



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

<b>HERMANN CLAY DE ALMEIDA LEITE</b>	<b>Manoel M. V. de Menezes Junior</b>
<b>ENERGISA PARAIBA DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S/A</b>	
hermann@energisa.com.br	manoelmessias@energisa.com.br

**Aplicação de metaheurística baseada no comportamento de colônia de formigas na otimização de rotas em distribuidora de energia elétrica**

**Palavras-chave**

ant colony  
mapas  
metaheurística  
ordens de serviço  
roteirização

**Resumo**

Neste trabalho é apresentado resultados de uma solução para otimização de rotas utilizando aplicação de meta-heurística dada a sua eficiência na resolução de problemas combinatórios, visando auxiliar o despacho de ordens de serviço emergenciais, comerciais e técnicas minimizando a distância percorrida entre cada atendimento, reduzindo tempo e custos operacionais. Empresas distribuidoras de energia elétrica realizam muitos atendimentos de ordens de serviço distribuídas em tempo e espaço. As rotas a serem seguidas pelos veículos normalmente são definidas em curto prazo por operadores que nem sempre conseguem tomar a melhor decisão devido às informações imprecisas. A otimização de rotas é um problema bastante complexo pelas inúmeras combinações possíveis que resultariam em diversas soluções. Escolhas de rotas erradas resultam num gasto excessivo de combustível e tempo, causando custos desnecessários para a empresa e insatisfação por parte do cliente. Foram realizados testes considerando lotes de ordens de serviços que foram preparados com diferentes graus de dificuldades de acordo com a quantidade de ordem de serviços. O resultado mostrou ganho médio de 25% para equipes de serviço comercial e 37% para equipes de corte e negociação.

**1. Introdução**

Em empresas que atuam no segmento de distribuição e fornecimento de energia elétrica, os atendimentos das ordens de serviços emergenciais, comerciais e técnicas representam um grande desafio quando se observa a necessidade de manter a produtividade das equipes em padrões aceitáveis e com baixo custo operacional.

Isso porque as incidências das ocorrências e solicitações de serviços por consumidores são distribuídas aleatoriamente em tempo e espaço, dificultando o processo de despacho de equipes e atendimento dentro de um prazo desejado.

A natureza dinâmica destas ocorrências no decorrer do dia gera alterações de rotas não planejadas previamente, provocando aumento significativo no tempo de atendimento, devido à distância dos trajetos e consequentemente aumento de custos operacionais como combustíveis e manutenção do veículo.

Além disso, muitas empresas ficam a mercê da experiência de seus funcionários e motoristas, que nem sempre conhecem o melhor caminho ou trajeto no deslocamento entre um determinado local a outro da rota, além de desconhecer a situação atual das vias de trânsito, que podem estar obstruídas por manutenção, bloqueadas por algum acidente ou engarrafadas, comprometendo assim o tempo de atendimento planejado.

Este artigo propõe a utilização de metaheurística na melhoria do processo de despacho de ordens de serviço emergenciais, comerciais e técnicas de acordo com as melhores rotas de atendimento, considerando critérios tais como prioridade, prazo, localização, tipo de equipe e disponibilidade.

A organização deste trabalho está organizado da seguinte forma: 1. Introdução; 2. Desenvolvimento; 3. Conclusões.

## **2. Desenvolvimento**

### **2.1. JUSTIFICATIVA**

Segundo (BALLOU, 1998) a logística participa de pelo menos um terço total das despesas de uma empresa, e estes custos podem variar de acordo com o tempo de viagem entre o atendimento de um cliente e outro, ou o atendimento de uma nova demanda inesperada. Na Energisa estes custos, estão relacionados ao deslocamento para o atendimento de ocorrências e/ou solicitações de serviço pelos clientes. Uma eficiente operação logística tem impacto relevante no resultado da empresa. Essa eficiência é obtida através da determinação de boas rotas para uma frota de veículos.

Desta forma, o aumento da produtividade na roteirização de veículos é fundamental para redução de custos e aumento da produtividade na execução dos serviços em empresas distribuidoras de energia elétrica.

Segundo Araújo (2008) a maioria dos problemas de roteirização de veículos encontrados apresenta dificuldades na resolução por métodos exatos. Eles são resolvidos por processos heurísticos, que buscam melhores respostas em tempos computacionais viáveis.

O Problema de Roteirização de Veículos (PRV) consiste basicamente em definir um conjunto de pontos a serem percorrido por um ou mais veículos, para atender um determinado conjunto de clientes geograficamente dispersos, com distâncias e custos diferentes associados a suas conexões. Estes clientes estão conectados entre si através de trajetos ou rotas, para cada par de clientes há um ou mais trajetos que os ligam. O problema consiste, então, em encontrar o menor caminho para percorrer todos os clientes em uma única vez. O Conjunto de todos os caminhos possíveis a serem percorrido, define o espaço da busca para este problema. Quando o conjunto é pequeno se torna fácil de resolver, testando todas as possibilidades. Mas em conjuntos maiores a dificuldade cresce exponencialmente devido as inúmeras possibilidades combinatórias. Daí a necessidade de estratégias computacionais de baixo custo, mais que possam encontrar soluções ótimas ou próximas delas para este tipo de problema.

