



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Previsão de Mercado Voltada à Tomada de Decisão com Base Estatística para as Regiões Geométricas da ELEKTRO

Robinson Semolini
Elektro

Robinson.Semolini@elektro.com.br

José R. Pascon
Elektro

Jose.Pascon@elektro.com.br

Frederico Heitmann
Elektro

Frederico.Heitmann@elektro.com.br

José A. Jardim
FDTE

jardini@pea.usp.br

Luiz C. Magrini
CONTREL

magrini@pea.usp.br

Palavras-chave

Alocação Espacial

Curva S

Energia

Previsão de Carga

Quadrículas Geométricas

Resumo

O problema da previsão espacial de energia é um tópico de natureza imprecisa, contudo é importante para uma adequada operação do sistema de distribuição. Neste artigo é apresentada uma nova metodologia para a previsão espacial de energia baseada na combinação de imagens aéreas e procedimentos estatísticos aplicáveis a municípios em desenvolvimento. O método requer a construção e ajuste das curvas S correspondentes às quadriculas saturadas e não saturadas da área geométrica. A metodologia proposta foi validada utilizando um município piloto no que se refere à previsão de energia e alocação espacial da carga.

1. Introdução

Um dos objetivos de toda concessionária de distribuição é oferecer a seus usuários um serviço de alta qualidade compatível com sua capacidade financeira. Como parte do processo de planejamento do sistema de distribuição, as previsões de demanda e energia de médio e longo prazo são requeridas. Normalmente, na previsão de longo prazo são consideradas variáveis explicativas que tem relação com o desempenho da atividade econômica e social de uma determinada região, por exemplo, o PIB (Produto Interno Bruto), crescimento demográfico, evolução dos consumidores nas classes residencial, comercial e industrial, etc.

Estes valores obtidos na etapa de previsão, utilizando as variáveis explicativas, deverão ser distribuídos sobre as quadrículas criadas na área geolétrica. Idealmente, todo o processo de previsão deveria ser realizado de forma automática e integrada. Assim, a concessionária teria uma ferramenta para o direcionamento dos investimentos e útil para a manutenção e expansão da sua rede.

A falta de um planejamento adequado, em consequência da falta do investimento necessário para a expansão do sistema, pode colocar em risco o fornecimento de energia, que pela sua vez acarretará em elevadas penalidades impostas pelo órgão regulador. Contrariamente, investimentos desnecessários destinados à expansão do sistema podem sobre-dimensionar e afetar a parte financeira da empresa.

Assim, a previsão espacial possibilitará à concessionária considerar as futuras necessidades e tendências da sua rede em expansão, tais como: a necessidade de transformadores de distribuição, alimentadores e outros componentes da rede.

Boa parte das referências consultadas utilizam o GIS (Sistema de Informações Geográficas) como ferramenta para a alocação de carga. O método utilizado neste trabalho também usa imagens aéreas, porém, estas são combinadas com métodos estatísticos e de tendência.

Simulações de previsões espaciais de carga baseados no uso do solo oferecem resultados satisfatórios quando comparados com métodos de alocação estatísticos [1], daí o uso do solo dividido em quadrículas, utilizado na metodologia deste trabalho.

Nos anos recentes foram propostos vários métodos abordando a previsão espacial de carga. Nas referências [1], [2] e [10], por exemplo, apresentam-se algumas técnicas que aproveitam o rápido desempenho e velocidade de processamento dos computadores quando utilizados para este propósito. Nas mencionadas referências são apresentados e discutidos métodos de previsão baseados no uso do solo, técnicas de tendência, métodos não analíticos bem como o comportamento da carga relacionado a seu crescimento. Em [3] são apresentados os resultados de um estudo para melhorar a extrapolação do crescimento de carga em sistemas de distribuição. São também analisados o carregamento, através das curvas de carga, das quadrículas e alimentadores

Nas referências [4], [5] e [6] são apresentadas aplicações da teoria fuzzy sobre a previsão espacial de carga. Particularmente a referência [5] utiliza alguns fatores preferenciais (distância a rodovias, a pólos urbanos, etc) aplicados à previsão espacial de carga. Nas referências [5] e [7] foca-se também o problema da previsão espacial de carga, porém, propondo o método chamado de re-urbanização (urban re-development method).

Outras ferramentas de previsão, dirigidas ao uso do solo em sistemas de distribuição, como as Redes Neurais Artificiais (RNA), a teoria wavelets [8], [9], [10], sistemas especialistas [11] e Knowledge Discovery in Database (KDD) [12], foram também propostas na literatura. Na referência [13] é apresentado um outro método alternativo para analisar a evolução da curva S baseada em um modelo linear passo a passo (piece-wise linear model).

