UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

FERNANDO DORIGUEL

MODELAGEM MATEMÁTICA DE OTIMIZAÇÃO NO PROCESSO DE MANOBRA DO TRANSBORDO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Botucatu

2019

FERNANDO DORIGUEL

MODELAGEM MATEMÁTICA DE OTIMIZAÇÃO NO PROCESSO DE MANOBRA DO TRANSBORDO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientadora: Profª. Drª. Helenice de Oliveira Florentino Silva

Botucatu

2019

D697m

Doriguel, Fernando
Modelagem matemática de otimização no processo de manobra do transbordo de cana-de-açúcar / Fernando Doriguel. -- Botucatu, 2019
84 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientadora: Helenice de Oliveira Florentino Silva

1. Manobras de máquinas agrícolas. 2. Sistema de colheita. 3. Modelos matemáticos. 4. Energia. 5. Energia. Otimização. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELAGEM MATEMÁTICA DE OTIMIZAÇÃO NO PROCESSO DE MANOBRA DO TRANSBORDO DE CANA-DE-AÇÚCAR

AUTOR: FERNANDO DORIGUEL

ORIENTADORA: HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA
Departamento de Bioestatística / UNESP/Câmpus de Botucatu

Profª. Drª. SONIA CRISTINA POLTRONIERE SILVA
Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP

Prof.ª Dr.ª MAURA SEIKO TSUTSUI ESPERANCINI
Economia, Sociologia e Tecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomica - UNESP

Botucatu, 02 de julho de 2019

A minha esposa Danielle, aos meus pais, Cleusa e Antônio Fernando, aos meus irmãos, Tânia e Marcelo, ao meu sobrinho, Guilherme Doriguel e, em especial, a minha princesa, Vitória Doriguel, com muito orgulho,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Um dos maiores desafios da minha vida, sinceramente, foi durante o período da minha dissertação, precisando conciliar o trabalho com os estudos, pois em diversos momentos me deparei com a necessidade de me dedicar aos estudos e não tendo aquele tempo necessário, mesmo assim, continuei lutando e, acima de tudo, acreditando em mim mesmo. Diante disso, o autor deseja expressar seus sinceros agradecimentos:

A Deus, por derramar sobre mim, todos os dias, suas bênçãos.

Aos meus pais, Cleusa e Antônio Fernando, pela educação, honestidade e, acima de tudo, exemplos de vida.

À minha esposa Danielle por estar sempre ao meu lado nos bons e também nos momentos difíceis, e por ter me ensinado o significado e sentido do verdadeiro amor.

À Lucas e Miguel crianças que tenho em meu coração e responsabilidade de cuidar por toda minha vida.

À Profª. Drª. Helenice de Oliveira Florentino Silva, pela orientação, ensinamentos, paciência e por acreditar em mim, mesmo sabendo de minhas dificuldades.

À banca de defesa desta dissertação, Profª. Drª. Sônia Cristina Poltroniere Silva e Profª. Drª. Maura S. T. Esperancini pela contribuição valiosa na melhoria deste trabalho.

A todos os funcionários da biblioteca Prof. Paulo de Carvalho Mattos, em especial, Ana Lúcia de Grava Kempinas, Airton Fioravante, Nilson de Carvalho, Valdemir Ramos Domingues e Joel Di Creddo.

Ao amigo “Juninho” por ceder todo suporte necessário durante a coleta de dados e aos funcionários tratoristas dos veículos transbordos durante as conversas informais e ao Sr. Jairo pelo suporte técnico.

Aos meus colegas de trabalho, Cássio A. Vendramini, Ricardo Z. Vendramini, Flávio Henrique dos Santos, Lucas Malagode, Bruno Moraes, Adriana de Lima, que puderam entender os momentos de minha ausência e supri-la com competência e sabedoria.

Aos amigos, que conquistei ao longo dos dois anos na pós-graduação em Biometria e Energia na Agricultura.

“Curiosidade, criatividade, disciplina e especialmente paixão são algumas exigências para o desenvolvimento de um trabalho criterioso, baseado no confronto permanente entre o desejo e a realidade”.

Mirian Goldenberg

RESUMO

A cana-de-açúcar é considerada uma das mais importantes culturas dentro do agronegócio brasileiro, sua utilização é destinada principalmente para produção de açúcar, etanol e bioeletricidade, além de outros importantes produtos. Sob uma ótica econômica, a cultura da cana-de-açúcar, tem relevância na geração de empregos de renda e de divisas para o país produtor. Devido à importância desta cultura, houve uma grande expansão deste setor, tornando o planejamento de processos sucroenergéticos muito complexo. Neste contexto, gestores e pesquisadores dos setores privado e público estão juntando esforços para obter estratégias que facilitem a gestão destas empresas, respeitando os fatores políticos, ambientais, sociais e econômicos. Muitas das vezes, estas estratégias exigem o emprego de técnicas matemáticas e computacionais para subsidiar tomadas de decisão mais assertivas. Assim, o objetivo desse trabalho é propor uma metodologia envolvendo técnicas matemáticas que auxiliem na minimização do tempo de duração da colheita, considerando a otimização do tempo de manobras dos veículos de transbordo na cabeceira do talhão, visto que esta é a operação que mais demanda tempo durante o processo de corte da cana. A metodologia proposta considera duas etapas, em que na primeira é aplicado um modelo matemático para minimização do número de manobras a serem realizadas pelo veículo na área de colheita e na segunda etapa é sugerido um procedimento para realização da manobra, o qual permite que esta seja feita em um tempo inferior à média de tempo gasto fazendo a manobra de forma tradicionalmente utilizada pelas usinas. Com a minimização do tempo de manobra das máquinas agrícolas, este trabalho, consequentemente, contribuirá para a redução do tempo total de colheita, diminuindo a mão de obra envolvida na colheita e transporte da cana, aumentando a qualidade da matéria prima a ser enviada para usina. Com a redução do consumo de combustível, reduz os custos operacionais e impactos ambientais causados pela queima de combustível.

Palavras-chave: Energia. Otimização. Modelos matemáticos. Sistema de colheita. Manobras de máquinas agrícolas.

ABSTRACT

Sugarcane is considered one of the major crops in Brazilian agribusiness as it is utilized mainly for the production of sugar, ethanol and bioelectricity besides other important products. Under an economic perspective, sugarcane cultivation has been relevant to creation of jobs, income, and foreign exchange for the producing country. Due to the importance of this crop, there has been a great expansion of this sector which has resulted in very complex planning of sugar-energy processes. Therefore, managers and researchers from the public and private sectors have been working together in order to develop strategies that make the management of these companies easier while respecting political, environmental, social and economic factors. Mostly, these strategies demand the use of mathematical and computational models to subsidize more assertive decision making. Thus, this study aimed to propose a methodology involving mathematical models that help minimize the harvest time, considering time optimization of transshipment maneuvers at the plot since this is the longest operation in the sugarcane cutting process. The proposed methodology presents two phases: first, a mathematical model is applied to minimize the number of maneuvers to be done by the truck in the harvesting area, and then a maneuver procedure to shorten the average maneuvering time is presented. By minimizing the maneuvering time of agricultural machinery, this study will consequently contribute to the reduction of total worked time, decreasing the involved labor force and sugarcane transport, increasing the quality of the raw material to be shipped to the mill. By reducing fuel consumption, reduces operational costs and environmental impacts caused by fuel consumption.

Keywords: Energy. Optimization. Mathematical models. Harvesting system. Agricultural machinery maneuvers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geometria para o cálculo do giro do veículo agrícola 35

Figura 2 - Tipos comuns de manobras 37

Figura 3 - Percurso de uma manobra longa de um veículo agrícola 38

Figura 4 - Linhas de cana e o grafo correspondente 41

Figura 5 - Parâmetros em cada tipo de manobra de veículos de colheita 44

Figura 6 - Pontos determinantes para a realização de manobra tipo P 46

Figura 7 - Parâmetros da curva tipo Ω 51

Figura 8 - Parâmetros da curva tipo U 52

Figura 9 - Parâmetros da curva tipo T 53

Figura 10 - Parâmetros da curva tipo P 54

Figura 11 - Números de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Otimizado (Passo 1) 60

Figura 12 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Modelo 1 63

Figura 13 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 2 com Curva Ω 63

Figura 14 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 2 com Curva U 64

Figura 15 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 2 com Curva T 64

Figura 16 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 2 com Curva P 65

Figura 17 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 1 + Passo 2 com Curva Ω 68

Figura 18 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 1 + Passo 2 com Curva U 68

Figura 19 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 1 + Passo 2 com Curva T..... 69

Figura 20 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 1 + Passo 2 com Curva P 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos cenários: número de talhões, área total destinada a colheita, número total de linhas que a colhedora deverá percorrer e o tempo total gasto com manobra realizada de forma tradicional 56

Tabela 2 - Números de manobras obtidos de forma tradicional e otimizado 59

Tabela 3 - Tempo de manobras, em segundos, dos veículos agrícolas 61

Tabela 4 - Tempo de manobras em segundos dos veículos agrícolas 66

Tabela 5 - Comparação do percentual de redução do tempo médio de manobras quando utilizados as diferentes metodologias estudadas (T = tradicional, M1 = modelo otimizado, P2 = passo 2, P12 = passo 1 + passo 2).....71

LISTA DE ABREVIATURAS, UNIDADES DE MEDIDA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CTT	Corte, Transbordo e Transporte
FO	Função Objetivo
GLSPSPPL	General Lot-sizing and Scheduling Problem
GLNPSO	Gbest, Lbest and Nbest Social Structures
GPS	Global Positioning System
ha	Hectare
h	hora
ISO	International Organization for Standardization
km	Quilômetro
km^{-1}	Quilômetro por hectare
$km\ l^{-1}$	Quilômetro por mililitro
l	litro
m	metro
MJ	Mega Joule
$MJ\ ha^{-1}$	Mega Joule por hectare
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NL	Número de Linhas
NP-hard	Nondeterministic Polynomial-time hard
PBI	Programação Binária Inteira
PL	Programação Linear
PPL	Problema de Programação Linear
PPLB	Problema de Programação Linear Binário
PPNL	Problema de Programação Não Linear
PPLIM	Problema de Programação Linear Inteira Mista
PPLI	Problema de Programação Linear Inteira
PO	Pesquisa Operacional
s	segundo
t^{-1}	Tonelada por Hectare
$t.h^{-1}$	Tonelada por hora
t	tonelada
VRPTW	Vehicle Routing Problem With Time Window

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO……23

2 REVISÃO DA LITERATURA……26

2.1 SISTEMA DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR……26

2.2 OPERAÇÕES DE CORTE, TRANSBORDO E TRANSPORTE (CTT)……28

2.2.1 CORTE…… 28

2.2.2 TRANSBORDO…… 28

2.2.3 TRANSPORTE…… 29

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA……30

2.4 OTIMIZAÇÃO……31

2.5 A OTIMIZAÇÃO NO PROCESSO DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR……32

2.6 MANOBRA DOS VEÍCULOS AGRÍCOLAS……34

2.7 A OTIMIZAÇÃO APLICADA AO PROCESSO DE MANOBRA DE VEÍCULO AGRÍCOLA……39

2.8 MODELOS MATEMÁTICOS……40

3 MATERIAL E MÉTODOS……48

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO……56

5 CONCLUSÃO……73

REFERÊNCIAS……75

APÊNDICE A……83

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é considerada uma importante cultura em países como: Brasil, Índia, China, Cuba, Tailândia, México, Paquistão, Filipinas, Colômbia e Austrália, como uma das mais importantes culturas utilizada para geração de bioeletricidade e fertilizantes e, em menor escala, etanol de segunda geração e o biogás. Esta cultura é a principal fonte de produção de etanol, etanol celulósico e açúcar. Sob uma ótica econômica, a cultura da cana-de-açúcar, tem relevância na geração de empregos de renda e de divisas para o país produtor.

O Brasil, por sua vez, é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e de acordo com os levantamentos realizados pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2018), a produção de cana-de-açúcar na safra 2017/2018 foi de 633,26 10^6 *t*, com uma área cultivada de cana de 8,73 10^6 *ha*. A produção de açúcar atingiu 37,87 10^6 *t*, enquanto, a produção de etanol foi de 27,76 x 10^9 *l*. O estado de São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar do país, com mais de 52% da área plantada de cana-de-açúcar e com uma taxa de mecanização na colheita de 95,9%.

A produção de cana-de-açúcar cresce anualmente para atender a grande demanda de açúcar e de fontes alternativas de energia do Brasil (TOLMASQUIM, 2012). Por outro lado, está crescente produção tem preocupado órgãos ambientais e governamentais, devido à vasta ocupação de territórios e a redução das culturas alimentícias. Outro fator preocupante é a complexidade dos problemas operacionais e econômicos que as agroindústrias enfrentam durante o gerenciamento destas empresas.

Neste contexto, faz-se necessário um bom planejamento do ciclo operacional gerado nas etapas de plantio e colheita da cana-de-açúcar pois ,destas etapas, dependem a qualidade da cana-de-açúcar entregue às usinas e os fatores econômico e ambiental, sendo estas as etapas de maior custo para a usina e também as de maior consumo de combustível (MAGALHÃES *et al*. 2008; SANTOS *et al*. 2012; CARVALHO *et al*. 2016).

O sistema de colheita da cana-de-açúcar no Brasil passou por uma fase de modificação, principalmente nas etapas de corte e transporte. O corte passou de

manual para mecanizado e o transporte da cana colhida tem sido feito, atualmente, por um conjunto de trator e transbordo, que deposita a cana no caminhão, e realiza o transporte até o centro de processamento para moagem (BELARDO; RIPOLI, 2015). Estas modificações melhoraram o sistema de colheita, mas, por outro lado, aumentaram as preocupações ambientais, econômicas e com as atividades operacionais, devido ao grande número de maquinários utilizados e o alto consumo de combustível, o que gera elevados custos e problemas ambientais, tornando o gerenciamento dos processos mais complexo.

Estudos realizados por Melo e Rosa (2015) abordam os custos de produção agrícola do setor sucroenergético, os quais possuem uma representatividade significativa para o setor, podendo-se chegar até 45% do custo total da cadeia produtiva, com destaque, principalmente, para os custos operacionais agrícolas, sendo a colheita mecanizada representando 44%; o custo do transbordo 22%; enquanto, o transporte representa 33% dos custos operacionais da produção em campo.

Sethanan e Neungmatcha (2016) afirmam que o aumento na eficiência da colheita da cana-de-açúcar depende do bom planejamento nas etapas da colheita mecanizada, como minimizar a distância percorrida durante a colheita e maximizar o rendimento da cana-de-açúcar por hectare (ha^{-1}) colhido, cujos fatores econômicos e ambientais são relevantes para o setor sucroenergético. Por outro lado, essas etapas são difíceis de serem alcançadas, pois são objetivos conflitantes e precisam ser consideradas simultaneamente.

O sistema de colheita de cana-de-açúcar é considerado uma desafiadora operação logística, envolvendo inúmeros trabalhadores diretos e indiretos, dezenas ou até centenas de colhedoras mecanizadas, inúmeros tratores e caminhões (DÍAZ; PÉREZ, 2000). Do ponto de vista econômico, o setor sucroenergético exige alta rentabilidade e demandam um saldo positivo no balanço energético (SPEKKEN *et al*. 2015).

O planejamento de processos no setor sucroenergético é muito complexo. Assim, gestores e pesquisadores dos setores privado e público estão juntando esforços visando o emprego de técnicas matemáticas e computacionais com intuito de subsidiar tomadas de decisões mais assertivas. Com isto, os modelos matemáticos e as técnicas de Pesquisa Operacional têm apresentado relevante

auxílio no gerenciamento do setor (GLEN, 1987; SCARPARI; BEAUCLAIR, 2010; JENA; POGGI, 2013). A otimização de processos no setor sucroenergético tem auxiliado muito nas tomadas de decisões de forma a reduzir custos, reduzir esforços, planejar atividades de forma otimizada, minimizar tempo de trabalho, maximizar lucros, reduzir impactos ambientais, entre outros.

A investigação de processos visando a redução do tempo que as máquinas agrícolas gastam para as atividades produtivas, principalmente os que envolvem as manobras dos maquinários de colheita, têm se tornado foco de muitas pesquisas, pois isto implica diretamente na redução dos custos logísticos, dos impactos ambientais, do tempo de não trabalho e da quantidade de mão de obra. As manobras das máquinas durante a colheita apresentam os mais altos custos econômicos e ambientais devido ao alto consumo de combustível e a demora nesta operação, gerando gastos com horas trabalhadas.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo investigar técnicas matemáticas que auxiliem na minimização do tempo de duração das manobras dos veículos agrícolas na cabeceira do talhão durante a colheita da cana-de-açúcar, visando a melhoria não somente do tempo trabalhado, mas também a redução do consumo de combustível, o que consequentemente gera uma redução de custos desta operação e redução dos impactos ambientais causados pela queima deste. Desta forma, o trabalho contribui para a melhoria da geração de energia renovável a partir da biomassa da cana-de-açúcar e consequentemente contribui com a matriz energética brasileira, gerando energia de forma ambientalmente correta, e para a redução do custo de geração desta, tornando-a mais atrativa.

O trabalho está organizado da seguinte forma, o Capítulo 2 está destinado à revisão de literatura do tema em questão, o Capítulo 3 a discussão do material e método utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, os resultados e discussões destes estão no Capítulo 4. O apêndice A é apresentado ao final, o qual contém o resumo do capítulo do livro que foi publicado durante o período de desenvolvimento desta pós-graduação. Este artigo aborda uma revisão da aplicação dos métodos de otimização no processo de colheita da cana-de-açúcar.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Apresenta-se neste capítulo fatores e conceitos ligados a colheita da cana-de-açúcar, como o sistema de colheita; o subsistema de corte, transbordo e transporte (CTT) do setor sucroenergético; as técnicas de modelagem matemática e otimização aplicadas aos processos envolvidos no CCT, assim como a otimização dos processos envolvidos na manobra de veículos agrícolas, visando a redução de combustível e do tempo de manobra durante a colheita da cana-de-açúcar.

2.1 Sistema de colheita de cana-de-açúcar

O sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar tem destaque, principalmente, devido aos elevados custos operacionais e de combustíveis envolvidos.

Ao longo dos anos, o sistema de colheita de cana-de-açúcar sofreu importantes transformações, que visaram atender a demanda das usinas sucroenergéticas, que por sua vez, atendem à demanda do mercado nacional e internacional.