Os Algoritmos Genéticos descrito por Holland (1975), inspirados pela biologia evolutiva, que se baseia na observação da evolução das espécies, são muito utilizados na resolução de problemas do tipo caixeiro-

viajante e de roteirização de veículos com janela de tempo. Porém, para problemas de roteirização em veículos sem janelas de tempo, os algoritmos genéticos não vinham apresentando bons resultados se comparados com algoritmos baseados em meta-heurística (TAILLARD, 1994).

Atualmente, existem vários estudos publicados que propõem a resolução de diferentes tipos de PRV, dentre eles, os modelos definidos por Dorigo e Colomi (1996) que utilizam metaheurística baseadas na observação de fenômenos físicos e biológicos e de inteligência artificial que tem apresentado melhores resultados quando aplicados em problemas reais.

Esse trabalho apresenta resultados obtidos na roteirização de um conjunto de ordens de serviços através de uma solução sistêmica utilizando meta-heurística e mapas.

## **2.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### *A. O problema de despacho de ordens de serviço*

O problema de despacho de ordens de serviço tem como objetivo cumprir um determinado conjunto de tarefas em um determinado prazo. Este conjunto de tarefas é dividido em subconjuntos a serem distribuídos para um determinado número de equipes disponíveis, de acordo com a classificação do tipo de serviço que cada equipe está apta a executar e sua posição inicial.

Cada tarefa possui características e atributos própria tais como: tipo da tarefa, localização, prioridade, tempo de atendimento, material necessário, entre outros. Já a equipe, por sua vez, tem atributos que se referem a sua disponibilidade, localização, tipo de serviços aptos a executarem, tipo de veículo, material disponível, velocidade média de deslocamento entre outros. Além disso, deve-se considerar a área de atuação da equipe.

As ordens de serviço devem ser agrupadas de modo a manter as tarefas mais próximas do centróide (ponto que define o centro geométrico de um objeto) de agrupamento, reduzindo assim a distância de deslocamento da equipe de um determinado agrupamento de tarefas.

Na Energisa, o despacho de ordens de serviços, seja ela do tipo Comercial ou Técnica, é realizado de forma centralizada, através do Centro de Operações de Serviços. A partir de um conjunto de ordens de serviços disponíveis, o despachante seleciona uma combinação de tarefas para atender a um determinado conjunto de clientes, onde o custo seja o menor possível (normalmente distância percorrida ou tempo de deslocamento). Este conjunto de ordens de serviços agrupadas é denominado Lote. Ao realizar o despacho do lote de tarefas, atualmente, o sistema da Energisa transfere os dados para dispositivo móvel do tipo Smartphone (aparelho celular com sistema operacional e funcionalidades avançada) da equipe através de rede de dados wireless (quando a equipe encontra-se na garagem ou sede da empresa) ou por conexão GPRS/EDGE/3G (quando a equipe encontra-se em operação). As ordens de serviços transferidas para o dispositivo móvel não seguem qualquer tipo de ordenação; a seqüência e priorização são realizadas pelo despachante durante as atividades do dia-a-dia através de rádio, podendo ocorrer cruzamentos de trajetos conforme ilustrado na Figura 1abaixo.

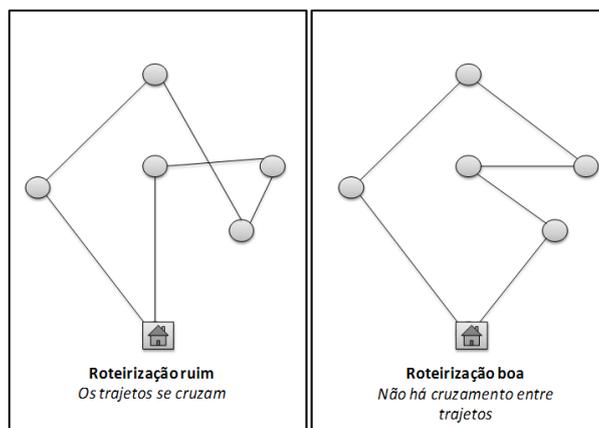


Figura 1: Exemplo de roteirização ruim e boa (BALLOU, 2001).

