

Inteligência computacional aplicada à logística de equipes de manutenção de redes de distribuição de energia elétrica

Computational intelligence applied to the logistics of electric energy distribution network maintenance teams

Edson Bobel¹
Heitor Silvério Lopes²

¹Copel – Companhia Paranaense de Energia
edson.bobel@copel.com

²UTPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
hslopes@utfpr.edu.br

Abstract: One of the problems that an Electric Energy Distribution Company faces is the maintenance of its distribution network. This study focuses on the problem of allocating emergency maintenance teams so that costs related to the energy outage as well as the cost of the teams themselves are minimized. This study includes a geographic area of 108 counties in the State of Paraná, Brazil, and uses information related to: interruptions history in high voltage switches, list of locations able to allocate emergency maintenance teams and list of switches that were actually served by the maintenance teams during the year 2002. With this information and the list of locations with emergency maintenance teams, an estimate of the situation is made and the costs are calculated for the year 2002. With this in hand, the problem was solved using two methods: p-medians and genetic algorithms, in which the potential gains of 13.37% and 12.64% were obtained, respectively, as compared to the costs in 2002, for the same geographic area. Finally, a projection was made for the potential decrease of costs for the Electric Distribution Company regarding the total area of Paraná State, as well as an estimate of financial profits for the State Government.

Keywords: Optimization, Logistics, Distribution Network, Genetic Algorithms, P-medians.

Resumo: Um dos problemas enfrentados pelas concessionárias de Energia Elétrica está relacionado à manutenção. Este trabalho tem como foco alocar as equipes de manutenção de emergência de uma rede de distribuição de energia elétrica a fim de que os custos relacionados às interrupções no sistema elétrico de distribuição e os das respectivas equipes sejam minimizados. O trabalho abrange uma área geográfica composta por 108 municípios do Estado do Paraná e consiste na obtenção das informações: histórico das interrupções ocorridas nas chaves de alta tensão, relação de municípios possíveis de alocar equipes de manutenção e da relação de chaves que foram atendidas pelas equipes de manutenção de emergência no ano de 2002. Com estas informações, e com a relação de municípios que sediavam equipes de manutenção de emergência em 2002, foi estimada a situação de atendimento às chaves pelas equipes de manutenção de emergência sediadas nesses municípios e obtidos os custos para a situação existente em 2002. Em seguida, o problema foi resolvido com a utilização dos métodos das p-medianas e dos algoritmos genéticos com os quais foram obtidos ganhos potenciais nos custos de 13,37% e 12,64%, respectivamente, em relação aos custos para a situação existente em 2002, para a área em estudo. No final do trabalho foi feita uma projeção do ganho potencial total dos custos para a concessionária em todo o Estado do Paraná e uma estimativa do ganho potencial de receita de impostos para o governo do Estado do Paraná.

Palavras-Chave: Otimização, logística, rede de distribuição de energia elétrica, algoritmo genético, P-medianas.

1 Introdução

O objetivo geral deste trabalho é mostrar as potencialidades e as limitações do emprego dos métodos das P-medianas e algoritmos genéticos para obter a distribuição de menor custo possível das equipes de manutenção de emergência. Essas equipes são responsáveis pelo restabelecimento das características elétricas e mecânicas da rede de distribuição de energia elétrica, na eventualidade de uma interrupção acidental. Para validar o estudo, os métodos são aplicados a dados reais da área geográfica composta por 108 municípios da região de Maringá/PR.

Devido à complexidade e a dimensão do problema, foram estudadas duas técnicas computacionais: Algoritmos Genéticos [6] e P-Mediana [10]. Outro aspecto relevante a considerar é que, na prática, as regiões têm mais

locais para alocação de equipes e o número de locais a serem submetidos à manutenção é maior do que o considerado neste trabalho, caso o estudo considerasse toda a região de abrangência da concessionária.

2 Descrição do problema

A rede de distribuição de energia elétrica faz parte de um sistema responsável pelo fornecimento de energia elétrica aos consumidores. O sistema elétrico é composto por três partes: geração, transmissão e distribuição. A rede de distribuição é composta basicamente por postes, cabos, chaves e transformadores. Neste trabalho os pontos de manutenção considerados são as chaves. As chaves têm os objetivos de isolar o ponto com defeito e permitir a alteração do fluxo de energia elétrica em condições anormais, sendo, assim, capaz de reduzir os impactos do defeito perante os consumidores. Por exemplo: Se ocorre um problema em um ponto da rede de distribuição, o local considerado é a chave que fornece energia ao ponto e que está eletricamente mais próximo dele.

O procedimento para o atendimento a um problema no sistema de distribuição é composto sinteticamente pelas seguintes etapas:

1. A concessionária é informada do problema;
2. Uma equipe de atendimento de emergência é deslocada ao ponto da rede com problema;
3. A equipe de atendimento de emergência avalia a situação. Se não houver a necessidade de manutenção, ou seja, é um problema operacional, tal como o acionamento de uma chave, essa equipe resolve o problema e é concluído o atendimento. Caso contrário, é acionada uma equipe de manutenção de emergência que realizará todas as atividades necessárias para restabelecer as características elétricas e mecânicas da rede.

Neste trabalho são considerados os serviços realizados pelas equipes de manutenção de emergência.