Segundo Ripoli e Ripoli (2009) o sistema de colheita de cana-de-açúcar pode ser classificado em três subsistemas: colheita manual, semi mecanizado e o automotriz. Para estes autores, no sistema manual todo processo de colheita e carregamento dos caminhões é realizado manualmente; no sistema semi mecanizado a colheita é realizada manualmente e o carregamento dos caminhões conta com a utilização de máquinas, enquanto no sistema mecanizado todo o processo é realizado utilizando maquinários. A escolha do tipo do sistema de colheita a ser utilizado depende de muitos fatores, como disponibilidade de mão de obra, configuração dos talhões, declividade do terreno, disponibilidade de maquinários, legislações trabalhista e ambiental inerentes a colheita da cana, dentre outros fatores.

Segundo Moraes (2007) a colheita manual é considerada o modo mais antigo de corte da cana-de-açúcar. Este corte é realizado com a cana crua ou com a cana queimada, mas o mais comum é a colheita manual da cana queimada, pois este processo apresenta maior rendimento e segurança para os trabalhadores.

Segundo Vieira (2003) um trabalhador rural colhe diariamente em média 3 toneladas de cana crua e 6 toneladas de cana queimada.

Rodrigues e Saab (2007) realizaram uma avaliação técnica econômica comparativa da colheita manual de cana-de-açúcar queimada com a colheita mecanizada, observando que o custo de 1 hectare de área colhida manualmente é 35% maior que a colhida mecanicamente, no entanto, o aproveitamento da cana no corte manual é 35% maior que o mecanizado, pois há uma menor perda de colmos quando o corte é realizado manualmente.

O sistema de colheita semi mecanizado, segundo Ripoli (1996) é realizado em duas etapas fundamentais: primeiro o corte da cana-de-açúcar é realizado manualmente e o carregamento, que é realizado com auxílio de um veículo automotriz, ou seja, parte do processo é manual e parte é realizado de maneira mecanizada. Por haver veículo automotriz no sistema semi mecanizado, Ripoli *et al*. (2007) afirmam que no sistema semi mecanizado o terreno não deve ultrapassar uma declividade de 25%. Neste sistema o rendimento médio por hora de trabalho é de 37 toneladas de cana-de-açúcar (MIALHE, 1996).

Embora os sistemas manual e semi mecanizado promovam maior aproveitamento da cana, a colheita mecanizada é uma tendência irreversível para o setor sucroenergético, devido a fatores econômicos, ambientais e a rapidez do processo (LISBOA *et al*. 2017; SILALERTRUKSA *et al*. 2017). O Protocolo Agroambiental firmado em 2007, visando reduzir os impactos ambientais das queimadas dos resíduos do campo, fez o processo de colheita passar do manual para o mecanizado (VIAN *et al*. 2015). De acordo Higgins *et al*. (2007), no sistema mecanizado é utilizada a colhedora automotriz, e dependendo do comprimento do talhão e topografia do terreno são colhidas aproximadamente 80 toneladas de cana-de-açúcar por hora ($t.h^{-1}$). No somatório de horas em um ano, dependendo das horas trabalhadas, pode obter-se um rendimento no processo de corte entre 50.000 e 150.000 toneladas de cana-de-açúcar.

O funcionamento de uma colhedora automotriz, a qual pode realizar o corte da cana-de-açúcar picada ou cortada logo acima do solo, isto é, deixando o caule inteiro, com colmos entre 0,30 m e 0,35 m (SALASSI E CHAMPAGNE, 1998; VOLPATO *et al*. 2002; SALVI *et al*. 2007). O processo de colheita da cana-de-açúcar picada envolve as operações: corte dos ponteiros, levantamento e alinhamento da base dos colmos, transporte dos colmos com separação dos

resíduos, corte dos colmos em rebolos, ventilação e separação das palhas, transporte dos rebolos através de um elevador, ventilação e separação secundária e descarga a granel da cana-de-açúcar picada no veículo de transbordo (BELARDO *et al*. 2015).

2.2 Operações de corte, transbordo e transporte (CTT)

As operações envolvendo o corte, transbordo e transporte (CTT) da cana-de-açúcar são realizadas utilizando colhedoras automotriz, conjuntos de trator, transbordo e caminhões.

2.2.1 Corte

Atualmente o corte da cana-de-açúcar é basicamente mecanizado e muito se tem discutido a respeito de custos e impacto ambiental devido à queima de combustível dos diversos maquinários, principalmente aos ligados a colheita. Segundo Rosa (2017), à medida que aumenta a velocidade da colhedora, respeitando os seus limites, reduz-se os custos e o número de equipamentos envolvidos no processo.

A colhedora autopropelida realiza 10 etapas até a cana-de-açúcar chegar no veículo transbordo: cortar as pontas; levantar e alinhar a cana; derrubar os colmos; corte basal da cana; levantamento basal; transporte dos colmos com separação dos resíduos; picagem da cana em rebolos; limpeza primária; transporte da cana através de elevador; limpeza secundária e, descarregamento da cana picada no transbordo (BELARDO *et al*. 2015; BELARDO; RIPOLI, 2015). Durante a interação do solo-máquina-planta, no decorrer da colheita mecanizada, ocorrem inúmeras perdas da cana-de-açúcar. Desta forma, causando também quedas na qualidade do canavial bem como na sua longevidade, e o cortador basal da cana, promove muitas perdas ao longo do processo de colheita mecanizada (SALVI *et al.* 2007; REIS *et al.* 2015; VOLTARELLI *et al.* 2015).

2.2.2 Transbordo

O transbordo, composto por um trator e uma carreta, movimenta-se paralelamente a colhedora mecanizada enquanto é realizado o corte da cana-de-

açúcar. Quando lotado, o transbordo desloca-se em meio ao talhão para a transferência (transbordamento) da carga de cana-de-açúcar picada para o caminhão, o qual se encontra localizado fora do talhão (SANTOS, 2011; CERVI *et al*. 2015; ROSA, 2017).

Melo e Rosa (2015) informam que existem diferentes composições de transbordo, de tal forma que este é capaz de transportar, de uma única vez, 8 toneladas de matéria-prima em 3 caixotes. Em outra composição é capaz de transportar 10,5 toneladas em 2 caixotes e 21 toneladas em um único caixote.

Silva *et al*. (2006) estudaram o número necessário de veículo transbordo em função do número de colhedoras de cana picada, sendo que a cada duas colhedoras há uma necessidade de 6 a 8 transbordos.

Milan e Rosa (2015) observaram que os veículos de transbordos utilizado na colheita mecanizada da cana-de-açúcar apresenta uma depreciação maior que os outros veículos, ou seja, quando há uma previsão de 10 anos para haver depreciação, o veículo de transbordo deprecia em 7,07 anos.

2.2.3 Transporte

O transporte da cana-de-açúcar no Brasil é, predominantemente, realizado pela malha rodoviária e por corredor, com mais de 95% neste tipo de transporte. Há também, em menor escala, outros tipos de transporte, como o hidroviário e o ferroviário (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

A cana é transportada da unidade agrícola para a unidade industrial por caminhões, “*truck*”, Romeu e Julieta, Treminhão e Rodotrem, com capacidades de 8 até 74 *t*, dependendo da distância e da malha rodoviária (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

As composições de transporte da cana-de-açúcar mais comumente utilizadas, entre a unidade agrícola e a unidade industrial, são classificadas por Silva (2006) como: caminhão plataforma “*truck”* com capacidade de carga é de até 23 *t* (toneladas); caminhão plataforma com um reboque acoplado “Romeu e Julieta”, com capacidade de carga de até 36 *t*; caminhão plataforma com dois reboques acoplados “treminhão” com capacidade de até 53 *t* e, cavalo mecânico com dois semi-reboques acoplados “rodotrem” podendo-se chegar a 74 *t*.

A agilidade dos veículos para transporte da cana-de-açúcar entre o campo e a usina é fundamental para garantir a qualidade da cana. A sequência de operações para este transporte é a seguinte: chegada do caminhão ao campo trazendo carreta vazia; o caminhão espera em fila para liberação da carga; há o carregamento; o caminhão retorna à usina. Quando chega a usina, há a pesagem do caminhão carregado; faz-se coleta de amostras para analisar a qualidade da cana; descarrega-se a carga; pesa-se a composição vazia e a composição volta ao campo para iniciar uma nova viagem (HAHN, 1994).

Ao analisar o comportamento operacional, econômico e energético do transporte da cana-de-açúcar, Carreira (2010) concluiu que a carga líquida influencia diretamente nos custos do transporte, sendo para uma carga líquida de 48 *t* o custo é de US$0.0406 km^{-1} e para 83 *t* o custo é de US$0.2358 km^{-1}. Além da carga líquida, o combustível tem impacto direto nos custos, para uma carga constante de 66,5 *t* e um consumo de 0,77 $km\ l^{-1}$, o custo é de US$0.3305 km^{-1}. Já no consumo de 1,18 $km\ l^{-1}$ o custo é de US$0.2837 km^{-1}.

2.3 Modelagem matemática

Segundo Biembengut (2009), a modelagem matemática é um processo para descrição, formulação matemática e resolução de problemas reais de uma área do conhecimento. De acordo com Resende e Corrêa (2007) a modelagem matemática visa a elaboração de um modelo que descreva e explique uma situação real com delimitações associadas ao problema real (CIFUENTES; NEGRELLI, 2012). Baptistelli (2008) afirma que para a modelagem matemática, muitas vezes é necessário fazer simplificações ligadas ao problema real para permitir a resolução do modelo formulado, ou seja, é necessário desconsiderar alguns termos e formular hipóteses que simplificam este modelo.

Portanto, a escolha de modelos e hipóteses é fundamental para a representatividade do problema real e para a qualidade dos resultados a serem obtidos. Neste contexto, o processo de modelagem deve considerar os passos de inicialização, coleta de dados, calibração e validação do modelo matemático (ALMEIDA; PALHARINI, 2012).

Muitos modelos são destinados ao auxílio nas tomadas de decisão da melhor forma possível, os quais são chamados modelos de otimização.

2.4 Otimização

Problema de Otimização é o nome dado ao modelo matemático elaborado com o intuito de gerar uma solução ótima para um determinado problema real por meio da minimização (de custos, de erros...) ou maximização (de lucro, receita, aplicação financeira...) de uma função (função objetivo) de várias variáveis $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ com valores em uma determinada região multidimensional (conjunto de restrições ou região de busca de solução), assim, auxiliando à tomada de decisão (MURTY, 1985; EIRAS; ANDRADE, 1995; MARTÍNEZ; SANTOS, 1995; DANTZIG; THAPA, 2006).

Um problema geral de otimização é representado pelo modelo matemático (1) a seguir:

$$\begin{gathered} Minimizar\ f(x) \\ s.a. \\ g(x) \leq 0\ ou \geq 0\ ou = 0 \\ x \in R^{n} \end{gathered} \tag{1}$$

Em que, f é a função objetivo $f: R^n \to R$, as restrições $g: R^n \to R^p$ determinam a região de busca de solução, denominada por região factível, e $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ é o vetor das variáveis de decisão.

Se $f(x)$ e $g(x)$ forem lineares, tal que $x = (x_1, x_2, \dots, x_n), x_i \in R, i = 1, \dots, n$ tem-se um problema de programação linear (PPL).

Se $f(x)$ e $g(x)$ forem lineares, de tal forma que $x = (x_1, x_2, \dots, x_n), x_i$ seja inteiro para todo $i \in \{1,2, \dots, n\}$ tem-se um problema de programação linear inteira (PPLI).

Se $f(x)$ ou $g(x)$ forem não lineares, tem-se um problema de programação não linear (PPNL).

Um problema de programação linear inteira mista (PPLIM) ocorre quando $f(x)$ e $g(x)$ são lineares e pelo menos um dos x_i são inteiros, $i = 1, \dots, n$.

Para um problema de programação linear binário (PPLB) é que x_j pertence ao conjunto $\{0,1\}$, para $j = 1 \dots n$.

Segundo Chwif e Medina (2015), as técnicas para resolução dos modelos de otimização dependem das características das equações envolvidas, se a função objetivo e as restrições forem formadas por expressões matemáticas lineares, resolve-se o problema com técnicas de Programação Linear (PL), como exemplos o método Simplex e o método de Pontos Interiores; caso este tenha variáveis restritas a serem valores inteiros resolve-se o problema com técnicas de Programação Linear Inteira (PLI) e pode-se aplicar, por exemplo, a técnica *branch-and-bound*; sendo não linear (PNL), aplica-se técnicas de programação não linear apropriadas. Estas e outras técnicas podem ser vistas em literaturas clássicas de otimização (DANTZIG, THAPA, 2006; HILLIER; LIEBERMAN, 2013; ARENALES *et al*. 2015; DANTZIG, 2016).

A modelagem de otimização pode ser aplicada a diversos problemas na área agrária e em específico no planejamento otimizado da colheita da cana-de-açúcar, como discutido no item a seguir.

2.5 A otimização no processo de colheita da cana-de-açúcar

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar, o transbordo e o carregamento do caminhão são atividades desafiadoras e complexas, necessitando de técnicas matemáticas e computacionais para auxiliarem nas tomadas de decisões. Díaz e Pérez (2000) propuseram um estudo de simulação computacional visando otimizar o processo de colheita e o transporte da cana-de-açúcar. Os resultados alcançados contribuíram para um melhor desenvolvimento e planejamento do processo de colheita de cana-de-açúcar.

Sethanan *et al.* (2013) propuseram um modelo matemático para otimização da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, com o objetivo de maximizar o rendimento do percentual de açúcar da cana. Para resolução do modelo foram utilizadas duas heurísticas, um algoritmo visando o agendamento da colheita mecanizada e a outra otimizando a solução deste algoritmo utilizando uma *Busca Tabu*. Os resultados apontaram uma melhoria de 16,38% na produção de açúcar.

Vorasayan e Pathumnakul (2014) propuseram modelos matemáticos para otimização do sistema logístico para colheita e recepção da cana-de-açúcar em uma usina na Tailândia. O modelo permitiu determinar um número ótimo de caminhões por colhedora, minimizando o custo total da colheita.

Neungmatcha e Sethanan (2015) estudaram Técnicas de Pesquisa Operacional envolvendo a logística agrícola na colheita mecanizada da cana-de-açúcar, visando planejar a rota de operação da colheita mecanizada. Para isto foi utilizada a Programação Inteira Mista. Os resultados apontaram uma redução dos custos em todo sistema, impactando diretamente na colheita mecanizada e no transporte da cana-de-açúcar.

Em alguns países (Brasil, Índia, China, Cuba, Tailândia e Austrália dentre outro), a escala de produção da cana-de-açúcar tem passado por expansões e, por conta disso, tornando-se cada vez mais desafiador para os gestores agrícolas. Nesta linha de raciocínio, Kittilertpaisan e Pathumnakul (2015) formularam modelos matemáticos para otimização do roteamento dos veículos com 18 cenários possíveis, cada cenário era composto de 15 talhões e 20 períodos da colheita de cana-de-açúcar. Foram obtidas melhor sequência de colheita mecanizada, melhor rota dos veículos, além de determinar o melhor momento para realizar a colheita.

A colheita e transporte da cana-de-açúcar podem afetar diretamente o fornecimento de matérias-primas a unidade industrial. Dessa forma, estas operações devem ser o mais regular possível, evitando interrupções no suprimento da cana-de-açúcar. Neste contexto, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos no intuito de auxiliar o planejamento otimizado da colheita e transporte da cana.

Junqueira e Morabito (2017) propuseram um modelo matemático para minimizar a mudança de frentes de colheita e obter maior equilíbrio na capacidade de colheita e transporte da cana, visando apoiar principalmente as decisões de quantidade de colhedoras e de quantidade de tratores de transbordo usados por safra. O modelo proposto para apoiar estas decisões de colheita, plantio e reforma dos talhões foi baseado em um Problema Geral de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes – GLSPPL (*General Lot-sizing and Scheduling Problem*). A metodologia proposta por estes autores permite obter planejamentos que reduzem os custos da colheita e do transporte, bem como, um retorno satisfatório com potencial das colhedoras automotriz e veículos de transbordo durante a safra.

Florentino *et al*. (2018) desenvolveram um modelo matemático de otimização para auxiliar o planejamento da colheita da cana-de-açúcar e a

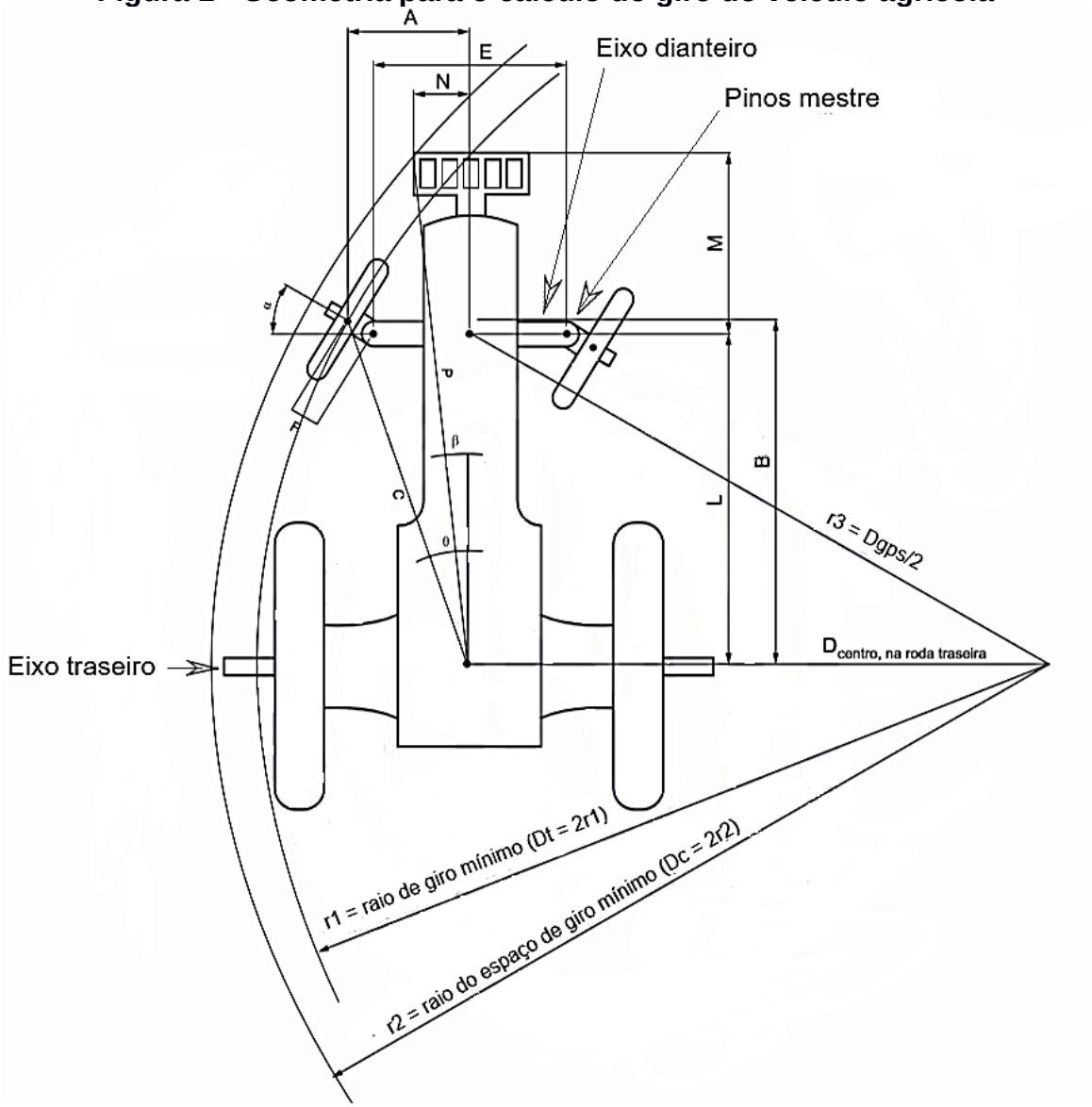
melhorar a qualidade da matéria-prima, tendo como restrições a demanda de açúcar e a capacidade operacional da usina, dentre outras. Foi proposto também um Algoritmo Genético para resolver o modelo proposto. Os resultados encontrados mostraram que esta metodologia tem um grande potencial para auxiliar a determinação de planejamentos otimizados da colheita da cana.

