muito bons quando de trata de curvas de carga no transformador de distribuição. A metodologia proposta está baseada no fato de que uma boa classificação do circuito pode ser realizada usando as informações disponíveis. No que diz respeito à classificação, o classificador hierárquico produziu bons resultados, enquanto o classificador SOM requer um refinamento e um estudo mais detalhados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. C. B. de Oliveira, N. Kagan, A. Méffe, S. Jonathan, S. L. Caparroz, J. L. Cavaretti. A new method for the computation of technical losses in electrical power distribution systems, CIRED 2001, Amsterdam, 2001.
- [2] T. Kohonen. Self-organizing maps, Springer Verlag, Heidelberg, 1995.
- [3] T. Kohonen *et al.* LVO PAK: a program package for the correct application of Learning Vector Quantization algorithms, Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, pp I 725-730, Baltimore, June 1992 (IEEE).
- [4] C. C. B. de Oliveira, N. Kagan, A. Méffe, S. Jonathan, S. L. Caparroz, J. L. Cavaretti. Cálculo das Perdas Técnicas de Energia e Demanda por Segmento do Sistema de Distribuição, SENDI 2000, Foz do Iguaçu, 2000.
- [5] A. Méffe. Metodologia para Cálculo de Perdas Técnicas por Segmento do Sistema de Distribuição, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- [6] A. U. Antunes. Metodologia para Planejamento Agregado de Investimentos em Redes de Distribuição Secundárias, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.