



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

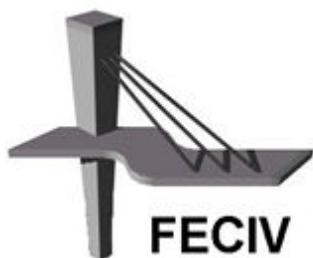
Nº 099

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS (CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE) NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

ANA THEREZA BARBOSA DA SILVA

UBERLÂNDIA, 05 DE ABRIL DE 2012

ANA THEREZA BARBOSA DA SILVA



FECIV

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Ana Thereza Barbosa da Silva

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS
(CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE) NA
PRODUÇÃO AGRÍCOLA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Faria

Uberlândia, 05 de abril de 2012



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 099/2012

CANDIDATA: Ana Thereza Barbosa da Silva

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Faria

TÍTULO: "Modelagem e simulação de processos (corte, carregamento e transporte) na produção agrícola de açúcar e álcool"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana

LINHA DE PESQUISA: Planejamento e Operação de Transportes

DATA DA DEFESA: 05 de abril de 2012

LOCAL: Sala de Projeção Prof. Celso Franco de Gouvêa

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 13:45 - 16:00 hs

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que a candidata foi:

(APROVADA)

(REPROVADA)

OBS: Révisou o texto corrigindo os erros conforme o resultado no trabalho.
Complementou o capítulo 5 fazendo análise com base na km percorrida e tempo
de colheita para justificar e tornar de forma mais estendendo a análise para todos os
casos de levar.

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Celso A F

Professor Orientador: **Prof. Dr. Carlos Alberto Faria – FECIV/UFU**

Mateus Araújo e Silva

Membro externo: **Prof. Dr. Mateus Araújo e Silva – UNIP**

faraujose

Membro: **Prof.ª Dr.ª Sezimária de Fátima Pereira Saramago – FAMAT/UFU**

Uberlândia, 5 de abril de 2012.

*Dedico este trabalho a Deus e ao meu anjo
da guarda. Aos meus pais e irmão. Às
minhas avós. Aos meus tios. Ao meu amor
Diogo.*

A GRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador Professor Dr. Carlos Alberto Faria pela confiança, incentivo, apoio, orientação, disponibilidade, dedicação e paciência não só na realização desta pesquisa, mas durante todos esses anos de trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG processo TEC - APQ-01836-09) pelo apoio financeiro.

À Professora Camilla Miguel Carrara Lazzarini pela amizade, apoio constante, incentivo, disponibilidade e dedicação que tanto auxiliaram nesta pesquisa.

Aos engenheiros da Usina que contribuíram muito fornecendo informações preciosas para elaboração desta pesquisa.

Ao Capitão Cordeiro, Capitão Márcio Augusto, Inácio, Tenente Miranda, Soldado Thales, Sargento Roneir, Soldado Wellington Costa e a todos os companheiros de trabalho pelo apoio, estímulo, compreensão e por toda a ajuda para que eu concluisse esta pesquisa.

Agradeço à querida secretaria da Pós-graduação Sueli Maria Vidal da Silva pela ajuda, paciência e carinho sempre dispensados a mim.

Às queridas amigas Ana Flávia Ferreira de Castro Paula e Michelle Crescêncio de Miranda, as quais tive a imensa felicidade de conhecer, conviver, respeitar e compartilhar os dias na Pós-graduação. Vocês foram e são muito importantes na minha vida e na construção desta pesquisa, torço muito por vocês!

Agradeço também às amigas Renata Filsner Medeiros, Soleane Portes e Silva, Mariana Guedes Ariza e Michelle Chaim Stabile pela amizade, companheirismo, estímulo e carinho de sempre!

À minha família, em especial à Tia Lúcia, Tia Sônia, Tia Shirley, Bárbara, Marcus Paulo e à minha sogra Luciana por acreditarem em mim e por me apoiarem sempre!

Ao meu irmão Rui Augusto pelo amor e companheirismo!

Aos meus pais Rui e Dalva pela vida, pelo exemplo, pela educação, pela dedicação e pelo amor incondicional!

Ao meu namorado Diogo, pelo amor, incentivo, paciência e compreensão!

Às minhas avós Anunciata e Maria Teresa (*in memorian*) pela proteção!

E agradeço, principalmente, a Deus, por me conceder a oportunidade de crescimento intelectual, por nunca me desamparar e por colocar no meu caminho essas pessoas tão especiais, aqui mencionadas. A todos vocês, Muito Obrigada!

Silva, A. T. B. Modelagem e simulação de processos (corte, carregamento e transporte) na produção agrícola de açúcar e álcool. 106 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo simular e analisar as etapas de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar para o planejamento da produção na indústria sucroalcooleira. As etapas agrícolas são responsáveis por cerca de 30% dos custos totais da produção. Nas simulações aplicou-se o módulo de roteirização em arco do *software* TransCAD. Este *software* trabalha com uma rede viária configurada com base em conceitos advindos da Teoria dos Grafos, os quais foram utilizados neste estudo. Partindo-se da premissa que a matéria-prima cana-de-açúcar possui rápida deterioração após a colheita e que por este motivo precisa ser entregue para industrialização em até 72 horas, cabe à gerência agrícola desenvolver um planejamento logístico para evitar o comprometimento da eficiência industrial. Foram considerados nesta pesquisa, fatores como a geometria e o tamanho dos talhões, os pontos de manobra e de transferência de carga e os ciclos operativos. Assim, foi possível, com a utilização do *software* TransCAD, gerar áreas ótimas de colheita que viabilizassem as operações, otimizassem os processos, reduzissem as perdas, promovessem ações direcionadas à facilitação das operações com o maquinário e minimizassem os custos operacionais. O *software* mostrou ser uma ferramenta de apoio a decisões envolvidas no planejamento e controle da produção de uma usina de açúcar e álcool, tanto nas operações agrícolas quanto na logística da movimentação de máquinas no talhão. Dessa forma, promoveu-se a maximização da produtividade. Mesmo com algumas limitações do *software*, este contribuiu para que se chegasse aos resultados finais, alcançando-se os objetivos iniciais propostos.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, sistemas de corte, carregamento e transporte, TransCAD, roteirização de veículos, usina de açúcar e álcool.

Silva, A. T. B. Modeling and simulation of processes (cutting, loading and transportation) in agricultural production of sugar and alcohol. 106 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2012.

ABSTRACT

This paper aims to simulate and analyze the steps of cutting, loading and transportation of sugar cane for production planning in the sugar and alcohol industry. Agricultural steps are responsible for about 30% of the production full cost. In the simulations, there was applied the arc routing procedure from the TransCAD software. This software works with a traffic network based on concepts arising from the Graph Theory, approached in this study. Starting from the premise that sugar cane has rapid deterioration after harvest and which therefore needs to be delivered within 72 hours industrialization, agricultural management is expected to develop a detailed logistical planning to avoid the involvement of industrial efficiency. It was considered in this study, factors such as the geometry and size of plots, the points of maneuver and load transfer and operating cycles. Therefore, it was possible by the usage of TransCAD software, to generate optimized harvest areas, which could allow the operations, improve the processes, reduce the losses, promote directed actions to facilitate operations with machinery and lower the operational costs. The software proved to be a tool for supporting decisions involved in planning and controlling the production of a sugar and alcohol, both in agricultural operations and the logistics of moving machinery in the field. Thus it was useful to promote the maximization of productivity. Even with some limitations, the software has helped in achieving the results came up the initial goals proposed.

Keywords: sugar cane, cutting systems, loading and transportation, TransCAD, vehicle routing, sugar/alcohol pant.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

E	- Aresta
G	- Grafo
ha	- Hectares
km	- Quilômetros
Km/h	- Quilômetros por Hora
Km/t	- Quilômetros por Toneladas
t	- Toneladas
V	- Vértice

SIGLAS

$AEAC$	- Álcool Etílico Anidro Carburante
$AEHC$	- Álcool Etílico Hidratado Carburante
CCT	- Corte, Carregamento e Transporte
DER	- Departamento de Estradas de Rodagem
MG	- Minas Gerais
PCC	- Problema do Carteiro Chinês (<i>Chinese Postman Problem</i>)
PCP	- Planejamento e Controle de Produção
PCV	- Problema do Caixeiro Viajante (<i>Traveling Salesman Problem</i>)
$PRPV$	- Problema de Roteirização e Programação de Veículos
PRV	- Problema de Roteirização de Veículos
$RFID$	- <i>Radio-Frequency IDentification</i>
SIG	- Sistema de Informações Geográficas
$SIG-T$	- Sistema de Informações Geográficas para Transportes
VHP	- <i>Very High Polarization</i>

LISTA DE FIGURA

FIGURA 1 – Colheita da cana-de-açúcar com a utilização de transbordos	14
FIGURA 2 – Transferência da cana-de-açúcar dos transbordos para os caminhões.....	15
FIGURA 3 – Corte Manual de cana crua.	19
FIGURA 4 – Corte Manual de cana queimada.....	20
FIGURA 5 – Colheita Mecanizada.	21
FIGURA 6 – Transporte Ferroviário de cana-de-açúcar.	24
FIGURA 7 – Transporte Hidroviário de cana-de-açúcar.	25
FIGURA 8 – Transporte Rodoviário de cana-de-açúcar.	25
FIGURA 9 – Sequência das operações na área industrial.	31
FIGURA 10 – Passagem do caminhão pela sonda para retirada de amostras para realização de análises tecnológicas.....	32
FIGURA 11 – Hilo para descarga de caminhões.	32
FIGURA 12 – Descarga lateral em mesa rebaixada.....	33
FIGURA 13 – Grafo estabilizado das Pontes de <i>Königsberg</i>	35
FIGURA 14 – Grafo Básico.	36
FIGURA 15 – Grafo Orientado.	37
FIGURA 16 – Grafo não orientado.	37
FIGURA 17 – Grafo Misto.....	37
FIGURA 18 – Grafo Rotulado.	38
FIGURA 19 – Grafo Valorado.	38
FIGURA 20 – Grau de Vértice.....	39
FIGURA 21 – Grafo Completo.	39
FIGURA 22 – Representação de um percurso de grafo.	40
FIGURA 23 – Representação de caminho.	40
FIGURA 24 – Janela TransCAD - <i>Network</i> com as demarcações de nós e arcos.	58
FIGURA 25 – Janela TransCAD - Roteirização em arco (<i>Arc Routing</i>).	60
FIGURA 26 – Janela TransCAD - Roteirização em arco (<i>Solid Waste Collection Routing</i>).	60
FIGURA 27 – Janela TransCAD – Inserção de atributos para <i>layers</i> de pontos.	63
FIGURA 28 – Janela TransCAD – Inserção de atributos para <i>layers</i> de linhas.	64

FIGURA 29 – Janela TransCAD – <i>Layer</i> de rotas gerada pela simulação.	66
FIGURA 30 – Janela TransCAD – Seleção de <i>Skims</i>	67
FIGURA 31 – Caminhamento da colhedora na lavoura.....	76
FIGURA 32 – Resultado gráfico do procedimento de roteirização em arco <i>Arc Routing</i> ..	79

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Ranking dos principais países produtores de cana em 2000 e 2005.....	5
Tabela 2 – Participação do Brasil na produção, estoque e exportações de açúcar no comércio internacional nas safras de 2002/2003 a 2006/2007 (mil toneladas).....	6
Tabela 3 – Dados de produtividade da safra 1997/1998 a 2008/2009.....	7
Tabela 4 – Aumento da área cultivada de cana da safra de 2007/2008 para a safra de 2008/2009	8
Tabela 5 – Tipos de caminhões	27
Tabela 6 – Capacidade de carga dos veículos utilizados no transporte de cana.....	27
Tabela 7 – Informações gerais.....	71
Tabela 8 – Informações sobre a colheita	71
Tabela 9 – Informações sobre custos e transporte	72
Tabela 10 – Cenários analisados	73
Tabela 11 – Dimensões para o talhão do cenário 1	77
Tabela 12 – Dimensões para o talhão do cenário 2	77
Tabela 13 – Dimensões para o talhão do cenário 3	77
Tabela 14 – Resumo dos parâmetros operacionais dos resultados do procedimento de roteirização em arco.....	78
Tabela 15 – Resultados aplicados para área de cultivo atual e safra futura (2014).....	81
Tabela 16 – Comparações entre os resultados da safra atual e a safra futura (2014).....	81

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	4
1.2 JUSTIFICATIVA	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	10
 CAPÍTULO 2	 11
SISTEMAS DE CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE.....	11
2.1 EQUIPAMENTOS DE COLHEITA	13
2.2 FRENTEIS DE CORTE	16
2.2.1 Frentes de Cana Inteira	17
2.2.2 Frentes de Cana Picada	18
2.3 SISTEMAS DE COLHEITA	19
2.4 TRANSPORTE.....	23
2.4.1 Transporte Ferroviário	23
2.4.2 Transporte Hidroviário	24
2.4.3 Transporte Rodoviário	25
2.5 TURNOS DE TRABALHO.....	28
2.6 ESTOQUE DE CANA NO PÁTIO	29
2.7 OPERAÇÕES NA ÁREA INDUSTRIAL	30
 CAPÍTULO 3	 34
ROTEIRIZAÇÃO	34
3.1 TEORIA DOS GRAFOS	35
3.1.1 Grafos	35
3.1.2 Grafo Orientado (Dígrafo).....	36
3.1.3 Grafo Não orientado	37
3.1.4 Grafo Misto	37
3.1.5 Grafo Rotulado	38
3.1.6 Grafo Valorado	38
3.1.7 Grau de Vértice	39
3.1.8 Grafo Completo	39
3.1.9 Percurso de um Grafo	39
3.1.10 Caminho, Circuito e Ciclo	40
3.1.11 Grafo Hamiltoniano	41
3.1.12 Grafo Euleriano	41
3.2 PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE	41
3.3 PROBLEMA DO CARTEIRO CHINÊS	43

3.4 PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	44
3.5 CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS .	48
3.5.1 Classificação Segundo Bodin et al. (1983).....	48
3.5.2 Classificação Segundo Ronen (1988).....	49
3.5.3 Classificação Segundo Assad (1988)	50
3.5.4 Classificação Segundo Desrochers et al. (1990)	51
CAPÍTULO 4.....	53
MODELAGEM E GERAÇÃO DE CENÁRIOS.....	53
4.1 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO.....	54
4.2 REDE DE TRABALHO - NETWORK	58
4.3 PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO EM ARCO	59
4.4 DADOS DE ENTRADA DO ARC ROUTING – CONFIGURAÇÃO DA REDE	63
4.5 ARQUIVOS DE SAÍDA DO ARC ROUTING	66
4.6 ARQUIVO GRÁFICO DA ROTA	66
CAPÍTULO 5.....	69
ESTUDO DE CASO	69
5.1 PROBLEMA.....	69
5.2 CARACTERIZAÇÃO DA USINA	70
5.3 CENÁRIOS	72
5.3.1 Cenário 1	76
5.3.2 Cenário 2	77
5.3.3 Cenário 3	77
5.4 RESULTADOS	78
CAPÍTULO 6.....	84
CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
ANEXO A.....	95
ARQUIVOS DE SAÍDA LISTANDO OS DADOS DE ENTRADA E CONFIGURAÇÕES.....	95
ANEXO B	104
RESUMO DAS ESTATÍSTICAS PARA CADA ROTA	104

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As novas exigências para a atividade logística passam por maior controle e identificação de oportunidades para a redução de custos, dos prazos de entrega e aumento da qualidade do serviço quanto ao cumprimento dos prazos com clientes, disponibilidade constante de produtos, programação das entregas e emprego de novas ferramentas para redefinição de métodos, processos e adequação dos negócios, dentre outros.

Segundo o *Council of Logistics Management*, “Logística é a parte do gerenciamento da cadeia de abastecimento que planeja, implementa, controla os fluxos, o armazenamento eficiente, econômico de matérias-primas, produtos acabados, bem como as informações desde o local de origem até o de consumo, com o propósito de atender às exigências dos clientes” (CARVALHO, 2002, p. 31).

Segundo Hall (1985) e Ballou (1978), a tecnologia da informação tem contribuído com o avanço da logística através da modelagem de sistemas fornecendo soluções inestimáveis para o aperfeiçoamento de procedimentos, no uso da mão de obra, reposição automática de estoques, melhorias na utilização de veículos, aumento da eficiência dos controles, uso crescente de etiquetas com códigos de barras (RFID), além dos procedimentos de roteirização terem se tornado mais eficientes, possibilitando determinar o posicionamento dos veículos e controles dos estoques em tempo real e, de forma muito confiável.

A evolução da informática nos últimos anos tornou o computador um importante aliado na otimização dos problemas de transportes. A crescente necessidade de se utilizar ferramentas que auxiliem tomadas de decisão atuantes nas áreas de planejamento urbano e de transporte tem levado a uma procura cada vez maior pelos chamados Sistemas de

Informações Geográficas (SIG). Segundo Rose (2001), os *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas aplicados aos Transportes (SIG-T) estão no mercado em larga escala, disponíveis com vários tipos de configurações e funcionalidades. Uma das ferramentas importantes proporcionadas por SIG's-T é a roteirização e programação de veículos.

Nos anos de 1990, o estrondoso avanço tecnológico, em termos computacionais, associado às intensas pesquisas desenvolvidas na área de pesquisa operacional, foi fundamental para o desenvolvimento de melhores soluções aos Problemas de Roteirização e Programação de Veículos (PRPV).

Para Bodin (1990) *apud* Ferreira Filho e Melo (2005), a mais significativa mudança com relação aos sistemas para roteirização e programação de veículos ocorreu no ambiente computacional. Em sua primeira geração, os sistemas de roteirização e programação de veículos eram executados nos chamados *mainframes*, onde os resultados gerados nem sempre podiam ser conhecidos imediatamente, pois dependiam tanto do tempo de processamento como da sua prioridade na fila de espera para resolução. Além disso, esses sistemas não apresentavam recursos gráficos e interativos, logo não era possível testar alterações manualmente nas soluções obtidas, de modo a atender restrições não consideradas explicitamente nos parâmetros de entrada de dados no modelo.

A roteirização de veículos surge como uma das soluções para otimização de problemas de transporte aplicados na agricultura, na distribuição de carga urbana, na coleta de lixo urbano, e nas mais variadas atividades. Faz-se nesse estudo o emprego do *software* TransCAD que é desenvolvido pela *Caliper Corporation*.

O TransCAD é um sistema utilizado para armazenar, mostrar, gerenciar e analisar dados de transporte, combinando um SIG (Sistemas de Informações Geográficas) e um sistema de modelagem de transporte em uma plataforma integrada. Trabalhando com todas as modalidades de transporte, esse sistema, quando aplicado a modelos de roteirização e logística, pode ser utilizado para diversas aplicações (FERREIRA FILHO e MELO, 2001).

Grande parte das inovações tecnológicas introduzidas na agricultura é constituída por máquinas, equipamentos, defensivos agrícolas, fertilizantes químicos, e outros produtos que são, na verdade, biotecnologias e novos produtos industriais utilizados pelo setor

agroindustrial. Esse setor caracteriza-se, cada vez mais, pela globalização dos mercados, pelo crescente uso de novas tecnologias e pela busca da produção sustentável. Tal realidade obriga o setor agroindustrial brasileiro a adotar novas tecnologias, empregando-as a fim de elevar sua produtividade, melhorar os produtos e métodos de gestão e contribuir para a preservação do meio ambiente e, consequentemente, possibilitar maior competitividade no mercado mundial. Sem dúvida que essa realidade demanda da agroindústria uma atuação empresarial que visa atar dois lados, ou seja, otimizar os sistemas produtivos e minimizar o impacto ambiental (SILVA e MORAES, 2009).

O setor sucroalcooleiro brasileiro tem despertado o interesse de diversos países, principalmente pelo baixo custo de produção de açúcar e álcool. Este último tem sido cada vez mais importado por nações de primeiro mundo, que visam reduzir a emissão de poluentes na atmosfera e a dependência de combustíveis fósseis.

Com o crescimento da demanda de cana-de-açúcar e a competitividade de preço dos produtos, o setor agrícola está buscando maior eficiência e melhor tecnologia para o campo, investindo assim em equipamentos que proporcionam menor perda de matéria-prima, redução da contaminação de cana-de-açúcar com impurezas minerais e, consequentemente, maior lucratividade (MAGALHÃES *et al.*, 2008).

Dessa forma, nessa pesquisa o problema a ser estudado é o da indústria canavieira, cuja entrega de cana na usina deve ocorrer sem interrupções e com o menor tempo possível entre colheita e moagem. O problema começa com a etapa de produção agrícola, programando os lotes de produção do ponto de vista econômico, seguido da etapa de corte (métodos e processos), transporte e entrega na indústria conforme os requisitos necessários para a manutenção dos teores de açúcar (KAWAMURA *et al.*, 2006).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Com base no procedimento de roteirização do *software* TransCAD, este trabalho busca simular e analisar os processos de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar

visando apoiar as tomadas de decisão envolvidas no planejamento e controle da produção (PCP) de uma usina de açúcar e álcool, a partir de estratégias de produção eficazes no período da safra.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar os processos de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar da lavoura até a usina e suas variáveis;
- Abordar experimentalmente o Problema de Roteirização de Veículos em Arco usando o *software* TransCAD;
- Modelar diferentes cenários com talhões de geometria e dimensões variadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A indústria sucroalcooleira possui grande importância na economia brasileira, sendo fonte de riquezas e geradora de empregos. É um sistema logístico complexo, que requer cuidados no planejamento de suas atividades.

Por ser predominantemente rodoviário o transporte da cana-de-açúcar no Brasil, é necessário que a infraestrutura de caminhões seja suficiente para garantir o abastecimento da indústria.

O setor sucroalcooleiro, depois de ter passado pela crise de superprodução de etanol no período de 1999/2000, representada pelos baixos preços do álcool carburante para os produtores e por um expressivo excedente do produto no mercado, conseguiu acumular condições suficientes para um crescimento sustentado, desde então até o momento atual, com perspectivas de continuar essa expansão de forma muito sólida.

Atualmente, o Brasil é o líder na produção canavieira no mundo, seguido da Índia, China e Tailândia. Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAOSTAT, 2012), em 2010 o País respondeu por cerca de 42% da produção mundial que foi de aproximadamente 1,69 bilhão de toneladas (Tabela 1).

Tabela 1 – Ranking dos principais países produtores de cana em 2000 e 2005

Ranking		País	Produção (t)	
2000	2010		2000	2010
		Mundo	1.251.142.450	1.685.444.531
1	1	Brasil	327.704.992	719.157.000
2	2	Índia	299.230.016	277.750.000
3	3	China	66.280.000	111.454.359
4	4	Tailândia	49.563.000	68.807.800
5	6	Paquistão	46.332.600	49.372.900
6	5	México	44.100.000	50.421.600
9	12	Colômbia	33.500.000	20.272.600
7	8	Austrália	38.164.688	31.457.000
12	10	Indonésia	23.900.000	26.500.000
10	11	EUA	32.762.070	24.820.600
13	14	África do Sul	23.876.162	16.015.600
11	7	Filipinas	24.491.000	34.000.000

Fonte: FAOSTAT (2012).

A participação do Brasil na produção mundial de açúcar passou de 15,2% para 19,88% de 2002/2003 para 2006/2007. O mesmo comportamento pode ser verificado quanto à participação do País no total exportado mundialmente, que variou de 27,7% para 40,99% no período citado (Tabela 2).

Com relação à produção de álcool, apesar de algumas restrições (dificuldades para fornecimento ao mercado global em função da logística de escoamento do produto, do mercado interno crescente, da relação do preço de açúcar e álcool no mercado internacional, da confiança na disponibilidade regular do produto, dentre outros), o Brasil é hoje o maior produtor e exportador de álcool no mundo, seguido pelos EUA. A produção mundial de etanol em 2006 (incluindo álcool carburante e industrial) foi cerca de 50 bilhões de litros, dos quais o País participou com cerca de 36,0% deste volume (UNICA, 2012).

Tabela 2 – Participação do Brasil na produção, estoque e exportações de açúcar no comércio internacional nas safras de 2002/2003 a 2006/2007 (mil toneladas)

	2002/2003			2003/2004			2004/2005			2005/2006			2006/2007		
	Mundo	BR	%												
Estoque inicial	36.609	210	0,57	40.924	270	0,66	38.827	1.030	2,65	35.142	585	1,66	28.945	-285	-0,98
Produção	148.656	23.810	16,02	142.400	26.400	18,54	140.811	28.175	20,01	144.151	28.700	19,91	155.166	30.850	19,88
Importação	40.319	0	0	40.113	0	0	42.877	0	0	42.714	0	0	42.817	0	0
Oferta total	225.584	24.020	10,65	223.437	26.670	11,94	222.515	29.205	13,12	222.007	29.285	13,19	226.928	30.565	13,47
Exportação	46.345	14.000	30,21	45.862	15.240	33,23	46.317	18.020	38,91	47.720	18.250	38,24	47.698	19.550	40,99
Consumo doméstico	138.315	9.750	7,05	138.649	10.400	7,5	141.056	10.600	7,51	142.781	10.800	7,56	146.037	10.800	7,4
Estoques finais	40.924	270	0,66	38.926	1.030	2,65	35.142	585	1,66	31.506	-285	0,75	33.193	215	0,65

Fonte: Veiga Filho *et al.* (2008).