Os processos de otimização do planejamento da colheita mecanizada devem considerar todos os possíveis fatores ligados a qualidade do processo de corte da cana, como o tempo de manobra dos veículos agrícolas, consumo de combustível e o espaço de giro durante a manobra dos veículos ligados a colheita da cana.

2.6 Manobra dos veículos agrícolas

Os veículos agrícolas em determinado momento realizam manobras, principalmente, na cabeceira do talhão e/ou nos corredores. As manobras demandam tempo, espaços de giro de veículos no campo e, consequentemente, grande consumo de combustível. Segundo Mialhe (1996), o veículo agrícola atenderá melhor a necessidade do usuário se o raio e o espaço de giro deste veículo for o menor possível, permitindo maior facilidade em manobras nas cabeceiras do talhão e estradas em geral, além de uma menor incidência de pisoteio na cana-de-açúcar por parte dos veículos agrícolas e um menor tempo de duração deste processo, o que acarreta em um menor custo econômico e ambiental. Neste contexto, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2016) e ABNT NBR ISO 789-3:2016, preconizam que o diâmetro de giro, ilustrado na Figura 1, deve ser o menor possível.

Figura 1 - Geometria para o cálculo do giro do veículo agrícola



Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR ISO 789-3:2016.

Para obter o diâmetro do espaço de giro do veículo agrícola, algumas equações formuladas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2016), são apresentadas.

Observando-se a Figura 1 tem-se:

- A distância do centro do eixo traseiro ao ponto de contato pneu-solo da roda mais externa no eixo dianteiro, C, pode ser calculada pela Equação 2.

$$C = \sqrt{\left(\frac{E}{2} + Fcos\alpha\right)^2 + (L + Fsen\alpha)^2} \quad (2)$$

O valor de C representa a distância do centro do eixo traseiro ao ponto de contato pneu-solo da roda mais externa no eixo dianteiro. E é a distância entre os centros dos pinos-mestre à direita e à esquerda; F é a distância entre o centro do pino-mestre (projetado no solo) e o centro da área de contato pneu-solo da roda mais externa no eixo dianteiro; L é a distância entre os eixos dianteiro e traseiro, α é o ângulo de esterçamento da roda dianteira mais externa, quando mantida a direção travada à direita (ou à esquerda).

- O ângulo θ pode ser calculado pela Equação 3.

$$\theta = \left(arctg \left(\frac{\left(\frac{E}{2} + Fcos\alpha\right)}{(L + Fsen\alpha)} \right) \right) \quad (3)$$

Em que θ é o ângulo de esterçamento da roda dianteira mais externa do veículo, medido entre a linha de centro longitudinal do veículo e a linha que liga o centro do eixo traseiro (projetado no solo) ao centro da área de contato pneu-solo da roda mais externa, quando mantida a direção travada à direita (ou à esquerda).

- O diâmetro de giro mínimo do veículo (Dt) pode ser calculado pela Equação 4, a seguir.

$$Dt = 2\sqrt{\left(\left(\frac{Dgps}{2}\right)^2 - L^2\right) + C^2 - 2\left(\sqrt{\left(\frac{Dgps}{2}\right)^2 - L^2}\right) Ccos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)} \quad (4)$$

Em que Dt é o diâmetro de giro mínimo realizado pelo veículo, o qual tem como ponto de referência o eixo traseiro da roda do veículo e $Dgps$ é o diâmetro

de giro (estando na posição de localização da antena GPS) localizado no centro do eixo dianteiro, e como ponto de referência o eixo traseiro do veículo.

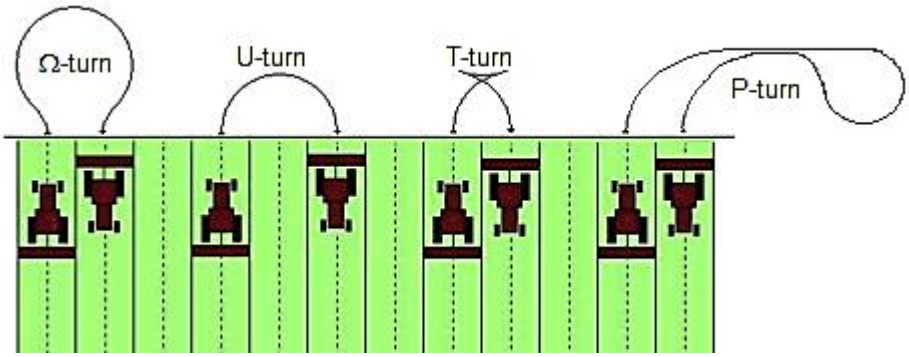
- O diâmetro do espaço de giro mínimo do veículo (Dc) é calculado pela Equação 5, como apresentada, a seguir.

$$Dc = 2\sqrt{\left(\left(\frac{Dgps}{2}\right)^2 - L^2\right) + (L+M)^2 + N^2 - 2\sqrt{\left(\frac{Dgps}{2}\right)^2 - L^2}\sqrt{(L+M)^2+N^2}\cos\left(\frac{\pi}{2} + arctg\left(\frac{N}{(L+M)}\right)\right)} \quad (5)$$

Em que Dc é o diâmetro do espaço de giro mínimo realizado pelo veículo tendo como ponto de referência o centro do eixo traseiro, M é a distância entre o centro do eixo dianteiro e o ponto mais externo na circunferência de giro Dc, N é a distância entre a linha de centro longitudinal do trator e o ponto mais externo na circunferência de giro Dc.

Quanto a forma de execução das manobras, Spekken *et al.* (2015), classificam estas formas como curva Ω (Ω-*turn*), curva U (U-*turn*), curva T (T-*turn*) e curva P (P-*turn*), conforme a Figura 2, a seguir.

Figura 2 - Tipos comuns de manobras



Fonte: Adaptado de Spekken *et al.* 2015.

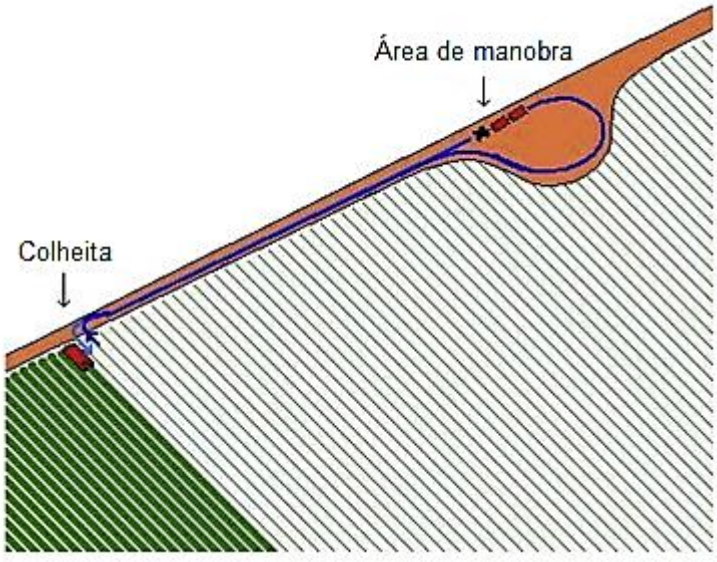
As manobras com curvas Ω são mais rápidas e o maquinário retorna para uma linha adjacente, mas exige mais espaço, pois necessita de cabeceiras mais largas para manobras.

As manobras com curvas U são rápidas e exigem menos espaço; estas são viáveis quando a largura do implemento é maior que o diâmetro do círculo de giro ou quando as linhas são saltadas.

As curvas na forma T são mais comumente vistas em operações de cana-de-açúcar devido a sua baixa demanda por espaço de manobra para alcançar uma pista adjacente.

A manobra na forma P é mais elaborada, a máquina percorre uma certa distância para alcançar um espaço dedicado à manobra, para girar e retornar paralelamente à colhedora mecanizada, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Percurso de uma manobra longa de um veículo agrícola



Fonte: Adaptado de Spekken *et al*. 2015.

Orsolini (2002), ao analisar o desempenho operacional e econômico de uma cortadora-amontoadora para cana-de-açúcar, observou que o veículo agrícola obteve um raio de giro de 5,37*m* e um espaçamento para o giro no campo de 7,36*m*, e ao realizar o giro à esquerda do veículo o raio foi um pouco maior do que o giro à direta, com 5,57*m,* e o espaçamento 7,36*m*. Com estas observações, o autor constatou que o espaço de giro é maior do que o raio de giro do veículo agrícola e que isto apresenta dificuldades durante a manobra. Em razão disso, cabe ao tomador de decisão da empresa agrícola um maior detalhamento durante o planejamento do talhão, bem como dimensionamento dos corredores.

O processo de otimização do planejamento da colheita mecanizada é muito complexo, pois considera os fatores ligados a qualidade do corte da cana como, por exemplo, o tempo, o consumo de combustível e o espaço de giro durante a manobra dos veículos ligados a colheita da cana, dentre outros. Muitas vezes, as tomadas de decisões nesta área podem ser auxiliadas por modelos matemáticos de otimização. No item a seguir são discutidos modelos de otimização que podem auxiliar o processo de manobra de veículos de colheita.

2.7 A otimização aplicada ao processo de manobra de veículo agrícola

Bochtis e Vougioukas (2008) estudaram a redução da distância percorrida pelo veículo agrícola na cabeceira do talhão, utilizando um algoritmo para computar a sequência das linhas paralelas percorridas por equipamento agrícola, o qual visa minimizar o tempo percorrido por cada veículo. Para encontrar uma solução ótima foi desenvolvido e resolvido um modelo de programação inteira binária. Os resultados desta pesquisa mostram que é possível obter-se uma redução de até 50% de horas de manobras dos veículos agrícolas, resultando em um menor consumo de combustível e, consequentemente, redução do custo e do tempo não produtivo dos veículos envolvido no sistema de colheita.

Bochtis e Sorense (2010), propuseram otimizar a logística de campo, apresentando um modelo de otimização combinatória para o roteamento de veículos com janela de tempo (*Vehicle Routing Problem With Time Windows* - VRPTW). Os resultados foram bastante relevantes para as questões gerenciais.

O tempo não produtivo das máquinas agrícolas durante o plantio e a colheita tem sido um desafio para os gestores. Spekken e Bruin (2013) determinaram um roteamento ótimo em campos agrícolas, minimizando as manobras e o tempo de manutenção. Foi proposto um algoritmo computacional para otimizar a rota nos campos em diferentes situações. Os resultados mostraram uma redução no tempo de operação agrícola em até 50%.

Spekken *et al*. (2015) analisaram os impactos que os veículos agrícolas causam durante o processo produtivo, levando em considerações os impactos operacionais, econômicos e ambientais. Para isto, foram analisados o consumo de combustível, o tempo de manobra, os espaçamentos de manobras, largura dos

corredores e organização dos transportes. Os autores obtiveram uma economia de US$4,15 ha^{-1}.

Santoro *et al*. (2017) propuseram um modelo matemático de programação inteira visando determinar um planejamento de rotas de colhedoras para minimizar o tempo de manobras realizadas pelas colhedoras mecanizadas. Ao comparar os tempos de manobra das colhedoras e os tempos de manobras geradas a partir do modelo matemático de otimização, observou-se uma redução de 46% no tempo de manobra otimizado, tendo impacto positivo direto na redução do consumo de combustível.

Vianna *et al*. (2018) desenvolveram um modelo matemático para alocação dos talhões em parcelas retangulares na área de plantio de forma a reduzir o número de manobras dos veículos agrícolas. A metodologia proposta é uma ferramenta para auxiliar a renovação dos canaviais em talhões que facilitam a colheita mecanizada e a diminuição do número de manobras das colhedoras.

A seguir são apresentados modelos matemáticos para otimização do número de manobras de máquinas agrícolas na colheita da cana-de-açúcar.

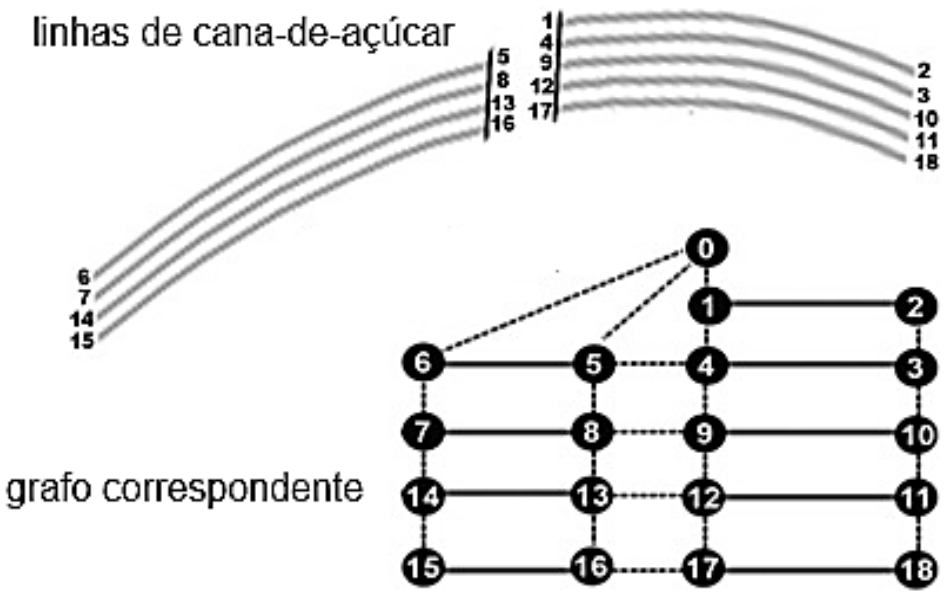
2.8 Modelos matemáticos

Esta seção destina-se a apresentar e discutir dois modelos matemáticos desenvolvidos para auxiliar no processo de colheita mecanizada no setor sucroenergético, mais precisamente nas manobras dos veículos agrícolas envolvidos durante o processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

- Modelo 1:

Santoro *et al*. (2017) propuseram um modelo de otimização visando minimizar o tempo de manobra da colhedora e, consequentemente, reduzir os custos com combustível e mão-de-obra. Para formulação deste modelo, os autores consideraram a estrutura do talhão como um grafo não orientado, em que cada linha de cana-de-açúcar corresponde a uma aresta limitada por dois nós do grafo (cada nó representa o início e o fim de uma linha de cana-de-açúcar), conforme ilustrado na Figura 4, a seguir.

Figura 4 - Linhas de cana e o grafo correspondente



Fonte: Adaptado de Santoro *et al*. (2017).

As arestas do grafo têm custos associados ao tempo das manobras. Desse modo, o problema é comparado ao Problema do Carteiro Rural (LENSTRA; KAN, 1981; CHRISTOFIDES *et al*. 1984; CORBERÁN; SANCHIS, 1994; GROVES; VAN VUUREN, 2005). Dado o grafo $G = (V, A)$, em que $V = \{v1, v2, \dots, vn\}$ corresponde a um conjunto de nós, enquanto $A = \{(i, j), i \neq j\}$ denota o conjunto de arestas entre os nós e $Ar \subset A$ é um subconjunto de arestas obrigatórias.

Portanto, o problema consiste em determinar um caminho fechado de custo mínimo, que começa em um nó de origem e passa em cada Ar uma única vez. As arestas obrigatórias Ar correspondem às linhas de cana-de-açúcar (SANTORO *et al.* 2017). Tal problema foi modelado como segue:

Parâmetros do modelo:

A: conjunto de arestas do grafo;

Ar: conjunto de arestas obrigatórias;

t_{ij}: tempo para manobras da máquina de colheita associada a aresta $(i, j) \in A$.

