



**XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica  
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro  
Rio de Janeiro - RJ - Brasil**

<b>Luiz Gonzaga Fernandez Silva</b>	<b>Marcus Rodrigo Carvalho</b>	<b>Alden Uehara Antunes</b>
<b>CPFL PIRATININGA</b>	<b>Daimon Engenharia e Sistemas</b>	<b>Daimon Engenharia e Sistemas</b>
fernandez@cpfl.com.br	marcus@daimon.com.br	alden@daimon.com.br

<b>Elcio Franklin de Arruda</b>	<b>Marcello Pek Di Salvo</b>	<b>Samuel M. Barbosa Neto</b>
<b>Daimon Engenharia e Sistemas</b>	<b>Daimon Engenharia e Sistemas</b>	<b>Daimon Engenharia e Sistemas</b>
elcio.arruda@daimon.com.br	marcello.salvo@daimon.com.br	samuel@daimon.com.br

**METODOLOGIA DE CRESCIMENTO HORIZONTAL ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPACIAL DA  
CARGA COMO APOIO AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO**

**Palavras-chave**

Análise Espacial da Carga  
Crescimento Horizontal  
Planejamento da Expansão

**Resumo**

Este artigo tem por objetivo apresentar a comparação entre duas metodologias de previsão e análise do crescimento horizontal da carga com a consequente ocupação territorial e expansão do sistema de distribuição em áreas inicialmente desocupadas. Uma das metodologias utiliza o padrão cultural das cidades para indicar as regiões de maior probabilidade de crescimento e a outra se baseia em conceitos eletromagnéticos utilizando pontos de atração e repulsão de cargas. Estes pontos atuam sobre uma determinada área de influência o que também permite indicar as regiões de maior probabilidade de crescimento de carga. As metodologias são aplicadas em uma área de concessão, baseada na área de concessão da CPFL Paulista, dividida em quadriculas de quinhentos metros. Foram, inicialmente, considerados pontos de interesse (que podem agir como atratores ou repulsores de cargas) como estradas, escolas, hospitais e centros comerciais. Os resultados demonstram que, embora o princípio de atuação das metodologias seja diferente, as metodologias estudadas são bem aderentes, podendo ser utilizadas em conjunto para uma definição mais assertiva quanto a previsão de crescimento horizontal.

**1. Introdução**

**I - Introdução:**

Estudos sobre o comportamento da rede e especialmente o planejamento da expansão de médio e longo

prazo das redes de distribuição têm se desempenhado papel fundamental para as concessionárias na busca por maior eficiência, diminuindo custos. Este objetivo é exigido, atualmente, pela Aneel através dos Procedimentos de Distribuição PRODIST (2010) que define metas em busca de maior eficiência no fornecimento de energia e ao mesmo tempo menores custos.

Neste sentido torna-se de grande necessidade a realização de uma previsão de demanda detalhada e, preferivelmente de forma espacial, para auxiliar no processo da expansão da rede de uma maneira planejada.

O presente trabalho apresenta duas metodologias para atuarem de forma complementar ao modelo de planejamento estratégico considerando previsões de crescimento horizontal, relacionados a extensão dos alimentadores visando o atendimento de áreas originalmente sem rede de distribuição, e correspondente preenchimento de quadriculas inicialmente vazias.

Dentre os poucos trabalhos encontrados na literatura que versam sobre saturação de quadriculas e/ou crescimento horizontal destacam-se os trabalhos descritos a seguir.

O trabalho desenvolvido por Franco (2008) apresenta uma metodologia de previsão espacial de demanda, a partir de um algoritmo de extração de conhecimento baseado em conceitos de algoritmos evolutivos e regras de classificação linguísticas, para caracterizar a área de serviço e identificar novas áreas com possibilidades de aumento de carga futuro.