Durante o decorrer do dia, novas demandas são geradas devido às incidências de ocorrências ou solicitações de clientes, gerando alterações de rotas previamente não planejadas e a necessidade de reprogramação das equipes em operação. Atualmente na ENERGISA, a escolha da equipe para execução da nova tarefa é baseada apenas em visualização gráfica através de ferramenta CAD (do inglês, Computer-aided design) e/ou conhecimento de agente de despacho, ou seja, sem qualquer análise computacional da equipe ideal para atendimento baseado em tipo da equipe, localização, inter-relações entre as tarefas, e da complexidade associada a cada uma delas (prioridade, indicadores, prazos etc). Segundo Ballou (2001) utilizar o raciocínio humano para determinar roteiros já trás resultados positivos, como por exemplo, evitar que as rotas se cruzem. Entretanto, o aumento da complexidade como o número de tarefas, restrições de velocidade, sentido das vias e tempo de parada, passa a exigir modelos computacionais como ferramenta para aumento da eficácia.

#### B. O problema de roteirização de veículos

A otimização de rotas em problema de roteirização de veículos é algo bastante complexo, devido a inúmeras possibilidades de combinações que podem resultar em diversas soluções. O objetivo é determinar um conjunto de rotas ideais, para uma determinada frota de veículos, de menor custo, que atenda a um conjunto de tarefas, respeitando as restrições operacionais definidas para cada problema, tais como tipo do serviço, material, localização, prioridade, prazo, tipo de equipe e transporte.

O termo roteirização (equivalente ao inglês, “*routing*”), apesar de não encontrado em todos os dicionários de língua portuguesa, é definido como o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou seqüências de paradas a serem cumpridos, com o objetivo de visitar um conjunto de pontos distintos geograficamente e pré-determinados (CUNHA, 2000).

A roteirização segundo Assad (1988) *apud* Cunha:

*“consiste em uma das histórias de grande sucesso da Pesquisa Operacional nas últimas décadas, que pode ser medido pelo expressivo número de artigos que vêm sendo publicados ao longo dos anos na literatura especializada, incluindo os anais de congressos da ANPET (Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes)”*. (p2)

O primeiro problema de roteirização a ser estudado foi o problema do caixeiro viajante (no inglês “Travel Salesman Problem” ou TSP), que consiste em estabelecer qual a melhor rota ou sequência de cidades a ser feita por um vendedor, onde o mesmo deve percorrer a menor distância possível e assegurando que cada cidade seja visitada exatamente uma única vez.

Desde então, restrições vem sendo adicionadas ao problema do caixeiro viajante, com o objetivo de representar os diferentes tipos de problemas que envolvem a definição de roteiros para pessoas e veículos. Muitas vezes problemas do tipo caixeiro viajante podem ser vistos como problemas de múltiplos caixeiros viajantes, com restrições adicionais de capacidade e outras restrições que depende de cada aplicação (CUNHA, 2006).

O problema de roteirização de veículos pode ser classificado basicamente em dois tipos: Estáticos e Dinâmicos. No problema estático, conhecido como Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo (PRVJT), todos os dados relativo aos clientes são conhecido antes das rotas serem construídas e nenhuma mudança é realizada após a fase de roteamento dos veículos.

O desenvolvimento de novas tecnologias de informações e o avanço nas telecomunicações vem exigindo que as empresas revisem os seus modelos de distribuição. Recentes avanços na comunicação permitem que novas tarefas sejam processadas em tempo real, geralmente enquanto as rotas já estão sendo executadas, e novas informações podem ser obtidas durante a operação das equipes como: tempo de parada, veículo quebrado ou atrasado, situação das vias etc.

Com isso, uma classe de problema não muito explorada vem crescendo, conhecida como Problemas de Roteamento de Veículos Dinâmico com Janelas de Tempo (PRVDJT). No problema Dinâmico as rotas previamente planejadas podem ser alteradas durante a operação dos veículos mediante o surgimento de novas tarefas. De certa forma, pode ser visto como um conjunto de problemas estáticos a serem resolvidos durante a operação dos veículos (PSARAFTIS, 1995).

No PRVDJT, os veículos em operação podem sofrer uma reprogramação em tempo real, para atender a um novo conjunto de tarefas com suas respectivas características, de tal modo que o custo seja o menor possível (geralmente a distância percorrida ou tempo de deslocamento). Além disso, algumas requisições dos clientes podem ser conhecidas previamente, por exemplo, antes da saída dos veículos da garagem. (RIBEIRO; LORENA, 2005, p2)

A natureza dinâmica das novas solicitações de serviços que surgem no decorrer do dia faz-se necessário que seja realizada a reprogramação dos veículos que estão em operação. No momento da reprogramação das rotas, esse problema pode ser visto como um problema estático (PRVJT) a ser resolvido.