Variáveis de decisão

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & se\ a\ aresta\ (i,j)\ é\ percorrida\ pela\ máquina\ de\ colheita \\ 0, & em\ \ caso\ \ contrário \end{cases}$$

O modelo matemático é definido como:

$$Min \sum_{(i,j)\in A} t_{ij} x_{ij} + t_{ji}\, x_{ji} \tag{6}$$

sujeito a:

$$\sum_{\{j:(i,j)\in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i)\in A\}} x_{ji} = 0, \qquad i = 1,2,\dots,n \tag{7}$$

$$x_{ij} + x_{ji} = 1, \qquad para\ todo\ \ (i,j) \in A_r, \tag{8}$$

$$\sum_{(i\in S)} \sum_{(j\in S)} x_{ij} \leq |S| - 1, \qquad S \subset \{v_1, v_2, \dots, v_n\}\ e\ S \neq \emptyset \tag{9}$$

$$\sum_{(o,j)\in A} X_{oj} \geq 1 \tag{10}$$

$$\sum_{(i,o)\in A} X_{io} \geq 1 \tag{11}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \qquad para\ todo\ (i,j) \in A \tag{12}$$

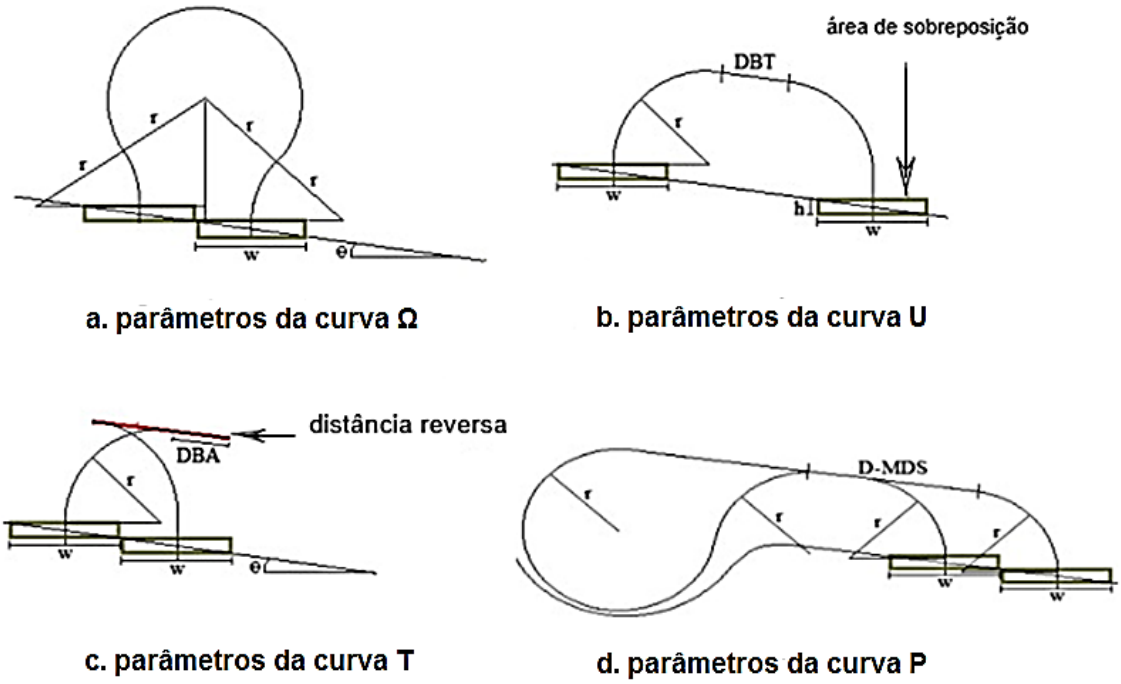
O modelo matemático desenvolvido por Santoro *et al*. (2017) visa a otimização do tempo de manobras da máquina agrícola. A variável de decisão X_{ij} é igual a 1 se a máquina percorre a aresta (i,j), e 0 em caso contrário. A Função Objetivo (6) está relacionada a minimização do tempo das manobras. Enquanto as restrições (7) garantem a continuidade das rotas. As restrições (8) garantem que todas as linhas de cana sejam colhidas. A restrição (9) impede a construção de sub-rotas desconectadas. As restrições descritas nas Equações (10) e (11) garantem o ponto de partida, bem como o local de chegada. Em (12) tem-se o domínio das variáveis de decisão.

- Modelo 2:

Spekken *et al.* (2015) desenvolveram modelos matemáticos para o estudo de distâncias percorridas e o tempo durante os diferentes tipos de manobras dos veículos agrícolas envolvidos no processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Com o auxílio dos modelos matemáticos foram calculados o número de voltas e o tempo envolvido no processo de manobra.

Para a modelagem matemática das manobras, os autores fundamentaram os estudos nos tipos de manobras realizadas na cabeceira do talhão, nas formas T, P, U e Ω, conforme ilustrado na Figura 5. A curva T é conhecida como curva reversa, devido o procedimento utilizado durante o processo de manobra, Figura 5c; na curva P a máquina agrícola percorre um caminho até alcançar um espaço para a manobra (similar a forma da letra P), Figura 5d; a forma U é uma curva rápida, exigindo menos espaço para a realização da manobra, Figura 5b; a curva em Ω é a mais rápida e tem o retorno na linha paralela à cana colhida, Figura 5a. Estas formas foram escolhidas por serem exigentes em tempo, a qual depende da geometria da manobra e também da habilidade do operador. Os principais parâmetros na geometria das manobras são: a largura da operação (w), o raio de giro (r) e o ângulo no qual a máquina se dirige para uma borda de campo perpendicular (θ), conforme são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Parâmetros em cada tipo de manobra de veículos de colheita



a. parâmetros da curva Ω

b. parâmetros da curva U

c. parâmetros da curva T

d. parâmetros da curva P

Fonte: Adaptado de Spekken *et al*. 2015.

Conforme ilustrado na Figura 5, o ângulo θ pode variar ao longo do percurso entre um campo e outro. As estradas de cana-de-açúcar muitas vezes são projetadas quase em ângulo reto com as linhas da cana-de-açúcar plantada. Spekken *et al*. (2015) supõem um valor padrão para o ângulo, o qual é $\theta = 10°$. O comprimento h pode ser obtido pela Equação (13), a seguir.

$$h = \frac{w}{tg(90 - \theta)} \tag{13}$$

Em que h é o comprimento da área de sobreposição da linha de cana-de-açúcar em relação à estrada.

Spekken *et al*. (2015) afirma que é importante que haja um tipo de percurso eficiente para o veículo agrícola enquanto realiza uma manobra de cabeceira do talhão completa. O espaço necessário para a manobra e o tempo percorrido pelo veículo agrícola até atingir a linha adjacente à linha que será realizada a colheita de cana é denotado por ΩMS e ΩMT, respectivamente. Tais parâmetros podem ser calculados pelas Equações (14) e (15), a seguir.

$$\Omega MS = r + cos(\theta)\left\{sen\left[arccos\left(\frac{r+\frac{w}{2+tg(\theta)h}}{2r}\right)\right]2r + tg^2(\theta)h\right\} + \frac{w}{2} \quad (14)$$

$$\Omega MT = \frac{r}{fv}\left\{2\left[arccos\left(\frac{r+\frac{w}{2}+tg(\theta)h}{2r}\right) + arccos\left(\frac{r+\frac{w}{2}-tg(\theta)h}{2r}\right)\right] + \pi\right\} \quad (15)$$

Em que ΩMS é o espaço necessário quando um veículo agrícola está realizando uma manobra de cabeceira, ΩMT é o tempo da realização do percurso para manobrar o veículo agrícola, fv é a velocidade (ms^{-1}) do veículo enquanto realiza uma manobra no corredor ou na cabeceira do talhão.

Para o tipo de manobra U, o espaço percorrido para a realização de manobras de corredores e nas cabeceiras dos talhões é denotado pela Equação 16. É o tempo de percurso da manobra do tipo U é apresentado conforme a Equação 17, a seguir.

$$UMS = r(sen(\theta) + 1)r + \frac{w}{2} \quad (16)$$

$$UMT = \frac{\left(\pi r + DBT + 2rtg(\theta)\right)}{fv} \quad (17)$$

Em que UMS é o espaço percorrido pelo veículo agrícola até atingir a linha adjacente à linha já colhida, UMT é o tempo gasto pelo veículo agrícola enquanto é realizada a manobra do tipo U, DBT é à distância em que o veículo agrícola fará a manobra reversa na cabeceira do talhão, de acordo com a Figura 5c.

A Equação 18 é utilizada para o cálculo da distância que será necessária percorrer pelo veículo agrícola quando for realizar uma manobra de cabeceira do tipo T, e o tempo do percurso é denotado pelas equações a seguir: 19, 20 e 21.

$$TMS = r(sen(\theta) + 1)r + \frac{w}{2} \quad (18)$$

$$TMT = \frac{Comp.doVeículo}{fv} + \frac{Dist.Reversa}{rv} + 2(tempo\ de\ parada) \quad (19)$$

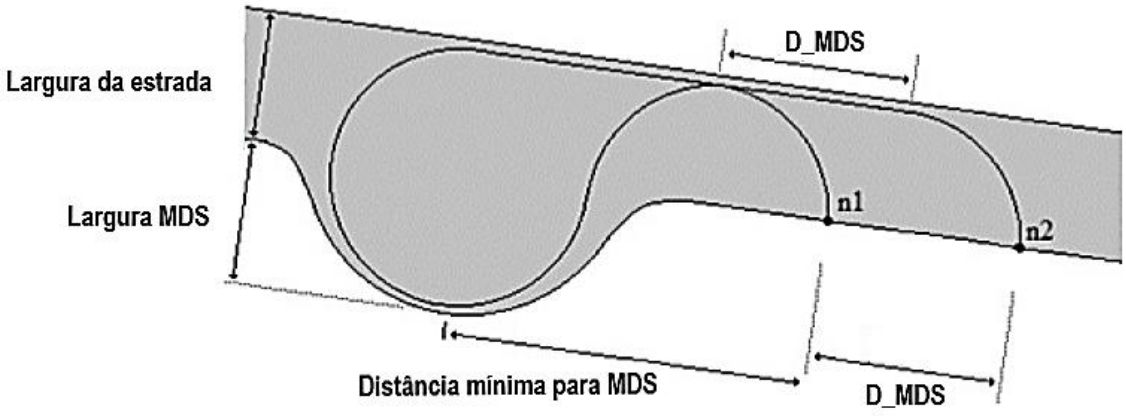
$$Comprimento\ do\ Veículo = \pi r + tg(\theta) + DBA \quad (20)$$

$$Distância\ Reversa = DBA + 2(r - w) \quad (21)$$

Em que TMS é o espaço mínimo percorrido pelo veículo agrícola ao realizar a manobra do tipo T, TMT é o tempo necessário para realizar a manobra do tipo T, rv é a velocidade do veículo agrícola enquanto está realizando a marcha ré, e DBA é o comprimento do implemento agrícola até o centro do eixo dianteiro do veículo agrícola.

Além dos três tipos de manobras apresentados anteriormente, U, T e Ω. Na Figura 6, são ilustrados os parâmetros considerados determinantes para a realização das manobras de cabeceira para veículos agrícolas, os quais são: a largura da estrada, a largura MDS (largura máxima da estrada necessária para se realizar a manobra do tipo P), a distância mínima para a realização da manobra tipo P e a distância entre o nó 1 e o nó 2. Também é ilustrado o valor de D_{MDS}, o qual representa o comprimento do veículo agrícola.

Figura 6 - Pontos determinantes para a realização de manobra tipo P



Fonte: Adaptado de Spekken *et al*. 2015.

Para se realizar a manobra do tipo P são necessários alguns parâmetros, ilustrados na Figura 6. Para obter-se a largura da estrada é necessário o auxílio da Equação 22, para obtenção da largura MDS se faz necessário o auxílio da Equação 23. E na distância mínima MDS pode ser determinada pela Equação 24, a seguir.

$$Largura\ da\ estrada = r - rsen(\theta) + \frac{w}{2} \tag{22}$$

$$MDS = 2r + w - largura\ da\ estrada \tag{23}$$

$$Distância\ mínima\ para\ MDS = 2r + cos(\theta)r \tag{24}$$

Para se realizar o cálculo do tempo de percurso de um veículo agrícola enquanto é realizada a manobra do tipo P na cabeceira ou no corredor do talhão é dada pela Equação 25, a seguir.

$$PMT = \frac{2r\left(\frac{3\pi}{2} - \theta\right)}{fv_1} + \frac{2(r + D_{MDS}) - w}{fv_2} \tag{25}$$

Em que PMT é considerado o tempo em que o veículo agrícola percorre para realizar a manobra do tipo P, fv_1 é considerada em velocidade do veículo agrícola mais lenta, e fv_2 considera-se uma velocidade mais rápida do veículo agrícola.

As Equações (6)-(25) apresentadas anteriormente têm como propósito auxiliar na determinação do número de manobras bem como empregar o menor tempo de manobras realizando a escolha do tipo de manobra mais adequada para o veículo agrícola enquanto é realizado o processo de colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O objetivo deste trabalho é investigar técnicas matemáticas que auxiliem na minimização do tempo de manobras dos veículos agrícolas na cabeceira ou corredores do talhão durante a colheita da cana-de-açúcar. Para isto, foi proposta uma metodologia utilizando dois passos. No primeiro passo, aplica-se um modelo matemático de otimização visando a minimização do número de manobras a serem realizadas pelo veículo na área de colheita. No segundo passo é aplicado um procedimento para realização da manobra em um tempo menor do que o tempo tradicionalmente realizado nas usinas. A seguir descreve-se cada um destes passos.

Passo 1: aplicação de um modelo matemático para redução do número de manobras a serem realizadas pelos veículos agrícolas na área de colheita.

Como descrito anteriormente, Santoro *et al*. (2017) propuseram um modelo visando minimizar o tempo de manobras do veículo agrícola. Baseado neste trabalho, propõe-se aqui um modelo para determinar o número mínimo de manobras do veículo agrícola, adaptando-se a função objetivo. Para esta modelagem, baseada em Santoro *et al*. (2017), constrói-se um grafo representativo dos talhões contendo a cana a ser colhida, em que as arestas representam as estradas presentes no talhão e os nós representam os possíveis pontos para manobra. O modelo visa determinar um caminho para o veículo de colheita que passe por todas as estradas entre as linhas de cana e faça o mínimo número possível de manobras. O modelo proposto está apresentado em (26)-(32).

Para apresentação do modelo considere o Grafo $G = \left(n, (i,j)\right)$ gerado a partir dos talhões contendo a cana a ser colhida, em que n é o número de possíveis pontos para manobra (nós) e (i,j) são as estradas (arestas) que ligam os nós i aos nós j, $i = 1, \dots, n,\ j = 1, \dots, n$. Sendo x_{ij} as variáveis de decisão, $i = 1, \dots, n,\ j = 1, \dots, n,\ i \neq j$, em que $x_{ij} = 1$ se a aresta (i,j) é percorrida pelo veículo agrícola, ou $x_{ij} = 0$ em caso contrário, tem-se o modelo:

$$Min \sum_{(i,j)\in A} x_{ij} + x_{ji} \quad (26)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\{j:(i,j)\in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i)\in A\}} x_{ji} = 0, i = 1,2,\dots,n; \quad (27)$$

$$x_{ij} + x_{ji} = 1, \qquad para\ todo\ (i,j) \in A_r, \quad (28)$$

$$\sum_{(i\in S)} \sum_{(j\in S)} x_{ij} \leq |S| - 1, para\ S \subset v_1, v_2, \dots, v_n\ e\ S \neq \emptyset \quad (29)$$

$$\sum_{(o,j)\in A} x_{oj} \geq 1 \quad (30)$$

$$\sum_{(i,o)\in A} x_{io} \geq 1 \quad (31)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \qquad para\ todo\ (i,j) \in A \quad (32)$$

A função objetivo (26) tem como propósito a minimização do número de manobras dos veículos agrícolas para a colheita da cana.

As restrições (27) garantem a continuidade do percurso percorrido pelo veículo agrícola durante a colheita mecanizada; as restrições (28) têm por finalidade garantir que toda linha de cana seja percorrida somente uma vez pelo veículo; as restrições (29) permitem que não seja construída uma sub-rota; as restrições (30) e (31) definem o local de partida e de chegada do veículo agrícola, isto é, saindo da usina, passando por todas as linhas, e retornando a usina; as restrições (32) definem o domínio das variáveis de decisão.

O modelo matemático (26)-(32) é classificado como um Problema de Programação Linear Binária (PLB), e pode ser resolvido utilizando técnicas especializadas de PLB, as quais estão disponíveis em softwares comerciais ou livres, como exemplo o CPLEX (2016).

A validação deste modelo foi realizada por Santoro *et al*. (2017) a partir de testes computacionais utilizando a linguagem de programação Java foi utilizada na interligação dos dados utilizados, vindos do sistema gerenciador de banco de

dados *Oracle Database Express Edition 11g,* com o *solver* CPLEX, sendo também utilizada na captura da saída fornecida pelo *solver* CPLEX.

Os cenários estabelecidos por estes autores, visando a validação do modelo, representaram talhões em usinas sucroenergéticas. Nestes cenários, foram simulados aleatoriamente dados de frentes de colheitas, como, por exemplo, o número de talhões, as áreas destes em hectare e as linhas de cana dos talhões. O tempo para realização de uma manobra, utilizado por estes autores, foi o tempo médio tradicionalmente utilizado nas usinas, que é de 120 segundos. Estes dados foram armazenados em um sistema gerenciador *Oracle Database* 11g *Express Edition Release* 2 (Sistema Gerenciador de Banco de Dados) que tem por objetivo armazenar, manipular e organizar as informações. Maiores informações podem ser encontradas em ORACLE (2016). O trabalho de Santoro *et al*. (2017) descreve em detalhes estes procedimentos.

No presente trabalho, foram utilizados os cenários propostos por Santoro *et al*. (2017) e determinados o número mínimo de manobras em cada um destes utilizando o modelo (26)-(32).

Passo 2: aplicação de um procedimento para realização de manobras de forma a reduzir o tempo de percurso dos veículos agrícolas no local de colheita da cana.

Foram descritos, no Capítulo 2, alguns procedimentos que visam reduzir o tempo para realização de manobras de veículos agrícolas na cabeceira ou no corredor dos talhões de cana-de-açúcar, baseado no trabalho de Spekken *et al.* (2015). Desta forma, neste trabalho, após a determinação das estratégias que minimizam o número de manobras conforme descrito no passo 1, propõe-se a utilização destes procedimentos visando a minimização do tempo de realização das manobras. Tais procedimentos estão descritos a seguir.

Os processos de manobras incluem 4 tipos, Ω, U, T e P conforme descrito anteriormente. Portanto, dependendo da área disponível para realização da manobra pode-se escolher um entre estes 4 tipos.

Neste passo, o procedimento para a realização da manobra consiste inicialmente da escolha de um entre um dos quatro tipos e a seguir deve-se proceder a manobra de acordo com a geometria descrita no que segue.

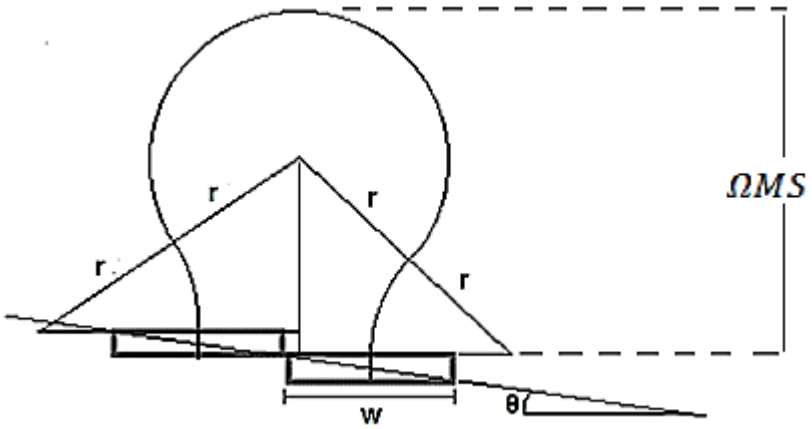
Geometria da manobra

Quando o veículo termina de colher a linha de cana, inicia-se o processo de manobra de cabeceira visando atingir a linha adjacente à colhida e, para isto, o operador do veículo tem quatro possíveis tipos de manobras para realizar, conhecidos como Ω, U, T e P e a geometria é específica a cada um dos tipos.