No trabalho desenvolvido por Carreno, E.M.& Padilha-Feltrin (2008) e Trujillo (2010) são apresentados dois métodos para serem aplicados na previsão espacial de demanda elétrica, os quais simulam as influências de cargas especiais nas vizinhanças e utilizam os sistemas multiagentes para caracterizar a área de serviço, mostrando assim, a dinâmica dos grupos sociais em uma cidade à procura dos recursos necessários para suas atividades.

A probabilidade de instalação de novas cargas em uma determinada quadricula é mensurada através de duas metodologias. Na primeira, baseada no trabalho desenvolvido por J. D. M. Trujillo, as características da distribuição espacial das cargas já instaladas são utilizadas como base para determinação da probabilidade de desenvolvimento de novas instalações. Esta abordagem permite que o padrão cultural de crescimento da área de estudo influencie diretamente na forma como as novas regiões serão ocupadas. Na segunda metodologia os pontos de interesse (escolas, hospitais, estradas, entre outros) são utilizados como atratores ou repulsores de cargas. É então utilizada uma teoria similar à de propagação de fluxo magnético onde existem pólos que geram linhas de fluxo, bem como pólos que absorvem linhas de fluxo. Caminhos de menor relutância tendem a facilitar a passagem de linhas de fluxo. De forma similar pontos de interesse como escolas são atratores de certos tipos de carga, enquanto pontos como aterros sanitários são repulsores de outros.

- As metodologias serão aplicadas em uma área de concessão, baseada na área de concessão da CPFL Paulista, dividida em quadriculas de quinhentos metros. Espera-se com esta aplicação obter resultados mais assertivos quanto à previsão de ocupações em quadriculas vazias.

## **2. Desenvolvimento**

### **II - Metodologias de Crescimento Horizontal:**

As metodologias a serem apresentadas deverão auxiliar o planejamento da expansão do sistema indicando as regiões de maior crescimento permitindo efetuar a proposição de obras visando atender ao crescimento da carga.

Nesta análise a taxa de crescimento da carga é subdividida em taxa de crescimento vertical (crescimento vegetativo) e taxa de crescimento horizontal. A taxa de crescimento horizontal refere-se a todas as novas

instalações elétricas que surgirão no período de estudo. A presente proposição contempla instalações a serem realizadas em quadrículas desocupadas.

- **Método do padrão cultural**

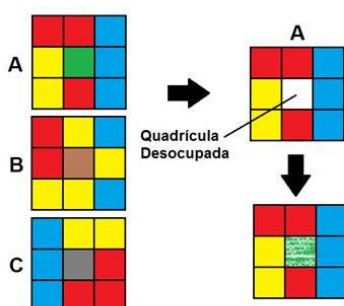
O Método do Padrão Cultural (MPC), explorado por Trujillo (2010) é baseado no conceito de que cada região possui suas próprias tendências de crescimento espacial de cargas, que serão replicadas conforme ocorre a ocupação de novas áreas.

A ideia é avaliar cada quadrícula de acordo com regras predeterminadas, tais como distância em relação a hospitais, escolas, densidade de cargas nos arredores por classe, etc.. Cada critério de avaliação gera uma nota, que posteriormente será normalizada e irá formar junto com as outras o Vetor de Avaliação da quadrícula.

Após isso, cada quadrícula desocupada é comparada com todas as ocupadas para determinar dentre estas a ocupada mais semelhante. Essa comparação é feita através da norma da diferença entre os Vetores de Avaliação de cada quadrícula, sendo que uma norma resultante de valor menor corresponde a uma maior afinidade (semelhança) entre ambas. Tal afinidade significa que a quadrícula desocupada apresenta características regionais semelhantes à quadrícula ocupada, e desta forma apresenta uma tendência a se desenvolver de maneira similar a esta. A Figura I ilustra esse processo de como as características regionais das quadrículas ocupadas influenciam no crescimento da quadrícula desocupada.

Encontrada a quadrícula ocupada mais semelhante à quadrícula desocupada em questão, esta receberá uma probabilidade de desenvolvimento que será proporcional à carga da primeira, de tal forma que as quadrículas desocupadas semelhantes a quadrículas com cargas maiores tenham uma probabilidade maior de se desenvolverem.