O volume das exportações mundiais de álcool em 2006 ficou em torno de 5 (cinco) bilhões de litros, sendo que o Brasil participou com 68%, sendo a maior parte da produção concentrada no Estado de São Paulo (UNICA 2012). Atualmente, ocorre concentração de produção de álcool no Brasil, e os custos nacionais são os menores entre os países produtores de combustível a partir da biomassa.

Conforme dados apresentados pela UNICA (2010), o setor canavieiro processou na safra de 1997/1998 303,1 milhões de toneladas de cana, produzindo 14,9 milhões de toneladas de açúcar e 15,4 milhões de metros cúbicos de álcool. Na safra de 2008/2009 foram processadas 569,1 milhões de toneladas de cana, produzindo 31,1 milhões de toneladas de açúcar e 27,6 milhões de metros cúbicos de álcool, obtendo-se um crescimento de 87,8% em doze safras. Na Tabela 3 pode-se verificar a variação dessas medidas para as safras de 1997/1998 a 2008/2009 tanto para a sub-região Norte-Nordeste (NN), quanto para a sub-região Centro-Sul (CS).

Tabela 3 – Dados de produtividade da safra 1997/1998 a 2008/2009

Safra	Cana (mil toneladas)		Açúcar (toneladas)		Álcool (m ³)	
	CS	NN	CS	NN	CS	NN
97/98	248.775	54.282	11.354.475	3.526.216	13.251.527	2.144.936
98/99	269.781	45.141	15.160.279	2.781.830	12.216.817	1.631.216
99/00	263.949	43.017	16.900.182	2.487.333	11.653.712	1.368.092
00/01	207.099	50.523	12.643.341	3.612.764	9.064.364	1.528.671
01/02	244.218	48.832	15.972.162	3.245.849	10.176.290	1.359.744
02/03	270.407	50.243	18.778.055	3.789.205	11.152.084	1.471.141
03/04	299.121	60.195	20.420.477	4.505.316	13.068.637	1.740.068
04/05	328.697	57.393	22.085.132	4.536.089	13.591.355	1.825.313
05/06	337.714	49.727	22.084.810	3.820.913	14.352.542	1.594.452
06/07	372.285	53.251	25.784.133	4.098.300	16.006.345	1.712.864
07/08	431.114	64.610	26.200.606	4.825.564	20.333.466	2.193.358
08/09	504.963	64.100	26.749.819	4.299.387	25.101.963	2.410.999

Fonte: UNICA (2010).

Segundo Veiga Filho *et al.* (2008) o Brasil deverá aumentar a produção açucareira a uma taxa média de 5,0% nos próximos dez anos para atender à maior demanda mundial e, se esta previsão se confirmar, na safra de 2014/2015 o montante a ser produzido será de 42,4

milhões de toneladas, sendo o volume de exportações de 29 milhões de toneladas e o consumo interno de 12,5 milhões de toneladas.

Os autores estimam ainda que em 2015 a produção brasileira de álcool seja de 36 (trinta e seis) bilhões de litros, dos quais 28 (vinte e oito) bilhões sejam utilizados pelo mercado interno e cerca de 8 (oito) bilhões de litros sejam encaminhados para exportação.

As perspectivas de crescimento sustentado dos mercados de açúcar e álcool, seja em nível interno ou externo, são promissoras conforme pode-se observar na Tabela 4, o aumento da área cultivada com cana-de-açúcar nos principais estados produtores da região centro-sul – CS – do Brasil na safra 2008/09. Por configurar-se no papel da matriz energética, o álcool poderá viabilizar profundas mudanças na economia setorial. Dessa forma, estudos que visem tanto inovações tecnológicas na área industrial e na área agrícola, quanto melhorias na logística dos processos acarretando menores perdas e maior eficiência possuem muita relevância no intuito de auxiliar a melhoria e o crescimento do setor sucroalcooleiro brasileiro.

Tabela 4 – Aumento da área cultivada de cana da safra de 2007/2008 para a safra de 2008/2009

Estado	Safra 2007/2008 (ha)	Safra 2008/2009 (ha)	Variação em % <u>Safra (2007/2008)</u> <u>Safra (2008/2009)</u>
São Paulo	3.961.928	4.445.281	12,2
Paraná	513.965	604.923	17,7
Minas Gerais	462.969	574.990	24,2
Goiás	308.840	432.009	39,9
Mato Grosso do Sul	212.551	290.990	36,9
Mato Grosso	217.762	231.060	6,1
Rio de Janeiro	94.613	100.399	6,1
Espírito Santo	59.231	70.086	18,3
Total	5.831.859	6.749.738	15,7

Fonte: UNICA (2011).

Além disso, segundo dados da UNICA (2012), a bioeletricidade (energia gerada a partir da biomassa do palhiço e do bagaço da cana-de-açúcar) foi a principal fonte de geração termoelétrica do País na safra de 2011/2012, representando cerca de 31% de toda a geração

termelétrica brasileira no período de maio a setembro de 2011, período mais crítico para o sistema elétrico nacional devido à escassez de chuvas. É possível perceber, com isso, a importância dessa fonte de energia para garantir a segurança e a sustentabilidade da matriz energética.

O planejamento das operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar exige grande esforço por parte da gerência agrícola, pois além de considerar as origens da matéria-prima (frentes de corte e carregamento – através de carregadoras, colhedoras, tratores-reboque etc), considera também os diferentes procedimentos de colheita (manual ou mecanizada) e os diversos tipos de equipamentos.

Segundo Mundim (2009), para que o abastecimento de cana-de-açúcar na moenda seja feito adequadamente é importante que as operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana, até a entrega dela na usina, sejam feitos com eficiência.

Barata (1992) fez uso da programação linear para avaliar economicamente as problemáticas relacionadas à etapa de corte e à reforma de canaviais. Lopes (1995) modelou um sistema de transporte, carregamento e reboque com o objetivo de identificar e avaliar os fatores que influenciavam o custo de cada operação. Grisotto (1995) aplicou um modelo de otimização para o transporte de cana-de-açúcar utilizando transporte ferroviário.

Houve um crescimento de estudos que visassem desenvolver e aplicar modelos matemáticos e a utilização de *softwares* para auxiliar nas principais operações do setor sucroalcooleiro, destacando-se os modelos de planejamento da colheita, modelos de programação do transporte de cana-de-açúcar, e, também, o planejamento agregado da produção, contemplado pelas etapas agrícolas de corte, carregamento e transporte e as etapas de processamento desses produtos, bem como, a melhor combinação de produção, visando à obtenção de uma máxima margem de contribuição.

Visando para atingir os objetivos de um desempenho eficaz, ou seja, maior qualidade, confiabilidade, rapidez, flexibilidade e redução de custos, a modelagem computacional é uma ferramenta importante no processo decisório, pois permitem a avaliação comparativa de sistemas tendo em vista observar como ficará a situação de operação real quando esta for implementada, reduzindo assim, as chances de se obter situações inesperadas, já que elas podem ser simuladas antecipadamente.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em seis capítulos. Após este capítulo de introdução, o Capítulo 2 descreve o sistema de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar da lavoura à usina, abordando as peculiaridades e especificações de cada uma destas etapas integrantes do processo agrícola da produção de álcool e açúcar.

No Capítulo 3 são abordados alguns conceitos derivados da Teoria dos Grafos que servirão de base para o entendimento do Problema de Roteirização em Arco e para os estudos de diversos autores caracterizando e descrevendo esse problema e suas variantes.

No Capítulo 4 são abordados conceitos básicos a respeito de modelagem, simulação e geração de cenários e conceitos específicos do *software* TransCAD que será aplicado no módulo de roteirização em arco.

No Capítulo 5 foi proposto um Estudo de Caso baseado em dados obtidos em uma Usina produtora de álcool e açúcar do Estado de Minas Gerais, que posteriormente serviram para a aplicação do *software* TransCAD na elaboração de cenários que minimizem os gastos no sistema de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar e gerando assim uma condição otimizada na área de colheita.

Por fim, no Capítulo 6 estão apresentadas algumas conclusões referentes ao estudo.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE

Segundo informações contidas na Grande Encyclopédia Ilustrada Larousse Cultural (1995), a cana-de-áçucar foi introduzida na China antes do início da Era Cristã. Seu uso no Oriente, provavelmente na forma de xarope, data da mais remota Antiguidade. Foi introduzida na Europa pelos Árabes, que iniciaram seu cultivo na Andaluzia. No século XIV já era cultivada em toda região mediterrânea, mas a produção era insuficiente, levando os europeus a importarem o produto do oriente. A guerra entre Veneza, que monopolizava o comércio de açúcar, e os turcos, no século XV, levou a sociedade da época à procura de outras fontes de abastecimento. A cana, então, passou a ser cultivada na Ilha da Madeira pelos portugueses, e nas Canárias pelos espanhóis. O descobrimento da América permitiu extraordinária expansão das áreas de cultura da cana.

As primeiras mudas, trazidas da Ilha da Madeira, chegaram ao Brasil em 1502, e já em 1550, numerosos engenhos espalhados pelo litoral produziram açúcar de qualidade equivalente ao produzido pela Índia.

Incentivado o cultivo da cana pela metrópole, com isenção do imposto de exportação e outras regalias, o Brasil tornou-se, em meados do século XVII, o maior produtor de açúcar de cana do mundo.

O país perdeu essa posição durante muitas décadas, mas a partir da década de 1960 houve uma modernização do setor sucroalcooleiro, impulsionada por um momento extremamente favorável de alta de preços do açúcar no mercado internacional, que atingiu cotações

históricas de mais de mil dólares por tonelada. Com os preços vantajosos, o aumento da demanda de açúcar e com os recursos decorrentes desse aumento, foi criado o Fundo Pró-Açúcar em 1973, que financiou a modernização das usinas de açúcar.

Em virtude do primeiro choque do petróleo, iniciou-se em 1975 o início da produção de álcool combustível e a criação do programa nacional do álcool (PROÁLCOOL), com o objetivo de estimular a produção do álcool (através de incentivos como a criação de linhas de financiamento com condições favoráveis, garantias de preços e de compra, incentivos fiscais para carros a álcool entre outros), e visando o atendimento das necessidades do mercado interno e externo e da política de combustíveis automotivos.

Além disso, houve a criação do plano real, do contra choque do petróleo, da conscientização dos países desenvolvidos com relação ao aquecimento global e do desenvolvimento de carros híbridos, fatos ocorridos a partir da década de 1990, o Brasil voltou a ser o maior produtor mundial de álcool combustível e o faz ao custo mais baixo.

Atualmente, a característica principal da indústria canavieira tem sido a expansão através do latifúndio, resultando em alta concentração de terras nas mãos de poucos proprietários, normalmente conseguida através da incorporação de pequenas propriedades.

O setor sucroalcooleiro possui também algumas características específicas como a sua sazonalidade na produção agrícola (a cana-de-açúcar é cultivada, principalmente, em clima tropical onde se alternam as estações secas e úmidas) e a continuidade da operação de moagem durante toda a safra. Sua floração, em geral, começa no outono e a colheita se dá na estação seca, durante um período de 3 a 6 meses.

Segundo Silva (2006), o período de moagem da cana é definido por três fatores relacionados ao clima seco. Primeiramente, a cana tem seu teor de sacarose aumentado em virtude do *stress* hídrico causado pela menor disponibilidade de água. Em segundo lugar, do ponto de vista agronômico, a colheita apresenta menor risco de causar danos como a compactação do solo e o dilaceramento de soqueiras (raízes de cana) devido à movimentação das máquinas no campo. Por fim, a interrupção frequente do processo de colheita e transporte devido à chuva reduz a confiabilidade de entrega de cana na indústria. Fora os danos agronômicos, a colheita em estação úmida proporciona o envio de impurezas

minerais (solo) para a usina, o que causa o desgaste de equipamentos e perda da eficiência industrial de fabricação de açúcar e álcool.

2.1 EQUIPAMENTOS DE COLHEITA

Dentro do ciclo operacional gerado pela cana-de-açúcar, a etapa da colheita pode ser considerada como uma das mais importantes, pois dela depende a qualidade do produto entregue às usinas.

A escolha dos equipamentos de colheita é feita em função de como a cana será colhida: inteira ou picada e das condições técnicas e econômicas de cada usina. A escolha do tipo de corte dos colmos – manual (cana inteira) ou mecanizado (cana Picada) - da cana-de-açúcar dependerá de vários fatores como:

- Disponibilidade de mão-de-obra;
- Aspectos sócio-econômicos;
- Condições de campo (como a declividade do terreno);
- Subsistema de carregamento a ser utilizado, dentre outros.

As operações de corte tanto da cana inteira quanto da cana picada envolvem complexas interações na alocação e uso dos equipamentos nas frentes de corte. Pretende-se, com isso, maximizar o tempo produtivo e o uso da capacidade dos veículos, equipamentos de corte e carregamento (tratores, carregadoras e colhedoras) e operadores, evitando assim tempos ociosos em filas e esperas por cana ou outros equipamentos dos quais depende a continuidade das operações (SILVA, 2006).

Além das colhedoras, estão presentes nas frentes de serviço caminhões-tanque para o abastecimento de combustíveis e lubrificantes das máquinas e caminhões-oficina equipados com os instrumentos necessários para a realização de reparos e manutenção das colhedoras in loco.

As colhedoras operam acompanhadas de um veículo (geralmente tratores, pois são mais leves e evitam o comprometimento do solo em virtude de compactação) que tracionam

uma ou mais caçambas, que, por sua vez, recebem a cana, que pode ser estar inteira ou picada, conforme Figura 1. Assim, o carregamento da cana cortada para a usina é feito simultaneamente ao corte, dispensando as carregadeiras mecânicas (guinchos) e os seus operadores.



FIGURA 1 – Colheita da cana-de-açúcar com a utilização de transbordos.

As caçambas, denominadas transbordos, têm a função tanto de receber a cana-de-açúcar das colhedoras quanto de transferi-la para os caminhões que aguardam nos carreadores principais (Figura 2) e que transportarão a cana diretamente para a usina.

Segundo Ripoli e Ripoli (2008), nos subsistemas de transporte rodoviário existem 2 tipos de transbordo a serem considerados: o transbordo direto e o transbordo intermediário.

O transbordo direto é utilizado em sistemas de colheita que utilizam colhedoras (combinadas), portanto a matéria-prima encontra-se na condição de colmos picados. Para o acompanhamento das colhedoras são utilizados reboques tracionados por tratores de rodas ou veículos especiais. Neste sistema há a exigência de montagem de dispositivos independentes que permitem a operação de transbordo.



FIGURA 2 – Transferência da cana-de-açúcar dos transbordos para os caminhões.

No transbordo intermediário a própria unidade de transporte possui dispositivos hidráulicos que permitem o auto-descarregamento. Em média, esses equipamentos de transbordo possuem capacidade líquida de carga de 4 a 12 toneladas. É importante lembrar que a utilização desses veículos é justificada para condições de solo onde a compactação é problema, pois eles exercem menores pressões sobre o terreno do que os caminhões trucados convencionais.

Ainda segundo os autores, a operação de transbordo intermediário é genericamente justificada quando as frentes de corte encontram-se além de 25 km da unidade industrial. Com este tipo de manejo de transporte é possível agilizar o fluxo de veículos, acarretando uma diminuição sensível dos custos de tonelada por quilômetro percorrido, pois se utilizam pequenas e lentas unidades para operar próximo às frentes de corte e as unidades mais velozes e de maior capacidade de carga para percorrer as grandes distâncias.

Nas frentes de cana picada com utilização de transbordos, a razão entre tratores-transbordo e colhedoras normalmente varia entre 1,5 e 2, ou seja, supondo-se uma frente com 4 colhedoras, a quantidade de tratores-transbordo varia de 6 a 8 unidades. Quando a alocação destes tratores-transbordo pelas colhedoras não é fixa, após a transferência de carga para o caminhão, o operador do trator-transbordo é informado via rádio para qual colhedora deve

se dirigir para efetuar o próximo carregamento. Já nas frentes de cana inteira, a razão ideal entre tratores-reboque e carregadoras varia em função do tipo de transporte que a frente está trabalhando. Se a frente estiver trabalhando apenas com caminhões que possuam dois reboques, além do caminhão plataforma, a necessidade de tratores-reboque é maior do que se estivessem sendo utilizados apenas caminhões-plataformas com reboque (SILVA, 2006).

É importante ressaltar que, a maneira como é tratada a interação entre os recursos mecanizados (caminhões, colhedoras, tratores-reboque, carregadoras e tratores-transbordo) e operadores de máquinas facilita a identificação dos gargalos no sistema. A utilização de ferramentas computacionais como programas de simulação, de roteirização de veículos, dentre outros, facilita a obtenção de solução para melhor balanceamento dos recursos, visto que alguns destes recursos podem interferir ou limitar a capacidade de operação do sistema logístico.

2.2 FRENTES DE CORTE

A cana-de-açúcar que chega à usina vem de pontos distintos, fazendas diferentes, de setores chamados talhões. Podem existir várias frentes de corte nos talhões, dependendo da capacidade de moagem da usina, da distribuição geográfica, da dimensão das fazendas, dentre outros fatores. Segundo Hanh (1994), o número de frentes de corte trabalhadas diariamente varia de três até mais de doze, de acordo com a quantidade de cana estimada em cada frente e a capacidade de moagem diária da usina.

Além disso, as frentes são fundamentais para a otimização dos recursos, pois a sua distribuição em diferentes distâncias permite operar com distância média que optimiza o uso dos equipamentos e que garanta o abastecimento contínuo da indústria, acarretando na racionalização dos recursos necessários para a realização da colheita. Do contrário, o procedimento com uma única frente de trabalho seria ineficiente, pois haveria sobra de equipamentos quando as distâncias fossem curtas e falta deles quando as distâncias fossem maiores, o que certamente levaria a uma estrutura superdimensionada, com pesados ônus para o processo produtivo e para a organização.

Cada frente de trabalho é composta por equipes de corte (manual, semi-mecanizado e mecanizado), carregamento, transbordo e transporte. Com grande frequência e quando as condições possibilitam as frentes mais distantes devem ser programadas para terminarem os trabalhos algumas semanas antes das frentes mais próximas. Os desgastes dos equipamentos e condições climáticas normalmente aumentam a exigência de uma maior disponibilidade de equipamentos para garantir o suprimento da fábrica. No final da safra a ocorrência de quebras é mais frequente e a ocorrência de chuvas aumenta a demanda de equipamentos para aproveitar os momentos com condições para a retirada da cana do campo (MILLER, 2010).

Ao longo da safra, a entrega de cana pelos fornecedores não é uniforme, tendo em vista que nos meses de julho e agosto a cana atinge seu ponto máximo de sacarose, levando os fornecedores a concentrar sua entrega nesse período, em virtude de sua melhor remuneração.

Dessa forma, é extremamente importante o adequado planejamento por parte da gerência agrícola visando equilibrar o risco da falta de cana na usina, a fim de que se obtenha, ao longo do período de safra canaviais com padrões desejáveis de maturação, adequadamente distribuídos por toda a área pertencente a uma agroindústria ou de fornecedores.

2.2.1 Frentes de Cana Inteira

O processo de mecanização da colheita de cana de açúcar no Brasil teve início nos anos 70, quando surgiu uma das primeiras patentes de colhedoras de cana-de-açúcar e quando a empresa Motocana Máquinas e Implementos Ltda lançou seu primeiro protótipo de colhedora de cana. Na mesma época as empresas nacionais fabricantes de implementos agrícolas lançaram as máquinas cortadoras de cana inteira acopladas em trator agrícola (NEVES, 2003).

Atualmente, a colheita mecânica comercial de cana inteira não é muito utilizada. Portanto, quando uma frente é identificada como sendo de cana inteira, entende-se que o sistema seja semi-mecanizado, ou seja, com corte manual e carregamento mecânico.

Os caminhões que chegam até a frente de cana inteira se dirigem ao ponto de engate e desengate onde fazem o desprendimento dos reboques, que são, então, atreladas aos

tratores-reboque. A seguir, os caminhões desengatados e os tratores com os reboques acoplados dirigem-se para alguma carregadora dentro da área de colheita. Esta escolha se dá em função da carregadora que estiver mais livre. As carregadoras permanecem paradas junto à cana disposta em montes ou esteirada. O caminhão ou o trator é posicionado ao lado da carregadora, que se movimenta, coletando a cana com suas garras e depositando o feixe na carroceria do caminhão ou reboque.

Após a conclusão da carga, os caminhões e os tratores-reboque puxando os reboques dirigem-se ao ponto de engate e desengate, onde foram desprendidos dos tratores, que seguem para atrelar algum reboque vazio ou simplesmente aguardam a sua chegada. Os reboques se prendem aos caminhões para formar, novamente, a composição de transporte completa (popularmente denominados de Romeu e Julieta e treminhão). Após a montagem do caminhão, é feito o acerto de carga, quando as pontas das canas são aparadas rente à carroceria, além da amarração da carga. Realizado esse processo, o caminhão retorna à usina.

2.2.2 Frentes de Cana Picada

As primeiras máquinas colhedoras de cana picada surgiram no final da década de 1970. Nos sistemas de cana inteira, os reboques são desprendidos dos caminhões e os equipamentos entram na área de colheita. Já os sistemas mais modernos utilizam transbordo, implemento que possui uma caçamba atrelada ao trator, e que possibilita transferir a cana recebida da colhedora para os caminhões. Nesse sistema, além de possibilitar ao caminhão trazer uma carga maior por viagem, dada a possibilidade de aumentar a sua carroçaria, os caminhões não entram na área de colheita, o que reduz a ocorrência de compactação do solo.

Os caminhões de cana picada chegam primeiro e permanecem estacionados em uma área denominada malhador. Os tratores rebocando os transbordos - normalmente duas unidades - vêm até os caminhões, acionam os pistões hidráulicos e a carroçaria dos transbordos se eleva, transferindo a carga para os caminhões.

Após a transferência, os tratores se dirigem para as colhedoras, que permanecem no interior da área de colheita. A colhedora realiza sequencialmente o corte, a picação e a limpeza da cana, conduzindo-a para os transbordos. Após a conclusão da carga, os tratores

se dirigem novamente ao malhador e transferem a cana para os caminhões, fechando, assim, o ciclo operacional. Quando a carga dos caminhões é finalizada, estes se dirigem para a usina.

2.3 SISTEMAS DE COLHEITA

Ripoli e Ripoli (2007) conceituam os subsistemas de colheita existentes como sendo três:

- Sistema Manual: os subsistemas de corte e de carregamento se processam de forma manual, podendo haver um subsistema de transporte intermediário, por tração animal ou transbordo com dispositivos específicos. Este tipo de corte pode ser precedido ou não por queima da palha, conforme Figuras 3 e 4. Embora seja um sistema aparentemente arcaico, ainda é utilizado em regiões declivosas do nordeste brasileiro.



FIGURA 3 – Corte Manual de cana crua.

Fonte: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_98_22122006154841.html.



FIGURA 4 – Corte Manual de cana queimada.

Fonte: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_98_22122006154841.html.

- Sistema Semi-mecanizado: envolve o subsistema de corte manual e o subsistema de carregamento por carregadoras mecânicas. Este sistema é utilizado quando a declividade do relevo não ultrapassa 20% a 25%.
- Sistema Mecanizado: utiliza um subsistema mecanizado com cortadoras de diversos tipos, ou por colhedoras de cana inteira com subsistema de carregamento mecânico ou utiliza subsistema por colhedoras de cana picada como é mostrado na Figura 5 Admite-se a utilização deste sistema em relevos de 15% a 17% de declividade, sendo que valores acima destes comprometem o trabalho.



FIGURA 5 – Colheita Mecanizada.

Genericamente, os sistemas são identificados pela forma como a cana é recebida na indústria: inteira ou picada. Quando uma frente de corte é identificada como sendo de cana inteira, subentende-se que o sistema seja semi-mecanizado, ou seja, corte manual e carregamento mecânico, porém a colheita mecânica comercial da cana inteira não é muito difundida atualmente. Já o termo cana picada se refere ao sistema que emprega colhedoras para efetuar o corte e o carregamento (SILVA, 2006).

De acordo com BRAUNBECK e MAGALHÃES (2004) os processos convencionais de colheita manual ou mecânica, com queima prévia, visam apenas o aproveitamento dos colmos e está constituído de uma sequência de operações simples que incluem o corte da base, do ponteiro e a picagem ou empilhamento dos colmos. Atualmente esta concepção de colheita está sofrendo modificações em função de restrições legais e ambientais ao processo de queima da cana-de-açúcar (MAGALHÃES e BRAUNBECK, 1998). Isso acarreta implicações profundas nos processos convencionais de colheita, tanto manual quanto mecânica, implicações estas associadas com perdas de matéria-prima, contaminação de cana com impurezas minerais, altos investimentos para a colheita.

