



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

NEISVALDO BARBOSA DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA O GERENCIAMENTO DO
SISTEMA DE TRANSPORTE DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum spp.*)**

FORTALEZA

2021

NEISVALDO BARBOSA DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA O GERENCIAMENTO DO SISTEMA
DE TRANSPORTE DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* spp.)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo de Almeida Monteiro.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alessandro Chioderoli.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S236d Santos, Neivaldo Barbosa dos.
Desenvolvimento de um software para o gerenciamento do sistema de transporte de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) / Neivaldo Barbosa dos Santos. – 2021.
84 f. : il.
Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Leonardo de Almeida Monteiro.
Coorientação: Prof. Dr. Carlos Alessandro Chioderoli.
1. Mecanização agrícola. 2. Logística. 3. Planejamento e gerenciamento. 4. Modelo computacional. 5. Simulação. I. Título.

CDD 630

NEISVALDO BARBOSA DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA O GERENCIAMENTO DO SISTEMA
DE TRANSPORTE DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum spp.*)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo de Almeida Monteiro (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Alberto Viliotti
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Albiero
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Prof. Dr. Flávio Hiroshi Kaneko
Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM)

Prof. Dr. Tiago Rodrigo Francetto
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

A Deus.

Aos meus pais, Maria Neide Barbosa Santos e
Nivaldo Ferreira dos Santos.

As minhas irmãs, Valdineide Barbosa dos
Santos e Nivalneide Barbosa dos Santos.

A minha esposa, Dra. Catarina de Bortoli
Munhae dos Santos.

AGRADECIMENTOS

À UFPI/CPCE, por ter concedido o meu afastamento para cursar o doutorado.

Ao Prof. Dr. Leonardo de Almeida Monteiro, pela excelente orientação.

Ao Prof. Dr. Carlos Alessandro Chioderoli, pela excelente co-orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Carlos Alberto Viliotti, e Prof. Dr. Daniel Albiero, Prof. Dr. Flávio Hiroshi Kaneko e Prof. Dr. Tiago Rodrigo Francetto pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas de turma Elivânia Maria Sousa Nascimento, Isabela Oliveira Lima, José Vieira Diniz, José Wilson Nascimento de Souza, Leonardo Lenin Marques de Brito, Luiz Gonzaga, Marcelo Queiroz Amorim, Marcio Porfírio da Silva, Natália de Oliveira, Rita de Cássia Peres Borges e Walisson Marques Silveira pela nossa convivência nas aulas e durante a realização dos trabalhos das disciplinas na sala de estudos da ESA.

Ao ex-coordenador do PPGEA, o professor Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa sempre pelo seu entusiasmo e suporte fornecido a mim.

Aos professores Dr. Daniel Albiero, Dr. Luis de França Camboim Neto, Dr. Sebastião Medeiros Filho, Dr. Carlos Alberto Viliotti, Dr. Fernando Bezerra Lopes, Dr. Alan Bernard Oliveira de Sousa e Dra. Isabel Cristina da Silva Araújo pelos ensinamentos nas disciplinas cursadas.

Aos secretários do PPGEA, Manoel Rodrigues da Silva (Jacó) e Ivna Karla Magalhães sempre pela disponibilidade para esclarecer as dúvidas sobre as atividades do curso.

“Viver é acalentar sonhos e esperanças,
fazendo da fé a nossa inspiração maior. É
buscar nas pequenas coisas um grande motivo
para ser feliz!”

Mario Quintana

RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar destinada às usinas produtoras de açúcar, álcool e co-geração de energia elétrica. O transporte de cana das usinas é realizado por caminhões com reboques e cavalos mecânicos com semireboques. O sistema modal rodoviário do transporte de cana faz uso desses equipamentos, a fim de atender a demanda contínua da matéria-prima colhida, visando alcançar um mínimo custo. O objetivo deste trabalho é de analisar as variáveis do desempenho operacional e econômico de diferentes equipamentos do transporte de cana-de-açúcar. Devido a dificuldade em atender o objetivo nas condições a campo, optou-se em desenvolver um modelo computacional denominado “*TransporteCana*”, em planilha eletrônica. O modelo foi verificado quanto a possíveis erros de rotina, validado, utilizado na análise das variáveis e na geração de resultados. Os resultados evidenciaram que aumento do raio médio da distância impacta negativamente no desempenho operacional e econômico dos conjuntos. A carga das carrocerias, raio médio da distância e preço do combustível são as variáveis que mais impactam no custo dos equipamentos do sistema de transporte. O conjunto caminhão bitruck e reboque tem maior custo operacional de produção e maior impacto no custo do sistema de transporte da usina.

Palavras-chave: mecanização agrícola; logística; planejamento e gerenciamento; modelo computacional; simulação; treminhão; rodotrem; recapagens de pneus.

ABSTRACT

Brazil is the world's largest producer of sugarcane destined for sugar, alcohol and cogeneration plants. Sugar cane transportation from the plants is carried out by trucks with trailers and mechanical horses with semi-trailers. The modal road system for the transportation of cane makes use of this equipment, in order to meet the continuous demand for the raw material harvested, correct at a minimum cost. The objective of this work is to analyze the variables of the operational and economic performance of different sugarcane transport equipment. Finding a difficulty in meeting the objective in the field conditions, it was decided to develop a computational model called "*TransporteCana*", in an electronic spreadsheet. The model was checked for possible routine errors, validated, used in the analysis of variables and in the generation of results. The results showed that an increase in the average distance radius negatively impacts the operational and economic performance of the groups. The bodywork load, average distance radius and fuel price are the variables that most impact the cost of transport system equipment. The set of bitruck trucks and trailers has a higher operational cost of production and a greater impact on the cost of the plant's transportation system.

Keywords: agricultural mechanization; logistics; planning and management; computational model; simulation; truck and trailer; mechanical horse and semi-trailer; tire retreads.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos do sistema logístico de cana-de-açúcar das usinas	17
Figura 2 – Processos do sistema de recepção de cana-de-açúcar das usinas.....	18
Figura 3 – Sistema de transporte de cana-de-açúcar das usinas do Brasil	19
Figura 4 – Abordagem do funcionamento dos equipamentos da Usina Hipotética no sistema de transporte.....	31
Figura 5 – Fluxograma geral do modelo computacional.....	33
Figura 6 – Variáveis de entrada do planejamento climático do modelo.....	76
Figura 7 – Variáveis de entrada do modelo.....	77
Figura 8 – Variáveis de saída do modelo.....	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção transportada na safra em função do raio médio da distância	46
Gráfico 2 – Distância trafegada na safra em função do raio médio da distância	48
Gráfico 3 – Consumo operacional de combustível na safra em função do raio médio da distância	49
Gráfico 4 – Número de conjuntos necessários em função da produção da usina e do raio médio da distância.....	50
Gráfico 5 – Alteração no custo operacional de produção dos conjuntos.....	52
Gráfico 6 – Validação do modelo com o conjunto caminhão e reboque.....	53
Gráfico 7 – Validação do modelo com o conjunto cavalo mecânico e semireboque.....	55
Gráfico 8 – Distribuição dos custos (%) para o Cenário Elaborado: a - Conjunto Caminhão Bitruck e Reboque; b - Conjunto Cavalo Mecânico e Semireboque. DPA - Depreciação anual, JRA - Juro anual, AST - Alojamento, seguro e taxas, LIC - Licenciamento, CCB - Custo com combustível, CRM - Custo com reparo e manutenção, CRMPN - Custo com reparo e manutenção do pneu novo e CRMPR - Custo com reparo e manutenção do pneu recapado.....	57
Gráfico 9 – Distribuição (%) do ganho bruto da usina com a produção transportada na safra (GBUPTS), ganho líquido da usina com a produção transportada na safra (GLUPTS) e custo total (CTC) do conjunto: a - Conjunto Caminhão Bitruck e Reboque e b - Conjunto Cavalo Mecânico e Semireboque.....	58
Gráfico 10 – Participação (%) do custo do Conjunto Caminhão Bitruck com Reboque e do Conjunto Cavalo Mecânico com Semireboque no sistema de transporte	59

de cana-de-açúcar.....	
Gráfico 11 – Custo operacional de produção e velocidade média de trabalho em função do raio médio da distância.....	60
Gráfico 12 – Custo operacional de produção e potência nominal do motor em função do raio médio da distância.....	62
Gráfico 13 – Custo operacional de produção e eficiência de disponibilidade em função do raio médio da distância.....	64
Gráfico 14 – Custo operacional de produção e variação relativa do custo operacional de produção em função do número de recapagens de pneus do conjunto caminhão bitruck com reboques.....	65
Gráfico 15 – Custo operacional de produção e variação relativa do custo operacional de produção em função do número de recapagens de pneus do conjunto cavalo mecânico com semireboques.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Série histórica da área e produção agrícola das safras de 2005-2006 a 2017-2018.....	16
Tabela 2 – Variável econômica, técnicas, gerencial e operacionais dos equipamentos para o Cenário Elaborado	32
Tabela 3 – Consumo médio de combustível por faixa de potência nominal do motor do equipamento	40
Tabela 4 – Análise descritiva dos dados secundários e gerado pelo modelo com o conjunto caminhão e reboque.....	54
Tabela 5 – Análise descritiva dos dados secundários e gerado pelo modelo com o conjunto cavalo mecânico e semireboque.....	56

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
UDOP	União dos Produtores de Bioenergia

LISTA DE ABREVIATURAS

AST	Alojamento, seguro e taxas do equipamento
CB	Consumo de combustível
CC	Carga das carrocerias
CCB	Custo com combustível
CF	Custo fixo do equipamento
COC	Custo operacional do caminhão bitruck
COCCMSR	Custo operacional do conjunto cavalo mecânico e semireboque
COCCR	Custo operacional do conjunto caminhão bitruck e reboque
COCM	Custo operacional do cavalo mecânico
COCS	Consumo operacional de combustível na safra
COE	Custo operacional do equipamento
COPC	Custo operacional de produção do conjunto
COPCB	Custo operacional de produção do caminhão bitruck
COPCCM	Custo operacional de produção do caminhão bitruck e cavalo mecânico
COPCCMSR	Custo operacional de produção do conjunto cavalo mecânico e semireboque
COPCCR	Custo operacional de produção do conjunto caminhão bitruck e reboque
COPCM	Custo operacional de produção do cavalo mecânico
COPR	Custo operacional de produção do reboque
COPRSR	Custo operacional de produção do reboque e semireboque
COPSR	Custo operacional de produção do semireboque
COR	Custo operacional do reboque
COSR	Custo operacional do semireboque
CRM	Custo com reparo e manutenção
CRMBCM	Custo com reparo e manutenção do caminhão bitruck e do cavalo mecânico
CRMPN	Custo com reparo e manutenção do pneu novo
CRMPR	Custo com reparo e manutenção do pneu recapado
CRMR	Custo com reparo e manutenção do reboque
CRMSR	Custo com reparo e manutenção do semireboque
CTC	Carga total do conjunto
CUTC	Custo total do conjunto
CTPC	Capacidade total de produção do conjunto

CV	Custo variável do equipamento
DPA	Depreciação anual do equipamento
DTD	Distância trafegada no dia
DTM	Distância trafegada no mês
DTS	Distância trafegada na safra
DTTCCD	Distância total trafegada no ciclo de carregamento e descarregamento
Efd	Eficiência de disponibilidade, em decimal
FRM	Fator de reparo e manutenção
GBUPTS	Ganho bruto da usina com a produção transportada na safra
GLUPTS	Ganho líquido da usina com a produção transportada na safra
i	Taxa de juros ao ano
JRA	Juros anual do equipamento
Jt	Jornada de trabalho
LIC	Licenciamento do equipamento
NC	Número de carrocerias
NCDD	Número de carregamentos e descarregamentos no dia
NCDM	Número de carregamentos e descarregamentos no mês
NCDS	Número de carregamentos e descarregamentos na safra
NCN	Número de conjuntos necessários
Nd	Número de dias
Ndf	Número de domingos e feriados
Nduit	Número de dias úteis impróprios para o transporte
NP	Número de pneus
NRP	Número de recapagens do pneu
PL	Preço do litro do combustível
PNM	Potência nominal do motor
PPN	Preço do pneu novo
PPR	Preço do pneu recapado
PTCEU	Preço estimado da tonelada de cana entregue na usina
PTD	Produção transportada no dia
PTM	Produção transportada no mês
PTS	Produção transportada na safra
PUS	Produção da usina na safra

RMD	Raio médio da distância
RP	Ritmo de produção
TC	Tempo de carregamento
TD	Tempo de descarregamento
TDd	Tempo disponível em dias de safra
TDM	Total de dias de um mês
TTCCD	Tempo total do ciclo de carregamento e descarregamento
Vf	Valor final do equipamento
Vi	Valor inicial do equipamento
VMT	Velocidade média de trabalho
VUA	Vida útil em ano do equipamento
VUPN	Vida útil do pneu novo
VUPR	Vida útil do pneu recapado
VUQ	Vida útil em quilômetros do equipamento

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
min	Minuto
h	Hora
km	Quilômetro
km h ⁻¹	Quilômetros por hora
t	Tonelada
t h ⁻¹	Tonelada por hora
t dia ⁻¹	Tonelada por dia
t mês ⁻¹	Tonelada por mês
t Ano ⁻¹	Tonelada por ano
km dia ⁻¹	Quilômetros por dia
km mês ⁻¹	Quilômetros por mês
km Ano ⁻¹	Quilômetros por ano
km L ⁻¹	Quilômetros por litro
L t ⁻¹	Litros por tonelada
kW	Quilowatt
CV	Cavalo vapor
C++	Linguagem de programação compilada multiparadigma
€	Euros
US\$ t ⁻¹	Dólares por tonelada
AU\$ Ano ⁻¹	Dólares australiano por ano
R\$	Reais
R\$ km ⁻¹	Reais por quilômetro
R\$ L ⁻¹	Reais por litro
R\$ t ⁻¹	Reais por tonelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Cultura da cana-de-açúcar	16
2.2	Logística e transporte de cana-de-açúcar	17
2.3	Pneus	21
2.4	Modelos computacionais e simulações	22
2.5	Modelagem computacional	26
3	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1	Clima	34
3.2	Desempenho operacional	35
3.3	Desempenho econômico	39
3.4	Ganhos econômicos da usina	44
3.5	Análise de sensibilidade, consistência e validação	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Produção transportada na safra	46
4.2	Distância trafegada na safra	47
4.3	Consumo operacional de combustível na safra	49
4.4	Número de conjuntos necessários	50
4.5	Análise de sensibilidade e consistência do modelo	51
4.6	Validação do modelo	53
4.7	Distribuição dos custos	56
4.8	Distribuição dos ganhos da usina	57
4.9	Participação do custo dos conjuntos	58
4.10	Velocidade média de trabalho	59
4.11	Potência nominal do motor	61
4.12	Eficiência de disponibilidade	63

4.13 Recapagens de pneus	65
5 CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A - MODELO COMPUTACIONAL	76

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a estimativa da área cultivada com cana-de-açúcar para a safra 2021/2022 é de 8,24 milhões de hectares e uma produção total prevista na safra de 592,03 milhões de toneladas (CONAB, 2021).

As usinas de cana-de-açúcar requerem uma demanda de matéria-prima a ser processada e que antes é preciso ser colhida no campo. Após colheita, a cana é transportada por caminhões e cavalos mecânicos com reboques e semireboques, a fim de atender a demanda contínua da matéria-prima, sendo o sistema de transporte influenciado por fatores como clima e distância entre a usina e campo. Além desses, existem outros fatores a serem considerados no sistema de transporte, como as características técnicas dos equipamentos, gerenciais e econômica. O fator econômico é representado pelo custo do transporte, que está diretamente relacionado com a distância percorrida pelos equipamentos entre a usina e campo.

Para o planejamento e gerenciamento do sistema de transporte é necessário ser previamente realizado, a fim de contribuir na redução da fila de espera dos equipamentos de transporte na recepção da usina, nos tempos de parada da moenda e no número de equipamentos necessários, de forma a reduzir também os custos operacionais e aumentar a competitividade da usina com as concorrentes. Nesse contexto, é importante também considerar que na falta de adequado método de planejamento e gerenciamento para o sistema de transporte de cana, pode acarretar atrasos nos tempos operacionais e, por consequência, prejuízos diretos e indiretos oriundos da qualidade da matéria-prima colhida. Dessa forma, se um modelo computacional adequado for desenvolvido, então é possível otimizar o gerenciamento do sistema de transporte.

No gerenciamento de sistemas mecanizados agrícolas, o desempenho operacional dos equipamentos tem relação direta com o desempenho econômico, devido à influência das variáveis de desempenho operacional e econômico ser inter-relacionadas, de modo que funcionam de forma sistêmica. Nas condições práticas, a campo, é difícil estudar o sistema de transporte de cana, em razão do número de variáveis envolvidas, o que pode ser possível, por meio da modelagem computacional.

A modelagem computacional é tida como ferramenta porque facilita a realização da ideia do trabalho, a fim de desempenhar elementos e elaborar a disposição dos dados (cenários). Além disso, a modelagem também é adotada porque disponibiliza esclarecimento admissível para sanar o problema. O objetivo deste trabalho é de analisar as variáveis do

desempenho operacional e econômico de diferentes equipamentos do transporte de cana-de-açúcar e desenvolver um software para o gerenciamento do sistema de transporte das usinas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura da cana-de-açúcar

A cultura da cana-de-açúcar no País, que é direcionada à produção do açúcar e álcool, em termos de área e produção agrícola, continua em expansão, conforme a série histórica das safras 2005-2006 a 2017-2018, da Tabela 1, de acordo com a (CONAB, 2018b).

Tabela 1 - Série histórica da área e produção agrícola das safras de 2005-2006 a 2017-2018

SAFRAS	2005-06	2006-07	2007-08	2008-09	2009-10	2010-11	2011-12	2012-13	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17	2017-18
Área (Milhões ha)	5.84	6.16	7.01	7.06	7.41	8.06	8.36	8.49	8.81	9.00	8.65	9.07	8.77
Produção (Milhões t)	431.4	474.8	571.4	571.4	604.5	624.0	561.0	589.0	658.8	634.7	665.5	690.9	646.3

Fonte: CONAB (2018b)

O cultivo de cana no Brasil continua em expansão, em decorrência da crescente necessidade do mercado pela produção de álcool, a fim de atender a demanda da frota de veículos flex e os aumentos da adição do álcool anidro na gasolina, devido a influência da política pública dos biocombustíveis. Para a safra 2018-2019, a produção de álcool está estimada em 28,16 bilhões de litros, resultando em um incremento de 1,4%, em relação à safra anterior. O açúcar tem produção prevista de 35,47 milhões de toneladas, ocorrendo uma redução de 6,3%, em comparação a safra passada (CONAB, 2018a). A safra 2019-2020, a produção de álcool foi estimada em 33,8 bilhões de litros, sendo um acréscimo de 4,6% em comparação a safra passada. O açúcar teve uma produção de 30,1 milhões de toneladas, com um acréscimo de 3,8%, quando em relação à safra anterior (CONAB, 2019).

A produção de cana-de-açúcar para a safra 2021/2022 será processada pelas usinas do centro-sul do País, 516,97 milhões de toneladas, que resulta em uma queda de 11,80%, ante 586,16 milhões de toneladas do último ciclo agrícola. Já a produção de açúcar para a safra 2021/2022 será de 31,84 milhões de toneladas, resultando em uma redução de 15,44%, quando em relação à safra passada. Quanto à produção de etanol para a safra 2021/2022, serão produzidos 25,84 bilhões de litros, sendo que destes, 10,39 bilhões de litros são de etanol anidro, resultando em um aumento de 14,79% e 15,45 bilhões de litros são de etanol hidratado, que resultou em uma redução de 19,84% na produção (UNICA, 2021).

Para a safra 2022/2023, a estimativa da produção de cana-de-açúcar é acima de 800,00 milhões de toneladas, enquanto que o consumo do açúcar doméstico será de

aproximadamente 13,00 milhões de toneladas, já o açúcar destinado a exportação será próximo de 32,00 milhões de toneladas e o consumo de álcool anidro será entorno de 14,00 milhões de litros, já o álcool hidratado será por volta de 23,00 milhões de litros. Enquanto que, para a safra 2023/2024, a previsão da produção de cana será acima de 850,00 milhões de toneladas, o consumo do açúcar doméstico será de aproximadamente 13,00 milhões de toneladas, o do açúcar destinado a exportação será próximo de 33,00 milhões de toneladas e o consumo de álcool anidro será entorno de 15,00 milhões de litros, já o álcool hidratado será ligeiramente acima de 25,00 milhões de litros (CENTRO CANAGRO, 2021).

2.2 Logística e transporte de cana-de-açúcar

A logística é uma estratégia adotada para o funcionamento adequado do transporte, a fim de que o serviço seja oferecido plenamente à empresa interessada. Nesse sentido, Vian e Marin (2020) mencionam que a logística de uma usina de cana-de-açúcar deve ser baseada em sistemas integrados, devido à necessidade de coordenação de todas as atividades que envolvem essa cadeia produtiva. Os sistemas logísticos são fundamentais para melhorar a eficiência operacional das usinas, porque atuam na integração das operações agrícolas e industriais. Um aspecto importante dos sistemas logísticos de cana é a forma de coordenar os processos de corte, carregamento e transporte da matéria-prima do campo até a área industrial, de maneira a suprir adequadamente a demanda necessária na área industrial, Figura 1.

Figura 1 - Processos do sistema logístico de cana-de-açúcar das usinas



Fonte: elaborada pelo autor.

Ainda de acordo com Vian e Marin (2020) o sistema de recepção compreende operações como pesagem, amostragem, armazenagem intermediária e descarga de cana-de-açúcar nas moendas da usina, que deve operar com fluxo de matéria-prima transportada do campo à indústria, de forma que permita alimentação uniforme das moendas, Figura 2.

Figura 2 - Processos do sistema de recepção de cana-de-açúcar das usinas



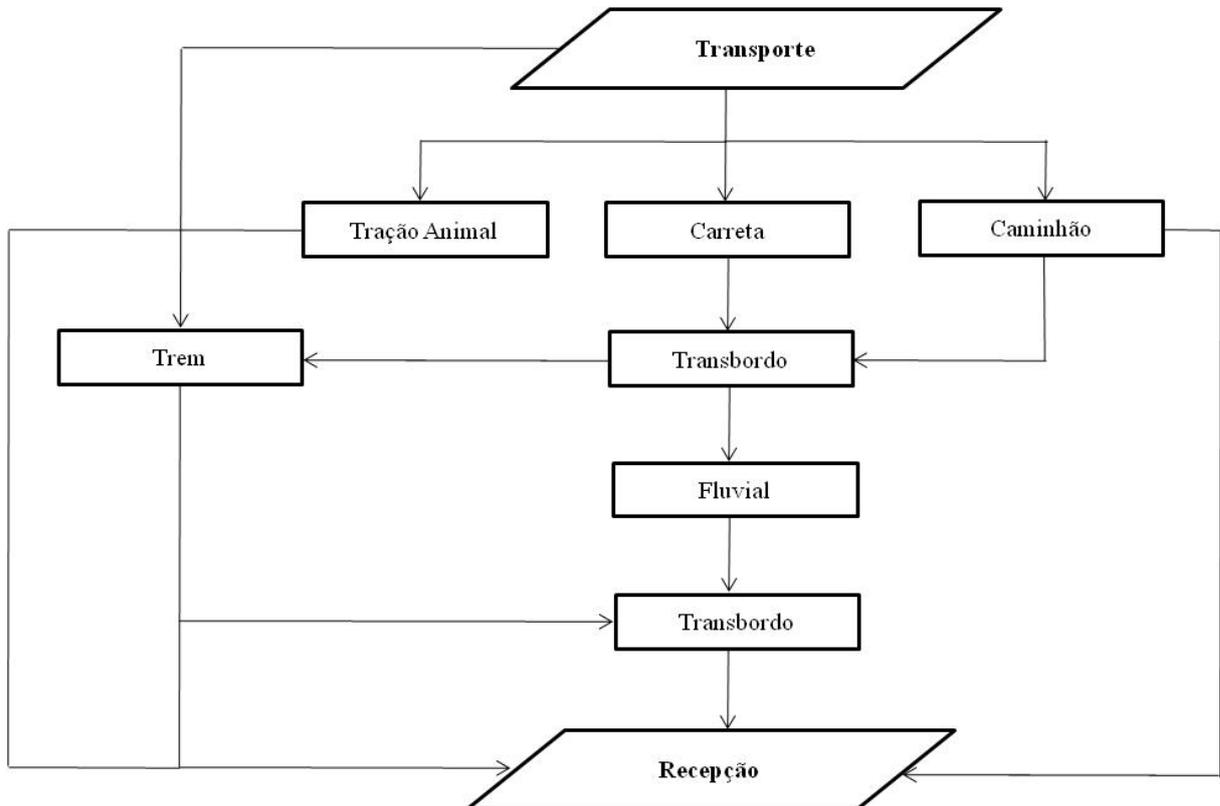
Fonte: elaborada pelo autor.

Iannoni e Morabito (2002) realizaram estudo do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar de uma usina, com o objetivo de analisar o desempenho do sistema, compreendido da balança até as moendas, e investigar configurações e políticas alternativas para sua operação. Os autores concluíram que é importante que o sistema de recepção seja integrado as operações agrícolas e industriais, como também, que a política de despacho de veículos e operações no pátio da usina, dependam da capacidade e operação das moendas. Além disso, caso haja mudanças no despacho ou na composição da frota de veículos, deve ser considerado o balanceamento e capacidade das moendas.

Le Gal et al. (2009) fizeram estudo com o objetivo de combinar modelo de planejamento de suprimentos chamado MAGI, com modelo diário de logística para explorar de forma holística, as relações entre esses componentes de suprimentos. Os modelos foram utilizados com sucesso para explorar a resposta da área da usina, quanto ao número de colhedoras, veículos de transporte, duração da estação de moagem e sensibilidade ao risco. Isso após o regime de mecanização da colheita ser de 16% e a colheita anual ter sido intensificada para 75%. Os autores concluíram que a combinação de modelos de simulação de planejamento de logística e suprimentos, serve para ajudar as partes interessadas na conversão de visões e políticas individuais de uma perspectiva coletiva e holística, em que as interações horizontal e vertical podem ser identificadas e quantificadas, dentro de um conjunto de objetivos coletivos mais amplos.

No Brasil, o sistema de transporte de cana-de-açúcar das usinas está diretamente relacionado com o sistema de colheita dessa matéria-prima. Segundo Ripoli e Ripoli (2009) o sistema de transporte de cana que predomina nas usinas do País, ocorre com a utilização de tração animal, caminhões, carretas, transbordos, trem e por modal fluvial, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Sistema de transporte de cana-de-açúcar das usinas do Brasil



Fonte: adaptada de Ripoli e Ripoli (2009).

Quanto ao transporte de cana-de-açúcar, o clima é um dos fatores que tem influência para restringir ou impedir o funcionamento dos equipamentos. Por isso, é necessário realizar previamente o planejamento do clima para o transporte, por meio de cronograma ou gráfico de Gantt com os dias úteis impróprios, baseados em dados de climatologia de precisão com atualização diária, a fim de determinar o tempo disponível para realização do transporte de cana na safra da usina. Segundo Wilson (2003) a aplicação do gráfico de Gantt dispõe de técnicas mais fáceis para a elaboração do planejamento, pois tem interfaces mais acessíveis, de modo que permite o usuário definir seus problemas, entender e aceitar soluções.

Ao que se refere ao planejamento do transporte de cana-de-açúcar das usinas, Margarido e Santos (2016) expressam que o planejamento serve para destinar o adequado funcionamento dos equipamentos de transporte, sendo recomendável ser realizado com base na distância que estejam às frentes de colheita, que não devem estar em talhões com distância média da usina, superior a 30 km, porque causará uma redução no fornecimento de matéria-prima, a não ser que parte do percurso seja de asfalto e o tempo compensado pela melhor qualidade da estrada. Em uma situação inversa, quando as frentes de colheitas estiverem a

uma distância média inferior de 20 km da usina, causará fila de caminhões para descarregar a cana na recepção da usina.

Moreira (2015) realizou trabalho com objetivo de construir modelo digital da malha de estradas em uma usina de álcool e açúcar e a sua utilização para realizar estudos de roteirização visando à análise da distância, do tempo de deslocamento e do desempenho operacional entre o carregamento e descarregamento da cana-de-açúcar colhida. O método proposto determinou rotas para o transporte de cana, sendo que as rotas de menor caminho são favoráveis para o serviço terceirizado, enquanto as rotas com ênfase no desempenho operacional é a melhor opção quando a frota é particular, pois o tempo de viagem é menor, de modo favorável a conservação ou vida útil dos equipamentos e para reduzir os custos com reparo e manutenção.

Françoso et al. (2017) fizeram levantamento de custos de corte, carregamento e transporte da produção da cana-de-açúcar para a safra 2016/17 no Estado de São Paulo. Os resultados mostraram que houve disparidade no custo por tonelada em duas regiões do Estado, sendo o custo em uma região de 26,77 R\$ t⁻¹ e na outra de 37,25 R\$ t⁻¹, tendo como referência uma distância percorrida pelos equipamentos de transporte de 25 km. Os autores mencionaram que as variações de dados podem estar relacionadas a diferentes variáveis, como o tipo de relevo, qualidade das estradas, preço do combustível na região, valorização da mão-de-obra, contratos particulares com usinas e prestadores de serviço.

Kaewtrakulpong et al. (2008) realizaram estudo a campo a fim de acumular observações para análise de deficiências do sistema de colheita e transporte de cana-de-açúcar. Além disso foram realizadas análises através de simulação simples da colheita e transporte, com base em dados obtidos por estudos temporais das operações de colheita e transporte. Os autores concluíram que o número de caminhões em relação à capacidade de campo da colhedora, pode aumentar ou diminuir o número de dias necessários da operação para a colheita a campo. Entretanto, um número excessivo de caminhões utilizados no sistema de colheita e transporte, causa uma diminuição no número de viagens de ida e volta por dia que os caminhões podem realizar. Por fim, se determinar número ótimo de caminhões necessários para os canaviais, é o essencial para ocorrer à utilização eficiente da colhedora.

2.3 Pneus

De acordo com Engenharias (2015) as empresas de equipamentos rodoviários devem ficar atentas, quanto ao aspecto preço acessível e maior vida útil em quilômetros da recapagem do pneu. Ainda segundo os autores, a vida útil de um pneu novo é cotada em 80.000 km e a vida útil de uma recapagem do pneu é cotada em 75.000 km; além disso, no pneu é possível ocorrer entre duas e três recapagens, sendo a quantidade total de recapagens, variável conforme for à utilização dos pneus. Nesse contexto, Banchi et al. (2013a) ao realizarem um estudo de gerenciamento técnico com pneus rodoviários de equipamentos canavieiros, determinaram que a viabilidade de reforma dos pneus foi de 3 recapagens, devido o maior custo acumulado alcançado e pela menor vida útil em quilômetros do pneu.

Banchi et al. (2013b) expressam que os pneus pela utilização normal estão sujeitos a agentes causadores de danos e a serem eliminados por alguns motivos. Quanto aos agentes causadores de danos, o desgaste natural é de 33,2%, dano causado por objeto metálico estranho 14,4%, acidente 8,4% e bolsas e bolhas de ar 7,7%. Enquanto a eliminação de pneus por alguns motivos, como o desgaste natural é de 34,0%, talão danificada 15,7%, quebra de carcaça 12,7% e danos por furos ou cortes 12,1%.

Banchi et al. (2006a) mencionam que as condições da pavimentação das estradas tem forte influência na vida útil dos pneus, pois quando a qualidade do pavimento for inferior, maior será o desgaste do pneu. Ainda segundo Banchi et al. (2006a), a vida útil do pneu, varia conforme seja a pavimentação da estrada, como de cascalho e areia sem pavimentação é de 50%, cascalho e areia em boas condições 64%, 2/3 pavimentada e 1/3 de cascalho e areia 72%, bem pavimentada 90% e suave com pavimentação de concreto 100%.

Segundo Banchi et al. (2006b) dependendo da situação que os pneus trafeguem, como em posições inadmissíveis, a vida útil do pneu pode ser reduzida em até 25%. Do ponto de vista econômico, a renovação de pneus corresponde entre 20 e 25% do valor inicial de um pneu novo e tem duração média de 80% ao pneu novo.

De acordo com Banchi et al. (2006c) em uma frota os pneus são componentes de grande importância, devido o alto custo e relação com a segurança do operador/motorista. Entretanto, a maior despesa operacional em uma frota é referente ao custo com combustível, com reparo e manutenção e, ao final, o custo com pneus, isso quando a empresa tem gerenciamento adequado dos pneus. Caso contrário, os pneus podem ser a segunda ou até mesmo, a primeira maior despesa operacional de uma frota.

2.4 Modelos computacionais e simulações

Le Gal et al. (2008) fizeram estudo de modelagem e simulação para investigar as variações geográficas e temporais na produção do valor recuperável como porcentagem da massa de cana-de-açúcar, com modificações nos cronogramas de fornecimento de cana durante um período de moagem. No estudo foram definidas duas subáreas com base na qualidade, sendo uma subárea costeira, que possui matéria-prima de menor qualidade no início do período e, a outra subárea, que inicia o período com cana de maior qualidade. Os resultados mostraram que dividindo a área de fornecimento de cana da usina em zonas homogêneas e adaptando a alocação de acordo com as variações da qualidade da cana, os ganhos totais do valor recuperável como porcentagem da massa de cana-de-açúcar, podem alcançar até 793.000 € e 2,7% do período de produção da usina. É importante frisar, que as capacidades existentes em toda a cadeia poderiam sustentar o aumento da produção.

Cochran e Whitney (1977) realizaram estudo com o objetivo de desenvolver um modelo a partir de dados primários para prever a produção por hora em toneladas de cana que são entregues a usina em um dado sistema de transporte. O sistema de transporte do modelo compreendia a capacidade de carregamento, número de equipamentos, capacidade dos equipamentos, distância do campo até a usina, velocidade média dos equipamentos e tempo de descarregamento na usina. Os autores compararam o custo por tonelada com diferentes unidades de transporte e determinaram um número de unidades necessárias de transporte, alcançando um custo mínimo de 1,84 US\$ t⁻¹.

Higgins et al. (2004) desenvolveram estrutura de modelagem, técnicas de pesquisa operacional, modelagem financeira e simulação, sendo que essas ferramentas puderam ser aplicadas para investigar as oportunidades de aprimoramento do sistema em parceria com a usina e melhorar a eficiência do sistema de colheita e transporte de cana-de-açúcar. Os autores concluíram que ao reduzir o número de colhedoras e implementar os princípios das boas práticas para a colheita, o estudo de caso mostrou ganhos potenciais com lucratividade de até 1.000.000 AU\$ Ano⁻¹.

Carreira (2010) criou modelo com o objetivo de avaliar o impacto das variáveis no desempenho operacional, econômico e energético de um sistema de transporte de cana-de-açúcar. Os resultados demonstraram que as variáveis relacionadas ao desempenho operacional, podem apresentar grandes amplitudes, afetando o custo da matéria-prima e gasto de energia.

Na mecanização agrícola, o desenvolvimento de modelos de programação linear ou matemática, tem sido adotado para encontrar soluções, por meio de funções matemáticas, que atuam de forma sistêmica, com os valores das variáveis combinadas. Nesse sentido, Jorio et al. (2006) criaram um modelo em programação matemática a fim de estudar a formação de filas e técnicas de simulação utilizando de forma incorporada a colheita, transporte, recepção e moenda da usina para facilitar ambos os agendamentos da colheita e transporte de cana-de-açúcar. O modelo foi utilizado sem que houvesse restrições para determinar o número de unidades de transporte, quanto à estratégia de designação e horários diários. Os resultados da simulação mostraram que o número de veículos de transporte foi reduzido em 50% e, ao mesmo tempo, a eficiência poderia ser melhorada pela maximização do número diário de viagens de ida e volta por equipamento.

Milan et al. (2006) utilizaram modelo de programação linear inteiro misto, a fim de solucionar o problema da minimização do custo de remoção e transporte de cana-de-açúcar do campo para a usina, a nível operacional. A complexidade do problema foi determinada pela abordagem do sistema, devido ao grande número de variáveis e restrições referentes às dimensões operacionais, como a necessidade de fornecimento contínuo de matéria-prima à usina, meios de corte utilizados na colheita, veículos de transporte e fornecimento de rotas. Os autores concluíram que o modelo é capaz de solucionar o problema da minimização de custos no transporte de cana do campo para a usina, por um dia de trabalho. O modelo permite que os gerentes das usinas planejem automaticamente, planos de transporte diários, com base em critérios objetivos ou naqueles adquiridos por meio de experiência profissional. Além disso, é útil que o software seja elaborado sob medida, com base em uma interface amigável, capaz de lidar com uma grande quantidade de variáveis e ser transparente para o usuário.

Na modelagem computacional e matemática tem à simulação de eventos discretos, que ocorre por meio das inúmeras variáveis da estrutura, ao estarem relacionadas entre si e atuando ao mesmo tempo. Nesse contexto, Bocanegra-Herrera e Vidal (2016) criaram um modelo em linguagem C++ para simulação de eventos discretos, sendo um sistema de apoio à decisão para gerentes de uma usina de cana-de-açúcar. No trabalho foi considerada a colheita, transporte e descarregamento da matéria-prima no pátio da usina, incluindo as janelas de tempo, a incerteza pertinente ao sistema e as filas de todas as operações. Aos resultados das simulações foi constatado que em 50% das vezes, os equipamentos de transporte ficam aguardando e que ocorre uma inatividade da usina, quanto à cana descarregada no pátio. Além disso, nas simulações a espera dos equipamentos na fila em um cenário foi de 65%, de forma

que aumentou o tempo de ciclo devido à capacidade de carga mais lenta e reduziu a quantidade de equipamentos em serviço. Já em outro cenário, a espera dos equipamentos na fila foi de 36%, de modo que aumentou a quantidade de cana descarregada no pátio da usina e diminui o tempo na fila de espera pelos equipamentos.

Mundim (2009) criou modelo com o objetivo de simular eventos discretos para o dimensionamento de recursos de um sistema de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar, necessários para a realização da safra. O autor concluiu que o modelo foi capaz de representar o despacho de caminhões para o transporte de cana e, que permite avaliar, como a produção e custo operacional são afetados pelo tamanho da frota de caminhões e semireboques.

Arjona et al. (2001) desenvolveram modelo de simulação para eventos discretos dos sistemas de colheita e transporte de cana-de-açúcar, com os objetivos de estimar o efeito das reduções de máquinas sobre o tempo total diário de processamento e avaliar se o uso das máquinas é eficiente o suficiente para restituir os empréstimos. Os resultados mostraram em várias situações, que a utilização das máquinas foi eficiente o suficiente para restituir os empréstimos. Os autores concluíram que reduzindo a quantidade de máquinas utilizadas e aumentando a eficiência de utilização delas, o cultivo podia manter a produção e, dessa maneira, os proprietários das máquinas obteriam mais lucro.

Os modelos de planejamento e gerenciamento de mecanização agrícola têm como base a definição do objetivo e suas ações para execução do estudo. Nesse fundamento, Faria e Silva (2015) fizeram modelo com o objetivo de avaliar os procedimentos de planejamento da manutenção de equipamentos envolvidos no corte, carregamento e transporte da cultura de cana-de-açúcar. Os autores concluíram que a programação de reabastecimento, lubrificações e substituição das lâminas de corte da colhedora, permitiu a redução de uma colhedora e dois caminhões, de modo que alcançou a meta de fornecimento de cana e comprovou a interação entre os equipamentos do sistema de corte, carregamento e transporte.

Higgins e Davies (2005) desenvolveram modelo de planejamento com capacidade para o transporte de cana-de-açúcar, a fim de estimar o número de locomotivas e trocas necessárias, de vagões necessários e os atrasos nas operações de colheita, resultantes da espera das colhedoras aguardando a entrega dos vagões na usina. O modelo foi baseado nos princípios da simulação estocástica, ao invés de ter sido elaborado um planejamento de transporte, porque fornece vantagens de flexibilidade e facilidade de aplicação. Os autores

concluíram que o modelo permitiu aumentar a janela de colheita, racionalizar os grupos de colheita e os desvios na ferrovia.

Vilailuck et al. (2016) realizaram trabalho com o objetivo de estudar a decisão de alocação de recursos, utilizando modelo de simulação para comparar o sistema operacional original com um sistema novo, bem como, encontrar possíveis soluções para o tempo perdido no transporte de cana-de-açúcar para as usinas e em alocar os caminhões por máquina de corte. Aos resultados, no sistema original com a produtividade de cana de $62,5 \text{ t ha}^{-1}$, com uma máquina de corte, o número médio de caminhões foi de 13,75 e máximo de 19. Quando na produtividade de $93,7 \text{ t ha}^{-1}$, utilizando uma máquina de corte, o número médio de caminhões foi de 14,75 e máximo de 23. Já no sistema novo, com a produtividade de cana de $62,5 \text{ t ha}^{-1}$, com uma máquina de corte, o número médio de tratores e carrocerias foi de 1,34 e máximo de 3, o número médio de caminhões foi de 5,57 e máximo de 11. Quando na produtividade de $93,7 \text{ t ha}^{-1}$, utilizando uma máquina de corte, o número médio de tratores e carrocerias foi de 1,45 e máximo de 3, o número médio de caminhões foi de 6,97 e máximo de 15. Os autores concluíram que o número de tratores, carrocerias e caminhões aumenta, se a produtividade de cana for maior e que as usinas devem explorar de forma adequada a colheita, o tamanho e formato do talhão do canavial.

Higgins (2006) realizou um trabalho focado no desenvolvimento e implementação de um modelo para programar o transporte de veículos rodoviários e selecionar reboques de cana-de-açúcar, nas plataformas de carregamentos localizadas nas fazendas. No trabalho foram aplicadas, duas meta-heurísticas, a pesquisa tabu e a pesquisa de vizinhança variável, ambas para encontrar soluções ao modelo, levando em conta uma economia do custo potencial de $240.000 \text{ AU\$ Ano}^{-1}$, quando comparado ao planejamento realizado manualmente pelo profissional responsável do tráfego da usina. O autor concluiu que as duas meta-heurísticas foram capazes de encontrar soluções, com uma redução média no tempo da fila de veículos em torno de 90%, quando comparado aos métodos manuais utilizados pelos profissionais responsáveis do tráfego, bem como, reduziu o número de veículos necessários.

Iannoni e Morabito (2006) fizeram um estudo com o objetivo de analisar o desempenho dos processos da área de recepção de cana-de-açúcar de uma usina e analisar possíveis configurações e políticas alternativas para as operações. O estudo foi baseado em técnicas de simulação discretas, sendo as simulações concluídas com a utilização do software Arena. Nas simulações foram considerados três cenários. No primeiro cenário houve uma redução de 13,5% na quantidade média de cana aguardando nas filas da recepção da usina, ao

tempo que houve um aumento de 1,1% na quantidade de matéria-prima descarregada. No segundo cenário, apesar da mudança no número de treminhões e rodotrens, ocorreu uma maior espera no setor de recepção da usina pelos treminhões e rodotrens de 17,9%, quando em relação ao cenário original. Neste cenário, a quantidade média de cana descarregada aumentou em 0,6%, quando em relação ao cenário original. No terceiro cenário, apesar das mudanças proporcionais no número de treminhões e rodotrens foram maiores as filas de espera e a quantidade de cana em espera na recepção de 13,1%. Neste cenário, a quantidade média de cana descarregada teve um aumento de 1,2%, quando em relação ao cenário original.

Ainda segundo Iannoni e Morabito (2006) quanto a um estudo de caso de um sistema de suprimento de uma usina de cana-de-açúcar, o presente trabalho evidencia que técnicas de simulação podem ser eficientemente utilizadas para modelar sistemas complexos. Além disso, que as simulações de diferentes cenários podem detectar eficiências a serem obtidas nos processos da área de recepção de cana da usina.

Segundo Hansen et al. (2002) a ausência de um bom método de planejamento no sistema de transporte de cana-de-açúcar, pode ocasionar atrasos nos tempos operacionais e, principalmente, prejuízos na qualidade da matéria-prima colhida. Ainda segundo os autores, que desenvolveram um modelo computacional para identificar os fatores que contribuem aos longos atrasos entre a colheita e a moagem da cana. Os atrasos durante o período de 20 semanas de colheita simulada foram de aproximadamente 35,1 horas, sendo inferior a média real semanal, avaliada também em um período de 20 semanas, que variou entre 48 e 72 horas.

Díaz e Pérez (2000) desenvolveram um modelo de simulação com o objetivo de identificar gargalos logísticos no transporte de cana-de-açúcar, fornecer soluções integrais para os gargalos como suporte ao processo de tomada de decisão e desenvolver um sistema eficaz de apoio à decisão para a alocação de recursos para cada equipe diariamente. O modelo desenvolvido, através das simulações, serviu como um sistema de apoio à decisão para facilitar a alocação de recursos das equipes, bem como, teve a capacidade de prever gargalos e fornecer soluções a eles, a fim de evitar problemas e riscos no futuro.

2.5 Modelagem computacional

Péra et al. (2017) mencionam que os modelos matemáticos são ferramentas indispensáveis para a elaboração de um plano integrado otimizado e exequível. Ainda

segundo os autores, os modelos matemáticos de planejamento integrado, envolvendo cenários de riscos produtivos e econômicos, propiciam o planejamento otimizado das operações e ofertam suporte a tomadas de decisões de natureza estratégica e tática.

Banchi et al. (2019) desenvolveram um modelo matemático para representar o custo operacional da colhedora de cana. O modelo foi ajustado, de modo que permite determinar e verificar o custo operacional do equipamento, considerando as variáveis combinadas de produtividade agrícola da cultura e vida útil da colhedora. Nesse sentido, Banchi et al. (2020) adotaram a modelagem matemática multivariável para determinar a capacidade operacional de colheita de cana-de-açúcar, sendo baseado em variáveis independentes e com diversas propostas de equações para a modelagem. Ao final foi possível identificar o modelo mais adequado para o estudo.