Da mesma forma, as quadrículas ocupadas são comparadas com as pertencentes a polos urbanos, que são regiões com alta densidade de carga e que teoricamente encontram-se saturadas, para determinar as probabilidades de crescimento horizontal das primeiras. Deste modo obtêm-se tanto as probabilidades de crescimento por classe das quadrículas desocupadas quanto das que já possuem consumidores instalados.



*Figura I*

- **Método da distribuição de fluxos**

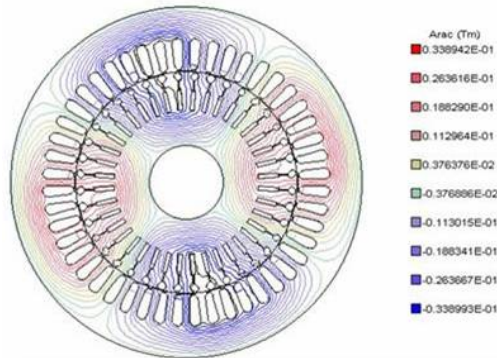
O Método da Distribuição de Fluxos (MDF) fundamenta-se na teoria de fluxos magnéticos que possuem fontes geradoras e fontes absorvedoras de linhas fluxo.

Em um projeto de um gerador os pólos positivos são fontes atratoras de fluxos magnéticos enquanto que os pólos negativos repelem linhas de fluxo magnético (Chapman 2003). A distribuição das linhas de fluxo é diretamente influenciada pelo tipo de material utilizado. As linhas de fluxo geram densidades de campo

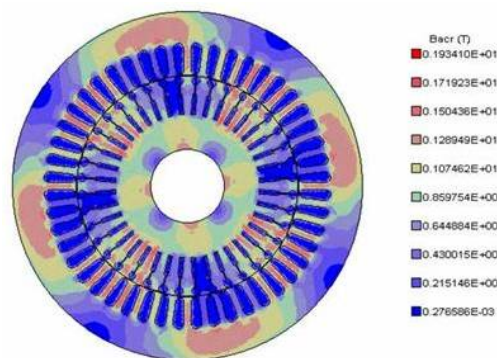
magnético em função do tipo de material e da área limite.

A Figura II extraída da referência [6], apresenta uma simulação em elementos finitos de um gerador de energia com a distribuição das linhas de fluxo magnético ao longo de sua área. Em um gerador os materiais utilizados em cada parte física são específicos para a região de concentração de fluxos e considera a característica do fluxo. Em um pólo, por exemplo, têm-se fluxos contínuos e constantes gerados pela corrente de excitação que é contínua e constante.

A Figura III apresenta, para o mesmo gerador considerado anteriormente, a distribuição da densidade de fluxo magnético.



*Figura II – Distribuição de linhas de fluxo magnético em um gerador.*



*Figura III – Densidade de fluxo magnético em um gerador.*

A analogia do crescimento horizontal com a teoria eletromagnética advém das seguintes observações:

- Pólos de atração e repulsão de demanda;

Existem pontos de interesse nas cidades que possuem a característica de atrair ou repelir cargas elétricas. Neste contexto podem-se citar escolas, shoppings, estradas, aterros sanitários, rios, estradas, regiões com incentivo fiscal para indústrias, entre outros. Tais pontos podem ser utilizados como ponto de partida para a definição das probabilidades de instalação de novas cargas.

- Restrição de ocupação de áreas;

Existem áreas da região em estudo com pequenas probabilidades de serem ocupadas devido a restrições, como por exemplo, lagos, acidentes geográficos, mata nativa ou zona de preservação ambiental, entre outras. Estas regiões podem ser modeladas como regiões elétricas com material de alta relutância.

- Áreas com maior proximidade de pólos de atração possuem maior probabilidade de ocupação.