A prática da queima da palha da cana (prejudicial à manutenção dos níveis de matéria orgânica do solo) vem sendo contestada por órgãos públicos e comunidades preocupadas

com os efeitos dessa prática agrícola sobre a saúde, a segurança, a qualidade de vida da população e dos trabalhadores rurais, somando-se à preocupação com a poluição do ar, os riscos de incêndios e os desmatamentos.

A mudança na etapa do corte, de manual para mecânico, não é apenas uma mera substituição de uma técnica por outra. Em termos agrícolas significa combinar e otimizar alguns aspectos: o preparo do solo na lavoura, o dimensionamento dos equipamentos no campo, a equipe de manutenção e apoio, o treinamento do pessoal envolvido e as alterações no transporte e recepção da cana na indústria (VEIGA FILHO, 1999).

A mecanização total ou parcial se apresenta atualmente como a única opção para a colheita da cana, tanto do ponto de vista ergonômico quanto econômico. Do ponto de vista institucional a Lei Federal nº 11.241/2002 estipula a eliminação gradativa da prática de queimadas nas colheitas de cana-de-açúcar em especial do uso do fogo direto, como método despalhador e facilitador do corte da cana-de-açúcar até 2021. E do ponto de vista ambiental, já que apenas o corte mecânico viabiliza a colheita sem queima prévia, o que por sua vez viabiliza o aproveitamento do palhiço de forma ainda não consolidada comercialmente na geração de energia e cobertura vegetal para agricultura convencional ou orgânica, dentre outros. Perfilha-se dessa forma um novo conceito de colheita da cana-de-açúcar, sem queima prévia, que visa o aproveitamento integral da planta, envolvendo operações adicionais para a retirada das folhas e a disposição adensada de colmos e palhiço para o transporte.

É importante ressaltar que, mesmo no corte mecanizado da cana crua, o risco de incêndio durante a operação é muito grande. As palhas secas que permanecem no talhão podem incendiar, seja porque entram em contato com as partes da máquina que, em virtude do funcionamento quase ininterrupto, estão superaquecidas, ou porque podem ser alvo por exemplo, de uma ponta de cigarro acesa atirada de forma descuidada. Como medida de prevenção, permanece no talhão um caminhão-tanque carregado com água, que é utilizada para apagar possíveis focos de incêndio e para lavar as partes da máquina onde se acumulam as palhas secas.

2.4 TRANSPORTE

O estabelecimento de subsistemas de transporte deve iniciar-se, em tese, concomitantemente com a implantação da base física agrícola da agroindústria, para que, com passar dos anos, ele não venha a ser considerado um gargalo nos processos de transferência da matéria-prima da lavoura à usina.

As grandes extensões que caracterizam as unidades canavieiras no Brasil e a flexibilidade das operações no transporte são responsáveis pela consagração do transporte rodoviário como sendo a principal opção de transporte da cana, embora não seja a mais viável economicamente. Esta situação é resultante da política de transportes desencadeada nos primórdios da implantação da indústria automobilística no Brasil. A fim de estimular e favorecer a comercialização de veículos rodoviários intensificou-se a construção de rodovias. Por este motivo, não houve interesse no desenvolvimento e ampliação dos sistemas ferroviários e hidroviários, mesmo estes sendo considerados mais econômicos para o transporte de carga (RIPOLI e RIPOLI, 2007).

Sendo assim, os tipos de transportes da cana utilizados no país são: ferroviário, hidroviário e rodoviário, sendo o último o de maior utilização.

2.4.1 Transporte Ferroviário

Este tipo de transporte – que pode ser visto na Figura 6 - é muito utilizado em outros países, como Austrália e Cuba, em que a maior parte da produção agrícola chega a usina por esse modo de transporte. Porém é pouco utilizado no Brasil, já que são poucas as usinas que possuem infraestrutura, ou seja, sistema de trilhos para o recebimento da cana-de-açúcar vinda da lavoura.



FIGURA 6 – Transporte Ferroviário de cana-de-açúcar.

Fonte: <http://www.sacaroseonline.com.br>

2.4.2 Transporte Hidroviário

O transporte hidroviário (Figura 7), assim como o transporte ferroviário, atua concomitantemente com o transporte rodoviário. A maior desvantagem deste tipo de transporte de cana é o tempo gasto nessa etapa, que pode acarretar a perda da qualidade da matéria-prima vinda da lavoura. Embora sua utilização seja muito promissora, sobretudo no transporte dos produtos finais, sua utilização ainda é incipiente para o transporte da produção de cana do Brasil.

Segundo informações de Ripoli *et al.* (1984) na Usina Diamante, hoje pertencente ao Grupo COSAN, localizada na Bacia do Médio Tietê, SP, foi implantado um sistema de transporte hidroviário a partir da década de 1980 que é uma experiência pioneira até o presente momento. Nesta usina foram instalados 4 (quatro) pontos de transbordo, por meio de guindastes, nos quais, a matéria-prima é transferida às chatas. A máxima distância em que se opera com esse sistema de transporte é de 35 km, porém se essa matéria-prima fosse transportada por rodovias, a distância percorrida corresponderia a aproximadamente 100 km. Observou-se que o uso deste tipo de transporte reduziu os custos na ordem de 53,1%, em decorrência da associação do transporte fluvial com o rodoviário cuja distância média de transporte por rodovia não ultrapassa a 10 km da indústria.



FIGURA 7 – Transporte Hidroviário de cana-de-açúcar.

Fonte: <http://www.sacaroseonline.com.br>

2.4.3 Transporte Rodoviário

Através da malha rodoviária circula cerca de 95% de toda cana-de-açúcar colhida no País e as vias utilizadas podem pertencer à propriedade, aos municípios, aos estados ou ao Governo Federal (Figura 8).



FIGURA 8 – Transporte Rodoviário de cana-de-açúcar.

Fonte: <http://www.sacaroseonline.com.br>.

O segmento primário da malha rodoviária de uma propriedade são os carreadores. Os carreadores são estradas de largura média de 5 a 7 metros que tem por função além de separar e delimitar os talhões da cultura de cana, servir de espaço de manobra de toda maquinaria agrícola envolvida no processo de produção e transferência da cana. Sua arquitetura básica é determinada pelo traçado dos talhões, o qual, por sua vez, é função do relevo da área e demais aspectos ligados ao planejamento organizacional da base física agrícola.

A otimização dos transportes é importante para garantir o abastecimento de cana nas usinas a um custo mínimo em vista dos altos custos envolvidos na cadeia produtiva. As frotas podem conter caminhões com capacidades e características operacionais diferentes ou então constituir-se apenas por um tipo de caminhão.

O tipo e as dimensões das carroçarias para acomodação da carga podem variar em função do tipo de cana a ser carregada, da forma como pode ser carregada, da distância do campo de produção à unidade industrial, das condições de tráfego das vias de circulação e dos custos operacionais de cada tipo de transporte.

Dentre os veículos disponíveis para o transporte da cana, os caminhões são os mais utilizados. O mercado oferece grande variedade de modelos que podem transportar de 8 a 60 toneladas de carga líquida, conforme Tabela 5. As composições de transporte de cana mais utilizadas são apresentadas na Tabela 6.

O mais conhecido e difundido nas empresas do setor é o caminhão com um reboque (Romeu e Julieta), mas também é usado o caminhão com dois reboques (Treminhão) e o cavalo mecânico com dois semi-reboques (Rodotrem). Todos esses tipos de caminhões podem ser encontrados para colheita manual ou mecanizada. Nos conjuntos em que são acoplados reboques/semi-reboques é necessário que possuam rala fixa (ligação definitiva ao veículo rebocado) ou a utilização do dolly canavieiro (distribuidor de peso constituído de suspensão e rodas, ligados ao veículo rebocado).

Tabela 5 – Tipos de caminhões

Descrição	Esquema	Nome popular
Caminhão plataforma		“Truck”
Caminhão plataforma com um reboque acoplado		“Romeu e Julieta”
Caminhão plataforma com dois reboques acoplados		“Treminhão”
Cavalo mecânico com dois semi-reboques acoplados		“Rodotrem”

Fonte: SILVA, 2006.

Algumas empresas adotam o sistema de “Bate Volta”, onde os caminhões do tipo “cavalo mecânicos” que permitem o engate de caçambas que recebem a cana do transbordo, desacoplam os reboques carregados no pátio da usina e engatam-se outro reboque vazio para o retorno a área de colheita. Para a movimentação dessas unidades no pátio industrial é utilizado o caminhão “escravo”, que tem a função de transportar a cana do pátio da usina até a mesa alimentadora. Esse sistema tem como objetivo maximizar o uso do cavalo-mecânico, diminuindo o tempo de permanência na usina, o custo do transporte e o desgaste dos equipamentos, visando o melhor aproveitamento da frota, visto que esta estratégia tenta garantir o funcionamento ininterrupto das colhedoras.

Tabela 6 – Capacidade de carga dos veículos utilizados no transporte de cana

TIPO DE VEÍCULO	CAPACIDADE DE CARGA (toneladas)
Caminhão Trucado	23,00
Caminhão Simples	31,50
Romeu e Julieta	50,00
Treminhão	63,00
Rodotrem	74,00

Fonte: Lei da Balança (2001), adaptada.

A composição de transporte e o tipo da carroçaria utilizada para transportar a cana do campo para a usina variam em função da quantidade ideal de cana a ser transportada. Variações do ambiente, como o clima, a localização das frentes de corte (quando a colheita precisa ser feita em áreas muito distantes da usina), do tipo de estrada e especificações da frota da necessidade de potência do motor do caminhão, da capacidade de carga transportada por viagem, das velocidades de deslocamento do caminhão vazio ou carregado, do tipo de carregamento e do tipo de descarga na usina também podem influenciar tanto no tipo de carroçaria a ser utilizado, quanto na escolha da composição.

Por outro lado, a ociosidade de caminhões no pátio também é motivo de grande preocupação devido ao alto custo de investimentos, mão-de-obra e combustível, além da falta que estes veículos fazem no campo, pois se não houver caminhões disponíveis para receber a cana colhida, não haverá trabalho para operários e máquinas.

É importante ter uma visão sistêmica da cadeia logística de corte, carregamento e transporte da cana, que representam 30% do custo total de produção, sendo que somente os gastos com transporte equivalem a 12% desse total (CARREIRA, 2010).

2.5 TURNOS DE TRABALHO

Uma usina de açúcar opera 24 horas ininterruptamente. As paradas só ocorrem devido a chuvas ou para manutenção prevista na indústria quando cessa o transporte de cana. A parada prevista para manutenção, em média a cada 20 dias, tem a tendência atual de ter um intervalo de tempo maior, com o intuito de melhorar o aproveitamento de tempo.

A cana pode ser transportada continuamente durante 24 horas – os turnos de trabalho dos operadores e motoristas são estabelecidos levando-se em conta as restrições legais, sendo usualmente considerados três turnos de oito horas ou, em alguns casos, apenas dois turnos - ou somente durante um período, interrompendo-se parte da noite, muitas vezes em virtude de fatores de segurança de tráfego, já que em algumas regiões o trânsito noturno de composições longas (maiores de 19,8 m) não é permitido pelo Departamento de Estradas de Rodagem – DER. A vantagem do transporte contínuo é a utilização mais racional do sistema e o menor investimento relativo.

Segundo Silva (2006), no sistema de dois turnos, mencionado anteriormente, a jornada máxima permitida pela legislação é de 10 horas (oito horas trabalhadas e duas horas extras). Como a usina opera 24 horas por dia, nesse sistema há a necessidade de se contar com a alimentação de cana armazenada no pátio ou sobre rodas, nos períodos em que houver interrupção do transporte.

O pátio é um depósito aonde a cana inteira é armazenada e cuja movimentação até o ponto de recepção para moagem é feita por intermédio de pontes rolantes ou de pás carregadoras. Já a cana sobre rodas é a prática de se manter na usina caminhões e reboques carregados com cana inteira ou cana picada que são movimentados por tratores ou caminhões até os pontos de descarregamento na esteira para moagem. Estas duas práticas visam suprir a usina nas paradas entre os turnos ou em caso de falha no abastecimento de cana.

Para evitar que os caminhões cheguem juntos na frente de corte e carregamento e ocasionem a ocorrência de filas, pode-se também, tanto no sistema de dois turnos quanto no de três turnos, escalonar o horário de entrada de operadores e motoristas em uma ou duas horas, fazendo com que parte dos funcionários inicie seu trabalho com defasagem dos demais.

Quanto ao transporte intermitente, há necessidade de maior quantidade de veículos, tratores e colheitadeiras, o que acarreta um investimento maior em equipamentos e também a necessidade de investimento na infraestrutura da indústria para estocagem e posterior alimentação de cana.

Um fator que deve ser levado em conta no transporte de cana é a deterioração da matéria-prima após o corte. Além da perda de sacarose, no processamento na indústria a qualidade do açúcar fica muito prejudicada e a fermentação torna-se mais difícil. Via de regra, a cana deve ser processada no máximo 36 horas após o corte.

2.6 ESTOQUE DE CANA NO PÁTIO

O sistema de suprimento de matéria-prima em usinas sucroalcooleiras é composto pelo CCT (corte, carregamento e transporte), pela recepção, descarregamento e pela

armazenagem no pátio da usina. Ou seja, após o corte e carregamento a cana-de-açúcar é transportada diretamente para a usina, não sofrendo nenhuma espécie de armazenagem de longo prazo. Assim, chegando à usina, a cana sofre um rápido processo de amostragem da qualidade e é descarregada para moagem propriamente dita. Porém, uma parcela desta cana pode ser descarregada no pátio, para uma armazenagem rápida da matéria-prima no interior da usina antes de ir para a moagem. Este processo garante a alimentação das moendas nos momentos de descontinuidade de entrega, compensando assim os horários de alta oferta com os de baixa oferta.

É importante observar que o tempo em que a cana-de-açúcar leva desde o momento das operações de CCT, passando pela recepção na usina, sua estocagem, até a moagem nas instalações da usina, chamado *Lead Time* é de fundamental relevância, visto que tem influência direta na qualidade do caldo da cana-de-açúcar e este, por sua vez, influencia na qualidade do açúcar e etanol produzidos pela usina. Quanto mais tempo a cana permanecer no pátio, mais rápida deve ser realizada a sua moagem. Assim, a cana que possuir um *Lead Time* menor normalmente é direcionada para o estoque.

2.7 OPERAÇÕES NA ÁREA INDUSTRIAL

O primeiro ponto relevante com relação às operações na área industrial é a existência de uma relação direta entre o transporte da cana-de-açúcar e o descarregamento na indústria. Se houver atraso no descarregamento por qualquer que seja o motivo, ocorrerá falta de reboque para realizar o transporte, que por consequência acarretará em paralisação da colheita no campo. Porém, sistemas mais modernos contemplam a alocação dinâmica dos caminhões em função da previsão de moagem futura e da probabilidade de ocorrência de filas na lavoura.

Para evitar atrasos e prejuízos, o ciclo dos caminhões na usina é bem definido. A Figura 9 mostra a sequência das operações na área industrial. A primeira operação é a pesagem dos caminhões (peso bruto) para registrar a quantidade de cana que vem da frente de corte. Após o descarregamento, o caminhão é pesado novamente para se obter o peso líquido da cana que entrou na usina.

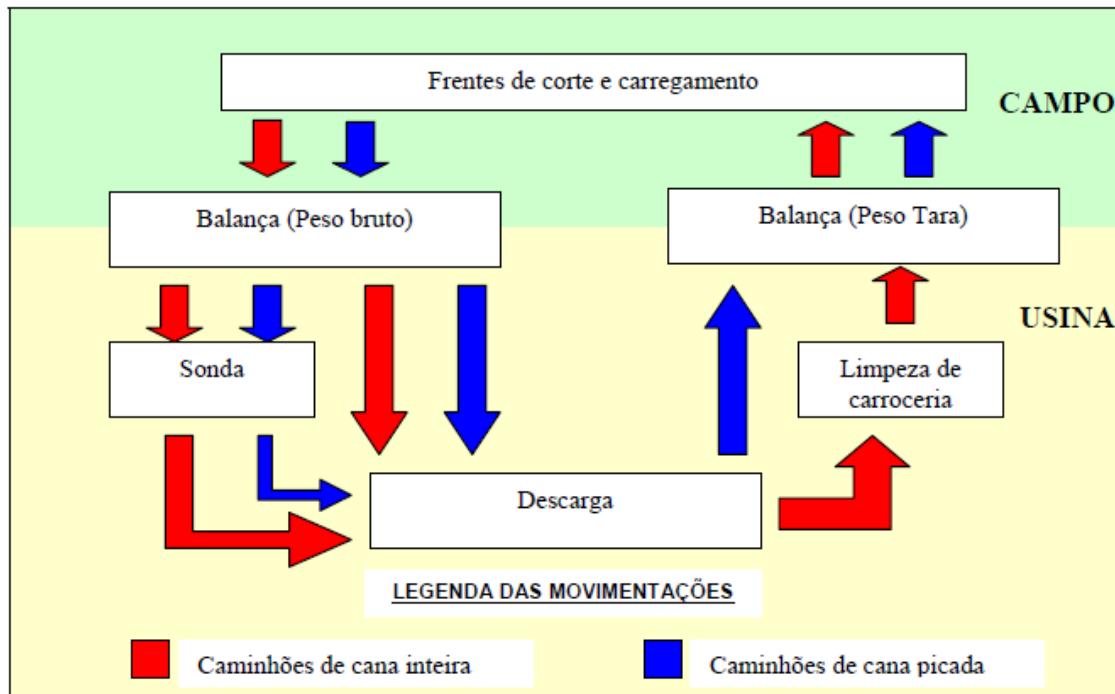


FIGURA 9 – Sequência das operações na área industrial.

Fonte: SILVA, 2006.

Em seguida, alguns caminhões seguem para a sonda onde amostras de cana são retiradas para realização de testes (conforme Figura 10). Nestes testes são obtidas informações como o nível de impurezas, o brix (teor de sólidos solúveis – ácidos orgânicos e açúcares), dentre outros e a determinação do preço a ser pago ao produtor. A escolha dos caminhões a terem amostras retiradas para análise é feita aleatoriamente.

Após a pesagem e a retirada de amostras para análise, os caminhões seguem para o descarregamento, que pode ser realizado nas esteiras (cana inteira e cana picada) ou a carga pode ser levada para o pátio (cana inteira).

O equipamento ideal a ser utilizado no descarregamento é determinado pelo tipo de caminhões e de cana (inteira ou picada) adotados pela empresa. Os sistemas de descarga de cana inteira mais comuns são a descarga por hilo (Figura 11) e a descarga por ponte rolante. Já os sistemas de descarga de cana picada mais utilizados são por báscula lateral (Figura 12) e por báscula superior.



FIGURA 10 – Passagem do caminhão pela sonda para retirada de amostras para realização de análises tecnológicas.



FIGURA 11 – Hilo para descarga de caminhões.
Fonte: SILVA, 2006.



FIGURA 12 – Descarga lateral em mesa rebaixada.

Fonte: RIPOLI E RIPOLI, 2007.

Após serem descarregados, os caminhões que transportam cana inteira passam por um processo de limpeza e retirada de restos de cana, e os caminhões que transportam cana picada seguem diretamente para a pesagem, para em seguida retornarem ao campo.

CAPÍTULO 3

ROTEIRIZAÇÃO

Segundo Ballou (2006), os custos de transportes variam em torno de um a dois terços dos custos logísticos totais. Reduzir os custos do transporte e melhorar os serviços aos clientes, descobrir as melhores rotas para os veículos ao longo de uma rede de rodovias, ferrovias, hidrovias ou rotas de navegação aérea a fim de minimizar o tempo e as distâncias constituem problemas muito frequentes de tomada de decisão, visto que aumentar a eficiência por meio da máxima utilização dos equipamentos e pessoal de transporte é uma das maiores preocupações do setor.

O termo *Roteirização*, embora não encontrado nos dicionários de língua portuguesa, é a forma que vem sendo utilizada como equivalente ao inglês “*routing*” para designar o processo de determinação de uma ou mais rotas ou sequências de paradas a serem cumpridos por veículos de uma frota, objetivando visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento. O termo *roteamento* também é utilizado por alguns autores, embora este termo seja mais utilizado quando associado às redes computacionais (CUNHA, 2000).

A maioria dos problemas de roteirização de veículos é baseada nos conceitos advindos da teoria dos grafos. Esses problemas de roteirização lidam com rotas sobre uma rede viária onde nós de demanda ou oferta são alocados. Assim, faz-se necessário conhecer, basicamente, alguns conceitos da Teoria dos Grafos.

3.1 TEORIA DOS GRAFOS

A teoria dos grafos estuda objetos combinatórios - os grafos - que são modelos para muitos problemas de gerenciamento de projetos, além de serem utilizados em vários ramos da matemática, da informática, da engenharia e da indústria (FEOLI OFF *et al.*, 2011).

O desenvolvimento da teoria dos grafos veio a acontecer sob o impulso das aplicações a problemas de otimização organizacional, dentro do conjunto de técnicas que hoje formam a pesquisa operacional, já na segunda metade do século XX. Este desenvolvimento não teria ocorrido sem a invenção do computador, como também a imensa maioria das aplicações de grafos seria totalmente impossível (BOAVVENTURA NETTO, 2006).

É importante observar que uma vez “descoberta” a teoria dos grafos, diversas aplicações em muitos outros campos de conhecimento, como ciências físicas ou humanas, foram rapidamente desenvolvidas (BOAVVENTURA NETTO, 2006).

3.1.1 Grafos

Acredita-se que um dos primeiros exemplos da utilização de grafos teria surgido devido as Pontes de *Königsberg* (atual Kaliningrado), antiga capital da Prússia Oriental. Em 1736, o matemático e físico suíço Leonhard Paul Euler utilizou grafos para explicar o problema que consistia em atravessar as sete pontes que separavam a cidade de *Königsberg*, passando apenas uma vez por cada uma delas (Figura 13).

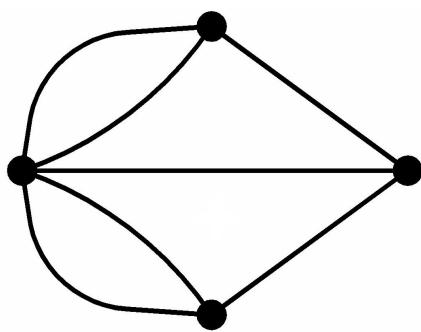


FIGURA 13 – Grafo estabilizado das Pontes de *Königsberg*.

Euler chegou à conclusão de que não seria possível tal façanha, visto que quando se caminha por um vértice, é necessário entrar e sair dele (ou vice-versa, no caso do ponto inicial), o que significa que se deve usar um número par de arestas cada vez que se passa por um vértice e o grafo acima possui vértices com número ímpar de arestas.

Matematicamente, um grafo G é formado por um conjunto V e E , sendo o conjunto V de pontos (nós ou vértices) ligados entre si por arcos (arestas), e o conjunto E de arcos (arestas) que interligam os pontos, ou seja, pares não ordenados de elementos de V . Simbolicamente é representado por $G = (V, E)$.

A maneira mais usada para representar graficamente um grafo é desenhar um círculo para cada ponto, e desenhar arcos ligando esses vértices como pode ser observado na Figura 14. Este grafo seria descrito da seguinte forma:

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$$

$$E = \{(V_1, V_3), (V_2, V_3), (V_3, V_4), (V_2, V_5), (V_4, V_5)\}$$

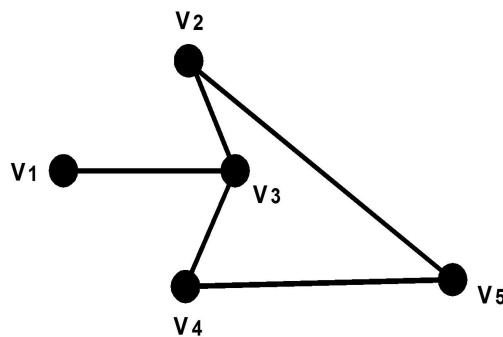


FIGURA 14 – Grafo Básico.

3.1.2 Grafo Orientado (Dígrafo)

De acordo com Novaes (1978), os arcos podem ser orientados ou não. Se tiverem uma direção associada, a representação é feita por uma seta para se obter um grafo direcionado conforme Figura 15. Neste caso denomina-se de arco ou aresta direcionada.

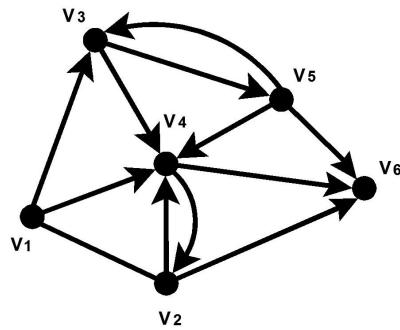


FIGURA 15 – Grafo Orientado.

3.1.3 Grafo Não orientado

Um grafo é dito não orientado quando não houver sentido em nenhum arco, ou seja, é possível percorrer o arco em qualquer sentido, sem restrições.

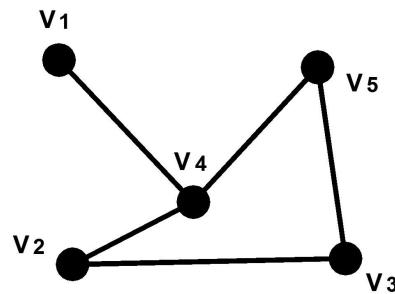


FIGURA 16 – Grafo não orientado.