Se a manobra for do tipo Ω:

A manobra do tipo Ω é uma manobra rápida que parte da linha de cana que está sendo colhida até atingir à linha adjacente, a qual necessita de maior espaço na cabeceira do talhão devido ao comprimento do veículo agrícola. A geometria deste tipo de curva está mostrada na figura a seguir.

Figura 7 - Parâmetros da curva tipo Ω



Fonte. Adaptado de Spekken e Bruin (2013); Spekken *et al.* (2015).

Para a realização desta manobra é necessário conhecer a inclinação (θ) do terreno (em geral usa-se θ = 10º), a largura (w) entre as linhas de cana e o raio de giro (r) do veículo agrícola durante a manobra, conforme discutido no capítulo 2. A partir destes parâmetros calcula-se o comprimento ΩMS, conhecido na literatura como espaço de manobra (veja Figura 7). A equação para o cálculo de ΩMS é a seguinte:

$$\Omega MS = r + cos(\theta)\left\{sen\left[arccos\left(\frac{r + \frac{w}{2 + tg(\theta)h}}{2r}\right)\right]2r + tg^2(\theta)h\right\} + \frac{w}{2}$$

Ao realizar a manobra utilizando o comprimento ΩMS determinado, Spekken *et al.* (2015) mostraram que o tempo para realização desta é o mínimo possível e pode ser calculado pela equação a seguir:

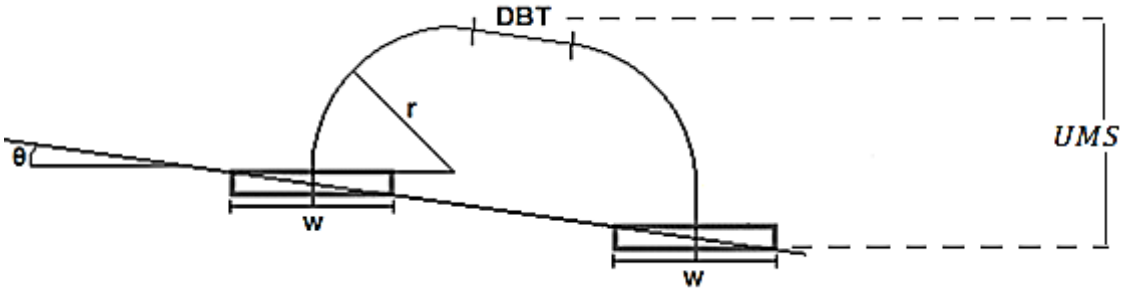
$$\Omega MT = \frac{r}{fv}\left\{2\left[arccos\left(\frac{r+\frac{w}{2}+tg(\theta)h}{2r}\right)+arccos\left(\frac{r+\frac{w}{2}-tg(\theta)h}{2r}\right)\right]+\pi\right\}$$

Em que fv é a velocidade constante (ms^{-1}) do veículo.

Se a manobra for do tipo U:

A manobra do tipo U é uma manobra rápida que parte da linha de cana colhida e entra na linha paralela. Esta manobra pode ser realizada com um espaço de giro menor quando comparada aos demais tipos. A Figura 8 ilustra a geometria deste tipo de manobra.

Figura 8 - Parâmetros da curva tipo U



Fonte. Adaptado de Spekken e Bruin (2013); Spekken *et al.* (2015).

Para a realização da manobra do tipo U é necessário conhecer a inclinação (θ) do terreno, a largura (w) entre as linhas de cana e o raio (r) de giro do veículo agrícola. A partir destes parâmetros calcula-se o comprimento UMS (espaço de manobra), conforme mostrado na Figura 8. A equação para o cálculo de UMS é apresentada no que segue:

$$UMS = r(sen(\theta)+1)r+\frac{w}{2}$$

Ao realizar a manobra utilizando o comprimento ΩMS, Spekken *et al.* (2015) mostraram que o tempo para realização desta é o mínimo possível e pode ser calculado pela equação seguinte:

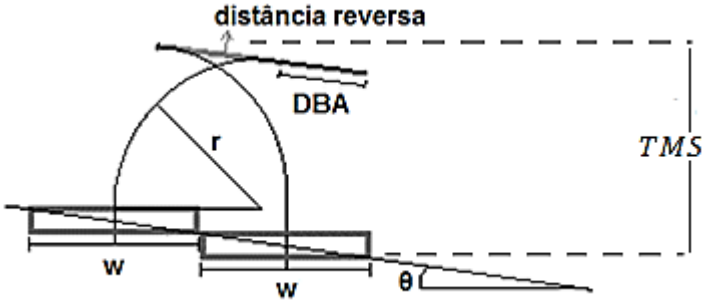
$$UMT = \frac{\left(\pi r + DBT + 2rtg(\theta)\right)}{fv}$$

Em que DBT é o comprimento percorrido entre os giros do veículo.

Se a manobra for do tipo T:

A manobra do tipo T é uma manobra reversa em que o veículo avança sobre o corredor e manobra para trás, após isto, se dirige a linha de cana a ser colhida. Este tipo de manobra pode ser realizado com um espaço semelhante ao do tipo Ω. A Figura 9 ilustra a geometria deste tipo de manobra.

Figura 9 - Parâmetros da curva tipo T



Fonte. Adaptado de Spekken e Bruin (2013); Spekken *et al.* (2015).

Para a realização da manobra do tipo T é necessário conhecer a inclinação (θ) do terreno, a largura (w) entre as linhas de cana e o raio (r) de giro do veículo agrícola. Baseado nestes parâmetros calcula-se o comprimento TMS (espaço de manobra), conforme é ilustrado na Figura 9. A equação para o cálculo de TMS é apresentada a seguir:

$$TMS = r(sen(\theta) + 1)r + \frac{w}{2}$$

Ao realizar a manobra utilizando o comprimento TMS, Spekken *et al.* (2015) mostraram que o tempo para realização deste tipo de manobra é o mínimo possível e pode ser calculado pelas equações no que segue:

$$TMT = \frac{Comp.doVeículo}{fv} + \frac{Dist.Reversa}{rv} + 2(tempo\ de\ parada)$$

$$Comprimento\ do\ Veículo = \pi r + tg(\theta) + DBA$$

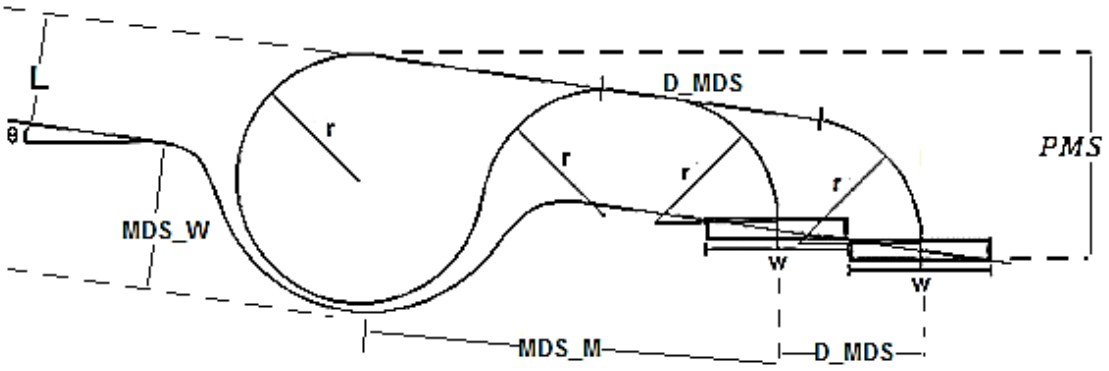
$$Distância\ Reversa = DBA + 2(r - w)$$

Em que fv é a velocidade para frente do veículo agrícola, rv é a velocidade para trás do veículo e DBA é a distância entre o eixo dianteiro do trator e do eixo do implemento.

Se a manobra for do tipo P:

A manobra do tipo P é uma manobra que demanda um tempo maior por percorrer um espaço maior em comparação aos demais tipos de manobras, a qual parte da linha de cana que está sendo colhida, percorre um caminho para alcançar uma área de retorno e volta até atingir à linha adjacente, isto é, necessita de maior espaço no corredor da cana devido ao comprimento do veículo agrícola. A geometria deste tipo de curva está representada na Figura 10.

Figura 10 - Parâmetros da curva tipo P



Fonte. Adaptado de Spekken e Bruin (2013); Spekken *et al.* (2015).

Para a realização da manobra do tipo P é necessário conhecer a inclinação (θ) do terreno, a largura (w) entre as linhas de cana e o raio (r) de giro do veículo agrícola, conforme apresentado na Figura 10. A partir destes parâmetros calcula-se o comprimento PMS (espaço de manobra), conforme equação a seguir.

$$PMS = L + \frac{\left[\frac{\pi\ (MDS\_W)^2}{2}\right]}{MDS\_W + \ MDS\_M + D\_MDS}$$

Em que:

$$L = r - rsen(\theta) + \frac{w}{2}$$

$$MDS\_W = 2r + w - L$$

$$MDS\_M = 2r + cos(\theta)r$$

Ao realizar a manobra utilizando a distância PMS, Spekken *et al.* (2015) mostraram que o tempo para realização deste tipo de manobra é o mínimo possível e pode ser calculado pela equação a seguir:

$$PMT = \frac{2r\left(\frac{3\pi}{2} - \theta\right)}{fv_1} + \frac{2(r + D_{MDS}) - w}{fv_2}$$

Em que D_{MDS} é a distância percorrida pelo veículo agrícola conforme Figura 10, fv_1 é a menor velocidade atingida pelo veículo agrícola, e a velocidade maior do veículo fv_2.

As implementações computacionais desenvolvidas neste trabalho foram realizadas com o uso do *software LibreOffice* Cal® versão 6.0.5.2, em microcomputadores Core 2 Quad com 2GB de memória e 250 GB de disco rígido do Laboratório Científico de Informática (LCI) do Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências da UNESP de Botucatu.

Os dados utilizados para a implementação dos modelos matemáticos dos passos 1 e 2 foram obtidos respectivamente de Santoro *et al*. (2017) e Spekken *et al*. (2015), os quais foram tabulados e organizados em planilhas de cálculos do *software LibreOffice* Cal® versão 6.0.5.2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sabendo-se que o processo de manobra dos equipamentos agrícolas para a colheita em regiões sucroenergéticas é o que demanda a maior quantidade e custos com combustível e visando uma melhoria econômica e ambiental no processo de planejamento da colheita da cana, foram estudados e implementados os passos 1 e 2 descritos no Capítulo 3. Para isto, baseado em Santoro *et al*. (2017), foram utilizados 50 diferentes cenários ilustrando diferentes campos contendo a cana a ser colhida, os quais estão descritos na Tabela 1.

Segundo Benedini e Conde (2008) o tempo médio de uma manobra realizada de forma Tradicional é de 120 segundos e o número de manobras é tradicionalmente calculado pelo número de linhas de cana menos 1, devido a forma em "*zig-zag*" que tradicionalmente a colhedora percorre as linhas. Assim, neste trabalho utilizou-se a fórmula (120(NL-1)), em que NL denota o número total de linhas, para o cálculo do tempo Tradicional de realização das manobras em uma área de colheita, visando a comparação da forma Tradicional com a metodologia de otimização apresentada neste trabalho (Modelo 1 de Santoro *et al*. (2017) (Equações (6)-(12)), Passo 1 e Passo 2). Entende-se por forma Tradicional de realização da manobra, aquela praticada comumente em áreas agrícolas, sem utilização de técnicas otimizadas.

Os dados da Tabela 1 foram obtidos de Santoro *et al*. (2017). Esta tabela apresenta as principais características dos 50 cenários: número de talhões do campo agrícola representado pelo cenário, área total do campo em hectare, número total de linhas de cana e o tempo total utilizado para a realização (de forma Tradicional) das manobras durante o processo de colheita da cana.

Tabela 1 - Características dos cenários: número de talhões, área total destinada a colheita, número total de linhas que a colhedora deverá percorrer e o tempo total gasto com manobra realizada de forma Tradicional

Cenários	Nº de Talhões	Área (ha)	Nº de Linhas NL	Tempo para Manobras (s) (Tradicional) (120(NL-1))
1	3	6,6	95	11.320
2	5	35,8	232	27.760
Cenários	**Nº de Talhões**	**Área (ha)**	**Nº de Linhas**	**Tempo para Manobras (s)**

			NL	(Tradicional) (120(NL-1))
3	4	45,4	295	35.320
4	4	16,7	242	28.960
5	2	25,3	164	19.600
6	2	10.4	150	17.920
7	3	10,9	158	18.880
8	2	17,5	253	30.280
9	2	7,7	111	13.240
10	3	26,7	173	20.680
11	2	21,8	141	16.840
12	4	28	182	21.760
13	2	11,9	172	20.560
14	2	5,2	75	8.920
15	2	5,6	81	9.640
16	2	12,2	176	21.040
17	2	5,2	75	8.920
18	4	24,1	156	18.640
19	3	4,5	65	7.720
20	2	14,4	208	24.880
21	2	10,7	155	18.520
22	2	2,1	30	3.520
23	2	4,7	68	8.080
24	5	36,2	235	28.120
25	2	4,7	68	8.080
26	6	26,3	170	20.320
27	2	28,2	183	21.880
28	2	6,7	97	11.560
29	2	19,1	276	33.040
30	2	30,9	200	23.920
31	2	15	217	25.960
32	5	44,3	287	34.360
33	2	14,6	211	25.240
34	2	13,7	198	23.680
35	4	52,8	343	41.080
36	6	42,7	277	33.160

Cenários	Nº de Talhões	Área (ha)	Nº de Linhas NL	Tempo para Manobras (s) (Tradicional) (120(NL-1))
37	5	23,5	152	18.160
38	2	6,7	97	11.560
39	2	16,2	234	28.000
40	2	7,6	110	13.120
41	2	1,2	45	5.320
42	2	28,9	187	22.360
43	5	57,9	287	34.360
44	4	30,6	198	23.680
45	2	15,4	223	26.680
46	4	21,2	137	16.360
47	2	10,9	158	18.880
48	3	57,8	312	37.360
49	4	27,1	176	21.040
50	4	29,7	193	23.080
Total	146	1.013	8.728	1.043.360

Fonte: Adaptado de Santoro *et al*. (2017).

Para efeito de comparação com o método Tradicional, foram implementados os modelos matemáticos descritos: Modelo 1 de Santoro *et al*. (2017) (Modelos (6)-(12)) e os passos 1 e 2 descritos no capítulo anterior, visando a determinação do número mínimo de manobras necessárias em cada cenário, assim como o tempo mínimo para realização destas manobras. Os resultados estão mostrados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Na Tabela 2 são apresentados o número de manobras calculado de forma Tradicional (NL-1) e os resultados obtidos da implementação do modelo matemático de otimização do passo 1 para determinação do número mínimo de manobras. A coluna 1 da tabela apresenta a identificação dos cenários. As colunas 2 e 3 abordam respectivamente os resultados dos cálculos dos números de manobras utilizando a forma Tradicional e o otimizado com o modelo do passo 1.

Tabela 2 - Números de manobras obtidos de forma Tradicional e otimizado

Nº de Manobras					
Cenários	**Tradicional (NL-1)**	**Otimizado Passo 1**	**Cenários**	**Tradicional (NL-1)**	**Otimizado Passo 1**
1	94	76	26	169	135
2	231	183	27	182	110
3	294	169	28	96	58
4	241	189	29	275	225
5	163	131	30	199	158
6	149	121	31	216	122
7	157	127	32	286	164
8	252	146	33	210	123
9	110	66	34	197	154
10	172	99	35	342	154
11	140	84	36	276	165
12	181	144	37	151	121
13	171	136	38	96	56
14	74	42	39	233	183
15	80	46	40	109	86
16	175	138	41	44	19
17	74	41	42	186	108
18	155	127	43	286	176
19	64	36	44	197	158
20	207	162	45	222	133
21	154	88	46	136	78
22	29	23	47	157	123
23	67	56	48	311	261
24	234	142	49	175	140
25	67	54	50	192	108

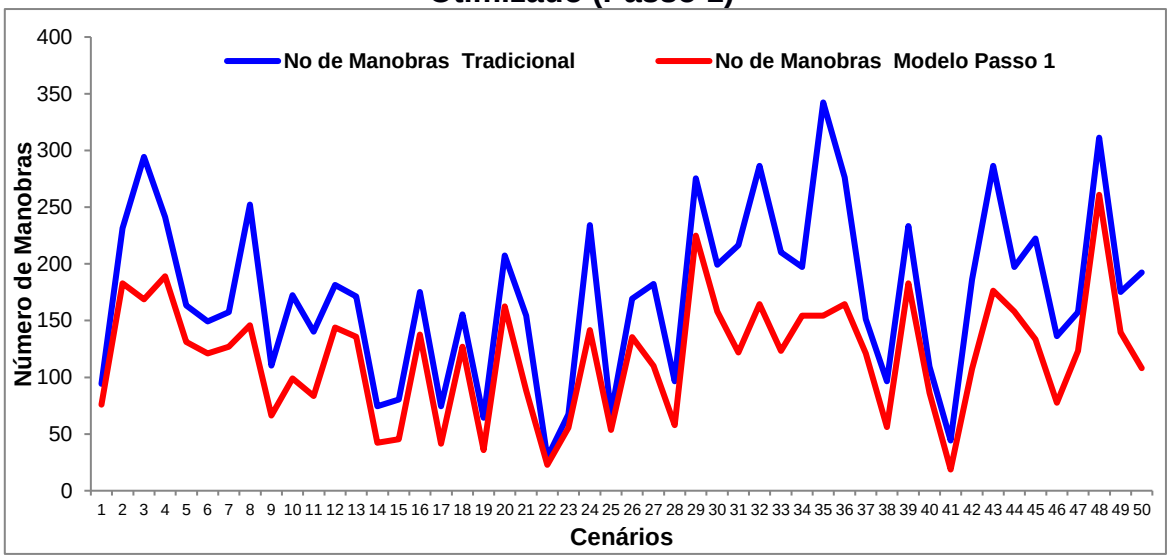
Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode ser observado na Tabela 2 que o número total de manobras realizadas (considerando todos os cenários) de maneira Tradicional e o número total de manobras obtidas de forma otimizada diferem, sendo a Tradicional composta por 8.695 manobras com média por cenário de 174 manobras e para a forma otimizada de 5.943 manobras com média por cenário de 119 manobras.