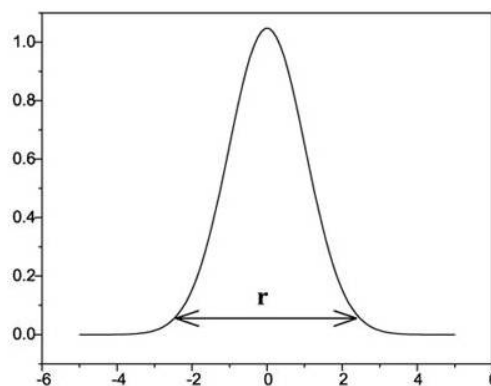
Esta premissa, que é abstraída da teoria magnética, visa privilegiar a ocupação de regiões sem restrição de ocupação que são mais próximas de pólos de atração ou, por outro lado, desprivilegiar regiões próximas de pólos de repulsão de cargas.

- Definição de região de influência.

Além das semelhanças relacionadas com as linhas de fluxo magnético, tem-se que a força de atração magnética é inversamente proporcional à distância da fonte de atração magnética, à medida que se afasta de uma fonte de atração de instalações de cargas menores são as probabilidades de instalar cargas.

Com a existência de várias e diferentes fontes de atração e repulsão, utiliza-se uma superposição de curvas de influência obtendo-se regiões influenciadas por várias fontes, podendo ser de atração e repulsão simultaneamente.

A região de influência pode ser modelada através de curvas como a apresentada na Figura IV. A atenuação da curva simboliza o decréscimo da influência em função da distância do centro da curva, que representa o pólo de atração de instalações. De forma contrária, pode-se considerar uma curva invertida como representativa de influência negativa, ou seja, repulsão de instalações.



*Figura IV – Representação do raio de influência  $r$  de uma função gaussiana.*

Outra forma de se visualizar a região de influência de um pólo atrator de instalações é apresentada na Figura V com camadas que podem ser equalizadas em coroas de influência.

### Exemplo de Área de Influência

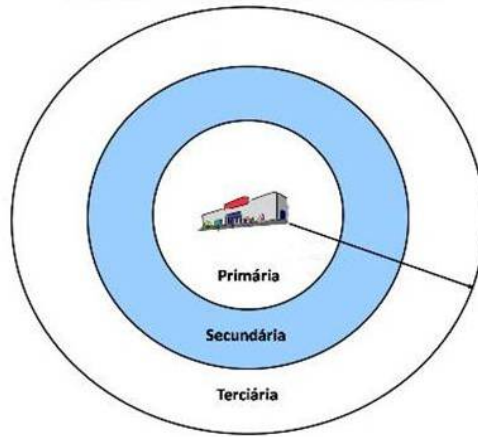


Figura V – Região de influência de pólos atratores ou repulsores.

A partir das regiões de influências pode-se definir a pontuação para as áreas desocupadas próximas a um pólo de acordo com regras como as que seguem:

- Raio máximo de influência
- Força de atração do pólo “número de espiras”.
- Pólo positivo à Notas positivas
- Pólo negativo à Notas negativas
- Uma quadrícula ocupada influência suas vizinhas (primeira vizinhança).
- Maior a carga da quadrícula à maior a influência.

#### • Comparação das Metodologias

Para realizar a comparação entre as metodologias propostas, foi considerada uma região de concessão como a apresentada na Figura VI, bem como uma região limite para o estudo, exemplificada em verde na Figura VII.

Foram também considerados pontos de interesse distribuídos pela área de concessão em quadrículas já ocupadas, pontos estes em destaque vermelho na Figura VII.

Utilizando o MPC obteve-se a distribuição de probabilidades apresentada na Figura VIII. Neste exemplo, o eixo vertical “z” representa a nota de cada quadrícula, sendo as regiões com cores mais avermelhadas possuem maiores notas enquanto que as regiões azuladas possuem menores notas.