3.1.4 Grafo Misto

Grafo misto é aquele que possui tanto linhas orientadas quanto linhas não orientadas.

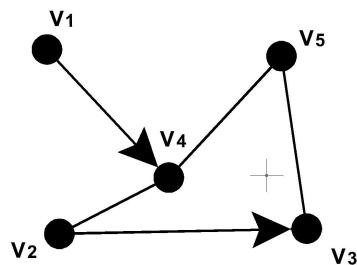


FIGURA 17 – Grafo Misto.

3.1.5 Grafo Rotulado

Nos grafos rotulados cada vértice ou nó é identificado, ou seja, cada nó é acompanhado de um rótulo que é habitualmente uma palavra, um número ou um código numérico. A rotulação dos nós implica, necessariamente, na rotulação das ligações. A Figura 18 mostra um exemplo de grafo rotulado:

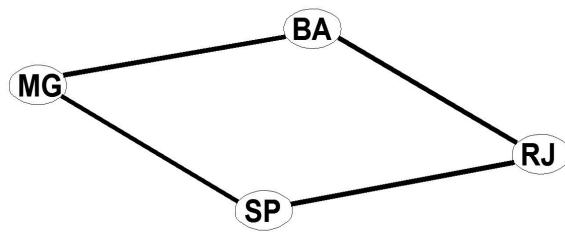


FIGURA 18 – Grafo Rotulado.

3.1.6 Grafo Valorado

Um grafo é dito valorado quando existem uma ou mais funções relacionando V e/ou E a conjuntos de números. Essas funções podem variar de acordo com o problema em análise. Na maioria das aplicações de grafos em problemas de engenharia, faz-se necessário a aplicação de grandezas tais como distâncias, altitudes, capacidades, fluxos, etc., associadas a localidades, estradas, entre outras que definem os nós e os arcos do grafo.

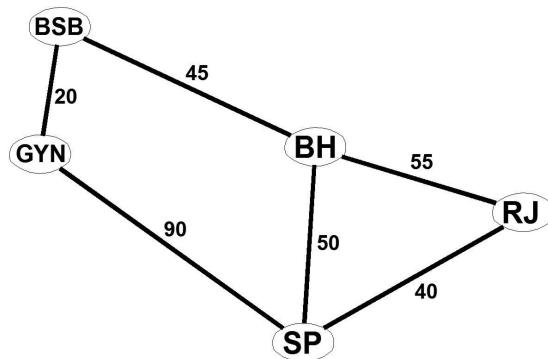
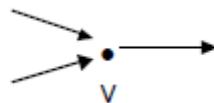


FIGURA 19 – Grafo Valorado.

3.1.7 Grau de Vértice

O grau de um vértice (nó) é o número de arcos adjacentes a ele. Em um grafo dirigido, o grau de entrada pode ser diferente do grau de saída do vértice (nó), como pode ser observado na Figura 20:



V possui grau de entrada 2 e de saída 1.

FIGURA 20 – Grau de Vértice.

3.1.8 Grafo Completo

Um grafo é denominado completo quando existe ao menos um arco entre dois nós quaisquer do grafo. O grafo completo não orientado recebe a nomenclatura designada por K_n , onde n é número de nós. Na Figura 21 podem ser vistos grafos com seus respectivos K_n :

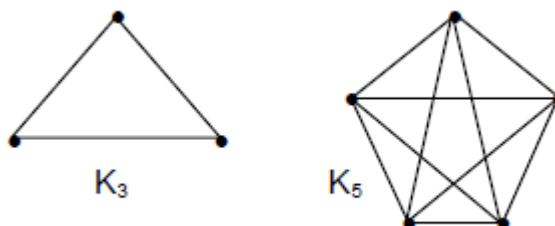


FIGURA 21 – Grafo Completo.

3.1.9 Percurso de um Grafo

Boaventura Netto (2006) define percurso, itinerário ou cadeia como sendo uma família de ligações sucessivamente adjacentes, cada uma tendo uma extremidade adjacente à anterior e a outra à subsequente (com exceção da primeira e da última). O percurso será fechado se

a última ligação da sucessão for adjacente à primeira e o percurso será aberto caso contrário.

O autor destaca que um percurso é dito simples quando não repete ligações e elementar se não repete nós. É importante observar que um percurso fechado (x,y,z,x), por exemplo, é elementar, embora sua representação repita um nó, pois não se trata na verdade de repetição, e sim de um retorno que fecha o percurso. Já considerando o percurso (x,y,z,x,t,v,x), por exemplo, não se pode dizer que ele é elementar, visto que repete o nó x .

Destaca ainda que o comprimento de um percurso é o número de ligações por ele utilizadas, contando-se as repetições.

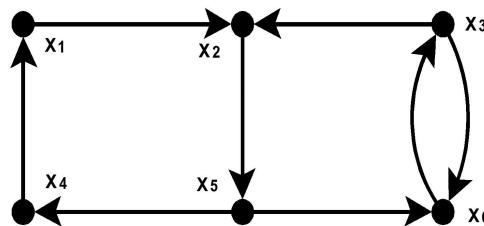


FIGURA 22 – Representação de um percurso de grafo.

3.1.10 Caminho, Circuito e Ciclo

Entende-se por caminho, conceito aplicado somente aos grafos orientados, como sendo uma sequência de nós conectados por arcos, onde para cada nó há um arco para ligá-lo ao nó subsequente. Para o grafo representado na Figura 23, a sequência de nós (a, c, e, b, d) é um exemplo de caminho.

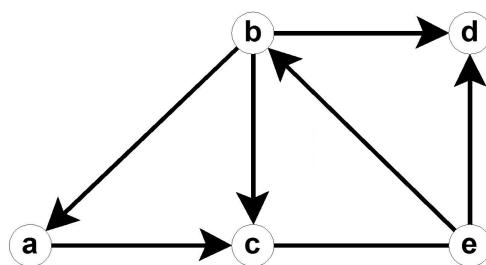


FIGURA 23 – Representação de caminho.

Um circuito é um caminho simples e fechado que obedece a uma orientação. Na Figura 23, um exemplo de circuito é a sequência de nós (e, b, c, e)

Já um ciclo é um caminho que começa e termina no mesmo nó. Neste caso, a orientação não configura característica essencial. Para o grafo da Figura 23, tem-se um ciclo na sequência de nós (a, c, e, d, b, a).

3.1.11 Grafo Hamiltoniano

Um grafo G é hamiltoniano se existe um ciclo em G que contenha todos os seus nós, sendo que cada nó só aparece uma vez no ciclo. Este ciclo é chamado de ciclo hamiltoniano. Sendo assim, um grafo é hamiltoniano se ele contiver um ciclo hamiltoniano.

3.1.12 Grafo Euleriano

Um grafo euleriano é aquele que possui um ciclo euleriano (ciclo que passa por todas os arcos exatamente uma vez), em outras palavras, um grafo é euleriano se puder ser desenhado sem tirar o lápis do papel e voltar ao ponto de partida, sem passar mais de uma vez por nenhum arco. É importante lembrar que, em seus estudos, Euler observa que um grafo conectado G é euleriano se, e somente se, o grau de cada vértice de G for par.

3.2 PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV), ou *Traveling Salesman Problem* (TSP) - problema este baseado na teoria dos grafos - é um caso típico de otimização combinatória frequentemente utilizado em computação, em projetos de circuitos integrados, roteamento de veículos, etc., para demonstrar problemas de difícil resolução.

A mais significativa contribuição para o problema do caixeiro viajante é de W. R. Hamilton, que no ano de 1859 inventou um jogo que consistia na busca de um percurso fechado envolvendo todos os nós de um dodecaedro regular, de tal maneira que cada um deles fosse visitado apenas uma vez.

Os problemas hamiltonianos aplicados se relacionam a atendimentos sequenciais em locais relativamente distantes uns dos outros ou, em geral, em pontos caracterizados por sua posição e não pela sequência de atendimento, o que implica na procura de elementos viáveis no conjunto de permutações dos nós de um grafo (BOAVENTURA NETTO, 2006).

O problema do caixeiro viajante é um problema de otimização, como dito anteriormente, associado ao da determinação dos caminhos hamiltonianos em um grafo qualquer. O objetivo do PCV é encontrar, em um grafo $G = (V, E)$, o caminho hamiltoniano de menor distância, ou seja, consiste em encontrar um caminho através de um grafo valorado que inicie e termine no mesmo nó, passe por todos os demais nós do grafo uma única vez e minimize a distância total percorrida. Porém, Boaventura Netto (2006) afirma que esse fator de impedância (distância) pode também ser expresso em termos de custo, tempo ou outros parâmetros.

Desde seu surgimento, novas restrições vêm sendo incorporadas ao problema do caixeiro viajante, de modo a melhor representar os diferentes tipos de problemas que envolvem rotas de pessoas e veículos, entre as quais: restrições de horário de atendimento (conhecidas na literatura como janelas de tempo ou janelas horárias); capacidades das frotas dos veículos; frota composta por veículos de diferentes tamanhos; duração máxima das rotas dos veículos relacionadas a tempo ou distância, dentre outras.

De acordo com Cunha (2000), o PCV pertence à categoria conhecida como NP-difícil (do inglês “NP-hard”), o que significa que possuem ordem de complexidade exponencial, ou seja, o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema (dado pelo número de pontos a serem atendidos).

Tendo em vista a extrema importância da obtenção de bons resultados para a solução exata do PCV, em problemas de porte real, como roteamento de veículos, e sendo o PCV NP-Difícil, faz-se necessário utilizar métodos heurísticos. Estas estratégias de solução baseiam-se em abordagens intuitivas, de modo que a estrutura particular do problema possa ser considerada e explorada de forma inteligente (CUNHA, 1997). Outros autores afirmam ainda ser intratável ou não haver soluções possíveis para este problema.

3.3 PROBLEMA DO CARTEIRO CHINÊS

Conhecido como Problema do Carteiro Chinês, por ter sido proposto na revista Chinesa *Mathematics* por *Mei-Ko Kwan* em 1962 e utilizar a rota de um carteiro como cenário, este problema possui grandes aplicações reais, como, por exemplo, na área de roteamento de veículos, coleta de lixo, distribuição de carta, manutenção de rede, remoção de neve, serviços de entrega, etc.

Dentro do escopo da teoria de grafos, o problema do carteiro chinês (PCC) é um problema no qual, dado um grafo $G(V, E)$ cujos arcos (i, j) tem um comprimento não negativo c_{ij} , deseja-se identificar de forma racional o comprimento mínimo de um caminho que se inicie em algum nó, passe por todos os arcos da rede pelo menos uma vez e retorne ao nó inicial, considerando que haverá trechos a serem percorridos mais de uma vez (AHUJA *et al.*, 1993). Desde a sua aparição na moderna literatura, o problema do carteiro chinês vem ganhando muita atenção de pesquisadores que tratam de logística, principalmente em problemas de logística urbana, como por exemplo, problemas de roteirização e dimensionamento de frota.

Neste caso, a otimização está relacionada para assegurar a minimização do percurso improdutivo dos veículos, decorrente da passagem do veículo em algumas vias ou trechos de vias por mais de uma vez, de forma a permitir atingir e trafegar por outras vias, devido aos problemas de circulação e de tráfego de veículo (CASTRO, 2006).

Como a demanda se localiza nos arcos ao invés dos nós, ou seja, não há pontos ou locais específicos a serem atendidos, pode-se dizer que o Problema do carteiro Chinês trata da aplicação dos percursos eulerianos a problemas práticos. Porém, não se pode esperar deparar em cada caso com um grafo euleriano, já que se houver grau de vértice ímpar, será necessário percorrer trechos (arcos) mais de uma vez.

Problemas similares ao do carteiro chinês se dividem basicamente conforme o tipo de orientação da rede. Existem basicamente três tipos de orientação de grafos possíveis para este problema: grafos não direcionados, direcionados e mistos.

O primeiro resultado conhecido referente ao PCC para grafos não direcionados é devido a Euler em 1736. Euler mostrou que um grafo conectado não direcionado $G(V, E)$ tem uma

rota que passa exatamente uma vez por todos os seus arcos se, e somente se, todos os nós deste grafo forem de grau par. Já para um grafo não conectado ter uma rota que passa exatamente uma vez por todos os seus arcos, o número de nós de grau ímpar deve ser exatamente 2 nós. Esta importante relação, tanto para grafos conectados como não conectados, é conhecida na literatura por Teorema de Euler (GODINHO FILHO E JUNQUEIRA, 2007). Em Eiselt *et al.* (1995) menciona-se que o matemático chinês *Mei-Ko Kwan*, observou que quando G tem um número par de vértices de grau ímpar, um grafo euleriano G' pode ser derivado de G pela adição de arcos ligando os nós de grau ímpar.

Para o caso de grafos direcionados, diferentemente dos grafos não direcionados, existe uma condição de extrema importância para que o PCC tenha solução. Esta condição é que o grafo deve ser fortemente conectado, ou seja, deve haver um caminho direcionado ligando todos os nós do grafo (WANG & WEN, 2002).

Por fim, um grafo misto contém tanto arcos orientados como não orientados. Assim, como nos grafos direcionadas, nos grafos mistos também o grafo deve ser totalmente conectado para que o PCC tenha solução.

3.4 PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

Antes de ser dar início ao estudo dos problemas de roteirização de veículos faz-se necessário conceituar, basicamente, o termo roteirização, que pode ser entendido, segundo Carrara (2007), como sendo uma ferramenta de apoio à decisão na solução da distribuição de cargas de uma ou mais instalações para um conjunto de clientes, com o objetivo de gerenciar estas operações de forma eficiente, com o intuito de reduzir os custos de operação e assegurar que coletas e entregas sejam realizadas sob razoáveis níveis de serviço. Carrara (2007) ainda afirma que a resolução deste problema envolve a determinação da quantidade de veículos que serão necessários para servir os destinos e desenvolver uma rota e programação para cada um.

Um problema real de roteirização é definido, segundo Partyka e Hall (2000) *apud* Novaes (2007) por três fatores fundamentais: decisões, objetivos e restrições.

- As decisões se referem à alocação de um grupo de clientes, que devem ser visitados, a um conjunto de veículos e respectivos motoristas, envolvendo também a programação e o sequenciamento das visitas.
- Os objetivos principais da roteirização visam proporcionar um serviço de alto nível aos clientes, mas ao mesmo tempo, mantendo os custos operacionais e de capital tão baixos quanto possível.
- A roteirização deve obedecer a certas restrições. Em primeiro lugar, deve completar as rotas com os recursos disponíveis, lembrando de cumprir totalmente os compromissos assumidos com os clientes. Em segundo lugar, deve-se respeitar os limites de tempo impostos pela jornada de trabalho dos motoristas e operadores. E por fim, devem ser respeitadas as restrições de trânsito como: velocidades máximas, horários de carga/descarga, tamanhos máximos de veículos nas vias públicas, dentre outros.

Novaes (2007) afirma que, na prática os problemas de roteirização ocorrem com bastante frequência na distribuição de produtos e serviços. Alguns exemplos podem ser citados:

- Entrega, em domicílio, de produtos comprados nas lojas de varejo ou pela internet;
- Distribuição de bebidas em bares e restaurantes;
- Distribuição de combustíveis para postos de gasolina;
- Coleta de lixo urbano;
- Entrega domiciliar de correspondência etc.

Além dos 3 (três) fatores ou parâmetros fundamentais (decisões, objetivos e restrições) que definem um problema de roteirização defendidos por Partyka e Hall (2000), Belfiore (2006) apresenta em seu estudo mais uma categoria, totalizando 4 (quatro) fatores: função objetivo, restrições, variáveis de decisão, hipóteses/recursos e/ou características do problema.

No parâmetro função objetivo podem-se destacar os principais objetivos ou metas a serem alcançados:

- Minimizar os custos totais de distribuição (custos fixos e variáveis);
- Minimizar a distância total percorrida;

- Minimizar a duração das rotas e o número de veículos;
- Maximizar a função utilidade baseada no nível de serviço e/ou prioridades dos clientes.

O parâmetro restrições possui os seguintes pontos:

- Restrições dos veículos (limite da capacidade dos veículos, limite com relação ao tipo de carga carregada, operações de carga e descarga, quantidade e tipo de veículos disponíveis);
- Restrições com os clientes (intervalo de atendimento de cada cliente, atendimento total ou parcial das demandas, prioridade no atendimento, tempo máximo permitido nas operações de carga e descarga, necessidade ou restrição de serviço em algum dia específico da semana).
- Restrições das rotas (horários de início e término das viagens, tempo máximo de viagem de um veículo, distância máxima percorrida etc.).

O parâmetro pode ser descrito por:

- Roteiro a ser percorrido por cada veículo;
- Qual veículo é designado para cada cliente;
- Quantidade de carga transportada para cada cliente da rota;
- Tempo de início de atendimento do primeiro cliente da rota.

O último parâmetro descrito por Belfiore (2006) detalha as principais hipóteses/recursos e características do problema como sendo:

- Tipo de operação (coleta, entrega, coleta e entrega simultaneamente, coleta ou entrega com carga de retorno);
- Tipo de carga (única ou carga de lotação, múltiplas cargas ou cargas fracionadas);
- Tipo de demanda (determinística, estocástica);
- Localização da demanda (somente em arcos, somente em nós ou em arcos e nós);
- Tamanho (limitada ou ilimitada) e tipo da frota (homogênea ou heterogênea);
- Quantidade de depósitos e localização de veículos;
- Jornada de trabalho (duração, horário de almoço etc.), dentre outras.

Conforme Golden *et al.* (1981), os problemas de roteirização de veículos pertencem a uma categoria ampla de problemas de pesquisa operacional conhecida como problemas de otimização de rede. É possível observar nessa categoria problemas clássicos como problemas de fluxo máximo, problemas de caminho mínimo, problemas de transporte, problemas de designação.

É importante observar que os Problemas de Roteirização de Veículos (PRV) se diferem em virtude de diversos aspectos, tais como:

- Tipo de operação;
- Tipo de carga;
- Tipo de frota utilizada;
- Tipo de restrições;
- Localização dos clientes e depósitos etc.

O crescimento nas últimas décadas da utilização dos computadores e da capacidade de processamento levou ao desenvolvimento de *softwares* específicos para resolver os problemas de roteirização. Os Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos ou, simplesmente, Roteirizadores são sistemas computacionais que, através de algoritmos, geralmente, heurísticos e uma apropriada base de dados, são capazes de obter soluções para problemas de roteirização e programação de veículos (PRPV) com resultados relativamente satisfatórios, consumindo tempo e esforço de processamento relativamente pequenos quando comparados aos gastos nos tradicionais métodos manuais (MELO e FERREIRA FILHO, 2001).

Cabe salientar que tais sistemas podem considerar inúmeros tipos de restrições ou condicionantes (ex.: um ou mais depósitos, janelas de tempo, vários tipos de veículos, tempos de parada, velocidades variáveis, limitações de capacidade, múltiplos compartimentos por veículo, barreiras físicas, restrições de circulação de veículos e de jornadas de trabalho, etc.) que tornam possível a obtenção de modelos muito próximos da realidade atual. Além disso, são dotados de poderosos recursos gráficos e podem fornecer resultados (ex.: rotas e programação de cada veículo, relatórios de utilização dos veículos, relatórios de programação do motorista, etc.) que são de grande importância para o processo de tomada de decisão (MELO e FERREIRA FILHO, 2001).

Atualmente, a grande maioria dos roteirizadores disponíveis já apresenta tecnologia que proporcionam aos usuários plataformas cada vez mais amigáveis, considerando restrições cada vez mais complexas (horários de circulação e atendimento, tamanhos de veículos, utilização de mais de um tipo de veículo etc.). Dessa forma, o maior uso da Internet provocado por avanços na área de comunicação nas empresas, proporciona um maior aquecimento do mercado, provocando uma grande revolução tecnológica no sentido de melhoria de relacionamento com o cliente final, levando a obtenção de vantagem competitiva sobre a concorrência.

3.5 CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

Modelar e resolver problemas de roteirização requer grande esforço em virtude da quantidade de parâmetros que podem influenciar no problema, como visto anteriormente. Dessa forma, é necessária uma visão sistêmica dos principais problemas de roteirização para identificar os aspectos mais relevantes, permitindo assim, a implementação de estratégias que proporcionem soluções adequadas.

A seguir será apresentada a classificação dos problemas de roteirização segundo Belfiore (2006), de acordo com: Bodin *et al.* (1983), Ronen (1988), Assad (1988) e Desrochers *et al.* (1990).

3.5.1 Classificação Segundo Bodin *et al.* (1983)

Bodin *et al.* (1983) propõem que a classificação seja feita em função de restringir os problemas a aspectos espaciais e/ou temporais. Sendo assim, classificam os problemas de roteirização em 3 (três) grupos: problema de roteirização pura, problema de programação de veículos e problemas combinados de roteirização e programação de veículos.

No primeiro caso, problemas de roteirização pura, são considerados aspectos espaciais (não há restrições temporais relacionadas ao atendimento dos clientes) e o objetivo é construir um conjunto de rotas viáveis minimizando os custos de transporte.

No segundo caso, problemas de programação de veículos são considerados tanto os aspectos espaciais quanto temporais. Há restrições de horários preestabelecidos para cada atividade a ser executada.

No terceiro e último caso, denominado problemas combinados de roteirização e programação de veículos há restrições de precedência (quando a entrega de uma mercadoria deve ser precedida de sua coleta, por exemplo) entre tarefas e/ou restrições de janela de tempo (intervalo de tempo que pode ocorrer o início do atendimento aos clientes). Bodin e Golden (1981) afirmam que os problemas mais usuais normalmente estão nesta categoria.

3.5.2 Classificação Segundo Ronen (1988)

Ronen (1988) apresenta uma classificação baseada em 3 (três) classes principais que diferem entre si em função do ambiente operacional e dos objetivos. São elas: problemas relacionados ao transporte de passageiros, problemas de prestação de serviços e problemas de roteirização e programação de transporte de carga.

A primeira classe, problemas relacionados ao transporte de passageiros, corresponde aos sistemas de transportes de ônibus, táxi, pessoas, idosos e transportes escolares de ônibus.

A segunda classe, problemas de prestação de serviços, refere-se à roteirização e programação de serviços como coleta de lixo, entrega postal, dentre outros.

Na terceira e última classe, o autor criou 12 critérios de classificação dos problemas de roteirização e programação de transporte de carga, que são:

- Tamanho da frota;
- Composição da frota;
- Estrutura de custos da frota;
- Componentes de custo;
- Número de bases de origem e destino de veículos;
- Natureza da demanda;
- Tipo de operação;
- Número de viagens por veículo num determinado período;

- Duração ou tempo máximo permitido de viagem;
- Tipo de entrega;
- Distâncias e tempo;
- Função objetivo do modelo.

3.5.3 Classificação Segundo Assad (1988)

Assad (1988) sugere que cada problema prático deva ser tratado de forma particular, de acordo com um conjunto de elementos. O autor alega ser difícil encontrar um esquema de classificação apropriado quando se deve considerar ou não as restrições do problema e o método de solução proposto.

O autor ainda considera uma possível classificação, na qual o tempo em que as informações das demandas estão disponíveis, baseado no fato de que a demanda pode ser conhecida antecipadamente – demanda determinística –, como é o caso dos problemas clássicos de roteirização ou que a demanda possa ser conhecida *a posteriori* – demanda estocástica – caso em que a roteirização é dinâmica, ou seja, as rotas podem ser conhecidas em tempo real.

O conjunto de elementos proposto pelo autor para caracterização dos problemas de roteirização é:

- Natureza das demandas: coletas, entregas, um produto, múltiplos produtos, atendimento total da demanda, atendimento parcial da demanda, prioridade no atendimento aos clientes, terceirização, não terceirização;
- Características da demanda: determinística, estocástica, constante, variável etc.;
- Frota de veículos: homogênea, heterogênea, restrições de capacidade de veículos, frota fixa, frota variável, frota em um único depósito, frota em múltiplos depósitos;
- Requisitos de pessoal: duração da jornada de trabalho, hora extra, número fixo de motoristas, número variável de motoristas, horário de início da jornada, hora de almoço e outros tipos de parada;
- Requisitos de programação: restrições de janela de tempo para coleta e entrega, tempo de carga e descarga, horários de abertura e fechamento;

- Requisitos de informações: disponibilidade geográfica, tempos de viagem, localização de veículos.

3.5.4 Classificação Segundo Desrochers *et al.* (1990)

Desrochers *et al.* (1990) propuseram um estudo que serve para classificar não só os problemas de roteirização e programação de veículos, como também para dar suporte ao desenvolvimento de modelos para sistemas relacionados a essa área. A ideia central do estudo foi desenvolver uma representação teórica do problema real, com a finalidade de possibilitar uma escolha apropriada do algoritmo utilizado.

Segundo Pelizaro (2000), esta classificação serve como ferramenta para caracterização do *software* TransCAD, proporcionando uma direção para o processo de escolha das classes de problemas a serem testadas, pois manipula informações nos três níveis diferentes: no nível do problema situado na vida real, no nível do problema tipo teórico e no nível dos algoritmos.