No trabalho foram utilizadas informações obtidas junto à divisão de Distribuição da Companhia Paranaense de Energia (COPEL). As características dos dados utilizados são:

- Coordenadas geográficas UTM (Universal Transversa de Mercator) do centro de 20 municípios, com infra-estrutura para alocar equipes de manutenção, dentre os 108 existentes na área em estudo;
- Coordenadas geográficas UTM de todas as 25.347 chaves existentes na área em estudo;

- Relação das 9.107 chaves de alta tensão que tiveram interrupções acidentais na área durante o ano de 2002;
- Relação das 2.546 chaves de alta tensão que foram atendidas pelas equipes de manutenção na área e ano em estudo;
- Potência média em cada chave que teve interrupção;
- Custo médio anual relativo à infra-estrutura (aluguéis, informática, etc...) das equipes de manutenção, dado em R\$/ano igual a 34.448,40;
- Custo médio anual relativo a pessoal, de cada equipe de manutenção de emergência, dado em R\$/ano e igual a R\$ 107.100,00;
- Capacidade média de atendimento de chaves por equipe, dado em número de chaves/equipe, igual a 72;
- Valor do preço médio do kWh, sem impostos, dado em R\$/kWh, igual a 0,24;
- Velocidade média de deslocamento das equipes até as chaves, dado em Km/h, igual a 40;
- Número médio de pessoas na equipe de manutenção de redes, igual a 2,5;
- Valor médio do custo do Km rodado, dado em R\$/Km, igual a 0,39;
- Valor médio do P_{xh} (Pessoa x hora) em R\$, igual a 25,75.

Todas as informações foram obtidas com base no ano de 2002 e as informações monetárias referem-se ao mês de dezembro.

3 Fundamentação teórica

Para a compreensão da metodologia empregada é necessário o conhecimento de alguns conceitos básicos relativos a algoritmos genéticos e p-medianas.

3.1 Algoritmo Genético

O algoritmo genético é baseado na teoria da evolução das espécies de Darwin. A teoria propõe a idéia de que indivíduos que estão mais bem adaptados ao meio ambiente têm maior probabilidade de sobrevivência e, conseqüentemente, maior probabilidade de gerar mais descendentes.

O modelo matemático do algoritmo genético não é recente. Na década de 60, John Holland, da Universidade de Michigan, iniciou o trabalho que serviu de base para esse modelo. O resultado do trabalho foi publicado somente em 1975 no livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [5]. Os algoritmos genéticos têm sido utilizados em diversas áreas. Algumas dessas áreas são: computação envolvendo processamento de imagens e sistemas inteligentes, pesquisa operacional envolvendo programação inteira, linear, planejamento, escalonamento e outras áreas como biologia molecular, sociologia e inteligência artificial. Silva e Abrão [9] descrevem a aplicação de algoritmos genéticos em sistemas de potência. Lopes [6] descreve a utilização de algoritmos genéticos em áreas de engenharia tais como telecomunicações, eletrônica, sistemas elétricos de potência, mecatrônica e controle. Muitos problemas de engenharia não necessitam da solução ótima, mas de uma boa solução, normalmente melhor do que uma conhecida.

No modelo do algoritmo genético é necessária a avaliação da adaptabilidade de cada indivíduo ao meio. O meio significa o problema e a adaptabilidade do indivíduo a esse meio é medida por um valor obtido através das características desse indivíduo para o problema em questão, quantificadas por uma função de *fitness*. O valor do *fitness* indica o quanto a solução representada pelo indivíduo é satisfatória para o problema.

A aplicação de algoritmos genéticos consiste basicamente em gerar inicialmente uma população de indivíduos de forma aleatória, os quais são inseridos em um meio. Então é feito um processo iterativo no qual ocorre o cruzamento entre os indivíduos, sendo dada a preferência para a seleção de indivíduos que estão mais bem adaptados ao meio. Sucessivas gerações são criadas podendo ser preservado o indivíduo de melhor desempenho para as gerações futuras. Após um determinado número predefinido de gerações ou um outro critério de parada, o melhor indivíduo obtido, ou seja, o que está mais bem adaptado ao meio, é apresentado como solução para o problema.

Durante o processo existem alternativas para a forma de geração de novos indivíduos a partir dos existentes e para os métodos de seleção dos melhores indivíduos. Para a avaliação da evolução dos resultados dos indivíduos após cada geração existem algumas medidas de desempenho. As cinco principais são:

- *fitness* mínimo é o menor valor de *fitness* encontrado na população em determinada geração;

- *fitness* médio é a média dos valores de *fitness* de toda a população em determinada geração;
- *fitness* máximo é o maior valor de *fitness* encontrado na população em determinada geração;
- *on-line performance* está relacionado à média de todos os *fitness* de todos os indivíduos gerados até uma determinada geração. Esse parâmetro é calculado em cada geração. A análise gráfica dos valores ao longo das gerações informa se ocorreu a convergência;
- *off-line performance* refere-se à média dos melhores indivíduos de cada geração gerados até determinada geração.

Com esses parâmetros devidamente representados em gráficos é possível uma análise do que ocorreu durante a execução do algoritmo genético. Por exemplo:

- os valores de *fitness* mínimo, médio e máximo muito próximos entre si indicam que o algoritmo já convergiu para um valor. Neste caso, normalmente tem-se duas situações:
 1. é substituído ou incluído um determinado número de indivíduos na população e o algoritmo prossegue;
 2. considera-se que houve a convergência, o algoritmo é interrompido e os resultados são informados;
- a diferença entre os valores dos parâmetros *on-line performance* e *off-line performance* fornece uma medida da diversidade genética em cada geração. Quanto maior o valor da diferença, maior a diversidade genética. Se esses parâmetros forem iguais significa que a população evoluiu para uma determinada solução.

Nos casos práticos em que se utilizou o algoritmo genético, este comprovou ser robusto e eficiente, principalmente na resolução de problemas de elevada complexidade, com grande número de combinações entre as variáveis envolvidas no problema, respondendo em tempos de processamento relativamente baixos se comparados aos de outros métodos de otimização. Além destas características, quando não há necessidade de solução ótima e sim de apenas uma solução satisfatória, este método tem se sobressaído.

3.2 P-Medias

O método das p-medianas é empregado como uma ferramenta de auxílio na tomada de decisões onde, em geral, é possível utilizar Sistemas de Informação Geográficas (*Geographic Information Systems – GIS*) [7].

