



DIMENSIONAMENTO DE MÃO DE OBRA E ROTEAMENTO ATRAVÉS DE UM ALGORITMO VND: ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA

Victor Abu-Marrul Carneiro Da Cunha¹
victorabu@gmail.com

Leila Figueiredo Dantas¹
leilaffdantas@gmail.com

Leonardo Helmer Bremenkamp¹
leonardobremenkamp@gmail.com

Luciana de Souza Pessoa¹
lucianapessoa@puc-rio.com

¹ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
R. Marquês de São Vicente, 225 – Gávea, Rio de Janeiro – RJ, 22451-900
Departamento de Engenharia Industrial (DEI)

RESUMO

Este trabalho visa, a partir de uma solução heurística, dimensionar a mão de obra e reduzir o tempo de execução de serviço, para um problema de roteamento, em uma empresa responsável por realizar a medição de consumo de clientes de uma companhia fornecedora de energia. Para isso, foi desenvolvida uma metaheurística VND (*Variable Neighborhood Descent*) para a busca de melhores soluções através das vizinhanças *insert*, *2-opt* e *interchange*. Como a quantidade de clientes visitados por mês depende da probabilidade de falha do equipamento que faz a medição automática, foram analisados 50 cenários possíveis, e os resultados que visam servir de apoio à decisão gerencial apontam que todos os clientes podem ser atendidos dentro do turno de trabalho de três funcionários, e que o menor custo é obtido com dois funcionários utilizando horas extras de trabalho. A mudança sugerida resulta em uma redução mínima de 38% dos custos mensais, podendo chegar a 50%.

PALAVRAS CHAVE. Roteamento de veículo; Metaheurística; VND; Dimensionamento de mão de obra.

Tópicos: L&T, MH, SE.

ABSTRACT

This work aims to define the labor composition and reduce service time for a company that measures energy consumption from an energy supplier company. For this, a Variable Neighborhood Descent metaheuristic was developed to search for better solutions based on three different neighborhoods: insert, 2-opt and interchange. As the number of customers visited per month depends on the probability of automatic equipment failure, 50 possible scenarios were analyzed, and the results that support the management decision indicate that all customers can be attended without extra time by three employees, and with the lowest cost and overtime by two employees. The suggested change could reduce in 38% of monthly costs, up to 50% in some cases.

KEYWORDS. Vehicle Routing Problem; Metaheuristic; Variable Neighborhood Descent; Labor composition.

Paper topics: L&T, MH, SE.



1. Introdução

Em tempos de crescente competição a nível mundial, é cada vez maior a necessidade que as empresas enfrentam de tornarem eficientes os seus processos e utilizarem os seus recursos de maneira eficaz a fim de reduzirem custos e obterem vantagens competitivas no mercado. Uma das áreas que mais absorvem esses custos é a responsável pelos processos logísticos, que chega a corresponder expressivos 12% do produto interno bruto mundial [Ballou, 2006].

Uma das soluções mais conhecidas e utilizadas com papel importante na redução de custos logísticos é a resolução do Problema de Roteamento de Veículos (VRP a partir do acrônimo em inglês para *Vehicle Routing Problem*) [Laporte 1992; Barbarosoglu e Ozgur 1999; Chen et al. 2010]. O VRP aborda problemas de otimização combinatória relacionados à distribuição de mercadorias e fornecimento de serviços através de uma rede de transporte [Montero et al. 2015] e tem como objetivo determinar rotas de custo mínimo que atendam todo o conjunto de clientes e demanda [Chen et al. 2010].

Visto isso, no presente estudo, o VRP será utilizado para solucionar o problema de uma empresa responsável por realizar a medição de consumo em clientes de uma companhia fornecedora de energia. Para efetuar o serviço de medição, é necessário que os leituristas visitem um conjunto de clientes do segmento industrial, localizados em diferentes pontos da cidade. O desejo da empresa é minimizar os custos com mão de obra e deslocamentos necessários para a realização do serviço.

Em geral, os VRPs são fáceis de formular e de entender, mas difíceis de resolver, uma vez que são problemas NP-Difícil [Montero et al. 2015]. Assim sendo, nas últimas décadas, os pesquisadores estão se concentrando principalmente nos estudos das heurísticas e metaheurísticas, que mesmo não garantindo que a solução ótima será encontrada, podem encontrar soluções muito boas dentro de um espaço de tempo razoável, especialmente para aplicações na vida real [Chen et al. 2010].

O objetivo deste trabalho é propor uma solução heurística para o problema da empresa, visando definir a melhor adequação da mão-de-obra a partir de cenários mensais de demanda por medições, aprimorando o roteamento no atendimento aos clientes. Para tanto, utilizou-se uma estratégia com metaheurística VND (*Variable Neighborhood Descent*) para a busca de soluções. Os resultados gerados visam servir de apoio à decisão gerencial, validando o método proposto também como uma ferramenta de apoio operacional para o roteamento da companhia.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: a Seção 2 relata a descrição do problema do estudo de caso. Na Seção 3 é discutida a literatura existente sobre o modelo VND. A Seção 4 descreve a metodologia da solução proposta. Os resultados computacionais junto com as discussões são apresentados na Seção 5. E finalmente, os comentários finais são apresentados na Seção 6.

