

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ADMINISTRATIVAS**

JEFERSON MACHADO SANTOS

**DEFINIÇÃO DE UM MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS
PARA A EMPRESA FITOLOG**

Porto Alegre

2012

JEFERSON MACHADO SANTOS

**DEFINIÇÃO DE UM MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS
PARA A EMPRESA FITOLOG**

**Trabalho de conclusão do curso de
graduação apresentado ao Departamento
de Ciências Administrativas da
Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Administração**

Orientador: Prof. Denis Borenstein

Porto Alegre

2012

Jeferson Machado Santos

**DEFINIÇÃO DE UM MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS
PARA A EMPRESA FITOLOG**

**Trabalho de conclusão do curso de
graduação apresentado ao Departamento
de Ciências Administrativas da
Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Administração**

Conceito Final:

Aprovado em de de

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. – UFRGS

Prof. Dr. – UFRGS

Orientador – Prof. Dr. Denis Borenstein – UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares e amigos que me acompanharam durante todo o período de graduação, dando o suporte necessário e motivação para seguir em frente em todos os momentos.

Agradeço a todos os colegas com quem tive contato em minhas experiências profissionais até o momento por contribuírem e complementarem minha formação acadêmica e profissional.

Agradeço a todos os professores com quem tive oportunidade de aprender durante este período de graduação e que com certeza deram uma grande contribuição para os desafios que serão enfrentados nas próximas etapas.

RESUMO

O transporte possui um alto impacto no desenvolvimento de uma nação e na capacidade competitiva das empresas. Além disso, a maior parte dos custos logísticos das empresas se refere aos transportes e às decisões quanto à roteirização de veículos possuem um alto impacto sobre esse custo e sobre o nível de serviço oferecido pela empresa. Dessa forma, a partir de uma análise da operação da Fitolog foi possível identificar as principais variáveis relevantes no que diz respeito às suas operações de transporte e definir um modelo de roteirização de veículos para a mesma a partir do problema de roteirização de veículos com janelas de tempo. Após a definição do modelo, foi identificado o melhor método de solução do modelo, através da comparação dos resultados das heurísticas de Clark e Wright e de Mole e Jameson.

Palavras – chave: Transporte. Programação linear. Problema de roteirização de veículos. Problema de roteirização de veículos com janelas de tempo

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de janela de tempo de um cliente.....	23
Figura 2 – O procedimento de economia.....	24
Figura 3 – Exemplo de aplicação da heurística de Clark e Wright.....	25
Figura 4 – Lista de economias	25
Figura 5 – Lista de proximidades da rota 0-5-0.....	28
Figura 6 – Lista de proximidades da rota 0-3-0.....	29
Figura 7 – Lista de economias da rota 0-4-3-0	29
Figura 8 – Exemplo de aplicação da heurística Mole e Jameson	30
Figura 9 – Lista de fatores relevantes para o modelo de roteirização da Fitolog	32
Figura 10 – Primeira parte do algoritmo da heurística de Clark e Wright	36
Figura 11 – Segunda parte do algoritmo da heurística de Clark e Wright	37
Figura 12 – Primeira parte do algoritmo da heurística de Mole e Jameson.....	38
Figura 13 – Segunda parte do algoritmo da heurística de Mole e Jameson.....	39
Figura 14 – Ferramenta de roteirização (inserção de dados).....	40
Figura 15 – Ferramenta de roteirização (parametrizações)	40
Figura 16 – Ferramenta de roteirização (resultados)	41
Figura 17 – Visão geral dos testes comparativos.....	42
Figura 18 – Análise dos testes comparativos (quantidade de rotas)	43
Figura 19 – Análise dos testes comparativos (pontos não roteirizados).....	44
Figura 20 – Análise dos testes comparativos (custo total)	45
Figura 21 – Análise dos testes comparativos (custo total e pontos não roteirizados)	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GCS	Gestão da Cadeia de Suprimentos
PPL	Problema de Programação Linear
PPLI	Problema de Programação Linear Inteira
PRV	Problema de Roteirização de Veículos
PRVJT	Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_k = capacidade do veículo k

q_i = demanda do cliente i

d_{ij} = distância entre o cliente i e o cliente j

c_{ij} = custo da viagem do cliente i ao cliente j

t_{ij} = tempo de viagem do cliente i ao cliente j

s_i = duração do serviço no cliente i

e_i = momento mais cedo em que é permitido o início do serviço no cliente i

u_i = momento mais tarde em que é permitido o início do serviço no cliente i

n = número de clientes de um problema, o índice 0 indica o depósito

m = número de veículos de um problema

C = custo total da rota

E_{ij} = economia obtida ao unir os clientes i e j em uma mesma rota

T_{ij} = tempo entre o término do serviço no cliente i e início no cliente j

v_{ij} = tempo faltante até o último momento possível para iniciar o serviço no cliente j

$e(i, l, j)$ = distância entre o ponto l e a rota formada pelos pontos i e j

$\sigma(i, l, j)$ = economia obtida ao inserir o ponto l entre os pontos i e j

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
1. ORGANIZAÇÃO E AMBIENTE	11
2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	13
3. JUSTIFICATIVA	15
4. OBJETIVOS	16
4.1. OBJETIVO GERAL	16
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
5.1. PROGRAMAÇÃO LINEAR	17
5.2. PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA.....	19
5.3. PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	20
5.4. PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM JANELAS DE TEMPO	21
5.5. ABORDAGENS DE SOLUÇÃO	23
5.5.1. Algoritmo de Clark e Wright	24
5.5.2. Heurística do vizinho mais próximo orientada ao tempo.....	26
5.5.3. Heurística de Mole e Jameson.....	27
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	31
6.1. IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS RELEVANTES	31
6.2. FORMULAÇÃO DA FUNÇÃO-OBJETIVO E DAS RESTRIÇÕES.....	32
6.3. ESCOLHA DO MÉTODO MATEMÁTICO DE SOLUÇÃO	35
7. RESULTADOS DO ESTUDO	36
7.1. PROGRAMAÇÃO COMPUTACIONAL	36
7.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS HEURÍSTICAS.....	41
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS	50

INTRODUÇÃO

O transporte é a forma que permite às empresas que seus produtos e serviços cheguem até os canais em que estarão disponíveis para seus clientes. Como contribuição para o desenvolvimento da nação, o sistema de transportes permite uma maior concorrência entre as empresas e uma redução nos preços dos produtos (BALLOU, 2006). Além disso, os custos de transporte representam, em média, 60% dos custos logísticos de uma empresa (BOWERSOX; COOPER; CLOSS, 2006). Esse impacto dos transportes numa empresa é representado principalmente pelas decisões sobre o roteamento de veículos da mesma, uma vez que tais decisões podem trazer economias tanto em termos de custo quanto de tempo de transporte. Em qualquer ramo em que a atividade de transporte estiver presente, a roteirização de veículos pode trazer uma melhoria no sistema de distribuição de produtos e serviços e um aumento na satisfação dos clientes.

Atualmente, a empresa Fitolog, que atua no ramo de tratamento fitossanitário de embalagens para exportação, não possui um modelo definido para roteirização dos veículos que realizam seus serviços. Dessa forma, este trabalho realiza uma análise do ambiente da empresa Fitolog no que tange ao tema de transporte e define um modelo de roteirização de veículos adequado para esta realidade. Além disso, também é desenvolvida uma ferramenta que permite a implementação deste modelo.

O trabalho se divide em oito capítulos. O primeiro capítulo é dedicado à apresentação da empresa e do estágio em se encontra quanto à roteirização de veículos. Os capítulos 2, 3 e 4 são dedicados à contextualização do problema em estudo e definição dos objetivos deste trabalho. O capítulo 5 tem o objetivo de apresentar alguns conceitos teóricos sobre programação linear, problema de roteirização de veículos e problema de roteirização de veículos com janelas de tempo, que permitiram a construção do modelo de roteirização adequado à realidade da Fitolog. Nos capítulos 6 e 7 são apresentados os procedimentos realizados para definição do modelo de roteirização, bem como a ferramenta desenvolvida e as análises realizadas para que se atingisse o

objetivo do trabalho. Por fim, as conclusões do trabalho são expostas no capítulo 8.

1. ORGANIZAÇÃO E AMBIENTE

A Fitolog atua no ramo de controle de pragas e tem como sua atividade principal o tratamento fitossanitário de embalagens de madeira para exportação. Fundada em 2008, está situada em Porto Alegre e atua na região metropolitana desta cidade e em alguns outros municípios do Rio Grande do Sul.

Atualmente, a empresa conta com 14 colaboradores. Atuando na divisão fitossanitária, há 3 operadores que realizam os tratamentos fitossanitários com as unidades móveis. Os demais colaboradores estão distribuídos nas áreas administrativas e de *backoffice* e nas outras divisões da empresa. Além disso, a empresa possui três veículos equipados com a estrutura necessária para realizar os tratamentos fitossanitários.

Quanto à participação de mercado, conforme dados de 2011 da própria empresa, a Fitolog possui cerca de 40% do *Market share* em termo do número de clientes. Atualmente, a divisão de tratamentos fitossanitários possui cerca de 75 clientes ativos.

O tratamento fitossanitário em embalagens de madeira é uma exigência legal para o exportador. Assim, todo *pallet* ou caixa de madeira a ser exportado deve passar pelo tratamento através da modalidade de Brometo de Metila ou Tratamento Térmico. O tratamento através do agrotóxico Brometo de Metila apresenta restrições ambientais e riscos à saúde, devido ao nível de toxicidade do gás. No Brasil, a utilização do Brometo de Metila nos tratamentos fitossanitários será proibida após o ano de 2015. Além disso, em diversos países as embalagens tratadas com Brometo de Metila são mal vistas e alguns importadores já estabeleceram restrições a elas. O Tratamento Térmico não utiliza produtos tóxicos e é menos nocivo ao meio ambiente. Este procedimento é realizado através da elevação da temperatura da madeira até um determinado nível e manutenção da mesma por 30 minutos. A dificuldade original deste tipo de tratamento é sua imobilidade, uma vez que as estufas utilizadas normalmente são grandes e estáticas. Identificando uma oportunidade neste segmento, a empresa em estudo desenvolveu o Processo de Câmara Portátil, permitindo que unidades móveis se dirijam até o local em

que as embalagens do cliente se encontram, reduzindo custos de deslocamento das embalagens até uma estrutura fixa e reduzindo tempo de operação.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O transporte possui um alto impacto no desempenho logístico de uma empresa e também de uma nação. A evolução do sistema de transporte permite a uma economia passar de uma estrutura de produção e consumo em áreas geograficamente próximas, para uma estrutura com concentração populacional nos grandes centros, limitando a produção local a menos produtos e melhorando o padrão de vida do cidadão (BALLOU, 2006). Conforme Ballou (2006), um sistema de transporte contribui para intensificar a competitividade, aumentar as economias de escala e reduzir os preços dos produtos. Além disso, os transportes possuem um alto impacto nos custos de uma empresa. Segundo Bowersox, Cooper e Closs (2006), os custos referentes a transporte representam cerca de 60% dos custos logísticos de uma empresa.