Por ser um método heurístico, não há garantia de convergência para o ótimo. Devido a esse fato, muitos trabalhos de alocação de facilidades utilizam o método das p-medianas como uma alternativa para a solução de problemas dessa natureza conjugando-o e comparando-o com outros métodos [8], objetivando resultados mais próximos do ótimo.

O objetivo do método proposto por Teitz e Bart [10] é determinar p locais que atenderão uma demanda associada a cada ponto tendo-se um conjunto de pontos V composto por n elementos. O somatório das distâncias percorridas de cada ponto de demanda até o local que o atenderá, p , deve ser a mínima possível. Os p locais que atenderão o conjunto V são chamados de medianas.

O valor da demanda associada a cada ponto é denominado peso e determina o grau de influência do ponto quando da aplicação do algoritmo. No algoritmo são escolhidos p pontos do conjunto V para formar um subconjunto S que é considerado a solução inicial. No subconjunto S (medianas) é aplicado o algoritmo até a obtenção do melhor subconjunto S que é a solução para o problema.

4 Trabalhos relacionados ao tema

Este trabalho se baseia em um artigo [1] e em uma dissertação de mestrado [2] que descrevem a utilização de algoritmos genéticos para a obtenção do mapeamento chave x município, tal que minimize os custos de manutenção de emergência em redes de distribuição de energia elétrica. Os custos fundamentam-se nos valores anuais de equipes de manutenção, tempo de deslocamento e energia elétrica não faturada. O comparativo entre o artigo (A), a dissertação (D) e este trabalho (T) é mostrado na tabela 1.

Tabela 1: Comparativo entre o artigo [1], a dissertação [2] e este trabalho.

Aspecto	(A)	(D)	(T)
Ano dos dados	1999	2002	2002
N° de municípios da área em estudo	10	108	108
N° de municípios que podem ter equipes de manutenção	10	20	20

N° de chaves distintas com interrupções no ano em estudo	1072	9107	9107
N° de chaves atendidas pelas equipes	1072	2546	2546
Espaço de busca para a codificação utilizada	10^{1072}	10^{3312}	10^{3312}
N° máximo de iterações para a obtenção do melhor resultado	10^5	20.10^3	5.10^3
Considera custos de logística	Não	Sim	Sim
Considera a capacidade de atendimento por equipe	Não	Sim	Sim
Considera custo de deslocamento	Não	Não	Sim
Considera n° pessoas nas equipes	Não	Não	Sim

5 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu do desenvolvimento de algumas ferramentas computacionais e posteriormente a análise de resultados obtidos com os dois métodos abordados.

5.1 Ferramentas desenvolvidas

Para a realização do estudo foi necessário o desenvolvimento de ferramentas de *software* que são compostas por 7 módulos e utilizam arquivos texto como entrada e saída. Os arquivos texto têm 3 *layouts* distintos. O primeiro tem as informações dos municípios com infra-estrutura para alocar equipes de manutenção de emergência com as seguintes informações: código, nome, coordenada x e coordenada y de cada município. O segundo tipo de arquivo texto tem as informações das chaves que tiveram interrupção no ano em estudo e foram atendidas pelas equipes de manutenção de emergência. As informações desse arquivo são: número, potência média (kW), tempo de interrupção (minutos), número de consumidores interrompidos, coordenada x, coordenada y e tipo de interrupção na chave. No trabalho são consideradas apenas as interrupções do tipo acidental. As interrupções programadas não são consideradas. O terceiro tipo de arquivo texto

fornece o resultado do mapeamento x município. Este mapeamento é o resultado da distribuição geográfica obtida com a utilização dos métodos em estudo. As informações desse arquivo são: nome do município, coordenada x do município, coordenada y do município, nome da chave, coordenada x da chave, coordenada y da chave e distância da chave ao município que a atende em km.

Os módulos de software desenvolvidos no estudo foram:

- **ger_sit:** que tem o objetivo de gerar um arquivo texto com o mapeamento chave x município. O módulo utiliza como dados de entrada os arquivos dos municípios e das chaves interrompidas. Em seguida são informados os municípios que participarão do mapeamento e este é gerado com base na menor distância de cada chave até cada município;
- **p_med:** gera um arquivo texto com o mapeamento chave x município utilizando o algoritmo de Teitz e Bart [10]. Os arquivos de entrada são os mesmos utilizados pelo módulo **ger_sit**. Além desses arquivos é informado o número de medianas e obtido o local de cada mediana. Após a obtenção dos locais das medianas, o local de cada uma é deslocado para o município a que a mediana estiver mais próxima. Com essa relação dos municípios, é utilizado o mesmo critério do módulo **ger_sit** para a geração do arquivo texto com o mapeamento chave x município;
- **calc_fun_obj:** fornece a composição dos custos para um determinado mapeamento chave x município. Este módulo utiliza como dados de entrada os arquivos texto das chaves interrompidas e o de um determinado mapeamento chave x município. O módulo tem na sua interface as seguintes informações: valor da energia elétrica não faturada (kWh), número de municípios envolvidos no mapeamento, número de equipes de manutenção adicionais bem como os valores financeiros anuais (R\$) relativos a: energia elétrica não faturada, equipes de manutenção de emergência, infra-estrutura, deslocamento e o valor total destas quatro componentes do custo;
- **AG:** gera dois arquivos texto relativos ao mapeamento chave x município e um com a composição dos custos, com as mesmas informações de saída descritas no módulo **calc_fun_obj**, utilizando o método do algoritmo genético. O primeiro mapeamento é o relativo ao melhor indivíduo obtido pelo algoritmo genético e o segundo é o relativo ao melhor indivíduo submetido a um ajuste. Este

módulo utiliza como dados de entrada os arquivos texto com as informações dos municípios e das chaves interrompidas. Os parâmetros do algoritmo genético são informados diretamente em sua interface. O módulo permite o acompanhamento da evolução das medidas de desempenho do algoritmo genético durante processamento em sua interface bem como a interrupção do processamento, caso seja observada uma situação indesejável como a não convergência do algoritmo;