Banchi et al. (2018) determinaram uns parâmetros de um modelo matemático do custo com reparo e manutenção em função da vida útil em horas do transbordo de cana-de-açúcar. O modelo foi ajustado e posteriormente validado utilizando métodos de estatística descritiva. Quanto à validação do modelo foi realizada a parametrização e os ajustes dos modelos foram validados, por meio da Tabela ANOVA, apresentando o teste F, gráfico dos resíduos, coeficiente de correlação R e coeficiente de determinação R^2 , a fim de analisar o modelo a ser adotado com o software R. Os autores concluíram que o método adotado para a análise de dados, pode auxiliar no gerenciamento de máquinas, até mesmo sendo com equipamentos semelhantes, de marcas diferentes, pois o método irá apresentar custos diferentes entre os equipamentos analisados. Bem como, que os modelos matemáticos específicos para determinados grupos de máquinas agrícolas, com características semelhantes, permite alcançar resultados mais consistentes, quando em comparação com modelos matemáticos gerais.

Scarpari e Beauclair (2010) desenvolveram um modelo de programação linear para o planejamento do cultivo de cana-de-açúcar. Para o modelo foi utilizada a linguagem sistema geral de modelagem algébrica - SGMA, sendo o sistema uma excelente ferramenta para permitir a maximização do lucro e otimização do cronograma de colheita na usina estudada. Os resultados evidenciaram que o modelo de planejamento quando otimizado é uma ferramenta muito útil para o gerenciamento da cultura.

Teixeira et al. (2021) mencionam que os modelos matemáticos de otimização podem ser úteis para construir ferramentas de planejamento eficientes das atividades

envolvidas na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, a fim de auxiliar no enfrentamento de desafios. Ainda segundo os autores, os modelos matemáticos de otimização podem ser muito úteis em qualquer sistema de apoio à decisão, quando designado a atender desafios. Nesse sentido, Péra et al. (2017) mencionam que os modelos matemáticos de otimização, servem também para gerar recomendações, a fim de racionalizar de forma integrada o resultado da empresa, por meio de um plano assertivo e que seja factível de execução.

Chavez et al. (2020) desenvolveram um modelo matemático de otimização estocástica multi-objetivo para o planejamento da colheita, manutenção e transporte de cana-de-açúcar. Os autores concluíram que o modelo realizou uma abordagem de forma sustentável, com o equilíbrio adequado entre os objetivos econômicos, ambientais e sociais que foram considerados no estudo.

Carvajal et al. (2019) desenvolveram um modelo de otimização de programação linear estocástica para o planejamento da cadeia produtiva da cana-de-açúcar, integrando várias decisões agrícolas, a partir de uma perspectiva de planejamento estratégico-tático, a fim de avaliar a viabilidade de uma nova planta de produção de biocombustíveis. O modelo permitiu estabelecer um conjunto de decisões que maximizam a produtividade da cultura, de forma a otimizar o valor presente líquido - VPL dos lucros esperados e permitiu a identificação de variáveis críticas a serem controladas, de forma a reduzir o risco do investimento.

Silva et al. (2015) estenderam um modelo revisado de programação de metas de escolha múltipla - MRPMEM, que apresentava uma estrutura algébrica para a programação de metas, que é mais simples e mais inovador do que os modelos vistos em otimização estocástica robusta e otimização robusta, de modo que, não foi necessário calibrar os parâmetros ou adotar técnicas estatísticas para estimá-los. Os autores concluíram que o modelo evita o uso de variáveis discretas ou binárias, por meio de variáveis desviantes e outras variáveis auxiliares contínuas. Bem como, que o modelo alcançou excelentes resultados quando aplicado a um problema de grande escala em tempo real, enquanto executa em tempo computacional, de forma que permite os gerentes agrícolas tomar decisões em tempo real.

Segundo Faria et al. (2019), sobre a modelagem de simulação de evento discreto - MSED, combinada a teoria de utilidade multi-atributo, para um sistema de transporte de cana-de-açúcar. Nela foi possível observar que para a estratégia adotada no estudo, ocorreu uma

maximização na utilização do caminhão, de modo que tornou o sistema de transporte ainda mais ágil.

Branco et al. (2019) desenvolveram um modelo de otimização de programação linear inteiro misto para investigar locais ideais para os novos investimentos da indústria de cana-de-açúcar no Brasil, devido que a construção de modelos gravitacionais e de simulações, com a aplicação da programação linear, programação inteira, programação inteira mista e outras metodologias meta-heurísticas, terem sido frequentemente utilizadas para as análises espaciais de uma produção agroindustrial. Os autores concluíram que o modelo desenvolvido para o estudo foi uma importante ferramenta para estratégias do setor agroindustrial de cana-de-açúcar.

De acordo com Junqueira e Morabito (2019), a modelagem de programação inteira mista - MIP, serve para representar e resolver adequadamente um problema de logística, por ser um método heurístico, que envolve um processo de agregação, sendo construtivo e, baseado em atenuação e conserto, a fim de melhorar a heurística que é baseada em correção e otimização. Ainda segundo os autores, esta abordagem de otimização é aplicada para resolver um problema real de grande porte.

De acordo com Filho et al. (2021), a modelagem de programação não linear inteira mista - MPNLIM, serve para um gestor tomar uma decisão a nível de planejamento tático, a fim de melhorar o desempenho geral das operações de um sistema mecanizado agrícola, por meio de uma melhor alocação de recursos. Bem como, em auxiliar na tomada de decisão, ao ser realizada a operação agrícola pretendida para maximizar o lucro total da empresa agrícola.

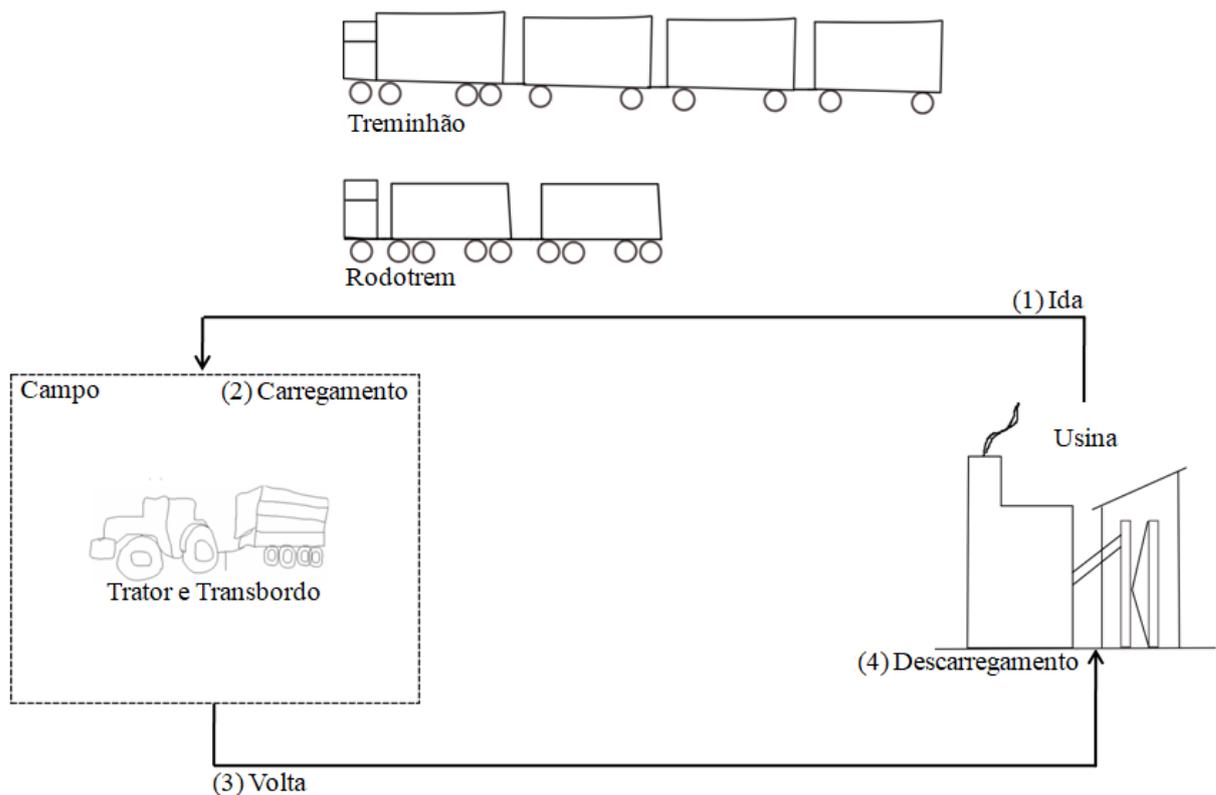
Na modelagem computacional é fundamental o desenvolvimento do algoritmo. Segundo Parmar et al. (1996) o algoritmo é uma sequência lógica de orientações para desenvolver as rotinas do modelo, que ao serem definidas e organizadas corretamente, a sequência permite que o modelo alcance a melhor solução para o problema. Segundo Oksanen (2007) há casos que o algoritmo não resolve o problema por completo e em outros casos não fornece soluções aceitáveis. Entretanto, o algoritmo em desenvolvimento servirá como um caminho para definir o algoritmo ideal para solucionar o problema. Por fim, segundo Santos et al. (2015) apud Williams (2008) a modelagem computacional é adotada por ser uma ferramenta que simplifica o desenvolvimento da ideia proposta, a fim de representar estruturas e desenvolver cenários.

No universo da modelagem, existe o modelo matemático, que segundo Williams (2008) é diferente da programação computacional, porque é apenas no sentido do planejamento, de modo que não tem relação com computadores, apesar de ser muito confundido com o uso da terminologia ‘programação’.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foi considerada uma Usina, denominada de Usina Hipotética, com sistema de transporte de cana-de-açúcar, que considera os equipamentos: caminhão bitruck com reboques (treminhão) e cavalo mecânico com semireboques (rodotrem), Figura 4. A predominância do sistema de transporte neste estudo, assim como de qualquer usina do Brasil, conforme demonstra a Figura 3, ocorre com a ida (1) dos equipamentos da usina até o campo para o carregamento (2) da cana-de-açúcar e volta (3) do campo para o descarregamento (4) da matéria-prima na usina. Assim completando todo o ciclo de carregamento e descarregamento, sem que haja restrições quanto à forma de acoplamento e desacoplamento ou não, entre os equipamentos durante o ciclo.

Figura 4 - Abordagem do funcionamento dos equipamentos da Usina Hipotética no sistema de transporte



Fonte: elaborada pelo autor.

A Usina Hipotética tem talhões distantes a um raio médio que varia de 10 a 50 km e que serão percorridos pelos equipamentos durante o ciclo de carregamento e descarregamento. Para geração dos resultados foi criado Cenário Elaborado, que compreende

a descrição das características econômica, técnicas, gerencial e operacionais dos equipamentos, Tabela 2.

Tabela 2 - Variável econômica, técnicas, gerencial e operacionais dos equipamentos para o Cenário Elaborado¹

Variável	Sigla	Unidade	Caminhão Bitruck	Reboque	Cavalo Mecânico	SemiReboque
Econômica				-		
Valor Inicial	VI	R\$	715.000	85.000	595.000	190.000
Técnicas				-		
Potência Nominal do Motor	PNM	kW/CV	368/500	-	368/500	-
Carga das Carrocerias	CC	t	20	18	-	35
Número de Carrocerias	NC	Número	-	3	-	2
Número de Pneus	NP	Número	12	24	10	24
Gerencial				-		
Jornada de Trabalho	JT	h			24	
Eficiência de Disponibilidade	Efd	Decimal			0,70	
Operacional				-		
Velocidade Média de Trabalho	VMT	km h ⁻¹		40		40
Vida Útil do Pneu Novo	VUPN	km		80.000		80.000
Vida Útil do Pneu Recapado	VUPR	km		75.000		75.000
Número de Recapagens do Pneu	NRP	km		2		2
Raio Médio da Distância	RMD	km		30		30
Tempo de Carregamento	TC	min		55		50
Tempo de Descarregamento	TD	min		55		50

Fonte: elaborada pelo autor.

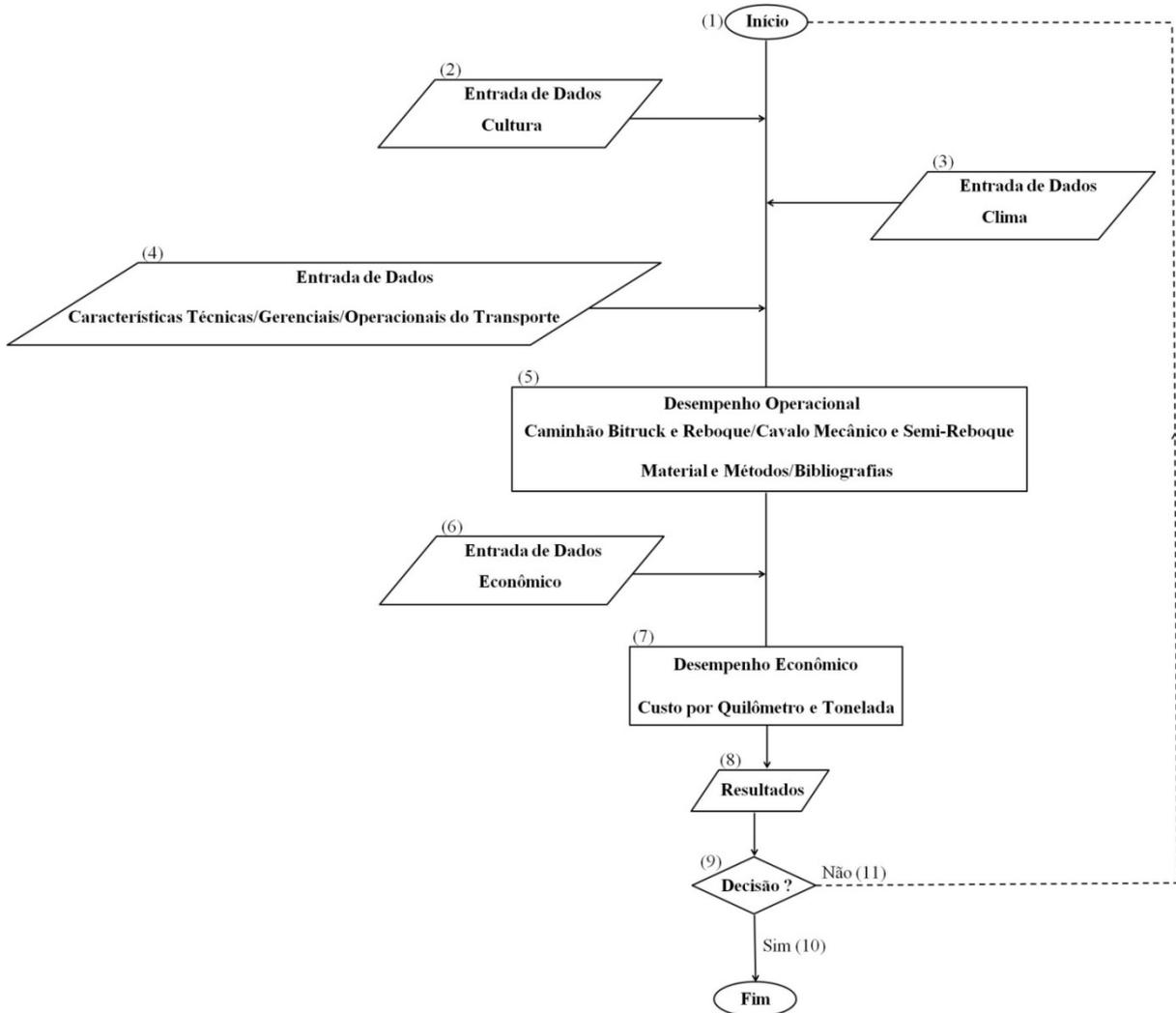
Para atender o objetivo do trabalho foi desenvolvido modelo computacional, denominado “*TransporteCana*”, que tem as características básicas que influenciam no sistema de transporte de cana-de-açúcar das usinas do País. O trabalho foi realizado em duas etapas. A primeira etapa foi à construção, verificação e validação do modelo. A segunda etapa referiu-se à aplicação do modelo na geração de resultados e análise do cenário, inerente ao transporte de cana-de-açúcar, realizado pelos equipamentos considerados no trabalho.

O modelo tem como base o fluxograma apresentado na Figura 5, elaborado de acordo com os caracteres proposto por Oakland (2007). O “*TransporteCana*” foi

¹ A origem dos dados da Tabela 2 está na descrição da Figura 7.

desenvolvido em planilha eletrônica, do *Excel*[®]. O modelo inicia seu funcionamento (1)² com a entrada de dados referente a cultura (2), como a produção de cana a ser transportada e preço da tonelada de cana entregue na usina.

Figura 5 - Fluxograma geral do modelo computacional



Fonte: elaborada pelo autor.

O item (3) é à entrada de dados do clima: número de dias para realizar o transporte, número de domingos e feriados e número de dias úteis impróprios para o transporte para definir o tempo disponível em dias. A entrada de dados (4) refere-se às características técnicas/gerenciais/operacionais do transporte: potência nominal do motor, cargas das carrocerias, número de carrocerias, número de pneus, velocidade média de trabalho, jornada de trabalho, vida útil do pneu novo, vida útil do pneu recapado, número de

² Os números entre parênteses referem-se ao fluxograma da Figura 2.

recapagens do pneu, raio médio da distância, tempo de carregamento e tempo de descarregamento.

A associação entre os itens (2), (3) e (4) determinam o desempenho operacional do conjunto caminhão bitruck com reboque e cavalo mecânico com semireboque (5): tempo total do ciclo de carregamento e descarregamento, número de carregamentos e descarregamentos no dia, mês e safra, carga total do conjunto, capacidade total de produção do conjunto, produção transportada no dia, mês e safra e distância trafegada no dia, mês e safra e consumo operacional de combustível na safra, ritmo de produção e número de conjuntos necessários.

Os resultados do desempenho operacional associados com a entrada de dados do econômico das máquinas (6): valor inicial, final, vida útil em anos, em horas, juro ao ano, alojamento, seguro e taxas - AST, licenciamento, consumo de combustível e reparo e manutenção, determinam o cálculo do desempenho econômico (7), que se refere ao custo com combustível, com reparo e manutenção, com reparo e manutenção do pneu novo, com reparo e manutenção do pneu recapado, por quilômetro e tonelada, ganho bruto e líquido da usina com a produção transportada.

Os resultados do modelo (8) permitem ao usuário avaliar o desempenho operacional e econômico do transporte e decidir (9) quanto à viabilidade (10) ou não. No caso do transporte com os equipamentos considerados não ser viável ao usuário (11), ou ele usuário, optar em avaliar outro cenário, novos dados deverão ser inseridos no modelo.

3.1 Clima

O clima da localidade determina o tempo disponível (TD) para realizar o transporte da matéria-prima colhida, com referência na proposta ajustada de (Mialhe, 1974). O tempo disponível em dias de safra (TDd) foi calculado com base no número de dias (Nd), número de domingos e feriados (Ndf) e número de dias úteis impróprios para o transporte (Nduit), equação 1.

$$TDd = [Nd - (Ndf + Nduit)] \quad (1)$$

Em que:

TDd: tempo disponível (dias);

Nd: número de dias;

Ndf: número de domingos e feriados;

Nduit: número de dias úteis impróprios para o transporte.

O tempo disponível em dias de safra (TDd) refere-se ao tempo disponível para os equipamentos realizar o transporte de cana-de-açúcar, durante o período determinado de safra (Nd). Pelas normas gerenciais da usina, o transporte poderá ou não ser realizado aos domingos e feriados (Ndf). O número de dias úteis impróprios para o transporte (Nduit) refere-se aos dias úteis que o transporte não pode ser realizado, devido a fatores relacionados ao clima/solo. A jornada de trabalho (Jt) é o número de horas de trabalho diário, que é definida pelo setor gerencial da usina.

3.2 Desempenho operacional

O tempo total do ciclo de carregamento e descarregamento (TTCCD), número de carregamentos e descarregamentos no dia (NCDD), produção transportada no dia (PTD), produção transportada na safra (PTS), distância trafegada no dia (DTD) e distância trafegada na safra (DTS) foram baseados na proposta de Carreira (2010). A proposta foi adotada porque atende a operacionalização do processo logístico (transporte) da cana-de-açúcar para uma Usina.

O tempo total do ciclo de carregamento e descarregamento (TTCCD) foi calculado com base no raio médio da distância (RMD), velocidade média de trabalho (VMT), tempo de carregamento (TC) e tempo de descarregamento (TD), de acordo com Carreira (2010), equação 2.

$$TTCCD = \left[\left(\frac{RMD * 2}{VMT} \right) + \left(\frac{TC + TD}{60} \right) \right] \quad (2)$$

Em que:

TTCCD: tempo total do ciclo de carregamento e descarregamento (h);

RMD: raio médio da distância (km);

2: constante;

VMT: velocidade média de trabalho (km h⁻¹);

TC: tempo de carregamento (min);

TD: tempo de descarregamento (min);

60: constante.

O número de carregamentos e descarregamentos no dia (NCDD) foi determinado com base na jornada de trabalho (Jt), tempo total do ciclo de carregamento e descarregamento (TTCCD) e eficiência de disponibilidade (Efd), com base na proposta de Carreira (2010),

equação 3.

$$NCDD = \left[\left(\frac{J_t}{TTCCD} \right) * Efd \right] \quad (3)$$

Em que:

NCDD: número de carregamentos e descarregamentos no dia;

Efd: eficiência de disponibilidade, em decimal.

A eficiência de disponibilidade (Efd) é uma variável gerencial que determina quanto o equipamento está disponível para realizar o trabalho. A Efd compreende os tempos efetivamente trabalhado pelo equipamento, de ajustes no equipamento, de disponibilidade para o trabalho, porém não seria utilizado devido a condições gerenciais ou climáticas que independem do equipamento e com manutenções rotineiras, que são essenciais para a realização do trabalho.

O número de carregamentos e descarregamentos no mês (NCDM) foi definido pela associação entre o número de carregamentos e descarregamentos no dia (NCDD) e total de dias de um mês (TDM), equação 4. O número de carregamentos e descarregamentos no mês (NCDM) foi definido para servir como um indicador de controle gerencial.

$$NCDM = NCDD * TDM \quad (4)$$

Em que:

NCDM: número de carregamentos e descarregamentos no mês;

TDM: total de dias de um mês.

O número de carregamentos e descarregamentos na safra (NCDS) foi calculado pela associação entre o número de carregamentos e descarregamentos no dia (NCDD) e tempo disponível em dias de safra (TDd), equação 5. O número de carregamentos e descarregamentos na safra (NCDS) foi calculado para ser um indicador de controle gerencial.

$$NCDS = NCDD * TDd \quad (5)$$

Em que:

NCDS: número de carregamentos e descarregamentos na safra.

A carga total do conjunto (CTC) foi determinada pela associação entre a carga das carrocerias (CC) e número de carrocerias (NC), equação 6.

$$CTC = CC * NC \quad (6)$$

Em que:

CTC: carga total do conjunto (t);

CC: carga das carrocerias (t);

NC: número de carrocerias.

A capacidade total de produção do conjunto (CTPC) foi definida pela razão entre a carga total do conjunto (CTC) e tempo total do ciclo de carregamento e descarregamento (TTCCD), equação 7. A capacidade total de produção do conjunto (CTPC) foi definida para ser um indicador de controle gerencial.

$$CTPC = \frac{CTC}{TTCCD} \quad (7)$$

Em que:

CTPC: capacidade total de produção do conjunto ($t h^{-1}$).