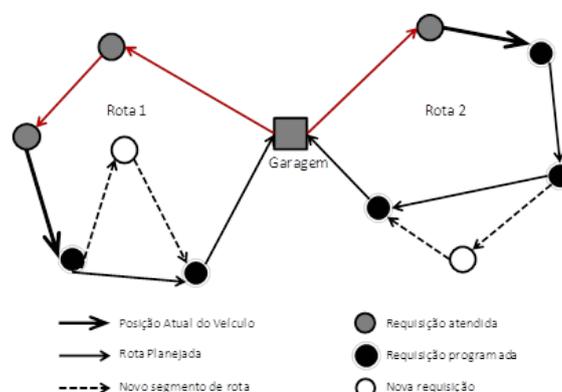


Figura 2: Cenário de um Problema de Roteamento de Veículos Dinâmico (RIBEIRO; LORENA, 2005)

A Figura 2 mostra um problema simples de roteirização dinâmica de veículos. No exemplo, dois veículos partem para atender um conjunto de rotas previamente existentes no qual cada um inicia na posição atual do veículo e ao término retornam para a garagem. Considera-se no exemplo que os veículos estão capacitados para atender tanto as requisições programadas quanto novas requisições. As requisições previamente solicitadas e programadas são representadas pelos círculos negros, enquanto as novas requisições são representadas pelos círculos brancos.

As linhas sólidas representam as duas rotas que o despachante planejou para os veículos. A linha sólida de espessura mais grossa representa a posição atual do veículo no momento que novas requisições são recebidas.

No problema tratado neste trabalho, parte das ordens de serviço é conhecida previamente, os quais são utilizados para roteirização de um determinado conjunto de rotas definidas inicialmente. No decorrer do dia, novas ordens de serviço que entram no sistema são atribuídas a equipes que estão em operação, desta forma as rotas podem sofrer reprogramação em tempo real, para atender um novo conjunto de ordens de serviço, de tal modo que o custo baseado na menor distância percorrida ou tempo de viagem seja o menor possível.

Para que as tarefas não programadas possam ser atendidas no mesmo dia da solicitação, é necessário definir um tempo limite de entrada de novas solicitações para a janela atual de operação, para que as ordens de serviços geradas após o tempo limite sejam colocadas para o próximo dia de operação. Ou seja, os veículos que já se encontram em operação têm conhecimento prévio sobre a localização das novas tarefas (MONTEMANNI; GAMBARDELLA; DONATI, 2003).

Considerou-se que os veículos que já estão em operação não precisam retornar a Garagem da ENERGISA para processar novas requisições. Após a reprogramação das rotas, o sistema de despacho de ordens de serviço deverá se comunicar com o dispositivo móvel instalado no veículo e atualizar a sequência dos serviços que deverão ser atendidos. Este dispositivo móvel, por sua vez, está equipado com sistema GPS e conexão de dados móvel (GSM/GPRS/HSPDA/3G).

Foram consideradas neste trabalho algumas variantes para o problema de roteirização de veículos. Elas foram classificadas em quatro categorias, conforme notação adotada por Silva (2007): função e objetivo, restrições, variáveis de decisão e hipóteses/recursos, e/ou características do problema.

Diante da grande diversidade de fatores e condicionantes que aparecem em problemas de roteirização, são necessárias estratégias matemáticas eficazes e robustas o suficiente para serem aplicadas nos mais diferentes problemas, para que possam ser atingidas soluções de qualidade, e para que sejam supridas as demandas particulares de cada problema originado de situações reais.

Segundo Cunha (2000, p. 13), um fato importante a ser destacado é que, embora a maioria dos modelos matemáticos que se propõem a otimização de roteiros, na prática nem sempre conseguem levar em consideração todos os custos operacionais, que compreende não só os custos variáveis como a distância percorrida, mas também os custos fixos dos veículos e os custos de horários com as equipes.

De acordo com Laporte (1992), as estratégias de solução de problemas de roteirização de veículos podem ser divididas em algoritmos exatos e soluções heurísticas. De acordo com Cunha (2006), citado por Araújo (2008, p. 20) *“as meta-heurísticas podem ser definidas como as estratégias e técnicas mais recentes e avançadas, que guiam outras heurísticas a fim de encontrar soluções melhores, ultrapassando o ponto de parada das heurísticas tradicionais.”*

Muitas pesquisas estão sendo realizadas utilizando metaheurística na resolução do PRVDJT. Neste trabalho foi utilizado um solução utilizando meta-heurística baseada no comportamento de colônia de formigas, que empregam um processo adaptativo e paralelo de busca de soluções em problemas complexos, o que o torna

uma técnica muito útil em problemas de otimização.

### 2.3. METAHEURÍSTICA ANT COLONY OTIMIZATION

A palavra heurística, de origem da língua grega “*heurisken*”, significa procurar algo, descobrir, encontrar; enquanto “*meta*” significa além de, em um nível superior. De forma genérica, metaheurística pode ser definida como um processo inteligente na busca por melhores soluções. A idéia principal por trás das metaheurísticas é a exploração do espaço da busca de maneira eficiente, encontrando ótimas soluções sem ter de explorar excessivamente o espaço da busca. Utilizam combinações de escolhas aleatórias e informações históricas dos resultados anteriores para se guiarem e realizar suas buscas.