- **ger_distrib_final:** gera um arquivo texto com o mapeamento chave x município para todas as chaves existentes na área em estudo. Este módulo utiliza três arquivos texto como entrada. O primeiro contém as informações das chaves interrompidas. O segundo tem as informações de todas as chaves existentes na área, com o mesmo *layout* do primeiro arquivo. O terceiro é o relativo ao mapeamento chave x município relativo às chaves interrompidas;
- **comp_map:** mostra em sua interface o número de chaves e o número total de equipes de manutenção de emergência em cada município relativo a um determinado mapeamento chave x município. As informações de entrada para este módulo são provenientes de um arquivo texto relativo a um mapeamento chave x município de chaves interrompidas;
- **distrib_res:** mostra em sua interface a distribuição geográfica de determinado mapeamento chave x município, permitindo salvar a distribuição em um arquivo no formato *bitmap*. Este módulo tem duas opções para mostrar a distribuição dos resultados. A primeira mostra a distribuição geográfica por meio de pontos. Cada ponto representa uma chave. A característica desta opção é que o agrupamento do atendimento às chaves é representado com base na cor dos pontos (chaves).

A segunda opção mostra uma distribuição radial. A característica desta opção é que cada ponto (chave) é ligado ao município que o atende por meio de um segmento de reta. Esta opção é útil para validação do agrupamento obtido mediante as sistemáticas apresentadas.

5.2 Análise pelo método das P-Medianas

Para análise pelo método das p-medianas foram desenvolvidos vários módulos de *software* utilizando a IDE do programa Lazarus, por ser

software livre e disponível em diversos sistemas operacionais como *Windows*, *Linux* e outras versões do *Unix*. No primeiro módulo de *software* é informado o número de medianas desejado. Em seguida são lidas as informações das chaves que tiveram interrupções acidentais em 2002 e os municípios capazes de alocar equipes de manutenção. Concluída a leitura das informações, é aplicado o algoritmo das p-medianas e obtidas as medianas. Em seguida é verificado o município que está mais próximo a cada mediana, dentre os possíveis de alocar equipes de manutenção, sendo obtida uma relação de municípios. Esses municípios são os que terão equipes de manutenção. Cada chave será atendida pelo município da relação a que estiver mais próxima. Com esta consideração são geradas as informações que definem o mapeamento chave x município.

No algoritmo das p-medianas implementado neste trabalho é considerada a potência média em cada chave assim como a demanda. O algoritmo das p-medianas considera apenas pontos de demanda com coordenadas geográficas e valores de demandas associadas e não os valores de custos. Devido a este fato, é necessário utilizar um processo que calcule os valores dos custos para cada situação de mapeamento. Este processo lê as informações do mapeamento chave x município das chaves que tiveram interrupção e calcula os valores dos custos, conforme descrito no módulo **calc_fun_obj**.

Por meio do somatório dos custos relativos a equipes, infra-estrutura e energia elétrica não faturada tem-se o valor total do custo para a situação em análise.

Como não é conhecido o número de municípios para a obtenção do mapeamento que leve ao melhor resultado, nem quais são os municípios que participarão do agrupamento, são necessários vários experimentos. Os experimentos são realizados variando o número de medianas e analisando os resultados obtidos. Neste estudo foram consideradas 1, 2, 3, 5, 8, 12, 18 e 25 medianas. Para uma melhor análise de cada resultado há a necessidade da visualização de cada distribuição obtida. A visualização é obtida por meio de um programa codificado em Lazarus, cuja interface gráfica foi descrita no módulo **distrib_res**. Esse programa lê as informações do mapeamento chave x município e mostra graficamente a distribuição.

5.3 Análise por Algoritmos Genéticos (AG)

A solução proposta pelo método de algoritmos genéticos é descrita a seguir.

5.3.1 Variáveis do problema e codificação

Para a região em estudo, existem 20 municípios em potencial para a alocação das equipes e 2546 chaves distribuídas nesta região. Para a implementação do algoritmo, utilizou-se a codificação binária tradicional como mostra a figura 1. Ela tem um cromossomo e 2546 genes com cinco bits para representar cada um dos vinte possíveis municípios onde uma equipe pode ser alocada. Cada uma das 2546 chaves são as variáveis do problema que devem ser alocadas a uma determinada equipe. Dessa forma, definiu-se que cada indivíduo (possível solução do problema) do AG terá 2546 genes, cada um com cinco bits. Esta codificação leva a um espaço de busca de $2^{(5 \times 2546)}$ ou, aproximadamente, 10^{3312} , o que é intratável por métodos enumerativos tradicionais [3].



Figura 1: Codificação

5.3.2 Restrições

Existem duas restrições na modelagem do problema. A primeira é que nenhuma chave pode ser atendida por dois locais distintos. Esta condição é satisfeita em função da codificação utilizada na qual esta situação não ocorre [2]. A segunda restrição é relativa à capacidade de cada equipe em atender um determinado número de ocorrências nas chaves. Esta situação é tratada com a inclusão de equipes adicionais nos municípios à medida que o número de atendimentos às chaves cresce. Com base no histórico de atendimentos tem-se uma limitante de 72 chaves por equipe [2].