Nos últimos tempos, uma série de fatores vem se somando a estas questões que já atribuem uma grande importância às decisões a respeito dos transportes. A concentração populacional nos grandes centros vem exigindo o atendimento de um número cada vez maior de pontos de demanda e as agências reguladoras tem colocado um número cada vez maior de restrições quanto à circulação de alguns tipos de veículos em determinados horários e locais. Além disso, com o aumento do nível de concorrência entre as empresas e com a disseminação dos conceitos de Gestão da Cadeia de Suprimentos (GCS), os clientes exigem um nível de serviço cada vez melhor de seus fornecedores. Dessa forma, a fim de melhorar o desempenho da distribuição de seus produtos, as empresas estão passando a utilizar modelos e sistemas de roteirização e programação de veículos.

A roteirização de veículos busca determinar roteiros de entregas a serem realizados pelos veículos, buscando gerar o menor custo possível e atender ao nível de serviço esperado pelos clientes (GALHARDI, 2006). Esses modelos têm o objetivo de simular situações que ocorrem no cotidiano, envolvendo diversas possibilidades de rotas, diferentes modelos de veículos, etc. Os modelos de roteirização podem ser de rota fixa – quando se deseja apenas distribuir cargas por rotas previamente determinadas – ou de rotas dinâmicas, quando é sugerida a melhor rota analisando uma série de fatores,

como tipo da carga a ser distribuída, capacidades dos veículos e locais de entrega (GHISI et al., 2004). Assim, vemos que os roteirizadores são poderosas ferramentas no auxílio à gestão dos transportes, permitindo que se reduza um dos principais componentes de custo das empresas sem perder o foco no nível de serviço exigido pelos clientes. Dessa forma, a roteirização vem cada vez mais despertando um interesse nas empresas que tem na distribuição uma parte importante do seu processo de negócio e uma séria de empresas de tecnologia da informação vem criando *softwares* roteirizadores que buscam a otimização dos recursos considerando diversas restrições, “com maior confiabilidade, velocidade e flexibilidade, eficiência e pontualidade na distribuição” (GALHARDI, 2006).

Atualmente, a Fitolog não possui nenhum modelo de roteirização para suportar a distribuição de suas unidades móveis para atendimento dos clientes. A determinação de quais clientes cada veículo atenderá e quais rotas estes devem seguir é feita empiricamente pelos funcionários do *BackOffice* da organização. Além disso, o atual cenário do mercado de tratamento fitossanitário de embalagens para exportação e o desempenho da organização vêm sinalizando que haverá um crescimento da demanda pelo serviço e que a empresa precisará expandir sua estrutura para atender esta demanda.

Dessa forma, a Fitolog expôs uma necessidade de possuir uma ferramenta de suporte para a roteirização de seus veículos. Essa ferramenta de gestão auxiliará nas operações atuais da empresa e também dará um suporte para um crescimento futuro. Assim, este trabalho se propõe a construir um modelo de roteirização para a organização descrita e definir a melhor forma de solucioná-lo.

3. JUSTIFICATIVA

Através desse estudo, espera-se identificar as variáveis impactantes nas decisões quanto à roteirização dos veículos da Fitolog e determinar um modelo de roteirização de acordo com sua realidade. Esse modelo auxiliará na tomada de decisão quanto às rotas a serem realizadas pelos veículos para atender às demandas diárias.

O modelo definido para a empresa poderá ser implementado através de ferramentas computacionais. Os colaboradores que hoje tomam as decisões das rotas a serem seguidas pelos veículos sem apoio metodológico poderão inserir os dados do negócio, como capacidade dos veículos e pontos de demanda, nessa ferramenta. Com esses dados, o modelo poderá ser executado e sugerir rotas a serem seguidas que minimizem os custos da operação e atendam à demanda dos clientes. Como a tendência do mercado e dos resultados da empresa indica um crescimento, esse modelo trará cada vez mais benefícios para a Fitolog à medida que seus negócios se expandirem.

4. OBJETIVOS

A partir da problemática apresentada, foram definidos os seguintes objetivos para o trabalho:

4.1.OBJETIVO GERAL

Determinar um modelo de roteirização de veículos para a empresa Fitolog, bem como a melhor maneira de solucioná-lo.

4.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a realidade operacional da empresa quanto à roteirização de veículos;
- Identificar as variáveis envolvidas na roteirização dos veículos da empresa;
- Determinar a função objetivo e as restrições do modelo de roteirização;
- Identificar as possíveis abordagens de solução para o modelo construído;
- Determinar a melhor abordagem de solução.

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta etapa, busca-se formar uma base conceitual que suporte a definição de um modelo de roteirização de veículos para a empresa Fitolog. Para isso, foram utilizados materiais científicos confiáveis para a fundamentação teórica.

Serão abordados conceitos a respeito de programação linear e programação linear inteira para embasar a solução de problemas que envolvem a alocação de recursos escassos. Após, serão abordados os problemas de roteirização de veículos e problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo, a fim de focar no problema deste estudo. Por fim, serão levantadas abordagens de solução para estes dois últimos problemas.

5.1. PROGRAMAÇÃO LINEAR

O Problema de Programação Linear (PPL) busca encontrar a melhor distribuição possível de recursos escassos entre as diversas tarefas que devem ser realizadas em uma determinada situação, “de forma a atingir um valor ótimo do objetivo estabelecido” (ANDRADE, 2009, p. 26). Além disso, esse tipo de problema pode ser representado por um modelo de otimização em que todas as relações matemáticas são lineares (ANDRADE, 2009). Um modelo de otimização é um modelo matemático construído para encontrar uma solução única, que será considerada ótima. Esses modelos são utilizados em situações em que as variáveis podem assumir diversos valores (ANDRADE, 2009). Segundo Andrade (2009), os modelos de otimização são diferentes dos modelos de simulação pelo fato de buscarem uma única solução, enquanto estes se focam na geração e análise de alternativas. Segundo Goldbarg e Luna (2005), é possível formular de uma forma geral o PPL como se segue:

Otimizar

$$z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = p + 1, p + 2, \dots, m \quad (3)$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, q \quad (4)$$

$$x_j \in R, j = q + 1, q + 2, \dots, n \quad (5)$$

Em que:

$M = \{1, 2, \dots, m\}$, o conjunto dos índices das restrições do problema;

$N = \{1, 2, \dots, n\}$, o conjunto dos índices das variáveis;

$A = \{a_{ij}\} \equiv$ matriz de restrições

$x = (x_j), j \in N$ /vetor coluna de n componentes

$c = (c_j), j \in N$ /vetor linha de n componentes

$d = (d_i), i \in M$ /vetor coluna de m componentes

O termo *otimizar* se refere à possibilidade de maximizar ou minimizar a função objetivo (GOLDBARG; LUNA, 2005). Assim, “o problema consiste em, dados a matriz A e os vetores b e c , achar o vetor de variáveis contínuas x que satisfaça o conjunto de restrições e que otimize o valor do critério z ” (GOLDBARG; LUNA, 2005, p.26).

Segundo Goldbarg e Luna (2005), as duas principais dificuldades para encontrar a melhor solução possível são como obter soluções viáveis básicas e como evitar o teste de todas as soluções viáveis básicas possíveis. Assim, o algoritmo Simplex se apresenta como uma forma de solução que supera essas dificuldades e pode ser adaptável ao cálculo computacional (GOLDBARG; LUNA, 2005). De forma geral, este algoritmo parte de uma solução viável do sistema de equações que constitui o PPL e, a partir desta solução inicial, identifica novas soluções melhores ou iguais que a atual (GOLDBARG; LUNA, 2005).

5.2. PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA

O Problema de Programação Linear Inteira (PPLI) diferencia-se do PPL pelo fato de que “uma ou mais variáveis de decisão são representadas apenas por valores inteiros” (LACHTERMACHER, 2009). Um exemplo de problema que requer programação inteira é o caso de uma companhia que precisa determinar o número ótimo de trabalhadores a serem alocados em cada turno (RAGSDALE, 2009). O Problema da Mochila representa de forma genérica o PPLI, uma vez que possui um estreito relacionamento com diversos outros modelos de programação (GOLDBARG; LUNA, 2005). Basicamente, o problema trata do desafio de encher uma mochila com diversos itens sem ultrapassar seu limite de peso, otimizando o valor total dos itens transportados (GOLDBARG; LUNA, 2005). Segundo Goldberg e Luna (2005), o Problema da Mochila pode ser formulado da seguinte forma:

Maximizar

$$z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (6)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n w_j x_j \leq b \quad (7)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, n \quad (8)$$

Em que x_j é representado na restrição (8) como uma variável binária que indica se o item j foi colocado na mochila caso seu valor for igual a um; seu valor será zero caso contrário. O valor de cada item j é representado por c_j . O peso de cada item j é representado por w_j . A restrição (7) indica que a soma do peso de todos os itens colocados na mochila não pode ser superior à capacidade total da mochila, representada por b .

Conforme Goldberg e Luna (2005) existem inúmeras soluções para o PPLI, as quais podem ser classificadas como técnicas de enumeração, de cortes e híbridas. Uma técnica de enumeração muito utilizada para solucionar os PPLI é o algoritmo *Branch-and-Bound*, em que são efetuadas partições no espaço das soluções, criando novos e restritos problemas, mais fáceis de

solucionar, para que então seja realizado o teste de otimalidade entre as soluções encontradas nos problemas restritos (GOLDBARG; LUNA, 2005).