Utilizando o MDF o algoritmo deverá efetuar a leitura dos pontos de interesse e calcular as notas, que representam probabilidade de ocupação por novas instalações, para todas as quadrículas da área de estudo considerada.

A Figura IX apresenta a região pontuada considerando os mesmos pontos de interesse, atratores de instalações, considerados no MPC.

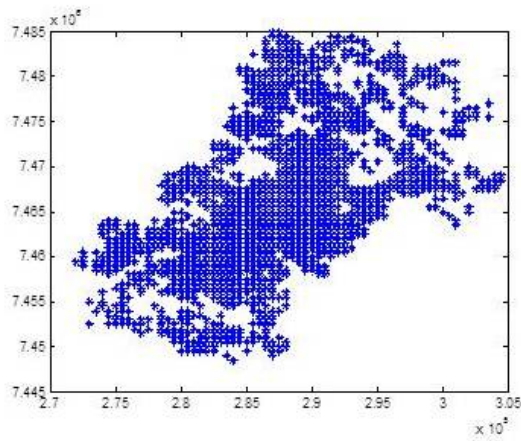


Figura VI – Quadrículas ocupadas em uma área de estudo.

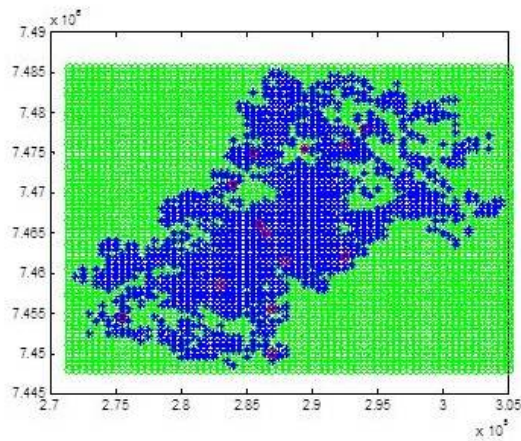


Figura VII – Região de estudo com as quadrículas desocupadas em verde.

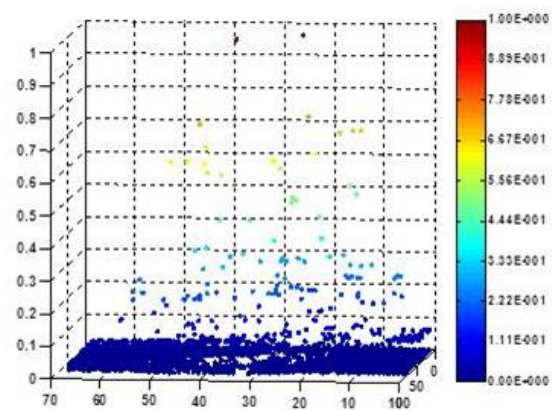
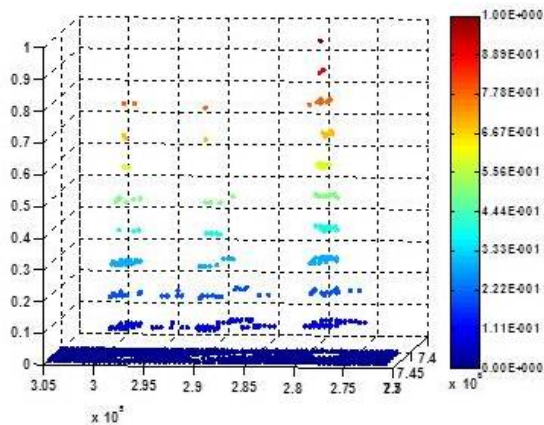


Figura VIII – Distribuição de probabilidades obtida pelo MPC.