5.3.3 Função objetivo e função de fitness

Como a natureza do problema é de minimização e, por definição, um Algoritmo Genético procura por um valor máximo, há a necessidade de uma adequação. Assim, utiliza-se como referência o valor do custo total para a situação em 2002, como mostrado na equação (1). A equação (2) mostra a função objetivo a ser otimizada:

$$f(x) = \frac{5.009.892,02}{g(x)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
g(x) = & Neqp * 107.100,00 + Nmun * 34.448,40 + \\
& + \sum_{m=1}^{Nmun} (0,2 * Neqpadmun_m) * 34.448,40 + \\
& + \sum_{i=1}^{Nchaves} P_i * t_i * 0,24 + \\
& + \sum_{j=1}^{Nchaves} Np * VHh * Vm * t_j * 0,39
\end{aligned}
\tag{2}$$

onde:

- $f(x)$ é a função de fitness;
- $g(x)$ é a função objetivo;
- $Neqp$ é o número total de equipes;
- $Nmun$ é o número de municípios que tem equipes de manutenção;
- $Neqpadmun_m$ é o número de equipes adicionais em cada município;
- P_i é a potência média na chave i ;
- t_i é o tempo de deslocamento para o atendimento a chave i ;
- $Nchaves$ é o número de chaves, no caso 2546;
- 0,24 é o valor em R\$/kWh consumido;
- 34.448,40 é o custo, em R\$, relativo à infraestrutura;
- 107.100,00 é o valor médio do custo anual de uma equipe de manutenção de emergência;
- Np é o número médio de pessoas em cada equipe;
- VHh é o valor em R\$ do P_xh (pessoa x hora);
- Vm é o valor da velocidade média em km/h;
- t_j é o tempo de deslocamento da equipe até a chave j ;
- 0,39 é o valor médio do custo do veículo por km rodado;
- 5.009.892,02 é o valor do custo em R\$ para a situação existente em 2002.

O custo anual de cada equipe de manutenção foi estimado pela Concessionária em R\$ 107.100,00. Para a simplificação da modelagem, o cálculo do tempo de deslocamento considera que a distância do local onde se encontra a equipe até o da chave a ser reparada vai ser percorrida em linha reta, sem obstáculos, a uma velocidade média de 40 Km/h.

Para que se possa observar melhor a evolução da solução ao longo das gerações é usual normalizar a função de *fitness* para que tenha um intervalo de variação de 0 a 1. Entretanto, utilizou-se uma transformação em função do valor da situação existente em 2002. Assim, a função de *fitness* final é definida pela equação 1, com base na função objetivo definida pela equação 2.

5.3.4 Parâmetros iniciais do Algoritmo Genético

O número de indivíduos da população de soluções foi estabelecido em 250 e o critério de parada do algoritmo foi o alcance de um número máximo de gerações (definido posteriormente). O método de seleção utilizado foi o da amostragem universal estocástica, pelo fato de não ser muito agressivo. Os operadores genéticos utilizados foram os tradicionais *crossover* de um ponto e mutação de um bit, aplicados com probabilidade respectivamente de 0,7 e 0,005.

6 Simulações e Resultados

Os resultados obtidos com a metodologia proposta são discutidos a seguir.

6.1 Resultado para a situação em 2002

Os resultados obtidos para a situação de 2002 considera a distribuição de equipes de manutenção alocadas nos seus respectivos municípios e o mapeamento de atendimento das chaves pelos municípios é criado com base na proximidade da cada chave aos municípios que possuem equipes. A tabela 2 mostra os resultados obtidos.

Tabela 2: Valores para a situação em 2002.

Descrição	Valor
Energia elétrica não faturada (kWh)	66.188,12
N° de locais distintos	13
N° de equipes adicionais	29
Tempo de deslocamento das equipes (h)	1.406,99
Quantidade de P _x h em deslocamentos	3.517,47
Energia elétrica não faturada (R\$)	15.885,15
Custo anual das equipes (R\$)	4.498.200,00
Custo anual de deslocamento (R\$)	54.872,47
Custo de logística das equipes (R\$)	647.622,40
TOTAL (R\$)	5.216.580,02

Como em 2002 existia um total de 36 equipes e o critério utilizado para a geração do mapeamento obteve 42 (13+29), o valor do custo anual de equipes deve ser reduzido em R\$ 206,688,00, o

que corresponde ao valor do custo anual de seis equipes de manutenção. Com esta consideração tem-se que o custo total em 2002 é de **R\$ 5.009.892,02**.

6.2 Resultado com Algoritmo Genético (AG)

Para a implementação da solução computacional do problema pelo método do algoritmo genético foi utilizado como base um módulo de *software* de domínio público, o GALOPPS, versão 3.2 [4], escrito em linguagem C.

O módulo de *software* foi rodado várias vezes em um computador PC *Athlon* 64 (3,7 GHz, 1GB RAM) e o melhor resultado obtido está sumarizado na tabela 3.

Tabela 3: Resultado obtido com o Algoritmo Genético

Descrição	Valor (R\$)
Energia não faturada	62.131,99
Custo anual das equipes	3.855.600,00
Custo anual de deslocamento	192.353,20
Custo de logística das equipes	303.145,92
TOTAL	4.413.231,11

Após a aplicação do ajuste descrito no módulo AG da seção 5.1, foram obtidos os resultados mostrados na tabela 4.

Tabela 4: Resultado Algoritmo Genético ajustado

Descrição	Valor (R\$)
Energia não faturada	58.445,61
Custo anual das equipes	3.855.600,00
Custo anual de deslocamento	180.554,66
Custo de logística das equipes	303.145,92
TOTAL	4.397.746,19

A figura 2 mostra a evolução dos valores de *fitness* ao longo das gerações e a figura 3 o do *on-line* e *off-line performance*. O valor unitário representa o custo total existente em 2002 e os valores acima indicam o quanto o melhor resultado evolui ao longo das gerações.

Um ponto notável é que existe uma evolução muito rápida no início do processo. Essa

característica ocorreu devido à criação de vinte indivíduos específicos no início do processo. Cada indivíduo representa o atendimento de todas as chaves por apenas um dos vinte municípios factíveis. Assim são gerados vinte indivíduos distintos com essa característica. Tal estratégia auxilia o algoritmo na obtenção de boas soluções em poucas gerações.