2. Descrição do problema

O presente trabalho é realizado em uma empresa prestadora de serviços terceirizada localizada no Rio de Janeiro/RJ, que realiza a medição de consumo em clientes de uma companhia fornecedora de energia para residências, comércios e indústrias. O foco do estudo se dá no segmento industrial onde, devido ao alto consumo dos clientes, as medições são apuradas ao final de cada mês, a fim de maximizar o volume contabilizado e evitar resíduos de consumo de um mês para o outro.

O processo de medição é feito de duas formas. A primeira delas por coleta no local, de modo que, técnicos, também chamados de leituristas, realizam visitas nos clientes para efetuar a leitura dos medidores. A segunda forma é a telemedição, onde o consumo dos clientes é informado *online* de forma contínua através de um equipamento instalado no medidor, que faz uso da rede de telefonia para o envio dos dados. Somente uma parcela dos clientes possuem o equipamento de telemedição instalado devido ao alto custo associado, e além disso, esse sistema está sujeito a eventuais falhas que fazem com que a medição do consumo de determinados clientes não seja informada. A empresa prestadora de serviço realiza a medição mensal dos clientes que não



possuem o sistema de telemedição instalado e daqueles que o possuem e que, eventualmente, apresentarem falhas na comunicação dos dados de consumo. Essa característica gera uma incerteza quanto ao montante de clientes que demandam visita para coleta da medição a cada mês.

O segmento industrial é constituído de cerca de 800 clientes, sem grandes variações ao longo do ano. Esses clientes são subdivididos em áreas de acordo com a proximidade geográfica, sendo selecionada para tratamento apenas uma das áreas, com 127 clientes, dos quais 103 são clientes de telemedição que possuem probabilidade de falha, ou seja, que podem ou não demandar leitura manual. Os outros 24 precisam de leitura dos técnicos em 100% das vezes.

Os técnicos do segmento industrial recebem treinamento especializado e custam mais caro para a prestadora. Em geral, tratam-se de técnicos que realizam medições em segmentos de menor complexidade (residenciais e comerciais) e que possuem demandas diárias de serviço, mas que passam a atender também o segmento industrial. Quando o novo segmento é incluído, o salário é então incrementado. Dessa forma, é importante que se determine o número mínimo de técnicos necessários para atender a esse segmento, minimizando assim o custo da mão de obra necessária. Além disso, ao otimizar a rota, minimiza-se também o custo de deslocamento, e com isso o custo total da operação.

A cada rota r atribui-se um técnico t , dado que não são permitidas múltiplas rotas para um mesmo técnico. Sendo assim, este estudo visa minimizar os custos associados ao número total de técnicos (T), ao tempo total extra por rota (TE_r) e ao tempo total de deslocamento por rota (TTD_r) necessários para a realização do serviço.

São consideradas, durante o tratamento do problema, as seguintes premissas: as distâncias entre clientes i e j são assimétricas, ou seja, a *distância* $_{ij} \neq \textit{distância}_{ji}$, sendo $i \neq j$; o trânsito não será levado em conta, visto que o meio de transporte utilizado é a motocicleta; o tempo médio de leitura é igual para todos os clientes, estimado a partir de dados históricos; a jornada de trabalho de todos os técnicos é a mesma; e ao final do serviço, os dados das leituras devem retornar para a prestadora de serviço para serem descarregados no sistema de gestão de medições, podendo assim serem acessados pela contratante. Os dados de entrada são: tempo total disponível por técnico (TT); tempos de deslocamento (TD_{ij}); tempo de atendimento médio para leitura (TAM); e o tempo máximo permitido de hora extra (LE).

Um problema similar já foi abordado por Cunha et al.[2016], onde o número de visitas era constante e a incerteza quanto a falha dos equipamentos de telemedição foi desconsiderada, sendo utilizado o algoritmo Clarke e Wright como solução. No presente trabalho, com o intuito de melhorar a solução real do problema, as probabilidades de falha para os clientes com telemedição foram adicionadas, e um algoritmo de busca VND foi utilizado para aprimorar um solução inicial construída a partir de um método baseado no cálculo dos ganhos do Clarke e Wright.

3. Revisão da literatura

3.1. Heurística e Metaheurística

Há diversas discussões de metodologias para o VRP na literatura, e em seus trabalhos, Golden et al. [2008] e Laporte [2009] fornecem uma descrição completa, bem como abordagens heurísticas e exatas para diferentes variantes do VRP. Como este é um problema NP-difícil, muitos esforços se concentraram nas heurísticas, que pode ser dividida em três categorias: heurística construtiva, heurística de melhoria e metaheurísticas [Chen et al. 2010].

A heurística construtiva constrói uma solução viável adicionando um componente à solução parcial atual até que uma solução completa seja obtida [Chen et al. 2010], na tentativa de manter o custo da solução o mais baixo possível. Um dos mais conhecidos é o clássico algoritmo baseado na abordagem das economias [Clarke & Wright 1964], usado para resolver VRP em que o número de veículos é livre. A heurística de melhoria tem o intuito de melhorar a solução atual explorando iterativamente seus vizinhos, sendo dependentes de soluções iniciais e facilmente presos em um ótimo local [Chen et al. 2010].



Visando fugir de soluções ótimas locais, aplicam-se os métodos metaheurísticos, que integram procedimentos de buscas locais de forma a expandir a busca dentro do espaço de solução viável [Gendreau e Potvin 2010]. Muitas heurísticas já tiveram sucesso, e pode-se observar no trabalho de Cordeau et al. [2002] a análise de cinco metaheurísticas aplicadas ao VRP, e no de Chen et al. [2010], o uso da metaheurística VND como método de solução para resolver problemas de roteirização.