5.3. PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

O Problema de Roteirização de Veículos (PRV) é comumente descrito como um problema em que veículos localizados em um depósito central devem visitar clientes geograficamente dispersos a fim de atender suas demandas (MARINAKIS; MIGDALAS, 2007). Conforme Marinakis e Migdalas (2007), o PRV foi inicialmente introduzido por Dantzig e Ramser (1959), com o nome de Problema de Despacho de Caminhões. O Problema de Despacho de Caminhões é caracterizado pelo fato de que a capacidade Q de cada veículo é inferior à soma das quantidades demandadas em cada ponto de entrega q_i (DANTZIG; RAMSER, 1959). Logo, esse problema é caracterizado pela relação:

$$Q \ll \sum_i q_i. \quad (9)$$

O objetivo deste problema é identificar quais rotas entre os pontos de demanda a serem atendidos minimizam a distância total a ser percorrida pelos veículos, sendo que a formulação geral proposta por Dantzig e Ramser (1959) é:

Minimizar

$$\sum_{i,j=0}^n d_{ij}x_{ij} \quad (10)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n q_j x_{ij} \leq C \quad (11)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

em que x_{ij} é definido na equação (13) como uma variável binária que indica que o cliente j é atendido após o cliente i , ou seja, que a rota i,j é utilizada,

caso seu valor seja um. Caso esta rota não seja utilizada, seu valor será zero. A restrição (11) indica que o total da demanda q_j de todos os pontos j atendidos não pode ser superior à capacidade do veículo, representada por C .

5.4.PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM JANELAS DE TEMPO

O Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo (PRVJT) determina que os clientes devem ser atendidos dentro de uma determinada janela de tempo, ou seja, dentro de um específico intervalo de tempo (MARINAKIS; MIGDALAS, 2007). Fischer, Jörsten e Madsen (1997) propuseram um modelo que busca atender às demandas dos clientes com os veículos disponíveis em um menor custo possível, sujeito ao fato de que o momento para iniciar o serviço em um cliente deve estar dentro de um determinado intervalo de tempo, a janela de tempo. Caso o veículo chegue muito cedo ao cliente, ele deverá esperar até que a janela esteja aberta. Segue o modelo proposto por Fischer, Jörsten e Madsen (1997):

Minimizar

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk} \quad (14)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_{irk} - \sum_{j=1}^n x_{rjk} = 0, \quad \forall r \in N, \forall k \in M \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{iok} = \sum_{j=1}^n x_{ojk} = 1, \quad \forall k \in M, \quad (16)$$

$$t_i + s_i + t_{ij} - (1 - x_{ijk})T \leq t_j, \quad \forall i, j \in N, \forall k \in M, \quad (17)$$

$$t_{0ek} + t_{0j} - (1 - x_{ojk})T \leq t_j \quad \forall j \in N, \forall k \in M, \quad (18)$$

$$t_i + s_i + t_{i0} - (1 - x_{i0k})T \leq t_{0uk} \quad \forall i \in N, \forall k \in M, \quad (19)$$

$$e_i \leq t_i \leq u_i \quad \forall i \in N, \quad (20)$$

$$e_0 \leq t_{0ek} \quad \forall k \in M, \quad (21)$$

$$t_{0uk} \leq u_0 \quad \forall k \in M, \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_i x_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k \in M, \quad (23)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in N_0, \quad (24)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N_0, \forall k \in M, \quad (25)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N, \quad (26)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_0, \forall k \in M, \quad (27)$$

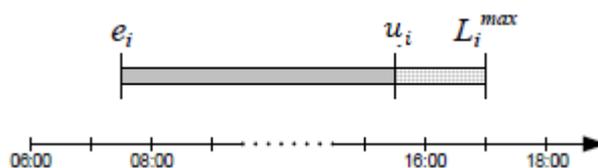
$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = y_{ik} \quad \forall i \in N_0, \forall k \in M. \quad (28)$$

em que x_{ijk} é definido na equação (25) como uma variável binária que indica que o cliente j é atendido após o cliente i pelo veículo k , caso seu valor seja um; caso seu valor seja zero, o veículo k não atenderá o cliente j após o cliente i . y_{ik} é definido na equação (27) como uma variável binária que indica que o cliente i é atendido pelo veículo k , caso seu valor seja um; caso seu valor seja zero, o cliente i não será atendido pelo veículo k . O momento para iniciar o serviço no cliente i é representado pela variável t_i . O momento de partida do veículo k do depósito é determinado pela variável t_{0ek} , enquanto o momento do retorno do veículo k ao depósito é determinado pela variável t_{0uk} . A restrição (15) garante que cada veículo k que visitar um ponto deixará aquele ponto em seguida. A restrição (16) garante que cada rota se origina e termina no depósito. As restrições (17), (18) e (19) garantem a compatibilidade dos horários de chegada e execução do serviço nos diversos clientes. A restrição (20) garante que o momento da chegada e início do serviço em um cliente está de acordo com a respectiva janela de tempo. As restrições (21) e (22) garantem que os horários de saída e chegada dos veículos no depósito respeitam a janela de tempo do depósito. A restrição (23) garante que a demanda de cada rota está de acordo com a capacidade máxima do veículo que a atende. As restrições (26) e (28) garantem que cada cliente é visitado apenas uma vez e que cada veículo deixa um cliente apenas uma vez, respectivamente.

O modelo para o PRVJT apresentado é um caso em que a janela de tempo é rígida. Segundo Koskosidis (*apud* Joubert, 2007, p.17), quando nenhuma entrega é permitida fora dos parâmetros definidos para a janela, dizemos que a janela de tempo é rígida. Caso sejam permitidas entregas fora dos parâmetros definidos para a janela no cliente i , dizemos que a janela de tempo é flexível e o atraso no cliente i será penalizado a um custo α_i . Além disso, o cliente i poderá determinar um atraso máximo permitido denotado por L_i^{max} (Joubert, 2007). A figura 1 ilustra um caso de um cliente i que determina

uma janela de tempo para ser atendido das 07h30min às 15h30min. No entanto, ele permite entregas atrasadas até às 17h:

Figura 1 – Exemplo de janela de tempo de um cliente



Fonte: Joubert (2007, p. 17)

Conforme Joubert (2007), o atraso no cliente i , denotado por L_i , pode ser calculado através da expressão:

$$L_i = \max\{0, t_i - u_i\} | t_i \leq L_i^{max} \quad (29)$$

em que t_i é horário de chegada ao cliente i . A expressão denota que o atraso L_i é calculado pela diferença entre o horário de chegada ao cliente i , t_i , e entre o horário final da janela de tempo no cliente i , u_i , desde que esta diferença seja maior que zero e que o horário de chegada t_i seja menor ou igual que o horário máximo de entregas atrasadas determinado pelo cliente i , L_i^{max} . Assim, o atraso é penalizado através da introdução de um termo de penalidade à função objetivo (14) (Joubert, 2007), resultando na equação (30).

Minimizar

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk} + \sum_{i=1}^n \alpha_i L_i \quad (30)$$

em que o atraso L_i é determinado pela equação (29).

5.5. ABORDAGENS DE SOLUÇÃO

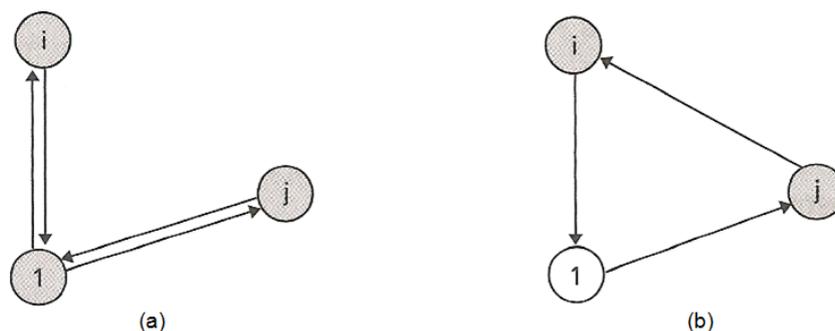
Nesta etapa serão apresentadas uma série de heurísticas que podem ser utilizadas para solucionar os PRV. As heurísticas foram selecionadas conforme sua adaptação às variações do PRV apresentadas nas etapas anteriores.

5.5.1. Algoritmo de Clark e Wright

O algoritmo de Clark e Wright foi um dos primeiros propostos para solucionar problemas do tipo do PRV, servindo de base para outros algoritmos mais sofisticados (HEINEN, 2005). Este algoritmo é caracterizado como um procedimento de economia e inserção, em que arcos entre os pontos de demanda de menor custo devem substituir os arcos com maior custo, melhorando a rota em termos de custo (GOLDBARG; LUNA, 2005).

O conceito básico deste algoritmo é obter as economias transformando duas rotas em uma só, conforme exemplificado na figura 2 (GOLDBARG; LUNA, 2005). Na figura 2, é apresentado um grafo com três nodos, em que o nodo 1 representa o depósito, e os nós i e j representam os clientes a serem atendidos.

Figura 2 – O procedimento de economia



Fonte: Goldberg e Luna (2005, p. 400)

Assim, o custo total da figura 2 (a) é dado por:

$$C = 2c_{1i} + 2c_{1j} \quad (31)$$

O custo total da figura 2 (b) é dado por:

$$C = c_{ii} + c_{1j} + c_{j1} \quad (32)$$

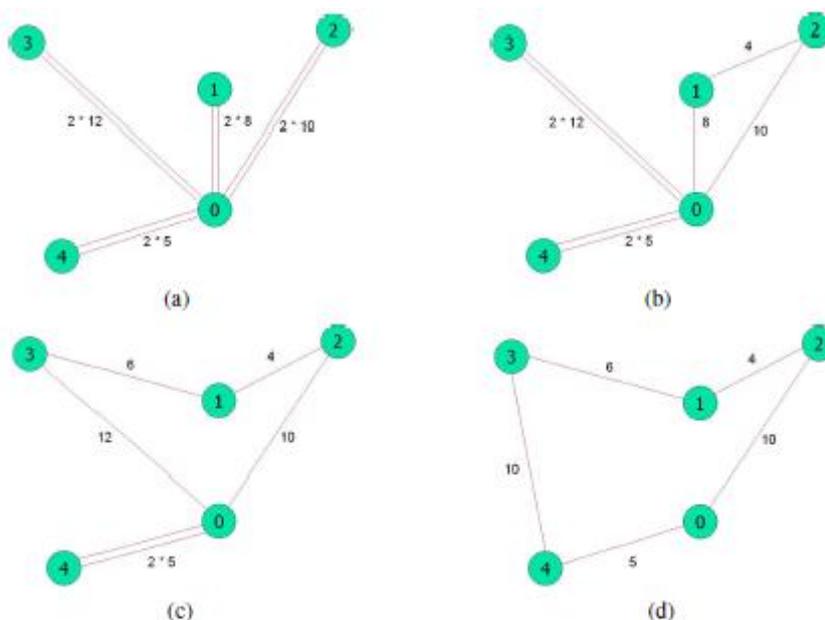
Combinando as duas rotas obtém-se a seguinte economia E_{ij} :

$$E_{ij} = E_{ji} = c_{i1} + c_{1j} - c_{ji} \quad (33)$$

Quanto maior for o valor da economia E_{ij} , mais atrativo será visitar os pontos i e j em uma mesma rota (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Esse conceito das economias é expandido para um problema com diversos pontos de demanda a partir de um grafo representando os clientes e o depósito central, os possíveis caminhos e suas distâncias (HEINEN, 2005). Após, deve-se criar $n - 1$ rotas iniciais entre o depósito e cada cliente, em que n é quantidade de nodos do grafo, conforme mostra a figura 3 (HEINEN, 2005):