Outro aspecto a se comentar é que a evolução ocorreu satisfatoriamente quando os parâmetros de *crossover* e de mutação do algoritmo foram ambos alterados para 100% com uma população de cem indivíduos coincidindo com os resultados obtidos das combinações dos parâmetros do algoritmo genético apresentado no trabalho de Bobel [2]. Essa característica é devida à codificação que foi utilizada, pois apesar de ser simples permite a existência de indivíduos bem distintos com valores de *fitness* muito próximos.

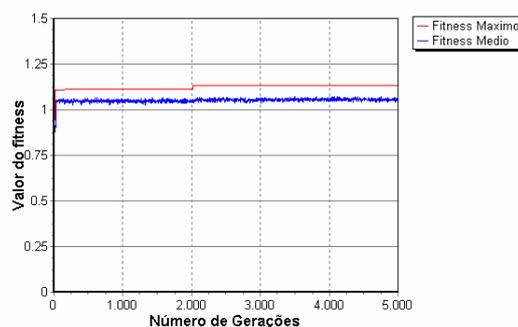


Figura 2: Evolução do *fitness*

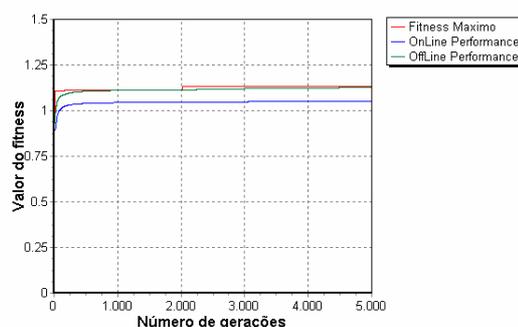


Figura 3: Evolução do *on-line* e *off-line performance*

A solução do algoritmo genético ajustada obtida para a alocação das 36 equipes na região é mostrada na figura 4, com os nomes dos respectivos municípios e os 2546 pontos de manutenção alocados às equipes. Por inspeção, percebe-se que há uma distribuição bastante concisa e factível.

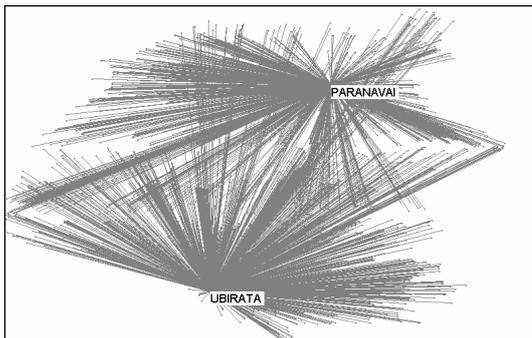


Figura 4: Atendimento das chaves A.G.

O método encontrou dois municípios distintos para realizar o atendimento às chaves: Ubitatã, parte inferior da figura 4 e Paranaíba. As linhas da figura 4 representam a ligação do município com a chave por cujo atendimento está responsável.

Para melhorar o mapeamento mostrado na figura 4, utiliza-se a estratégia de ajustar os genes do melhor indivíduo. O objetivo desse ajuste é a realização de uma busca local por uma solução ainda melhor. O ajuste dos genes do melhor indivíduo é realizado em duas etapas, como descrito a seguir.

A primeira etapa consiste na troca dos municípios que atendem determinadas chaves. Para que ocorra a troca, é verificado se existe alguma chave que é atendida por um determinado município, mas que se encontra mais próxima a outro. Se essa situação existir, é analisado se este outro município faz o atendimento a alguma chave que está mais próxima ao primeiro. Se essa condição existir, é feita a troca do atendimento. O procedimento é realizado até que não ocorram mais trocas. A característica desta etapa é a não alteração do número de atendimentos por município. Este procedimento reduz o valor da energia não faturada.

A segunda etapa consiste no melhor aproveitamento da distribuição das equipes de manutenção obtidas objetivando-se a redução do tempo do atendimento às chaves. Esta etapa explora a possibilidade da existência de sobra de capacidade de atendimento em determinados municípios na solução obtida. Se esse fato ocorrer, são verificadas as chaves mais próximas a cada município que possui capacidade ociosa de atendimento. Se essas chaves são atendidas por outro município, passam então a ser atendidas pelo mais próximo respeitando-se o limite da capacidade extra de atendimento. O procedimento desta etapa também reduz o valor da energia não faturada sem alterar os custos anuais de equipes de manutenção ou infra-estrutura.

Na figura 5 pode ser observado o resultado obtido, mas, mesmo com o mapeamento ajustado no

algoritmo genético, existem condições para melhorias no atendimento às chaves. Uma estratégia é a de considerar os municípios obtidos pelo método do algoritmo genético e gerar um mapeamento com base na proximidade de cada chave a determinado município e calcular os componentes de custos com o módulo **calc_fun_obj** descrito na seção 5.1.

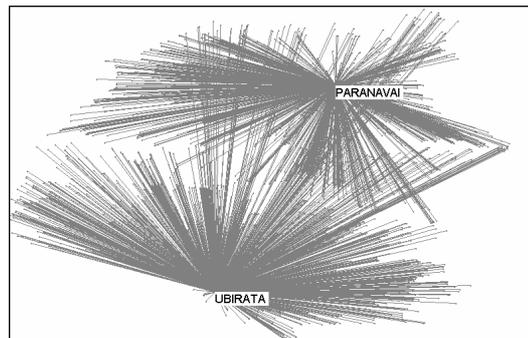


Figura 5: Atendimento às chaves A.G ajustado

O resultado da geração do mapeamento com os municípios obtidos pelo algoritmo genético para o atendimento às chaves está na figura 6.