A produção transportada no dia (PTD) foi calculada pela associação entre o número de carregamentos e descarregamentos no dia (NCDD) e carga total do conjunto (CTC), de acordo com Carreira (2010), equação 8.

$$PTD = NCDD * CTC \quad (8)$$

Em que:

PTD: produção transportada no dia ($t dia^{-1}$).

A produção transportada no mês (PTM) foi determinada pela associação entre a produção transportada no dia (PTD) e total de dias de um mês (TDM), equação 9. A produção transportada no mês (PTM) foi determinada para ser um indicador de controle gerencial.

$$PTM = PTD * TDM \quad (9)$$

Em que:

PTM: produção transportada no mês ($t mês^{-1}$).

A produção transportada na safra (PTS) foi definida pela associação entre a produção transportada no dia (PTD) e tempo disponível em dias de safra (TDd), de acordo com Carreira (2010), equação 10.

$$PTS = PTD * TDd \quad (10)$$

Em que:

PTS: produção transportada na safra ($t Ano^{-1}$).

A distância total trafegada no ciclo de carregamento e descarregamento (DTTCCD) foi calculada com base no raio médio da distância (RMD), equação 11.

$$DTTCCD = RMD * 2 \quad (11)$$

Em que:

DTTCCD: distância total trafegada no ciclo de carregamento e descarregamento (km).

A distância trafegada no dia (DTD) foi determinada com base na distância total

trafegada no ciclo de carregamento e descarregamento (DTTCCD) e número de carregamentos e descarregamentos no dia (NCDD), de acordo com a ideia proposta de Carreira (2010), equação 12.

$$DTD = DTTCCD * NCDD \quad (12)$$

Em que:

DTD: distância trafegada no dia (km dia^{-1}).

A distância trafegada no mês (DTM) foi definida pela associação entre a distância trafegada no dia (DTD) e total de dias de um mês (TDM), equação 13. A distância trafegada no mês (DTM) foi definida para ser um indicador de controle gerencial.

$$DTM = DTD * TDM \quad (13)$$

Em que:

DTM: distância trafegada no mês (km mês^{-1}).

A distância trafegada na safra (DTS) foi calculada pela associação entre a distância trafegada no dia (DTD) e tempo disponível em dias de safra (TDd), de acordo com Carreira (2010), equação 14.

$$DTS = DTD * TDd \quad (14)$$

Em que:

DTS: distância trafegada na safra (km Ano^{-1}).

O consumo operacional de combustível na safra (COCS) do conjunto caminhão bitruck com reboque e cavalo mecânico com semireboque foi determinado com base na distância trafegada na safra (DTS), consumo de combustível (CB) e produção transportada na safra (PTS), equação 15. O consumo operacional de combustível na safra (COCS) foi determinado para ser um indicador de controle gerencial.

$$COCS = \left[\frac{\left(\frac{DTS}{CB} \right)}{PTS} \right] \quad (15)$$

Em que:

COCS: consumo operacional de combustível na safra (L t^{-1});

CB: consumo de combustível (km L^{-1}).

O ritmo de produção (RP) foi definido pela razão entre a produção da usina na safra (PUS) e tempo disponível em dias de safra (TDd), equação 16.

$$RP = \frac{PUS}{TDd} \quad (16)$$

Em que:

RP: ritmo de produção (t dia⁻¹);

PUS: produção da usina na safra (t).

O ritmo de produção (RP) foi definido para determinar o número de conjuntos necessários (NCN) para realizar a operação de transporte da matéria-prima colhida pela usina.

O número de conjuntos necessários (NCN) foi calculado pela razão entre o ritmo de produção (RP) e produção transportada no dia (PTD), equação 17.

$$NCN = \frac{RP}{PTD} \quad (17)$$

Em que:

NCN: número de conjuntos necessários.

3.3 Desempenho econômico

O custo fixo do equipamento (CF) foi calculado com base na proposta ajustada da ASABE (2011), sendo definido pela razão entre a depreciação anual (DPA), juros anual (JRA), alojamento, seguro e taxas (AST), licenciamento (LIC) e distância trafegada na safra (DTS), equação 18.

$$CF = \left| \frac{\left\{ \left\langle Vi * \left[\left(\frac{1-Vf}{VUA} \right) + \left(\frac{1+Vf}{2} \right) * i + AST \right] \right\rangle + LIC \right\}}{DTS} \right| \quad (18)$$

Em que:

CF: custo fixo do equipamento (R\$ km⁻¹);

Vi: valor inicial do equipamento (R\$);

Vf: valor final do equipamento, em decimal;

VUA: vida útil em ano do equipamento (Ano);

i: taxa de juros ao ano, em decimal;

AST: alojamento, seguro e taxas ao ano, em decimal;

LIC: licenciamento (R\$ Ano⁻¹);

DTS: distância trafegada na safra (km Ano⁻¹).

O custo variável do equipamento (CV) foi definido pelo somatório entre o custo com combustível (CCB), custo com reparo e manutenção (CRM), custo com reparo e manutenção do pneu novo (CRMPN) e custo com reparo e manutenção do pneu recapado (CRMPR), com base na ideia ajustada de Mialhe (1974) e Balastreire (1990), equação 19.

$$CV = CCB + CRM + CRMPN + CRMPR \quad (19)$$

Em que:

CV: custo variável do equipamento (R\$ km⁻¹);

CCB: custo com combustível (R\$ km⁻¹);

CRM: custo com reparo e manutenção (R\$ km⁻¹);

CRMPN: custo com reparo e manutenção do pneu novo (R\$ km⁻¹);

CRMPR: custo com reparo e manutenção do pneu recapado (R\$ km⁻¹).

O consumo de combustível (CB) do caminhão bitruck e cavalo mecânico pode ser estimado ou médio. Na escolha do consumo estimado é preciso que seja fornecido o valor estimado. A opção do consumo médio está de acordo com a proposta de (Banchi et al., 2008). A proposta fornece valores médios do consumo de combustível de caminhões canavieiros, por faixa de potência nominal do motor (PNM) do equipamento, Tabela 3.

Tabela 3 - Consumo médio de combustível por faixa de potência nominal do motor do equipamento

Faixa de Potência Nominal do Motor	Consumo Médio
kW (cv)	(km L⁻¹)
175 - 279 (238 - 379)	1,25
279 - 308 (380 - 419)	1,11
309 - 338 (420 - 459)	1,09
338 - 382 (460 - 520)	0,98

Fonte: Banchi et al. (2008).

O custo com combustível (CCB) do equipamento foi calculado pela razão entre o preço do litro do combustível (PL) e consumo de combustível (CB), equação 20.

$$CCB = \frac{PL}{CB} \quad (20)$$

Em que:

CCB: custo com combustível do equipamento (R\$ km⁻¹);

PL: preço do litro do combustível (R\$ L⁻¹);

CB: consumo de combustível (km L⁻¹).

O custo com reparo e manutenção do caminhão bitruck e do cavalo mecânico (CRMBCM) foram definidos com base na proposta ajustada da ASABE (2011), equação 21.

$$CRMBCM = \left(\frac{FRM * Vi}{VUQ} \right) \quad (21)$$

Em que:

CRMBCM: custo com reparo e manutenção do equipamento (R\$ km⁻¹);

FRM: fator de reparo e manutenção, em decimal.

O custo com reparo e manutenção do reboque (CRMR) foi calculado de acordo com a proposta de (Banchi et al., 2009). A proposta foi desenvolvida com base em um banco de dados de cinco usinas, durante o período de 2000 e 2007. A proposta fornece o custo com reparo e manutenção do reboque, conforme for à capacidade de carga e vida útil em quilômetros do equipamento. Para reboques com capacidade de carga de até 20 toneladas, equação 22 e para reboques com capacidade de carga acima de 20 toneladas e até 24 toneladas, equação 23.

$$\text{CRMR} = 0,00000220 * \text{VUQ} + 0,0181774 \quad (22)$$

$$\text{CRMR} = 0,00000130 * \text{VUQ} + 0,1147230 \quad (23)$$

Em que:

CRMR: custo com reparo e manutenção do equipamento (R\$ km⁻¹).

O custo com reparo e manutenção do semireboque (CRMSR) foi determinado de acordo com a proposta de (Banchi et al., 2009). A proposta fornece o custo com reparo e manutenção do semireboque de 35 toneladas, conforme for à vida útil em quilômetros do equipamento, equação 24.

$$\text{CRMSR} = 0,00000030 * \text{VUQ} + 0,1638560 \quad (24)$$

Em que:

CRMSR: custo com reparo e manutenção do equipamento (R\$ km⁻¹).

O custo com reparo e manutenção do pneu novo (CRMPN) e com reparo e manutenção do pneu recapado (CRMPR) do equipamento foram baseados na proposta da Goodyear (2017) e Rosa (2017). O custo com reparo e manutenção do pneu novo (CRMPN) do equipamento foi calculado com base no preço do pneu novo (PPN), número de pneus (NP) e vida útil do pneu novo (VUPN), com base na proposta da Goodyear (2017) e Rosa (2017), equação 25.

$$\text{CRMPN} = \left(\frac{\text{PPN} * \text{NP}}{\text{VUPN}} \right) \quad (25)$$

Em que:

CRMPN: custo com reparo e manutenção do pneu novo (R\$ km⁻¹);

PPN: preço do pneu novo (R\$);

NP: número de pneus;

VUPN: vida útil do pneu novo (km).

O custo com reparo e manutenção do pneu recapado (CRMPR) do equipamento foi definido com base no preço do pneu recapado (PPR), número de recapagens do pneu (NRP), número de pneus (NP) e vida útil do pneu recapado (VUPR), com base na proposta da

Goodyear (2017) e Rosa (2017), equação 26.

$$\text{CRMPR} = \left(\frac{\text{PPR} * \text{NRP} * \text{NP}}{\text{VUPR}} \right)$$

Em que:

(26)

CRMPR: custo com reparo e manutenção do pneu recapado (R\$ km⁻¹);

PPR: preço do pneu recapado (R\$);

NRP: número de recapagens do pneu;

VUPR: vida útil do pneu recapado (km).

O custo operacional do equipamento (COE) foi determinado pelo somatório entre o custo fixo (CF) e custo variável (CV), com base na ideia ajustada de Mialhe (1974) e Balastreire (1990), equação 27.

$$\text{COE} = \text{CF} + \text{CV} \quad (27)$$

Em que:

COE: custo operacional do equipamento (R\$ km⁻¹).

O custo operacional do conjunto caminhão bitruck e reboque (COCCR) foi definido pelo somatório entre o custo operacional do caminhão bitruck (COC) e custo operacional do reboque (COR), equação 28.

$$\text{COCCR} = \text{COC} + \text{COR} \quad (28)$$

Em que:

COCCR: custo operacional do conjunto caminhão bitruck e reboque (R\$ km⁻¹).

O custo operacional do conjunto cavalo mecânico e semireboque (COCCMSR) foi calculado pelo somatório entre o custo operacional do cavalo mecânico (COCM) e custo operacional do semireboque (COSR), equação 29.

$$\text{COCCMSR} = \text{COCM} + \text{COSR} \quad (29)$$

Em que:

COCCMSR: custo operacional do conjunto cavalo mecânico e semireboque (R\$ km⁻¹).

O custo operacional de produção do caminhão bitruck e cavalo mecânico (COPCCM) foi determinado com base no custo operacional do equipamento (COE), distância trafegada na safra (DTS) e produção transportada na safra (PTS), com base na proposta ajustada de Carreira (2010) e Rosa (2017), equação 30.

$$\text{COPCCM} = \left[\text{COE} * \left(\frac{\text{DTS}}{\text{PTS}} \right) \right]$$

Em que:

(30)

COPCCM: custo operacional de produção do equipamento (R\$ t⁻¹);

COE: custo operacional do equipamento (R\$ km⁻¹);

DTS: distância trafegada na safra (km Ano⁻¹);

PTS: produção transportada na safra (t Ano⁻¹).

O custo operacional de produção do reboque e semireboque (COPRSR) foi definido com base no custo operacional do equipamento (COE), distância trafegada na safra (DTS) e produção transportada na safra (PTS), com base na proposta ajustada de Carreira (2010) e Rosa (2017), equação 31.

(31)

$$\text{COPRSR} = \left[\text{COE} * \left(\frac{\text{DTS}}{\text{PTS}} \right) \right]$$

Em que:

COPRSR: custo operacional de produção do equipamento (R\$ t⁻¹);

COE: custo operacional do equipamento (R\$ km⁻¹);

DTS: distância trafegada na safra (km Ano⁻¹);

PTS: produção transportada na safra (t Ano⁻¹).

O custo operacional de produção do conjunto caminhão bitruck e reboque (COPCCR) foi calculado pelo somatório entre o custo operacional de produção do caminhão bitruck (COPCB) e custo operacional de produção do reboque (COPR), equação 32.

$$\text{COPCCR} = \text{COPCB} + \text{COPR} \quad (32)$$

Em que:

COPCCR: custo operacional de produção do conjunto caminhão bitruck e reboque (R\$ t⁻¹).

O custo operacional de produção do conjunto cavalo mecânico e semireboque (COPCCMSR) foi determinado pelo somatório entre o custo operacional de produção do cavalo mecânico (COPCM) e custo operacional de produção do semireboque (COPSR), equação 33.

$$\text{COPCCMSR} = \text{COPCM} + \text{COPSR} \quad (33)$$

Em que:

COPCCMSR: custo operacional de produção do conjunto cavalo mecânico e semireboque (R\$ t⁻¹).

O custo total do conjunto (CUTC) foi definido pela associação entre o custo operacional de produção do conjunto (COPC) e produção transportada na safra (PTS), equação 34.

$$\text{CUTC} = \text{COPC} * \text{PTS} \quad (34)$$

Em que:

CUTC: custo total do conjunto (R\$).

O custo total do conjunto (CUTC) foi definido para determinar o ganho bruto (GBUPTS) e líquido (GLUPTS) da usina com a produção transportada na safra.

3.4 Ganhos econômicos da usina

O ganho bruto (GBUPTS) e líquido (GLUPTS) da usina com a produção transportada na safra foram baseados nas propostas modificadas de Santos et al. (2014); Santos et al. (2015) e Santos et al. (2017). As propostas foram criadas para determinar a renda bruta e líquida de uma usina, considerando o custo com os equipamentos. Neste caso, o ganho bruto da usina com a produção transportada na safra (GBUPTS) foi calculado pela associação entre o preço estimado da tonelada de cana entregue na usina (PTCEU) e produção transportada na safra (PTS), equação 35.

$$\text{GBUPTS} = \text{PTCEU} * \text{PTS} \quad (35)$$

Em que:

GBUPTS: ganho bruto da usina com a produção transportada na safra (R\$);

PTCEU: preço estimado da tonelada de cana entregue na usina (R\$ t⁻¹).

O ganho líquido da usina com a produção transportada na safra (GLUPTS) foi determinado pela diferença entre o ganho bruto da usina com a produção transportada na safra (GBUPTS) e custo total do conjunto (CUTC), equação 36.

$$\text{GLUPTS} = \text{GBUPTS} - \text{CUTC} \quad (36)$$

Em que:

GLUPTS: ganho líquido da usina com a produção transportada na safra (R\$).

3.5 Análise de sensibilidade, consistência e validação

A análise de sensibilidade, consistência e validação do modelo computacional foi realizada pelo custo operacional de produção. A análise de sensibilidade e consistência foi realizada para comprovar a dinâmica funcional do algoritmo, bem como, em verificar possíveis erros na rotina do modelo, através da alteração no valor de variáveis de entrada do modelo e observada à devida alteração no valor das variáveis de saída. Nas análises realizadas foi comprovado que o modelo não possui erros em sua rotina e que tem sensibilidade e consistência adequada para o funcionamento.

O “*TransporteCana*” foi validado por meio da comparação de resultados da simulação com dados da bibliografia (secundários), a fim de comprovar que o modelo alcança valores de custo operacional de produção com os equipamentos que foram considerados no estudo e que estão de acordo com a realidade dos valores de custos alcançados pelos equipamentos do transporte de cana-de-açúcar das usinas do Brasil.

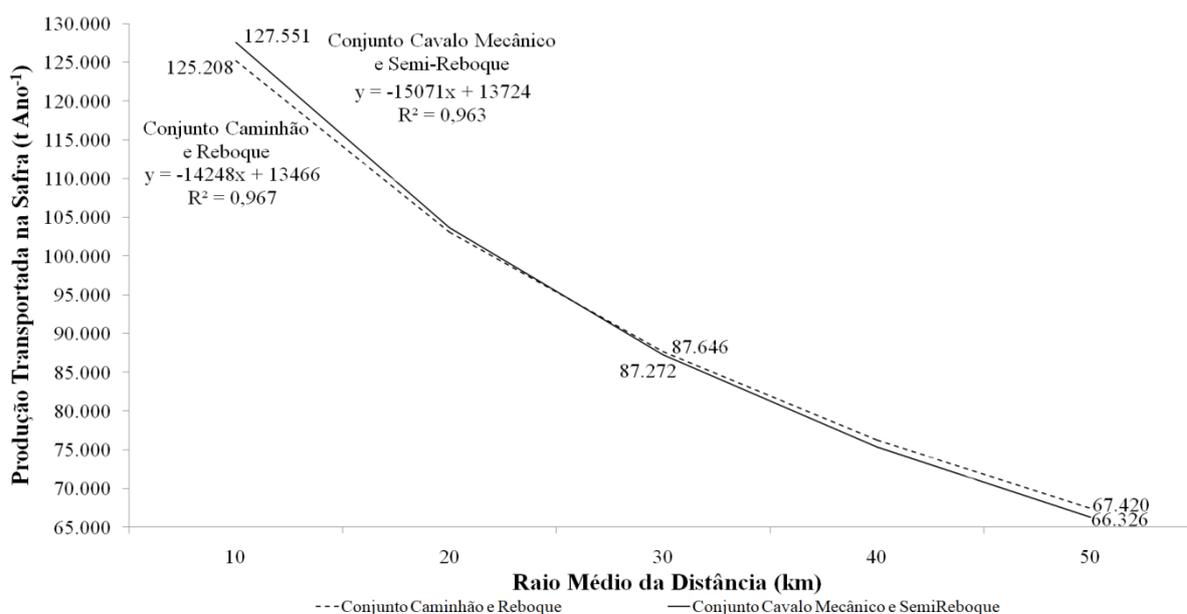
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o Cenário Elaborado da Usina Hipotética, o planejamento climático da localidade considerada, que foi a região do triângulo mineiro, no Estado de Minas Gerais, resultou em um tempo disponível em dias de safra (TDd) de 235.

4.1 Produção transportada na safra

O Gráfico 1 apresenta a produção transportada na safra em função do raio médio da distância. O aumento do raio médio da distância resulta em um decréscimo polinomial na produção transportada. Nesse sentido, segundo Margarido e Santos (2016) não é recomendável realizar o transporte da matéria-prima, quando as frentes de colheita estiverem em talhões com distância média da usina, superior a 30 km, porque causará redução no fornecimento de matéria-prima, a não ser que parte do percurso seja de asfalto e o tempo compensado pela melhor qualidade da estrada. Em uma situação inversa, quando as frentes de colheitas estiverem a uma distância média inferior de 20 km da usina, irá causar fila de caminhões para descarregar a cana-de-açúcar na recepção da usina.

Gráfico 1 - Produção transportada na safra em função do raio médio da distância



Fonte: elaborada pelo autor.

Conforme mostra o Gráfico 1, quando em raios menores, como no raio de 10 km, o impacto na produção transportada é fraco, de modo que a variável número de carregamentos e descarregamentos na safra é quem impacta na produção transportada e não a carga total do conjunto, pois o conjunto cavalo mecânico com semireboque requer maior número de carregamentos e descarregamentos na safra, de forma a alcançar maior produção transportada, quando em relação ao conjunto caminhão bitruck com reboque, que tem maior carga total.

No raio de 25 km, a produção transportada pelos conjuntos é igual, sendo o número de carregamentos e descarregamentos na safra, menor para o conjunto caminhão bitruck com reboque. Após o raio de 25 km, a situação se inverte, pois o aumento do raio médio tem maior impacto negativo no conjunto com menor carga total, como é o caso do conjunto cavalo mecânico com semireboque, de modo que conjunto caminhão bitruck com reboque passa a ter maior produção transportada. Isso evidencia que acima do raio médio de 25 km, a variável que sustenta a produção transportada é a carga total do conjunto e não somente o número de carregamentos de descarregamentos.

O conjunto caminhão bitruck e reboque transportam uma produção na safra no raio de 10, 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, de 125.208, 87.646 e 67.420 t Ano⁻¹, respectivamente. O conjunto cavalo mecânico e semireboque transportam uma produção no raio de 10, 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, de 127.551, 87.272 e 66.326 t Ano⁻¹, respectivamente.

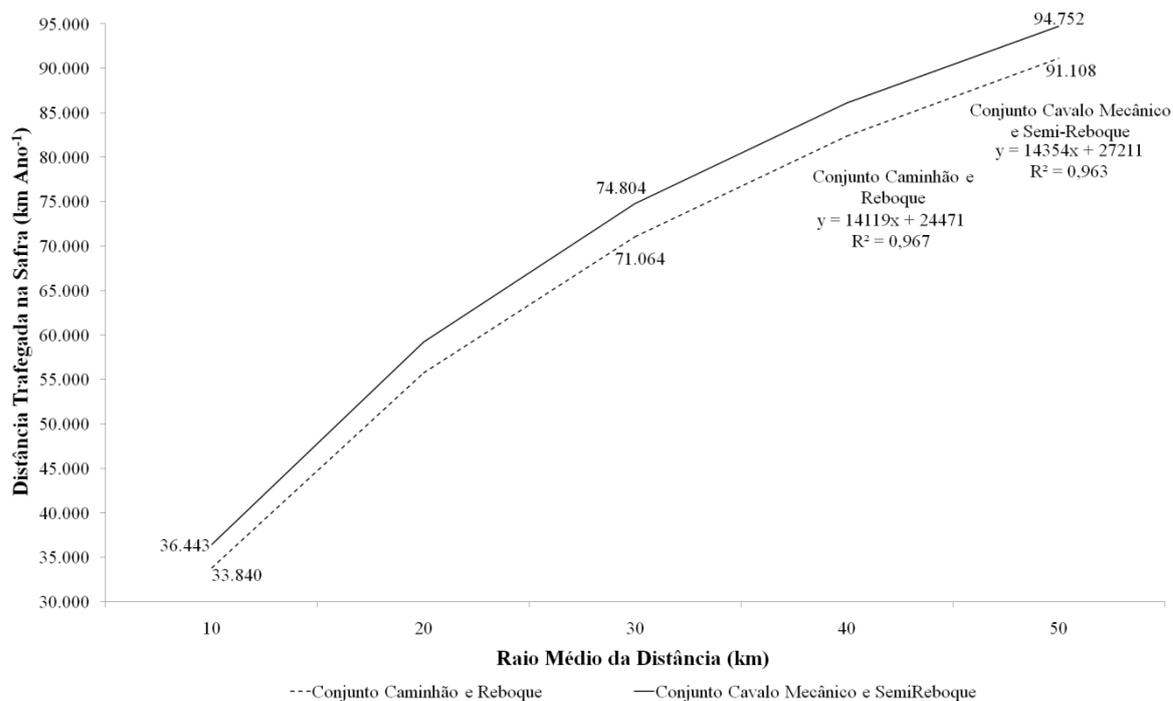
A diferença na produção transportada na safra pelo conjunto caminhão bitruck e reboque, com referência ao raio de 10 km foi uma redução de 37.562 e 57.788 t Ano⁻¹ ou em 42,86 e 85,71%, quando em relação aos raios de 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, respectivamente. Para o conjunto cavalo mecânico e semireboque, a diferença com referência ao raio de 10 km foi um decréscimo de 40.279 e 61.224 t Ano⁻¹ ou em 46,15 e 92,31%, quando em relação aos raios de 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, respectivamente.