Os principais parâmetros desenvolvidos foram classificados em 4 (quatro) categorias: endereço, veículo, características do problema e objetivos.

A primeira categoria, endereço, define as características que podem ser associadas a um único endereço. Os endereços deverão estar localizados sobre uma rede $G=(V,E)$, onde V é o conjunto de nós e E o conjunto de arcos.

A segunda categoria, veículo, define as características do veículo na rota. Houve uma subdivisão em 5 (cinco) subcategorias: número de veículos, restrição de capacidade, restrição de mercadoria, restrição de disponibilidade de veículo e restrição de tempo de duração de rota.

Já a terceira categoria, características do problema, define elementos como o tipo de rede utilizada (se direcionada, não direcionada ou mista), a estratégia de serviço a ser realizada (permitir ou não a quebra da demanda, a roteirização pode envolver coletas ou entregas ou somente entrega, quantidade de rotas por veículo, possibilidade ou não de rotas multidepósitos) e as restrições nas relações entre os endereços e os veículos (precedência

de atendimento de um cliente em relação a outro em virtude de sua localização, restrições de descarga do cliente e/ou tipo de carga que o veículo pode levar).

Por fim, a quarta e última categoria definida por Desrochers *et al.* (1990), função objetivo, tem por finalidade alcançar uma solução ótima para o problema de roteirização minimizando o custo total do transporte, reduzindo a distância total percorrida, reduzindo o tempo total de viagem, atendendo a demanda de todos os clientes, respeitando as demais restrições do problema, dentre outros.

Cabe observar, que esse estudo apresentado por Desrochers *et al.* (1990) é muito mais detalhado do que os demais apresentados anteriormente, além de ter aplicações em vários tipos de problemas de roteirização.

Além disso, o esquema de classificação apresentado por Desrochers *et al.* (1990) é projetado para modelar a situação problema real e para descrevê-la em uma forma padrão, de modo que exista uma correspondência entre as características do problema real e os componentes do esquema. O esquema lida apenas com problemas estáticos, onde os dados não mudam durante o planejamento de uma sessão. No entanto, ele permite que alguns dados sejam estocásticos.

O capítulo seguinte apresenta o *software* TransCAD, o qual trabalha com plataforma de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para modelagem e simulação de transportes com ferramentas de trabalho, nesse caso, utilizadas para roteirização em arco.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM E GERAÇÃO DE CENÁRIOS

A teoria clássica dos modelos de transporte tem como base uma representação discreta do espaço continuo, em que a área a ser modelada é dividida em zonas de tráfego e o sistema de transporte é representado através de uma rede de nós e arcos.

A rede viária existente é representada pelos seus respectivos custos generalizados (combinação ponderada de atributos como tempo e distância de viagem) nos deslocamentos e pela configuração das regras de circulação, que permitem definir ligações unidirecionais ou bidirecionais, proibições ou penalidades de conversão, dentre outros.

Para entender melhor o que é modelagem é necessário, primeiramente, conhecer as definições de “sistemas” e “modelos”. Um sistema é um conjunto de elementos distintos, que exercem entre si regras de interação ou interdependência. Pode-se definir também sistemas, como sendo um conjunto de elementos que recebem estímulos ou entradas (*inputs*) e produzem respostas ou saídas (*outputs*). São os elementos e suas relações, tanto internas quanto externas, que determinam como este converte estímulos em respostas (FREITAS FILHO, 2008). Um modelo é a representação simplificada de um sistema, ou seja, uma representação de um sistema real, na qual somente os aspectos relevantes para uma determinada análise deste sistema são considerados.

A utilidade da modelagem está diretamente relacionada à sua capacidade de incorporar elementos reais de forma simples. No entanto, um modelo deve conter os aspectos importantes do sistema real, sem que sua complexidade impossibilite a compreensão e manipulação do mesmo. Essa característica pode ser difícil de ser alcançada, pois modelos realísticos raramente são simples, e modelos simples raramente são realísticos.

Simulação é a operacionalização do modelo em sistema real. O exercício (execução) da simulação em computador tem potencial para fornecer resultados precisos sem que seja preciso interferir no sistema real. Tais resultados, quando analisados estatisticamente, produzem informações que podem contribuir grandemente na tomada de decisões que visam a solução de problemas.

Em busca de soluções que consigam coordenar de forma eficiente os processos de corte, carregamento e transporte, a análise de sistemas pode ser aplicada como ferramenta de gestão de processos. Essa metodologia é composta por um conjunto de ferramentas conceituais que pode auxiliar a compreensão da estrutura e da dinâmica de sistemas complexos, utilizando uma etapa de modelagem e de simulações em computador para definir organizações e políticas mais efetivas. Juntas, essas ferramentas permitem a criação de simuladores gerenciais, ou seja, mundos virtuais onde espaço e tempo podem ser comprimidos e desacelerados de tal forma a permitir a experimentação de efeitos colaterais de longo prazo, aprendizado, e estratégias de alto desempenho (HARREL *et al.*, 2003).

Com isso, as práticas de modelagem podem ser utilizadas para melhorar a eficiência do sistema de CCT da cana-de-açúcar, através do desenvolvimento de um modelo computacional que seja possível analisar simultaneamente os componentes desse processo.

4.1 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

O desenvolvimento de sistemas computacionais a partir da década de 70 possibilitou o desenvolvimento de *softwares* de simulação com a capacidade de representar os sistemas do mundo real de uma maneira mais adequada e mais simples para o usuário. O primeiro *software* comercial genérico de simulação de sistemas do mundo foi o GPSS, distribuído pela IBM (FREITAS FILHO, 2008). Atualmente, o mercado dispõe de muitas opções de *softwares* que possibilitam a modelagem e a simulação de sistemas, sendo os mais conhecidos: TransCAD, Arena, Promodel, Automod e Witness.

Neste estudo, a simulação foi feita utilizando-se o *software* TransCAD, versão 5.1. A escolha do *software* TransCAD foi em virtude da disponibilidade de utilização, pela

possibilidade de adequação dos comandos do *software* para modelar as operações de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar de uma maneira satisfatória e pelo conhecimento da linguagem de programação.

O *software* TransCAD é um programa de modelagem e simulação que contém uma plataforma SIG, que incorpora não só as funções básicas de um SIG, mas também rotinas específicas para soluções de problemas de logística, de pesquisa operacional e transportes em geral (SIG-T). Além disso, possui um conjunto bastante robusto de ferramentas que resolvem vários tipos de problemas de roteirização.

Segundo Pelizaro (2000), estas ferramentas são usadas para preparar os dados, resolver o problema e gerar os resultados das rotas e programação dos veículos, tanto na forma de relatório quanto na forma gráfica.

Lopes Filho (2003) apresenta algumas características peculiares necessárias para a efetiva aplicação dos SIG's-T, que são:

- Esquemas de representação de rede mais adaptados para aplicações em transportes. Isto se faz necessário devido ao SIG ter sido originado no gerenciamento de recursos naturais. Nesta área, o processamento de dados referentes a polígonos é mais importante que a apresentação de redes, que é uma das principais aplicações em transportes;
- Capacidades analíticas específicas. Modelos analíticos para a resolução de problemas de transporte, como a obtenção de caminhos mínimos, devem ser incorporados ao sistema para aumentar a sua aplicabilidade.

Desenvolvido pela *Caliper Corporation*, o TransCAD trabalha com métodos que se baseiam na heurística de “Economias” desenvolvidos por Clarke e Wright (1964), para roteirização de nós, caso do estudo em questão, e na heurística do Problema do Carteiro Chinês Misto, sugerida por Edmonds e Johnson (1973) e melhorada por Frederickson (1979) em roteirização de arcos (MELO, 2000).

O método de Clarke e Wright (1964) tem sido muito utilizado na resolução de problemas isolados, como também é utilizado por muitos *softwares*, pois permite incorporar, de forma eficiente, diversos tipos de restrições. Esse método tem como objetivo gerar roteiros que

respeitem as restrições de tempo e de capacidade, porém visando, ao mesmo tempo, minimizar a distância total percorrida pela frota (NOVAES, 2007).

Além disso, o TransCAD contém ferramentas necessárias para criar e editar mapas e grupos de dados geográficos, produz mapas temáticos, gráficos e realiza análises espacial e geograficamente. O *software* dispõe de um conjunto de modelos avançados para aplicações específicas e ferramentas de suporte para análises estatísticas e econômicas (CALIPER, 1996).

O TransCAD apresenta ferramentas de mapeamento e visualização especificamente desenvolvidas para aplicações em transportes, assim como procedimentos para modelagem de demanda e procedimentos de otimização.

O TransCAD é um sistema utilizado para armazenar, mostrar, gerenciar e analisar dados de transporte, combinando um SIG e um sistema de modelagem de capacidades de transporte em uma plataforma integrada (SIG-T). Trabalhando com todos os modais de transporte, este sistema, quando aplicado a modelos de roteamento e logística, pode ser utilizado por diferentes setores (públicos ou privados) (MELO e FERREIRA FILHO, 2001).

As aplicações deste programa são para todos os modos de transportes e de abrangência local, regional e nacional, podendo ser utilizado para:

- Análise de redes (rotas mais curtas, de menor custo, menor tempo);
- Planejamento de transportes (geração de viagens, distribuição de viagens, alocação de tráfego);
- Roteirização (operações de coleta e entrega, coleta de lixo, cálculo das distâncias percorridas etc.), dentre outros.

As características que podem ser consideradas pelo TransCAD para a resolução de problemas de roteirização de veículos são: múltiplos depósitos, janelas de tempo rígidas, tempo fixo de serviço, tempo por unidade, restrição de comprimento total da rota, frota heterogênea e paradas “backhaul” (PELIZARO, 2000).

De acordo com Almeida (1998), um mesmo problema pode ser resolvido várias vezes pelo programa TransCAD, gerando cenários futuros alternativos, alterando-se algumas

características do problema, como por exemplo, a capacidade de transporte dos veículos de alguns tipos de serviços, as restrições de tempo etc. Os resultados obtidos poderão ser comparados e analisados, para que alternativas mais eficazes sejam consideradas.

No TransCAD, o gerenciador de banco de dados espacial armazena os dados geográficos utilizando-se de uma estrutura de dados topológica, o que facilita a manipulação dos mesmos. Essa estrutura de dados define a localização e as relações espaciais entre pontos, linhas, áreas e outras entidades geográficas ou objetos. Ele suporta a definição de várias estruturas de dados de transporte como: redes, vias, nós, linhas e matrizes de fluxos. O TransCAD possui uma linguagem de consulta que inclui operadores SQL (*Structured Query Language – Linguagem Estruturada de Consulta*) e consultas geográficas. O usuário pode selecionar qualquer entidade geográfica para recuperar os dados tabulares relativos àquela entidade. Pode, também, utilizar consultas espaciais para localizar entidades dos mapas através de raios, polígonos ou contornos de *buffer* (áreas de abrangência) e *overlay* (sobreposição). Além dessas operações espaciais e ferramentas de geoprocessamento, o TransCAD realiza funções de agregação espacial e faz sobreposições entre dados vetoriais e dados matriciais, apresentando-os em conjunto (Rose, 2001).

Raia Junior e Silva (1998) *apud* Carrara (2007) ressaltam duas ferramentas do programa muito utilizadas e importantes para o planejamento de transportes: matrizes e redes. Matrizes podem estar relacionadas a algoritmos de caminhos mínimos, os quais constituem a base para toda e qualquer análise de redes de transporte. Estes algoritmos levam em consideração cálculo de rotas de menor custo entre dois pontos de uma rede de transporte, baseados em valores de impedância dos diferentes arcos da rede. Redes são estruturas compostas de nós e arcos que unem esses nós. Nestes são alocados fluxos de pessoas, carga veículos etc. uma rede de transporte é um conjunto de locais geográficos conectados entre si por certa quantidade de arcos. A estrutura geométrica de uma rede de transportes é, por conseguinte, o padrão topológico formado por seus elementos (nós e arcos). No entanto, as redes podem apresentar problemas na sua análise caso tenha sido construída de forma inconsistente.

Dessa forma, o *software* TransCAD será utilizado neste estudo na simulação e análise das operações de corte, carregamento e transporte, visando auxiliar as tomadas de decisão para controle da produção da usina de açúcar e álcool.

4.2 REDE DE TRABALHO - *NETWORK*

Para o uso do TransCAD, na versão 5.1, com o objetivo de se empregar a ferramenta de roteirização em arco, é necessário criar previamente uma rede de trabalho, tratada pelo software como *Network* e configurá-la para, posteriormente, utilizar o módulo de roteirização em arco. Essa rede de trabalho é um dado estrutural do software que possibilita armazenar características do sistema de transporte.

A rede de trabalho configurada é representada abstratamente com base na teoria dos grafos, contendo nós (*endpoints*) demarcando os encontros de vias e arcos (*links*) orientados que seguem os sentidos das vias da rede viária, conforme Figura 24.

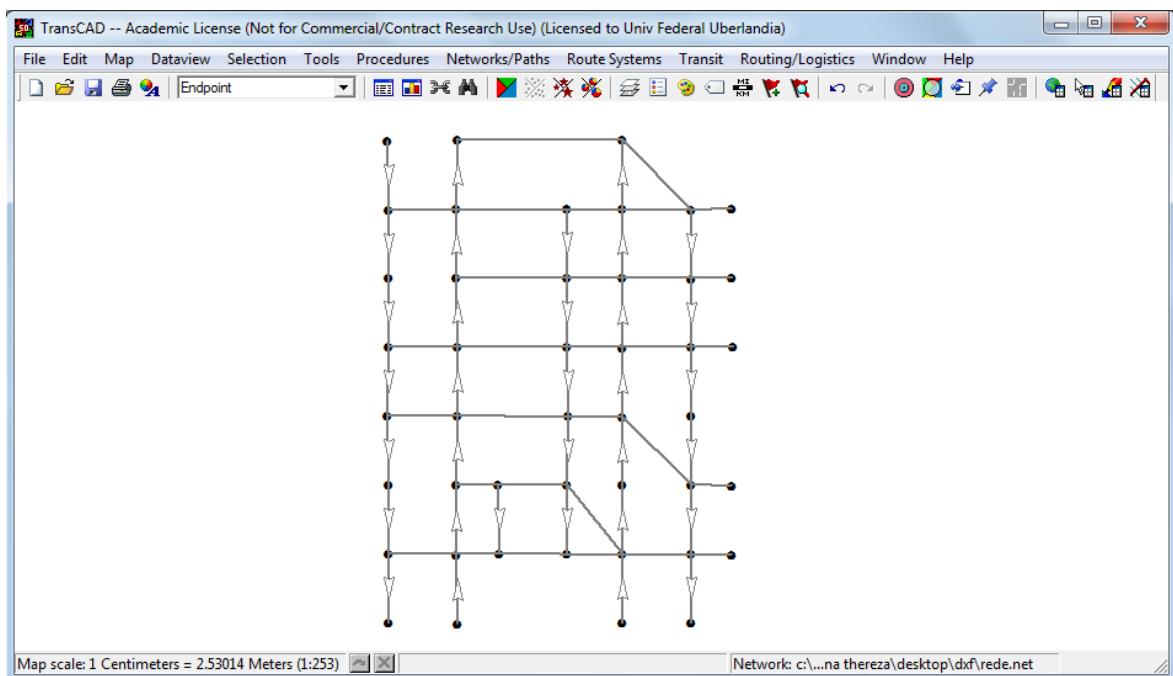


FIGURA 24 – Janela TransCAD - *Network* com as demarcações de nós e arcos.

O *Network* é configurado em um *layer* de linha, porém cada trecho da rede viária (arco) possui um identificador no início e no final desse arco. Esses identificadores ficam armazenados no *layer* de pontos “*Endpoints*”, que é gerado automaticamente quando se importa para o TransCAD o mapa georreferenciado da área de estudo.

O *Network* contém informações geográficas, outros dados de capacidade, declividade, sentido de fluxo além de dados que podem ser úteis nos procedimentos subsequentes de roteirização. As informações contidas e derivadas do *Network* são importantes para diferentes aplicações para obtenção de rotas e programação de veículos.

Além disso, o *Network* é usado para analisar o fluxo de pessoas e/ou cargas de um lugar para o outro. É também utilizado pelo TransCAD para encontrar rotas de caminhos mínimos, calcular distâncias e calcular tempo de viagens, além de apoiar outras análises e aplicações de modelos.

As redes no TransCAD compactam arquivos de dados que contém informações para análises nos formatos requeridos pelos modelos que podem ser desenvolvidos no *software*. Além disso, as estruturas de dados podem ser otimizadas para armazenar e processar algoritmos de maneira que se obtenham os caminhos mínimos para que sejam identificados o mínimo custo ou outros indicadores de desempenho.

A seguir, apresentam- se algumas soluções que podem ser realizadas pelo TransCAD:

- Localização de clientes;
- Criação das matrizes de distância e tempo de viagem;
- Especificação da frota;
- Definição dos pedidos e horários de atendimento;
- Roteirização (menor caminho/menor custo);
- Pesquisa operacional;
- Monitoramento de veículos.

4.3 PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO EM ARCO

No problema de roteirização em arco, o *software* TransCAD possui um módulo específico que resolve diversos tipos de problemas, atuando na fase preliminar de preparação dos dados, na resolução do problema de roteirização e programação de veículos e na elaboração das rotas, apresentando os resultados na forma de relatórios e também ilustrando as rotas na forma gráfica (FARKUH NETO E LIMA, 2006).

Basicamente, podem-se apontar três importantes passos no uso do módulo de roteirização do TransCAD:

- **Preparação da entrada de dados:** criar arquivos geográficos que mostrem as localizações de cada depósito e parada, junto com a informação sobre a demanda e outras características de cada um;
- **Resolução do problema de roteirização em arco:** desenvolver rotas eficientes;
- **Apresentação dos resultados:** exposição de relatórios de itinerários e relatórios resumidos e exposição de rotas de veículos com a qual pode-se criar um sistema de rotas onde é possível visualizar os resultados no mapa.

O módulo de roteirização em arco *Arc/Street Routing* do software TransCAD trabalha com duas ferramentas diferentes: o *Arc Routing* (Figura 25) e o *Solid Waste Collection Routing* (Figura 26).

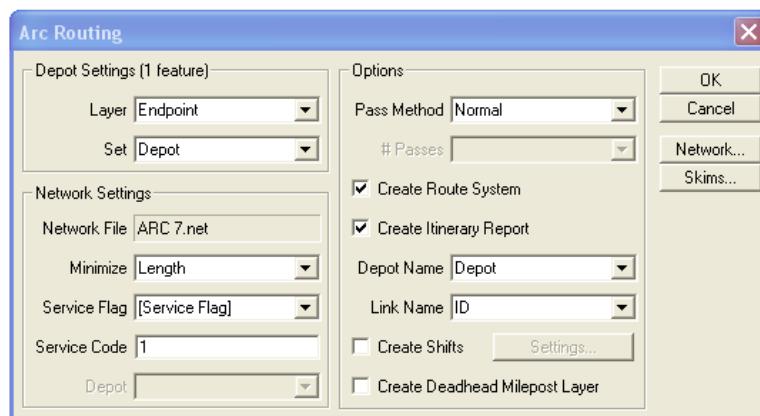


FIGURA 25 – Janela TransCAD - Roteirização em arco (*Arc Routing*).



FIGURA 26 – Janela TransCAD - Roteirização em arco (*Solid Waste Collection Routing*).

No problema de roteirização em arco *Arc Routing*, pessoas ou veículos são despachados de um ou mais depósitos para percorrer um conjunto de *links* de serviço. O resultado do problema é um conjunto de uma ou mais rotas que cobrem todos os *links* de serviço com uma quantidade mínima de *links* onde não há prestação de serviço (CALIPER, 2007).

Alguns dados são importantes de serem considerados antes de se iniciar o módulo de roteirização em arco *Arc Routing* como por exemplo:

- Identificação do sentido de fluxo, ou seja, se a orientação dos arcos (*links*) é variável. Se o arco possui apenas direção em um sentido ou nos dois sentidos;
- Identificação de serviço no arco. Há 3 (três) opções: o arco não tem serviço a ser realizado, o arco tem serviço a ser realizado em apenas um dos lados e o arco tem serviço nos dois lados;
- Identificação da necessidade ou não de passagem pelo arco mais de uma vez, ou seja, se os arcos precisam ser servidos apenas uma vez, ou mais de uma vez em cada sentido;
- Quantidade de depósitos a serem considerados.

Depois de definidos os parâmetros acima citados e após a criação da rede de trabalho (formada por *layers* de nós e linhas), deve-se criar um *dataview* (banco de dados) com os atributos necessários ao estudo do problema em questão. Em seguida deve criada a rede de trabalho (*Network*) do *layer* de linha, contendo esses atributos criados e por fim devem ser selecionados os nós que identificarão a localização dos depósitos. Após a conclusão dessas tarefas, o módulo de roteirização em arco *Arc Routing* pode ser executado.

No módulo de roteirização em arco *Solid Waste Collection*, veículos são despachados de um ou mais *seeds* (pontos iniciais das rotas) para percorrer um conjunto de links de serviço. O resultado do problema é também, um conjunto de uma ou mais rotas que cobrem todos os *links* de serviço com uma quantidade mínima de *links* onde não há prestação de serviço. Essas rotas podem ou não terminar nos *seeds*, dependendo das características de serviço dos *links* conectados aos *seeds* (CALIPER, 2007).

Ainda segundo Caliper (2007), o módulo de roteirização em arco *Solid Waste Collection* é projetado para criar rotas eficientes para veículos, sendo uma variação específica do

problema de roteirização em arco *Arc Routing*. Possui, dentre outras características, a capacidade de servir ambos os lados de uma via passando por ela apenas uma vez. Além disso, o procedimento tenta minimizar o número de conversões indesejáveis, especialmente *U-turns* (retornos), visando maximizar a segurança.

Esse procedimento requer um número específico de dados de entrada. Os tópicos a seguir são de grande importância no desenvolvimento desses dados de entrada e devem ser considerados antes de dar início ao módulo de roteirização em arco *Solid Waste Collection*:

- Se a orientação dos arcos é em fluxo de mão única ou nos dois sentidos;
- Se os arcos precisam ser servidos (dado de entrada mais importante do *Solid Waste Collection*). Há três opções disponíveis na ferramenta: o arco não deve ser servido, o arco deve ser servido em apenas um dos sentidos de cada vez e se os dois sentidos podem ser servidos durante uma única passagem do veículo;
- Há a possibilidade de se criar *shifts* (vários setores, distritos dentro de uma mesma rede). Quando criados, a aplicação da rotina de roteirização em arco *Solid Waste Collection* cria uma rota para cada distrito que servirá os *links* atribuídos a este distrito. Cabe lembrar que um *seed* deverá ser criado para cada distrito.

Para a realização da rotina de roteirização em arco *Solid Waste Collection* deve-se proceder da mesma forma do *Arc Routing*, lembrando deve ser criada uma seleção de nós que identificarão a localização dos *seeds*.

Nesse trabalho será utilizado o módulo de roteirização em arco *Arc Routing*, pois este se mostrou mais apropriada para o caso em estudo em virtude desta ferramenta possuir a característica de que todas as rotas começam e terminam no depósito, já que as operações de CCT começam e terminam no mesmo local (ciclo – usina, lavoura, usina).

4.4 DADOS DE ENTRADA DO *ARC ROUTING* – CONFIGURAÇÃO DA REDE

Antes de dar início a roteirização de veículos em arco, é necessária a criação de arquivos geográficos de pontos e linhas.

Para o presente estudo, o ponto inicial e final da rede – a Usina – será definida na rede de trabalho do TransCAD por um *layer* de pontos. Para cada *layer* são gerados atributos característicos, conforme Figura 27, que serão usados no desenvolvimento do estudo de roteirização.

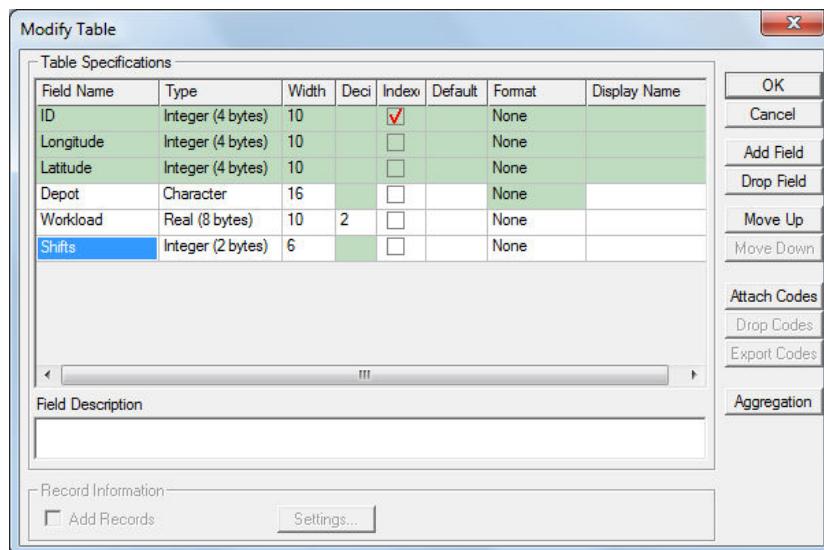


FIGURA 27 – Janela TransCAD – Inserção de atributos para *layers* de pontos.