Figura 3 – Exemplo de aplicação da heurística de Clark e Wright



Fonte: Heinen (2005, p. 4)

Em seguida, deve-se calcular as economias conforme a equação (33) para cada possível par de 2 nodos e ordená-las de forma decrescente (HEINEN, 2005). Para o problema utilizado como exemplo, as economias foram calculadas e ordenadas como mostra a figura 4:

Figura 4 – Lista de economias

i	j	$c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$	E_{ij}
1	2	$8 + 10 - 4$	14
1	3	$12 + 8 - 6$	14
2	3	$10 + 12 - 9$	13
3	4	$12 + 5 - 10$	7
1	4	$8 + 5 - 10$	3

Fonte: Heinen (2005, p. 3)

Para cada linha desta tabela, deve-se verificar se é possível unir as rotas que possuem os nodos i e j em uma mesma rota (HEINEN, 2005). Essas rotas poderão ser combinadas caso ambos os nodos estejam no extremo de rotas diferentes (HEINEN, 2005). A medida que as rotas são unidas, deve-se realizar os testes das restrições de capacidade dos veículos e de janelas de tempo (GOLDBARG; LUNA, 2005). No problema utilizado como exemplo, nota-se a partir da figura 4 que a maior economia se dá pela união dos nodos 1 e 2. Uma vez que esses nodos estão no extremo de suas rotas, eles podem ser unidos formando uma nova rota, conforme a figura 3(b). O processo é realizado da mesma forma para os nodos 1 e 3, resultando na configuração conforme a figura 3(c). Como a próxima linha da tabela envolve os nós 2 e 3, passa-se para o próximo par, resultando na união dos nodos 3 e 4, conforme a figura 3(d) (HEINEN, 2005). Nenhuma dessas uniões seria efetuada caso o resultado final violasse algumas das restrições de capacidade ou janelas de tempo (HEINEN, 2005).

5.5.2. Heurística do vizinho mais próximo orientada ao tempo

Uma adaptação do método das economias é proposta por Solomon (1987), chamada de heurística do vizinho mais próximo orientada ao tempo. Neste algoritmo, cada rota é iniciada com o cliente mais próximo ao depósito central que não está inserido em nenhuma rota e, nas iterações seguintes, busca-se o cliente mais próximo ao último inserido na rota (SOLOMON, 1987). A busca é realizada entre todos os clientes que possuem viabilidade de serem inseridos na rota, em termos de janela de tempo, momento de chegada do veículo ao depósito e restrições de capacidade. Sempre que essa busca falhar, uma nova rota é iniciada (SOLOMON, 1987).

A métrica utilizada para definir qual é o “vizinho mais próximo” a ser inserido na rota é dada por:

$$c_{ij} = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 T_{ij} + \delta_3 v_{ij}, \quad \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1, \quad \delta_1, \delta_2, \delta_3 \geq 0 \quad (34)$$

Considerando que i é o último cliente inserido na rota e j é qualquer ponto disponível que poderia ser visitado em seguida. As constantes δ definem

pesos para qual critério deve ser priorizado no momento de inserir um cliente em uma rota. d_{ij} representa a distância entre os dois clientes, T_{ij} representa a diferença de tempo entre o término do serviço no cliente i e o início do serviço no cliente j , e v_{ij} o tempo faltante até o último momento possível para o veículo iniciar o serviço no cliente j (SOLOMON, 1987)

5.5.3. Heurística de Mole e Jameson

Os algoritmos apresentados possuem a deficiência de os nodos internos não serem candidatos a participar do teste de economia, uma vez que apenas os nodos no extremo de cada rota podem ser unidos (GOLDBARG; LUNA, 2005). Assim, a heurística elaborada por Mole e Jameson é um algoritmo mais sofisticado, e traz como um dos principais benefícios a capacidade de atacar esta deficiência (GOLDBARG; LUNA, 2005). Como principal desvantagem do algoritmo, destaca-se a maior complexidade computacional (HEINEN, 2005).

Este algoritmo inicia a partir de um grafo que apresenta todos os nodos e as distâncias entre eles, conforme a figura 8(a). O depósito central é representado pelo nodo 0 e os clientes pelos demais nodos (HEINEN, 2005). Após, deve-se selecionar um nodo para ser inserido na primeira rota de acordo com algum critério. Genericamente, será utilizado o nodo livre mais próximo ao depósito (HEINEN, 2005). No exemplo utilizado, o nodo 5 é selecionado por ser o mais próximo do depósito. Em seguida, os nodos passam a ser inseridos nas rotas de acordo com os critérios de proximidade e economia (HEINEN, 2005). O critério de proximidade seleciona o nodo mais próximo da rota, conforme as distâncias calculadas por (HEINEN, 2005):

$$e(i, l, j) = c_{il} + c_{lj} - \mu c_{ij} \quad (35)$$

Caso nenhuma restrição do modelo seja violada, o nodo que apresentar a menor distância será inserido na rota (HEINEN, 2005).

O critério de economia tem o objetivo de selecionar o local para se inserir o nodo selecionado, de acordo com a fórmula (HEINEN, 2005):

$$\sigma(i, l, j) = \lambda c_{0l} - e(i, l, j) \quad (36)$$

Será selecionado o local que apresentar maior economia (HEINEN, 2005). Esta heurística possui dois parâmetros que podem ser alterados conforme as necessidades da estratégia de solução (GOLDBARG; LUNA, 2005):

- Com $\lambda = 0$ e $\mu = 1$, a inserção é realizada considerando a minimização do aumento da rota pela inclusão de um novo cliente;
- Com $\lambda = 0$ e $\mu = 0$, a inserção é realizada considerando a minimização da distância entre os dois nós vizinhos;
- O caso em que $1 \leq \lambda \leq 2$ e $\mu = \lambda - 1$, é uma generalização do critério de Gaskell (*apud* Heinen, 2005, p. 5);
- Quando $\lambda \rightarrow \infty$ e $0 < \mu < \infty$, a inserção ocorrerá considerando o cliente mais distante do depósito.

No exemplo apresentado, são utilizados os valores de $\lambda = 2$ e $\mu = 1$, segundo o critério de Gaskell (*apud* Heinen, 2005, p. 5).

Neste exemplo, é montada uma tabela com as distâncias de todos os nodos livres com relação à rota inicial, 0-5-0, conforme a figura 5 (HEINEN, 2005). Nesta tabela verifica-se que o nodo mais próximo é o nodo 1 e que há apenas um local para inseri-lo, uma vez que há apenas dois nodos na rota (HEINEN, 2005).

Figura 5 – Lista de proximidades da rota 0-5-0

i	l	j	$c_{il} + c_{lj} - \mu c_{ij}$	e
0	1	5	$10 + 20 - 3$	27
0	2	5	$15 + 20 - 3$	32

Fonte: Heinen (2005, p. 6)

No entanto, utilizando a fórmula (36), a economia obtida com a inserção deste nodo é -7 , tornando inviável inserir este nodo na rota. (HEINEN, 2005). Uma vez que não é possível inserir um nodo nesta rota, é criada uma nova rota com o nodo 3, conforme a figura 8(b). Calculadas as distâncias dos nodos livres em relação a esta rota, identifica-se através da figura 6 que o nodo 4 deve ser selecionado (HEINEN, 2005). A economia obtida pela inserção deste

nodo calculada com a fórmula (36) é de 14, viabilizando a inserção deste nodo na rota, conforme mostra a figura 8(c) (HEINEN, 2005).

Figura 6 – Lista de proximidades da rota 0-3-0

i	l	j	$c_{il} + c_{lj} - \mu c_{ij}$	e
0	1	3	$8 + 10 - 9$	9
0	2	3	$15 + 30 - 9$	36
0	4	3	$5 + 10 - 9$	6

Fonte: Heinen (2005, p. 6)

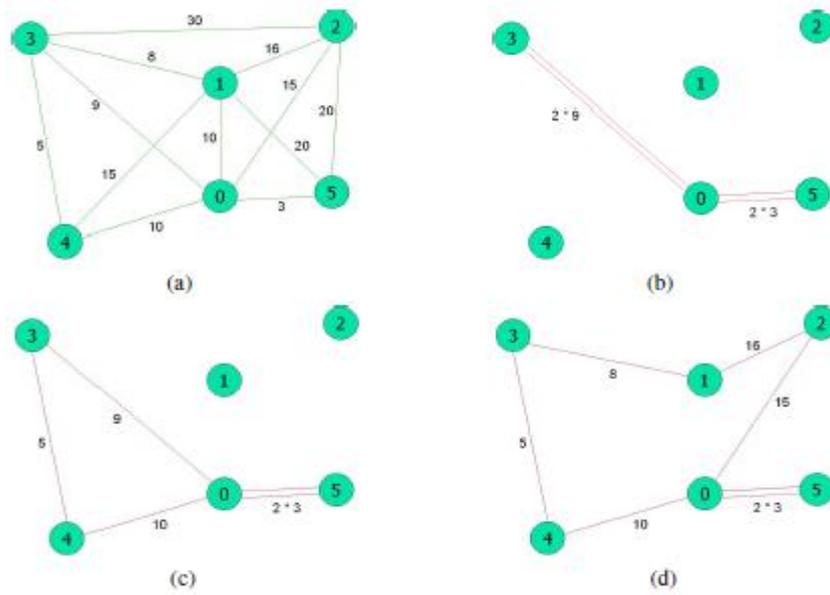
Mais uma vez, deve-se calcular a proximidade dos nodos livres em relação à rota 0-4-3-0 e, desta vez, o nodo 1 é selecionado para ser inserido na rota. Como há mais de dois nodos presentes na rota, é necessário calcular a tabela de economias para identificar a melhor posição de inserção do nodo 1, conforme a figura 7 (HEINEN, 2005). Assim, a maior economia é obtida ao inserir o nodo 1 entre os nodos 0 e 3 (HEINEN). O algoritmo segue sendo executado desta forma até que não existam mais nodos livres, conforme a figura 8(d).