4.2 Distância trafegada na safra

O Gráfico 2 apresenta a distância trafegada na safra em função do raio médio da distância. O aumento do raio médio da distância resulta em um acréscimo polinomial na distância trafegada. No raio de 10, 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, o conjunto caminhão bitruck e reboque trafegam uma distância na safra de 33.840, 71.064 e 91.108 km Ano⁻¹, respectivamente. Para o conjunto cavalo mecânico e semireboque, nos raios de 10, 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, a distância trafegada foi de 36.443, 74.804 e 94.752 km Ano⁻¹,

respectivamente. Nesse sentido, Rosa (2017) ao estudar o transporte de cana-de-açúcar, considerou um raio médio da distância de 25 km, a ser percorrido por unidade de cavalo mecânico e semireboque e alcançou uma distância percorrida de 41.666 km Ano⁻¹.

Gráfico 2 - Distância trafegada na safra em função do raio médio da distância



Fonte: elaborada pelo autor.

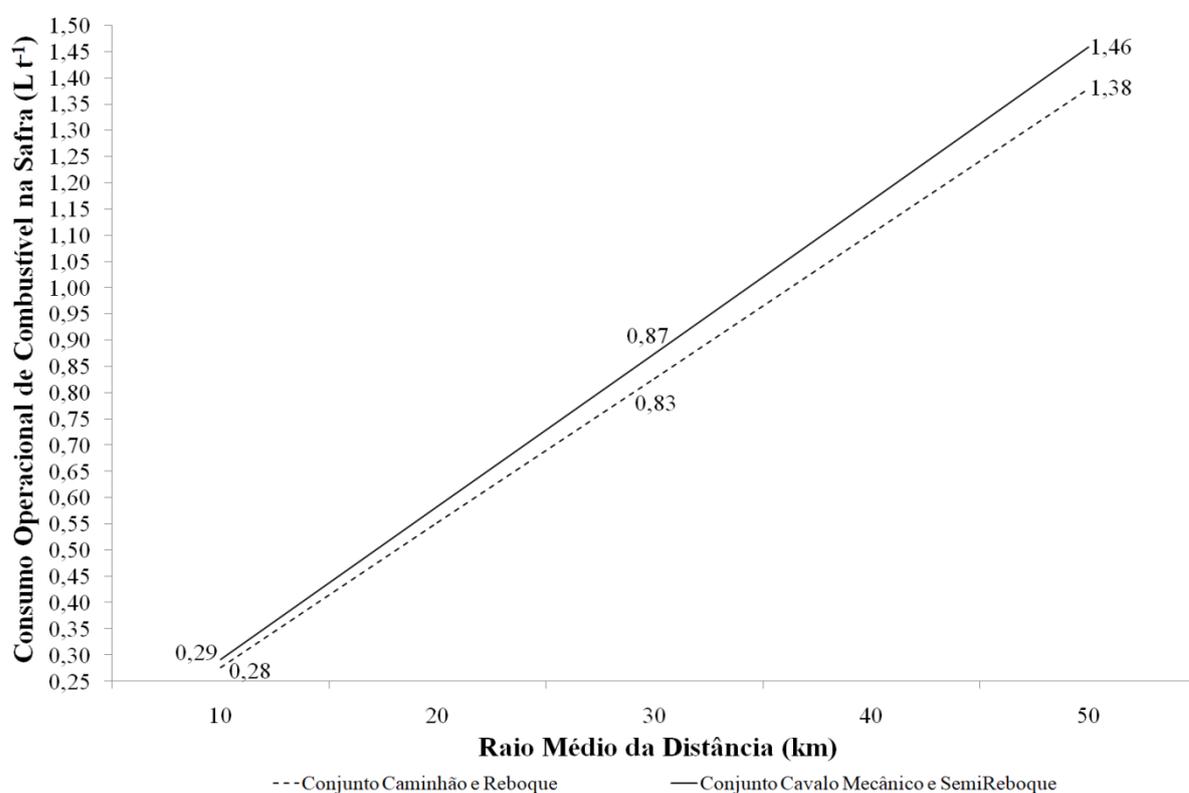
A diferença na distância trafegada na safra pelo conjunto caminhão bitruck e reboque, com referência ao raio de 10 km foi um aumento de 37.224 e 57.268 km Ano⁻¹ ou em 110,00 e 169,23%, quando em relação aos raios de 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, respectivamente. Para o conjunto cavalo mecânico e semireboque, a diferença com referência ao raio de 10 km foi um acréscimo de 38.361 e 58.309 km Ano⁻¹ ou em 105,26 e 160,00%, quando em relação aos raios de 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, respectivamente.

É recomendável evitar transportar a cana-de-açúcar em talhões com raios médios distantes da indústria, como forma de reduzir a distância trafegada na safra, a fim de aumentar a vida útil dos equipamentos, bem como, em reduzir o consumo operacional de combustível na safra.

4.3 Consumo operacional de combustível na safra

O Gráfico 3 apresenta o consumo operacional de combustível na safra em função do raio médio da distância. O aumento do raio médio da distância resulta no aumento linear do consumo. No raio de 10, 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, o conjunto caminhão bitruck e reboque alcançou um consumo de 0,28, 0,83 e 1,38 L t⁻¹, respectivamente. Para o conjunto cavalo mecânico e semireboque, nos raios de 10, 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, o consumo foi de 0,29, 0,87 e 1,46 L t⁻¹, respectivamente.

Gráfico 3 - Consumo operacional de combustível na safra em função do raio médio da distância



Fonte: elaborada pelo autor.

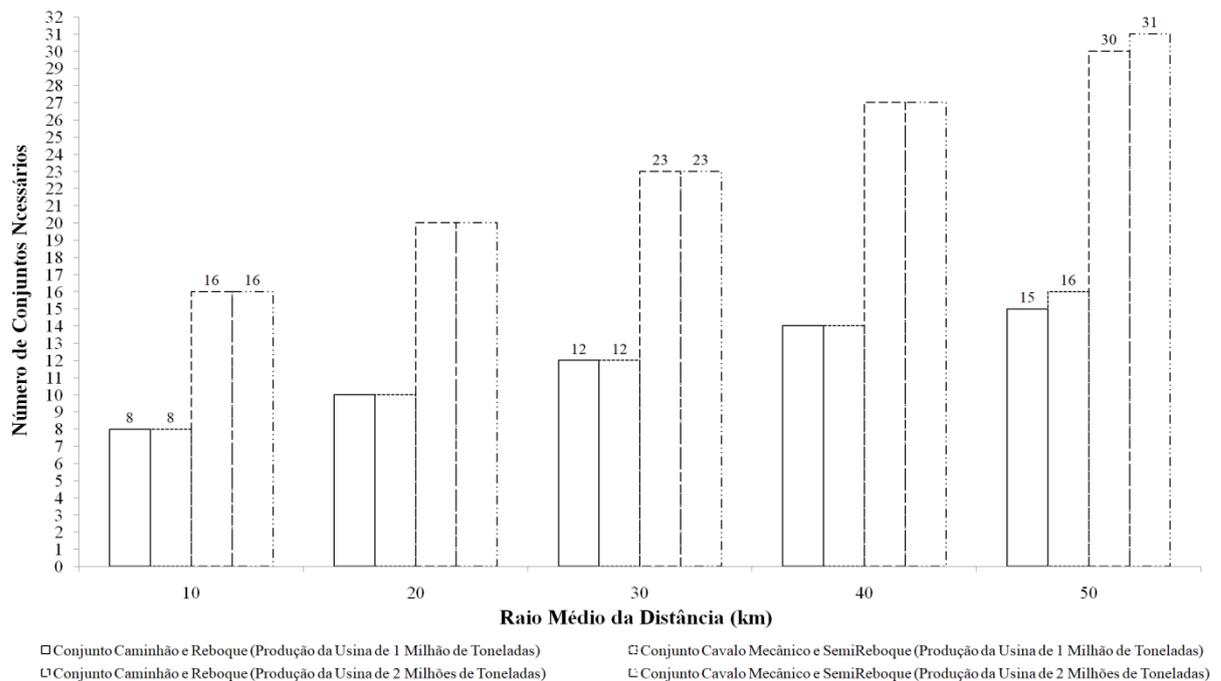
A diferença no consumo operacional de combustível na safra pelo conjunto caminhão bitruck e reboque, com referência ao raio de 10 km foi um acréscimo de 0,55 e 1,10 L t⁻¹ ou em 200,00 e 400,00%, quando em relação aos raios de 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, respectivamente. Para o conjunto cavalo mecânico e semireboque, a diferença com referência ao raio de 10 km foi um aumento de 0,58 e 1,17 L t⁻¹ ou em 200,00 e 400,00%, quando em relação aos raios de 30 (Cenário Elaborado) e 50 km, respectivamente.

É importante considerar que o consumo operacional de combustível na safra tem influência direta do raio médio da distância e da distância trafegada na safra, como também, da carga das carrocerias dos equipamentos e da produção transportada na safra, pois são essas variáveis de forma inter-relacionadas, que determinam o consumo operacional de combustível na safra dos conjuntos.

4.4 Número de conjuntos necessários

O Gráfico 4 apresenta o número de conjuntos necessários e produção da usina em função do raio médio da distância. O aumento do raio médio da distância e/ou da produção da usina resulta no aumento linear no número de conjuntos necessários. Isso ocorre devido o efeito da produção transportada no dia, não ser mais suficiente para atender o ritmo de produção, o que resulta no surgimento de um novo conjunto.

Gráfico 4 - Número de conjuntos necessários em função da produção da usina e do raio médio da distância



Fonte: elaborada pelo autor.

Quando na produção da usina de 1.000.000 t, o conjunto caminhão bitruck e reboque, ao transportar a cana-de-açúcar no raio de 10, 30 (Cenário Elaborado) e 50 km são requeridos 8, 12 e 15 conjuntos, respectivamente. Já o conjunto cavalo mecânico e

semireboque, no raio de 10, 30 (Cenário Elaborado) e 50 km são necessários 8, 12 e 16 conjuntos, respectivamente.

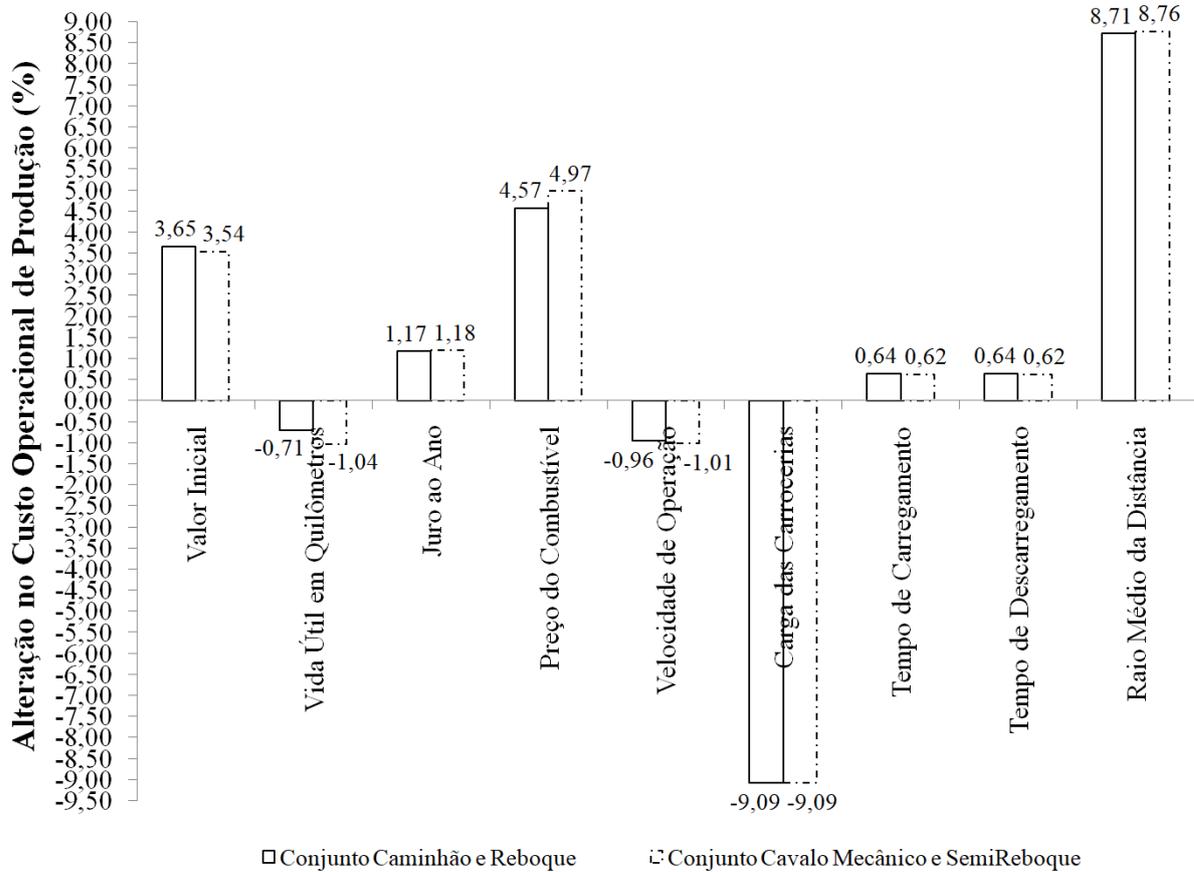
Rosa (2017) ao considerar um planejamento de moagem de cana-de-açúcar de 350.000 t, quando no raio de 10, 20, 30 e 40 km, resultou em 5, 6, 6 e 7 conjuntos de cavalos mecânicos e semireboques, respectivamente.

Para a produção da usina de 2.000.000 t, o conjunto caminhão bitruck e reboque, ao transportar a matéria-prima no raio de 10, 30 (Cenário Elaborado) e 50 km são requeridos 16, 23 e 30 conjuntos, respectivamente. Enquanto o conjunto cavalo mecânico e semireboque, no raio de 10, 30 (Cenário Elaborado) e 50 km são necessários 16, 23 e 31 conjuntos, respectivamente.

4.5 Análise de sensibilidade e consistência do modelo

A análise de sensibilidade e consistência do modelo computacional foi realizada por meio da alteração de um acréscimo de 10% no valor das variáveis consideradas e foi observada a alteração ocorrida no custo operacional de produção dos conjuntos, nas condições do Cenário Elaborado, como apresenta o Gráfico 5. Esse ligeiro valor percentual de acréscimo (10%) nas variáveis foi considerado de maneira proposital, como forma de certificar que o modelo é sensível e consistente o bastante para fornecer resultados condizentes para qualquer condição que for imposta de simulação com os equipamentos do sistema de transporte de cana-de-açúcar.

Gráfico 5 - Alteração no custo operacional de produção dos conjuntos



Fonte: elaborada pelo autor.

Como mostra o Gráfico 5, as variáveis que mais impactam negativamente no custo dos conjuntos é o raio médio da distância e preço do combustível. O aumento no raio médio da distância resultou no crescimento do custo para o conjunto caminhão e reboque de 8,71% e para o conjunto cavalo mecânico e semireboque de 8,76%, sendo uma diferença entre os conjuntos de 0,05%. Já o aumento no preço do combustível resultou no acréscimo do custo do conjunto caminhão e reboque de 4,57% e para o conjunto cavalo mecânico e semireboque de 4,97%, sendo uma diferença entre os conjuntos de 0,40%.

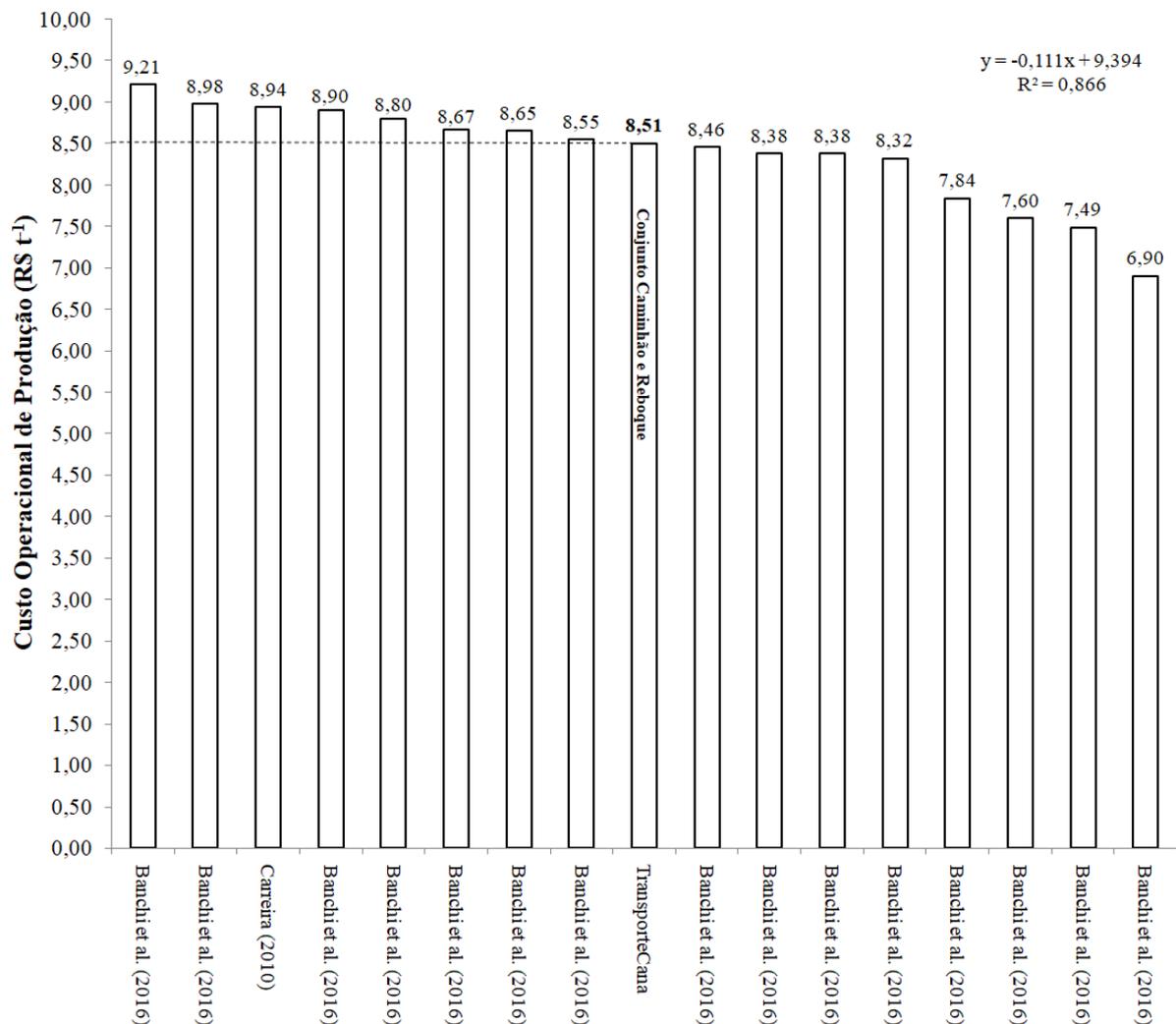
A variável que mais impacta positivamente no custo dos conjuntos é a carga das carrocerias. O aumento na carga das carrocerias resultou no decréscimo do custo do conjunto caminhão e reboque e do conjunto cavalo mecânico e semireboque de -9,09%. Por fim, devido à alteração ocorrida no custo operacional de produção dos conjuntos, com o aumento no valor das variáveis consideradas, isso evidencia que o modelo computacional tem sensibilidade e consistência para analisar o sistema de transporte de cana-de-açúcar de uma usina.

4.6 Validação do modelo

A validação do modelo é apresentada pelos Gráficos 6 e 7, em que foi realizada por meio de dados secundários.

O Gráfico 6 mostra a validação do modelo com o conjunto caminhão e reboque, através do custo operacional de produção. Nas condições do Cenário Elaborado, o custo alcançado pelo modelo com o conjunto caminhão e reboque foi de 8,51 R\$ t⁻¹.

Gráfico 6 - Validação do modelo com o conjunto caminhão e reboque



Fonte: elaborada pelo autor.

Como apresenta o Gráfico 6 e após análise descritiva entre os dados secundários e gerado pelo modelo com o conjunto caminhão e reboque, o valor mínimo foi de 6,90 R\$ t⁻¹, o

valor máximo foi de 9,21 R\$ t⁻¹, a média foi de 8,39 R\$ t⁻¹, o desvio padrão foi de 0,45 R\$ t⁻¹ e o coeficiente de variação foi de 5,33%, Tabela 4.

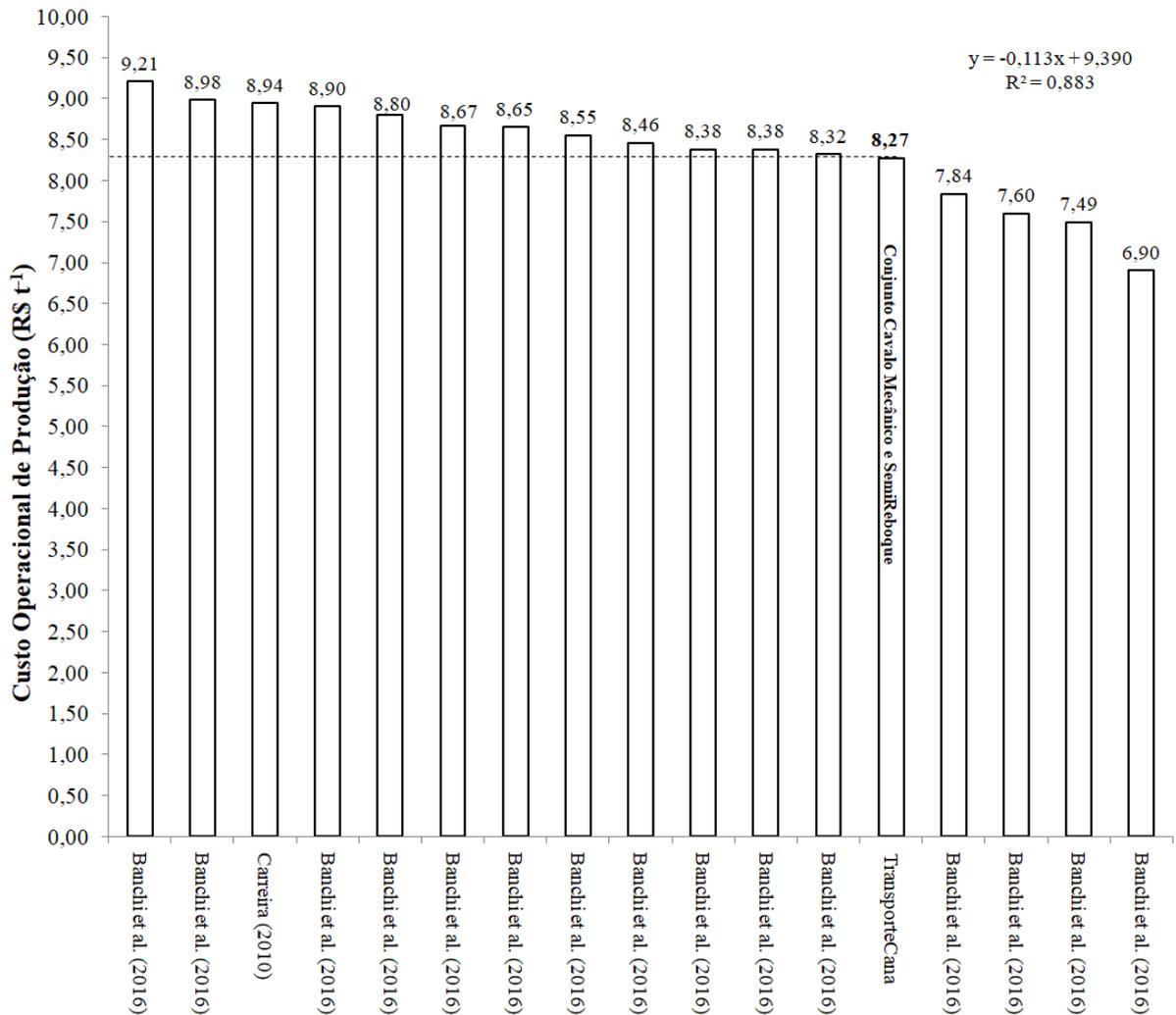
Tabela 4 - Análise descritiva dos dados secundários e gerado pelo modelo com o conjunto caminhão e reboque

Variável	-
Valor Mínimo	6,90 R\$ t ⁻¹
Valor Máximo	9,21 R\$ t ⁻¹
Média	8,39 R\$ t ⁻¹
Desvio Padrão	0,45 R\$ t ⁻¹
Coeficiente de Variação	5,33%

Fonte: elaborada pelo autor.