Para os *layers* de ponto contendo a Usina, serão configurados atributos característicos para o problema de roteirização em arco, um campo obrigatório (ID, Longitude e Latitude) e os demais (*Workload*, *shifts* etc.) variando de acordo com o problema a ser estudado:

- **ID:** número de identificação do depósito que relaciona dados do mapa (latitude e longitude) com o banco de dados.
- **DEPOT (NAME):** campo utilizado para identificar o nome do ponto no relatório. É importante sua utilização, pois na geração dos relatórios de saída, se não houver nomes nos pontos eles serão distinguidos somente pelo ID.

- **WORKLOAD:** a carga de trabalho máxima de deslocamento para as rotas que começam em um depósito.
- **SHIFTS:** o número máximo de turnos que pode começar em um depósito.

Também devem ser configurados os caminhos por onde passarão os caminhões, os tratores e as colhedoras. Estes caminhos serão definidas na rede de trabalho do TransCAD por *layers* de linhas. Assim como no *layer* de pontos, para cada *layer* são gerados atributos característicos, conforme Figura 28, que serão usados no desenvolvimento do estudo de roteirização em arco.

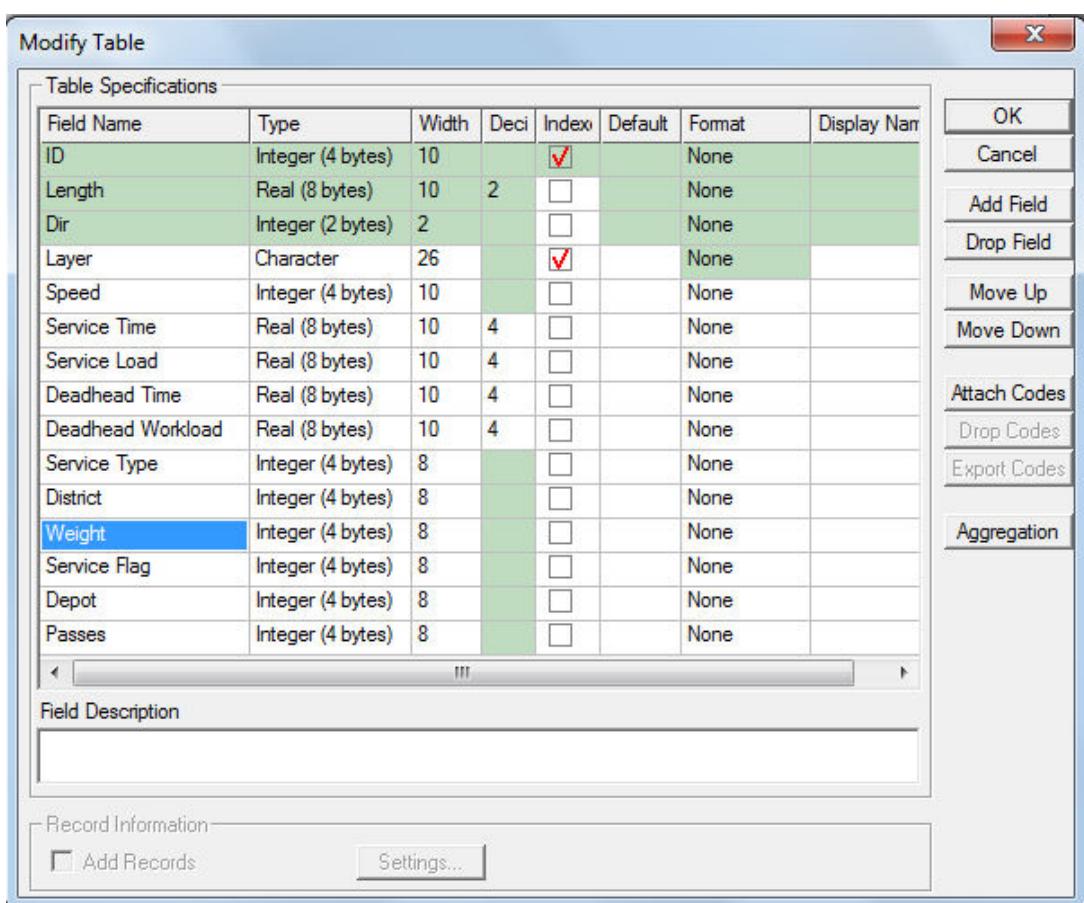


FIGURA 28 – Janela TransCAD – Inserção de atributos para *layers* de linhas.

Para o *layer* de linhas serão configurados atributos característicos para o problema de roteirização em arco, tais como:

- **ID:** número que identifica a linha;

- **LENGTH:** registro que identifica o comprimento do arco;
- **DIR:** registro que identifica o sentido de fluxo do arco;
- **SPEED:** registro que identifica a velocidade máxima permitida no arco;
- **SERVICE TIME:** registro que identifica o tempo para o veículo atravessar o arco, quando realiza coleta;
- **SERVICE LOAD:** quantidade de trabalho necessário, de material coletado ou de serviço prestado para servir o arco;
- **DEADHEAD TIME:** registro que identifica o tempo para o veículo atravessar o arco quando não realiza coleta;
- **DEADHEAD WORKLOAD:** registro que identifica a quantidade máxima de resíduos a serem coletados, em função da capacidade do veículo;
- **SERVICE TYPE:** indica o tipo de serviço a ser realizado na via;
- **DISTRICT:** registro que identifica o distrito (número, nome etc.) a que pertencem os arcos;
- **WEIGHT:** registro representado por um número que identifica o nível de prioridade de atendimento atribuído a determinado arco. Quanto maior o número (peso) dado ao arco, maior será sua prioridade de atendimento;
- **SERVICE FLAG:** número que identifica os arcos em que o serviço é necessário, ou que atribui um link para um território;
- **DEPOT:** registro que identifica o número do identificador do ponto no *layer* de pontos do depósito;
- **PASSES:** o número de passadas que são necessárias para atender a ligação, sendo que zero ou um valor em branco indicam que uma única passada é necessária;

Cabe lembrar que outros atributos podem ser inseridos e nem todos os atributos listados acima precisam necessariamente ser utilizados. Dependendo das opções escolhidas para a roteirização e do caso em estudo é que serão escolhidos os atributos apropriados.

4.5 ARQUIVOS DE SAÍDA DO *ARC ROUTING*

O módulo de roteirização em arco *Arc Routing* produzirá um arquivo de saída ARPW. REP (ANEXO A) que lista os dados de entrada e as configurações que foram usadas, além de fornecer informações resumidas sobre as rotas de veículos.

A rotina produz também um arquivo XML contendo o itinerário de cada veículo. Este relatório de itinerário contém instruções completas de cada rota, listando os arcos que foram percorridos, e identifica os arcos que foram servidos e aqueles em que não há serviço realizado.

4.6 ARQUIVO GRÁFICO DA ROTA

O procedimento de roteirização em arco *Arc Routing* gera uma rota e a apresenta em um *layer* conforme indicado na Figura 29.

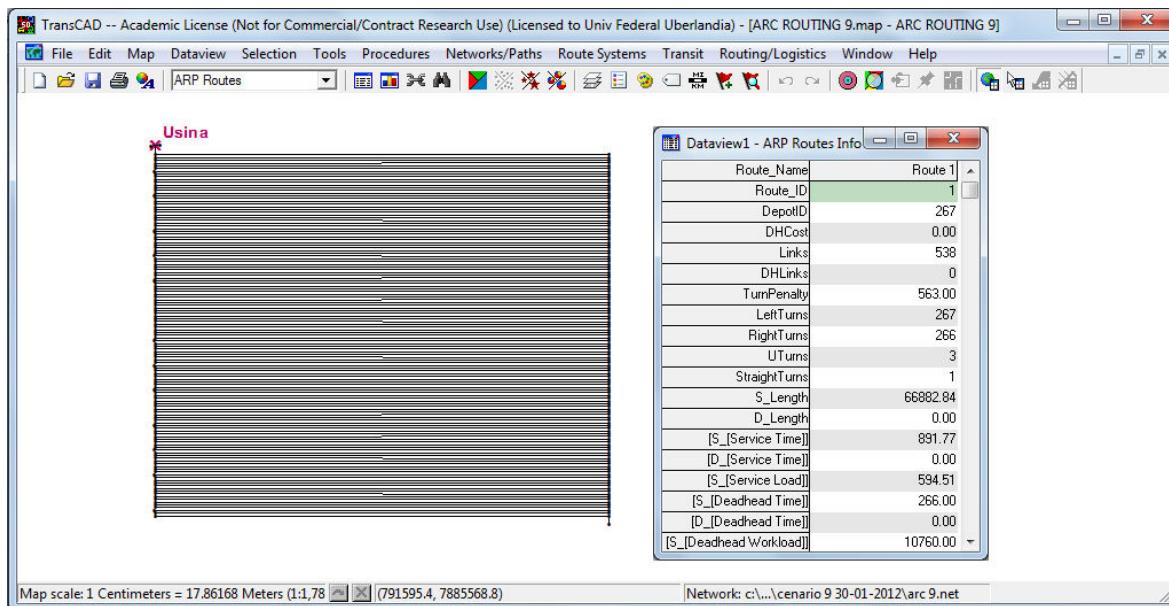


FIGURA 29 – Janela TransCAD – *Layer* de rotas gerada pela simulação.

A rota foi criada pelo procedimento de roteirização considerando um local como depósito, ou seja, onde o caminhão (rodotrem) ficou estacionado enquanto a máquina de corte fazia

o serviço no talhão. Além disso, o TransCAD fez os cálculos automaticamente gerando um relatório contendo as estatísticas da rota (ANEXO B), tais como:

- O *deadhead cost* (custo de atravessar um arco sem promover serviço algum);
- O número de arcos onde não houve prestação de serviço;
- A soma de todas as penalidades, quando existirem penalidades;
- O número de conversões separadas por tipo (esquerda, direita etc.).

É importante lembrar que, para o programa gerar também informações adicionais nos arquivos de saída, existe uma opção de configuração na janela do *Arc Routing* que deve ser selecionada, denominada *Skims* (Figura 30). Nessa janela existem 5 (cinco) opções a serem selecionadas:

- A estatística gerada de determinado atributo não deverá ser calculada (*None*);
- A estatística gerada de determinado atributo deverá ser calculada para todos os arcos em que houve prestação de serviço (*Service Links*);
- A estatística gerada de determinado atributo deverá ser calculada somente para os arcos onde não houve prestação de serviço (*Deadhead Links*);
- A estatística gerada de determinado atributo deverá ser calculada para todos os arcos (*All Links*) indistintamente, ou seja, para os arcos em que houve prestação de serviço e também para aqueles em que não houve prestação de serviço;
- A estatística gerada de determinado atributo deverá ser calculada para os arcos em que houve prestação de serviço e também para os arcos em que não houve prestação de serviço separadamente (*Service & Deadhead Links*).

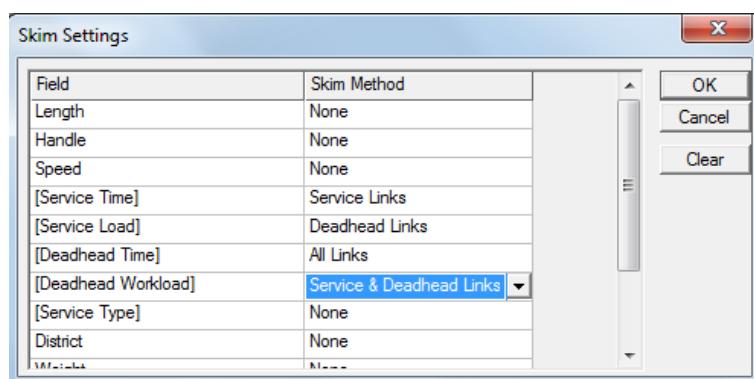


FIGURA 30 – Janela TransCAD – Seleção de *Skims*.

No próximo capítulo foi realizado um estudo de caso em uma Usina de açúcar e álcool localizada no Triângulo Mineiro. Para a realização desta análise foi utilizado o módulo de roteirização em arco do *software* TranCAD. Na aplicação desta ferramenta foi considerada como rede um grafo dirigido, onde os arcos são as vias por onde trafegam as colhedoras e onde as colhedoras realizam suas manobras. Os nós (vértices) são os pontos iniciais e finais de cada linha de passagem da colhedora, além de representar também o ponto inicial e final da rede (depósito – Usina).

Os parâmetros que foram observados para a realização das análises foram a distância total percorrida pela colhedora para realizar a colheita em cada talhão e o tempo total de duração desta atividade. Se por um lado é importante para a Usina a distância total percorrida porque está associada ao custo de produção, portanto esse parâmetro deve ser mínimo. Por outro lado, o tempo total de colheita também é importante porque o serviço deve ser realizado no período de aproximadamente 30 (trinta) semanas, que é o período da safra, para garantir que não ocorram perdas de produtividade por redução do teor de sacarose.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO

Neste capítulo serão apresentadas as características do funcionamento da Usina escolhida para o estudo do presente trabalho. Os dados referente às atividades da Usina serão trabalhados e os parâmetros da modelagem serão configurados para serem gerados diferentes cenários utilizando o *software* TransCAD. Por fim será realizada uma análise para verificar qual dos cenários apresentou melhores resultados de acordo com os objetivos estabelecidos nesse trabalho.

5.1 PROBLEMA

Nessa pesquisa modelou-se as etapas de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar do processo produtivo do setor sucroalcooleiro empregando o procedimento de roteirização em arco do *software* TransCAD. Para isso, foi escolhida uma Usina localizada no estado de Minas Gerais e as características utilizadas se baseiam em dados reais.

Na região da área em estudo, o solo é do tipo arenoso e regularizado antes do plantio. O deslocamento das máquinas e caminhões ocorre de forma regular porque mesmo quando o terreno contém declives, a operação ocorre segundo as curvas de nível. Por isso, considerando que a velocidade de deslocamento das maquinas é baixa, da ordem de 4 - 8 km/h, a topografia da lavoura não interfere diretamente no resultado final. Em condições de intempéries desfavoráveis como por exemplo, dia muito chuvoso, o serviço de corte fica interrompido porque há perdas de soqueiras e problemas com o transporte da lavoura para indústria. Nessas ocasiões, a indústria também para, em virtude da Usina não trabalhar com

estoques e o tempo ocioso é utilizado para realização de manutenção no maquinário, tanto do campo quanto da indústria.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA USINA

Foram realizadas visitas de campo à Usina para coleta dos dados e alguns dados técnicos foram obtidos através de um representante da Usina. Nas Tabelas 7, 8 e 9 estão os dados que foram coletados na Usina em estudo em condições regulares de operação.

A Usina opera com 3 (três) turnos de trabalho de 8 (oito) horas em cada operação de corte e carregamento, sendo que cada turno possui 1 (uma) hora para refeições. A Usina produz 4 (quatro) diferentes produtos:

- Etanol Hidratado: também denominado álcool etílico hidratado carburante (AEHC) é utilizado como combustível em motores a álcool;
- Etanol Anidro: também denominado álcool etílico anidro carburante (AEAC) é utilizado para mistura com a gasolina
- Açúcar VHP (*Very High Polarization*): utilizado como matéria-prima para outros processos e destinado ao refino devido a sua alta polarização, podendo ser usado para o consumo, mas geralmente é exportado a vários Países do Mundo para produção do açúcar refinado. Trata-se de um açúcar bruto, que permite aos clientes transformá-lo em diferentes tipos de açúcar para o consumo;
- Energia: a biomassa proveniente do palhiço e do bagaço da cana-de-açúcar são fontes de coogeração de energia na Usina. Essa energia é utilizada tanto nas atividades da própria Usina, quanto seu excedente é vendido para a concessionária de energia elétrica.

As Tabelas 7 e 8 reúnem informações referentes às condições preliminares ao plantio e dados gerais e informações referentes à colheita, respectivamente.

Tabela 7 – Informações gerais

Informação Solicitada	Informação Aferida
Cana Inteira ou cana Picada	Cana picada
Tipo de terreno dos talhões	Plano ou levemente ondulado
Possui projeto de Proteção Ambiental	Sim
Distância das lavouras à usina	15 a 25 km (média de 20 km)
Área de plantio de 2010	17.653 hectares
Meta de crescimento de área de plantio	55.000 hectares em 2014
Quantidade de cana-de-açúcar por dia	8.000 toneladas
Duração da safra	Aproximadamente 30 semanas
Tamanho dos talhões	até 20 hectares (média de 8 hectares)
Produção de etanol anidro na safra	13.475.691 litros
Produção de etanol hidratado na safra	80.093.285 litros
Produção de açúcar VHP na safra	1.541.419,20 sacas de 50 kg cada

Tabela 8 – Informações sobre a colheita

Informação Solicitada	Informação Aferida
Tipo de corte	Mecanizado
Colheita terceirizada	30% terceirizada e 70% própria
Quantidade de colhedoras utilizadas	15
Velocidade das colhedoras	4,5 a 5,0 km/h
Rendimento das colhedoras	550 a 580 toneladas por dia por colhedora
Capacidade do transbordo	10 toneladas cada
Tempo gasto nas manobras da colhedora	Cerca de 1 minuto
Largura da faixa de corte de cana	1,5 metros
Quantidade de palha colhida	12 a 20 toneladas por hectare
Quantidade de tratores transbordo por frente	Frente com 4 colhedoras - 8 tratores transbordo Frente com 3 colhedoras - 6 tratores transbordo
Distância percorrida pelos tratores transbordo	200 a 500 metros
Velocidade dos tratores transbordo	4,5 km/h enquanto colhendo 10 km/h no trajeto para descarregamento
Quantidade de transbordos por trator	2
Tempo médio para encher cada transbordo	15 minutos
Quantidade de frentes de corte	4
Quantidade de colhedoras por frente de corte	3 frentes com 4 colhedoras e 1 frente com 3 colhedoras

A Tabela 9 reúne informações referentes à etapa de transporte e aos custos das operações de CCT.

Tabela 9 – Informações sobre custos e transporte

Informação Solicitada	Informação Aferida
Tipo de caminhão utilizado	Somente Rodotrem
Capacidade do Rodotrem	30 a 35 toneladas por composição
Velocidade do caminhão vazio	30 a 35 km/h
Velocidade do caminhão cheio	5 a 10 km/h
Transporte é terceirizado	Sim
Transporte é realizado somente em estradas de terra	Sim
Custo das operações de Corte	R\$ 10,80 por tonelada
Custo das operações de Carregamento	R\$ 2,80 por tonelada
Custo das operações de Transporte	R\$ 5,25 em média para até 20 km

Os veículos utilizados no transporte da cana-de-açúcar trabalham no sistema de “bate-volta”, onde os caminhões/cavalos mecânicos desacoplam os semi-reboques carregados no pátio da usina e engata-se outros semi-reboques vazios para o retorno a área de colheita, conforme explicado em capítulo anterior. Estes caminhões são monitorados via GPS e quando entram na usina acionam um sensor que os registra automaticamente.

Os custos da parte agrícola do processo de produção de açúcar e álcool da Usina representam cerca de 60% dos custos totais. As operações de CCT da Usina representam de 30% a 40% desta parcela agrícola, sendo que as operações de corte correspondem a 55%, as operações de carregamento a 15% e o transporte a 30% destes gastos totais. Já as operações na área industrial representam 30% dos custos e os 10% restantes são gastos com despesas administrativas.

5.3 CENÁRIOS

Foram considerados 3 (três) cenários e em cada cenário foram feitas duas modificações, na areão total e na geometria dos talhões conforme indicado na Tabela 10.

Tabela 10 – Cenários analisados

Cenários	Área do talhão (m ²)
1	50.000,00
2	100.000,00
3	150.000,00

Cabe salientar que os parâmetros gerais foram mantidos constantes em todas as simulações. Além disso, os valores das áreas dos cenários 1, 2 e 3 foram escolhidos respeitando a faixa de talhões utilizados pela Usina, com áreas de até 20.000 m² (conforme Tabela 7).

As configurações dos parâmetros utilizados em cada campo do *dataview* (banco de dados) do arquivo geográfico de linhas (*layer* de linhas) foram:

I. DIR: indica a direção do fluxo de cada arco:

- = 1: indica que o sentido do fluxo coincide com a direção em que o arco foi criado;
- = -1: indica que o sentido de fluxo é na direção contrária em que o arco foi criado;
- = 0: indica que o arco pode ser percorrido em mão dupla.

Obs.: Como a rede de trabalho foi construída de forma a representar as operações da máquina na lavoura, não houve necessidade de colocar o sentido de fluxo, já que não há outro percurso possível de ser realizado. Dessa forma, foi atribuído a todos os arcos da rede o valor 0 (zero).

II. SPEED: indica a velocidade de operação da colhedora.

Obs.: Foi utilizada a velocidade da colhedora: 4,5 km/h.

III. SERVICE FLAG: indica a necessidade ou não de atendimento na via:

- = 1: quando a via da rede deve ser atendida;
- = 0: quando a via da rede não deve ser atendida.

IV. SERVICE TYPE: indica a condição de serviço a ser realizado em relação aos 2 (dois) lados do arco durante a passagem:

- = 1: indica que o serviço será realizado em ambos os lados do arco com uma única passagem do caminhão;
- = 2: indica que o arco será servido com a passagem do caminhão em cada sentido separadamente.

Obs.: Foi utilizado o valor 1 (um), porém é importante lembrar que apenas um lado da via foi servido durante a passagem da colhedora.

V. SERVICE TIME:

- O *Service Time* foi configurado com sendo o custo do deslocamento nos arcos quando há prestação de serviço (nos arcos). Este custo foi configurado como o tempo de deslocamento em função da velocidade de deslocamento da máquina ou veículo;
- $\text{Tempo} = \frac{\text{Deslocamento}}{\text{Velocidade}} \times 60 \implies \text{Service Time} = \frac{\text{Length}}{\text{Speed}} \times 60$
- Onde:
 - *Service Time* = Tempo, em minutos;
 - Velocidade = 4,5 km/h;
 - Percurso = Comprimento do Arco (*Length*), em metros.

VI. SERVICE LOAD: indica a quantidade de cana-de-açúcar que será coletada em cada trecho da via (arco):

- O *Service Load* foi configurado como sendo a taxa de colheita por hora em função da velocidade da colhedora multiplicada pelo comprimento do arco;
- $\text{Service Load} = \frac{\text{Taxa de colheita}}{\text{Velocidade}} \times \text{Percurso}$
- Onde:
 - Taxa de colheita = 40 t/h;
 - Velocidade = 4,5 km/h;
 - Percurso = Comprimento do Arco (*Length*), em metros;

- Obs.: Nos arcos que apenas auxiliaram a constituição física da rede o *Service Load* foi considerado igual a 0 (zero).

VII. DEADHEAD TIME: indica o custo de deslocamento nos arcos quando não está prestando serviço:

- Como o período da colheita da cana-de-açúcar é um serviço prestado continuamente e pressupõe-se que, em função da forma como a rede de trabalho foi montada, enquanto a colhedora está passando nos arcos ela está sempre prestando serviço. Então, o *Deadhead Time* foi considerado como sendo o tempo que a colhedora realiza a manobra no arco para entrar no arco seguinte, ou seja, para cada arco haverá um tempo fixo de manobra da colhedora. Cabe lembrar que nos arcos que apenas auxiliaram a montagem da rede o *Deadhead Time* foi considerado igual a 0 (zero);
- *Deadhead Time*: é a penalização em unidade de tempo para a manobra dos equipamentos. Foi adotado 1 (um) minuto por arco.

VIII. DEADHEAD WORKLOAD: indica a carga máxima de trabalho realizado.

- O campo *Deadhead Workload* foi configurado como sendo a carga máxima de cana-de-açúcar que os 2 (dois) transbordos suportam. Essa capacidade é de 20 toneladas (sendo 10 toneladas por transbordo);
- Nos arcos que apenas auxiliaram na configuração física da rede o *Deadhead Workload* foi considerado igual a 0 (zero).

IX. PASSES: indica o número de passagens que são necessárias para servir o arco:

- O campo *Passes* foi configurado como sendo necessária apenas uma passada. O valor atribuído, portanto, foi 0 (zero).

A rede de trabalho foi configurada sem restrições de movimento (penalidades), somente definindo um valor de penalização para retornos em “U”. Foi definida esta condição, pois como afirma Deluqui (2003), o *software* TransCAD não se mostrou eficiente com restrições em manobras de conversão à direita e à esquerda.

A rede de trabalho foi construída de modo a representar da forma mais real possível as operações realizadas nos talhões, objetivando obter a menor distância percorrida possível e também minimizar o tempo nas operações de corte, carregamento e transporte. A Figura 31 mostra como é realizado o caminhamento da colhedora no campo, de modo a facilitar o entendimento de como foi configurada a rede de trabalho para realização da roteirização em arco *Arc Routing*.