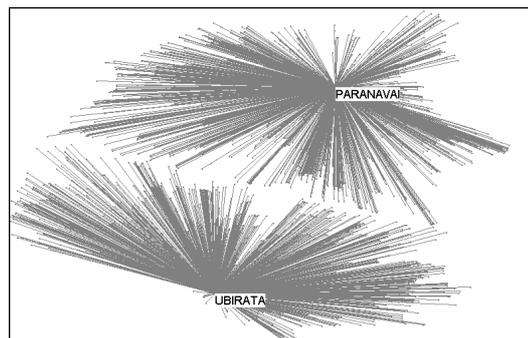


Figura 6: Mapeamento A.G por proximidade

Por meio da comparação da figura 4 com a figura 5 e da figura 5 com a figura 6 podem ser constatadas as melhorias no atendimento às chaves. Algumas chaves que estavam sendo atendidas pelo município de Ubitatã passaram a ser atendidas pelo município de Paranaíba e vice-versa, gerando uma distribuição mais uniforme.

A tabela 5 mostra a nova composição dos resultados financeiros.

Tabela 5: Novo resultado financeiro do Algoritmo Genético

Descrição	Valor (R\$)
Energia não faturada	54.500,88
Custo anual das equipes	3.855.600,00
Custo anual de deslocamento	163.393,08
Custo de logística das equipes	303.145,92
TOTAL	4.376.639,88

Além dos novos valores financeiros, tem-se os dados relativos ao deslocamento das equipes até as chaves mostrados na tabela 6 e o número de chaves atendidas e equipes por município na tabela 7.

Tabela 6: Valores relativos ao deslocamento

Descrição	Valor
Tempo de deslocamento das equipes (h)	4.189,57
Quantidade de P _{xh} em deslocamentos	10.473,92

Tabela 7: Número de equipes por município

Município	Nº de chaves	Nº de equipes
Paranavaí	1224	17
Ubiratã	1322	19

6.3 Resultados com P-Medias

Os resultados financeiros obtidos encontram-se na tabela 8. Os relativos aos custos de deslocamento e P_{xh} investidos pelas equipes de manutenção nos deslocamentos estão na tabela 9 e o número de chaves atendidas por cada município e o número de equipes por município encontram-se na tabela 10.

Tabela 8: Resultado P-Medias

Nº de medias	Nº de municípios	Valor (R\$)
1	1	4.380.342,18
2	2	4.468.616,29
3	3	4.340.216,39
4	4	4.456.934,61
5	5	4.586.904,02
8	8	4.866.064,00
12	12	5.071.101,40
18	15	5.486.824,96
25	17	5.653.550,12

Tabela 9: Resultado P-Medias

Nº de medias	Custo deslocamento (R\$)	Quantidade de P _{xh} de desloc.	Tempo de desloc. (h)
1	190.893,60	12.236,77	4.984,71
2	147.877,07	9.479,30	3.791,72
3	118.592,95	7.602,11	3.040,84
4	99.780,99	6.396,22	2.558,49
5	88.803,97	5.692,56	2.277,02
8	66.599,30	4.269,19	1.707,67
12	51.344,50	3.291,31	1.316,53
18	44.576,28	2.857,45	1.142,98
25	42.537,43	2.733,09	1.093,27

Tabela 10: Número de equipes por município

Município	Nº de chaves	Nº de equipes
Campo Mourão	791	11
Nova Esperança	822	12
Umuarama	933	13

A figura 7 mostra a distribuição do atendimento das chaves pelos municípios do melhor resultado obtido pelo método das P-Medias.

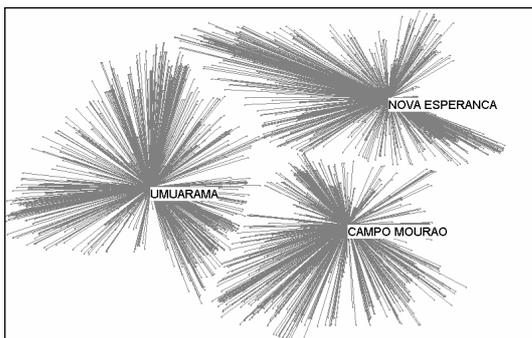


Figura 7: Atendimento das chaves P-Mediana

Os municípios encontrados pelo método correspondem a Umuarama (esquerda), Nova Esperança (acima) e Campo Mourão (abaixo).

7 Análise dos resultados

Considerando os valores de custo total de R\$ 5.009.892,02, 1.406,99 horas de deslocamento e uma média de 2,5 pessoas por equipe de manutenção em 2002 (seção 6.1) tem-se:

- a) Um ganho financeiro potencial anual de 12,64% se utilizada a solução apresentada pelo algoritmo genético, o que representa R\$ 633.252,14 (seção 6.2). No caso do método das p-mediana tem-se um ganho potencial de 13,37%, R\$ 669.675,63, (seção 6.3) para a área em estudo;
- b) Um aumento no tempo anual de deslocamento. Por meio da análise das tabelas 8 e 9 pode ser constatado o aumento do tempo de deslocamento à medida que é reduzido o número de locais distintos com equipes de manutenção. A solução apresentada pelo algoritmo genético representa um aumento de 2,978 vezes relativo a 4.189,57 horas obtidas e no método das p-mediana foi obtido um aumento de 2,161 vezes relativo a 3.040,84 horas;
- c) Redução da eficiência das equipes. Como existe a necessidade de investir um número maior de pessoas x hora em deslocamento até as chaves e esse investimento não produz trabalho, no caso reparo, ocorre uma redução da quantidade efetiva de pessoas x hora. Os valores das quantidades de pessoas x hora adicionais obtidos pelo método do algoritmo genético e p-mediana são de 6.956,45 e 6.195,12, respectivamente;
- d) Cada método encontrou uma solução diferente tanto na escolha dos municípios quanto em seu número (tabelas 7 e 10), porém, os resultados obtidos foram próximos

divergindo no que diz respeito a custos em apenas 5,4%.