Pesquisadores de diferentes áreas têm sido inspirados na observação da natureza e a evolução das espécies para desenvolver e aperfeiçoar métodos heurísticos de otimização. Muitas pesquisas vêm sendo realizada baseada no comportamento de colônia de insetos. Esta nova área de pesquisa conhecida como Inteligência Coletiva ou *Swarm Intelligence* baseia-se na aplicação do conhecimento adquirido acerca de como as colônias de insetos realizam atividades coletivas no desenvolvimento de novos algoritmos de simulação e otimização (BONABEAU; DORIGO; THERAULAZ, 1999).

Neste trabalho foi utilizado um algoritmo de otimização baseado no comportamento de colônia de formigas (ACO, do inglês *ant colony optimization*). O ACO (do inglês Ant Colony Optimization) foi desenvolvido por Dorigo (1991), é uma meta-heurística recente para solução de problemas combinatórios. É baseada na construção de soluções e foi inspirada na observação do comportamento das formigas em busca de alimentos.

As formigas são capazes de criar caminhos otimizados entre a sua colônia e uma fonte de alimento sem utilizar elementos visuais. Elas utilizam uma forma de comunicação indireta, onde um indivíduo da colônia modifica de alguma forma o ambiente ao ser redor, e algum tempo depois, outro indivíduo responde a esta modificação. Esta comunicação indireta entre dois indivíduos permite que seja encontrado o menor caminho.

Enquanto as formigas se movimentam da colônia até o alimento, elas depositam no solo uma substância química que produzem chamada de feromônio. Em cada caminho é formada uma trilha de feromônios. Desta forma, num primeiro instante, várias trilhas podem ser geradas. Outras formigas percebem a presença desta substância no solo e de um modo simplificado, a tendência é a formiga escolher a trilha com maior concentração de feromônios. Com o tempo, o feromônio depositado no solo passa a evaporar, assim, quanto maior o tempo que uma formiga fica sem passar em um ponto, menor será a quantidade de feromônio no mesmo.

As primeiras formigas a saírem da colônia se movimentam de forma aleatória. As que saem posteriormente têm sua escolha de rota a seguir influenciada pelas diferentes quantidades de feromônios depositados previamente. As rotas com maior quantidade de feromônios possuem maior probabilidade de serem escolhidas. Desta forma, as rotas são reforçadas com mais quantidade de feromônios e mais formigas seguem este caminho.

Na Figura 3 é demonstrado um exemplo do comportamento das formigas à procura de uma fonte de alimento.

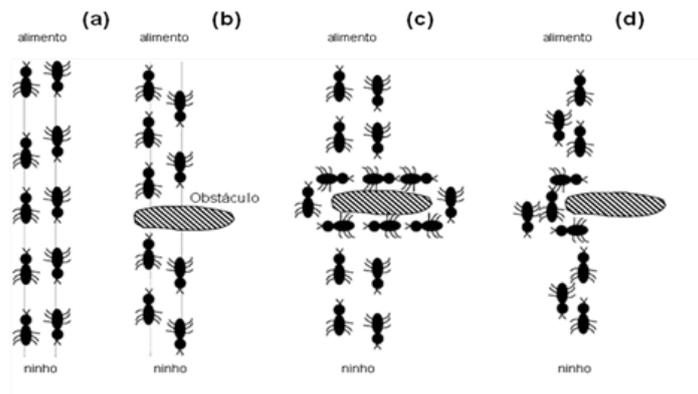


Figura 3: Comportamento das formigas na busca de alimento (OLIVEIRA, 2007).

Inicialmente (Figura 3(a)), as formigas se movimentam em linha reta seguindo a trilha de feromônio que liga o ninho a uma fonte de alimento. Na Figura 3(b) é demonstrado o surgimento de um obstáculo que interrompe o trajeto anterior das formigas e cria dois caminhos distintos, um maior que o outro até a fonte de alimento. O grupo de formigas que primeiro chega ao obstáculo e não consegue seguir a trilha de feromônio não sabe que caminho seguir e escolhe aleatoriamente ir pela esquerda ou pela direita (Figura 3(c)). Desta forma, é possível prever que 50% das formigas escolheram ir pela direita e 50% pela esquerda.

As formigas que escolheram o caminho mais curto para contornar o obstáculo e chegar à fonte de alimento retornam para o seu ninho mais rápido (Figura 3(d)). Desta forma a trilha que acumula uma maior concentração de feromônio influencia outras formigas a seguir esta trilha. Assim, as formigas deixam de escolher as trilhas aleatoriamente e a concentração de feromônio torna-se o parâmetro principal na decisão da escolha da trilha a seguir.

Como já foi dito, a metaheurística ACO baseia-se em um processo de construção de soluções. É também baseada em população, quando ocorre a cooperação entre as formigas. Os métodos de busca populacionais se caracterizam por armazenar um conjunto de boas soluções, que são combinadas de diferentes formas. Estas combinações têm como objetivo, agrupar os bons atributos presentes na melhor solução e gerar uma nova, possivelmente melhor que as demais. Uma das principais inovações do ACO é a utilização de formigas artificiais, que a cada caminho percorrido, depositam certa quantidade de feromônio que irá influenciar na decisão das formigas que vierem em seguida. Baseado na influencia deste feromônio o ACO busca obter a construção de soluções, com efeito, tanto de diversificação quanto de intensificação.