Contudo, apesar das modernas ferramentas disponíveis na atualidade, a previsão espacial de carga é, de natureza, imprecisa. Assim, resulta difícil estabelecer uma metodologia única aplicável a todos os casos. Cada caso terá que ser analisado e tratado através de um método particular ou usando uma combinação de métodos.

Conforme estabelecido em [1]-[3] o crescimento de carga da quadrícula pode ser mais bem representado através da sua curva S Fig.(1) na qual podem ser identificadas três partes [13]. Um período inicial responsável de aproximadamente 10% do crescimento. Um período com rampa acentuada, responsável por aproximadamente 80% do crescimento e, finalmente, o período de saturação, responsável pelos 10% restantes do crescimento.

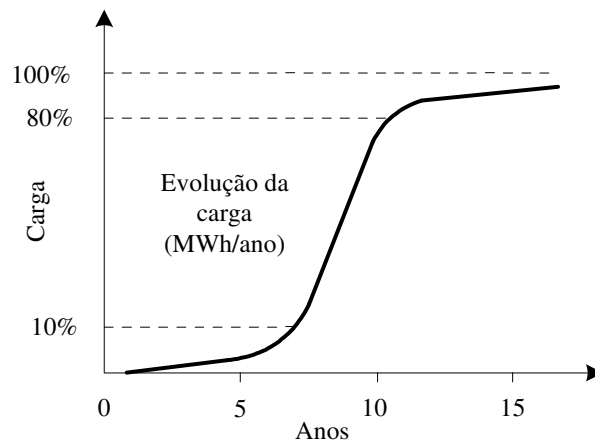


Figura 1. Curva S característica que representa o crescimento da quadrícula.

2. Metodologia Desenvolvida

Os testes iniciais para a validação da metodologia proposta neste trabalho foram realizados utilizando um município piloto pertencente à concessionária Elektro (Eletricidade e Serviços S.A.). Prevê-se que uma vez consolidada esta metodologia poderá ser aplicada ao resto dos municípios atendidos por esta concessionária. Na Fig.(2) mostra-se o mapa geoeletrico (quadrículas) correspondente ao município piloto em 2005. Neste mapa, todas as quadrículas que possuem consumo, independentemente da classe à qual pertençam, foram pintadas.

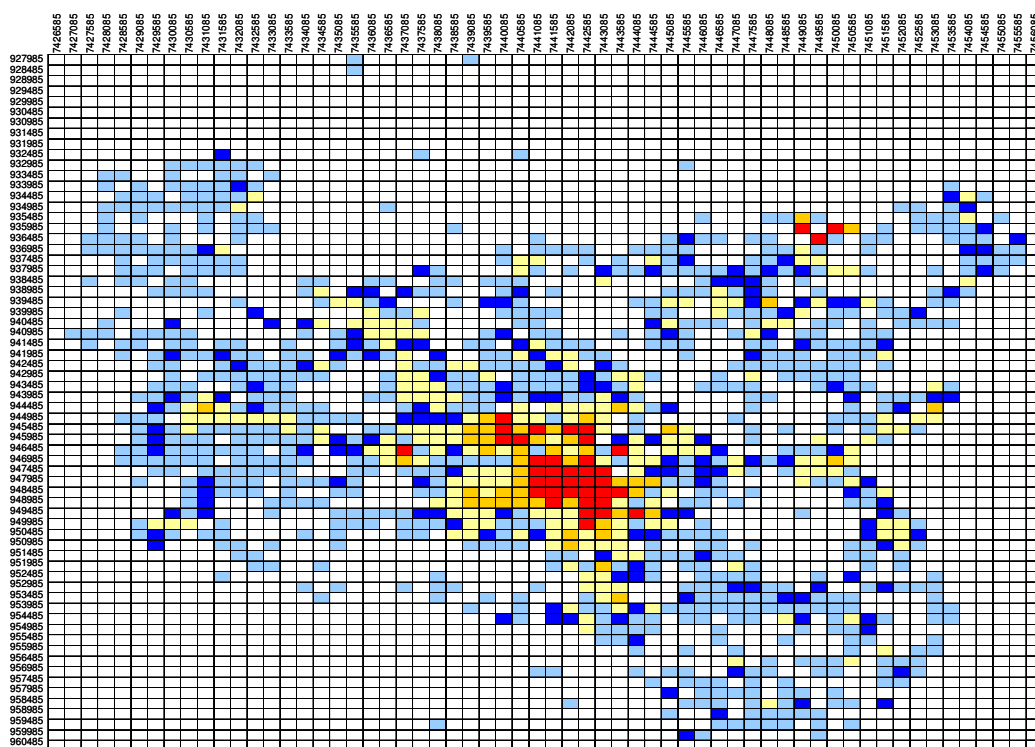


Figura 2. Mapa mostrando as quadrículas ocupadas do município piloto.