Figura 7 – Lista de economias da rota 0-4-3-0

i	l	j	$\lambda c_{il} - e(i, l, j)$	$\sigma(i, l, j)$
0	1	4	$2 * 10 + 10 - 10 - 15$	5
3	1	4	$2 * 10 + 5 - 15 - 8 - 4$	2
0	1	3	$2 * 10 + 9 - 10 - 8$	11

Fonte: Heinen (2005, p. 6)

Figura 8 – Exemplo de aplicação da heurística Mole e Jameson



Fonte: Heinen (2005, p. 7)

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos que descreverão como os objetivos estabelecidos no capítulo anterior serão alcançados. A metodologia utilizada no estudo é uma adaptação da metodologia proposta por Andrade (2009).

6.1. IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS RELEVANTES

A escolha das variáveis que compõe o modelo é muito importante, uma vez que é nessa etapa que se define o escopo do modelo a ser construído (ANDRADE, 2009). Deve-se incluir apenas as informações relevantes, uma vez que informações em excesso podem prejudicar o processo de tomada de decisão (ANDRADE, 2009). No estudo, foi analisada a operação da empresa e identificados quais itens devem ser levados em consideração no momento de tomada de decisão quanto à roteirização de veículos.

A Fitolog realiza os tratamentos fitossanitários em embalagens para exportação através do Processo de Câmara Portátil. Cada câmara portátil em conjunto com um veículo forma uma unidade móvel que se dirige até os locais onde se encontram as embalagens para exportação para que seja realizado o tratamento. Os clientes costumam entrar em contato para agendar o tratamento com a Fitolog, confirmando a data e o horário para realização do serviço, bem como a quantidade de embalagens a ser tratada. O equipamento possui uma capacidade de 100m³ para cada sessão de tratamento. Há situações em que são realizados mais de um tratamento em sequência em um mesmo cliente, em função do maior número de embalagens a serem tratadas. O tratamento no cliente costuma durar cerca de 2 horas e 20 minutos, sendo que 35 minutos são gastos para preparação da estrutura, 1 hora para realização do tratamento, 30 minutos para carimbagem das embalagens e 15 minutos para desmontagem. Os veículos costumam sair do depósito no início do dia, às 8 horas, e retornar ao final do dia, às 17 horas. Sempre que os veículos ultrapassam esse tempo de 8 horas de trabalho por dia, os operadores recebem horas extras.

Além das variáveis identificadas na descrição da operação – quantidade de veículos, horário para início do serviço em cada cliente, tempo de duração do tratamento e horário de saída e chegada ao depósito – outras variáveis são importantes para a definição de um modelo de roteirização. Segue o quadro com todos os fatores a serem considerados no modelo de roteirização de veículos para a Fitolog:

Figura 9 – Lista de fatores relevantes para o modelo de roteirização da Fitolog

Símbolo	Descrição
c_{ij}	Custo de deslocamento entre os pontos i e j
t_i	Momento para iniciar o serviço no cliente i
s_i	Duração do serviço no cliente i
t_{ij}	Tempo de deslocamento entre os pontos i e j
e_0	Horário mais cedo em que é permitida a saída do depósito
μ_0	Horário mais tarde em que é permitido o retorno ao depósito
d_{ij}	Distância entre os pontos i e j
H	Valor da hora extra

Fonte: Elaborado pelo autor

6.2. FORMULAÇÃO DA FUNÇÃO-OBJETIVO E DAS RESTRIÇÕES

Definidas as variáveis relevantes para o problema, deve-se definir formalmente as relações entre elas através de termos matemáticos (ANDRADE, 2009). Nesta etapa, foi formalizado o modelo matemático que reflete da forma mais próxima possível as condições existentes no que tange à roteirização de veículos na empresa Fitolog.

Para a formulação do modelo, algumas das variáveis definidas anteriormente conforme a operação da empresa foram adaptadas a fim de facilitar os cálculos durante a solução posterior. Assim, o custo de deslocamento entre os pontos i e j é uma função da distância entre esses pontos e do custo por quilômetro rodado dos veículos:

$$C_{ij} = d_{ij}c_{km} \quad (37)$$

O tempo de serviço no cliente i é uma constante para todos os clientes:

$$s_i = S, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (38)$$

O tempo de deslocamento entre os pontos i e j será uma função da distância entre esses pontos e a velocidade média de deslocamento dos veículos:

$$t_{ij} = d_{ij}/V_m, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (39)$$

O modelo de roteirização que mais se adapta à operação da Fitolog é um problema de roteirização com janelas de tempo, em que os clientes devem ser atendidos dentro de um horário especificado. Além disso, há uma penalidade, expressa na forma de horas extras, para os veículos que ultrapassam o tempo de trabalho de 8 horas diárias. Assim, o modelo definido para a Fitolog é uma adaptação dos modelos propostos por Fischer, Jörsten e Madsen (1997) e por Joubert (2007):

Minimizar

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m d_{ij}C_{km}x_{ijk} + \sum_{k=1}^m HL_k \quad (40)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_{irk} - \sum_{j=1}^n x_{rjk} = 0 \quad \forall r \in N, \forall k \in M \quad (41)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{iok} = \sum_{j=1}^n x_{ojk} = 1, \quad \forall k \in M, \quad (42)$$

$$t_i + S + d_{ij}/V_m - (1 - x_{ijk})T \leq t_j, \quad \forall i, j \in N, \forall k \in M, \quad (43)$$

$$t_{0ek} + d_{i0}/V_m - (1 - x_{ojk})T \leq t_j, \quad \forall j \in N, \forall k \in M, \quad (44)$$

$$t_i + S + d_{i0}/V_m - (1 - x_{iok})T \leq t_{ouk}, \quad \forall i \in N, \forall k \in M, \quad (45)$$

$$e_i \leq t_i \leq u_i, \quad \forall i \in N, \quad (46)$$

$$e_0 \leq t_{0ek} \quad \forall k \in M, \quad (47)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in N_0, \quad (48)$$

$$L_k = (t_{0uk} - t_{0ek}) - 9, \quad \forall k \in M \quad (49)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N_0, \forall k \in M, \quad (50)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N, \quad (51)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_0, \forall k \in M, \quad (52)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = y_{ik} \quad \forall i \in N_0, \forall k \in M. \quad (53)$$

$$L_k \geq 0, \quad \forall k \in M \quad (54)$$

em que x_{ijk} é definido na equação (51) como uma variável binária que indica que o cliente j é atendido após o cliente i pelo veículo k , caso seu valor seja um; caso seu valor seja zero, o veículo k não atenderá o cliente j após o cliente i . y_{ik} é definido na equação (53) como uma variável binária que indica que o cliente i é atendido pelo veículo k , caso seu valor seja um; caso seu valor seja zero, o cliente i não será atendido pelo veículo k . O momento para iniciar o serviço no cliente i é representado pela variável t_i . O momento de partida do veículo k do depósito é determinado pela variável t_{0ek} , enquanto o momento do retorno do veículo k ao depósito é determinado pela variável t_{0uk} . A função objetivo (40) busca minimizar o custo da operação, considerando os custos com deslocamento entre os pontos das rotas, bem como as horas extras realizadas por cada veículo k . A restrição (41) garante que cada veículo k que visitar um ponto deixará aquele ponto em seguida. A restrição (42) garante que cada rota se origina e termina no depósito. As restrições (43), (44) e (45) garantem a compatibilidade dos horários de chegada e execução do serviço nos diversos clientes. A restrição (46) garante que o momento da chegada e início do serviço em um cliente está de acordo com a respectiva janela de tempo. A restrição (47) garante que o horário de saída do depósito respeita a janela de tempo do depósito. A restrição (49) calcula as horas extras realizadas por cada veículo caso este ultrapasse nove horas de trabalho por dia (oito horas trabalhadas e uma hora de almoço). As restrições (51) e (53) garantem que cada cliente é visitado apenas uma vez e que cada veículo deixa um cliente apenas uma vez, respectivamente. A restrição (54) garante que o valor de L_k deve ser positivo; caso seja negativo, seu valor será zero.

6.3. ESCOLHA DO MÉTODO MATEMÁTICO DE SOLUÇÃO

Após a definição do modelo na etapa anterior, deve-se identificar qual método matemático é o mais indicado para a solução, considerando o próprio modelo e as questões que buscam ser respondidas (ANDRADE, 2009). Como os métodos para solução são grandes e complexos, há a necessidade de serem programados para a solução através de computadores (ANDRADE, 2009).

Dentre as abordagens de solução analisadas na etapa de fundamentação teórica, foi realizada a programação computacional da heurística de Clark e Wright e da heurística de Mole e Jameson. As heurísticas foram escolhidas por permitirem o teste das restrições de tempo durante a roteirização dos pontos e por seu nível de complexidade estar adequado à realidade da empresa, que não exige a roteirização de um grande número de nós em uma mesma programação. Além disso, é interessante comparar o desempenho das duas heurísticas, uma vez que a heurística de Clark e Wright trabalha apenas com a inserção de novos pontos nas extremidades das rotas em criação enquanto a heurística de Mole e Jameson permite a inserção de novos nós em qualquer ponto da rota em criação. Dessa forma, essas abordagens serão aplicadas e seus resultados comparados, de forma a identificar qual traz melhores soluções para o problema de roteirização de veículos da empresa Fitolog.

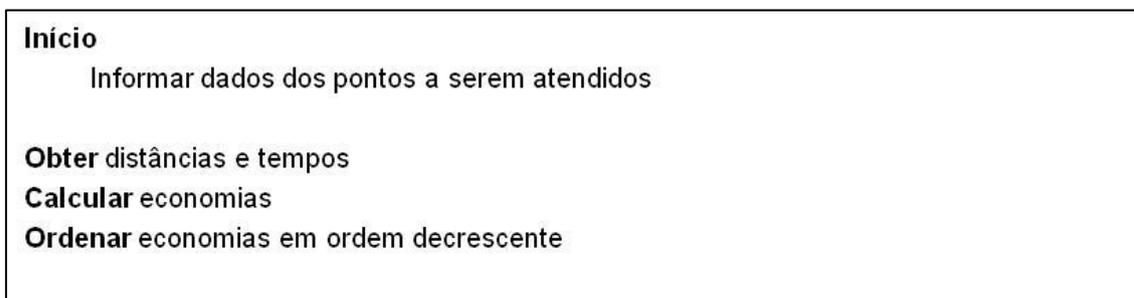
7. RESULTADOS DO ESTUDO

7.1. PROGRAMAÇÃO COMPUTACIONAL

O *software* selecionado para programação das heurísticas adaptadas à realidade da Fitolog foi o Microsoft Visual Basic e os dados foram implementados através do Microsoft Excel 2010. Além disso, para implementação das duas heurísticas é necessário obter os dados de distância e tempo de deslocamento entre os pontos que fazem parte do problema. Esses dados são obtidos através de conexão da ferramenta criada no Microsoft Excel 2010 com o Google Maps.