O processo de construção de uma solução ACO é realizado levando em consideração informações heurísticas e informações de feromônio, que é alterada dinamicamente para refletir a experiência da formiga. Inicialmente, as formigas artificiais são colocadas em pontos aleatoriamente. Quando a formiga dá um passo na construção da solução, ela faz um cálculo probabilístico baseada na quantidade de feromônio depositada nas arestas que ligam a sua posição atual até posições ainda não visitadas e na informação heurística relacionada a estas arestas.

Existem algumas variações do ACO, a principal diferença entre elas é a forma de como fazem o incremento do feromônio. Neste trabalho será utilizado o ACS (Ant Colony System), que consiste num melhoramento do Ant System (AS), que é o primeiro exemplo de algoritmo ACO, desenvolvido por Marco Dorigo, Vittorio Maniezzo e Alberto Coloni em 1996 que serviu como ponto de partida na implementação de diversos outros algoritmos inspirados no comportamento de formigas.

## 2.4. MODELAGEM DO AMBIENTE DE TESTE E RESULTADOS

A otimização de rotas é um problema bastante complexo pelas inúmeras combinações possíveis que resultariam em diversas soluções. Para os testes deste trabalho foi considerado uma única variável de decisão para otimização de uma rota: a distância. Outros elementos como prioridade, tipo de serviço, equipe, veículo e carga não foram considerados. A implementação destes elementos possui algumas características e precisarão ser vistas com mais detalhes em trabalhos futuros.

O Cenário de teste deste trabalho considerou que um veículo parte de um ponto inicial (garagem) e segue executando ordens de serviços em diferentes pontos de uma rota, e que, por fim, retorna ao ponto de origem (garagem). O objetivo é encontrar o melhor caminho possível (menor distância), de forma que todos os pontos marcados da rota sejam visitados.

Em rotas urbanas a quantidade de combinações possíveis para levar um veículo de um ponto a outro é muito grande. Dados os inúmeros trajetos possíveis a serem seguidos, todos levam ao mesmo destino, porém nem todos têm o melhor custo. Isto porque algumas características do trajeto podem levar a um melhor ou pior caminho tais como: classificação da via (rodovia, urbana, transição e coletora), parâmetros de tráfego, limite de velocidade, pedágios, condições das vias etc.

#### A. Descrição dos cenários de teste

Foi considerado um único veículo para o atendimento das ordens de serviço e os dados foram comparados com informações em *baseline* de serviços executados entre Janeiro/2010 à Fevereiro/2012. Foi considerado que o veículo em operação na rota tem capacidade suficiente para atender a todas as Ordens de Serviço, independente do seu tipo e características.

As instâncias de teste consideraram cadastro de ordens de serviços do tipo Comercial executadas na ENERGISA de janeiro/2010 à fevereiro/2012. Devido ao grande volume de dados, foi realizado um filtro para diminuir o tamanho da amostragem através de seleção randômica. Foram selecionados, de forma aleatória, 224 lotes de ordens de serviços executadas na localidade de João Pessoa-PB e Campina Grande-PB. Cada lote possui uma determinada quantidade de ordem de serviço definida na instância de teste.

Com o objetivo de validar o funcionamento do protótipo implementado e a eficiência do algoritmo de otimização de rotas utilizando meta-heurística ACO, proposto neste trabalho, foram verificados os resultados obtidos após execução de todos lotes de ordem de serviços para cada instância de teste. Os nomes das instâncias de testes foram assim definidos:  $R(n)$ , onde  $n$  é o número de ordens de serviços por lote. Logo, a instância R25, por exemplo, é composta pelo agrupamento de lotes com 25 ordens de serviços.

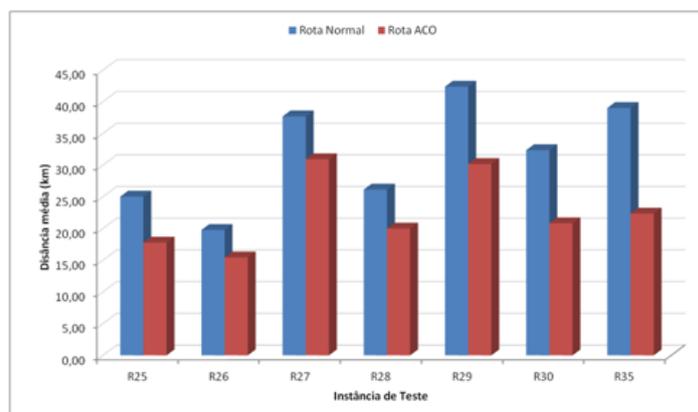


Gráfico 1: Comparativo de Resultados de Instâncias de testes

No Gráfico 1 acima, percebe-se que houve um ganho referente à distância percorrida entre a rota normal,

forma atual utilizada na Energisa para roteirização e atendimento de ordens de serviço e a rota ACO, após a aplicação do algoritmo de otimização. A média de ganho das instâncias de teste em relação à distância percorrida após a otimização com ACO é de 25% em relação ao modo normal.