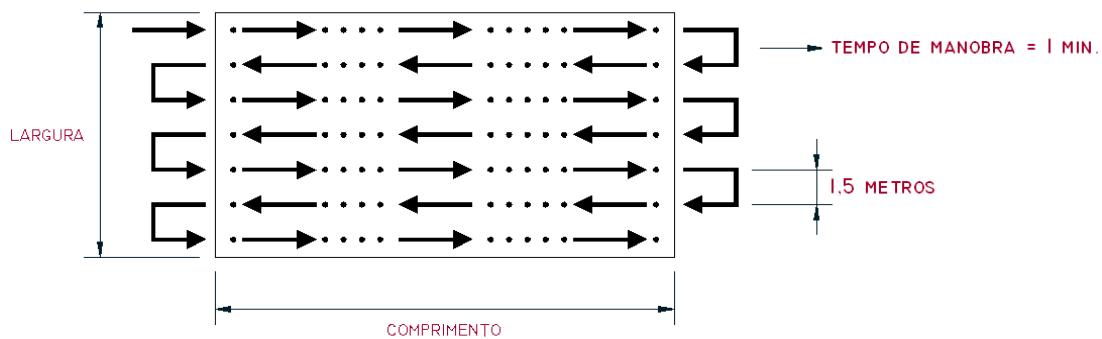


FIGURA 31 – Caminhamento da colhedora na lavoura.

É importante lembrar que, para cada um dos cenários simulados foi criado no mapa georreferenciado em AutoCAD e uma rede viária que foi utilizada, em seguida, no programa TransCAD. A partir daí, foram criados os arquivos geográficos de nós e linhas, assim como foram inseridas em cada banco de dados as configurações dos parâmetros utilizados (citados acima) para a posterior utilização do módulo de roteirização em arco.

5.3.1 Cenário 1

O primeiro cenário configurado considerou um talhão de área igual a 50.000 m² (5 hectares) e talhões de dimensões conforme a Tabela 11. Considerando que a área de plantio da Usina na safra de 2010/2011 foi de 176.530.000 m², será possível o plantio em aproximadamente 3.530 talhões de área de 50.000 m². Já na projeção futura da Usina para o ano de 2014, para a área de 550.000.000 m², será possível o plantio de 11.000 talhões com área de 50.000 m².

Tabela 11 – Dimensões para o talhão do cenário 1

CENÁRIO 1	
Simulação	Dimensões (m)
1.1	250,00 x 200,00
1.2	200,00 x 250,00
1.3	175,00 x 285,71

5.3.2 Cenário 2

Para o segundo cenário configurado foi considerado um talhão de área igual a 100.000 m² (10 hectares) e talhões de dimensões conforme a Tabela 12. Considerando que a área de plantio da Usina na safra de 2010/2011 foi de 176.530.000 m², será possível o plantio em aproximadamente 1.765 talhões de área de 100.000 m². Já na projeção futura da Usina para o ano de 2014, para a área de 550.000.000 m², será possível o plantio de 5.500 talhões com área de 100.000 m².

Tabela 12 – Dimensões para o talhão do cenário 2

CENÁRIO 2	
Simulação	Dimensões (m)
2.1	500,00 x 200,00
2.2	400,00 x 250,00
2.3	350,00 x 285,71

5.3.3 Cenário 3

O terceiro cenário foi configurado em uma área de 150.000 m² (15 hectares) e talhões de dimensões conforme a Tabela 13. Considerando que a área de plantio da Usina na safra de 2010/2011 foi de 176.530.000 m², será possível o plantio em aproximadamente 1.176 talhões de área de 150.000 m². Já na projeção futura da Usina para o ano de 2014, para a área de 550.000.000 m², será possível o plantio de 3.667 talhões com área de 150.000 m².

Tabela 13 – Dimensões para o talhão do cenário 3

CENÁRIO 3	
Simulação	Dimensões (m)
3.1	400,00 X 375,00
3.2	350,00 x 428,57
3.3	250,00 X 600,00

5.4 RESULTADOS

Após realizar as simulações com todos os talhões de todas as dimensões sugeridas nas Tabelas 11, 12 e 13, foram obtidos resultados para cada uma das áreas consideradas. Os resultados da aplicação do módulo de roteirização em arco *Arc Routing* podem ser observados na Tabela 14.

O serviço de corte e carregamento da cana-de-açúcar no talhão é similar ao procedimento de coleta de resíduos sólidos domiciliares que exige a passagem da máquina de corte e do transbordo ao longo de todos os arcos em um movimento de vai-e-vem até cobrir todo o talhão.

É importante observar que o custo total é obtido pelo produto do custo unitário (R\$/km) com a distância percorrida no talhão e no transporte do transbordo até o local onde o rodotrem fica aguardando para levar a cana-de-açúcar até a usina. Assim sendo, quanto menor forem as distâncias percorridas, menor será o custo total.

Tabela 14 – Resumo dos parâmetros operacionais dos resultados do procedimento de roteirização em arco

Cenário	Dimensões (m)	Distância (m)	Tempo (min)	Quantidade de Cana Colhida (t)
1.1	250,00 x 200,00	33.441,42	578,89	295,37
1.2	200,00 x 250,00	33.440,38	611,87	294,92
1.3	175,00 x 285,71	33.526,82	637,03	295,37
2.1	500,00 x 200,00	66.670,32	1.021,94	590,73
2.2	400,00 x 250,00	66.619,63	1.054,26	589,84
2.3	350,00 x 285,71	66.755,26	1.080,07	590,73
3.1	400,00 X 375,00	100.323,62	1.587,65	888,32
3.2	350,00 x 428,57	100.126,30	1.620,02	886,10
3.3	250,00 X 600,00	100.548,46	1.740,65	888,32

Na Figura 32 pode ser observado como a rede física foi configurada para aplicação do módulo de roteirização em arco do software TransCAD. Os dados que estão apresentados na forma de legenda referem-se a um dos cenários trabalhados nesse estudo de caso.

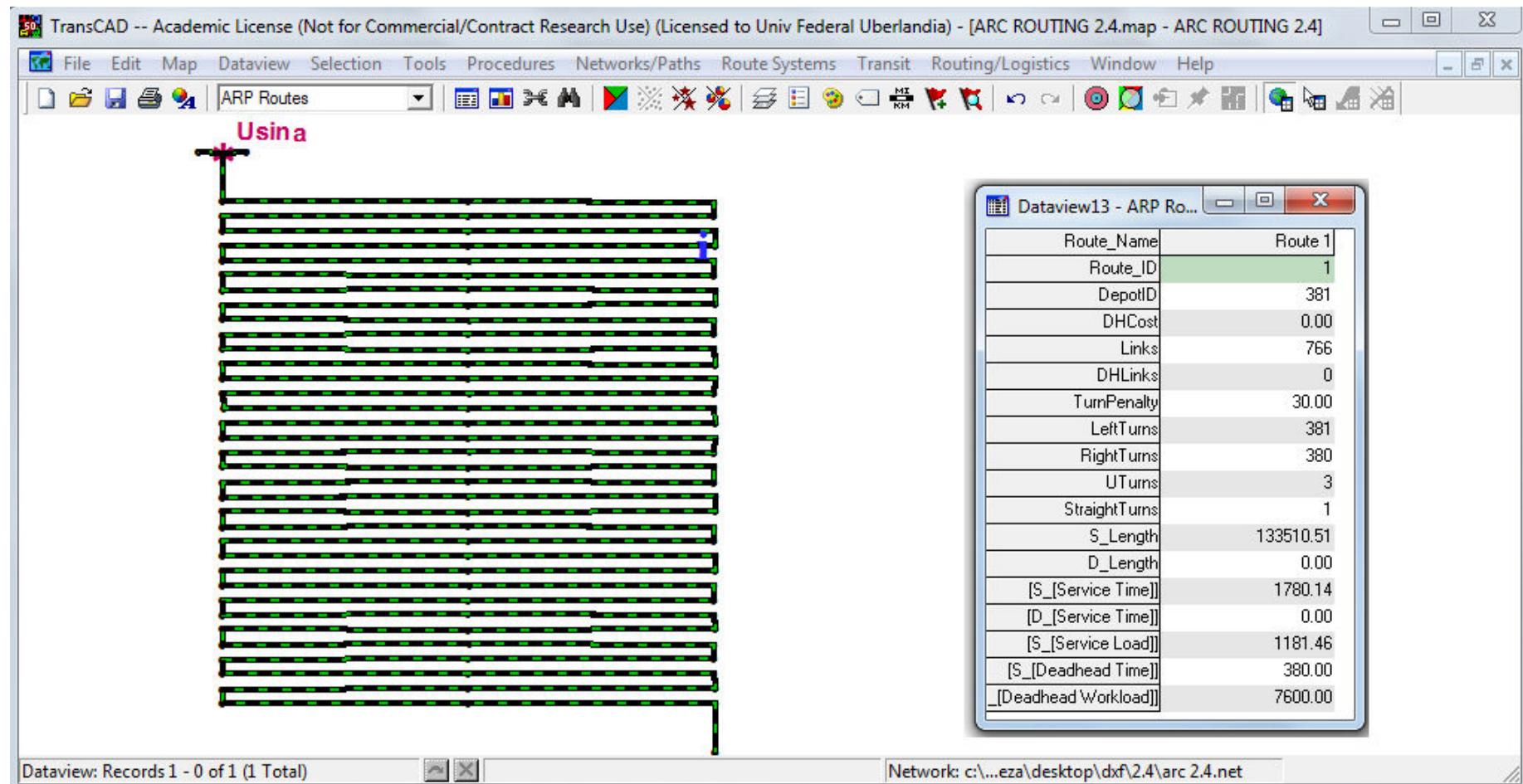


FIGURA 32 – Resultado gráfico do procedimento de roteirização em arco *Arc Routing*

Os dados da Tabela 15, obtidos a partir da aplicação do módulo de roteirização do software TransCAD, são de apenas 1 (um) talhão. A Tabela 15 apresenta valores considerando toda a área de plantio da safra atual da Usina (17.653 hectares) e valores considerando a expectativa de crescimento de área de cultivo da Usina para o ano de 2014.

Os valores mostrados na Tabela 16 foram obtidos a partir da comparação feita entre os cenários, considerando áreas de 50.000, 100.000 e 150.000 m², obtendo os menores valores de distâncias percorridas e tempo. Conforme pode ser visto, o cenário que apresentou a menor distância percorrida não foi o que apresentou o menor tempo.

Analisando-se os resultados da simulação dos 3 (três) cenários, contidos nas Tabelas 14, 15 e 16 e considerando que o objetivo deste trabalho foi simular e analisar os processos de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar, visando apoiar as tomadas de decisão envolvidas no planejamento e controle da produção (PCP) de uma usina de açúcar e álcool, a partir de estratégias de produção eficazes no período da safra, é possível inferir que:

I. Área de 50.000 m²:

- O cenário 1.1 (dimensões 250,00 m x 200,00 m) apresentou o melhor tempo gasto para percorrer todo o talhão na operação de colheita, 578,89 minutos;
- Percentualmente, o aumento no tempo utilizado na operação de colheita de um cenário para o outro foi considerado pequeno, aproximadamente de 5,7% do cenário 1.1 para o cenário 1.2 e de 4,1% do cenário 1.2 para o cenário 1.3;
- Ao se analisar toda a área de plantio da safra 2010/2011, que possui 17.653 hectares e aproximadamente 3.530 talhões, considerando fatores como a duração da safra que é de aproximadamente 30 semanas, a diferença no tempo utilizado na operação de colheita do cenário 1.1 para o cenário 1.2 é relevante (igual a 1.940,62 horas, o que equivaleria ao tempo de se percorrer aproximadamente 200 talhões utilizando o tempo mínimo 578,89 minutos);
- Considerando a previsão de crescimento de área de cultivo para o ano de 2014 de 55.000 hectares, correspondendo a 11.000 talhões de área 50 hectares, a diferença no tempo utilizado na operação de colheita do cenário 1.1 para o cenário 1.2 seria de 5.496,66 horas, o que equivaleria ao tempo de se percorrer aproximadamente 570 talhões utilizando o tempo mínimo (578,89 minutos);

Tabela 15 – Resultados aplicados para área de cultivo atual e safra futura (2014)

Cenário	Área de 1 talhão		Área de 17653 hectares		Área de 55.000 hectares		
	Dimensões (m)	Distância (m)	Tempo (min)	Distância (km)	Tempo (h)	Distância (km)	Tempo (h)
1.1	250,00 x 200,00	33.441,42	578,89	118.068,28	34.063,82	367.855,62	96.481,67
1.2	200,00 x 250,00	33.440,38	611,87	118.064,61	36.004,47	367.844,18	101.978,33
1.3	175,00 x 285,71	33.526,82	637,03	118.369,79	37.484,97	368.795,02	106.171,67
2.1	500,00 x 200,00	66.670,32	1.021,94	117.693,12	30.067,18	366.686,76	85.161,67
2.2	400,00 x 250,00	66.619,63	1.054,26	117.603,63	31.018,09	366.407,97	87.855,00
2.3	350,00 x 285,71	66.755,26	1.080,07	117.843,06	31.777,46	367.153,93	90.005,83
3.1	400,00 X 375,00	100.323,62	1.587,65	118.067,52	31.140,87	367.853,27	88.202,78
3.2	350,00 x 428,57	100.126,30	1.620,02	117.835,30	31.775,79	367.129,77	90.001,11
3.3	250,00 X 600,00	100.548,46	1.740,65	118.332,13	34.141,88	368.677,69	96.702,78

Tabela 16 – Comparações entre os resultados da safra atual e a safra futura (2014)

Cenário	Área de 17653 hectares				Área de 55.000 hectares			
	Distância (km)	Diferença entre Distâncias (km)	Tempo (h)	Diferença entre Tempos (h)	Distância (km)	Diferença entre Distâncias (km)	Tempo (h)	Diferença entre Tempos (h)
1.1	118.068,28		34.063,82		367.855,62		96.481,67	
1.2	118.064,61	3,67	36.004,47	1.940,65	367.844,18	11,44	101.978,33	5.496,66
2.1	117.693,12		30.067,18		366.686,76		85.161,67	
2.2	117.603,63	89,49	31.018,09	950,91	366.407,97	278,79	87.855,00	2.693,33
3.1	118.067,52		31.140,87		367.853,27		88.202,78	
3.2	117.835,30	232,22	31.775,79	634,92	367.129,77	723,50	90.001,11	1.798,33

- Sendo assim, em relação ao tempo utilizado na operação de colheita, o cenário que apresentou melhores resultados foi o cenário 1.1;
- Já em relação à distância percorrida pela colhedora para realizar a colheita no talhão, considerando fatores como o custo total das operações de CCT, o cenário que apresentou a menor distância total percorrida foi o cenário 1.2 (dimensões 200,00 m x 250,00 m);

II. Área de 100.000 m²:

- O cenário 2.1 (dimensões 500,00 m x 200,00 m) apresentou o melhor tempo gasto para percorrer todo o talhão na operação de colheita, 1.021,94 minutos;
- Percentualmente, o aumento no tempo utilizado na operação de colheita de um cenário para o outro foi considerado pequeno, em torno de 3,2 % do cenário 2.1 para o cenário 2.2 e de 2,4% do cenário 2.2 para o cenário 2.3;
- Ao se analisar toda a área de plantio da safra 2010/2011, que possui 17.653 hectares e aproximadamente 1.765 talhões, considerando fatores como a duração da safra que é de aproximadamente 30 semanas, a diferença no tempo utilizado na operação de colheita do cenário 2.1 para o cenário 2.2 é relevante (igual a 950,91 horas, o que equivaleria ao tempo de se percorrer aproximadamente 56 talhões utilizando o tempo mínimo 1.021,94 minutos);
- Considerando a previsão de crescimento de área de cultivo para o ano de 2014 de 55.000 hectares, correspondendo a 5.500 talhões de área 50 hectares, a diferença no tempo utilizado na operação de colheita do cenário 2.1 para o cenário 2.2 seria de 2.693,33 horas, o que equivaleria ao tempo de se percorrer aproximadamente 159 talhões utilizando o tempo mínimo (1021,94 minutos);
- Sendo assim, em relação ao tempo utilizado na operação de colheita, o cenário que apresentou melhores resultados foi o cenário 2.1;
- Já em relação à distância percorrida pela colhedora para realizar a colheita no talhão, considerando fatores como o custo total das operações de CCT, o cenário que apresentou a menor distância total percorrida foi o cenário 2.2 (dimensões 400,00 m x 250,00 m).

III. Área de 150.000 m²:

- O cenário 3.1 (dimensões 400,00 m x 375,00 m) apresentou o melhor tempo gasto para percorrer todo o talhão na operação de colheita, 1.587,65 minutos;
- Percentualmente, o aumento no tempo utilizado na operação de colheita de um cenário para o outro foi considerado pequeno, em torno de 2,0% do cenário 3.1 para o cenário 3.2 e de 7,4% do cenário 2.2 para o cenário 2.3;
- Ao se analisar toda a área de plantio da safra 2010/2011, que possui 17.653 hectares e aproximadamente 1.176 talhões, considerando fatores como a duração da safra que é de aproximadamente 30 semanas, a diferença no tempo utilizado na operação de colheita do cenário 3.1 para o cenário 3.2 é relevante (igual a 634,92 horas, o que equivaleria ao tempo de se percorrer aproximadamente 24 talhões utilizando o tempo mínimo 1.587,65 minutos);
- Considerando a previsão de crescimento de área de cultivo para o ano de 2014 de 55.000 hectares, correspondendo a 3.667 talhões de área 50 hectares, a diferença no tempo utilizado na operação de colheita do cenário 3.1 para o cenário 3.2 seria de 1.798,33 horas, o que equivaleria ao tempo de se percorrer aproximadamente 68 talhões utilizando o tempo mínimo (1.587,65 minutos);
- Sendo assim, em relação ao tempo utilizado na operação de colheita, o cenário que apresentou melhores resultados foi o cenário 3.1;
- Já em relação à distância percorrida pela colhedora para realizar a colheita no talhão, considerando fatores como o custo total das operações de CCT, o cenário que apresentou a menor distância total percorrida foi o cenário 3.2 (dimensões 350,00 m x 428,57 m).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A partir do módulo de roteirização em arco *Arc Routing* do software TransCAD, pode-se construir as rotas que representaram as operações de CCT da cana-de-açúcar na lavoura com diferentes configurações, alcançando o objetivo geral do estudo.

Os conceitos e estudos pesquisados em diversas literaturas com base na Teoria dos Grafos foram pertinentes para a compreensão da lógica básica de configuração e funcionamento da rede de trabalho (*Network*) no TransCAD e, também, para a configuração do Problema de Roteirização.

Os resultados obtidos na roteirização em arco pelo TransCAD foram satisfatórios confirmando que as rotas configuradas para o processo de CCT da cana-de-açúcar, podem ser consideradas uma ferramenta útil no planejamento operacional de uma Usina produtora de açúcar e álcool. Algumas análises puderam ser realizadas com base nos resultados obtidos.

Comparando-se os resultados de cada uma das áreas consideradas no estudo de caso pode-se inferir que em relação ao tempo utilizado nas operações de colheita, os cenários 1.1 (dimensões 250,00 m x 200,00 m), 2.1 (dimensões 500,00 m x 200,00 m) e 3.1 (dimensões 400,00 m x 375,00 m) foram os que melhor sistematizaram a área em estudo, visto que os demais cenários apresentaram valores mais elevados.

Já em relação à distância total percorrida pela colhedora no talhão para realizar suas operações, os cenários que mostraram os valores menores foram o 1.2 (dimensões 200,00 m x 250,00 m), 2.2 (dimensões 400,00 m x 250,00 m) e 3.2 (dimensões 350,00 m x 428,57

m). Essa escolha se justifica em virtude do custo total ser obtido pelo produto do custo unitário de transporte (R\$/km) com a distância percorrida no talhão e no transporte do transbordo até o local onde o rodotrem fica aguardando para levar a cana-de-açúcar para a usina, ou seja, quanto menor forem as distâncias percorridas, menor será esse custo total. A economia considerando a menor distância percorrida terá impacto nos custos de produção, visto que, segundo dados fornecidos pela Usina, somente as operações de corte consomem mais de 50% dos gastos das operações de CCT.

Além disso, do ponto de vista da Usina, os gastos com a parte agrícola (plantio e operações de CCT) são elevados, chegando a 60% dos custos totais. Por isso, é importante otimizar as atividades na lavoura. A distância percorrida pelas colhedoras influencia, portanto, nos custos de transporte da colheita, uma vez que o custo total é calculado em função do custo unitário por quilômetro multiplicado pela distância total percorrida pela colhedora.

Alguns fatores, porém, devem ainda ser analisados. A cana-de-açúcar colhida nesta safra pela Usina não é de primeiro corte. Para esse tipo de cana, a aplicação da simulação mostrou ser eficaz. Todavia, se o caso em estudo tratar-se do primeiro corte da cana os resultados podem ser bem diferentes, já que, neste caso, é recomendado evitar o uso de colhedoras, pois o terreno não está totalmente nivelado, o que promoverá o aumentando da quantidade de impurezas minerais que vão para a indústria. Apesar de ser a meta do governo federal que toda a safra seja cortada mecanicamente em horizonte de médio prazo. Além disso, a colheita mecanizada dessa cana de primeiro corte acarreta em maior compactação do solo e maior desgaste das máquinas, pois a cana é mais viscosa e pesada.

Como sugestão para trabalhos futuros, considerando que a área dos talhões tem outras limitações como, por exemplo, a topografia na área da lavoura, seria importante fazer um estudo considerando toda essa área para quantificação do resultado total que obter-se-ia adotando-se áreas mais regulares dos talhões e se essa condição seria possível de implantar face às variações topográficas existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B.: Network Flows – Theory, Algorithms and Applications. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1993.

ALMEIDA, M. F. B. de. Roteirização de Veículos para o Transporte de Alunos da Zona Rural Utilizando um Sistema de Informações Geográficas. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1998.

ASSAD, A. A. Modeling and Implementation issues in vehicle routing. In: GOLDEN, B. L.; ASSAD, A. A. Vehicle Routing: Method and Studies, Elsevier Sciences Publisher, North Holland, Amsterdam: Elsevier Sciences Publishers, p 7-45, 1988.

BALDO, R. F. G. Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o transbordo. 49 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade de Campinas, Campinas, 2007.

BALLOU, R. Basic Logistics Management. New Jersey: Prentice-Hall. 1978.

BALLOU, R. H. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial. 5^a Edição. Porto Alegre: Bookman, 2006. 616p.

BARATA, M. Q. F. Otimização Econômica do Corte e Reforma de Canaviais. 173 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Economia Agrária). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1992.

BELFIORE, P. P. Redução de Custos em Logística. 220 p. 1^a Edição. São Paulo: Editora Saint Paul. 2006.

BOAVENTURA NETTO, P. O. Teoria e Modelos de Grafos. 4^a Edição. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 2006. 328p.

BODIN, L. D.; GOLDEN, B. Classification in Vehicle Routing and Scheduling. Networks, v.11, n.2, p.97-108, 1981.

BODIN, L. D.; GOLDEN, B.; ASSAD, A. A.; BALL, M. Rounting and Scheduling of Vehicle and Crews: The State of the Art. Computers & Operations Research, v.10, n.2, p.63-211, 1983.

BRAUNBECK, O. A.; MAGALHÃES, P. S. G. Colheita Sustentável com Aproveitamento Integral da Cana. Visão agrícola, Piracicaba, v.1, n.1, p.72-79, 2004.

CALIPER. Routing and Logistics with TransCAD 5.0. Caliper Corporation, Version 5.0, 2007.

CALIPER. TransCAD Transportatio GIS Software. User's Guide. Version 4.5. Caliper Corporation, Newton, EUA, 1996.

CÂMARA, G. Anatomia de um SIG. Curitiba: Sagres Editora, p. 11-15, ano 1, n.4, 1994.

CÂMARA, G. MEDEIROS, J. S. In: ASSAD, E. (org.), SANO, E. E. (org.). Sistemas de Informações Geográficas. Aplicações na Agricultura. Brasília: Embrapa – SPI, 1998.

CÂMARA G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. C.; MEDEIROS, C. M. B. Anatomia de Sistemas de Informações Geográficas. 206 p. Ministério da Ciência e Tecnologia (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Disponível em <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/10.07.13.36/doc/anatomia.pdf>>. Acesso em 20 ago. 2011.

CARRARA, C. M. Uma Aplicação do SIG Para a Localização e Alocação de Terminais Logísticos em Áreas Urbanas Congestionadas. 246p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CARREIRA, M. L. Desempenho operacional, econômico e energético do transporte de cana de açúcar: um estudo de caso. 82 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2010.

CARVALHO, J. M. C. Logística. 3^a ed. Lisboa: Edições Silabo, 2002.

CASTRO, L. B. Avaliação do serviço de coleta de resíduos sólidos domiciliares em cidades de médio porte utilizando sistemas de informações geográficas e receptores do sistema de posicionamento por satélite. 157 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2006.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, v.12, p. 568-581, 1964.

CUNHA, C. B. Uma Contribuição para o Problema de Roteirização de Veículos com Restrições Operacionais. 222 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

CUNHA, C. B. Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais. *Transportes*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, p. 51-74, 2000.