O Gráfico 7 mostra a validação do modelo com o conjunto cavalo mecânico e semireboque, por meio do custo operacional de produção. Nas condições do Cenário Elaborado, o custo alcançado pelo modelo com o conjunto cavalo mecânico e semireboque foi de 8,27 R\$ t⁻¹.

Gráfico 7 - Validação do modelo com o conjunto cavalo mecânico e semireboque



Fonte: elaborada pelo autor.

Como mostra o Gráfico 7 e após análise descritiva entre os dados secundários e gerado pelo modelo com o conjunto cavalo mecânico e semireboque, o valor mínimo foi de 6,90 R\$ t⁻¹, o valor máximo foi de 9,21 R\$ t⁻¹, a média foi de 8,37 R\$ t⁻¹, o desvio padrão foi de 0,45 R\$ t⁻¹ e o coeficiente de variação foi de 5,36%, Tabela 5.

Tabela 5 - Análise descritiva dos dados secundários e gerado pelo modelo com o conjunto cavalo mecânico e semireboque

Variável	-
Valor Mínimo	6,90 R\$ t ⁻¹
Valor Máximo	9,21 R\$ t ⁻¹
Média	8,37 R\$ t ⁻¹
Desvio Padrão	0,45 R\$ t ⁻¹
Coefficiente de Variação	5,36%

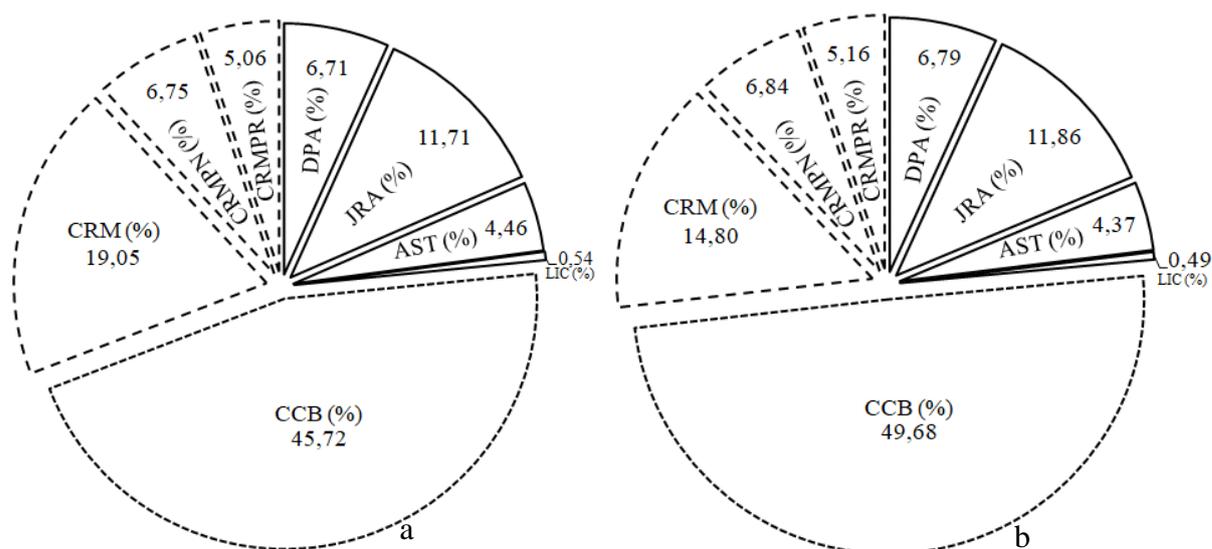
Fonte: elaborada pelo autor.

Dessa forma, a validação ocorrida nos Gráficos 6 e 7 evidenciaram que os dados de custo considerados da bibliografia, gerados pelo modelo e que foram analisados com a estatística descritiva, tem baixa variabilidade ou dispersão. Devido a isso, fica comprovado que o modelo desenvolvido fornece dados de custo dos equipamentos de transporte de cana-de-açúcar de uma usina, de acordo com a realidade.

4.7 Distribuição dos custos

Pelos resultados alcançados para o Cenário Elaborado, Gráfico 8, a variável mais representativa no custo do caminhão bitruck e reboque é o custo com combustível (CCB) com 45,72%, seguido do custo com reparo e manutenção (CRM) com 19,05% e juro anual (JRA) com 11,71%, Gráfico 8a. O custo variável totalizou 76,58% e, no entanto, o custo fixo representa 23,42%.

Gráfico 8 - Distribuição dos custos (%) para o Cenário Elaborado: a - Conjunto Caminhão Bitruck e Reboque; b - Conjunto Cavallo Mecânico e Semireboque. DPA - Depreciação anual, JRA - Juro anual, AST - Alojamento, seguro e taxas, LIC - Licenciamento, CCB - Custo com combustível, CRM - Custo com reparo e manutenção, CRMPN - Custo com reparo e manutenção do pneu novo e CRMPR - Custo com reparo e manutenção do pneu recapado



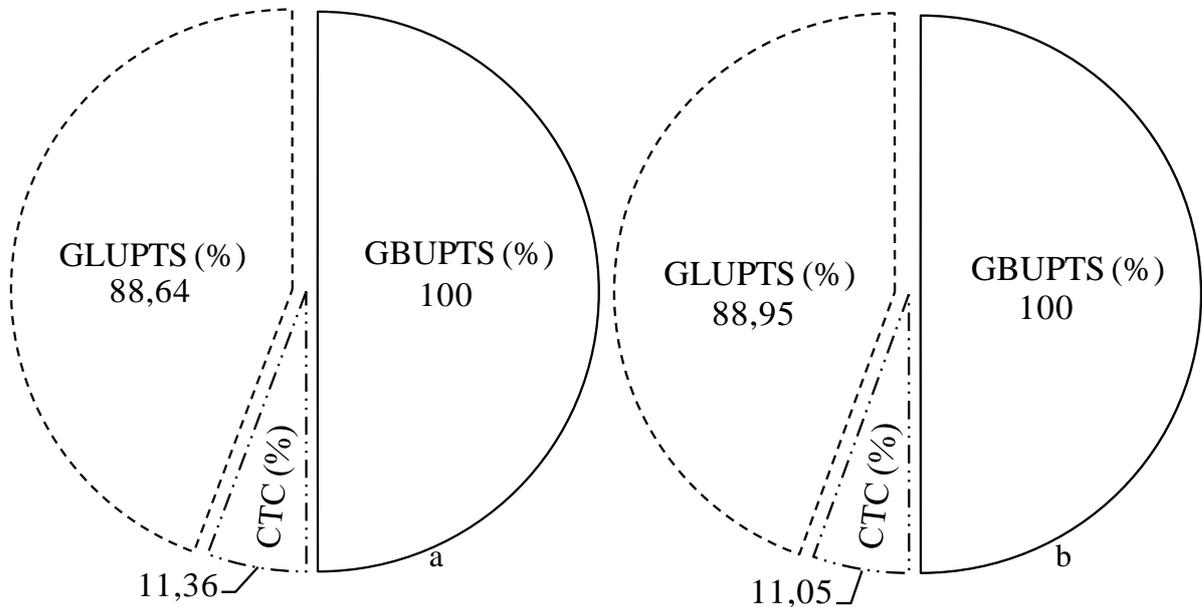
Fonte: elaborada pelo autor.

Para o custo do cavallo mecânico e semireboque, a variável de maior expressão também se refere ao custo com combustível (CCB) com 49,68%, seguido do custo com reparo e manutenção (CRM) com 14,80% e do juro anual (JRA) com 11,86%. O custo variável totalizou 76,48% e o custo fixo 23,52%, Gráfico 8b.

4.8 Distribuição dos ganhos da usina

Pela utilização dos equipamentos, o custo total tem influência nos ganhos econômicos da usina, Gráfico 9. Para o Cenário Elaborado, a produção transportada na safra (PTS) pelo conjunto caminhão e reboque foi de 87.646 t e o ganho bruto da usina com a produção transportada na safra (GBUPTS) foi de R\$ 6.564.655. Nessa situação, o conjunto caminhão bitruck e reboque alcançou um custo total (CTC) de 11,36%, resultando em um ganho líquido (GLUPTS) de 88,64% ou R\$ 5.819.225, Gráfico 9a.

Gráfico 9 - Distribuição (%) do ganho bruto da usina com a produção transportada na safra (GBUPTS), ganho líquido da usina com a produção transportada na safra (GLUPTS) e custo total (CTC) do conjunto: a - Conjunto Caminhão Bitruck e Reboque e b - Conjunto Cavallo Mecânico e Semireboque



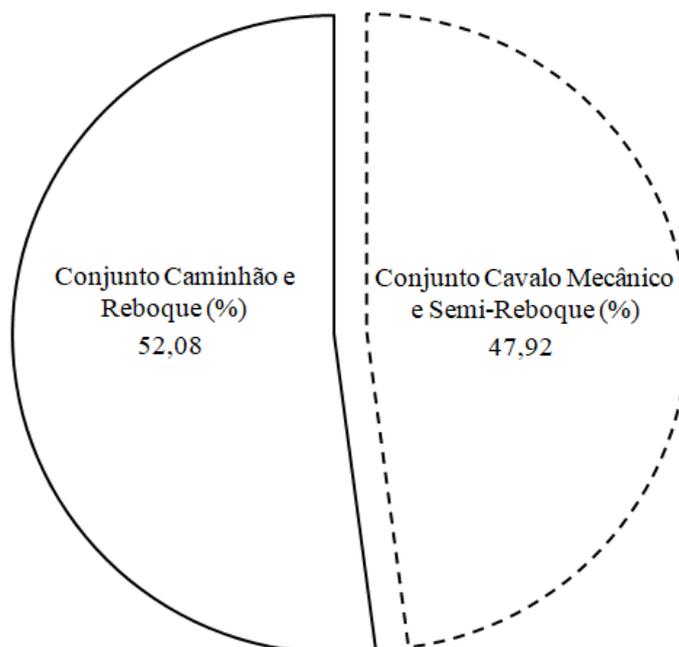
Fonte: elaborada pelo autor.

Para o conjunto cavalo mecânico e semireboque, a produção transportada na safra (PTS) foi de 87.272 t e o ganho bruto da usina com a produção transportada na safra (GBUPTS) foi de R\$ 6.536.641. Nessa condição, o conjunto cavalo mecânico e semireboque obteve um custo total (CTC) de 11,05% e o ganho líquido (GLUCPTS) foi de 88,95% ou R\$ 5.814.549, Gráfico 9b, resultando em uma diferença no custo total (CTC) de 0,31% e no ganho líquido (GLUPTS) de R\$ 4.676, quando em relação ao conjunto caminhão bitruck e reboque.

4.9 Participação do custo dos conjuntos

Na condição do Cenário Elaborado, o conjunto caminhão bitruck com reboque representa 52,08% do custo no sistema de transporte de cana-de-açúcar, enquanto que o conjunto cavalo mecânico com semireboque alcança 47,92% do custo, Gráfico 10.

Gráfico 10 - Participação (%) do custo do Conjunto Caminhão Bitruck com Reboque e do Conjunto Cavalo Mecânico com Semireboque no sistema de transporte de cana-de-açúcar

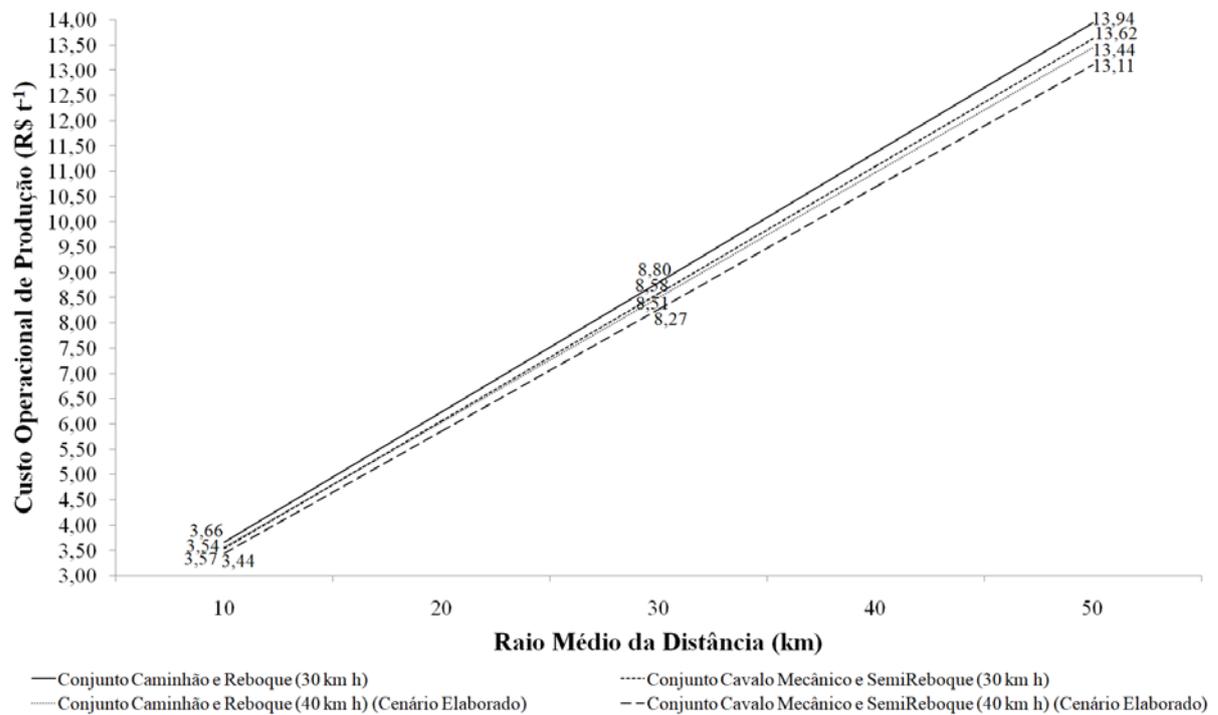


Fonte: elaborada pelo autor.

4.10 Velocidade média de trabalho

No Gráfico 11 é apresentado o custo operacional de produção dos conjuntos em duas condições operacionais: em velocidade média de trabalho de 30 e 40 km h⁻¹ (Cenário Elaborado) em função do raio médio da distância entre a usina e o talhão. O aumento do raio médio da distância resulta em um crescimento linear no custo, porém o aumento da velocidade de trabalho reduz o custo do conjunto. No raio de 10 km com as velocidades de 30 e 40 km h⁻¹, o custo com o conjunto caminhão bitruck e reboque foi 3,66 e 3,57 R\$ t⁻¹, respectivamente. Enquanto que o conjunto cavalo mecânico e semireboque obteve o custo de 3,54 e 3,44 R\$ t⁻¹, respectivamente. Já Carreira (2010) ao realizar um estudo com o transporte de cana-de-açúcar, com o conjunto cavalo mecânico e semireboque, considerando um raio de 10 km, a ser percorrido com as velocidades de trabalho de 11, 42,4 e 71 km h⁻¹, alcançou um custo de 2,92, 2,35 e 2,27 R\$ t⁻¹, respectivamente.

Gráfico 11 - Custo operacional de produção e velocidade média de trabalho em função do raio médio da distância



Fonte: elaborada pelo autor.

Para o raio de 30 km (Cenário Elaborado), nas velocidades de 30 e 40 km h⁻¹, o custo com o conjunto caminhão bitruck e reboque foi 8,80 e 8,51 R\$ t⁻¹, respectivamente. Já o conjunto cavalo mecânico e semireboque alcançou o custo de 8,58 e 8,27 R\$ t⁻¹, respectivamente. Quando no raio de 50 km com as velocidades de 30 e 40 km h⁻¹, o custo com o conjunto caminhão bitruck e reboque foi 13,94 e 13,44 R\$ t⁻¹, respectivamente. Enquanto que o conjunto cavalo mecânico e semireboque atingiu o custo de 13,62 e 13,11 R\$ t⁻¹, respectivamente. Já o estudo de Carreira (2010) com o conjunto cavalo mecânico e semireboque, ao considerar um raio de 50 km, a ser percorrido com as velocidades de trabalho de 11, 42,4 e 71 km h⁻¹, alcançou um custo de 11,77, 8,94 e 8,54 R\$ t⁻¹, respectivamente.

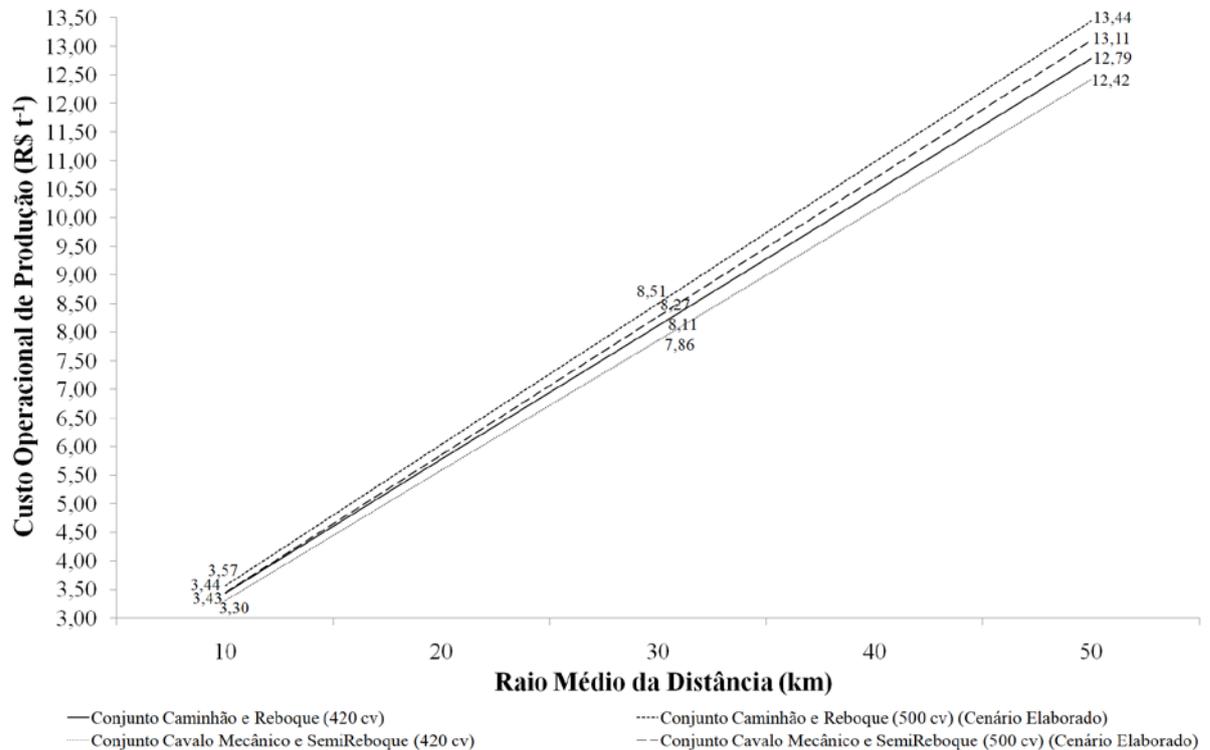
A diferença entre os custos do conjunto caminhão bitruck e reboque, com referência ao raio de 10 km, na velocidade de 30 km h⁻¹ houve um aumento de 5,14 e 10,28 R\$ t⁻¹ ou em 140,22 e 280,45%, quando em relação aos raios de 30 e 50 km, respectivamente. Quando na velocidade de 40 km h⁻¹, ocorreu um aumento de 4,94 e 9,88 R\$ t⁻¹ ou em 138,55 e 277,11%, respectivamente. Para o conjunto cavalo mecânico e semireboque, a diferença no custo com referência ao raio de 10 km, na velocidade de 30 km h⁻¹ houve um crescimento de 5,04 e 10,08 R\$ t⁻¹ ou em 142,19 e 284,38%, quando em relação aos raios de 30 e 50 km,

respectivamente. Já na velocidade de 40 km h^{-1} , ocorreu um aumento de 4,83 e 9,67 $\text{R\$ t}^{-1}$ ou em 140,47 e 280,94%, respectivamente.

4.11 Potência nominal do motor

Uma alternativa de gerenciamento para reduzir o custo dos equipamentos da Usina Hipotética, é a utilização de caminhões e cavalos mecânicos com menor potência nominal do motor. O Gráfico 12 apresenta o custo operacional de produção dos conjuntos, em duas diferentes potências nominal do motor: 420 e 500 cv (Cenário Elaborado) em função do raio médio da distância entre a usina e o talhão. O aumento do raio médio da distância resulta em um crescimento linear no custo, porém a menor potência nominal do caminhão bitruck e cavalo mecânico reduz o custo do conjunto. No raio de 10 km com as potências nominais de 420 e 500 cv, o custo com o conjunto caminhão bitruck e reboque foi 3,43 e 3,57 $\text{R\$ t}^{-1}$, respectivamente. Enquanto que o conjunto cavalo mecânico e semireboque obtive o custo de 3,30 e 3,44 $\text{R\$ t}^{-1}$, respectivamente.

Gráfico 12 - Custo operacional de produção e potência nominal do motor em função do raio médio da distância



Fonte: elaborada pelo autor.

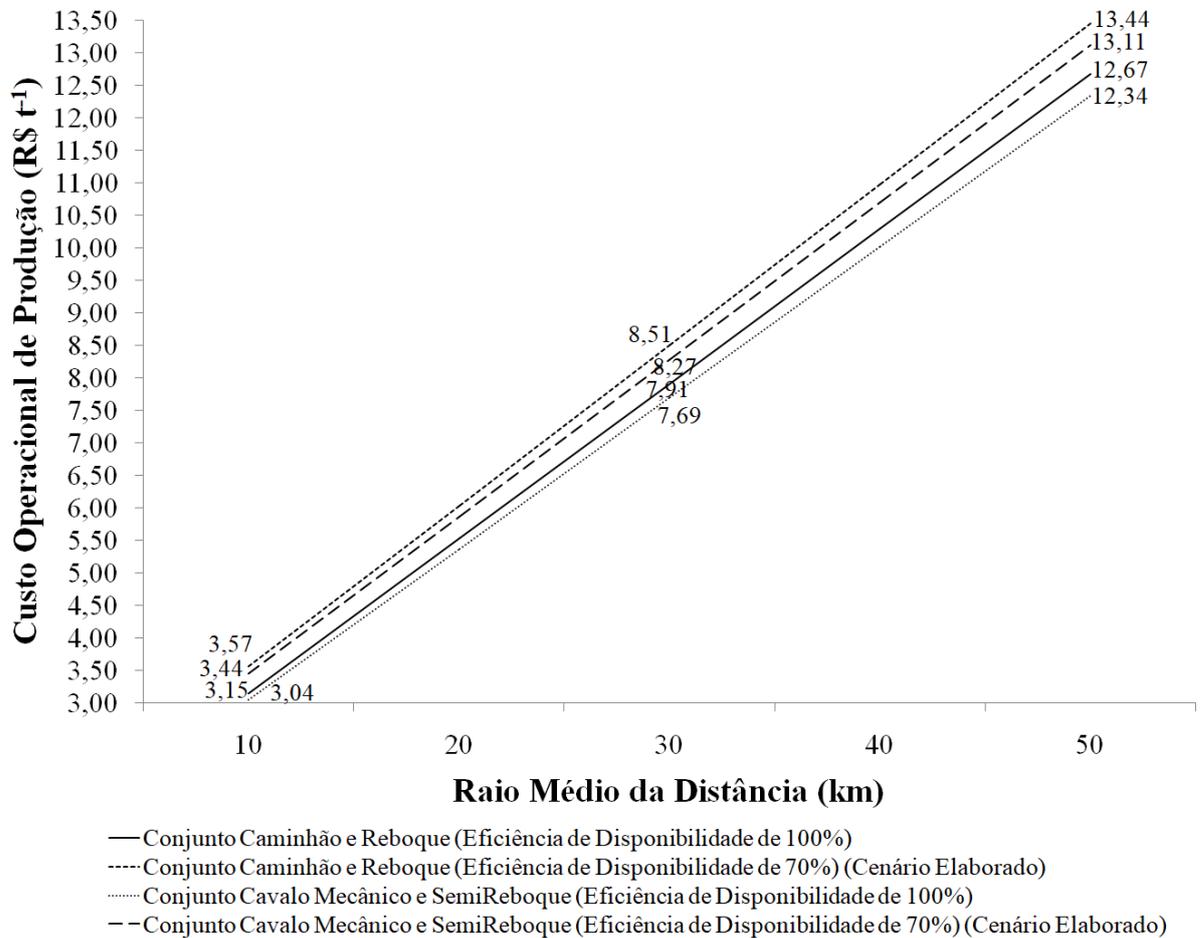
No raio de 30 km (Cenário Elaborado), com as potências nominais de 420 e 500 cv, o custo com o conjunto caminhão bitruck e reboque foi 8,11 e 8,51 R\$ t⁻¹, respectivamente. Já o conjunto cavalo mecânico e semireboque alcançou o custo de 7,86 e 8,27 R\$ t⁻¹, respectivamente. Quando no raio de 50 km com as potências nominais de 420 e 500 cv, o custo com o conjunto caminhão bitruck e reboque foi 12,79 e 13,44 R\$ t⁻¹, respectivamente. Enquanto que o conjunto cavalo mecânico e semireboque atingiu o custo de 12,42 e 13,11 R\$ t⁻¹, respectivamente.

A diferença entre os custos do conjunto caminhão bitruck e reboque, com referência ao raio de 10 km, com a potência nominal de 420 cv houve um aumento de 4,68 e 9,36 R\$ t⁻¹ ou em 136,21 e 272,43%, quando em relação aos raios de 30 e 50 km, respectivamente. Quando com a potência nominal de 500 cv, ocorreu um aumento de 4,94 e 9,88 R\$ t⁻¹ ou em 138,55 e 277,11%, respectivamente. Para o conjunto cavalo mecânico e semireboque, a diferença no custo com referência ao raio de 10 km, com a potência nominal de 420 cv houve um crescimento de 4,56 e 9,11 R\$ t⁻¹ ou em 137,98 e 275,96%, quando em relação aos raios de 30 e 50 km, respectivamente. Já com a potência nominal de 500 cv, ocorreu um aumento de 4,83 e 9,67 R\$ t⁻¹ ou em 140,47 e 280,94%, respectivamente.

4.12 Eficiência de disponibilidade

A eficiência de disponibilidade é uma variável gerencial que representa os tempos trabalhado, de regulagens e de disponibilidade do equipamento. O Gráfico 13 apresenta o custo operacional de produção dos conjuntos, em duas condições gerenciais da eficiência de disponibilidade: 70 (Cenário Elaborado) e 100% em função do raio médio da distância entre a usina e o talhão. O aumento do raio médio da distância resulta em um crescimento linear no custo, porém a maior eficiência de disponibilidade reduz o custo dos conjuntos. No raio de 10 km com as eficiências de 70 e 100%, o custo com o conjunto caminhão bitruck e reboque foi 3,57 e 3,15 R\$ t⁻¹, respectivamente. Enquanto o conjunto cavalo mecânico e semireboque obteve o custo de 3,44 e 3,04 R\$ t⁻¹, respectivamente.

Gráfico 13 - Custo operacional de produção e eficiência de disponibilidade em função do raio médio da distância



Fonte: elaborada pelo autor.

No raio de 30 km (Cenário Elaborado), com as eficiências de 70 e 100%, o custo com o conjunto caminhão bitruck e reboque foi 8,51 e 7,91 R\$ t⁻¹, respectivamente. Já o conjunto cavalo mecânico e semireboque alcançou o custo de 8,27 e 7,69 R\$ t⁻¹, respectivamente. Quando no raio de 50 km com as eficiências de 70% e 100%, o custo com o conjunto caminhão bitruck e reboque foi 13,44 e 12,67 R\$ t⁻¹, respectivamente. Enquanto que o conjunto cavalo mecânico e semireboque atingiu o custo de 13,11 e 12,34 R\$ t⁻¹, respectivamente.

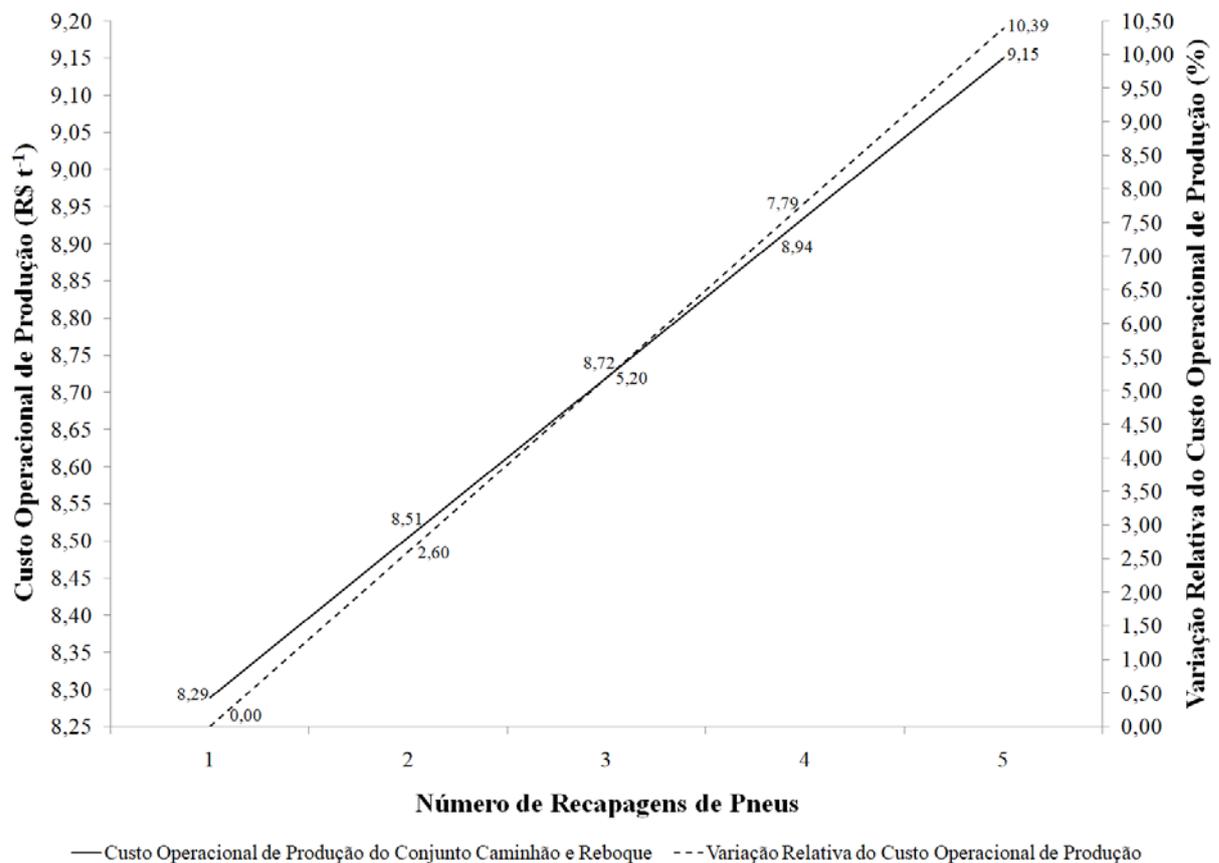
A diferença entre os custos do conjunto caminhão bitruck e reboque, com referência ao raio de 10 km, com a eficiência de 70% houve um aumento de 4,94 e 9,88 R\$ t⁻¹ ou em 138,55 e 277,11%, quando em relação aos raios de 30 e 50 km, respectivamente. Quando com a eficiência de 100%, ocorreu um aumento de 4,76 e 9,52 R\$ t⁻¹ ou em 151,27 e 302,54%, respectivamente. Para o conjunto cavalo mecânico e semireboque, a diferença no

custo com referência ao raio de 10 km, com a eficiência de 70% houve um crescimento de 4,83 e 9,67 R\$ t⁻¹ ou em 140,47 e 280,94%, quando em relação aos raios de 30 e 50 km, respectivamente. Já com a eficiência de 100%, ocorreu um aumento de 4,65 e 9,30 R\$ t⁻¹ ou em 152,86 e 305,71%, respectivamente.

4.13 Recapagens de pneus

O número de recapagens de pneus dos equipamentos de transporte de cana-de-açúcar deve ser analisado para observar o impacto causado no custo operacional de produção dos conjuntos, a fim de tomar uma medida gerencial no número de recapagens para reduzir o custo ao mínimo e elevar os ganhos da usina. O Gráfico 14 apresenta o custo operacional de produção e variação relativa do custo operacional de produção em função do número de recapagens de pneus do conjunto caminhão bitruck com reboques.

Gráfico 14 - Custo operacional de produção e variação relativa do custo operacional de produção em função do número de recapagens de pneus do conjunto caminhão bitruck com reboques

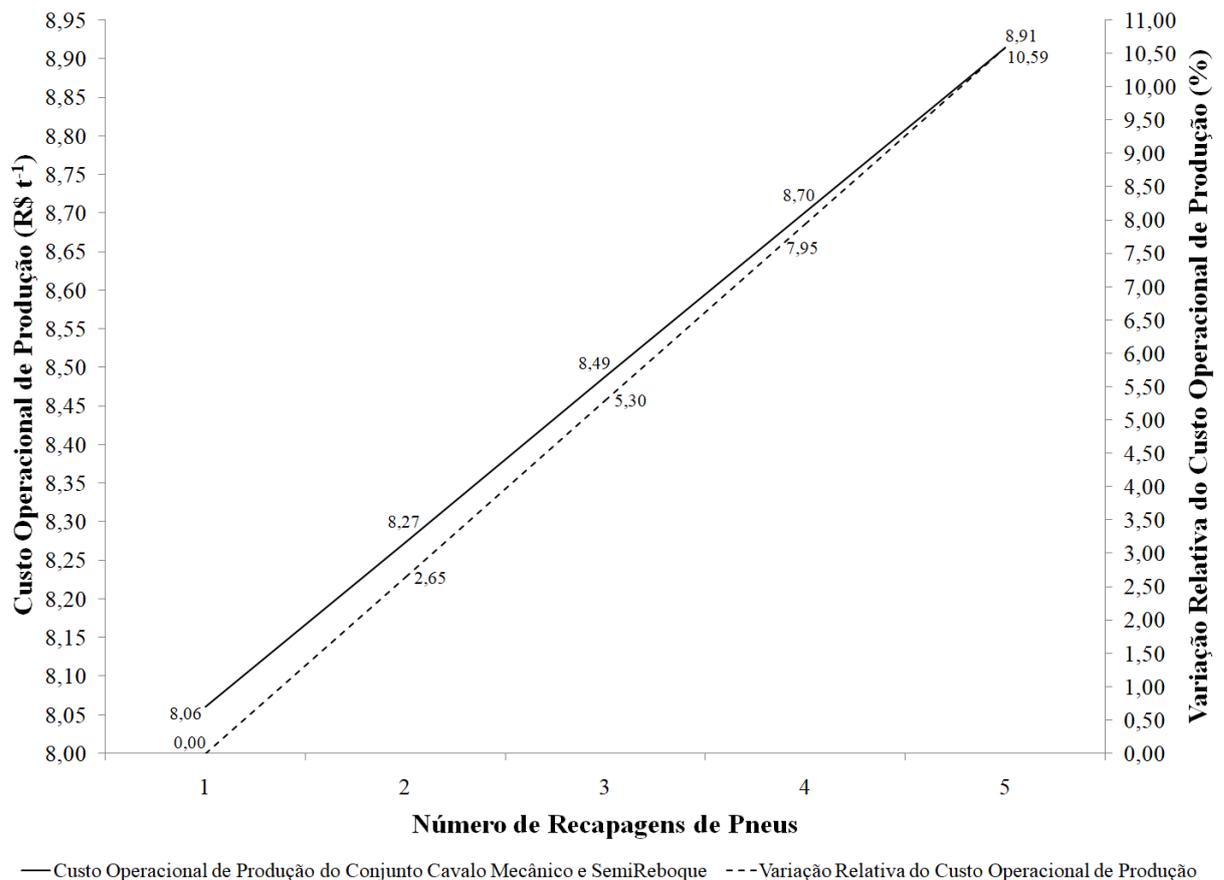


Fonte: elaborada pelo autor.

O custo na primeira recapagem foi de 8,29 R\$ t⁻¹, na segunda (Cenário Elaborado) foi de 8,51 R\$ t⁻¹ com um aumento na variação relativa de 2,60%. Na terceira recapagem, o custo foi de 8,72 R\$ t⁻¹ com um acréscimo de 5,20%. Na quarta recapagem, o custo foi de 8,94 R\$ t⁻¹ com um aumento de 7,79%. Na quinta recapagem, o custo foi de 9,15 R\$ t⁻¹ com um acréscimo de 10,39%.

O Gráfico 15 apresenta o custo operacional de produção e variação relativa do custo operacional de produção em função do número de recapagens de pneus do conjunto cavalo mecânico com semireboques.

Gráfico 15 - Custo operacional de produção e variação relativa do custo operacional de produção em função do número de recapagens de pneus do conjunto cavalo mecânico com semireboques



Fonte: elaborada pelo autor.

Na primeira recapagem, o custo foi de 8,06 R\$ t⁻¹, na segunda (Cenário Elaborado) foi de 8,27 R\$ t⁻¹ com um aumento na variação relativa de 2,65%. Na terceira recapagem, o custo foi de 8,49 R\$ t⁻¹ com um acréscimo de 5,30%. Na quarta recapagem, o custo foi de 8,70 R\$ t⁻¹ com um aumento de 7,95%. Na quinta recapagem, o custo foi de 8,91 R\$ t⁻¹ com um acréscimo de 10,59%.

Como se observar nos Gráficos 14 e 15, quando o número de recapagens de pneus passa de três recapagens, o custo operacional de produção dos conjuntos tem um crescimento expressivo. Nesse contexto, Banchi et al. (2013a) ao realizarem um estudo de gerenciamento técnico com pneus rodoviários de equipamentos canavieiros, determinaram que a viabilidade de reforma dos pneus foi de 3 recapagens, devido o maior custo acumulado alcançado e pela menor vida útil em quilômetros do pneu. Nesse sentido, segundo Engenharias (2015) no pneu é possível ocorrer entre duas e três recapagens, sendo a quantidade total de recapagens, variável conforme for à utilização dos pneus.

5 CONCLUSÕES

O modelo pode ser utilizado como ferramenta de suporte às tomadas de decisões gerenciais de uma usina.

O aumento do raio médio da distância reduz a produção transportada na safra e eleva a distância trafegada na safra e consumo operacional de combustível na safra.

O aumento da produção da usina e do raio médio da distância cresce o número de conjuntos necessários.

As variáveis que mais impactam no custo dos conjuntos do sistema de transporte são a carga das carrocerias, raio médio da distância e preço do combustível.

Entre os custos fixos e variáveis dos conjuntos, o combustível é o mais representativo.

O conjunto caminhão bitruck e reboque tem maior custo operacional de produção e maior impacto nos ganhos da usina.

O conjunto caminhão bitruck e reboque é quem mais impacta no custo do sistema de transporte da usina.

O aumento da velocidade média de trabalho influencia positivamente no desempenho operacional e econômico dos conjuntos.

A utilização de caminhões e cavalos mecânicos com menor potência nominal no motor provém um menor custo operacional de produção dos conjuntos.

O aumento da eficiência de disponibilidade reduz o custo operacional de produção dos conjuntos.

É recomendável realizar até duas recapagens e não exceder três recapagens de pneus, a fim de não reduzir a vida útil dos pneus recapados e, principalmente, em não elevar expressivamente (impactar) no custo operacional de produção dos conjuntos.

As Usinas devem priorizar por áreas de cultivo não distantes da indústria, a fim de reduzir o custo com os equipamentos e maximizar seus ganhos. Bem como, em não priorizar por áreas próximas da indústria, a menos de 20 km, porque irá causar fila de espera de caminhões na recepção e, no entanto, uma redução na qualidade da matéria-prima.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Brasília, DF: ANA, 2012. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/>. Acesso em: __ jan. 2012.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. Agricultural machinery management data ASAE D497.7. *In: ASABE. ASABE standards*. St. Joseph, 2011. p. 1-8.
- ARJONA, Enrique; BUENO, Graciela; SALAZAR, Luis. An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation systems of a sugarcane plantation. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 247-264, 2001.
- BALASTREIRE, Luiz Antônio. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990.
- BANCHI, Ângelo Domingos; BARRETO JUNIOR, Erik Augusto; LOPES, José Roberto. Implementos I: custos de reparo e manutenção dos implementos rodoviários. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 41, p. 8-11, 2009.
- BANCHI, Ângelo Domingos; GARCIA, Angel Pontin; ALBIERO, Daniel; GALVÃO, Cezario Benedito; FAVARIN, Luis Guilherme Arruda. Importance of crop productivity and equipment lifetime in the strategic and tactical management of sugarcane harvesters. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 5, p. 601-608, 2020.
- BANCHI, Ângelo Domingos; GARCIA, Angel Pontin; GRESPAN, Andrei; ALBIERO, Daniel; FAVARIN, Luis Guilherme Arruda; GALVÃO, Cezario Benedito. Operating cost of sugarcane harvester in function of agricultural productivity and harvester age. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 7, p. 552-557, 2019.
- BANCHI, Ângelo Domingos; LOPES, José Roberto. Custos com reparo e manutenção no transporte de cana-de-açúcar. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 26, p. 28-29, 2007.
- BANCHI, Ângelo Domingos; LOPES, José Roberto; FRANÇA, Lázaro Santana. Gerenciamento técnico de pneus em frotas: parte IV. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 14, p. 08-09, 2006a.
- BANCHI, Ângelo Domingos; LOPES, José Roberto; FRANÇA, Lázaro Santana. Gerenciamento técnico de pneus em frotas: parte II. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 12, p. 08-10, 2006b.
- BANCHI, Ângelo Domingos; LOPES, José Roberto; FRANÇA, Lázaro Santana. Gerenciamento técnico de pneus em frotas: parte I. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 11, p. 08-09, 2006c.
- BANCHI, Ângelo Domingos; LOPES, José Roberto; FERREIRA, Valter Aparecido; FAVARIN, Luis Guilherme Arruda. Gestão com mecanização com indicadores gerenciais estratégicos. *In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR*, 18., 2016, Ribeirão Preto. **Anais** [...]. Ribeirão Preto: IDEA, 2016.

BANCHI, Ângelo Domingos; LOPES, José Roberto; ROCCO, Giancarlo Coscelli; FERREIRA, Valter Aparecido. Gerenciamento técnico da manutenção de pneus. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 85, p. 42-45, 2013a.

BANCHI, Ângelo Domingos; LOPES, José Roberto; ROCCO, Giancarlo Coscelli; FERREIRA, Valter Aparecido. Inteligência na gestão de pneus. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 84, p. 36-41, 2013b.

BANCHI, Ângelo Domingos; LOPEZ, José Roberto; ROCCO, Giancarlo Coscelli. Uso anual e consumo de combustível em frotas agrícolas. **Revista Agrimotor**, São Paulo, n. 39, p. 8-10, 2008.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Simule o seu Financiamento**. Rio de Janeiro, 2020a. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/simulador/?productCode=AOI_027&valorBem=715000&percentualFinanciado=50&prazoFinanciamento=72&prazoCarenacia=12&spreadAgente=6&projecaoInflacaoAnual=3.63. Acesso em: 27 abr. 2020.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Simule o seu Financiamento**. Rio de Janeiro, 2020b. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/simulador/?productCode=AOI_027&valorBem=85000&percentualFinanciado=50&prazoFinanciamento=72&prazoCarenacia=12&spreadAgente=6&projecaoInflacaoAnual=3.63. Acesso em: 27 abr. 2020.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Simule o seu Financiamento**. Rio de Janeiro, 2020c. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/simulador/?productCode=AOI_027&valorBem=595000&percentualFinanciado=50&prazoFinanciamento=72&prazoCarenacia=12&spreadAgente=6&projecaoInflacaoAnual=3.63. Acesso em: 27 abr. 2020.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Simule o seu Financiamento**. Rio de Janeiro, 2020d. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/simulador/?productCode=AOI_027&valorBem=190000&percentualFinanciado=50&prazoFinanciamento=72&prazoCarenacia=12&spreadAgente=6&projecaoInflacaoAnual=3.63. Acesso em: 27 abr. 2020.

BRANCO, José Eduardo Holler; BRANCO, Daniela Holler; DE AGUIAR, Edson Martins; CAIXETA FILHO, José Vicente; RODRIGUES, Luciano. Study of optimal locations for new sugarcane mills in Brazil: Application of a MINLP network equilibrium model. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 127, p. 1-11, 2019.

BOCANEGRA-HERRERA, Claudia Cristina; VIDAL, Carlos Julio. Development of a simulation model as a decision support system for sugarcane supply. **DYNA**, Medellín, v. 83, n. 198, p. 180-186, 2016.

CARREIRA, Marcio Luis. **Desempenho operacional, econômico e energético do transporte de cana-de-açúcar**: um estudo de caso. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

CARVAJAL, Jimmy; SARACHE, William; COSTA, Yasel. Addressing a robust decision in the sugarcane supply chain: Introduction of a new agricultural investment project in Colombia. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 157, p. 77-89, 2019.

COCHRAN, Billy J.; WHITNEY, Richard W. A technique for designing transport systems for sugarcane. *In*: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 16., 1977, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ISSCT, 1977. p. 2069-2079.

CENTRO CANAGRO. **As projeções de produção de cana, açúcar e etanol para a safra 2023/24 da FIESP/MB Agro**. Piracicaba: CENTRO CANAGRO, 2021. Disponível em: <http://www.cana.com.br/biblioteca/informativo/Projecoes%202023%2024.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento**. Brasília, 2018a. Disponível em: https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/17727_4e54c5103a0ab4a15529e35307c79b2e. Acesso em: 19 mai. 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Portal de informações agropecuárias: observatório agrícola, cana-de-açúcar - série histórica, visão nacional**. Brasília, 2018b. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/safras/cana-serie-historica>. Acesso em: 18 jul. 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento**. Brasília, 2019. Disponível em: https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/30052_b5210c506c4abbec52544c052741cd7c. Acesso em: 02 jul. 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento (área cultivada e produção)**. Brasília, 2021. Disponível em: https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/38841_c46487b7985626b6b41f7083ce9336c5. Acesso em: 31 ago. 2021.

CHAVEZ, Marcela María Morales; SARACHE, William; COSTA, Yasel; SOTO, José. Multiobjective stochastic scheduling of upstream operations in a sustainable sugarcane supply chain. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 276, p. 1-14, 2020.

DÍAZ, José Antonio; PÉREZ, Ileana Gloria. Simulation and optimization of sugar cane transportation in harvest season. *In*: 2000 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2000, Orlando. **Proceedings [...]**. Orlando: IEEE, 2000. p. 1114-1117.

ENGENHARIAS. **(Produção + Transporte de Cargas) e Sistemas (Automação + Banco de Dados): Custo do Caminhão - Pneus**. 2015. Disponível em: <http://engenhariasistematica.blogspot.com/2015/04/>. Acesso em: 24 abr. 2020.

FARIA, Danilo Augusto Figueira de; FRAZÃO, Márcia Lorena da Silva; VIEIRA, José Geraldo Vidal; SILVA, Joao Eduardo Azevedo Ramos da; LEMOS, Paula Horta. A

combination of discrete event simulation and multi-criteria analysis to configure sugarcane drop and hook delivery systems. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, n. 2, p. 248-256, 2019.

FARIA, Luis Filipe Figueira de; SILVA, João Eduardo Azevedo Ramos da. Effects of maintenance management procedures in sugarcane mechanic harvesting system equipment. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 6, p. 1187-1197, 2015.

FILHO, Angelo Aliano; MELO, Teresa; PATO, Margarida Vaz. A bi-objective mathematical model for integrated planning of sugarcane harvesting and transport operations. **Computers & Operations Research**, [s. l.], v. 134, p. 1-19, 2021.

FRANÇOSO, Renato Frias; BIGATON, Aline; SILVA, Haroldo José Torres da; MARQUES, Pedro Valentim. Relação do custo de transporte da cana-de-açúcar em função da distância. **Revista iPecege**, Piracicaba, v. 3, n. 1, p. 100-105, 2017.

GALVÃO, Cezario Benedito; GARCIA, Angel Pontin; ALBIERO, Daniel; RIBEIRO, Admilson Írio; BANCHI, Ângelo Domingos. Operational management of the cane infield wagon: analysis of the cost of repair and maintenance. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 218-222, 2018.

GOODYEAR. **Cálculo de custo por km**. 2017. Disponível em: <https://caminhao.goodyear.com.br/mais-informacoes/custo/>. Acesso em: 24 abr. 2020.

HANSEN, Alan Christopher; BARNES, Andrew James; LYNE, Peter W. L. Simulation modeling of sugarcane harvest-to-mill delivery systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 45, n. 3, p. 531-538, 2002.

HIGGINS, Andrew. Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: a case study at an Australian sugar mill. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 170, n. 3, p. 987-1000, 2006.

HIGGINS, Andrew; ANTONY, George; SANDELL, Gary; DAVIES, Ian; PRESTWIDGE, Di; ANDREW, Bill. A framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 82, n. 2, p. 99-115, 2004.

HIGGINS, Andrew; DAVIES, Ian. A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 47, n. 2, p. 85-102, 2005.

IANNONI, Ana Paula; MORABITO, Reinaldo. A discrete simulation analysis of a logistics supply system. **Transportation Research Part E**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 191-210, 2006.

IANNONI, Ana Paula; MORABITO, Reinaldo. Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 9, n. 2, p. 107-128, 2002.

JORIO, Rosa de; LEGENDRE, Bernard; GAUTZ, Loren; ABDELLAOUIR, Radia. Incorporation of sugarcane harvesting and transport variables into a sugarcane harvest and

transport scheduling model. *In: ANNUAL CONGRESS OF THE SOUTH AFRICAN SUGAR TECHNOLOGISTS ASSOCIATION, 80., 2006, Durban. Proceedings [...]. Durban: SASTA, 2006. p. 71-85.*

JUNQUEIRA, Rogerio de Ávila Ribeiro; MORABITO, Reinaldo. Modeling and solving a sugarcane harvest front scheduling problem. **International Journal of Production Economics**, [s. l.], v. 213, p. 150-160, 2019.

KAEWTRAKULPONG, Kriengkri; TAKIGAWA, Tomohiro; KOIKE, Masayuki; HASEGAWA, Hideo; BAHALAYODHIN, Banshaw. Mechanization for the improvement of the sugarcane harvesting and transportation system in Thailand: a case study in Udon Thani province. **Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery**, Saitama, v. 70, n. 2, p. 51-61, 2008.

LE GAL, Pierre-Yves; LE MASSON, J.; BEZUIDENHOUT, Carel N.; LAGRANGE, L. F. Coupled modelling of sugarcane supply planning and logistics as a management tool. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 68, n. 2, p. 168-177, 2009.

LE GAL, Pierre-Yves; LYNE, Peter W. L.; MEYER, E.; SOLER, L. -G. Impact of sugarcane supply scheduling on mill sugar production: A South African case study. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 96, n. 1, p. 64-74, 2008.

MARGARIDO, Fernando Bomfim; SANTOS, Fernando. Planejamento da lavoura. *In: SANTOS, Fernando; BORÉM, Aluízio. Cana-de-açúcar: do plantio à colheita. Viçosa, MG: UFV, 2016. 26 p.*

MIALHE, Luiz Geraldo. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974.

MILAN, Esteban Lopez; FERNANDEZ, Silvia Miquel; PLA ARAGONES, Lluís Miquel. Sugar cane transportation in Cuba, a case study. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 174, n. 1, p. 374-386, 2006.

MOREIRA, Alisson Neves Harmyans. **Geoprocessamento aplicado ao estudo de roteirização do transporte canavieiro**. 2015. 61 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

MUNDIM, João Umbiruçu Campus. **Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar**. 2009. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

OAKLAND, John. **Gerenciamento da qualidade total tqm**. São Paulo: Nobel, 2007.

OKSANEN, Timo. **Path planning algorithms for agricultural field machines**. 2007. 110 p. Dissertation (Doctorate of Science in Technology), Helsinki University of Technology, Espoo, 2007.

PARMAR, Rajbir S.; MCCLENDON, Ronald W.; POTTER, Walter D. Farm machinery selection using simulation and genetic algorithms. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 5, p. 1905-1909, 1996.

PÉRA, Thiago Guilherme; BRANCO, José Eduardo Holler; CAIXETA FILHO, José Vicente. Repensando a logística de cana no Brasil: produtividade, modelagem, transporte ferroviário e agricultura digital. *In: LOGÍSTICA DO AGRONEGÓCIO: OPORTUNIDADES E DESAFIOS*, 1., 2017, Rochester. **Proceedings** [...]. Rochester: SSRN, 2017. p. 1-11.

RENOVEBENS. **Seguro de Caminhão**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://www.renovebens.com.br/seguro-caminhao/>. Acesso em: 27 abr. 2020.

RIPOLI, Tomaz Caetano Cannavam; RIPOLI, Marco Lorenzo Cunali. **Biomassa de cana-de-açúcar**: colheita, energia e ambiente. 2. ed. Piracicaba: Edição dos Autores, 2009.

ROLDÃO, Aline de Freitas; ASSUNÇÃO, Washington Luiz. Caracterização e duração das estações seca e chuvosa no Triângulo Mineiro - MG. **Revista Geonorte**, Manaus, Edição Especial 2, v. 3, n. 8, p. 428-440. 2012.

ROSA, João Henrique Mantellato. **Dimensionamento operacional e econômico da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**: modelo computacional como ferramenta de apoio a tomadas de decisão. 2017. 95 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

SANTOS, Neisvaldo Barbosa; CAVALCANTE, Diego Soriano; FERNANDES, Haroldo Carlos; GADANHA JÚNIOR, Casimiro Dias. Simulação da eficiência de campo da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 29, n. 1, p. 09-13, 2014.

SANTOS, Neisvaldo Barbosa dos; FERNANDES, Haroldo Carlos; GADANHA JÚNIOR, Casimiro Dias. Economic impact of sugarcane (*Saccharum spp.*) loss in mechanical harvesting. **Científica**, Jaboticabal, v. 43, n. 1, p. 16-21, 2015.

SANTOS, Neisvaldo Barbosa dos; TEIXEIRA, Mauri Martins; FERNANDES, Haroldo Carlos; GADANHA JÚNIOR, Casimiro Dias. Estimated repair and maintenance cost of sugarcane (*Saccharum spp.*) harvester. **Científica**, Jaboticabal, v. 45, n. 3, p. 214-217, 2017.

SEGFY. **Preço do Seguro para Usicamp Canavieiro**. Curitiba, 2020. Disponível em: <https://www.meuseguronovo.com.br/seguro/Usicamp---Canavieiro>. Acesso em: 27 abr. 2020.

SILVA, Aneirson Francisco da; MARINS, Fernando Augusto Silva; DIAS, Erica Ximenes. Addressing uncertainty in sugarcane harvest planning through a revised multi-choice goal programming model. **Applied Mathematical Modelling**, [s. l.], v. 39, n. 18, p. 5540-5558, 2015.

SCARPARI, Maximiliano Salles; DE BEAUCLAIR, Edgar Gomes Ferreira. Optimized agricultural planning of sugarcane using linear programming. **Revista Investigacion Operacional**, Habana, v. 31, n. 2, p. 126-132, 2010.

TEIXEIRA, Eduardo dos Santos; RANGEL, Socorro; FLORENTINO, Helenice de Oliveira; DE ARAÚJO, Silvio Alexandre. A review of mathematical optimization models applied to the sugarcane supply chain. **International Transactions in Operational Research**, [s. l.], v. 1, p. 1-34, 2021.

TREVISAN, Ed. **Cálculo Depreciação de Caminhão: Como Calcular esse Custo?**. 2016. Disponível em: <https://fretecomlucro.com.br/depreciacao-de-veiculos/>. Acesso em: 27 abr. 2020.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. **Preço cana campo (São Paulo)**. Araçatuba: UDOP, 2019. Disponível em: https://www.udop.com.br/cana/tabela_consecana_saopaulo.pdf. Acesso em: 13 abr. 2019.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Acompanhamento quinzenal da safra na região Centro-Sul**. São Paulo: UNICA, 2021. Disponível em: <https://observatoriodacana.com.br/listagem.php?idMn=63>. Acesso em: 11 dez. 2021.

VIAN, Carlos Eduardo Freitas; MARIN, Fábio Ricardo. **Árvore do conhecimento: cana-de-açúcar, logística e transporte**. Brasília: AGEITEC, 2020. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_133_22122006154842.html. Acesso em: 24 jun. 2020.

VIANA, Filipe Rios. **Cálculo da vida econômica de caminhões de transporte em uma indústria**. 2015. 26 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

VILAILUC, Phimpawat; SETHANAN, Kanchana; MOONSRI, Karn. Simulation of sugar cane harvesting and transportation in Nakhon Sawan, Thailand. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL APPLICATION ENGINEERING*, 4., 2016, Beppu. **Proceedings** [...]. Beppu: IIAE, 2016. p. 514-519.

WILLIAMS, H. Paul. **Model building in mathematical programming**. 4.ed. Chichester: John Wiley, 2008.

WILSON, James M. Gantt charts: a centenary appreciation. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 149, n. 2, p. 430-437, 2003.

APÊNDICE A - MODELO COMPUTACIONAL

Figura 6 - Variáveis de entrada do planejamento climático do modelo

Planejamento-Clima	Parâmetros	Sigla	Unidade	Meses de Transporte da Safra												Saída		
				Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Σ	%	
	Número de Dias	ND	Número				30	31	30	31	31	30	31	30			244	-
	Número de Domingos e Feriados	NDF	Número				0	0	0	0	0	0	0	0			0	-
	Número de Dias Úteis Impróprios para o Transporte	NDUIT	Número				2	1	0	0	0	1	2	3			9	4
	Jornada de Trabalho	JT	h				24	24	24	24	24	24	24	24			24	-
	Tempo Disponível	TD	h				672	720	720	744	744	696	696	648			5.640	-
			Dias				28	30	30	31	31	29	29	27			235	-
	Marque o Mês de Transporte Apertando o Botão Correspondente			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		Demarcar os Meses	

Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 6 apresenta as variáveis da entrada de dados do planejamento climático do modelo para o Cenário Elaborado da Usina Hipotética. O número de domingos e feriados (NDF) foi considerado como sendo zero (0), porque as usinas trabalham todos os dias da safra. Quanto o planejamento do clima da Usina Hipotética foi considerada às condições pluviométricas da região do triângulo mineiro, no Estado de Minas Gerais, entre os anos de 1980 e 2010, de acordo com os dados pluviométricos apresentados por (Roldão & Assunção, 2012) apud (ANA, 2012). Pelas condições pluviométricas e considerando um solo argiloso do triângulo mineiro, estimou-se o número de dias úteis impróprios para o transporte (NDUIT). A jornada de trabalho (JT) considerada foi de 24 horas, sendo em alternância de turnos, conforme funciona as usinas de cana-de-açúcar do País, durante o período de safra.

Os dados podem ser alterados pelo usuário do modelo, conforme for à necessidade ou ele usuário, julgar necessário.

Figura 7 - Variáveis de entrada do modelo

Dados de Entrada-Cenário Elaborado									
Item	Variável		Sigla	Unidade	Caminhão	Reboque	Cavalo	SemiReboque	
Clima	Tempo Disponível	Inserir os Dados dos Meses de Transporte	TDd/TDh	Dias/horas	235			5.640	
	Cultura	Produção da Usina na Safra	PUS	t			1.000.000		
		Preço da Tonelada de Cana Entregue na Usina	PTCEU	R\$ t ⁻¹			74,90		
Econômico		Valor Inicial	VI	R\$	715.000	85.000	595.000	190.000	
		Valor Final	VF	Decimal	0,50	0,50	0,50	0,50	
		Vida Útil em Anos	VUA	Ano	8	8	8	8	
		Vida Útil em Quilômetros	VUQ	km	500.000	250.000	500.000	250.000	
		Juro ao Ano	i	Decimal	0,15	0,15	0,15	0,15	
		Alojamento, Seguro e Taxas	AST	Decimal	0,04	0,03	0,04	0,03	
		IPVA e Licenciamento	LIC	R\$	3.269	756	2.756	756	
		Fator de Reparo e Manutenção	FRM	Decimal	1,00	-	1,00	-	
		Preço do Pneu Novo	PPN	R\$	1.920	1.400	1.920	1.400	
		Preço do Pneu Recapado	PPR	R\$	620	520	620	520	
		Preço do Combustível (Diesel)	PL	R\$ L ⁻¹			4,70		
		Fator de Consumo	Consumo Médio	Consumo Estimado (kmL)	FC	km L ⁻¹	1,00		1,00
	Características Técnicas, Gerenciais e Operacionais		Potência Nominal do Motor	PNM	CV	500	-	500	-
		Carga das Carrocerias	CC	t	20	18	-	35	
		Número de Carrocerias	NC	Número	-	3	-	2	
		Número de Pneus	NP	Número	12	24	10	24	
		Jornada de Trabalho	JT	h			24		
		Eficiência de Disponibilidade	Efd	Decimal			0,70		
		Velocidade Média de Trabalho	VMT	km h ⁻¹		40		40	
		Vida Útil do Pneu Novo	VUPN	km		80.000		80.000	
		Vida Útil do Pneu Recapado	VUPR	km		75.000		75.000	
		Número de Recapagens do Pneu	NRP	Número		2		2	
		Raio Médio da Distância	RMD	km		30		30	
		Tempo de Carregamento	TC	min		55		50	
		Tempo de Descarregamento	TD	min		55		50	

Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 7 são apresentados os valores das variáveis de entrada do planejamento do clima, cultura, econômico e as características técnicas, gerenciais e operacionais, do Cenário Elaborado da Usina Hipotética. O preço estimado da tonelada de cana-de-açúcar entregue na usina (PTCEU) está de acordo com a (UDOP, 2019).

O valor inicial (VI) foi obtido em concessionárias das principais montadoras de caminhões do País. O valor final (VF) foi determinado com base nos dados disponibilizado por Trevisan (2016).

A vida útil em anos (VUA) foi definida com base nos dados fornecidos por Viana (2015).

O juro ao ano (i) do caminhão, reboque, cavalo mecânico e semireboque foram determinados de acordo com os dados disponibilizado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2020a), (2020b), (2020c) e (2020d), respectivamente.

O alojamento, seguro e taxas (AST) do caminhão e cavalo mecânico foram

definidos com base nos dados fornecidos pelo Renovebens (2020). Para o reboque e semireboque foi determinado com referência aos dados disponibilizados de Segfy (2020).

O preço do pneu novo (PPN) e recapado (PPR) foram obtidos junto às revendas das principais marcas de pneus e recapadoras, respectivamente.

O preço do combustível (PL) foi determinado pelo valor médio dos postos de combustíveis de Uberada-MG, durante o mês de agosto de 2021.

A vida útil do pneu novo (VUPN) e recapado (VUPR) foram definidos com referência aos dados disponíveis de Engenharias (2015).

A eficiência de disponibilidade (Efd) está de acordo com Banchi e Lopes (2007), que determina a Efd pela vida útil em quilômetros do equipamento.

Os valores do tempo de carregamento (TC) e descarregamento (TD) foram considerados com base nos dados do estudo realizado por Carreira (2010).

Os valores das demais variáveis foram obtidos por meio de informações, consultas e recomendações práticas.

Figura 8 - Variáveis de saída do modelo

Dados de Saída-Cenário Elaborado							
Item	Variável	Sigla	Unidade	Caminhão	Reboque	Cavalo	SemiReboque
Desempenho Operacional	Tempo Total do Ciclo de Carregamento e Descarregamento	TTCCD	h	3,33			3,17
	Número de Carregamentos e Descarregamentos no Dia	NCDD	Número	5,04			5,31
	Número de Carregamentos e Descarregamentos no Mês	NCDM	Número	151			159
	Número de Carregamentos e Descarregamentos na Safra	NCDS	Número	1.184			1.247
	Carga Total do Conjunto	CTC	t	74			70
	Capacidade Total de Produção do Conjunto	CTPC	t h ⁻¹	22,20			22,11
	Produção Transportada no Dia	PTD	t Dia ⁻¹	373			371
	Produção Transportada no Mês	PTM	t Mês ⁻¹	11.189			11.141
	Produção Transportada na Safra	PTS	t Ano ⁻¹	87.646			87.272
	Distância Total Trafegada no Ciclo de Carregamento e Descarregamento	DTTCCD	km	60			60
	Distância Trafegada no Dia	DTD	km Dia ⁻¹	302			318
	Distância Trafegada no Mês	DTM	km Mês ⁻¹	9.072			9.549
	Distância Trafegada na Safra	DTS	km Ano ⁻¹	71.064			74.804
	Consumo Operacional de Combustível na Safra	COCS	L t ⁻¹	0,83			0,87
	Ritmo de Produção	RP	t Dia ⁻¹	4.255			4.255
	Número de Conjuntos Necessários	NCN	Número	12			12
Desempenho Econômico	Custo Fixo Anual	CFA	R\$ Ano ⁻¹	157.083	17.469	130.755	39.065
	Custo Fixo	CF	R\$ km ⁻¹	2,21	0,25	1,75	0,52
	Depreciação Anual	DPA	R\$ Ano ⁻¹	44.688	5.313	37.188	11.875
			R\$ km ⁻¹	0,63	0,07	0,50	0,16
	Juros Anual	JRA	R\$ Ano ⁻¹	78.024	9.276	64.929	20.734
			R\$ km ⁻¹	1,10	0,13	0,87	0,28
	Alojamento, Seguro e Taxas	AST	R\$ Ano ⁻¹	31.103	2.125	25.883	5.700
			R\$ km ⁻¹	0,44	0,03	0,35	0,08
	Licenciamento	LIC	R\$ Ano ⁻¹	3.269	756	2.756	756
			R\$ km ⁻¹	0,05	0,01	0,04	0,01
	Consumo de Combustível	CB	km L ⁻¹	0,98	-	0,98	-
	Custo com Combustível	CCB	R\$ km ⁻¹	4,80	-	4,80	-
	Custo com Reparo e Manutenção	CRM	R\$ km ⁻¹	1,43	0,57	1,19	0,24
	Custo com Reparo e Manutenção do Pneu Novo	CRMPN	R\$ km ⁻¹	0,29	0,42	0,24	0,42
	Custo com Reparo e Manutenção do Pneu Recapado	CRMPR	R\$ km ⁻¹	0,20	0,33	0,17	0,33
Custo Variável	CV	R\$ km ⁻¹	6,71	1,32	6,39	0,99	
Custo Operacional	CO	R\$ km ⁻¹	8,92	1,57	8,14	1,51	
Custo Operacional do Conjunto	COC	R\$ km ⁻¹	10,49			9,65	
Custo Operacional de Produção	COP	R\$ t ⁻¹	7,23	1,27	6,98	1,30	
Custo Operacional de Produção do Conjunto	COPC	R\$ t ⁻¹	8,51			8,27	
Ganhos da Usina	Custo Total do Conjunto	CTC	R\$	745.431			722.093
	Ganho Bruto da Usina com a Produção Transportada na Safra	GBUPTS	R\$	6.564.655			6.536.641
	Ganho Líquido da Usina com a Produção Transportada na Safra	GLUPTS	R\$	5.819.225			5.814.549

Fonte: elaborada pelo autor.