Salienta-se ainda que, na realidade, existem várias pequenas equipes de manutenção compostas de apenas uma pessoa que presta o atendimento inicial, chamado de emergência, e realiza pequenas manutenções cujos elementos não foram considerados no presente estudo. Somente na cidade de Maringá existiam 22 pessoas que prestavam esse tipo de atendimento.

8 Conclusões e trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o trabalho atingiu o seu objetivo que é a obtenção de uma situação que apresente ganhos financeiros e que seja melhor do que a existente, por meio de dois métodos distintos. No caso em particular, foi avaliada apenas uma dentre cinco áreas que abrangem a área de atendimento da concessionária. Se toda a área fosse considerada, estima-se um fator de multiplicação dos resultados em 2,98 vezes que representa a proporcionalidade entre as chaves de alta tensão existentes na área em estudo com a total da área da concessão [2]. Dessa forma, considerando o fator com o melhor resultado, tem-se um ganho potencial de **R\$ 1.995.633,38** ao ano.

Este trabalho é uma evolução de um trabalho publicado em 2001 [1] e de uma dissertação apresentada em 2002 [2]. À medida em que vão sendo acrescentados novos elementos, existe uma convergência maior da metodologia para a realidade, pois um número maior de variáveis com mais detalhes é considerado. Em todas as situações a metodologia desenvolvida demonstrou ser robusta e eficiente. A abordagem do problema por dois métodos distintos oferece meios para uma validação recíproca tendo um diferencial interessante que é a confiabilidade. Naturalmente quanto mais próximos os dados estiverem da realidade maiores serão os ganhos efetivos apresentados pela metodologia. Existem alguns pontos que podem ser melhorados, dentre os quais salientam-se:

- Consideração do atendimento das chaves de baixa tensão. O trabalho aborda somente as chaves de alta tensão de 13,8 e 34,5 kV;
- Consideração relativas a multas que podem ser:
 - a) De locais específicos que têm características especiais para o sistema como um todo que podem abranger um ou vários consumidores específicos. Por exemplo, uma indústria cuja interrupção

- no fornecimento ocasiona muitos prejuízos e tem contrato formal com a concessionária;
- b) Provenientes do não atendimento aos valores mínimos de DEC e FEC, DIC e FIC determinados pela ANEEL;
 - c) Relativas às chaves que pertençam à rede básica, estas não devem ser desligadas. Mesmo quando programado o desligamento, paga-se uma multa e, no caso de desligamento acidental (não programado), a multa torna-se bem maior. Considerando essa condição, pode haver alterações significativas nos resultados para determinadas regiões;
- O tempo de deslocamento até o local onde há um equipamento para ser feita a manutenção pode ser melhorado. No presente estudo, considerou-se uma velocidade uniforme de 40 Km/h e uma distância reta entre o local da equipe e do defeito para o cálculo do tempo de deslocamento. Entretanto, em termos práticos, existem fatores que fazem com que isso não ocorra, ou seja, a distância pode ser pequena, mas haver dificuldades de se chegar ao local como condições da estrada, ou acesso dificultado. Isso pode causar um tempo maior de deslocamento para uma distância pequena em relação a um local mais afastado com condições mais favoráveis. Dessa forma, pode ser considerado o tempo real de deslocamento de cada equipe ao local a ser submetido à manutenção e, conseqüentemente, obter-se resultados bem mais próximos da realidade. Porém, isso demanda um levantamento de dados em campo atualizado e detalhado.

As pequenas divergências entre os resultados dos mapeamentos obtidos no trabalho de Bobel (dissertação) [2] com este trabalho devem-se ao fato dos dados relativos às potências médias nas chaves de alta tensão que foram utilizados na dissertação terem sido relativos ao consumo médio mensal na chave, fato este detectado posteriormente. Entretanto, como pode ser constatado por este trabalho, essa questão não invalida a metodologia. Na verdade até a consolida.

9 Referências

- [1] BOBEL, E., LOPES, H.S. Otimização da logística de manutenção corretiva em redes de distribuição de energia elétrica por algoritmos genéticos. Anais do **V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente** - SBAI, Canela, RS, 7-9/novembro, [CD-ROM], 2001.
- [2] BOBEL, E. **Dimensionamento e locação de equipes de manutenção em redes de distribuição de energia elétrica**. Dissertação no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, CPGEI/CEFET/PR, 2002
- [3] GOLDBERG, D. E., **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [4] GOODMAN, E. D., **An Introduction to GALOPPS (Genetic Algorithm Optimized for Portability and Parallelism) – release 3.2**, 1996.
- [5] HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [6] LOPES, H.S. (1999) Algoritmos genéticos em projetos de engenharia: aplicações e perspectivas futuras. In: Anais do SBAI'99 - **IV. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. São Paulo, 08-10/setembro/1999, p. 64-74.
- [7] LORENA, L. A. N., SENNE, E. L. F. **Integração de um modelo de p-medianas a sistemas de informações geográficas, 1999**. Disponível na internet via URL www.lac.inpe.br/~lorena/sbpo99/p-med-SIG.pdf. Arquivo consultado em 10/11/2002.
- [8] ROSÁRIO, R. R. L. **O Problema das P-Medianas na Localização de Unidades de Saúde**. Curitiba, 2002. Dissertação no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, UFPR, 2002.
- [9] SILVA, A. P. A., ABRÃO P. J. Application of evolutionary computation in electric power system. **IEEE Word Congress on Computational Intelligence**, 12-17/maio, 2002
- [10] TEITZ, M. B., BART, P. Heuristics methods for estimating the generalized vertex median of a weighted graph. **Operations Research**, v. 16, p. 955-961, 1968.