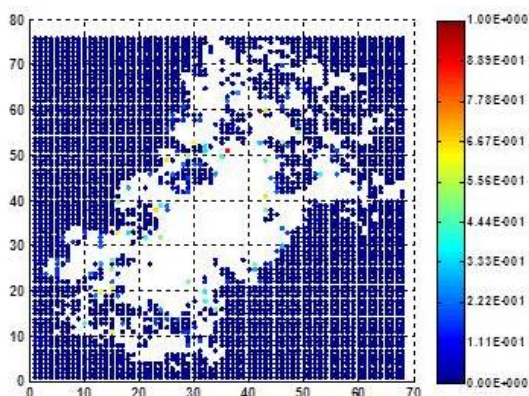




*Figura IX – Distribuição de probabilidades obtida pelo MDF.*

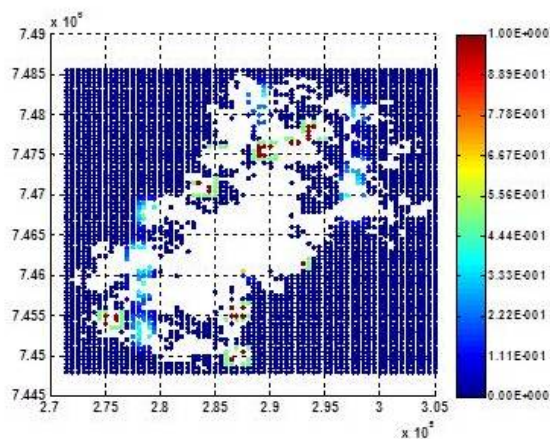
À primeira vista, de acordo com os gráficos apresentados, os resultados obtidos pelo MPC apresentaram maior dispersão de quadrículas pontuadas. Já os resultados obtidos pelo MDF apresentam distribuições concentradas em pontos de interesse.

Porém, como pode ser visualizado e comparado na Figura X e na Figura XI os pontos de maior probabilidade de alocação de cargas por crescimento horizontal, representados de acordo com a escala de cores nos gráficos, possuem localização próxima nos dois métodos.



*Figura X – Vista superior dos resultados obtidos pelo MPC.*



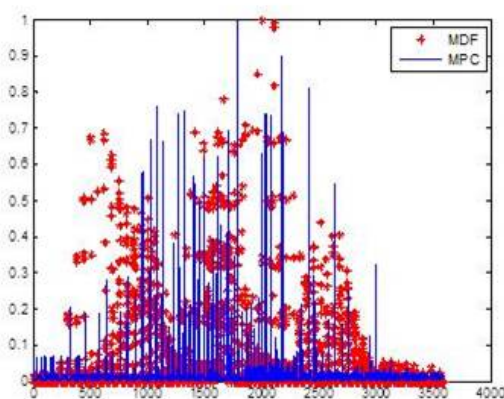


*Figura XI – Vista superior dos resultados obtidos pelo MDF.*

O MPC, como já descrito, é um método que utiliza a cultura de desenvolvimento da cidade como balizador para o seu crescimento e o método MDF utiliza os pontos de interesse da cidade como fonte de atração ou repulsão de cargas. É sabido que os dois métodos possuem intrinsecamente desvios em relação ao desenvolvimento real. Tal fato no caso do MPC pode ser verificado em (referência do MPC) onde o método foi comparado à experiência de especialistas de uma concessionária.

Com o intuito de se melhorar a visualização comparativa dos dois métodos, propõe-se a Figura XII. Nesta figura as quadrículas vazias da área de concessão foram ordenadas segundo um mesmo critério para os dois métodos e plotadas no mesmo gráfico. Neste, o eixo das ordenadas apresenta a intensidade (nota) para a quadrícula receber cargas. Esta intensidade está diretamente relacionada à probabilidade dessa quadrícula receber cargas.

Embora as diferenças quanto às intensidades associadas às quadrículas receberem cargas, podem-se notar através da Figura XII que as localizações das concentrações de quadrículas com maiores probabilidades de receber cargas estão em regiões específicas.