Na sequência serão descritos os algoritmos que formam o código de implementação das heurísticas. Primeiramente, será apresentado o algoritmo para implementação da heurística de Clark e Wright. A primeira parte do algoritmo consiste na informação dos dados dos nós a serem atendidos, a obtenção das distâncias e tempos de deslocamento e cálculo das economias, conforma a figura 10. Neste momento também é realizado o ordenamento das economias em ordem decrescente.

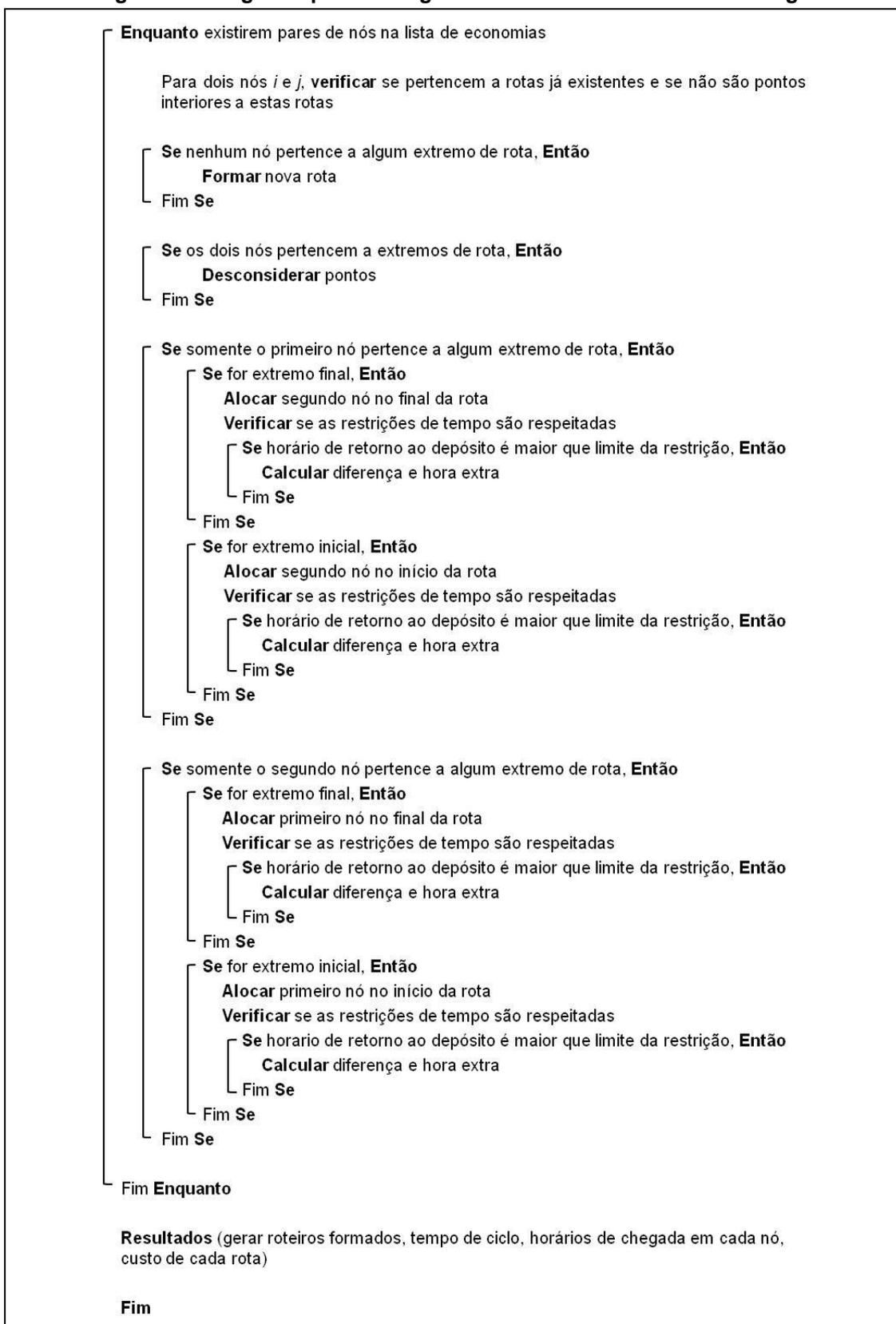
Figura 10 – Primeira parte do algoritmo da heurística de Clark e Wright



Fonte: Elaborado pelo autor

A segunda parte do algoritmo consiste na parte principal da heurística. Nesta etapa são formadas as rotas e verificadas as restrições de tempo definidas no problema, conforme a figura 11. Ao final da heurística, são apresentados os resultados dos roteiros formados.

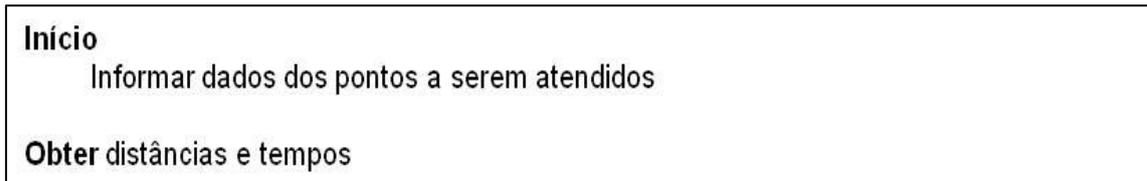
Figura 11 – Segunda parte do algoritmo da heurística de Clark e Wright



Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto ao algoritmo de Mole e Jameson, a primeira parte também consiste na informação dos dados dos nós a serem atendidos e na obtenção dos dados de distância e tempo de deslocamento entre os pontos, conforme a figura 12. No entanto, nesse algoritmo as economias não são calculadas nesta primeira etapa.

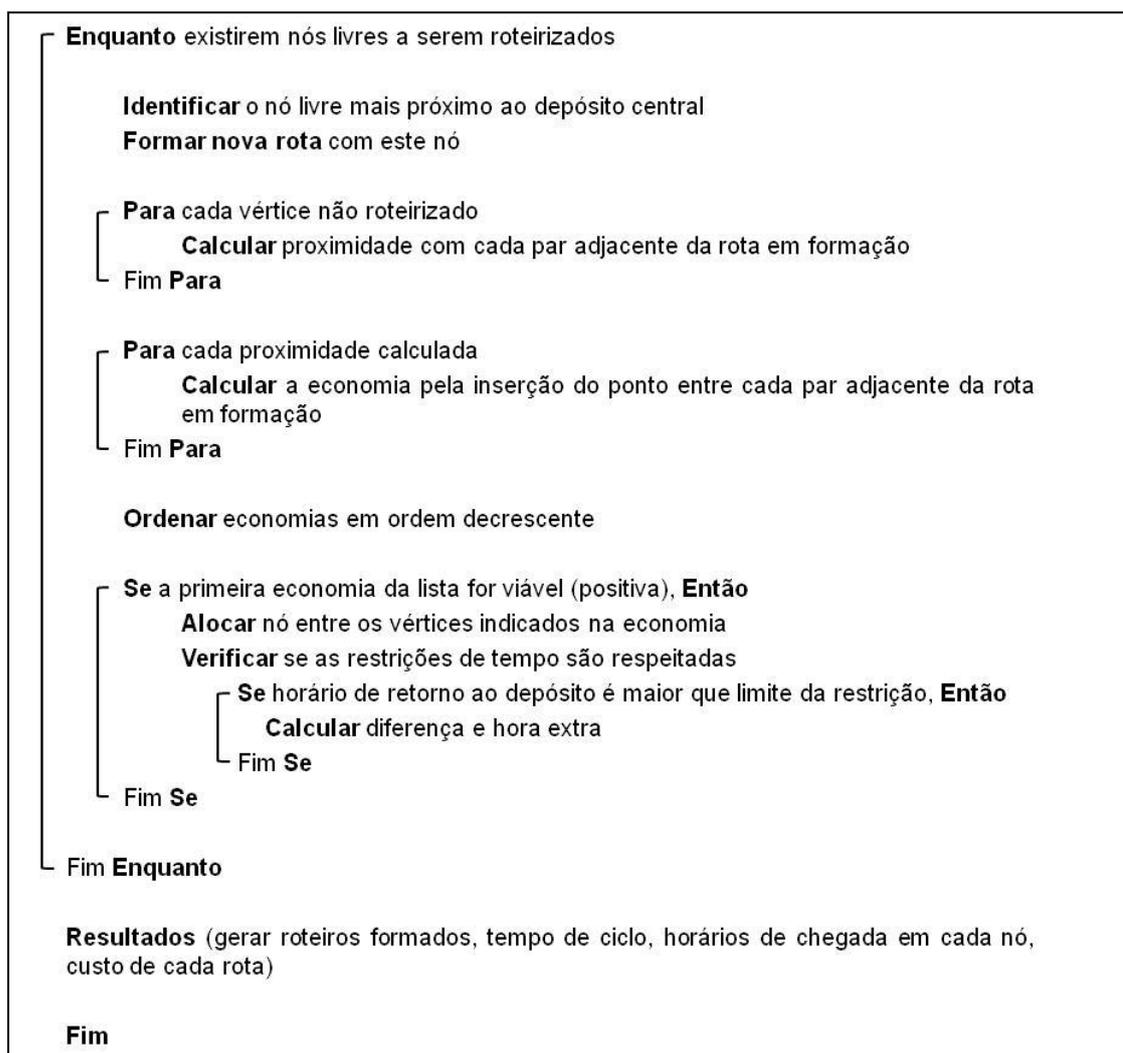
Figura 12 – Primeira parte do algoritmo da heurística de Mole e Jameson



Fonte: Elaborado pelo autor

Da mesma forma que o algoritmo anterior, a segunda etapa trata-se da parte principal do código. Neste momento são formadas as rotas, testadas as restrições de tempo do problema e apresentados os resultados, conforme a figura 13.