A princípio, analisando os resultados de forma sintética, observou-se que os melhores resultados médios obtidos estavam em instância de testes com maior número de ordens de serviços por lote conforme Gráfico 2 abaixo. Isso poderia levar a conclusão que as melhores soluções dependeriam da quantidade de ordens de serviço. Porém, após análise dos valores segmentada por lote de ordens de serviço, foi possível verificar que o desempenho não depende só do número de ordens de serviço, mas da posição geográfica de cada um deles.

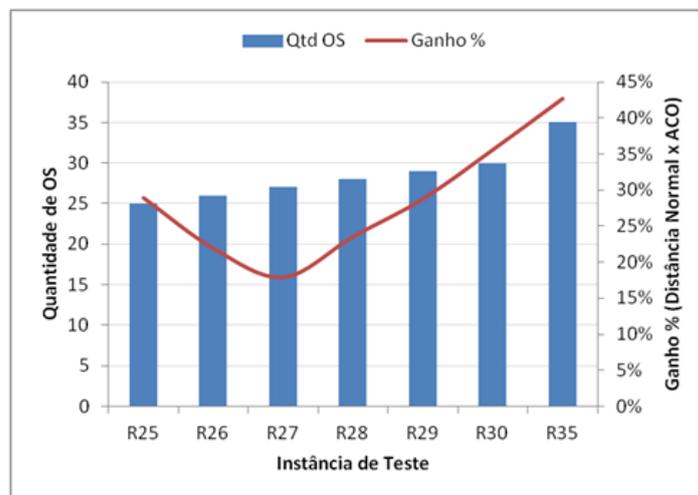


Gráfico 2: Ganho % x Quantidade de OS

De acordo com Larsen (2000), distribuição espacial da localização geográfica dos clientes é um dos parâmetros mais importantes no problema de otimização de roteiros, seja ele estático ou dinâmico. Isto porque à medida que a distância entre um determinado cliente atendido em direção ao próximo cliente cresce, diminui-se a atratividade relacionada à distância.

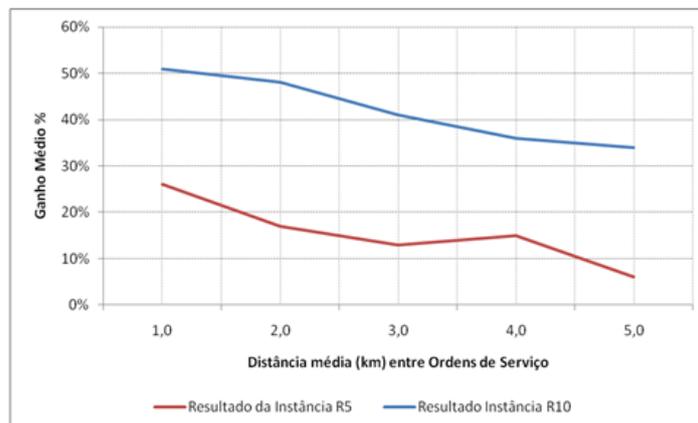


Gráfico 3: Comparativo do ganho com ACO x distância média entre ordens de serviço

O Gráfico 3 apresenta um comparativo entre o ganho médio % da diferença entre a distância normal, ou seja, sem aplicação do algoritmo ACO, em relação a distância das soluções encontrada utilizando algoritmo ACO versus a distância média (km) entre as Ordens de Serviço. É possível verificar que à medida em que a distância entre as ordens de serviço cresce, o ganho diminui.

Foi elaborado um outro cenário de teste considerando como amostra apenas ordens de serviço de Corte e Negociação de débitos afim de avaliar os ganhos pelo fato de realizem em média cerca de 100 visitas diárias, os valores de ganho obtidos com redução de deslocamento foram em torno de 37%. Com base nos resultados

obtidos pelo cenário de testes, foram realizadas projeções de ganho para equipes que trabalham na atividade de corte e negociação de débitos, onde a Energia Paraíba passaria a ter uma economia anual de cerca de R\$ 1,3 milhão com redução de deslocamento e aumento da produtividade utilizando esta solução.

### B. Prova de Conceito

Foi realizada uma prova de conceito para avaliação final da solução proposta, foi gerada uma lista com 25 unidades consumidoras a serem visitada por uma equipe de negociação. A equipe percorreu todos os clientes da lista ordenado com base no modelo atual utilizado, em seguida, a lista foi roteirizada utilizando a metaheurística e visitada novamente pela equipe seguindo a seqüência sugerida pelo algoritmo.