Tendo uma redução de 2.752 manobras quando utilizado o método otimizado, isto é, obtendo grande economia de combustível para os veículos agrícolas.

Para melhor visualização, a Figura 11 apresenta uma comparação entre os números de manobras, da máquina agrícola para realização da colheita da cana, calculados de forma Tradicional (NL-1) e os calculados a partir da estratégia de otimização proposta pelo modelo do passo 1.

Figura 11 - Números de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Otimizado (Passo 1)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observando a Figura 11 nota-se que o modelo de otimização (passo 1) é capaz de propor uma estratégia para colheita da cana que proporcione uma redução no número de manobras em todos os cenários apresentados, quando comparados a forma Tradicional de colheita. Esta redução foi de 32%, em média, quando comparada à maneira tradicionalmente praticada nas usinas de cana.

A Tabela 3 apresenta o tempo total de manobras em cada cenário, obtidos utilizando os métodos Tradicional (120(NL-1)), otimizado aplicando o modelo 1 de Santoro *et al*. (2017) (Equações (6)-(12)), o Tradicional juntamente com passo 2, isto é, primeiro determina o número de manobras de forma Tradicional (NL-1) e depois utiliza o passo 2 para reduzir o tempo de realização da manobra, utilizando os diferentes tipos de manobras (P, T, U e Ω).

Tabela 3 - Tempo de manobras, em segundos, dos veículos agrícolas

	Tempo de manobras (s)					
Cenários	**Tradicional (120(NL-1))**	**Otimizado Modelo 1**	**Tradicional + passo 2 com Curva Ω**	**Tradicional + passo 2 com Curva U**	**Tradicional + passo 2 com Curva T**	**Tradicional + passo 2 com Curva P**
1	11.320	9.120	4.490	2.264	5.283	6.273
2	27.760	21.930	11.011	5.552	12.955	15.384
3	35.320	20.250	14.010	7.064	16.483	19.573
4	28.960	22.690	11.487	5.792	13.515	16.049
5	19.600	15.750	7.775	3.920	9.147	10.862
6	17.920	14.520	7.108	3.584	8.363	9.931
7	18.880	15.250	7.489	3.776	8.811	10.463
8	30.280	17.520	12.011	6.056	14.131	16.780
9	13.240	7.960	5.252	2.648	6.179	7.337
10	20.680	11.880	8.203	4.136	9.651	11.460
11	16.840	10.020	6.680	3.368	7.859	9.332
12	21.760	17.260	8.631	4.352	10.155	12.059
13	20.560	16.280	8.155	4.112	9.595	11.394
14	8.920	5.070	3.538	1.784	4.163	4.943
15	9.640	5.460	3.824	1.928	4.499	5.342
16	21.040	16.530	8.346	4.208	9.819	11.660
17	8.920	4.960	3.538	1.784	4.163	4.943
18	18.640	15.240	7.394	3.728	8.699	10.330
19	7.720	4.310	3.062	1.544	3.603	4.278
20	24.880	19.490	9.869	4.976	11.611	13.788
21	18.520	10.600	7.346	3.704	8.643	10.263
22	3.520	2.750	1.396	704	1.643	1.951
23	8.080	6.660	3.205	1.616	3.771	4.478
24	28.120	17.010	11.154	5.624	13.123	15.583
25	8.080	6.440	3.205	1.616	3.771	4.478
26	20.320	16.249	8.060	4.064	9.483	11.261
27	21.880	13.190	8.679	4.376	10.211	12.125
28	11.560	6.940	4.585	2.312	5.395	6.406
29	33.040	26.990	13.106	6.608	15.419	18.310
30	23.920	18.970	9.488	4.784	11.163	13.256
31	25.960	14.630	10.297	5.192	12.115	14.386
32	34.360	19.730	13.629	6.872	16.035	19.041

	Tempo de manobras (s)					
Cenários	**Tradicional (120(NL-1))**	**Otimizado Modelo 1**	**Tradicional + passo 2 com Curva Ω**	**Tradicional + passo 2 com Curva U**	**Tradicional + passo 2 com Curva T**	**Tradicional + passo 2 com Curva P**
33	25.240	14.790	10.012	5.048	11.779	13.987
34	23.680	18.510	9.393	4.736	11.051	13.123
35	41.080	18.510	16.295	8.216	19.171	22.765
36	33.160	19.740	13.153	6.632	15.475	18.376
37	18.160	14.530	7.203	3.632	8.475	10.064
38	11.560	6.720	4.585	2.312	5.395	6.406
39	28.000	21.950	11.107	5.600	13.067	15.517
40	13.120	10.370	5.204	2.624	6.123	7.271
41	5.320	2.240	2.110	1.064	2.483	2.948
42	22.360	12.900	8.869	4.472	10.435	12.391
43	34.360	21.160	13.629	6.872	16.035	19.041
44	23.680	18.950	9.393	4.736	11.051	13.123
45	26.680	16.010	10.583	5.336	12.451	14.785
46	16.360	9.320	6.489	3.272	7.635	9.066
47	18.880	14.810	7.489	3.776	8.811	10.463
48	37.360	31.310	14.819	7.472	17.435	20.704
49	21.040	16.750	8.346	4.208	9.819	11.660
50	23.080	12.960	9.155	4.616	10.771	12.790
Total	1.043.360	713.179	413.857	208.672	486.918	578.195

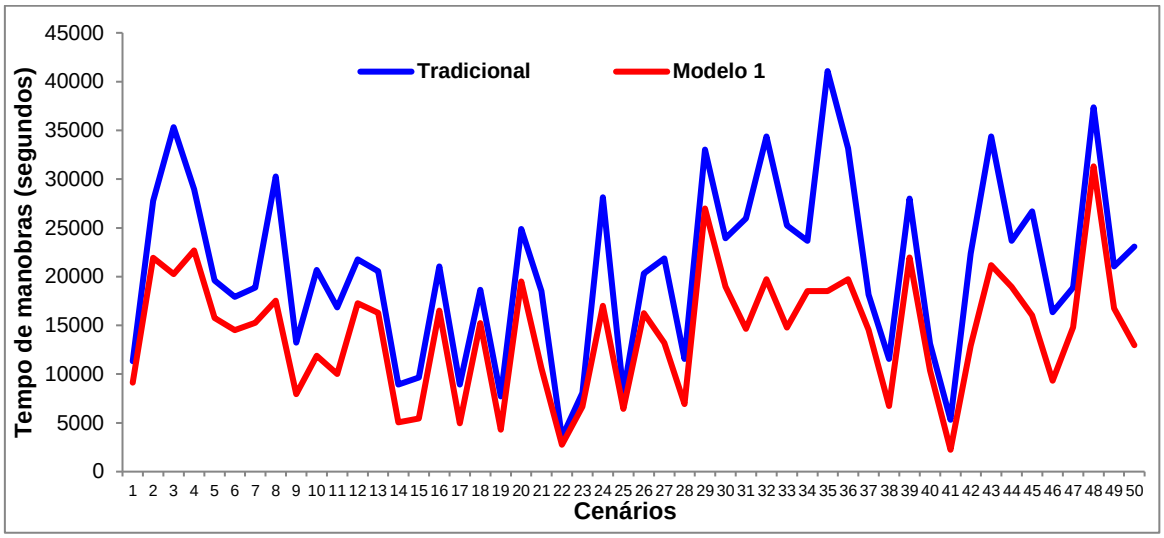
Fonte: Elaborada pelo autor.

Somando o tempo de manobras em cada coluna (em todos os cenários) da Tabela 3, observa-se que o valor obtido a partir do método Tradicional é de 1.043.360 segundos, enquanto o tempo total de manobras obtido com o Modelo 1 é 713.179 segundos, isto é, houve uma redução no tempo total de manobras de 31,6% quando comparado estes métodos. Ao utilizar o modelo Tradicional juntamente com o passo 2, com diferentes tipos de curvas, observa-se que com a curva tipo U este fornece o menor tempo total, que é de 208.672 segundos e com a curva tipo P é despendido o maior tempo total de manobras, que é de 578.195 segundos.

Para facilitar as comparações dos dados da Tabela 3, apresenta-se as figuras (12)-(15). A Figura 12 apresenta a comparação do tempo de manobras

realizadas pelos veículos agrícolas quando utilizado o método Tradicional com o tempo obtido via modelo 1.

Figura 12 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Modelo 1

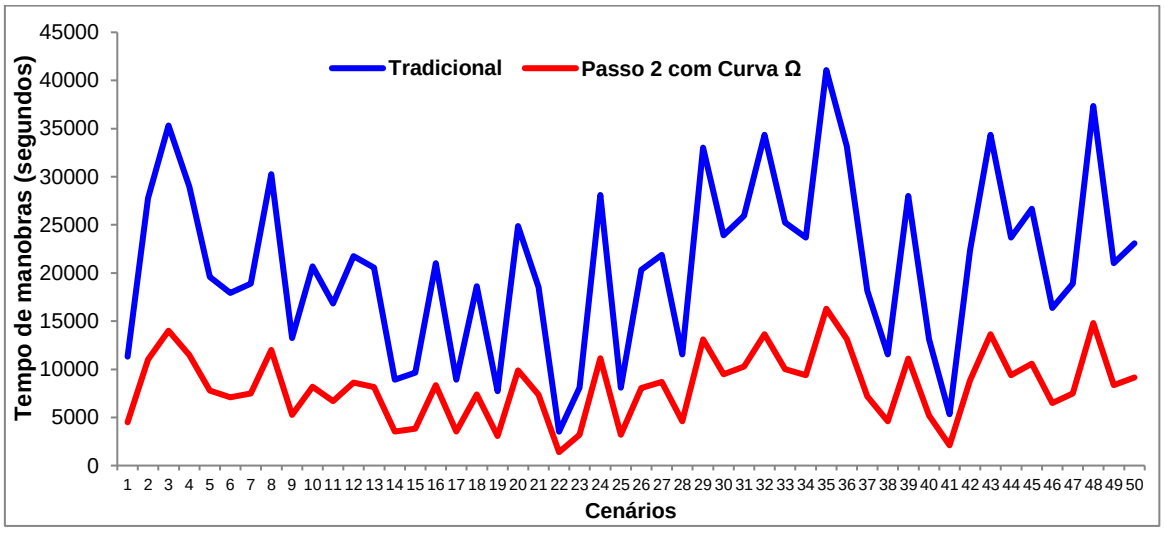


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 12 observa-se o tempo de manobras realizadas pelos veículos agrícolas utilizando o método Tradicional em todos os cenários é sempre superior ao tempo de manobra determinado via Modelo 1, com uma redução média no tempo total de 31,6%.

A Figura 13 compara os tempos de manobra obtidos pelo método Tradicional e pelo o passo 2 com a curva do tipo Ω.

Figura 13 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 2 com Curva Ω

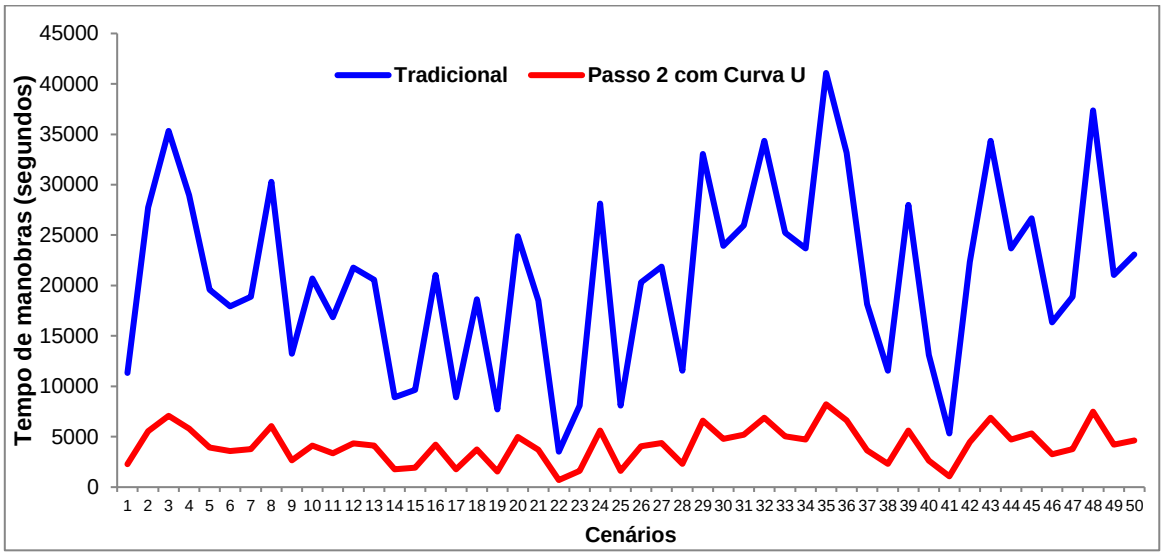


Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se na Figura 13 que o tempo gasto com manobras, obtido com o passo 2 e a curva Ω, é inferior ao obtido usando a forma Tradicional em todos os cenários. Considerando todos os cenários, o passo 2 juntamente com a curva Ω reduz o tempo de realização de manobras em média 60,2%, quando comparado ao Tradicional.

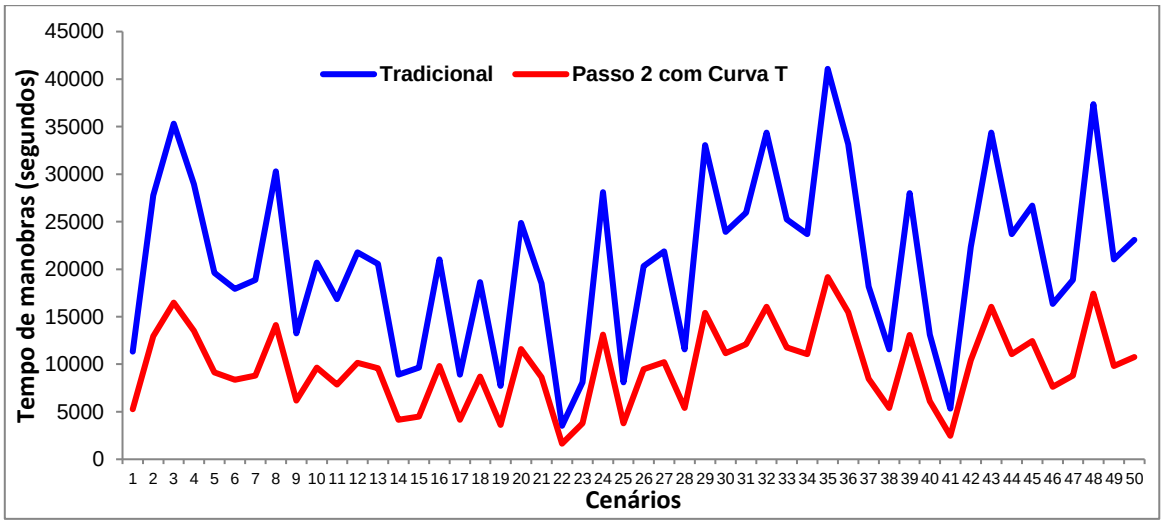
As Figuras 14, 15 e 16 comparam os tempos de manobra obtidos pelo método Tradicional e pelo o passo 2 respectivamente com as curvas do tipo U, T e P.

Figura 14 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 2 com Curva U



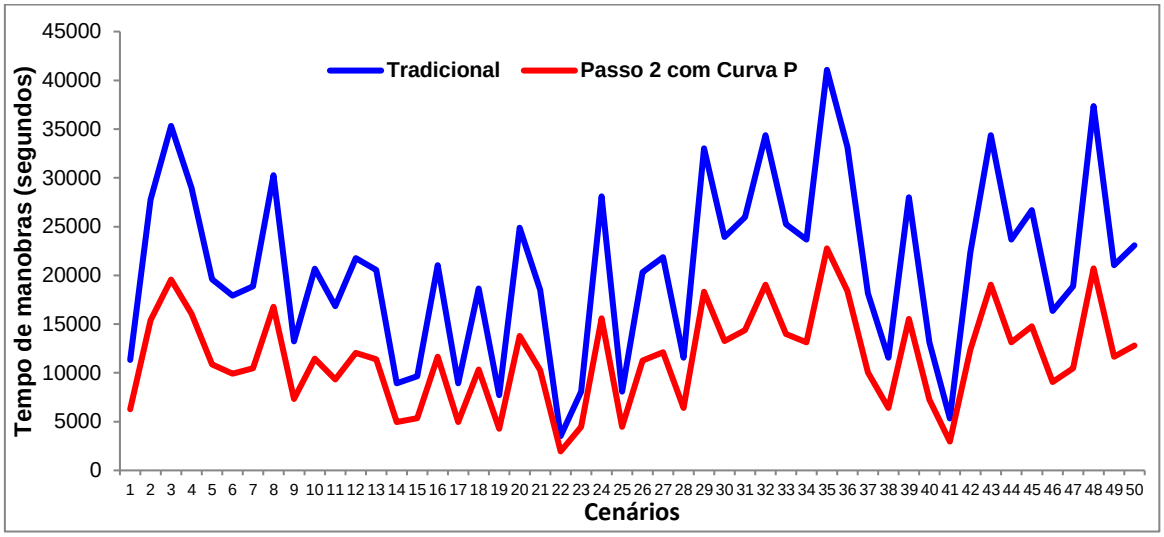
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 2 com Curva T



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 2 com Curva P



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se nas Figuras 14, 15 e 16 que o tempo gasto com manobras, obtido pelo Passo 2 com todas as curvas U, T e P, é inferior ao obtido usando a forma Tradicional em todos os cenários. Considerando todos os cenários a combinação do passo 2 com estas curvas reduz o tempo de realização de manobras em média, respectivamente, de 79,9%, 53,1% e 44,4%, quando comparado ao método Tradicional, sendo o passo 2 juntamente com a curva de manobra em U, o que dispende menor tempo.

A Tabela 4 apresenta o tempo total de manobras realizadas em cada cenário, os quais foram obtidos utilizando o passo 1 juntamente com o passo 2 aplicando os diferentes tipos de curvas (P, T, U e Ω), isto é, primeiro determina estratégias de colheita que reduza o número de manobras com o modelo do passo 1 e depois utiliza o método 2 para reduzir o tempo de realização da manobra, utilizando os tipos de curvas (P, T, U e Ω) e estes são comparados com o uso do método Tradicional e com o uso somente modelo de otimização 1 de Santoro *et al.* (2017).