Figura 13 – Segunda parte do algoritmo da heurística de Mole e Jameson



Fonte: Elaborado pelo autor

Para implementação desses algoritmos, foi desenvolvida uma interface no Microsoft Excel 2010. Esta ferramenta desenvolvida no Microsoft Excel 2010 tem o objetivo de permitir ao usuário informar os dados sobre os nós a serem roteirizados, os parâmetros de roteirização e, após a execução do algoritmo, visualizar as rotas geradas.

A ferramenta possui uma primeira interface em que o usuário poderá inserir os dados dos nós a serem roteirizados, informando o CEP, a cidade e o estado em que se localiza o ponto, além dos horários mínimos e máximos de chegada ao cliente. O primeiro nó a ser informado deverá ser o do depósito central e poderá ser mantido fixo para diversas roteirizações. Nesta tela também é possível informar o número de veículos disponíveis.

Figura 14 – Ferramenta de roteirização (inserção de dados)

Quantidade de veículos		3		Roteirizar	Resultados	Parametrizações
ID	Nome do cliente	CEP	Cidade	Estado	Horário mínimo de chegada	Horário máximo de chegada
0	Depósito	90200-290	Porto Alegre	RS	8:00	17:00
1	Cliente 1	90880-480	Porto Alegre	RS	8:00	18:00
2	Cliente 2	92010-011	Canoas	RS	8:00	18:00
3	Cliente 3	93040-290	São Leopoldo	RS	8:00	18:00
4	Cliente 4	92420-030	Canoas	RS	8:00	18:00
5	Cliente 5	920200-240	Canoas	RS	8:00	18:00
6	Cliente 6	91040-440	Porto Alegre	RS	8:00	18:00

Fonte: Elaborado pelo autor

O usuário também poderá ajustar alguns parâmetros importantes para a geração das rotas. Em outra interface, poderão ser informados os dados de tempo de duração de cada serviço, custo da hora extra, consumo médio de combustível de cada veículo e custo do combustível.

Figura 15 – Ferramenta de roteirização (parametrizações)

Parametrizações		Capa	Resultado
Custo do quilômetro rodado	R\$ 0,34		
Tempo de serviço	2:00:00		
Custo hora extra	R\$ 10,00		
Consumo de combustível por veículo (km/l)	8		
Preço do litro de combustível	R\$ 2,69		

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, há uma interface para apresentação das rotas geradas após a roteirização. Nesta interface é apresentada a sequência de visita aos nós em cada rota, bem como o horário de chegada em cada um deles. Para cada rota também é apresentado o custo com deslocamento de cada rota e o custo de horas extras, quando as mesmas são necessárias.

Figura 16 – Ferramenta de roteirização (resultados)

Resultados		Capa	Parametrizações																																																													
Rota	1	Rota	2																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Cliente</th> <th>Horario de chegada</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Depósito</td><td>8:00:00</td></tr> <tr><td>Cliente 5</td><td>8:24:59</td></tr> <tr><td>Cliente 2</td><td>10:39:59</td></tr> <tr><td>Cliente 4</td><td>12:57:59</td></tr> <tr><td>Cliente 1</td><td>15:32:58</td></tr> <tr><td>Cliente 6</td><td>17:58:57</td></tr> <tr><td>Depósito</td><td>20:06:57</td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Cliente	Horario de chegada	Depósito	8:00:00	Cliente 5	8:24:59	Cliente 2	10:39:59	Cliente 4	12:57:59	Cliente 1	15:32:58	Cliente 6	17:58:57	Depósito	20:06:57							<table border="1"> <thead> <tr> <th>Cliente</th> <th>Horario de chegada</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Depósito</td><td>8:00:00</td></tr> <tr><td>Cliente 3</td><td>8:35:59</td></tr> <tr><td>Depósito</td><td>11:33:58</td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Cliente	Horario de chegada	Depósito	8:00:00	Cliente 3	8:35:59	Depósito	11:33:58													<table border="1"> <thead> <tr> <th>Cliente</th> <th>Horario de chegada</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Cliente	Horario de chegada																		
Cliente	Horario de chegada																																																															
Depósito	8:00:00																																																															
Cliente 5	8:24:59																																																															
Cliente 2	10:39:59																																																															
Cliente 4	12:57:59																																																															
Cliente 1	15:32:58																																																															
Cliente 6	17:58:57																																																															
Depósito	20:06:57																																																															
Cliente	Horario de chegada																																																															
Depósito	8:00:00																																																															
Cliente 3	8:35:59																																																															
Depósito	11:33:58																																																															
Cliente	Horario de chegada																																																															
Custo da rota	R\$ 22,87	Custo da rota	R\$ 24,85																																																													
Hora extra	R\$ 31,16	Hora extra	R\$ 16,32																																																													
Custo total	R\$ 54,02	Custo total	R\$ 41,17																																																													
		Custo total	R\$ 0,00																																																													

Fonte: Elaborado pelo autor

7.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS HEURÍSTICAS

Para identificação da melhor heurística de solução do modelo proposto é necessário realizar a comparação do desempenho de ambas conforme alguns critérios no momento de realizar a roteirização de determinados pontos. Os critérios utilizados para comparar o desempenho das heurísticas foram os seguintes: custo total das rotas geradas, calculado através da distância percorrida para visitar todos os pontos da rota vezes o custo de combustível por quilômetro rodado, mais o valor de hora extra caso o veículo retorne para o depósito após o horário máximo de chegada ao depósito; tempo para geração das rotas; quantidade de rotas geradas; e quantidade de pontos não roteirizados.

Para realizar a análise conforme esses critérios foram realizadas doze simulações de roteirização com diferentes quantidades de nós a serem roteirizados. Os testes foram realizados com os dados de endereço de atuais clientes da Fitolog e a seleção de quais clientes seriam utilizados em cada teste ocorreu de forma aleatória. Para cada teste, foi realizada a roteirização dos pontos selecionados utilizando a heurística de Clark e Wright e a heurística de Mole e Jameson através da ferramenta desenvolvida no Microsoft Excel 2010. Nestes testes, foi utilizado um valor do litro de combustível de R\$ 2,69; uma taxa de consumo de combustível de 0,125 litros por quilômetro rodado de

cada veículo; um valor de hora extra de R\$ 10,00; e um tempo de serviço de 2 horas. Segue abaixo a tabela com os dados obtidos em cada teste para cada uma das heurísticas conforme os critérios de análise estabelecidos anteriormente:

Figura 17 – Visão geral dos testes comparativos

Teste	Nº de nós	Custo total (R\$)		Tempo (min)		Quantidade de rotas		Pontos não roteirizados	
		C&W	M&J	C&W	M&J	C&W	M&J	C&W	M&J
1	5	205,79	275,22	0,98	1,02	1	2	1	0
2	5	50,18	63,01	0,95	1,02	1	2	1	0
3	6	114,24	113,30	1,30	1,32	2	2	0	0
4	6	48,93	79,71	1,28	1,33	2	2	0	0
5	7	250,42	256,51	1,72	1,75	2	2	2	0
6	7	244,49	270,43	1,68	1,72	1	3	2	0
7	8	221,70	257,32	2,12	2,05	1	3	3	0
8	8	221,70	259,45	2,12	2,07	1	2	3	0
9	9	228,00	285,39	2,47	2,55	1	2	4	0
10	9	113,79	133,31	2,50	2,53	2	2	1	0
11	10	79,08	148,5	3,03	3,03	1	3	6	0
12	10	79,08	122,38	3,03	3,1	1	3	6	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto ao critério de tempo, o mesmo poderá ser desconsiderado para análise de qual heurística deverá ser utilizada. De forma geral, o tempo gasto para obter os resultados é muito baixo e não se confirma como um fator de decisão. Além disso, os tempos para geração de resultado de cada heurística são muito próximos em todos os testes e há, em média, uma diferença de apenas 1% nos tempos de cada heurística.

Quanto ao critério de quantidade de rotas geradas, a heurística de Mole e Jameson gerou, na maioria dos testes, um número maior de rotas. Em média, para cada um dos testes realizados, a heurística de Mole e Jameson gerou uma rota a mais que a heurística de Clark e Wright, conforme a figura 18.

Figura 18 – Análise dos testes comparativos (quantidade de rotas)

Teste	Nº de nós	Quantidade de rotas	
		C&W	M&J
1	5	1	2
2	5	1	2
3	6	2	2
4	6	2	2
5	7	2	2
6	7	1	3
7	8	1	3
8	8	1	2
9	9	1	2
10	9	2	2
11	10	1	3
12	10	1	3
Média		1,33	2,33

Fonte: Elaborado pelo autor

A geração de um número maior de rotas implica na necessidade de um maior número de veículos para atender os pontos roteirizados. Considerando apenas este critério, a geração de um menor número de rotas seria uma vantagem da heurística de Clark e Wright.

No entanto, ao analisar os dados do critério de pontos não roteirizados, é possível identificar que a heurística de Clark e Wright não realiza a roteirização de diversos pontos na maioria dos testes realizados, daí o número reduzido de rotas geradas identificado anteriormente. Em média, a heurística de Clark e Wright não roteiriza 2,42 pontos em cada um dos testes realizados, enquanto a heurística de Mole e Jameson realiza a roteirização de todos os pontos nos testes realizados.

Figura 19 – Análise dos testes comparativos (pontos não roteirizados)

Teste	Nº de nós	Pontos não roteirizados	
		C&W	M&J
1	5	1	0
2	5	1	0
3	6	0	0
4	6	0	0
5	7	2	0
6	7	2	0
7	8	3	0
8	8	3	0
9	9	4	0
10	9	1	0
11	10	6	0
12	10	6	0
Média		2,42	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Esse fato ocorre porque a heurística de Clark e Wright realiza a roteirização dos nós conforme o conceito das economias, apresentado anteriormente na seção 6.5.1. Para cada par da economia calculado, a inserção nas rotas em criação só poderá ocorrer caso um dos pontos desse par de economia se encontre em um dos extremos de alguma das rotas em criação. Caso essa condição não seja atendida, o par de economias é desconsiderado e é realizado o teste com o próximo par, até que não existam mais economias viáveis. Além disso, para que seja criada uma nova rota, é necessário que nenhum dos dois pontos do par da economia esteja inserido em alguma das rotas em criação, restringindo ainda mais a inserção de pontos nas rotas.

Conforme o conceito das economias de Clark e Wright, é calculada a economia de se visitar os pontos i e j em uma mesma rota ao invés de visitar o ponto i e retornar ao depósito e visitar o ponto j e retornar ao depósito (GOLDBARG; LUNA, 2005). Dessa forma, pode-se considerar que os pontos não roteirizados na heurística de Clark e Wright serão visitados por um veículo que retornará ao depósito após visitar um novo ponto, formando novas rotas de

apenas um nó. Esse ponto está diretamente relacionado à análise do critério de custo total de cada rota gerada. Na maioria dos testes realizados, o custo total de cada rota foi inferior na heurística de Clark e Wright. Em média, o custo total de cada teste realizado com a heurística de Mole e Jameson foi superior em R\$ 33,93 com relação ao teste realizado com a heurística de Clark e Wright.

Figura 20 – Análise dos testes comparativos (custo total)

Teste	Nº de nós	Custo total (R\$)	
		C&W	M&J
1	5	205,79	275,22
2	5	50,18	63,01
3	6	114,24	113,30
4	6	48,93	79,71
5	7	250,42	256,51
6	7	244,49	270,43
7	8	221,70	257,32
8	8	221,70	259,45
9	9	228,00	285,39
10	9	113,79	133,31
11	10	79,08	148,50
12	10	79,08	122,38
Média		154,78	188,71

Fonte: Elaborado pelo autor

No entanto, ao considerar os pontos não roteirizados na heurística de Clark e Wright como novas rotas de um único ponto a ser visitado, o custo total dos testes da heurística de Clark e Wright é superior ao custo total dos testes da heurística de Mole e Jameson. Analisando detalhadamente o exemplo do teste número 9, verifica-se que é gerada uma rota com 5 nós e com custo total de R\$ 228,00:

Rota 1: 0 – 8 – 2 – 4 – 1 – 5 – 0

Custo total: R\$ 228,00

Considerando que os demais nós não roteados formam rotas com apenas um nó, pode-se considerar a existência das seguintes rotas com seus respectivos custos:

Rota 2: 0 – 3 – 0

Custo total: R\$ 5,88

Rota 3: 0 – 6 – 0

Custo total: R\$ 8,26

Rota 4: 0 – 7 – 0

Custo total: R\$ 7,92

Rota 5: 0 – 9 – 0

Custo total: R\$ 15,78

Assim, para o teste número nove, a heurística de Clark e Wright acaba tendo um custo total de R\$ 265,84 em função dos nós não roteirizados, enquanto a heurística de Mole e Jameson possui um custo de R\$ 285,39. Realizando o mesmo procedimento para os demais testes, verifica-se os seguintes resultados:

Figura 21 – Análise dos testes comparativos (custo total e pontos não roteirizados)

Teste	Nº de nós	Custo total (R\$)		Pontos não roteirizados		Custo total C&W com pontos não roteirizados (R\$)
		C&W	M&J	C&W	M&J	
1	5	205,79	275,22	1	0	214,09
2	5	50,18	63,01	1	0	56,06
3	6	114,24	113,30	0	0	114,24
4	6	48,93	79,71	0	0	48,93
5	7	250,42	256,51	2	0	266,98
6	7	244,49	270,43	2	0	255,40
7	8	221,70	257,32	3	0	254,65
8	8	221,70	259,45	3	0	251,28
9	9	228,00	285,39	4	0	265,50
10	9	113,79	133,31	1	0	122,09
11	10	79,08	148,5	6	0	141,71
12	10	79,08	122,38	6	0	137,39
Média		154,78	188,71			183,10

Analisando o custo total considerando os pontos não roteirizados na heurística de Clark e Wright como novas rotas, identifica-se que o custo total das rotas geradas pela heurística de Mole e Jameson é, em média, apenas 3% superior ao custo das rotas geradas pela heurística de Clark e Wright. Além disso, verifica-se também que, considerando os pontos não roteirizados pela heurística de Clark e Wright como novas rotas há a necessidade de um número maior de veículos para atender a programação realizada por essa heurística. Dessa forma, considerando que o custo total das programações geradas pelas duas heurísticas é muito próximo e que a programação da heurística de Clark e Wright exigiria um número maior de veículos para ser atendida, representando novos custos com ativos imobilizados para a empresa, identifica-se que a melhor solução dentre as analisadas para o modelo de roteirização de veículos da empresa Fitolog seja a utilização da heurística de Mole e Jameson.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visto que os transportes possuem um grande impacto sobre as operações de uma empresa, tanto em termos de custo quanto em termos de satisfação dos clientes, este estudo teve como objetivo definir um modelo de roteirização de veículos para a empresa Fitolog. Para atingir tal objetivo, foi necessário realizar uma análise da operação da empresa no que diz respeito ao transporte e utilizar os conceitos teóricos sobre roteirização de veículos para que fosse definido um modelo adaptado à realidade da empresa.

No que diz respeito à roteirização de veículos na empresa Fitolog, identificou-se que a mesma não possui nenhum modelo de roteirização para suportar a distribuição de suas unidades móveis para atendimento dos clientes e que a determinação de quais clientes cada veículo atenderá e quais rotas estes devem seguir é realizada de forma empírica. Além disso, também se identificou que a empresa tende a ter um crescimento na demanda por tratamentos fitossanitários, dado o cenário econômico e legal, o que exige um melhor planejamento de transportes.

Realizada a análise da empresa, definiu-se um modelo de roteirização de veículos com janelas de tempo e sem restrições de capacidade de carga. O modelo foi definido dessa forma porque os veículos da Fitolog apenas realizam o serviço de tratamento fitossanitário em seus clientes e não há necessidade de entrega de produtos nos mesmos. As restrições de janela de tempo ocorrem porque os clientes podem ser atendidos dentro de um determinado horário e os veículos também devem retornar ao depósito em um horário determinado. Caso este horário de retorno seja ultrapassado, há o acréscimo de custo de horas extras pagas aos funcionários que operam os veículos. Além disso, durante o tempo de realização do serviço, os veículos permanecem em cada cliente.

Definido este modelo, foi necessário definir um método de solução do mesmo. Foram selecionadas as heurísticas de Clark e Wright e de Mole e Jameson para solução do problema. Nesta etapa, o objetivo foi identificar qual heurística melhor se adaptava à realidade da empresa e ao modelo proposto. Foram escolhidas estas heurísticas por permitirem o teste das restrições de

tempo durante a roteirização e pela baixa complexidade, uma vez que a realidade da empresa não exige a roteirização de um grande número de nós. Além disso, a comparação entre as heurísticas é válida uma vez que a heurística de Clark e Wright trabalha apenas com a inserção de novos pontos nas extremidades das rotas em criação enquanto a heurística de Mole e Jameson permite a inserção de novos nós em qualquer ponto da rota em criação (GOLDBARG; LUNA, 2005). Para comparar as duas heurísticas, os algoritmos foram programados através do *software* Microsoft Visual Basic e a ferramenta para implementação foi criada no Microsoft Excel 2010.

Os critérios determinados para analisar as duas heurísticas foram o custo total das rotas geradas; o tempo para geração das rotas; a quantidade de rotas geradas; e a quantidade de pontos não roteirizados. O desempenho das duas heurísticas foi muito semelhante nos critérios de custo total das rotas e tempo para geração das rotas. No entanto, a heurística de Clark e Wright apresentou um alto número de pontos não roteirizados em diversos testes realizados. Esses pontos não roteirizados são classificados como novas rotas de apenas um nó, o que exige um maior número de veículos para atender a programação. Além disso, quanto maior o número de nós inseridos para serem roteirizados, maior foi a representatividade dos nós não roteirizados. Dessa forma, a heurística selecionada para ser utilizada na ferramenta de roteirização de veículos da Fitolog foi a heurística de Mole e Jameson.

O modelo definido e a ferramenta criada permitirão à Fitolog melhores decisões no que diz respeito aos transportes da empresa. Além disso, a ferramenta trará cada vez mais benefícios à medida que a demanda da empresa e o número de clientes for crescendo, exigindo um maior nível de complexidade nas decisões de transporte. O modelo proposto e a ferramenta também poderão ser adaptados para outros serviços da empresa, como o ramo de controle de pragas, conforme vontade já manifestada pelos gestores.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. **Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e modelos para a análise de decisão**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009. 204 p. CD-ROM.

BALLOU, Ronald H.. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos / Logística Empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 616 p.

BOWERSOX, Donald J.; COOPER, M. Bixby; CLOSS, David J.. **Gestão Logística de Cadeias de Suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 528 p.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H.. The truck dispatching problem. **Management Science**, Hanover, Eua, p. 80-91. ago. 1959.

FISHER, Marshall L.; JÖRNSTEN, Kurt O.; MADSEN, Oli B. G.. Vehicle routing with time windows: two optimization algorithms. **Operations Research**, Heidelberg, p. 488-492. 1997.

GALHARDI, Antônio César. Tecnologia da informação e os processos de roteirização com restrições de janela de tempo. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., 2006, Bauru. **Anais eletrônicos**. São Paulo: Unesp, 2006. p. 1 - 12. Disponível em: <http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/909.pdf>. Acesso em: 05 set. 2011.

GHISI, Marcos Angeli et al. Usos e benefícios de softwares de roteirização na gestão de transportes. In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO FEA-USP, 7., 2004, São Paulo. **Anais eletrônicos**. São Paulo: Fea - Usp, 2004. p. 1 - 12. Disponível em: <<http://www.ead.fea.usp.br/semead/7semead/>>. Acesso em: 05 set. 2011.

GOLDBARG, Marco Cesar; LUNA, Henrique Pacca L.. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. 518 p.

HEINEN, Milton Roberto. Análise e Implementação de Algoritmos para o Roteamento de Veículos. In: SIMPÓSIO DE INFORMÁTICA DA REGIÃO CENTRO DO RS, 4., 2005, Santa Maria. **Anais...** . São Leopoldo: Unisinos, 2005. p. 1 - 8. Disponível em: <<http://www.sirc.unifra.br/artigos2005/artigo17.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2011.

JOUBERT, Johannes Wilhelm. **An integrated and intelligent metaheuristic for constrained vehicle routing**. 2007. 10 v. Tese (Doutorado) - University Of Pretoria, Pretoria, 2007. Cap. 2. Disponível em: <<http://upetd.up.ac.za/thesis/available/etd-07202007-175138/unrestricted/02chapter2.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2011.

LACHTERMACHER, Gerson. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 223 p. CD-ROM.

MARINAKIS, Yannis; MIGDALAS, Athanasios. Annotated Bibliography in Vehicle Routing. **Operational Research: An International Journal**, Heidelberg, p. 27-46. jan. 2007.

RAGSDALE, Cliff T.. **Modelagem e Análise de Decisão**. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 590 p.

SOLOMON, Marius M.. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. **Operations Research**, Heidelberg, p. 254-265. mar. 1987.