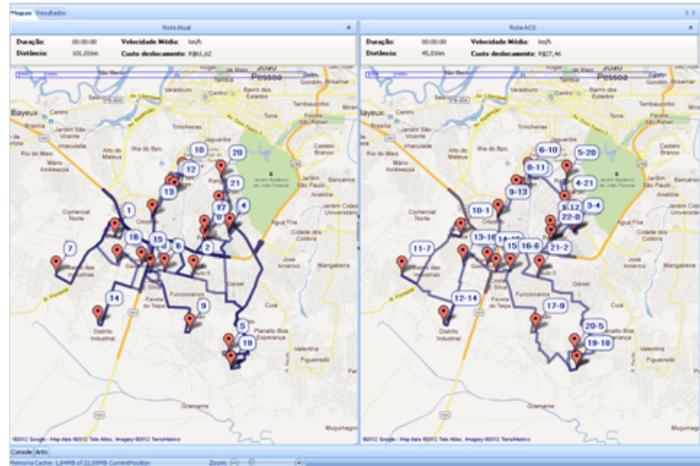


Figura 5: Interface do Software implementado

A Figura 5 acima mostra o comparativo das visitas realizadas (lado esquerdo), a rota percorrida pela equipe de Negociação no formato original, o deslocamento verificado foi de 101 km, no lado direito a rota otimizada após aplicação da metaheurística ACO com 45.01km. O ganho foi de 44%. Algumas informações como duração, distância, velocidade média e custo são exibidas para comparações entre os dois métodos. Os resultados computacionais comprovam a viabilidade da metodologia proposta.

## 3. Conclusões

Os resultados obtidos em cenários de testes mostraram eficiência do algoritmo de metaheurística. Para todas as instâncias testadas, o algoritmo sempre encontrou resultado melhor ou igual se comparados com soluções que já foram executadas em situações reais, gerando percentuais de ganho significativos. A qualidade das soluções obtidas e tempo gasto mostram que a sua utilização, na prática, trará grandes benefícios há empresas que prestam serviço de atendimento a clientes como distribuidoras de Energia Elétrica, uma vez que reduzirá o tempo gasto para atendimento dos clientes envolvidos de forma factível.

Com a evolução da tecnologia e a crescente oferta de soluções, tem-se uma grande disponibilidade de recursos que podem ser integrados aos sistemas corporativos das empresas, ferramentas fundamentais na busca pela melhoria da qualidade do atendimento e eficiência nos serviços prestados aos clientes. E ferramentas de roteirização de veículos se mostram cada vez mais necessárias no auxílio à decisão ou descoberta das melhores rotas em empresas como a ENERGISA.

#### 4. Referências bibliográficas

- BALLOU, R. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial**. Porto Alegre: Bookmann 4ª ed, 2001.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G. **Swarm intelligence: from natural to artificial systems**. Oxford University Press, 1999.
- DORIGO, M. G. **Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem**. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.1 , pp. 1-24, 1997.
- DORIGO, M. S. **Ant Colony Optimization**. Massachusetts: Bradford Books, 2004.
- DORIGO, M. **The ant system: an autocatalytic optimization process**. *Technical Report Revised. Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Itália, 1991*.
- DORIGO, M.; BIRATTARI, M.; STÜTZLE, T. **Ant colony optimization theory: artificial ants as a computational intelligence technique**. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, v. 6, , pp. p. 28–39, 2006.
- DORIGO, M.; CARO, G. Di ; GAMBARDELLA, L. M. **Ant algorithms for discrete optimization**. *Artificial Life*, v. 5, n. 2, , pp. p. 137–172, MIT Press Cambridge, Massachusetts, 1999.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. **Ant system: optimization by colony of cooperating agents** . *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics* , pp. p. 29–41, 1996.
- LAPORTE, G. **The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms**. Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia. Estados Unidos, 2001.
- LARSEN, A. **The Dynamic Vehicle Routing Problem**. Ph.D. thesis at the Department of Mathematical Modelling (IMM) at the Technical University of Denmark (DTU). Lyngby, 2000.
- MONTEMANNI, R.; GAMBARDELLA, L. M.; DONATI, A. E. **New Algorithm for a Dynamic Vehicle Routing problem based on Ant Colony System** . *Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale, 2003*
- OLIVEIRA, S. **Metaheurística Ant Colony System aplicada à uma proposta de uma arquitetura para resolução de problemas de roteamento de veículos com demanda dinâmica e janela de tempo**. Dissertação em Matemática. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte-MG, 2007.
- RIBEIRO, G.;LORENA, L. **.Roteamento de Veículos Dinâmico usando algoritmos genéticos**. XIX ANPET. Recife – PE, 2005.
- TAILLARD, E. **Parallel Iterative Search Methods for Vehicle-Routing Problems**. pp. Volume 23, p. 661-673., dezembro 1993.
- GPS (Sistema de Posicionamento Global). Disponível em: < <http://www.infoescola.com/cartografia/gps-sistema-de-posicionamento-global/>> Acesso em: 12 out. 2010.
-