CUNHA, C. B.; BONASSER, U. O.; ABRAHÃO, F. T. M. Experimentos Computacionais com Heurísticas de Melhorias para o Problema do Caixeiro Viajante. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, Natal, 2002. Anais: Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes. Rio de Janeiro: ANPET, v.2, p. 105-117, 2002.

DELUQUI, K. K. Roteirização para veículo de coleta de resíduos sólidos domiciliares utilizando um Sistema de Informações Geográficas – SIG. 222 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DESROCHERS, M.; LENSTRA, J. K.; SAVELSBERGH, M. W. P. A Classification Scheme for the Vehicle Routing and Scheduling Problems. European Journal of Operational Research, v.46, n.3, p.322-332, 1990.

DUEKER, K. J., TON, T. Geographical Information Systems for Transport. In: Handbook of Transport Modelling. D.A Hensher and K.J. Button. Elsevier Science Ltd, 2000.

EDMONDS, J.; JOHNSON, E. L. Matching, Euler Tours and Chinese Postman. Mathematical Programming, v. 5, p. 88-124, 1973.

EISELT, H.A.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G.: Arc Routing Problems, Part I: The Chinese Postman Problem. Operations Research, v. 43, n. 2, March-April, 1995.

FAOSTAT - Food and Agricultural Commodities Production. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>. Acesso em: 06 abr. 2012.

FARKUH NETO, A.; LIMA, R. S. Roteirização de Veículos de uma Rede Atacadista com o Auxílio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção. n. 5, p. 18-39, 2006.

FEOLILOFF, P.; KOHAYAKAWA, Y.; WAKABAYASHI, Y. Uma introdução Sucinta à teoria dos grafos. 2007. Disponível em: <<http://www.ime.usp.br/~pf/teoriadosgrafos/texto/TeoriaDosGrafos.pdf>>, Acesso em: 17 ago. 2011.

FERREIRA FILHO, V. J. M.; MELO, A. C. S. Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos. Seção de Software. Pesquisa Operacional, v.21, n.2, p.223-232, 2001.

- FERREIRA FILHO, V. J. M.; MELO, A. C. S. Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-74382001000200007&script=sci_arttext&tlang=pt>. Acesso em: 10 abr. 2011.
- FREDERICKSON, G. N. Approximation Algorithms for Some Postman Problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, v. 26, p. 538-554, 1979.
- FREITAS FILHO, P. J. Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas – com Aplicações em Arena. 372 p. 2^a Edição. Florianópolis: Visual Books, 2008.
- GODINHO FILHO, M.; JUNQUEIRA, R. A. R. Um algoritmo para Auxiliar na Escolha de Métodos de Solução para o Problema do Carteiro Chinês: Proposta e Aplicação em uma Grande Cidade do Interior Paulista. In: SIMPÓSIO E ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Bauru, 2007.
- GOLDEN, B.; BALL, M.; BODIN, L. Current and Future Research Directions in Network Optimization. *Computers & Operations Research*, v. 8, n. 2, p. 71-81, 1981.
- GRANDE ENCICLOPÉDIA ILUSTRADA LAROUSSE CULTURAL. São Paulo, Plural Editora e Gráfica, 1995.
- GRISOTTO, M. E. Otimização do Transporte de Cana-de-açúcar por Caminhões. 125 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Matemática Aplicada). Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação da Universidade de Campinas, Campinas 1995.
- GROSS, J. L.; YELLEN, J. Graph Theory and Its Applications. 585 p. 1^a Edição. Bocca Raton: CRC. 1999.
- HANH, M. H. SISTEC: Simulador de Sistema de Transporte da Cana-de-açúcar. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

HALL, R. W. Research Opportunities in Logistics. *Transportation Research A*. Vol 19A. No. 516, pp. 399-402. 1985.

HARREL, C. R.; MOTT, J. R. A.; BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. G.; GOGG, T. J. Simulação Otimizando os Sistemas, Belge Simulação e IMAN, p 143, 2003.

KAWAMURA, M. S.; RONCONI, D. P.; YOSHIZAKI, H. Optimizing Transportation and Storage of Final Products in the Sugar and Ethanol Industry. *International Transactions in Operational Research*, v. 13, n. 5, p. 425-439, set. 2006.

LEI DA BALANÇA. Limites de Pesos e Dimensões dos Principais Veículos de Carga Utilizados no País. Disponível em: <<http://www.sulcarj.com.br/leidabalan%C3%A7a.html>> Acesso em: 15 jan. 2011.

LEMES, D. C. S. S. Planejamento do Sistema de Transportes de uma Cidade de Porte Médio Auxiliado por SIG-T. 125 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

LOPES, M. B. Simulação de um Sistema de Carregamento e Transporte de Cana-de-açúcar. 143 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Agronômica). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

LOPES FILHO, José Iran de Oliveira. Pós-avaliação da Previsão de Demanda por Transportes no Município de Fortaleza. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

MAGALHÃES, P. S. G.; BALDO, R. F. G.; CERRI, D. G. P. Sistema de Sincronismo entre a Colhedora da Cana-de-açúcar e o Veículo de Transbordo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 274-282, 2008.

MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A. Colheita de Cana-de-açúcar: Atualidades e Perspectivas. *Ingeniería rural y macanización agraria en el ámbito latinoamericano*. La Plata: Editora de la Universidad Nacional de La Plata.,v. 1, p. 262-73, 1998.

MELO, A. C. S. Avaliação do Uso de Sistemas de Roteirização de Veículos. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

MELO, A. C. S.; FERREIRA FILHO, V. J. M. Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos. Revista Pesquisa Operacional, v. 21, n. 2, p. 223-232, 2001.

MILLER, L. C. Definição das práticas agrícolas a serem realizadas nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Araras: Sigacana, 2008. Disponível em: <http://www.sigacana.com.br/d_COLHEITA%5C4.PLANEJ_E_OPER_DA_COLHEITA_DE_CANA_INDUSTRIAL_atualiz.htm>. Acesso em: 12 outubro 2010.

MUNDIM, J. U. C. Uso de Simulação de Eventos Discretos para o Dimensionamento de Frota para a Colheita e Transporte da Cana-de-açúcar. 104 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

NAZÁRIO, P. GIS: Definições e aplicações na logística. Disponível em: <<http://www.cel.coppead.ufrj.br/fr-gis.htm>>. Acesso em: 10 ago. 2011.

NEVES, J. L. M. Avaliação de Perdas Invisíveis em Colhedoras de Cana-de-açúcar Picada e Alternativas para sua Redução. 223 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 2003.

NOVAES, A. G. Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição. 3^a Edição. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2007. 404p.

NOVAES, A. G. Métodos de Otimização: Aplicação aos transportes. São Paulo: Editora Blücher, 1978. 436 p.

PAULA. M. A. A. F. Estudo de Roteirização de Veículos Empregando o TransCAD – Contribuição para a Distribuição Urbana de Cargas. 90 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

PELIZARO, C. Avaliação do Desempenho do Algoritmo de um Programa Comercial para Roteirização de Veículos. 166p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

RIPOLI, T. C. C.; FRANCESCHI, P.; MIALHE, L. G. Transporte Fluvial da Cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Álcool e Açúcar, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 18-22, 1984.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Biomassa de Cana-de-açúcar: Colheita, Energia e Ambiente. 310 p. 2^a Edição. Piracicaba. Editora Barros & Marques Edição Eletrônica, 2007.

RIPOLI, M. L. C.; RIPOLI, T.C.N. Sistemas de colheitas. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Org). Cana-de-açúcar, Campinas, Instituto Agronômico & Fundação IAC, 882 p. 2008.

RONEN, D. Perspectives on Practical Aspects of Truck Routing as Scheduling. European Journal of Operational Research., v.35, n.2, p.137-145, 1988.

ROSE, A. Uma Avaliação Comparativa de Alguns Sistemas de Informação Geográfica Aplicados aos Transportes. 139 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

SILVA, C. B.; MORAES, M. A. F. D. Inovação na Indústria Sucroalcooleira Paulista: os Determinantes da Adoção da Agricultura de Precisão. In: CONGRESSO SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, Porto Alegre, p. 01-15, 2009.

SILVA, J. E. A. R. Desenvolvimento de um Modelo de Simulação para Auxiliar o Gerenciamento de Sistemas de Corte, Carregamento e Transporte de Cana-de-açúcar. 128 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

UNICA – União as Agroindústria Canavieira de São Paulo. Dados de Produtividade das Safras. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 18 de dezembro de 2010.

UNICA – União as Agroindústria Canavieira de São Paulo. CANASAT – Avaliação da Área de Cana Disponível para Colheita na Safra 2008/2009. Disponível em: <http://www.unica.com.br/downloads/estatisticas/canasat_2008.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2011.

UNICA - União as Agroindústria Canavieira de São Paulo. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticias>>. Acesso em 06 de março de 2012.

VEIGA FILHO, A. A. Estudo do Processo de Mecanização do Corte na Cana-de-açúcar: o Caso do Estado de São Paulo, Brasil. Recitec, Recife, v. 3, n. 1, p. 74-99, 1999.

VEIGA FILHO, A. A.; FRONZAGLIA, T.; TORQUATO, S. A. A necessidade de inovação tecnológica agrícola para sustentar o novo ciclo expansionista do setor sucroalcooleiro. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Org). Cana-de-açúcar, Campinas, Instituto Agronômico & Fundação IAC, 882 p. 2008.

WANG, H.; WEN, Y.: Time Constrained Chinese Postman Problems. Computers and mathematics with Applications, v. 44, n. 3-4, p. 375-387, 2002.

ANEXO A

ARQUIVOS DE SAÍDA LISTANDO OS DADOS DE ENTRADA E CONFIGURAÇÕES

Procedure Arc Routing 1.1

Inputs	
Depot View	Endpoint
Depot Selection	Depot (#depots = 1)
Network File	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENÁRIO 50.000\CENARIO 1.1\ARC 1.1.net
MInimize	Length
Service Flag Field	[Service Flag]
Service Code	1
Depot Field	Length
Skim Field 1	Length (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 2	[Service Time] (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 3	[Service Load] (Service Links)
Skim Field 4	[Deadhead Time] (Service Links)
Skim Field 5	[Deadhead Workload] (Service Links)
Pass Method	Normal
Route system	Created
Itinerary Report	Created
Depot Name Field	Depot
Link View	ARC ROUTING 1.1
Link Name Field	ID
Shifts	Not created
Deadhead Milepost Layer	Not created
Outputs	
Itinerary Report	C:\Users\ANATHE~1\AppData\Local\Temp\TransCAD\~vdm6.xml
Route System	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENÁRIO 50.000\CENARIO 1.1\rota cenario 1.1.rts
Total Deadhead Cost	0.00
# Links	538
# Deadhead Links	0
Total Turn Penalty	30.00
# Left Turns	267
# Right Turns	266
# U-Turns	3
# Straight Moves	1
Total Running Time 00:00:00.109.	

Procedure Arc Routing 1.2

Inputs	
Depot View	Endpoint
Depot Selection	Depot (#depots = 1)
Network File	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENÁRIO 50.000\CENARIO 1.2\ARC 1.2.net
MInimize	Length
Service Flag Field	[Service Flag]
Service Code	1
Depot Field	Length
Skim Field 1	Length (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 2	[Service Time] (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 3	[Service Load] (Service Links)
Skim Field 4	[Deadhead Time] (Service Links)
Skim Field 5	[Dedhead Workload] (Service Links)
Pass Method	Normal
Route system	Created
Itinerary Report	Created
Depot Name Field	Depot
Link View	ARC ROUTING 1.2
Link Name Field	ID
Shifts	Not created
Deadhead Milepost Layer	Not created
Outputs	
Itinerary Report	C:\Users\ANATHE~1\AppData\Local\Temp\TransCAD\~vdm7.xml
Route System	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENÁRIO 50.000\CENARIO 1.2\rota cenario 1.2.rts
Total Deadhead Cost	0.00
# Links	670
# Deadhead Links	0
Total Turn Penalty	30.00
# Left Turns	333
# Right Turns	332
# U-Turns	3
# Straight Moves	1
Total Running Time 00:00:00.109.	

Procedure Arc Routing 1.3

Inputs	
Depot View	Endpoint
Depot Selection	Depot (#depots = 1)
Network File	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENÁRIO 50.000\CENARIO 1.3\ARC 1.3.net
MInimize	Length
Service Flag Field	[Service Flag]
Service Code	1
Depot Field	Length
Skim Field 1	Length (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 2	[Service Time] (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 3	[Service Load] (Service Links)
Skim Field 4	[Deadhead Time] (Service Links)
Skim Field 5	[Deadhead Workload] (Service Links)
Pass Method	Normal
Route system	Created
Itinerary Report	Created
Depot Name Field	Depot
Link View	ARC ROUTING 1.3
Link Name Field	ID
Shifts	Not created
Deadhead Milepost Layer	Not created
Outputs	
Itinerary Report	C:\Users\ANATHE~1\AppData\Local\Temp\TransCAD\~vdm8.xml
Route System	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENÁRIO 50.000\CENARIO 1.3\rota cenario 1.3.rts
Total Deadhead Cost	0.00
# Links	766
# Deadhead Links	0
Total Turn Penalty	30.00
# Left Turns	381
# Right Turns	380
# U-Turns	3
# Straight Moves	1
Total Running Time 00:00:00.094.	

Procedure Arc Routing 2.1

Inputs	
Depot View	Endpoint
Depot Selection	Depot (#depots = 1)
Network File	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 100.000\CENARIO 2.1\ARC 2.1.net
MInimize	Length
Service Flag Field	[Service Flag]
Service Code	1
Depot Field	Length
Skim Field 1	Length (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 2	[Service Time] (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 3	[Service Load] (Service Links)
Skim Field 4	[Deadhead Time] (Service Links)
Skim Field 5	[Deadhead Workload] (Service Links)
Pass Method	Normal
Route system	Created
Itinerary Report	Created
Depot Name Field	Depot
Link View	ARC ROUTING 2.1
Link Name Field	ID
Shifts	Not created
Deadhead Milepost Layer	Not created
Outputs	
Itinerary Report	C:\Users\ANATHE~1\AppData\Local\Temp\TransCAD\~vdm10.xml
Route System	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 100.000\CENARIO 2.1\rota cenario 2.1.rts
Total Deadhead Cost	0.00
# Links	804
# Deadhead Links	0
Total Turn Penalty	30.00
# Left Turns	267
# Right Turns	266
# U-Turns	3
# Straight Moves	267
Total Running Time 00:00:00.109.	

Procedure Arc Routing 2.2

Inputs	
Depot View	Endpoint
Depot Selection	Depot (#depots = 1)
Network File	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 100.000\CENARIO 2.2\ARC 2.2.net
MInimize	Length
Service Flag Field	[Service Flag]
Service Code	1
Depot Field	Length
Skim Field 1	Length (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 2	[Service Time] (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 3	[Service Load] (Service Links)
Skim Field 4	[Deadhead Time] (Service Links)
Skim Field 5	[Deadhead Workload] (Service Links)
Pass Method	Normal
Route system	Created
Itinerary Report	Created
Depot Name Field	Depot
Link View	ARC ROUTING 2.2
Link Name Field	ID
Shifts	Not created
Deadhead Milepost Layer	Not created
Outputs	
Itinerary Report	C:\Users\ANATHE~1\AppData\Local\Temp\TransCAD\~vdm11.xml
Route System	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 100.000\CENARIO 2.2\rotas cenario 2.2.rts
Total Deadhead Cost	0.00
# Links	1002
# Deadhead Links	0
Total Turn Penalty	30.00
# Left Turns	333
# Right Turns	332
# U-Turns	3
# Straight Moves	333
Total Running Time 00:00:00.140.	

Procedure Arc Routing 2.3

Inputs	
Depot View	Endpoint
Depot Selection	Depot (#depots = 1)
Network File	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 100.000\CENARIO 2.3\ARC 2.3.net
MInimize	Length
Service Flag Field	[Service Flag]
Service Code	1
Depot Field	Length
Skim Field 1	Length (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 2	[Service Time] (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 3	[Service Load] (Service Links)
Skim Field 4	[Deadhead Time] (Service Links)
Skim Field 5	[Deadhead Workload] (Service Links)
Pass Method	Normal
Route system	Created
Itinerary Report	Created
Depot Name Field	Depot
Link View	ARC ROUTING 2.3
Link Name Field	ID
Shifts	Not created
Deadhead Milepost Layer	Not created
Outputs	
Itinerary Report	C:\Users\ANATHE~1\AppData\Local\Temp\TransCAD\~vdm12.xml
Route System	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 100.000\CENARIO 2.3\rota cenario 2.3.rts
Total Deadhead Cost	0.00
# Links	766
# Deadhead Links	0
Total Turn Penalty	30.00
# Left Turns	381
# Right Turns	380
# U-Turns	3
# Straight Moves	1
Total Running Time 00:00:00.109.	

Procedure Arc Routing 3.1

Inputs	
Depot View	Endpoint
Depot Selection	Depot (#depots = 1)
Network File	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 150.000\CENARIO 3.1\ARC 3.1.net
MInimize	Length
Service Flag Field	[Service Flag]
Service Code	1
Depot Field	Length
Skim Field 1	Length (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 2	[Service Time] (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 3	[Service Load] (Service Links)
Skim Field 4	[Deadhead Time] (Service Links)
Skim Field 5	[Deadhead Workload] (Service Links)
Pass Method	Normal
Route system	Created
Itinerary Report	Created
Depot Name Field	Depot
Link View	ARC ROUTING 3.1
Link Name Field	ID
Shifts	Not created
Deadhead Milepost Layer	Not created
Outputs	
Itinerary Report	C:\Users\ANATHE~1\AppData\Local\Temp\TransCAD\~vdm17.xml
Route System	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 150.000\CENARIO 3.1\rota cenario 3.1.rts
Total Deadhead Cost	0.00
# Links	1506
# Deadhead Links	0
Total Turn Penalty	30.00
# Left Turns	500
# Right Turns	501
# U-Turns	3
# Straight Moves	501
Total Running Time 00:00:00.109.	

Procedure Arc Routing 3.2

Inputs	
Depot View	Endpoint
Depot Selection	Depot (#depots = 1)
Network File	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 150.000\CENARIO 3.2\ARC 3.2.net
MInimize	Length
Service Flag Field	[Service Flag]
Service Code	1
Depot Field	Length
Skim Field 1	Length (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 2	[Service Time] (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 3	[Service Load] (Service Links)
Skim Field 4	[Deadhead Time] (Service Links)
Skim Field 5	[Deadhead Workload] (Service Links)
Pass Method	Normal
Route system	Created
Itinerary Report	Created
Depot Name Field	Depot
Link View	ARC ROUTING 3.2
Link Name Field	ID
Shifts	Not created
Deadhead Milepost Layer	Not created
Outputs	
Itinerary Report	C:\Users\ANATHE~1\AppData\Local\Temp\TransCAD\~vdm18.xml
Route System	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 150.000\CENARIO 3.2\rota cenario 3.2.rts
Total Deadhead Cost	0.00
# Links	1146
# Deadhead Links	0
Total Turn Penalty	30.00
# Left Turns	571
# Right Turns	570
# U-Turns	3
# Straight Moves	1
Total Running Time 00:00:00.109.	

Procedure Arc Routing 3.3

Inputs	
Depot View	Endpoint
Depot Selection	Depot (#depots = 1)
Network File	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 150.000\CENARIO 3.3\ARC 3.3.net
MInimize	Length
Service Flag Field	[Service Flag]
Service Code	1
Depot Field	Length
Skim Field 1	Length (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 2	[Service Time] (Service & Deadhead Links Separately)
Skim Field 3	[Service Load] (Service Links)
Skim Field 4	[Deadhead Time] (Service Links)
Skim Field 5	[Deadhead Workload] (Service Links)
Pass Method	Normal
Route system	Created
Itinerary Report	Created
Depot Name Field	Depot
Link View	ARC ROUTING 3.3
Link Name Field	ID
Shifts	Not created
Deadhead Milepost Layer	Not created
Outputs	
Itinerary Report	C:\Users\ANATHE~1\AppData\Local\Temp\TransCAD\~vdm19.xml
Route System	C:\Users\Ana Thereza\Desktop\Dissertacao\CENARIO 150.000\CENARIO 3.3\rota cenario 3.3.rts
Total Deadhead Cost	0.00
# Links	1606
# Deadhead Links	0
Total Turn Penalty	30.00
# Left Turns	801
# Right Turns	800
# U-Turns	3
# Straight Moves	1
Total Running Time 00:00:00.125.	

ANEXO B

RESUMO DAS ESTATÍSTICAS PARA CADA ROTA

Cenário 1.1

Route_Name	Route 1
Route_ID	1
DepotID	267
DHCost	0.00
Links	538
DHLinks	0
TurnPenalty	30.00
LeftTurns	267
RightTurns	266
UTurns	3
StraightTurns	1
S_Length	66882.84
D_Length	0.00
[S_[Service Time]]	891.77
[D_[Service Time]]	0.00
[S_[Service Load]]	590.73
[S_[Deadhead Time]]	266.00
[S_[Deadhead Workload]]	5320.00

Cenário 1.2

Route_Name	Route 1
Route_ID	1
DepotID	333
DHCost	0.00
Links	670
DHLinks	0
TurnPenalty	30.00
LeftTurns	333
RightTurns	332
UTurns	3
StraightTurns	1
S_Length	66880.76
D_Length	0.00
[S_[Service Time]]	891.74
[D_[Service Time]]	0.00
[S_[Service Load]]	589.84
[S_[Deadhead Time]]	332.00
[S_[Deadhead Workload]]	6640.00

Cenário 1.3

Route_Name	Route 1
Route_ID	1
DepotID	381
DHCost	0.00
Links	766
DHLinks	0
TurnPenalty	30.00
LeftTurns	381
RightTurns	380
UTurns	3
StraightTurns	1
S_Length	67053.63
D_Length	0.00
[S_[Service Time]]	894.05
[D_[Service Time]]	0.00
[S_[Service Load]]	590.73
[S_[Deadhead Time]]	380.00
[S_[Deadhead Workload]]	7600.00

Cenário 2.1

Route_Name	Route 1
Route_ID	1
DepotID	400
DHCost	0.00
Links	804
DHLinks	0
TurnPenalty	30.00
LeftTurns	267
RightTurns	266
UTurns	3
StraightTurns	267
S_Length	133340.63
D_Length	0.00
[S_[Service Time]]	1777.88
[D_[Service Time]]	0.00
[S_[Service Load]]	1181.46
[S_[Deadhead Time]]	532.00
[S_[Deadhead Workload]]	10640.00

Cenário 2.2

Route_Name	Route 1
Route_ID	1
DepotID	499
DHCost	0.00
Links	1002
DHLinks	0
TurnPenalty	30.00
LeftTurns	333
RightTurns	332
UTurns	3
StraightTurns	333
S_Length	133239.25
D_Length	0.00
[S_[Service Time]]	1776.52
[D_[Service Time]]	0.00
[S_[Service Load]]	1179.68
[S_[Deadhead Time]]	664.00
[S_[Deadhead Workload]]	13280.00

Cenário 2.3

Route_Name	Route 1
Route_ID	1
DepotID	381
DHCost	0.00
Links	766
DHLinks	0
TurnPenalty	30.00
LeftTurns	381
RightTurns	380
UTurns	3
StraightTurns	1
S_Length	133510.51
D_Length	0.00
[S_[Service Time]]	1780.14
[D_[Service Time]]	0.00
[S_[Service Load]]	1181.46
[S_[Deadhead Time]]	380.00
[S_[Deadhead Workload]]	7600.00

Cenário 3.1

Route_Name	Route 1
Route_ID	1
DepotID	751
DHCost	0.00
Links	1506
DHLinks	0
TurnPenalty	30.00
LeftTurns	500
RightTurns	501
UTurns	3
StraightTurns	501
S_Length	200647.24
D_Length	0.00
[S_[Service Time]]	2675.30
[D_[Service Time]]	0.00
[S_[Service Load]]	1776.63
[S_[Deadhead Time]]	1000.00
[S_[Deadhead Workload]]	20000.00

Cenário 3.2

Route_Name	Route 1
Route_ID	1
DepotID	380
DHCost	0.00
Links	1146
DHLinks	0
TurnPenalty	30.00
LeftTurns	571
RightTurns	570
UTurns	3
StraightTurns	1
S_Length	200252.60
D_Length	0.00
[S_[Service Time]]	2670.03
[D_[Service Time]]	0.00
[S_[Service Load]]	1772.19
[S_[Deadhead Time]]	570.00
[S_[Deadhead Workload]]	11400.00

Cenário 3.3

Route_Name	Route 1
Route_ID	1
DepotID	801
DHCost	0.00
Links	1606
DHLinks	0
TurnPenalty	30.00
LeftTurns	801
RightTurns	800
UTurns	3
StraightTurns	1
S_Length	201096.92
D_Length	0.00
[S_[Service Time]]	2681.29
[D_[Service Time]]	0.00
[S_[Service Load]]	1776.63
[S_[Deadhead Time]]	800.00
[S_[Deadhead Workload]]	16000.00