2.2. Variable Neighborhood Descent

Variable Neighborhood Search (VNS) é uma metaheurística proposta por Mladenovic e Hansen [1997] para solucionar problemas de grande complexidade com a ideia de explorar diferentes vizinhanças de maneira sistemática no processo de busca [Hansen e Mladenovic 1999]. A VNS resolve problemas de otimização combinatória e global cuja idéia básica é a mudança sistemática de vizinhança dentro de uma busca local [Hansen e Mladenovic 2014]. Vizinhança é um conjunto de soluções geradas a partir de uma solução viável de um determinado problema, por meio de operações de movimento aplicadas aos elementos desta solução [Talbi 2009].

O *Variable Neighborhood Descent* (VND) é uma variação do VNS que explora as vizinhanças de maneira determinística, e é uma extensão da busca local padrão [Hansen e Mladenovic 2014]. Em sua estrutura típica, o VND visita as diferentes vizinhanças de maneira sequencial, podendo ocorrer variações na maneira como a busca é continuada após ser identificada uma melhoria em alguma das vizinhanças. A busca pode retornar à primeira vizinhança da lista (*Basic VND*), continuar na mesma vizinhança (*Pipe VND*) ou continuar na próxima vizinhança da lista (*Cyclic VND*) [Mjirda et al. 2016].

Qualquer que seja o método adotado, o VND parte de uma solução inicial, obtida aleatoriamente ou através de uma heurística construtiva, e realiza um procedimento de busca local nas vizinhanças escolhidas, seguindo a sequência determinada. O procedimento é interrompido quando percorre todas as vizinhanças sem que seja obtida melhoria, encontrando um ótimo local para as estruturas de vizinhança escolhidas [Duarte et al. 2016], ou seja, o VND para quando a solução é um ótimo local de todas as vizinhanças [Salehipour et al. 2011].

O VND básico explora iterativamente N_k vizinhanças, onde $k = 1, \dots, k_{m\acute{a}x}$, e aplica uma melhor estratégia de melhoria para cada uma das vizinhanças. Esse algoritmo pode ser bem sucedido porque um local ótimo dentro de uma vizinhança não é necessariamente um ótimo local para uma vizinhança diferente. Assim, mudar a vizinhança pode resultar em melhorar o ótimo local [Den Besten e Stutzle 2001; Salehipour et al. 2011].

Para definir completamente um algoritmo de busca local de melhoria iterativa, uma estratégia tem que ser definida. Os padrões são o *best improvement*, que aplica o melhor movimento possível da vizinhança, e o *first improvement*, que imediatamente aplica um movimento logo que uma solução melhorada é encontrada [Den Besten e Stutzle 2001].

Em seu trabalho, Ribeiro e Souza [2002] encontraram a superioridade da estratégia de pesquisa local da VND comparada a uma única abordagem de vizinhança. Para [Den Besten e Stutzle 2001], a VND melhorou significativamente as soluções em comparação com aquelas obtidas por buscas locais de vizinhança única, e em um pequeno tempo de computação adicional.

4. Métodos de Solução

Em primeiro lugar, uma solução inicial, denominada x , é construída por meio de um método heurístico construtivo. Em seguida, faz-se a tentativa da solução x ser melhorada por um procedimento VND, de acordo com o Algoritmo 1.

4.1. Geração da solução inicial

A solução inicial foi gerada através de um algoritmo baseado nas economias de Clarke e Wright (1964), descrito a seguir:



Passo 1: Dado um número fixo de técnicos disponíveis (T), criam-se T rotas, sendo cada uma delas representada por r . As rotas inicialmente não possuem nenhum cliente alocado, e por definição devem sair e retornar ao depósito.

Passo 2: Computa as economias (s_{ij}) para cada par de clientes, onde $s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$, ordenando-as de forma decrescente. Sendo c_{ij} definido como custo de deslocamento entre os clientes i e j , utilizando-se 0 para o depósito. Para o estudo considerou-se esse custo como sendo o tempo de deslocamento (TD_{ij}) entre os clientes.

Passo 3: Seleciona a primeira rota ($r = 1$).

Passo 4: Tenta inserir o arco ij de maior ganho (s_{ij}) passível de ser encadeado com a rota r , dentre todos os arcos não alocados. Para que o encadeamento seja possível nenhum dos clientes do arco selecionado podem estar alocados a uma outra rota. Além disso, a rota deve estar vazia ou permitir o encaixe do novo arco em seu início ou fim, ou seja, quando o cliente j do arco testado for o primeiro cliente alocado na rota r ou quando o cliente i do arco for o último cliente alocado na rota. Caso nenhum arco possa ser alocado à rota r , ir ao passo 6.

Passo 5: Elimina-se da lista de arcos não alocados aqueles que contêm, na sua posição i , o cliente i recém encadeado e os que contêm, na sua posição j , o cliente j recém encadeado, pois estes arcos não poderão ser encadeados a nenhuma outra rota. Se a lista ficar vazia, ir ao passo 7.

Passo 6: Se $r = T$, então $r = 1$. Senão, $r = r + 1$. Retorna ao passo 4.

Passo 7: Verifica se existem clientes não alocados e insere cada cliente, ordenados pelo seu índice, na última posição na rota que a sua inserção acarretará no menor custo.

A construção da solução inicial baseada nas economias de Clarke & Wright deve-se ao fato que essa heurística mostrou bons resultados em um trabalho anterior de mesmo problema [Cunha et al. 2016].

Com o intuito de buscar melhores soluções para o problema, após a criação da solução inicial, um algoritmo VND foi desenvolvido.

4.2. Algoritmo *Variable Neighborhood Descent*

O procedimento VND busca melhores soluções através de um espaço definido por estruturas de vizinhança. Segundo [Chen et al. 2010], o objetivo de usar multi-estruturas é explorar o espaço de solução mais extensivamente. Quando nenhuma melhoria adicional pode ser obtida, o procedimento para. O processo VND aqui desenvolvido é descrito no Algoritmo 1, onde o *MelhorVizinho*($N_k(x)$) refere-se à busca local na vizinhança da solução x definida pelo movimento k .

Algoritmo 1 – VND. Fonte: Adaptado de [Den Besten e Stutzle 2001].

procedimento VND básico

Inicialização: x = Recebe solução construtiva, Seleciona conjunto de vizinhanças $N_k, k = 1, \dots, k_{m\acute{a}x}$

repita

$k = 1$

repita

$x' = \text{MelhorVizinho}(N_k(x))$

se (x' melhor do que x)

$x = x'$

$k = 1$

senão

$k = k + 1$

até $k = k_{m\acute{a}x}$

até não detectar melhoria

fim



Neste trabalho, a metaheurística VND será aplicada em três estruturas de vizinhanças clássicas dos problemas de roteirização, geradas pelos movimentos *Insert*, *2-opt* e *Interchange*, utilizando o *best improvement* como estratégia para a escolha do próximo vizinho.

A vizinhança *Insert* aplica todas as permutações que podem ser obtidas removendo um elemento (cliente) na i -ésima posição e inserindo-o na j -ésima posição ($i \neq j$), resultando em um tamanho de vizinhança $(n - 1)^2$ [Den Besten e Stutzle 2001].

A fim de minimizar o número de inserções, o *insert* aqui aplicado testa apenas clientes alocados na rota de maior custo com relação à função objetivo, ou seja, apenas os elementos dessa rota podem ser retirados e inseridos em diferentes posições. As posições de inserção podem ser tanto na própria rota de onde o elemento é retirado como em rotas distintas.

A heurística de *2-opt* remove cada par de arestas da solução de uma rota e reconecta os vértices nessa mesma rota. Atualizar a função objetivo é mais complicado para o *2-opt*, uma vez que a parte média da solução é invertida. Essa heurística requer tempo $O(n^2)$ para examinar toda a vizinhança de uma solução [Salehipour et al. 2011].

A vizinhança *Interchange* consiste em realizar todas as permutações que podem ser obtidas ao trocar dois elementos na i -ésima posição pela j -ésima ($i \neq j$), independentemente da sua adjacência. O tamanho dessa vizinhança é dado por $n(n - 1)/2$ [Den Besten e Stutzle 2001].

As vizinhanças *Interchange* e *2-opt* foram aplicadas conforme descritas na literatura, fazendo-se todos os movimentos possíveis.

A ordem das vizinhanças foi definida no algoritmo proposto como sendo *Insert*, *2-opt* e *Interchange*. Ela foi definida empiricamente por meio de testes preliminares com os dados reais, e dentre as possíveis, foi a ordem que produziu melhores resultados. O VND proposto visita as diferentes vizinhanças de maneira sequencial, e quando é identificada uma melhoria em alguma delas, a busca retorna à primeira vizinhança da lista, sendo conhecido como *Basic VND*.

5. Experimentos computacionais

Testes computacionais foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho do VND. Em primeiro lugar, são descritos os parâmetros usados no experimento. Em seguida, é feita a avaliação do mínimo de técnicos necessário para o problema. Logo após, alguns cenários são analisados, e finalmente, os resultados dos testes obtidos são reportados e discussões apresentadas.

Em todas as análises dos experimentos utilizou-se uma diferenciação entre os termos “rota” e “roteiro”, sendo o primeiro deles usado para designar o serviço de um técnico: saída da base, visita aos clientes e retorno a base. Enquanto o segundo termo determina o conjunto de rotas utilizadas para atender a todos os clientes. Quando utiliza-se apenas um técnico, os resultados por rota ou roteiro são os mesmos, dado que o roteiro nesse caso é formado por apenas uma rota.

A metaheurística VND foi codificada em C++ usando o compilador Visual C++ e otimização /Ox. Todos os testes foram realizados em ambiente Windows 7 em uma máquina com processador Intel Core i5-3470 CPU @ 3.2GHz e 8 GB de memória RAM.

5.1. Parametrização

A Função Objetivo (FO) proposta para o tratamento do problema visa minimizar os custos operacionais que a companhia tem com a atividade de medição de consumo do segmento industrial. Dessa forma, três componentes principais devem ser minimizados: custo com técnicos, custo de hora extra na realização das medições e o custo de deslocamento. Foram associados então três fatores (α , β e γ) a cada um dos componentes, hierarquizando cada um deles, como segue:

$$\min \alpha T + \beta \sum_r TE_r + \gamma \sum_r TTD_r$$

Para determinar os ajustes apropriados para os parâmetros, experiências preliminares foram realizadas. Na implementação, foram utilizados $\alpha = 480$, $\beta = 2$ e $\gamma = 0,2$. O parâmetro α indica o custo de um técnico e é multiplicado pelo número de técnicos (T) utilizados em cada teste, sendo definido como 480 considerando-se 1(um) o custo unitário para o minuto trabalhado. Como



o dia trabalhado corresponde a 480 minutos, tal valor se mantém fixo independente do tempo total trabalhado. Em consequência disso, o custo de tempo extra foi definido como o dobro do custo do minuto do técnico ($\beta = 2$), sendo este multiplicado pelo tempo total extra (TE_r) incorrido em todas as rotas r . O último dos fatores (γ) visa minimizar o custo total de deslocamento (TTD_r) de forma que este fator é o de menor impacto no custo total em relação aos demais componentes da FO.

Os valores para os dados de entrada são: Tempo Total (TT) disponível por técnico de 480 minutos; Tempos de Deslocamento (TD_{ij}) entre a base e o cliente e entre um cliente e o outro (onde $i, j \in K$ e $i \neq j$, sendo K o conjunto dos clientes e base); Tempo de atendimento médio para leitura (TAM) de 5 minutos; Máximo permitido de tempo extra (LE) de 120 minutos estipulado em Lei.

5.2. Avaliação do máximo de técnicos necessário

Com o objetivo de limitar a análise para um número fixo de técnicos, foi realizada a avaliação do número máximo de técnicos que a empresa necessitaria caso o pior cenário possível viesse a ocorrer. O pior cenário corresponde àquele em que todas as telemedições falham e todos os 127 clientes necessitam de medição manual.

Assim sendo, o algoritmo VND criado foi testado variando-se o número de técnicos para medição, com cada técnico correspondendo a uma rota de clientes.

Para esse pior cenário, testou-se a utilização de um a quatro técnicos, encontrando o resultado de que quatro leituristas seriam suficientes para atender todos os clientes sem a necessidade de hora extra. Porém, levando em consideração a avaliação com base na FO proposta, em que o custo de um técnico é maior do que o pagamento de hora extra, a utilização de apenas três técnicos seria a melhor opção em termos de custos para a companhia terceirizada.

Os resultados para o pior cenário possível podem ser observados na Tabela 1, que apresenta: na coluna 1 a quantidade de técnicos, o que corresponde ao número total de rotas; na coluna 2 a duração total do roteiro; na coluna 3 o tempo extra necessário para completar as medições no roteiro; na coluna 4 a maior duração encontrada entre as rotas; na coluna 5 o maior tempo extra necessário, dado pela diferença do valor da coluna 4 com o tempo limite de 480 e na coluna 6 a FO, que corresponde ao custo do problema.

Tabela 1 – Resultado para o pior cenário possível, com 127 clientes necessitando de medição manual e com variação da quantidade de leiturista. Fonte: Elaborada pelos autores.

Quantidade de leiturista	Duração Total do roteiro (min)	Tempo Extra necessário no roteiro (min)	Duração máxima por rota (min)	Tempo extra máximo por rota (min)	FO
1	1233,97	753,97	1233,97	753,97	2.234,73
2	1324,25	364,25	662,91	182,91	1.953,35
3	1468,67	28,67	492,46	12,46	1.791,07
4	1580,09	0	406,05	0	2.236,02

Com três funcionários, todos os clientes seriam atendidos com um limite de tempo extra dentro do permitido, utilizando 28,67 minutos extras no roteiro e um tempo máximo de 12,46 minutos em uma das rotas determinadas. A utilização de apenas um ou dois leituristas é inviável para esse cenário por ultrapassar, em uma das rotas, o limite de hora extra de 120 minutos permitido por lei, chegando a 182,91 minutos com dois técnicos e 753,97 com apenas um.

Com base nos resultados dessa avaliação, será utilizado o número máximo de quatro técnicos nos testes considerando a probabilidade de falha da telemedição dos clientes. Este resultado está de acordo com os obtidos por Cunha et al. [2016] que, ao minimizar a quantidade de rotas necessárias para o atendimento deste conjunto de 127 clientes, sem permitir a possibilidade de horas extras, encontrou a necessidade de criar quatro roteiros para atendimento.

5.3. Desenvolvimento dos cenários

Como o presente estudo lida com a probabilidade de falha para cada cliente, é necessário que se encontre a melhor solução possível para a empresa levando em conta essa incerteza. Dito



isso, foram gerados 50 cenários para a realização dos testes com base nas probabilidades de falha da telemedição para cada um dos clientes que possuem o equipamento, adicionados aos clientes que necessitam da leitura manual independentemente do cenário.

Na geração dos cenários foi utilizada, para cada cliente com telemedição, uma probabilidade de falha do equipamento baseada em dados históricos da companhia. De posse desses dados históricos e com o objetivo de determinar se o cliente seria ou não visitado em determinado cenário, gerou-se para cada um deles e em cada cenário um fator aleatório entre 0 e 1. Nos casos em que o fator gerado foi inferior à probabilidade de falha do equipamento, determinou-se que o cliente seria visitado por um técnico, caso contrário a visita não era necessária.

Dentre os 50 cenários, a média de clientes que precisam de medição manual é de 79,32, com desvio-padrão de 5,4 clientes. Além disso, o cenário com menor número de atendimentos é de 63 clientes, e o maior cenário envolveu 91 clientes para medição.

5.4. Resultados dos testes

Após a avaliação do número máximo de técnicos e geração dos cenários, o algoritmo VND testou a melhor configuração de leituristas (1, 2, 3 ou 4) para atender toda a demanda em cada um dos 50 cenários, totalizando assim 200 rodadas de medições.

A Tabela 2 apresenta a síntese dos resultados encontrados nas 200 rodadas de medições para os 50 cenários com os valores avaliados para o conjunto de todas as rotas elaboradas. O objetivo dessa primeira análise é atestar a viabilidade das soluções, para que se verifique se alguma configuração pode ser descartada. Na coluna 1 da tabela são exibidas as configurações definidas, ou seja, a quantidade de leituristas disponibilizados. Nas colunas 2, 3 e 4 são exibidos os resultados da duração média por rota, o desvio padrão dessas durações e a duração máxima encontrada em uma rota. Na coluna 5 é exibido o tempo extra médio dentre todas as rotas para cada configuração e na coluna 6 é indicado o tempo extra máximo nessas rotas.

Tabela 2 – Resumo do resultado das 200 rodadas de medições para os 50 cenários por rota. Fonte: Elaborada pelos autores.

Quantidade de leiturista	Duração média por rota (min)	Desvio padrão da duração por rota (min)	Duração máxima por rota (min)	Tempo extra médio (min)	Tempo extra máximo (min)
1	880,75	50,60	981,42	400,75	501,42
2	492,90	24,72	542,22	17,91	62,22
3	368,60	19,01	413,55	0	0
4	306,02	17,58	343,03	0	0

A Figura 1 exibe os resultados da duração por rota gerados para cada configuração de número de técnicos definida.

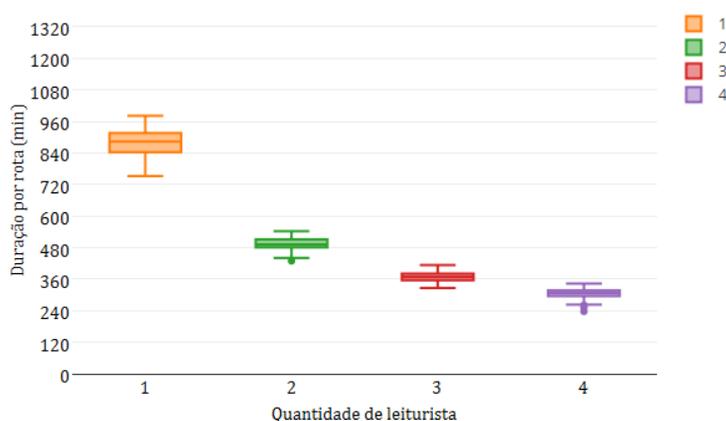


Figura 1 - *Boxplot* da duração por rota em minutos. Fonte: Elaborada pelos autores.



Em uma primeira análise, a opção de utilizar apenas 1 leiturista, ou seja, realizar as medições com apenas uma rota, se mostrou inviável devido ao tempo necessário para tal. O tempo médio para um técnico conseguir atender todos os clientes seria de aproximadamente 881 minutos, o que equivale a 14,7 horas. Além de ser inviável devido ao limite do horário comercial para atendimento ao cliente, esse resultado desrespeita uma lei nacional que limita o tempo extra de serviço em duas horas por dia. A configuração com dois técnicos teve como 62,22 minutos o maior valor para tempo extra dentre todas as rotas, aproximadamente metade do tempo máximo permitido, atestando assim a viabilidade dessa configuração. Pelo gráfico exibido na Figura 1 pode se observar que para as configurações com dois, três e quatro técnicos, nenhum resultado extrapolou o limite por rota de 600 minutos (480 minutos de serviço mais 120 minutos de tempo extra).

Dito isso, a configuração com um técnico foi descartada da análise por roteiros, onde será avaliado o valor obtido com a função objetivo proposta para o problema.

A Tabela 3 apresenta os mesmos resultados dos 50 cenários testados, porém com os valores consolidados por roteiros. A quantidade de leituristas testados estão na coluna 1. A média da duração dos roteiros e o desvio padrão das durações estão na coluna 2 e na coluna 3, respectivamente. A coluna 4 apresenta a média da FO, com o desvio padrão indicado na coluna 5. Na coluna 6 é indicada a quantidade de cenários em que foi necessário uso de tempo extra e na última coluna o tempo extra máximo encontrado.

Tabela 3 – Resumo do resultado das 200 rodadas de medições para os 50 cenários por roteiro. Fonte: Elaborada pelos autores.

Quantidade de leiturista	Duração média dos roteiros (min)	Desvio padrão da duração dos roteiros (min)	Média da FO	Desvio padrão da FO	Quantidade de cenários com tempo extra	Tempo extra máximo (min)
2	985,80	48,65	1.228,81	78,51	38	115,64
3	1105,80	51,99	1.661,16	10,40	0	0
4	1224,08	57,87	2.164,82	11,57	0	0

A Figura 2 exibe os resultados da função objetivo dos roteiros gerados para cada configuração de número de técnicos definida.

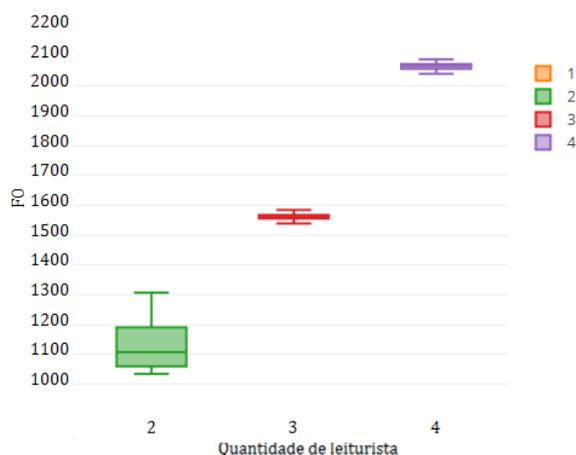


Figura 2 – *Boxplot* dos Custos Totais (FO) para cada quantidade de leiturista. Fonte: Elaborada pelos autores.

Para os testes com quatro técnicos, os resultados se mostraram desfavoráveis tanto na média da FO como também na média de tempo total de deslocamento, visto que como nenhum dos cenários chega próximo ao pior caso, em que todos os 127 clientes necessitam de medição manual, o algoritmo proposto mostrou uma ociosidade da mão de obra disponível. Assim, percebeu-se, através dos testes, que era possível atender todos os 50 cenários com apenas três técnicos, e sem a necessidade de tempo extra. Além do tempo, os custos da configuração com quatro técnicos foram superiores à de três com base na FO.



Seguindo a mesma análise, a configuração com dois técnicos se mostrou ainda melhor do que a configuração com três técnicos, tanto no comparativo entre o tempos totais médios por rota quanto para o valor de custo da FO. Entretanto, quando da utilização de apenas dois leituristas, fez-se necessário a utilização de tempo extra em 38 dos 50 cenários, enquanto que na proposta com três técnicos, em nenhum dos cenários foi necessário tempo excedente. Porém, dentre esses 38 cenários com hora extra para o uso de apenas dois leituristas, em nenhum deles o tempo ultrapassa o permitido por rota, chegando ao valor máximo de 62,22 minutos, conforme indicado anteriormente.

Em suma, os testes mostraram que para o cenário máximo (com 91 clientes para medição) foi possível atender todos os clientes apenas com dois técnicos, atendendo o limite de hora extra permitido por lei, e com tempo total e custos menores. Isso pode ser melhor visualizado na Figura 1 e 2, que apresentam a distribuição das durações por rota e dos valores da FO por roteiro, respectivamente. A configuração com apenas dois técnicos possui a menor FO, como também possui todas as rotas com tempos menores a 600 minutos, o permitido por lei.

5.4.1. Comparativo com a composição atual

Atualmente a companhia conta com quatro técnicos disponíveis para a realização do serviço e define as rotas de forma manual a partir de conhecimento tácito do problema. Os dados das rotas elaboradas manualmente não foram disponibilizados pela companhia, impossibilitando que seja feito um comparativo a partir dos valores obtidos na função objetivo proposta para o estudo. Porém, uma avaliação apenas do custo com mão de obra pode ser feita considerando-se a hipótese de que, independente do cenário que venha a ocorrer, a companhia seja capaz de gerar rotas sem tempo extra a partir da mão de obra disponível atualmente. Sendo assim, o custo com tempo extra seria zero e o custo com os técnicos, estimado a partir dos pesos estipulados para a função objetivo, seria de 1920 (4×480) por mês.

A partir dos resultados obtidos evidenciou-se que a designação de dois técnicos seria o suficiente para lidar com a demanda de medições mensais, contudo, com custos de tempo extra incorridos. Para a solução proposta o custo com técnicos seria de 960 (2×480) com um tempo extra máximo em um roteiro de 115,64 minutos, conforme indicado na Tabela 3, o que resultaria em um custo com tempo extra de 231,28 ($115,64 \times 2$). Indicando uma redução de custo mínima, dada pela diferença entre o custo da configuração atual e da configuração sugerida, de 728,72 (aproximadamente 38%). Essa redução chega a 50% nos cenários que não demandam tempo extra quando utiliza-se dois técnicos.

5.4.2. Análise do tempo computacional

Apesar de focar no âmbito gerencial de planejamento de médio prazo, o estudo só será compatível se a mesma forma de roteamento for utilizada no operacional. Isso significa que, mesmo após saber o número necessário de técnicos a serem designados para o segmento industrial, a gerência também deve utilizar o mesmo algoritmo VND aqui apresentado para gerar os roteiros dos técnicos, visto que a cada dia de medição, um cenário diferente deve ser considerado dado a probabilidade de falha de cada cliente.

A princípio, a avaliação desta falha deve ser feita no fim do expediente do dia anterior ao da medição, em que os roteiros deverão ser gerados. Porém, para casos de falta de algum técnico, esses roteiros devem ser reprogramados o mais rápido possível, o que faz-se necessário que a ferramenta seja capaz de gerar as rotas de forma ágil. Assim sendo, é importante que, para a implementação de um algoritmo no sistema de suporte da empresa, o tempo demandado pelo código seja avaliado.

Com esse intuito, o tempo de execução do algoritmo aqui desenvolvido foi avaliado, e constatou-se: média de 20 segundos; tempo máximo de 50 segundos; e desvio-padrão de 8 segundos. Isto indica excelente tempo de processamento, que não acarretará impacto na operação.



5.5. Comparação dos algoritmos construtivo e VND

Ao comparar o algoritmo construtivo baseado em Clarke & Wright com o algoritmo VND, percebe-se que essa diferença é grande quando se compara a abordagem com dois técnicos, onde o ganho médio de aplicação do VND sobe para cerca de 16% com uma diferença média de 239 minutos, o que evidencia a importância do uso deste algoritmo. Na média geral para todos os cenários gerados, o ganho foi de 7% do custo. O comparativo entre o algoritmo construtivo e o VND pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparativo entre o algoritmo construtivo Clarke & Wright (C&W) e o VND. Fonte: Elaborada pelos autores.

Quantidade de leiturista	Média da FO para C&W	Média da FO para VND	Média de Ganho do VND comparado ao C&W	Desvio padrão de Ganho do VND comparado ao C&W
1	1.652,48	1.457,64	9,91%	21,48%
2	1.467,46	1.228,81	15,89%	4,75%
3	1.689,68	1.661,16	1,69%	0,49%
4	2.198,27	2.164,82	1,52%	0,31%
Total Geral	1.751,98	1.628,11	7,25%	12,48%

Para as configurações com três e quatro técnicos o ganho não parece relevante quando observa-se o valor da FO por não ser necessário o uso de tempo extra em nenhuma das rotas. Isso ocorre pois o custo com técnicos é fixo e não pode ser reduzido independente do método aplicado e também devido ao menor impacto que o custo de deslocamento acarreta no valor da FO.

6. Conclusão

Este trabalho abordou um VRP em uma empresa responsável por realizar a medição de consumo em clientes de uma companhia fornecedora de energia, e com o intuito de minimizar os custos com mão de obra e deslocamentos necessários para a realização do serviço, aplicou um método metaheurístico VND. O algoritmo VND se baseou em três estruturas de vizinhanças clássicas dos problemas VRP geradas pelos movimentos *Insert*, *2-opt* e *Interchange*, e tem uma estrutura bastante simples e que gera roteiros de forma rápida, em apenas alguns segundos. Os testes computacionais para a empresa terceirizada de medição de energia gerou um conjunto de rotas otimizadas reduzindo custos com deslocamento e mão-de-obra, e seus resultados vão servir como apoio a decisão gerencial da empresa. Além disso, foi comprovado que o VND aqui proposto é eficiente e retorna resultados melhores do que um algoritmo construtivo, com ganhos de até 16% na diminuição dos custos. Uma vez que as estratégias propostas são independentes do problema, é flexível que ela possa ser aplicada para resolver outros problemas de otimização combinatória.

No comparativo com a configuração atual utilizada pela companhia, atestou-se que o serviço pode ser realizado com uma redução pela metade no número de técnicos, diminuindo os custos com mão de obra em pelo menos 38%, podendo chegar a 50%.

Para trabalhos futuros, outras metaheurísticas de busca local podem ser desenvolvidas, como também outras estruturas de vizinhança podem ser adicionadas, com o objetivo de comparar seus resultados com o VND aqui desenvolvido.

Referências

Ballou, R. H. (2006). Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/logística Empresarial. Bookman, Porto Alegre.

Barbarosoglu, G. e Ozgur, D. (1999). A Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, 26(3):255-270.

Chen, P., Huang, H. K. e Dong, X. Y. (2010). Iterated variable neighborhood descent algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 37(2):1620-1627.



- Clarke, G. U. e Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations research*, 12(4):568-581.
- Cordeau, J. F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J. Y. e Semet, F. (2002). A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 53:512–522.
- Cunha, V. A. M. C., Dantas, L. F., Repolho, H. M. V., Pessoa, L. S. (2016) Solução heurística para o problema de dimensionamento de mão de obra e roteirização através de um algoritmo Clarke e Wright. In *Anais do XXX ANPET*, Rio de Janeiro.
- Den Besten, M. e Stützle, T. (2001). Neighborhoods revisited: An experimental investigation into the effectiveness of variable neighborhood descent for scheduling. In *MIC'2001—4th Metaheuristics International Conference*.
- Duarte, A., Mladenovic, C.N., Sánchez-Oro, J. e Todosijevec, R. (2016). Variable Neighborhood Descent. In: *Handbook of Heuristics*, p. 1-27, Springer International Publishing.
- Gendreau, M. e Potvin, J. Y. (2010). *Handbook of metaheuristics*. Springer, Nova York.
- Golden, B. L., Raghavan, S. e Wasil, E. A. (2008). *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges*. Springer Science & Business Media.
- Hansen, P. e Mladenovic, N. (1999) An Introduction to variable neighborhood search. In *Metaheuristics: Advances and trends in local search paradigms for optimization*, S. Voss, Martello, I. H. Osman, and C. Roucairol, editors. Dordrecht.
- Hansen, P. e Mladenović, N. (2014). Variable neighborhood search. In *Search methodologies*, p.313-337. Springer, US.
- Laporte, G. (1992). The vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3):345-358.
- Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4):408-416.
- Mjirda, A., Todosijevec, R., Hanafi, S., Hansen, P. e Mladenovic, N. (2016). Sequential variable neighborhood descent variants: an empirical study on the traveling salesman problem. *International Transactions in Operational Research*, 00:1-19.
- Mladenovic, N e Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research*, 24(11):1097-1100.
- Montero, A., Miranda-Bront, J. J. e Méndez-Díaz, I. (2015). An ILP-based local search procedure for the VRP with pickups and deliveries.
- Ribeiro, C.C. e Souza, M.C. (2002). Variable neighborhood search for the degree-constrained minimum spanning tree problem. *Discrete Applied Mathematics*, 118(1):43–54.
- Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*. John Wiley & Sons, Nova York.
- Salehipour, A., Sörensen, K., Goos, P. e Bräysy, O. (2011). Efficient GRASP+ VND and GRASP+ VNS metaheuristics for the traveling repairman problem. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 9(2):189-209.