Tabela 4 - Tempo de manobras em segundos dos veículos agrícolas

	Tempo de manobras (s)					
Cenários	**Tradicional**	**Otimizado Modelo 1**	**Passo 1 + Passo 2 com Curva Ω**	**Passo 1 + Passo 2 com Curva U**	**Passo 1 + Passo 2 com Curva T**	**Passo 1 + Passo 2 com Curva P**
1	11.320	9.120	3.618	1.824	4.256	5.054
2	27.760	21.930	8.699	4.386	10.234	12.153
3	35.320	20.250	8.033	4.050	9.450	11.222
4	28.960	22.690	9.000	4.538	10.589	12.574
5	19.600	15.750	6.248	3.150	7.350	8.728
6	17.920	14.520	5.760	2.904	6.776	8.047
7	18.880	15.250	6.049	3.050	7.117	8.451
8	30.280	17.520	6.950	3.504	8.176	9.709
9	13.240	7.960	3.157	1.592	3.715	4.411
10	20.680	11.880	4.712	2.376	5.544	6.584
11	16.840	10.020	3.975	2.004	4.676	5.553
12	21.760	17.260	6.846	3.452	8.055	9.565
13	20.560	16.280	6.458	3.256	7.597	9.022
14	8.920	5.070	2.011	1.014	2.366	2.810
15	9.640	5.460	2.166	1.092	2.548	3.026
16	21.040	16.530	6.557	3.306	7.714	9.160
17	8.920	4.960	1.967	992	2.315	2.749
18	18.640	15.240	6.045	3.048	7.112	8.446
19	7.720	4.310	1.710	862	2.011	2.388
20	24.880	19.490	7.731	3.898	9.095	10.801
21	18.520	10.600	4.205	2.120	4.947	5.874
22	3.520	2.750	1.091	550	1.283	1.524
23	8.080	6.660	2.642	1.332	3.108	3.691
24	28.120	17.010	6.747	3.402	7.938	9.426
25	8.080	6.440	2.555	1.288	3.005	3.569
26	20.320	16.249	6.445	3.250	7.583	9.005
27	21.880	13.190	5.232	2.638	6.155	7.309
28	11.560	6.940	2.753	1.388	3.239	3.846
29	33.040	26.990	10.706	5.398	12.595	14.957
30	23.920	18.970	7.525	3.794	8.853	10.513
31	25.960	14.630	5.803	2.926	6.827	8.107

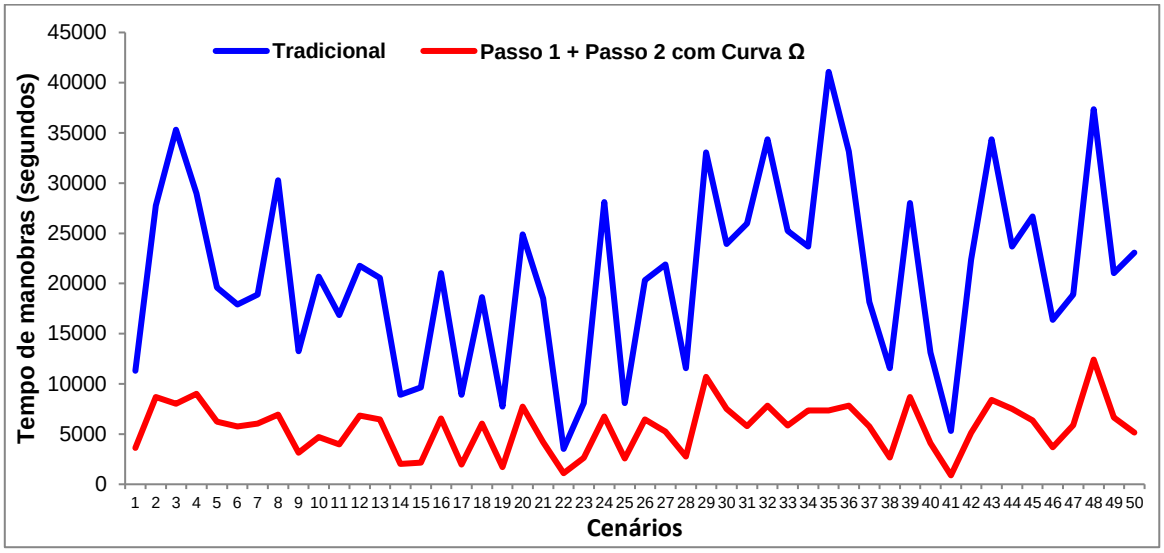
	Tempo de manobras (s)					
Cenários	**Tradicional**	**Otimizado Modelo 1**	**Passo 1 + Passo 2 com Curva Ω**	**Passo 1 + Passo 2 com Curva U**	**Passo 1 + Passo 2 com Curva T**	**Passo 1 + Passo 2 com Curva P**
32	34.360	19.730	7.826	3.946	9.207	10.934
33	25.240	14.790	5.867	2.958	6.902	8.196
34	23.680	18.510	7.342	3.702	8.638	10.258
35	41.080	18.510	7.342	3.702	8.638	10.258
36	33.160	19.740	7.830	3.948	9.212	10.939
37	18.160	14.530	5.764	2.906	6.781	8.052
38	11.560	6.720	2.666	1.344	3.136	3.724
39	28.000	21.950	8.707	4.390	10.243	12.164
40	13.120	10.370	4.113	2.074	4.839	5.747
41	5.320	2.240	889	448	1.045	1.241
42	22.360	12.900	5.117	2.580	6.020	7.149
43	34.360	21.160	8.393	4.232	9.875	11.726
44	23.680	18.950	7.517	3.790	8.843	10.501
45	26.680	16.010	6.351	3.202	7.471	8.872
46	16.360	9.320	3.697	1.864	4.349	5.165
47	18.880	14.810	5.875	2.962	6.911	8.207
48	37.360	31.310	12.420	6.262	14.611	17.351
49	21.040	16.750	6.644	3.350	7.817	9.282
50	23.080	12.960	5.141	2.592	6.048	7.182
Total	1.043.360	713.179	282.897	142.636	332.815	395.220

Fonte: Elaborada pelo autor.

Somando o tempo de manobras em cada coluna (em todos os cenários). Na Tabela 4, observa-se que o valor obtido a partir do método Tradicional é de 1.043.360 segundos, o tempo total de manobras obtido com o Modelo 1 é 713.179 segundos, enquanto a integração do passo 1 com o passo 2 e utilizando manobras com curvas em U apresentou o menor tempo, que foi de 142.636 segundos. Com a integração o maior tempo foi obtido com a curva na forma P, com 395.220 segundos, que ainda é bem promissora quando comparada aos métodos Tradicional e o Modelo 1. Comparando os resultados do método Tradicional com o integrado (passo 1 + passo 2) com curva U, observa-se a maior diferença no tempo de manobras, que é de 86,3%.

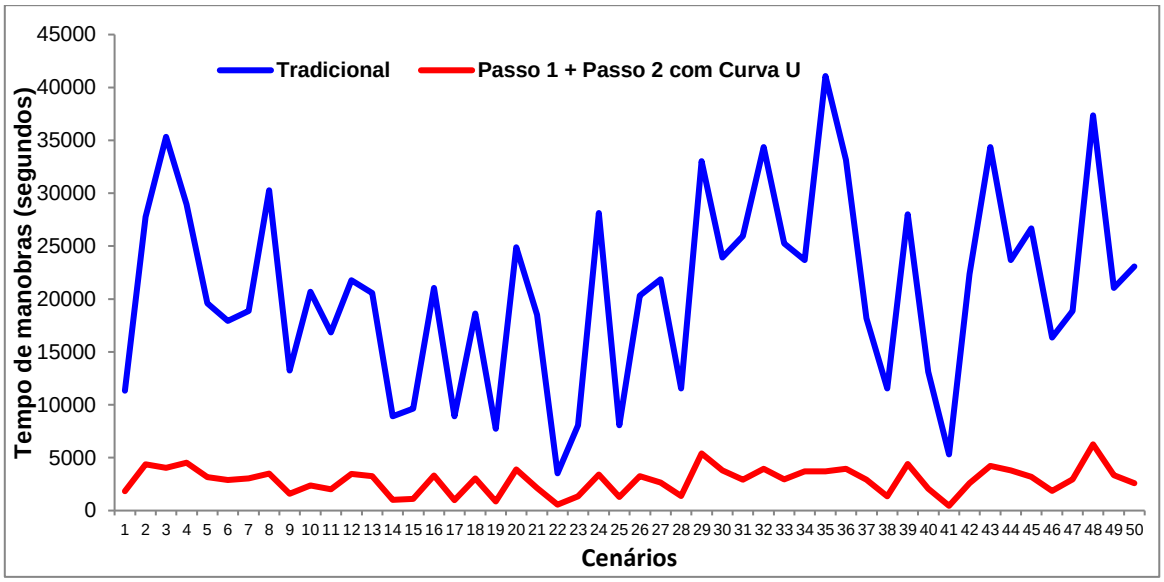
As Figuras 17, 18, 19 e 20 apresentam uma comparação do tempo gasto com as manobras nos cenários estudados utilizando o método Tradicional e o método integrando o passo 1 e o passo 2 com as curvas Ω, U, T e P respectivamente.

Figura 17 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 1 + Passo 2 com Curva Ω



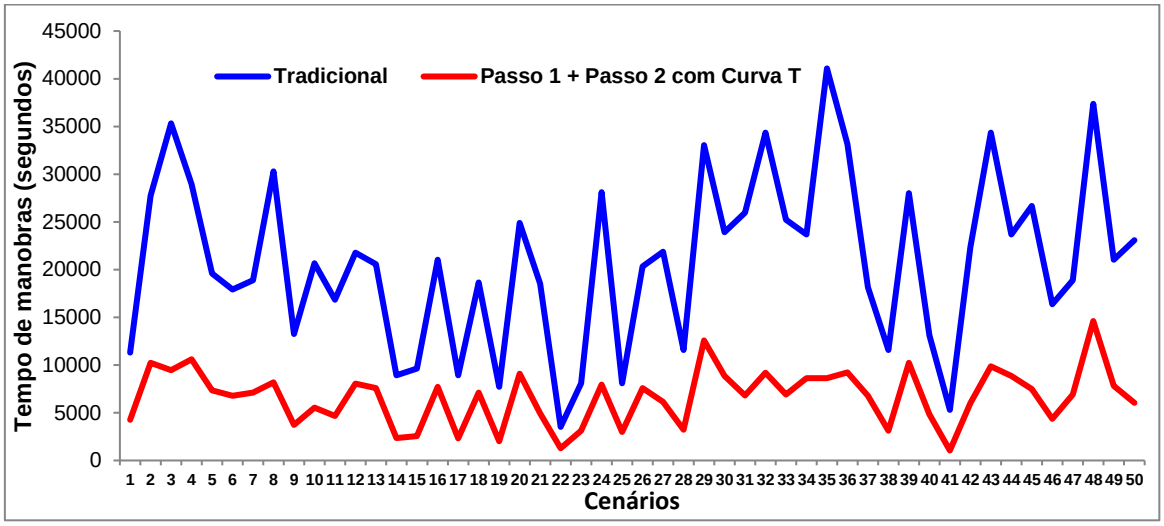
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 1 + Passo 2 com Curva U



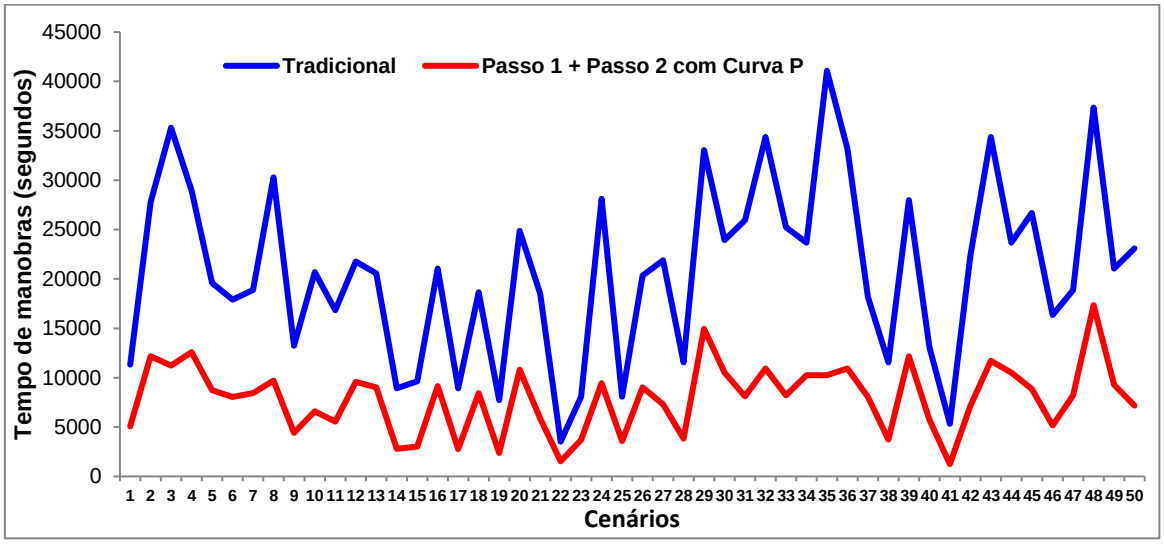
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x Passo 1 + Passo 2 com Curva T



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 - Tempo de manobras dos veículos agrícolas Tradicional x *Passo* 1 + Passo 2 com Curva P



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observando as Figuras 17, 18, 19 e 20, todos os resultados apontam para a vantagem em realizar as manobras utilizando a metodologia integrando o passo 1 ao passo 2, com relação ao Tradicional. As porcentagens de redução do tempo de manobras com o método integrado em relação ao Tradicional foram 72,9%, 86,3%, 68,1% e 62,1% utilizando manobras com as curvas Ω, U, T e P respectivamente

Pode ser observado nas tabelas e figuras apresentadas que o método Tradicional de realização de manobras é o que dispensa o maior tempo, com isso,

o maior consumo de combustível e, portanto, os maiores custos. O segundo maior tempo para a realização de manobras foi obtido quando utiliza uma integração o modelo 1. Mas, estes tempos podem ser reduzidos quando aplicados uma integração do passo 1 com o passo 2, para quaisquer tipos de curvas estudadas, sendo que quando utilizada esta integração o tempo de manobra se reduz, no pior caso, a uma porcentagem média de 38%, que é quando a curva tipo P é utilizada, a qual demanda maior tempo de realização de manobra. Assim sendo, com esta integração passo 1 e passo 2, a redução mínima é de 38% quando comparado com as práticas tradicionais realizadas nas usinas.

A Tabela 5 apresenta a comparação do percentual de redução do tempo médio de manobras, nos 50 cenários, quando utilizadas as diferentes metodologias estudadas, em que, T-M1 denota a comparação do tempo de manobras realizadas de forma Tradicional e as manobras realizadas a partir da estratégia obtida pelo modelo 1; T-P*ij* denota a comparação do tempo de manobras de forma Tradicional e as realizadas utilizando a estratégia do passo *i* com a manobra na forma *j.* Como exemplos têm-se que T-M1 = 31,6% implica que ao realizar as manobras utilizando a estratégia determinada pelo modelo 1, ocorre uma redução média de 31,6% no tempo, quando comparado com a forma Tradicional de realização destas manobras e T-P12Ω = 72,9% implica que ao realizar as manobras utilizando as estratégias do passo 1 seguidas pelo passo 2, discutidos neste trabalho, com manobras do tipo Ω, ocorre uma redução média de 72,9% no tempo, quando comparado com a forma Tradicional. Todas as comparações estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparação do percentual de redução do tempo médio de manobras quando utilizados as diferentes metodologias estudadas (T = Tradicional, M1 = modelo otimizado, P2 = passo 2, P12 = passo 1 + passo 2)

	Estratégias de manobra	Redução (%)
	T-M1	31,6
Passo 2	T-P2Ω	60,2
	T-P2U	79,9
	T-P2T	53,1
	T-P2P	44,4
Passo 1 + Passo 2	T-P12Ω	72,9
	T-P12U	86,3
	T-P12T	68,1
	T-P12P	62,1

Fonte. Elaborada pelo autor.

A Tabela 5 apresenta uma comparação das metodologias apresentadas por Spekken *et al*. (2015) e Santoro *et al*. (2017), com a prática comum (Tradicional) de realização das manobras dos veículos agrícolas nos 50 cenários estudados, mostrando que o tempo médio para realização das manobras na forma Tradicional é superior aos apresentados utilizando as estratégias de manobras propostas por estes autores. Este fator é de suma importância para o sistema sucroenergético, pois promove a redução do tempo improdutivos dos trabalhadores e veículos agrícolas, e uma redução do consumo de combustível.

Na Tabela 5 também pode-se observar que, quando utilizada a estratégia do passo 2 e comparada com a forma Tradicional de manobrar os veículos agrícolas, a manobra do tipo U foi a que apresentou a maior redução de tempo, com uma redução média de 79,9%. Por outro lado, a menor redução de tempo médio total foi a manobra do tipo P, ocorrendo uma redução de 44,4% para os 50 cenários.

Outra observação importante na Tabela 5 foi que as manobras dos tipos Ω, T, U e P utilizando as estratégias do passo 1 em seguidas do passo 2 obtiveram maior redução do tempo total médio em comparação com o que é realizado tradicionalmente nas usinas. O tipo de manobra U obteve o maior percentual de redução de tempo médio total, com 86,3% comparado com a forma Tradicional. A menor redução de tempo comparada com a forma Tradicional foi observando para

a curva do tipo P, devido a longa distância a ser percorrida para a realização desta (a redução desta foi de 62,1%).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de investigar técnicas matemáticas que auxiliem na minimização do tempo de duração das manobras realizadas durante a colheita da cana-de-açúcar, consequentemente reduzindo o tempo de trabalho e o consumo de combustível, o que consequentemente gera um custo mínimo desta operação e reduz os impactos ambientais causados pela queima do combustível.

Foram comparados os resultados do cálculo do tempo de manobras obtidos pelas práticas tradicionais da usina e os passos 1 e 2 apresentados nesta dissertação. Observou-se que quando utilizado o passo 1 para determinar um número reduzido de manobras e posteriormente utilizando o passo 2 para minimização do tempo de manobra, os resultados mostram que utilizando esta metodologia de redução, a média de tempo gasto com manobras otimizadas pode ser a metade do tempo gasto quando as manobras são feitas de forma Tradicional.