As quadrículas com cor “vermelho”, mostradas na Fig.(2), tem o maior consumo de energia seguido pelas quadrículas em cor “laranja”, pelas quadrículas em “amarelo”, pelas quadrículas em “azul” e, finalmente as quadrículas em cor “azul claro” que possuem o menor consumo de energia.

A seguir são descritos os passos seguidos pela metodologia de previsão espacial desenvolvida:

2.1. Previsão de energia do município por classe de consumo

Esta primeira etapa do projeto foi realizada considerando o histórico de consumo do período 2000-2005 bem como as respectivas variáveis explicativas. O horizonte de previsão de longo prazo foi de cinco anos (2006-2010). Na Fig.(3) mostram-se os períodos correspondentes ao histórico de consumo ($n-3, n-2, \dots, n$) e ao período de previsão ($n+1, n+2, n+3, \dots$) de uma curva de previsão típica, para qualquer classe de consumo. O incremento de energia do primeiro ano de previsão é representado através de ΔE_{n+1} .

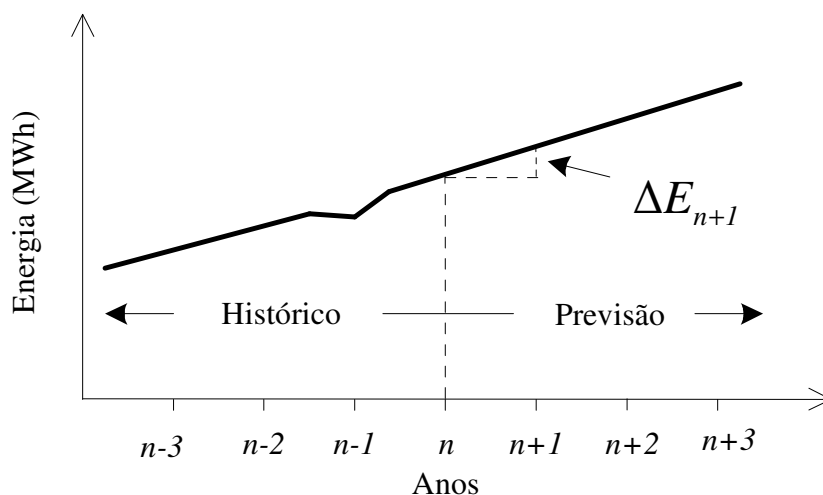


Figura 3. Curva de previsão genérica.

2.2. Criação das quadrículas

A área geoeletrica do município piloto foi dividida em quadrículas de 500m x 500m. Cada quadrícula, identificada através de um número, fornecerá informações tais como: a sua localização, energia anual (e mensal) consumida por classe de consumo, bem como a porcentagem de energia das classes de consumo dentro da quadrícula. Adicionalmente, fornecerá informações correspondentes a cada consumidor, tais como: kWh/mês, kWh/ano e localização.

2.3. Identificação das quadrículas saturadas

Esta etapa é realizada utilizando imagens aéreas. Através destas imagens é possível estimar a porcentagem de ocupação aproximada das diferentes classes de consumo (ou sub-classes), tais como: áreas industriais, prédios, áreas residenciais e rurais, etc. Por outro lado, é possível também obter a energia máxima (E_{max}) de cada classe de consumo nas quadrículas.

2.4. Tratamento das quadrículas não saturadas

De forma similar ao passo anterior, as quadrículas não saturadas permitirão também identificar as principais classe de consumo dentro delas. Ainda mais, elas fornecerão informações relacionadas às áreas disponíveis e áreas proibidas, tais como: rios, parques, rodovias, reservas florestais, etc. Devido

ao crescimento destas quadrículas ser semelhante a determinadas quadrículas já saturadas, é possível pré-definir a sua energia máxima. No fundo, este valor máximo será igual ao da quadrícula saturada.

2.5. Obtenção da curva S

Devido ao histórico de consumo (cinco anos) não ser suficiente para a obtenção da curva S das quadrículas, foram feitas as seguintes considerações:

- Quadrículas saturadas: Calculada a energia máxima (E_{\max}) e de posse dos 5 anos de histórico, utilizou-se um procedimento estatístico para ajustar a curva S que caracteriza o crescimento da quadrícula. Para isso foi utilizada a Eq.(1), referida em [1]-[3], [14].

$$\text{Eq. (1)} \quad E(t) = E_{\max} \left[1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2} \right]$$

onde:

E_{\max} : Energia (carga) máxima ou de saturação da quadrícula

t_0 : Tempo inicial de crescimento da curva S

τ : Constante de tempo

- Quadrículas não saturadas: Basicamente, estas quadrículas acompanharão (seguirão) o crescimento da curva S das quadrículas saturadas (quadrículas mãe). As áreas proibidas existentes nestas quadrículas serão subtraídas da área total da quadrícula (500m x 500m). Assim, a área efetivamente disponível, agora menor pela presença das áreas proibidas, será utilizada de forma proporcional à percentagem de utilização de cada classe de consumo na quadrícula.

2.6. Alocação especial de carga (energia)

Obtida a curva S das quadrículas saturadas e não saturadas, este passo servirá para alocar espacialmente a energia projetada nas curvas S. Por exemplo, para o ano n+1 (ver Fig. (3)), os incrementos de energia $\left(\sum_{i=1}^m \Delta E_{QUADS_i} \right)$ de todas as quadrículas (por classe de consumo) serão

comparadas com a energia prevista calculada em 2.1. conforme as seguintes condições:

- Caso $\sum_{i=1}^m \Delta E_{QUADS_i} \cong$ energia prevista (ΔE_{n+1}), significa que ΔE_{n+1} foi alocada na sua totalidade, assim, passamos a tratar com o incremento de energia do próximo ano, ou seja a energia prevista no ano n+2.
- Caso $\sum_{i=1}^m \Delta E_{QUADS_i} <$ energia prevista (ΔE_{n+1}), a presente metodologia propõe alocar a energia remanescente (ou seja a diferença entre $\Delta E_{n+1} - \sum_{i=1}^m \Delta E_{QUADS_i}$) sobre novas quadrículas.
- Caso $\sum_{i=1}^m \Delta E_{QUADS_i} >$ energia prevista (ΔE_{n+1}), então, a diferença de energia de $\left(\sum_{i=1}^m \Delta E_{QUADS_i} - \Delta E_{n+1} \right)$ será reduzida de forma proporcional em todas as quadrículas. Este processo será repetido até que a condição (i) seja atingida.

Nas condições acima, o termo m representa o número total de quadrículas (excluindo as saturadas) dentro da classe de consumo considerada.

As quadrículas novas habilitadas, adotarão a curva S, incluindo a constante de tempo, da quadrícula vizinha mais próxima. Devido a que poderia existir mais de uma quadrícula potencialmente influenciável, a quadrícula vizinha mais próxima será escolhida considerando um Índice de Mérito (IM). O IM será calculado com base nos seguintes critérios:

- Inicialmente serão escolhidas as oito quadrículas em volta da quadrícula nova (candidata).
- A seguir, calcula-se a relação entre a energia total correspondente ao último ano do histórico e a Emax de cada quadrícula vizinha.
- Finalmente, o valor médio das relações acima, obtida para cada quadrícula vizinha, representará o IM da quadrícula candidata.

O índice de mérito de varias quadrículas candidatas é calculado e ordenado em ordem decrescente. A quadrícula candidata com o maior IM será escolhida para receber a energia remanescente calculada no passo 2.6. anterior. Caso ainda houver energia a ser alocada ou se devido a algumas restrições a quadrícula com o maior índice estiver impossibilitada de receber energia, será escolhida a segunda quadrícula com IM maior, e assim por sucessivamente, até que não exista energia remanescente alguma.

Na Fig.(4) mostra-se o diagrama de blocos geral da metodologia aqui utilizada.

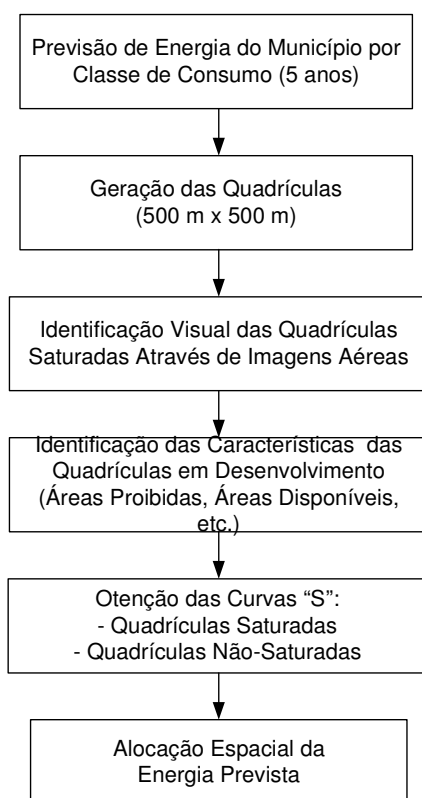


Figura 4. Diagrama de blocos da metodologia utilizada.

3. Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados correspondentes ao município piloto, referido no capítulo 2, quando aplicada a metodologia aqui proposta. Na Fig.(5) mostra-se a previsão de energia de longo prazo da classe comercial considerando as respectivas variáveis explicativas. Três cenários

de previsão (otimista, conservativo e regular) foram obtidos para cada classe de consumo. A previsão de energia “regular” (em cor “preto”) servirá de referência para a comparação com a energia projetada através das curvas S.

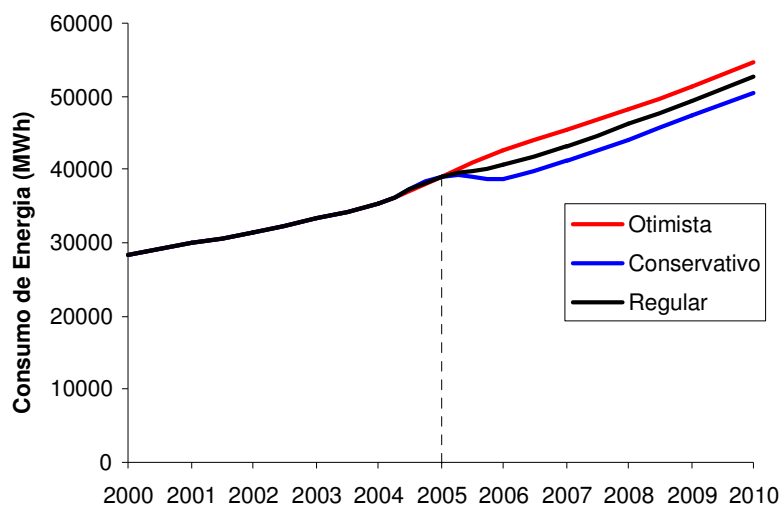


Figura 5. Previsão de energia (2000-2010) para a classe de consumo comercial

Na Tab.(1) apresenta-se o incremento anual da energia prevista correspondente à classe Comercial, que foi mostrada na Fig.(5).

Tabela 1. Incremento Anual da Energia Prevista para a Classe Comercial

Ano	Energia Comercial Prevista	Incremento Anual de Energia
	MWh	
2005	38.949	--
2006	40.629	1.680
2007	43.301	2.672
2008	46.180	2.879
2009	49.281	3.101
2010	52.622	3.341

Pode-se ver na Tab. (1) que o incremento de energia em 2006 é igual a $\Delta E_{2006}=1680$ MWh. Por outro lado, a energia alocada nas quadrículas em desenvolvimento, utilizando as curvas S que definem o crescimento da quadrícula, foi igual a $\sum_{i=1}^m \Delta E_{QUADS_i} = 1190$ MWh, sendo a diferença entre a energia “projetada” (uso das curvas S) e a energia “prevista” igual a $(1680-1190) = 490$ MWh. Esta diferença deverá ser alocada em quadrículas novas.

A seguir apresenta-se um exemplo mostrando a forma como é calculado o IM (Índice de Mérito). Para isso, encolheu-se uma pequena região da área geolétrica (classe Comercial) no município piloto. As quadrículas Q2864, Q2865, Q2866, Q2942 e Q3020, mostradas na Fig.(6), já possuíam energia em 2005, enquanto que as quadrículas Q2943, Q2944, Q3021 e Q3022 estavam vazias.

2864	2865	2866
2942	2943	2944
3020	3021	3022

Figura 6. Quadrículas em volta da quadrícula Q2943

Na Tab. (2) mostram-se as energias máximas calculadas para as quadrículas Q2864, Q2865, Q2866, Q2942 e Q3020, bem como os seus respectivos MWh em 2005. É obvio que a relação (E2005/E_{max}) para as quadrículas Q2944, Q3021 e Q3022 será zero.

Tabela 2. Relação (E₂₀₀₅/E_{MAX}) das Quadrículas Ocupadas

Quadrícula	Energia em 2005 (MWh)	E _{max} (MWh)	Relação (E ₂₀₀₅ /E _{max})
Q2864	415	1.200	0,3458
Q2865	1.189	1.500	0,7927
Q2866	615	1.200	0,5125
Q2942	335	1.000	0,3350
Q3020	380	980	0,3877

O IM para as quadrículas vazias Q2943, Q2944, Q3021 e Q3022, é obtido através da Eq.(2):

$$Eq. (2) \quad MI_{Q_{2943}} = \frac{\sum_i^8 (Ratio_{Q_i})}{8}$$

$$MI_{Q_{2943}} = \frac{(0.3458+0.7927+0.5125+0.3350+0.3877+0+0+0)}{8} = 0.2967$$

O IM da quadrícula Q2943 (vazia) apresenta o máximo valor em comparação com os IMs das quadrículas Q2944, Q3021 e Q3022 calculados de forma similar. Assim, a quadrícula Q2943 terá prioridade em receber parte da energia remanescente. Na Fig.(7) apresenta-se parte da imagem aérea da região (município piloto) analisada sobre a qual foram criadas as quadrículas de 500m x 500m. Percebe-se que diferentemente das regiões urbanas e cidades grandes, a mesma não possui muitos edifícios e prédios com muita concentração de carga. Assim, nas classes de consumo Residencial e Comercial não será necessário separar subclasses caracterizadas pelo consumo deste tipo de cargas.

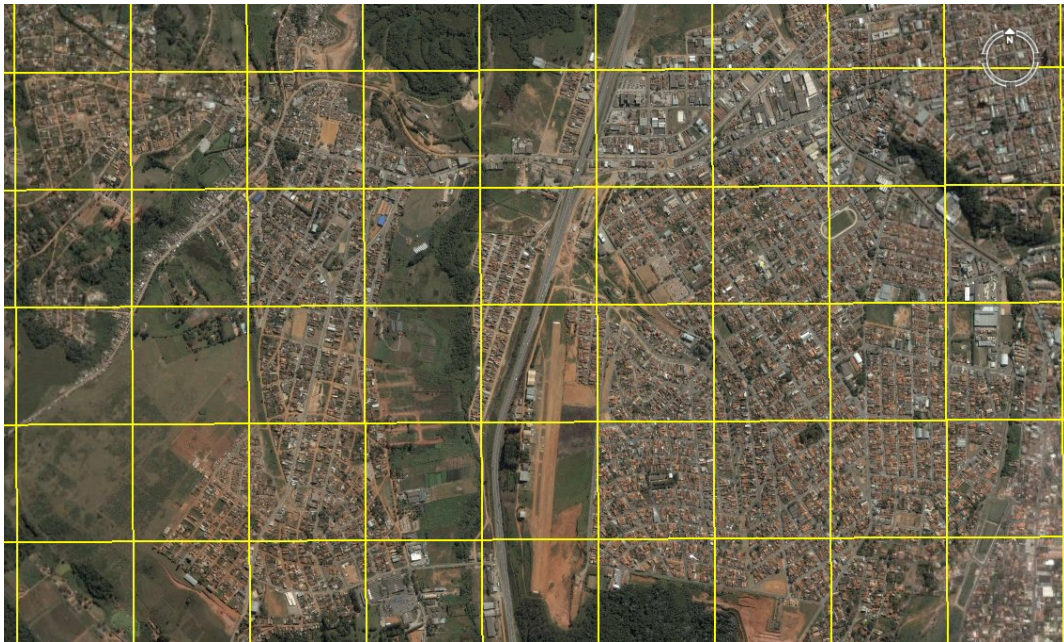


Figura 7. Imagem aérea parcial do município piloto

Na Fig.(8) está sendo mostrado o crescimento espacial da classe comercial (município piloto) uma vez aplicada a metodologia aqui proposta. Podem ser observados, por um lado, o número de identificação das quadrículas e por outro, a disposição dispersa das cargas na área geoeétrica. As quadrículas em cor verde representam às áreas ocupadas em 2005. As quadrículas em cor vermelho e amarelo apareceram em 2006 e 2007, respectivamente.

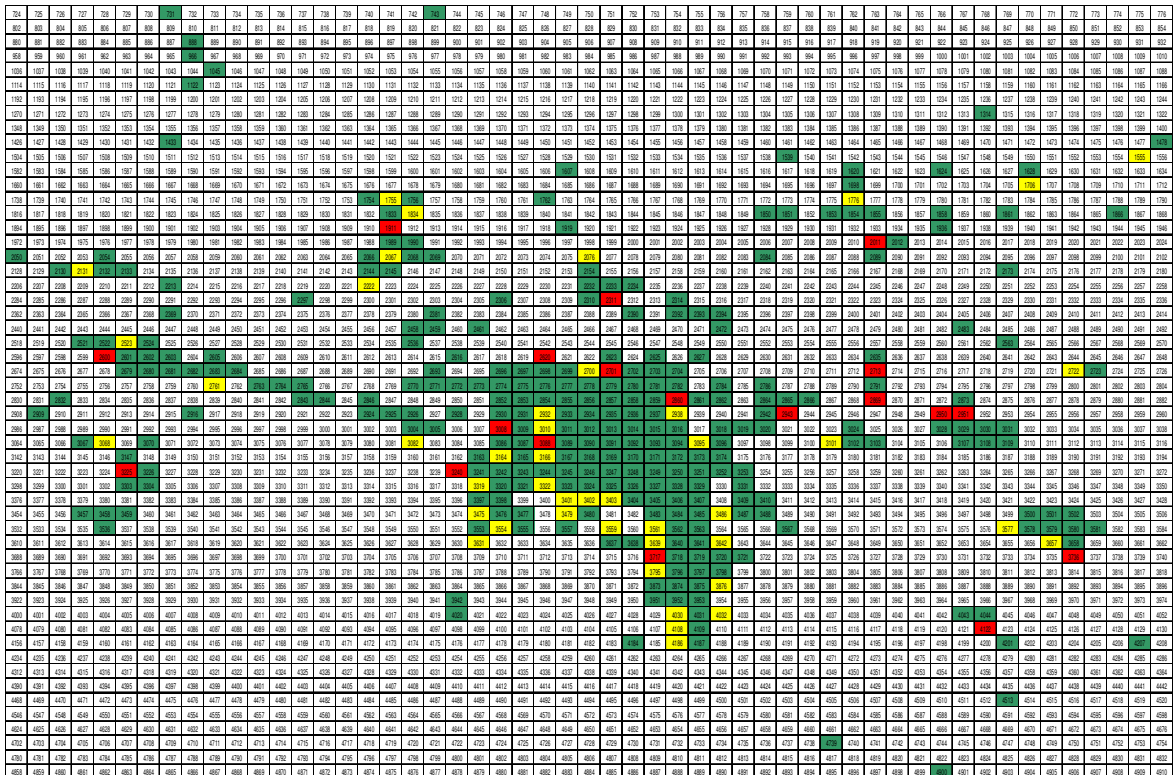


Figura 8. Área geoeétrica da classe Comercial (município piloto) mostrando as quadrículas novas adicionadas em 2006 (vermelho) e 2007 (amarelo)

As outras classes de consumo (residencial, industrial, rural e serviço público) foram tratadas de forma similar. A alocação de energia em 2006 das mencionadas classes de consumo foi utilizada como entrada (“input”) para a alocação de energia em 2007. O resultados preliminares correspondentes aos anos 2006 e 2007, mostraram ter concordância com o crescimento real do município, assim, estas serviram como referência para diagnosticar e validar a metodologia.

4. Comentários

Conforme comentado anteriormente, as classes de consumo dentro da quadrícula na realidade se encontram dispersas como mostra a Fig.(8) e misturadas com outras classes de consumo. Apenas para fins de tratamento de dados e caracterização das curvas S das quadrículas, considerou-se que estas estão agrupadas, ver Fig.(9a). Similarmente, as áreas proibidas foram agrupadas calculando-se posteriormente a porcentagem que estas representam dentro da quadrícula como na Fig.(9b), desta forma facilitando o processo de alocação.

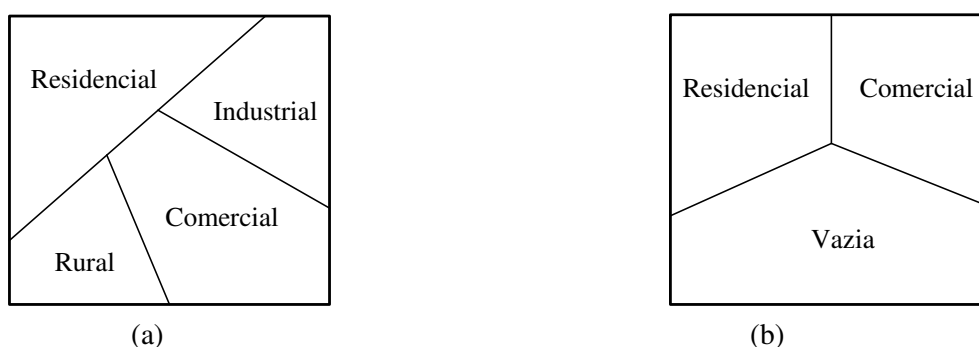


Figura 9. (a) Agrupamento das classes de consumo na quadrícula saturada, (b) Quadrícula com área disponível a ser utilizada

Apesar do método utilizar imagens aéreas bem como informações de consumo e outros da base de dados, é importante que o planejador esteja familiarizado com a região analisada. Isto facilitará de forma notável a alocação espacial de energia (carga) além de contribuir caso apareçam algumas discrepâncias durante o processo de alocação.

Quanto à alocação de novas cargas, a metodologia proposta permite alocar estas cargas não consideradas no processo de previsão. As mesmas podem ser incluídas em qualquer ano dentro do período de previsão.

5. Conclusões

Neste artigo foi proposta uma nova metodologia para a previsão espacial de carga baseada na combinação de imagens aéreas e procedimentos estatísticos aplicáveis a municípios em desenvolvimento. A combinação do uso do solo através de observações assim como dos procedimentos estatísticos possibilitaram a construção e um melhor ajuste das curvas S das quadrículas saturadas e não saturadas. Conforme apresentado no Capítulo 2, a energia prevista por classe de consumo, obtida usando as variáveis explicativas, foi utilizada como valor de referência a ser alcançado durante a alocação da energia para cada ano na quadrícula.

A metodologia proposta permite analisar cada quadrícula de forma individual criando curvas S para cada classe de consumo dentro da quadrícula. As quadrículas saturadas são identificadas com base na

área ocupada pelos consumidores (imagem aérea) assim como pela energia total consumida nos últimos anos, que tem um comportamento quase constante.

As quadrículas vazias candidatas foram ordenadas com base no Índice de Mérito, que mostra a tendência de ocupação de uma determinada área em relação à identificação de pólos de desenvolvimento de uma certa classe de consumo e ao período de tempo necessário para se ocupar esta área.

Finalmente, a aplicação da metodologia sobre o município piloto mostrou-se consistente, podendo esta ser aplicada sobre os outros municípios atualmente atendidos pela Elektro.

6. Referências Bibliográficas

- [1] H. L. Willis, Spatial Electric Load Forecasting, Marcel Dekker, Inc, 2002.
- [2] H.L. Willis, J.E.D. Northcote-Green, “Spatial electric load forecasting: A tutorial review,” in Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 2, Feb. 1983, pp. 232 – 253.
- [3] H.L. Willis, J.E.D. Northcote-Green, H.N. Tram, R.W. Powell, “An Improved Method of Extrapolating Distribution System Load Growth,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-103, No. 6, June 1984, pp. 1459 – 1465.
- [4] S.K. Padmakumari, K.P. Mohandas, D. Thiruvengadam, “Application of Fuzzy System Theory in Land Use Based Long Term Distribution Load Forecasting,” in Proc. of the International Conference on Energy Management and Power Delivery - EMPD '98, Vol. 1, pp. 311-316, 3-5 March 1998.
- [5] M.Y. Chow, J. Zhu, Tram, H., “Application of Fuzzy Multi-Objective Decision Making in Spatial Load Forecast,” Transactions on Power Systems, Vol. 13, pp. 1185-1190, August 1998.
- [6] M.Y. Chow, H. Tram, “Application of Fuzzy Logic-Technology for Spatial Load Forecast,” Transactions on Power Systems, Vol. 12, pp. 1360-1366, August. 1997.
- [7] M.Y. Chow; H. Tram, “Methodology of Urban Re-Development Considerations in Spatial Load Forecast,” Transactions on Power Systems, Vol. 12, pp. 996-1001, May. 1997.
- [8] M. Al Mamun, K. Nagasaka, “Artificial Neural Networks Applied to Long-term Electricity Demand Forecasting,” in Proc. Fourth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'04), Dec. 05-08, 2004, Kitakyushu, Japan.
- [9] T.Q.D. Khoa, L.M. Phuong, P.T.T. Binh, N.T.H. Lien, “Application of Wavelet and Neural Network to Long-Term Load Forecasting,” in Proc. Power Systems Technology Conference - PowerCon 2004, Vol. 1, pp. 840-844, 21-24 Nov. 2004.
- [10] C.W. Fu, T.T. Nguyen, “Models for Long-Term Energy Forecasting,” in Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1, 13-17 July, 2003.
- [11] M.S. Kandil, S.M. El-Debeiky, N.E. Hasanien, “Long-term Load Forecasting for Fast Developing Utility Using a Knowledge-Based Expert System,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 491-496, May 2002.
- [12] H.C. Wu, C.N. Lu, “A Data Mining Approach for Spatial Modeling in Small Area Load Forecast,” Transactions on Power Systems, Vol. 17, pp. 516-521, May 2002.
- [13] A. Chaturvedi, M.B.R. Murthy, R. Ranjan, K. Prasad, “A Novel Scheme of Load Forecasting Pertaining to Long Term Planning of a Distribution System,” in Proc. IEEE Region 10 TENCON Conference, Nov. 2005, pp. 1-6.
- [14] H.L. Willis, M.V. Engel, M.J. Buri, “Spatial load forecasting,” IEEE Transactions on Computer Applications in Power, Vol. 8, No. 2, pp. 40-43, April 1995.