*Figura XII – Avaliação comparativa das quadrículas.*

Uma vez que os dois métodos possuem desvios e ao mesmo tempo indicam focos de futuros desenvolvimentos em regiões parecidas. Propõe-se utilizar a interseção das regiões com intensidade acima de um limiar inferior, o qual deve ser configurado com a experiência do planejador, como forma de se determinar, com maior assertividade, regiões de desenvolvimento.

Utilizando-se um limiar que contemple 20 % do número total de quadrículas com as maiores intensidades nos dois métodos, considerando somente a interseção dos métodos, e os valores abaixo do limiar considerados zero, obtém-se a Figura XIII. Nesta figura tem-se diferenciado com nitidez as localidades com focos de desenvolvimento, que podem ser melhor visualizadas na e Figura XIV. Na Figura XII pôde-se ter um indício deste resultado onde pontos de intensidades tendem a situarem-se nas mesmas localidades.

### 3. Conclusões

#### a. Conclusões:

Foi apresentado neste artigo uma comparação entre duas metodologias de previsão e análise do crescimento horizontal da carga com a conseqüente ocupação territorial e expansão do sistema de distribuição em áreas inicialmente desocupadas.

Concluiu-se que, embora existam desvios entre as metodologias, estas em conjunto compreendem uma ferramenta indicativa de localidades de desenvolvimento (crescimento horizontal) com maior assertividade, uma vez que os focos significativos de desenvolvimento coincidem.

Salienta-se que a metodologia está em fase de aplicação na rede da CPFL Paulista e faz parte de um sistema de planejamento global de estudo de área.

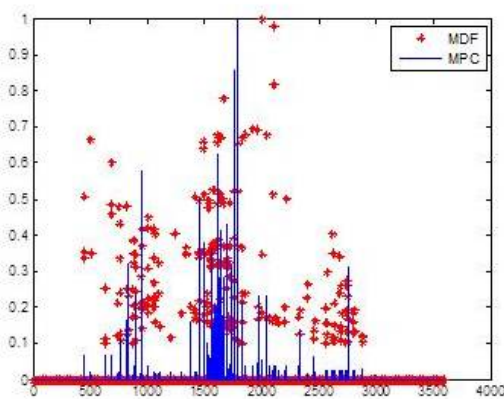
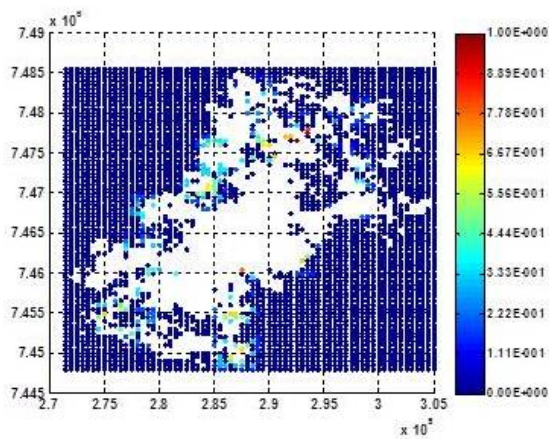


Figura XIII – Interseção dos pontos de maior intensidade de possibilidade de desenvolvimento.



*Figura XIV – Localização geográfica e intensidade de possibilidade de desenvolvimento considerando a interseção dos pontos de maior intensidade.*

#### **4. Referências bibliográficas**

##### **a. Referências Bibliográficas:**

- [1] Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2010.
- [2] Edgar M. C. Franco, Previsão Espacial de Demanda em Sistemas de Distribuição com uma Base Reduzida de Dados, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008.
- [3] Joel D. M. Trujillo, Aplicações de Sistemas Multiagentes na Previsão Espacial de Demanda Elétrica em Sistemas de Distribuição, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2010.
- [4] Carreno, E.M.; Padilha-Feltrin, A.; , "Evolutionary heuristic to determine future land use," Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE , vol., no., pp.1-6, 20-24 July 2008.
- [5] Electric Machinery Fundamentals, McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering, 2003.
- [6] <http://alphard.ethz.ch/Smajic/fem1.htm>
-