A metodologia apresentada neste trabalho tem grande potencial para auxílio no planejamento otimizado da colheita da cana, reduzindo o tempo de manobras, contribuindo para redução de tempos de não-trabalho, o que possibilita um uso mais eficiente dos recursos produtivos, como: combustível, trabalho e na capital empregado em máquina. Consequentemente contribuindo com matriz energética brasileira, gerando energia de forma sustentável e com custo reduzido.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. M. W.; PALHARINI, B. N. Os “Mundos da matemática” em atividades da modelagem matemática. **Bolema**, Rio Claro, v. 26, n. 43, p. 907-934, ago. 2012.

ARENALES, M.; MORABITO, R.; ARMENTANO, V.; YANASSE, H. **Pesquisa operacional**: para cursos de engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 789-3**: Tratores agrícolas – Procedimentos de ensaio – Parte 3: Diâmetros de giro e do espaço de giro. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BAPTISTELLI, S. C. **Análise crítica da utilização de modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves no litoral da baixada santista (estado de São Paulo).** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BELARDO, G. C.; RIPOLI, T. C. C. Avaliação da colhedora mecanizada: desempenho de colhedoras de cana-de-açúcar. *In*: BELARDO, G. C. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. 1. ed. Jaboticabal: SBEA, 2015. p. 357-362.

BELARDO, G. C.; ROSA, J. H. M.; MAGALHÃES. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar. *In*: BELARDO, G. C. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. 1. ed. Jaboticabal: SBEA, 2015. p. 335-355.

BENEDINI, S. M.; CONDE, J. Sistematização da Área para colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **Revista Coplana**, Guariba, v. 23, p. 23-25, 2008.

BIEMBENGUT, M. S. 30 anos de modelagem matemática na educação brasileira: das propostas primeiras às propostas atuais. **Alexandria Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, Florianópolis, v. 2, n. 2, p. 7-32, jul. 2009.

BOCHTIS, D. D.; VOUGIOUKAS, S. G. Minimising the non-working distance travelled by machines operation in a headland field pattern. **Biosystems Engineering**, London, v. 101, n. 1, p. 1-12, set. 2008.

BOCHTIS, D. D.; SθRENSEN, C. G. The vehicle routing problem in field logistics: Part II. **Biosystems Engineering**, London, v. 105, n. 2, p. 180-188, 2010.

CARREIRA, M. L. **Desempenho operacional, econômico e energético do transporte de cana-de-açúcar**: um estudo de caso. 2010. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Global Change Biology Bioenergy**, West Sussex, v. 9, n. 7, p. 1181-1195, 2016.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; FLORENTINO, H. O.; ISLER, P. R.; OLIVEIRA, P. A. Avaliação do desempenho operacional da colheita e transbordo de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 30, n. 3, p. 232-241, jul./set., 2015.

CIFUENTES, J. C.; NEGRELLI, L. G. Uma interpretação epistemológica do processo de modelagem matemática: implicações para a matemática. **Bolema**, Rio Claro, v. 26, n. 43, p. 791-815, ago. 2012.

CHRISTOFIDES, N.; BENAVENT, E.; CAMPUS, V.; CORBERÁN, A.; MOTA, E. An optimal method for the mixed postman problem. *In*: THOFT-CHRISTENSEN, P. (ed.). **System modelling and optimization**: lecture notes in control and information sciences. Berlin: Springer, 1984. v. 59, p. 641-649.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**: teoria e aplicações. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

CPLEX. ILOG CPLEX Optimization Studio welcome page. [*S.l.*]: CPLEX, 2016. Disponível em: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SSSA5P. Acesso em: 04 jun. 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira - cana-de-açúcar**: quarto levantamento, abril 2017 – safra 2016/2017. Brasília, DF. Disponível em: https://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_19_11_27_36_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_16-17.pdf. Acesso em: 30 mar. 2018.

CORBERÁN, A.; SANCHIS, J. M. A polyhedral approach for the rural postman problem. **EJOR**, Amsterdam, n. 79, p. 95-114, 1994.

DANTZIG, G. N.; THAPA, M. N. **Linear Programming 1**: Introduction. Berlin: Springer, 2006.

DANTZIG, G. N. **Linear programming and extensions**. Princeton: Princeton University Press, 2016.

DÍAZ, J. A.; PEREZ, H. G. Simulation and optimization of sugar cane transportation in harvest season. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 32., 2000, Orlando. **Proceedings** […]. Piscataway: IEE, 2000. v. 2, p. 1114-1117.

DORIGUEL, F.; CRUSCIOL, C. A. C.; FLORENTINO, H. O. Mathematical optimization models in the sugarcane harvesting process. *In*: OLIVEIRA, A. B. **Sugarcane**: technology and research. London: IntechOpen, 2017. Chap. 11, p. 207-221. Disponível em: https://www.intechopen.com/books/sugarcane-technology-and-research/mathematical-optimization-models-in-the-sugarcane-harvesting-process. Acesso em: 15 abr. 2019.

EIRAS, S. P.; ANDRADE, J. C. O uso do simplex modificado como estratégia de otimização em química analítica. **Química Nova**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 24-29, 1995.

FLORENTINO, H. O.; IRAWAN, C.; ALIANO, A. F.; JONES, D. F.; CANTANE, D. R.; NERVIS, J. J. A multiple objective methodology for sugarcane harvest management with varying maturation periods. **Annals of Operations Research**, New York, v. 267, n. 1/2, p. 153-177, 2018.

GLEN, J. J. Mathematical models in farm planning: a survey. **Operations Research**, Catonsville, v. 35, n. 5, p. 487-494, 1987.

GROVES, G. W.; VAN VUUREN, J. H. Efficient heuristic for the rural postman problem. **Orion**, Munich, v. 21, n. 1, p. 33-51, 2005.

HAHN, M. H. **SISTEC**: simulador de sistema de transporte de cana-de-açúcar. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. ed. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2013.

HIGGINS, A. J.; THORBURN, P.; ARCHER, A.; JAKKU, E. Opportunities for value chain research in sugar industries. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 94, n. 3, p. 611-621, 2007.

JENA, S. D.; POGGI, M. Harvesting planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 230, n. 2, p. 374-384, 2013.

JUNQUEIRA, R. D. A. R.; MORABITO, R. Optimization approaches for sugarcane harvest front programming and scheduling. **Management and Production**, São Carlos, n. 24, v. 2, p. 407-422, 2017.

KITTILERTPAISAN, K.; PATHUMNAKUL, S. Sugarcane harvester planning based on the vehicle routing problem with time window (VRPTW) approach. In: **The 10th International Congress on Logistics and SCM Systems (ICLS 2015)**, Chiangmai, Thailand: p. 335-344, 2015

LENSTRA, J. K; KAN, A. H. G. R. Complexity of vehicle routing and scheduling problemas. **Networks**, Hoboken, v. 11, n. 2, p. 221-227, 1981.

LISBOA, I. P.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. C.; CERRI, D. G.; CERRI, C. E. Guidelines for the recovery of sugarcane straw from the field during harvesting. **Biomass and Bioenergy**, Kidlington, v. 96, p. 69-74, 2017.

MAGALHÃES, P. S. G.; BALBO, R. F. G.; CERRI, D. G. P. Sistema de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo de transbordo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 274-282, 2008.

MARTÍNEZ, J. M.; SANTOS, S. A. Métodos Computacionais de Otimização. *In*: 20º Colóquio Brasileiro de Matemática**, Apostilas** [...] Rio de Janeiro, RJ: IMPA, 1995. p. 1-262.

MELO, M. O.; ROSA, J. H. M. Corte, transbordo e transporte (CTT): uso de transbordo na colheita mecanizada e seus impactos no CTT. *In*: BELARDO, G. C. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. 1. ed. Jaboticabal: SBEA, 2015. p. 429-437.

MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas**: ensaios e certificação. Piracicaba: FEALQ, 1996.

MILAN, M.; ROSA, J. H. M. Corte, transbordo e transporte (CTT): aspectos relevantes e uso de modelagem para o CTT. *In*: BELARDO, G. C. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. 1. ed. Jaboticabal: SBEA, 2015. p. 415-427.

MORAES, M. A. F. D. O mercado de trabalho da agroindústria canavieira: desafios e oportunidades. **Economia Aplicada**, Ribeirão Preto, v. 11, n. 4, p. 605-619, dez. 2007.

MURTY, K. G. **Linear and combinatorial programming**. Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company, 1985.

NEUNGMATCHA, W.; SETHANAN, K. Optimal mechanical harvester route planning for sugarcane field operations using particle swarm optimization. **KKU Engineering Journal**, Muang District, v. 42, n. 2, p. 125-133, 2015.

ORACLE. Oracle Database Express Edition Documentation 11g Release 2. [S.l.]: ORACLE, 2016. Disponível em: http://docs.oracle.com/cd/E17781_01/. Acesso em: 4 jun. 2019.

ORSOLINI, J. M. **Protótipo de cortadora-amontoadora: desempenho operacional e econômico em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) com queima prévia**. 2002. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) –Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paul, Piracicaba, 2002.

OKSANEN, T.; VISALA, A. Coverage path planning algorithms for agricultural fields machine. **Journal of Fields Robotics**, Hoboken, v. 26, n. 8, p. 651-668. 2009.

RIPOLI, T. C. C. Ensaios e certificação de máquinas para colheita de cana-de-açúcar. *In*: MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas**: ensaios e certificações. Piracicaba: FEALQ, 1996, p. 635-674.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDI, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar**: estado da arte. Piracicaba: Edição dos autores, 2007.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar**: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Edição dos autores, 2009.

REIS, G. N.; VOLTARELLI, M. A.; SILVA, R. P.; TOLEDO, A.; LOPES, A. Qualidade do corte basal na colheita mecanizada de cana-de-açúcar em dois

tipos de manejo do solo. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 6, n. 2, p. 143-153, 2015.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C. Modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 3, p. 373-378, 2007.

RODRIGUES, E. B.; SAAB, O. J. G. A. Avaliação técnico-econômica da colheita manual e mecanizada da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de bandeirantes – Pr. **Semina**: Ciências Agrárias, v. 28, n. 4, p. 581-588, 2007.

ROSA, J. H. M. **Dimensionamento operacional e econômico da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (Saccharum ssp)**: modelo computacional como ferramenta de apoio a tomada de decisão. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

SANTOS, N. B. **Identificação dos fatores críticos da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SALASSI, M. E.; CHAMPAGNE, L. P. A spreadsheet-based cost model for sugarcane harvesting sytems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 20, n. 3, p. 215-222, 1998.

SANTORO, E.; SOLER, E. M.; CHERRI, A. C. Route optimization in mechanized sugarcane Harvesting. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 141, p. 140-146. 2017.

SALVI, J. V.; MATOS, M. A.; MILAN, M. Avaliação do desempenho de dispositivo de corte de base de colhedora de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 201-209, 2007.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Optimized agricultural planning of sugarcane using linear programming. **Investigación Operacional**, Havana, v. 31, n. 2, p. 126-132, 2010.

SETHANAN, K.; THEERAKULPISUT, S.; TAECHASSOK, P.; NEUNGMATCHA, W.; BUREERAT, S. Sugarcane harvest scheduling for maximizing total sugar yield. **Advanced Science Letters**, Valencia, v. 19, n. 19, p. 3122-3125, 2013.

SETHANAN, K.; NEUNGMATCHA, W. Multi-objective particle swarm optimization for mechanical harvester route planning of sugarcane field

operations. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 252, n. 2, p. 969-984, 2016.

SILVA, J. E. A. R. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transportes de cana-de-açúcar**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

SILVA, R. P.; CORRÊA, C. F.; CORTEZ, J. W.; FURLANI, C. E. A. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 292-304, 2008.

SILALERTRUKSA, T.; PONGPAT, P.; GHEWALA, S. H. Life cycle assessment for enhancing environmental sustainability of sugarcane biorefinery in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 140, n. 2, p. 906-913, 2017.

SPEKKEN, M.; BRUIN, S. Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time. **Precision Agriculture**, New York, v. 14, n. 2, p. 224-244, 2013.

SPEKKEN, M.; MOLIN, J. P.; ROMANELLI, T. L. Cost of boundary manoeuvres in sugarcane productions. **Biosystems Engineering**, London, v. 129, p. 112-126, 2015.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 247-260, 2012.

VIAN, C. E. F.; SILVA, R. P.; BARICELO, L. G.; PISSINATO, B.; QUINTINO, D. D.; MARIN, F. R.; MORAES, M. L.; RODRIGUES, M. A. Evolução da produção e mecanização da cana-de-açúcar no estado de São Paulo: desafios e perspectivas. *In*: BELARDO, G. C. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. 1. ed. Jaboticabal: SBEA, 2015. p. 73-88.

VIANNA, A. C. G.; CHERRI, A. C.; FLORENTINO, H. O. Agricultural planning for mechanized sugarcane harvesting. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**, São José dos Campos, v. 6, n. 1, p. 1-2, 2018.

VIEIRA, G. **Avaliação do custo, produtividade e geração de emprego no corte de cana-de-açúcar, manual e mecanizado, com e sem queima prévia**. 2003. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

VOLPATO, C.E.S.; BRAUNBECK, O.A.; OLIVEIRA, C.A.A. Desenvolvimento e avaliação de um protótipo de cortador de base para colhedoras de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 345-348, 2002.

VOLTARELLI, M. A.; SILVA, R. P.; CASSIA, M. T.; ORTIZ, D. F.; TORRES, L. S. Qualidade do corte basal de cana-de-açúcar utilizando-se de três modelos de facas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 3, p. 528-541, 2015.

VORASAYAN, J.; PATHUMNAKUL, S. Optimal Logistics System for Sugarcane Mechanical Harvesting in Thailand. **Journal of Applied Science and Agriculture**, Bankok, v. 9, n. 15, p. 28-35, 2014.

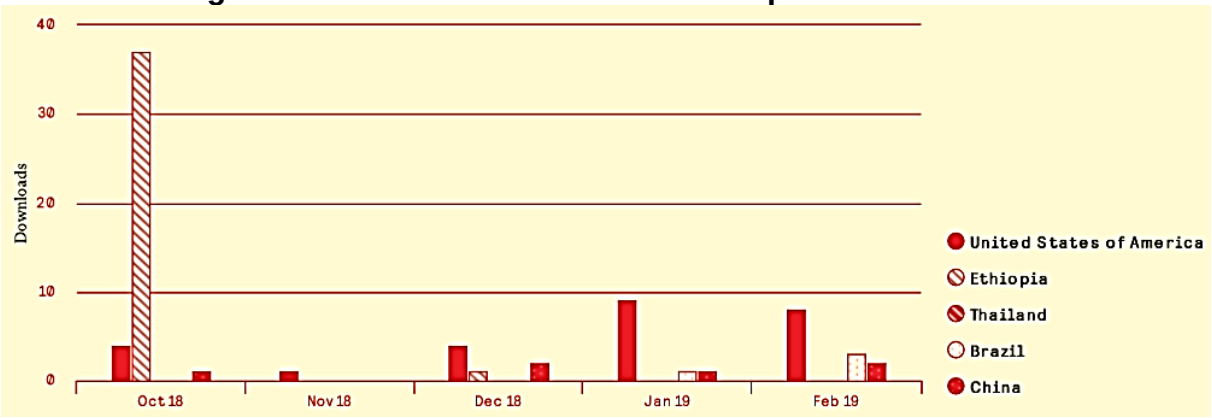
APÊNDICE A

Durante o período de desenvolvimento deste trabalho de pesquisa foi elaborado um capítulo de livro intitulado *Mathematical Optimization Models in the Sugarcane Harvesting Process*. Neste capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica de importantes trabalhos utilizando métodos matemáticos e computacionais visando otimizar o processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar. A referência deste capítulo está no que segue:

DORIGUEL, F.; CRUSCIOL, C. A. C.; FLORENTINO, H. O. Mathematical optimization models in the sugarcane harvesting process. *In*: OLIVEIRA, A. B. **Sugarcane**: technology and research. London: IntechOpen, 2017. Chap. 11, p. 207-221. Disponível em: https://www.intechopen.com/books/sugarcane-technology-and-research/mathematical-optimization-models-in-the-sugarcane-harvesting-process. Acesso em: 10 jun. 2019.

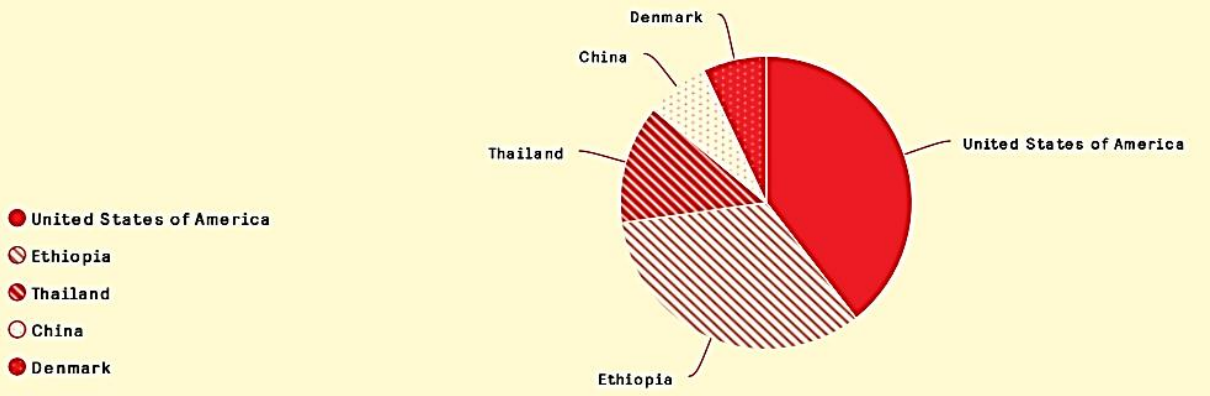
De acordo com os editores da revista, este capítulo está sendo bem acessado em vários países. A seguir, tem-se um relatório da aceitação do capítulo. A Figura 1A apresenta os acessos do capítulo por país, entre os meses de outubro de 2018 a fevereiro de 2019.

Figura 1A - Números de acessos do capítulo do livro



A Figura 2A apresenta o número de *download* cumulativo por país. Os maiores números de *downloads* foram realizados pelos países: Estados Unidos, Etiópia, Tailândia, China e Dinamarca.

Figura 2A - Download do capítulo do livro cumulativo por país



Conclui-se que este capítulo está tendo uma boa aceitação em trabalhos de pesquisas voltados a estudos de otimização no sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar.