Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Dimensionamento operacional e econômico da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): modelo computacional como ferramenta de apoio a tomadas de decisão

João Henrique Mantellatto Rosa

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2017

João Henrique Mantellatto Rosa
Engenheiro Agrônomo

Dimensionamento operacional e econômico da colheita mecanizada de cana-de-açúcar
(*Saccharum spp*): modelo computacional como ferramenta de apoio a tomadas de decisão
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MARCOS MILAN**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Rosa, João Henrique Mantellatto

Dimensionamento operacional e econômico da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): modelo computacional como ferramenta de apoio a tomadas de decisão / João Henrique Mantellatto Rosa. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

95 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Indicadores de desempenho 2. Gestão 3. Mecanização 4. Simulador.
I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos, Maria Eduarda e Benício, dos quais furtei muitos momentos de lazer e companhia.

AGRADECIMENTOS

A **Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”** e todos seus docentes, pela formação acadêmica.

Ao professor e orientador **Marcos Milan**, pelos ensinamentos e paciência.

A **CAPES**, pelo apoio financeiro.

Ao **Condomínio Agrícola São João**, em nome de Nelson Antunes “**Junior**”, pelo fornecimento de dados e apoio no desenvolvimento do trabalho.

A **Organização dos Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil (ORPLANA)**, em nome de todas as associações que colaboraram com o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, “**Osso**” e “**Dona Cristina**”, por ensinarem os fundamentos da vida. Sempre presentes, tanto nos momentos de alegria como de tristeza.

A **Marisol**, pelo companherismo e dedicação na criação dos nossos filhos.

A todos os meus amigos e familiares, em nome de meu irmão, Juliano “**Aper-ta**”.

Ao **PECEGE**, pela oportunidades. Em especial: **Prof. Pedro, Daniel, Haroldo, Tati, Renan “Chumbão”, Arthur, Débora, Dani, Daiane, Fernanda, Julia e Érica.**

Obrigado

EPÍGRAFE

“Não se gerencia o que não se mede, não se mede o que não se define, não se define o que não se entende, ou seja, não há sucesso no que não se gerencia.”.

William Edwards Deming

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	10
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE SISTEMAS MECANIZADOS AGRÍCOLAS	20
2.2. MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADOS A SISTEMAS MECANIZADOS DE CANA-DE-AÇÚCAR	22
2.3. INDICADORES DE DESEMPENHO DO SISTEMA MECANIZADO DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1. DIMENSIONAMENTO OPERACIONAL	34
3.1.1. Corte.....	38
3.1.2. Transbordo.....	41
3.1.3. Transporte	45
3.1.4. Apoio	48
3.1.5. Operadores.....	49
3.2. DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO	49
3.2.1. Custos Fixos	51
3.2.1.1. Operadores.....	53
3.2.2. Custos Variáveis.....	54
3.2.2.1. Combustível.....	54
3.2.2.1.1. Corte.....	54
3.2.2.1.2. Transbordo	55
3.2.2.1.3. Transporte	56
3.2.2.2. Reparos e Manutenção.....	57
3.2.2.2.1. Corte.....	58
3.2.2.2.2. Transbordo.....	58
3.2.2.2.3. Transporte	59
3.2.2.3. Operadores.....	60

3.2.2.4. <i>Pneus</i>	60
3.3. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	69
4.1.1. <i>Validação dos Indicadores Operacionais</i>	70
4.1.1.1. <i>Corte</i>	70
4.1.1.1.1. <i>Capacidade de Trabalho</i>	70
4.1.1.1.2. <i>Consumo de Combustível</i>	73
4.1.1.2. <i>Transbordo</i>	75
4.1.1.3. <i>Transporte</i>	76
4.1.2. <i>Validação dos Indicadores Econômicos</i>	77
4.1.3. <i>Utilização do Modelo como Ferramenta de Apoio à Tomada de Decisão</i>	81
4.1.3.1. <i>Corte</i>	84
4.1.3.2. <i>Transbordo</i>	85
4.1.3.3. <i>Transporte</i>	86
5. CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS	91

RESUMO

Dimensionamento operacional e econômico da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): modelo computacional como ferramenta de apoio a tomadas de decisão

O sistema de colheita de cana-de-açúcar representa a conexão entre o campo e a indústria no complexo sucroenergético, exigindo uma sinergia operacional entre os agentes envolvidos. Sob a ótica econômica, é um dos principais, senão o principal, dispêndio da cadeia agroindustrial de produção de açúcar e etanol. Considerando o número de variáveis envolvidas, as diferentes naturezas das mesmas e as relações interdependentes observadas, seu gerenciamento é complexo, exigindo uma análise sistêmica. Nesse sentido, os modelos computacionais podem ser aplicados como ferramenta de gestão, permitindo o conhecimento prévio do desempenho dos sistemas e a possibilidade de desenvolver cenários para testar situações de interesse. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo em Excel® para o dimensionamento operacional e econômico de um sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar, contemplando os subsistemas de corte, transbordo, transporte e apoio e suas interrelações. Para a validação e a verificação do modelo utilizou-se de dados obtidos juntos a um condomínio agrícola, além de comparações com indicadores publicados na bibliografia. Com base nos resultados, afirma-se que o modelo pode ser utilizado como uma ferramenta de apoio em tomadas de decisão relacionadas ao sistema mecanizado de colheita.

Palavras-chave: Indicadores de desempenho; Gestão; Mecanização; Simulador

ABSTRACT

Operational and economical dimensioning of mechanized sugarcane (*Saccharum spp*) harvest: computational model as a support tool for decision making

The sugarcane harvesting system represents the connection between the field and the industry in the sugar-energy industry, demanding operational synergy between the involved agents. Under the economic point of view, it is one of the main, or indeed the main, expenditure of agroindustrial production chain of sugarcane and ethanol. Considering the number of variables involved, the different natures and the interdependent relationships observed, its management is complex, requiring a systemic analysis. In this matter, the computational models can be applied as a management tool, allowing prior knowledge of the systems performances and the possibility of developing scenarios in order to test situations of interest. Therefore, the aim of this study was the development of an Excel® model for the operational and economic design of a mechanical sugarcane harvesting system, contemplating the cutting subsystems, carry, transport and support and their interrelationships. For validation and verification of the model, data from real sources were used, obtained along with an agricultural condominium, besides comparisons with indicators published in the bibliography. Based on the results, the model can be used as a tool for decision-making related to mechanical sugarcane harvesting system.

Keywords: Performance indicators; Management; Mechanization; Simulator

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS¹

a	Coeficiente angular
AR	Área a ser colhida
ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
ASTA	Alojamento, seguros e taxas anuais
b	Coeficiente linear
CA	Critério de arredondamento
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CBO	Custo de bonificação de operadores
CMD	Capacidade de moagem diária
CC	Custo com combustível
CCB	Consumo de combustível
CCBE	Consumo de combustível específico
CCE	Capacidade de campo efetiva
CCO	Capacidade de campo operacional
CF	Custo fixo
CFA	Custo fixo anual
CIC	Capacidade individual de carga
CMD	Capacidade de moagem diária
COP	Custo operacional
CP	Custo com pneus
CPn	Custo com pneus novos
CPr	Custo com pneus recapados
CPO	Capacidade de produção operacional
CPOr	Capacidade de produção operacional real
CPOd	Capacidade de produção operacional diária
CPOdr	Capacidade de produção operacional diária real
CRA	Critério de arredondamento
CRM	Custo de reparos e manutenção
CT	Custo total
CTC	Capacidade total de carga

¹ Dependendo da natureza da variável, a sigla pode ser seguida de: “c” – corte ou colhedora; “tb” – transbordo; “t” – caminhão; “a” – apoio; “Sc” – sistema de colheita; “tr” – trator; “cr” – carroceria; “cc” – caminhão; “of” – oficina; “pp” – bombeiro; “cb” – comboio.

CV	Custo variável
DIs	Data de início de safra
DFs	Data de fim de safra
DP	Distância até ponto de descarregamento médio
DPi	Distância até ponto de descarregamento no percurso de ida
DPv	Distância até ponto de descarregamento no percurso de volta
DPA	Depreciação anual
DPS	Distância percorrida na safra
DPSc	Distância percorrida na safra por conjunto de transporte
DSe	Dias de safra efetivos
DSt	Dias de safra totais
DSui	Dias de safra úteis impróprios
DUPn	Durabilidade dos pneus novos
DUPr	Durabilidade dos pneus recapados
EF	Eficiência de campo
EFg	Eficiência gerencial
EFt	Equipamentos o por frente
ESP	Espaçamento de plantio
FAST	Fator de alojamento, seguros e taxas
FCP	Fileiras colhidas por passada
FNQ	Fundação Nacional da Qualidade
HTe	Horas trabalhadas por equipamento
HTT	Horas de trabalho por turno
i	Taxa de juros
IGP-DI	Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna
INV	Investimento
JRA	Juros anuais
JT	Jornada de trabalho
L	Largura de trabalho
MPT	Manutenção Produtiva Total
MR	Moagem realizável
N	Número de conjuntos
Na	Número de equipamentos por frente de apoio
Ni	Número de conjuntos inteiro

NDF	Número de domingos e feriados
NF	Número de frentes
NOP	Número de operadores
NOPt	Número de operadores por turno
NP	Número de pneus por veículo
NT	Número de turnos por dia
NUC	Número de unidades de carga por conjunto
NUCt	Número de unidades de carga total
OPA	Operadores anual
PA	Produtividade agrícola
PAlq	Produtividade agrícola líquida
PCA	Preço da cana-de-açúcar
PEc	Perdas na colheita
PECEGE	Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas
PEm	Perdas monetárias
PIB	Produto Interno Bruto
PL	Preço do combustível
PM	Planejamento de moagem
PotM	Potência do motor
QMP _r	Quantidade de matéria prima a ser produzida
RO	Ritmo operacional
RP	Número de recapagens por pneu
RTC	Relação transporte por colhedora
RTC _r	Relação transporte por colhedora real
RTbC	Relação transbordo por colhedora
RTbC _r	Relação transbordo por colhedora real
SFO	Salário fixo com encargos de operadores
SVO	Salário variável de operadores, R\$ t ⁻¹ ;
TC	Tempo de ciclo
TCarr	Tempo de carregamento
TD	Tempo disponível
TDescarg	Tempo de descarregamento
TDeslo	Tempo de deslocamento
TWh	Terawatt-hora

V	Velocidade de trabalho
VT _c	Velocidade de trabalho carregado
VT _v	Velocidade de trabalho vazio
VF	Valor final
VI	Valor inicial
VI	Valor inicial unitário
VUA	Vida útil anual
VUA _p	Vida útil anual projetada
VUE	Vida útil estimada
VUP _n	Valor unitário dos pneus novos
VUP _r	Valor unitário da recapagem
UNICA	União da Indústria da Cana-de-Açúcar

1. INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético brasileiro abrange a cadeia agroindustrial de produção de açúcar, etanol e bioeletricidade, tendo como fonte de matéria-prima a cana-de-açúcar. Na safra 2015/2016 cerca de 620 milhões de toneladas de cana foram processadas, com uma produção de aproximadamente 34 milhões de toneladas de açúcar e 30 bilhões de litros de etanol, além da geração de 20 TWh² de energia elétrica, o que equivale a 4,3% do consumo nacional. Tais valores colocam o Brasil no patamar de maior produtor e exportador de açúcar com, respectivamente, 20% e 40% do total, e segundo maior produtor e exportador de etanol, com 25% e 20% do total, respectivamente, atrás somente dos Estados Unidos³. Ademais, a produção da bioeletricidade, juntamente com as demais fontes de energia, especialmente a hídrica, confere ao país uma matriz energética sustentável, com cerca de 40% dos recursos renováveis (UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA, 2016).

Ainda que nos últimos anos o cenário econômico para a atividade não tenha sido dos mais favoráveis, com muitas unidades encerrando operações por dificuldades financeiras, o setor teve um dos maiores indicadores de Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio, com movimentação estimada de R\$ 113,27 bilhões em 2015 (CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA, 2016). Atualmente, o país conta com cerca de 370 unidades de processamento de cana-de-açúcar e mais de 1.000 municípios com atividades vinculadas ao segmento sucroenergético, gerando cerca de 950 mil empregos formais diretos, sem contar os produtores independentes da matéria-prima, que passam de 70 mil.

No âmbito da produção agrícola, o sistema de cultivo passou por modificações importantes na última década, especialmente no que diz respeito a mecanização das operações. Especificamente para a colheita, o aumento da mecanização foi expressivo, em função das restrições legais quanto à queima da cana, crescente escassez de mão-de-obra, exigências em relação a condições de trabalho, além de novos investimentos em bioeletricidade. Considerando o centro-sul⁴ canavieiro, região que responde por 92% da produção de cana-de-açúcar, o percentual de colheita mecanizada passou de 28% em 2000 para 97% em 2015 (UNICA, 2015).

Dentre as máquinas disponíveis para se colher mecanicamente, as colhedoras autopropelidas de cana-de-açúcar⁵, ou popularmente denominadas de colhedoras de cana picada,

² Terawatt-hora.

³ Produção em 2015 de cerca de 50 bilhões de litros de etanol, tendo como matéria-prima o milho.

⁴ Compreende os estados de: Espírito Santo, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo.

⁵ Terminologia técnica com base em Gadanha Júnior et al. (1991).

são as mais utilizadas, principalmente devido ao número de etapas que realizam, já que promovem o corte e a limpeza parcial da matéria-prima, além de fracionar os colmos em rebolos, aumentando a densidade de carga para o transporte. Ainda que a máquina seja relativamente completa em termos de corte, a chegada da cana na usina depende de fatores intermediários, representados pelas etapas de transbordo e transporte. Além disso, nas frentes de colheita uma estrutura de apoio é necessária, visando garantir a segurança e manutenção dos equipamentos em operação.

Nota-se, portanto, que a colheita de cana-de-açúcar se trata de um sistema, composto de um conjunto de subsistemas que interagem de modo a atingir um objetivo comum, nesse caso, a retirada da matéria-prima do campo e sua entrega até a unidade industrial para o processamento. Considerando que a fabricação de açúcar e etanol é contínua durante o período de safra, o elevado valor imobilizado em termos de infraestrutura e que a cana se deteriora à medida que aumenta o tempo entre o corte e a moagem, a sinergia operacional do sistema de colheita é fundamental.

Ademais, na análise econômica da cultura, a colheita é o principal componente do custo operacional de produção, correspondendo a cerca de 40% do total. Ao considerar que a matéria-prima representa em torno de 60% de custo de produção do açúcar e etanol, observa-se que a colheita é um dos maiores, senão o maior, dispêndio da cadeia sucroenergética como um todo, representando cerca de 25% dos desembolsos operacionais (PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS – PECEGE, 2016).

O planejamento de um sistema de colheita é complexo, tendo em vista o elevado número de variáveis envolvidas, as diferentes naturezas das mesmas e as relações entre elas. A alteração em uma determinada variável pode afetar várias outras, modificando a atividade operacional e econômica do sistema como um todo. Portanto, uma análise sistêmica, de forma a conhecer as variáveis envolvidas bem como suas relações, é fundamental para o planejamento e gerenciamento do processo. Nesse sentido, a utilização de modelos computacionais como ferramenta de gestão traz vantagens que derivam do conhecimento prévio do desempenho dos sistemas e da possibilidade de avaliar cenários para testar situações de interesse.

Na bibliografia existem diversos trabalhos que relatam a utilização de modelos aplicados ao planejamento e gerenciamento de sistemas de colheita de cana, tratando, entretanto, os subsistemas de forma isolada, sem a integração das etapas e respectivas variáveis do corte, transbordo, transporte e apoio. Além disso, os trabalhos que contemplam o sistema de colheita como um todo são raros e relativamente antigos.

Tendo em vista as evoluções nos últimos anos no cenário de produção de cana, o conhecimento e avaliação das relações entre as variáveis operacionais e econômicas desse cenário é fundamental para a gestão da atividade. Considerando o potencial do uso dos modelos para a

análise de sistemas, o objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo computacional para o dimensionamento operacional e econômico de um sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar, contemplando as relações entre os subsistemas de corte, transbordo, transporte e apoio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Independente da cultura, diversas são as formas de se promover a colheita do material desejado, sendo que para Ripoli & Ripoli (2009), um sistema de colheita é definido por fatores fisiológicos, sociais, tecnológicos e econômicos. Ainda que os autores listem diferentes aspectos, todos eles acabam por direcionar no final a uma análise econômica, determinando a viabilidade do sistema proposto.

Os sistemas de colheita podem ser divididos em manual, semi-mecanizado e mecanizado, sendo que como os próprios termos sugerem, diferenciam-se de acordo com a participação de máquinas no processo. Especificamente para o sistema mecanizado, todas as etapas da colheita são feitas a partir de máquinas (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

Diversos são os fatores que podem influenciar no desempenho de um sistema mecanizado. Ripoli & Ripoli (2009), discorrendo sobre a capacidade operacional de colhedoras de cana, distribuem esses fatores em três classes, “campo”, “administrativo” e “máquina”. Os aspectos relacionados a campo podem ser traduzidos em condições de trabalho em nível de lavoura, podendo-se citar, variedade, porte da cultura, condições do preparo de solo, clima, declividade do terreno, entre outros. Os fatores de ordem administrativa, dizem respeito a aspectos gerenciais e de planejamento, como jornada de trabalho, condições de reparos/manutenções e aptidão de operadores, por exemplo. Por fim, os pontos relacionados ao fator “máquina” tratam de questões relacionadas às características dos equipamentos, como centro de gravidade da máquina, largura de trabalho, eficiência de campo, potência, consumo de combustível, rodado, entre outros.

Para Meyer (1997), a seleção de um sistema mecanizado de colheita de cana deve levar em conta os seguintes fatores: custo de capital, abrangendo aspectos relacionados à parte financeira, como estrutura de financiamento, implicações fiscais, tomadas de decisão quanto à aquisição e/ou renovação de frota; qualidade da cana, direcionada no sentido de avaliação de perdas, matéria-estranha na carga e deterioração da matéria-prima; operadores, contemplando treinamento, segurança, políticas sociais e custos; sistema de transporte, sendo tipos de máquinas a serem empregadas, capacidade de carga, raio médio e compactação do solo; desempenho das colhedoras em função do estado do canavial, podendo ser elencados produtividade, variedade, condições de queima, presença de plantas daninhas e irrigação, porte ereto ou acamado, declividade do terreno, umidade do solo, configuração do talhão e janela de operação; custos dos maquinários, determinado a partir de habilidade do operador, serviço de pós-venda, aspectos de utilização direta, como tempo de operação, consumo de combustível e horas trabalhadas, por exemplo e,

configuração técnica da máquina; aspectos administrativos, como treinamento, segurança, instalações de serviço e gerenciamento eficiente.

Assim como ocorre para qualquer atividade agrícola, o sistema está condicionado a aspectos controláveis e não controláveis, impactando, conseqüentemente, no funcionamento do sistema. Os fatores não controláveis estão atrelados, principalmente, a condições climáticas, enquanto que os fatores controláveis, por sua vez e como o próprio termo diz, são fatores passíveis de modificação, respeitando-se, evidentemente, certo nível de interferência específico.

Para Milan (2004), o gerenciamento das operações relacionadas à atividade agrícola é relativamente complexo em função, principalmente, do grande número de variáveis envolvidas e das diferentes naturezas das mesmas, já que envolve áreas de biologia, engenharia e economia, tornando essencial a necessidade de um planejamento eficiente, cuja abrangência básica deve contemplar o dimensionamento e seleção dos equipamentos, bem como a previsão de custos dos mesmos.

Nesse sentido, Silva et al. (2011) destacam que as tomadas de decisão podem ser auxiliadas pela utilização de modelos computacionais, cujas vantagens derivam do conhecimento prévio do desempenho dos sistemas e da possibilidade de manipular cenários para testar situações de interesse.

Assis (2004) relata que o desenvolvimento de novos modelos e a utilização ou compreensão das limitações dos atuais, permite a percepção antecipada de problemas ainda não identificados, além de viabilizar, através de simulação, a criação de cenários alternativos, possibilitando o entendimento e funcionamento em situações atípicas ou em níveis não vivenciados na prática, alertando o pesquisador para novas alternativas de pesquisas futuras ou ainda, para a realização de ensaios científicos mais elaborados, reduzindo gastos e desgastes.

2.1. Modelagem e Simulação Computacional de Sistemas Mecanizados Agrícolas

A utilização de modelos computacionais acompanhou, de certa forma, a disseminação do uso de computadores, cujos primeiros registros de trabalhos dedicados datam no início da década de 1970 (MILAN, 2004).

Bochtis, Sørensen & Busato (2014) realizaram uma revisão sobre os avanços na gestão de máquinas agrícolas e apresentam as investigações mais recentes sobre o tema. No total, são elencados 31 trabalhos desde o início da década de 2000 até meados de 2013, segmentados pelos autores em cinco grandes temáticas no âmbito da gestão de sistemas mecanizados: planejamento da capacidade, que trata da seleção qualitativa e quantitativa dos componentes de produção em

relação a determinada demanda; planejamento dos tempos operacionais, que diz respeito a quantidade de tempo disponível para realização das operações; alocação dos recursos para realização das operações nos períodos de tempos definidos; otimização dos trajetos das máquinas agrícolas durante as operações; avaliação do desempenho dos equipamentos no campo, objetivando, sobretudo, o comparativo entre o planejado e o executado.

Busato (2014), discutindo os desafios da gestão da colheita mecanizada de arroz desenvolveu um modelo de simulação dedicado, utilizando a representação matemática para avaliação dos parâmetros de desempenho e demonstrar o potencial da ferramenta na gestão da atividade. O modelo foi desenvolvido na plataforma ExtendSim, um software dedicado a modelagem de sistemas discretos, contínuos e mistos. Segundo a autoria, os resultados na validação do modelo foram satisfatórios, com erro na predição dos parâmetros operacionais variando de 2,59% a 3,12%.

Para Akinnuli et al. (2014), a seleção de máquinas é um elemento vital no planejamento da implementação e operação de serviços agrícolas, independente da escala de produção. Para tanto os autores desenvolveram um modelo matemático cujo objetivo era obter a melhor combinação entre trator e implemento, visando, sobretudo, a otimização econômica da operação. Estruturado na linguagem Quick-Basic, o modelo utiliza as seguintes variáveis operacionais na memória de cálculo: potência do trator, condições do solo, tipos de solo, velocidades de trabalho, eficiência de campo e largura do implemento. No aspecto econômico são utilizados os seguintes parâmetros: valor inicial, valor residual, vida útil e perdas por pontualidade. Dentre as discussões os autores concluem que o modelo pode ser utilizado como ferramenta de apoio a tomadas de decisão.

Najafi & Dastgerduei (2015), desenvolveram um modelo em programação linear para determinar os custos de pontualidade na utilização de máquinas e seus efeitos nas receitas dos agricultores. O estudo foi motivado pelo perfil de utilização e posse de máquinas pelos produtores, contrastando com valores de escala de produção no cultivo de trigo, arroz, cevada, beterraba açucareira e colza. Os resultados indicaram uma lacuna entre os padrões de cultivo existentes e os considerados ótimos pelo modelo, sendo recomendado aquisição de tratores para produtores com mais de 10 hectares e uso compartilhado, por meio de terceirização de serviço, para módulos inferiores a este.

Zhou (2015) desenvolveu um modelo computacional utilizando o software MATLAB, integrado com GPS para aquisição de dados reais, com o objetivo de melhorar o desempenho operacional e econômico de máquinas agrícolas na produção de batata. Aplicado a título de validação em 4 campos experimentais e com acompanhamento de 5 operações mecanizadas, a precisão do modelo pode ser considerada satisfatória no que diz respeito a previsibilidade das

eficiências e capacidades de campo, com erros entre 0,46% e 4,84% e 0,72% a 6,06%, respectivamente. O autor destaca ainda que o modelo pode ser empregado como ferramenta de apoio no planejamento e dimensionamento operacional e econômico de sistemas mecanizados.

Yousif (2016), com o objetivo de estimar custos de reparos e manutenção de tratores agrícolas, desenvolveu um modelo matemático dedicado. O autor utilizou dados de compra dos maquinários, horas de trabalho anual, consumo de combustível, custos de reparos e manutenção, salários de operadores e preço do combustível. Os resultados revelaram relação significativa entre as horas de utilização dos equipamentos e os custos de reparos e manutenção, por sua vez, relacionados com o preço de compra dos equipamentos.

Cunha et al. (2016) utilizou a metodologia de superfície de resposta (MSR) e desenvolveu modelos para verificar a influência de variáveis como velocidade, comprimento médio de entrelinhas e declividade das áreas no desempenho operacional de operações mecanizadas na cafeicultura, no caso, colheita, varrição e enleiramento. Dentre as conclusões os autores destacam que a MSR se mostrou como importante ferramenta para verificar o efeito das variáveis nos parâmetros de desempenho, além de que os modelos gerados apresentaram alta significância.

ZakiDizaji, Bougari & Khorasani (2016), desenvolveram um modelo para simulação dos custos operacionais da colheita mecanizada de trigo. A estrutura de cálculo é fundamentada em três segmentos: a determinação das horas de trabalho, o nível de perdas na colheita e o cálculo econômico. De acordo com os autores, o planejamento e escalonamento das operações de colheita são importantes principalmente para produções de maior escala, tendo em vista as perdas por pontualidade. Para a região do estudo, as menores perdas na colheita foram de até 4 dias após a maturação fisiológica da cultura. É destacado ainda que apesar do custo crescente com o atraso da colheita, dependendo da escala, não se justifica a aquisição de uma nova máquina, sendo o aluguel de equipamentos a alternativa mais viável.

2.2. Modelagem e Simulação Computacional Aplicados a Sistemas Mecanizados de Cana-de-açúcar

Para Milan (1992), o sistema de cultivo de cana-de-açúcar pode ser descrito basicamente por quatro subsistemas e suas interações, sendo agronomia, colheita, transporte e mecanização. A partir dessas relações, o autor desenvolveu um modelo em linguagem Fortran 77, de modo a identificar os fatores críticos e estratégias gerenciais dos equipamentos envolvidos. Dentre as conclusões, foi verificado, a partir de uma análise de sensibilidade, que as características relacionadas ao transporte, em especial ao caminhão, são as de maior impacto, principalmente as

variáveis “valor inicial” e “capacidade de carga”. O trabalho integra as etapas do sistema de colheita como um todo.

Singh & Pathak (1994) desenvolveram um simulador para auxiliar o gerenciamento do sistema mecanizado de cana-de-açúcar na Tailândia. O sistema, denominado “DSS”, é composto de dois módulos integrados, que avaliam os custos de colheita e permitem a identificação das participações relativas dos itens que compõe o custo, inclusive com a possibilidade de simulação em diferentes cenários, determinando ainda, o número de caminhões necessários para atender a colhedora. Para determinação dos custos, os autores consideram os seguintes itens: vida útil, valor residual (10% do valor inicial), taxa de juros anual, taxa de alojamento e impostos, custo com lubrificantes, custo com reparos e manutenção, consumo de combustível, preço do combustível, número de operadores, salário dos operadores, número de mecânicos e salário dos mecânicos. No caso do cômputo de caminhões necessários, os fatores considerados foram: velocidade média, tempo de espera para descarregamento da cana na usina e capacidade de carga do caminhão.

Higgins et al. (1998) ressaltam que a unidade processadora de cana-de-açúcar tem uma capacidade limitada, não sendo possível, portanto, o processamento simultâneo de toda matéria-prima quando os rendimentos máximos são atingidos. Para os autores, época e idade de colheita, variedade, tamanho de áreas e capacidade das frentes de colheita, são alguns dos fatores que podem influenciar a produção da cana e, conseqüentemente, nos custos dos produtos finais, sendo que, de modo a otimizar a produção de açúcar e a receita líquida da atividade, os autores desenvolveram um modelo computacional baseado em programação linear. Para as condições do estudo, o modelo indicou a possibilidade de aumento 8% na rentabilidade da atividade.

Barnes et al. (1998), analisando o sistema de colheita de cana, com o objetivo específico de verificar formas de reduzir atrasos na entrega da matéria-prima, desenvolveram um modelo de simulação no software Arena. Os resultados da análise de sensibilidade indicaram que reduções nos atrasos de moagem são possíveis através do escalonamento dos horários de queima e, conseqüentemente, das quantidades de matéria-prima entregues. Os autores destacam que apesar de óbvios, os resultados servem para fundamentar a importância de estudos na área, em especial quanto ao desenvolvimento de novos modelos, integrando cada vez mais partes do sistema.

Salassi et al. (1998), visando comparar três diferentes sistemas de colheita mecanizada de cana-de-açúcar (colhedora de cana inteira – 1 fileira; colhedora de cana inteira – 2 fileiras; colhedora de cana picada), desenvolveram um modelo computacional, em Quattro Pro 6.01 (Novell) para Windows (Microsoft), que estima a quantidade de máquinas necessárias para uma dada situação de colheita, bem como verificam os custos envolvidos na operação. A determinação do número de equipamentos é realizada a partir da relação entre a demanda de cana e o desempenho de

equipamentos, este determinado em duas unidades de medida básicas, toneladas por hora e hectares por dia. No que diz respeito a custos, os cálculos são feitos com base na divisão clássica entre custos fixos e variáveis. Apesar de ser um trabalho que contempla todas as etapas do sistema de colheita mecanizado, algumas entradas de dados foram computadas de forma simplificada, o que pode distorcer os resultados obtidos com os resultados em nível de campo. Ainda assim, destaca-se a importância do trabalho no sentido elaborar uma estrutura que integre as etapas do sistema de colheita, fato este não muito comum considerando os modelos aplicados ao tema.

Salassi, Champagne & Legendre (1999), com o intuito de melhorar a rentabilidade da atividade de cana-de-açúcar, desenvolveram um modelo de programação linear de forma a estabelecer uma sequência dos talhões a serem colhidos, otimizando a produção de açúcar. Para tanto os autores utilizaram estimativa temporais em relação ao crescimento vegetativo e acúmulo de sacarose em função de data e idade da cultura. Segundo os autores, o modelo apresenta grande potencial como ferramenta de gestão e que o maior desafio está, na verdade, na qualidade dos dados, onde é sugerido o desenvolvimento e integração de ferramentas de agricultura de precisão de forma a auxiliar no apontamento dos dados.

Díaz & Pérez (2000), com o objetivo de identificar gargalos logísticos no transporte de cana-de-açúcar e oferecer soluções integrais para tais, apoiando tomadas de decisão, desenvolveram um sistema de simulação com técnicas de otimização e superfícies de resposta. No estudo os autores listam pelo menos 18 variáveis relacionadas ao sistema, estas podendo ser de natureza controlável ou não.

Arjona et al. (2001) relatam que o corte e transporte da cana-de-açúcar são complexos e demandam um planejamento diário de áreas a serem colhidas, destacando ainda, que a operação ocorre simultaneamente em talhões separados, muitas vezes distantes, o que torna difícil o compartilhamento das máquinas envolvidas, diminuindo, consequentemente, a eficiência de campo e demandando um maior número de conjuntos. Nesse sentido, com o objetivo de reduzir o número de máquinas necessárias, bem como verificar se o desempenho das mesmas é suficiente para pagar os custos com financiamento envolvidos, visto as elevadas taxas de inflação e financiamento no México, os autores desenvolveram um modelo de simulação discreta de um sistema de colheita de cana, abrangendo todos os aspectos a partir da queima da matéria-prima até seu posterior descarregamento na unidade industrial. O modelo, denominado SIMACT, não trabalha em detalhes com as variáveis dos sistemas de colheita em questão, abordando uma visão mais abrangente do processo, sob a ótica de fluxos de matéria-prima, sendo considerados basicamente dados de quantidades (de cana disponível para colheita, de cana colhida, de cana colhida por colhedora, de cana carregada por uma carregadora, de cana transportada por um caminhão) e

tempos (de processamento de cana, perdidos por chuva, de caminhões na lavoura esperando; de carregamento de caminhões; de ida e volta de caminhões do talhão ao pátio da usina; de espera dos caminhões no pátio da usina). Dentre as conclusões, o modelo sugere que é possível manter a mesma quantidade de cana processada, empregando menos conjuntos mecanizados na colheita, desde que sejam melhoradas as eficiências de uso.

Yamada, Porto & Inamasu (2002), avaliaram a aderência dos conceitos de modelagem e de rede de Petri ao complexo agroindustrial de cana-de-açúcar. O estudo resultou em 14 conjuntos de etapas de produção, englobando desde o plantio da cana até o armazenamento dos produtos finais, no caso açúcar e etanol.

Para Iannoni e Morabito (2002), os sistemas logísticos são fundamentais para melhoria da eficiência das unidades sucroenergética, visto que atuam na integração das operações agrícolas e industriais. Neste sentido, com o objetivo de analisar o sistema de recepção de cana – da balança até a moenda – de uma unidade sucroenergetica localizada na região de Ribeirão Preto, os autores utilizaram o software Arena, buscando, sobretudo, investigar configurações e políticas alternativas para a operação do sistema. Dentre as conclusões, os autores destacam que o modelo é capaz de representar de forma satisfatória o sistema, revelando, sobretudo, as melhores alternativas, dependendo da ótica operacional que se deseja.

De acordo com Higgins & Davies (2005), a eficiência no transporte de cana-de-açúcar pode ser melhorada por meio da extensão diária da janela de colheita, redução do número de colhedoras e investimento ou adaptação de infra-estrutura em questão. Considerando que o principal tipo de transporte de cana-de-açúcar na Austrália é ferroviário, os autores desenvolveram um modelo de planejamento de transporte de modo a estimar: i) o número de locomotivas e mudanças necessárias; ii) o número de vagões necessários e; iii) os atrasos para a operação de colheita resultante do sincronismo irregular entre colhedoras e vagões de transporte. No modelo, os principais pontos considerados foram: a) número de colhedoras e respectivas áreas atendidas pelas mesmas; b) janela diária de colheita; c) sequência dos ramais de transporte e; d) número e localização dos pontos de manobra. A partir do cenário proposto, o modelo indicou que a melhor eficiência do sistema de transporte pode ser alcançada a partir de uma jornada de trabalho de 18 horas, com janela de colheita iniciando as 03:00 horas e finalizando as 21:00 horas.

Silva (2006), com o intuito de avaliar cenários para entrega contínua de matéria-prima mediante jornadas de trabalhos inferiores a dez horas por turno com a mesma frota de equipamentos, desenvolveu um modelo de simulação das operações de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar. Ainda que o escalonamento tenha sido considerado satisfatório apenas para as condições de cana inteira, por meio de simulação, foi possível verificar que a

alternância de turnos de quatro horas teve o melhor desempenho, balanceando jornadas, produções por tipo de cana e risco de falta de matéria-prima. As análises levaram em conta apenas aspectos técnicos, sendo sugerido pelo autor na época, a integração de informações de custos.

Para Carreira (2007), o desafio no transporte de cana-de-açúcar está associado a prazos de entrega, qualidade, custos e energia despendida, sendo que de modo a avaliar a influência das variáveis envolvidas no sistema, o autor desenvolveu um modelo em planilha eletrônica. Dentre os resultados, o autor destaca que o desempenho operacional do transporte é extremamente variável em função, principalmente, dos tempos de carregamento e descarga da matéria-prima, estes, por sua vez, influenciados pelo modo de operação da composição.

Mundim (2009) desenvolveu uma ferramenta computacional baseada em simulação estocástica, com o objetivo de representar o despacho de caminhões para o transporte de cana-de-açúcar de cana-de-açúcar, tanto pelo método de despacho estático como dinâmico, cuja diferença está na flexibilidade de viagens entre as frentes de colheita. A utilização do modelo permitiu concluir, para as condições propostas, que os menores custos operacionais estão atrelados ao despacho dinâmico. O modelo foi capaz de mostrar como as decisões logísticas afetaram a produtividade da frota e, conseqüentemente, o custo do sistema, sendo destacado pelo autor a flexibilidade do modelo.

Silva et al. (2011), de modo a auxiliar as tomadas de decisão em torno da logística de entrega de cana, diminuindo com isso os riscos de parada para a indústria de açúcar e etanol, desenvolveram um modelo de simulação discreta para a determinação de turnos de trabalhos dos operadores de equipamentos agrícolas de uma usina no Estado de São Paulo. No modelo foram considerados os requisitos de moagem, o risco da falta de matéria-prima e o limite permitido das jornadas de trabalho, sendo realizados ainda quatro cenários de avaliação. Os autores verificaram que dentre os principais fatores que condicionam as operações do sistema de CCT, o “pátio de cana” foi o de maior influência, visto que regula o cálculo de cotas de matéria-prima a serem entregues e, conseqüentemente, as jornadas de trabalho dos operadores e motoristas.

Silva (2012), com o propósito de simular e analisar as etapas de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar para o planejamento da produção na indústria sucroalcooleira, desenvolveu módulos de roteirização em arco no TransCAD. Considerou-se no trabalho fatores como a geometria e o tamanho dos talhões, pontos de manobra e de transferência de carga e os ciclos operativos, buscando-se otimização do processo de colheita e conseqüente redução de custos operacionais. Segundo a autora, os resultados obtidos foram satisfatórios, afirmando que a configuração de rotas configuradas no sistema de colheita de cana-de-açúcar pode ser considerada uma ferramenta útil no planejamento operacional de uma unidade sucroenergética.

Oliveira (2012), estudando as interrelações operacionais e econômicas do sistema de plantio mecanizado de cana-de-açúcar, desenvolveu um modelo computacional em planilha eletrônica. Dentre as conclusões, a autora destaca que a capacidade de carga da plantadora foi a que apresentou o maior impacto nos custos operacionais, reforçando ainda que as variáveis eficiência operacional, velocidade de trabalho, distância de ciclo e velocidade de transporte devem ser acompanhadas no detalhe, visto o potencial de redução do custo operacional.

Ramos (2014), buscando otimizar o planejamento de plantio e colheita de cana-de-açúcar, desenvolveu dois modelos matemáticos. O modelo inicial preconizava a divisão otimizada da área de plantio em talhões, visando o máximo rendimento da colhedora de cana-de-açúcar, enquanto que o segundo tinha por objeto a escolha da variedade para cada talhão, com intuito de se obter a maior produção em quatro cortes por meio da indicação da época de plantio. A alocação dos talhões sugerida pela ferramenta, permitiu uma redução de mais de 40% no número de manobras das colhedoras quando comparado aos processos tradicionais, além de apresentar uma estimativa de produção de quase 18% a mais que a produção convencional.

Santos et al. (2014), com o objetivo de avaliar, de modo sistêmico, a influências das variáveis envolvidas no desempenho operacional e econômico da colheita mecanizada de cana, desenvolveu um modelo, em planilha eletrônica (Excel®) e linguagem de programação (Visual Basic®), denominado “ColheCana”. O autor verificou que a colhedora de cana é o equipamento que mais impacta no sistema, destacando ainda que as variáveis “eficiência de campo” e “valor inicial” são maior importância em termos de custos operacionais.

2.3. Indicadores de Desempenho do Sistema Mecanizado de Colheita de Cana-de-açúcar

Segundo a Fundação Nacional da Qualidade – FNQ (2016), indicadores de desempenho se traduzem em informações quantitativas ou qualitativas que expressam a performance de um determinado processo, permitindo acompanhar sua evolução ao longo do tempo e compará-lo com outras organizações. Ainda de acordo com a organização, a principal característica de um indicador é que ele permite a comparação em relação à uma série histórica, referencial de desempenho, compromisso assumido e meta.

Apontamentos inadequados e falta de padronização de metodologia são os principais desafios quando se trabalha com indicadores. Além disso, o acesso às informações pode ser restrito, visto que muitas unidades, por questões de política da empresa, não compartilham informações, especialmente as de cunho econômico.

Sobre indicadores na colheita mecanizada de cana-de-açúcar, ainda que as primeiras máquinas para corte de cana tenham sido introduzidas no Brasil na década de 1950, a intensificação da mecanização da colheita se deu a partir de meados dos anos 2000, trazendo, consequentemente, mudanças nos indicadores de desempenho, cujas discussões passaram a ser focadas na performance das máquinas envolvidas no processo. Diversos trabalhos foram conduzidos neste sentido, especialmente para as colhedoras, conforme Rosa (2013). Estas referências tratam, entretanto, do desempenho das máquinas mais sob a ótica de capacidade efetiva, com avaliações em torno do potencial dos equipamentos em diferentes condições, e não do acompanhamento dos indicadores em nível de campo propriamente dito.

A seguir são referenciados trabalhos que apresentam parâmetros de desempenho na colheita de cana-de-açúcar e cuja abordagem se dará mais no sentido de elencar os indicadores de performance associados ao sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar do que discutir valores de referência propriamente dito.

Pinto (2002), em um dos primeiros trabalhos desenvolvidos no Brasil sobre parâmetros de desempenho na colheita mecanizada de cana-de-açúcar, propõe os seguintes indicadores para acompanhamento: operacionais – produtividade média dos caminhões ($\text{t dia caminhão}^{-1} \text{ km}^{-1}$), cana carregada por carregadora por dia efetivo de safra ($\text{t dia carregadora}^{-1}$), cana colhida por colhedora de cana por dia efetivo de safra ($\text{t dia colhedora}^{-1}$), cana colhida por cortadora de cana por dia efetivo de safra ($\text{t dia cortadora}^{-1}$); dimensionamento – número de equipamentos motorizados por área de cana colhida ($\text{equipamento } 10^{-3} \text{ ha}$), consumo de combustível ponderado por distância média (L km ha^{-1}), motores retificados por ano (%); analítico-descritivos – idade média dos equipamentos automotrizes (anos), idade média dos veículos (anos), idade média das máquinas (anos), terceirização dos equipamentos motorizados (%), plantio mecanizado de cana (%) e colheita mecanizada de cana (%).

Araújo (2002), ao estruturar uma proposta de indicadores da função de motomecanização aplicados a uma usina de açúcar e etanol, apresenta os seguintes parâmetros: horas trabalhadas por veículos, distância (km) percorrida por veículos, taxa de indisponibilidade (%), horas ociosas, consumo de combustível (km L^{-1}) e custo operacional da frota ($\text{R\$ km}^{-1}$, $\text{R\$ h}^{-1}$).

Carreira (2007), avaliando o impacto das variáveis no desempenho operacional, econômico e energético de um sistema de transporte de cana-de-açúcar, elenca os seguintes parâmetros como principais para este subsistema: velocidade média na estrada, carga transportada por viagem, distância percorrida, tempo de carregamento, tempo de descarregamento e consumo de combustível.

Neves (2011), avaliando a metodologia “Manutenção Produtiva Total – (MPT)” apresenta os seguintes parâmetros como indicadores gerenciais do sistema mecanizado de colheita: capacidade operacional das colhedoras ($t \text{ dia}^{-1}$), capacidade operacional dos sistemas motomecanizados de transbordo ($t \text{ dia}^{-1}$), perdas visíveis na colheita mecanizada (%), consumo de combustível das colhedoras ($L \text{ t}^{-1}$), consumo de combustível dos tratores dos sistemas mecanizados de transbordo ($L \text{ t}^{-1}$), disponibilidade das colhedoras (%) e disponibilidade dos sistemas mecanizados de transbordo (%).

O Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial Ltda – IDEA (2012), em uma das mais detalhadas publicações sobre indicadores de desempenho na agroindústria canavieira, apresenta os seguintes parâmetros no que diz respeito a mecanização, transporte e manutenção de frota do setor sucroenergético: produtividade média dos caminhões canavieiros ($t \text{ caminhão dia}^{-1}$), cana transportada por cavalo mecânico canavieiro na safra ($t \text{ cavalo mecânico dia}^{-1}$), cana transportada por conjunto rodotrem por dia efetivo de safra ($t \text{ rodotrem dia}^{-1}$), cana transportada por treminhão por dia efetivo de safra ($t \text{ treminhão dia}^{-1}$), cana transportada por biminhão por dia efetivo de safra ($t \text{ biminhão dia}^{-1}$), cana transportada por caminhão solteiro por dia efetivo de safra ($t \text{ caminhão solteiro dia}^{-1}$), cana carregada por carregadora de cana por dia efetivo de safra ($t \text{ carregadora dia}^{-1}$), cana colhida por colhedora de cana picada por dia efetivo de safra ($t \text{ colhedora dia}^{-1}$), cana transbordada por dia efetivo de safra ($t \text{ transbordo dia}^{-1}$), equipamentos motorizados por 1.000 ha cortados de cana-de-açúcar, motoniveladoras por 1.000 ha cortados de cana-de-açúcar, caminhões canavieiros por 1.000 ha cortados de cana-de-açúcar, carregadoras de cana por 1000 ha de cana-de-açúcar cortados manualmente, colhedoras de cana por 1.000 ha de cana de açúcar cortados mecanicamente, participação de utilitários sobre a frota de equipamentos motorizados (%), número de Julietas por treminhão, número de Julietas por biminhão, número de semirreboques por rodotrem, número de semirreboques por dolly, utilização média anual da frota de veículos e similares (km ano^{-1}), utilização média anual da frota de máquinas e similares motorizados (h ano^{-1}), disponibilidade operacional da frota de veículos similares motorizados (%), disponibilidade operacional da frota de máquinas e similares motorizados (%), consumo de combustível por tonelada transportada ($L \text{ t}^{-1}$), consumo de combustível por hectare cortado de cana ($L \text{ ha}^{-1}$), consumo de combustível ponderado pela distância média ($L \text{ ha km}^{-1}$), consumo de combustível das carregadoras por tonelada de cana carregada ($L \text{ t}^{-1}$), consumo de combustível das colhedoras por tonelada de cana colhida mecanicamente ($L \text{ t}^{-1}$), consumo de óleo lubrificante do motor ponderado pela área de cana trabalhada ($L \text{ ha}^{-1}$), consumo de óleo hidráulico ponderado pela área de cana trabalhada ($L \text{ ha}^{-1}$), consumo de óleo hidráulico das carregadoras por tonelada de cana carregada (ml t^{-1}), consumo de óleo hidráulico das colhedoras por tonelada colhida mecanicamente (ml t^{-1}),

vida média dos pneus (km e h), motores retificados por ano (%), gasto com reparos e manutenção da frota motorizada (R\$ ano equipamento⁻¹), gasto com reparos e manutenções da frota de veículos e similares motorizados (R\$ ano equipamento⁻¹), gasto com reparos e manutenções da frota de máquinas e similares motorizados (R\$ ano equipamento⁻¹), gasto com reparos e manutenções da frota de implementos e similares (R\$ ano equipamento⁻¹), equipamentos motorizados por mão-de-obra direta da manutenção (equipamento mão-de-obra direta⁻¹), equipamentos motorizados por mão-de-obra administrativa da manutenção (equipamento mão-de-obra administrativa⁻¹), equipamentos motorizados por comboísta e lavador (equipamento lavador⁻¹), equipamentos motorizados por eletricista (equipamento eletricista⁻¹), equipamentos motorizados e implementos rodoviários por soldador e torneiro (equipamento torneiro⁻¹), equipamentos automotrizes por funileiro e pintor (equipamentos funileiro e pintor⁻¹), equipamentos motorizados por tipo de mecânico (equipamentos mecânico⁻¹), equipamentos motorizados por encarregado de manutenção (equipamentos encarregado⁻¹), equipamentos automotrizes por borracheiro (equipamentos borracheiro⁻¹), pneus por borracheiro (pneus borracheiro⁻¹), mão-de-obra direta por mão-de-obra administrativa da manutenção (mão-de-obra direta mão-de-obra administrativa⁻¹), relação de comando na manutenção (mão-de-obra direta encarregado⁻¹), equipamentos atendidos por comboio de abastecimento e lubrificação (equipamentos comboio⁻¹), equipamentos motorizados atendidos por caminhão oficina (equipamentos caminhão oficina⁻¹), caminhões bombeiro por 1000 ha cortados de cana (caminhão bombeiro 1000 ha⁻¹), diversificação da frota motorizada (%), cana moída por dia efetivo de safra (t dia⁻¹), cana transportada por frente de corte por dia efetivo de safra (t dia⁻¹), transporte de cana com frota de terceiros (%), idade média da frota motorizada (anos), idade média da frota de veículos e similares motorizados (anos) e idade média da frota de máquinas e similares motorizadas (anos).

Cervi et al. (2015), estudando indicadores de desempenho operacional para operações de colheita e transbordo de cana-de-açúcar, apresentaram os seguintes parâmetros para monitoramento e controle das operações: capacidade de campo operacional (ha h⁻¹), capacidade de campo efetiva (ha h⁻¹), eficiência de campo (%), capacidade de campo efetiva da colhedora (ha h⁻¹), capacidade de produção operacional da colhedora (t h⁻¹), número de colhedoras (unidades), tempo total do ciclo de transbordo (h), tempo de carregamento do transbordo (h), tempo de descarregamento do transbordo (h), tempo de deslocamento do transbordo na ida (h), tempo de deslocamento do transbordo na volta (h), tempo total de deslocamento do transbordo (h), capacidade de produção operacional do transbordo (t h⁻¹) e número de transbordos para atender uma colhedora (unidades).

Oliveira (2015), discutindo critérios para seleção de colhedoras de cana-de-açúcar relata os seguintes indicadores de desempenho no gerenciamento da colheita: produção média por safra (t), horas trabalhadas por safra (h), produção em toneladas por hora trabalhada ($t\ h^{-1}$), capacidade operacional em toneladas por dia ($t\ dia^{-1}$), capacidade efetiva em toneladas por dia ($t\ dia^{-1}$), rendimento ou eficiência de campo (%), consumo de óleo diesel ($L\ h^{-1}$ e $L\ t^{-1}$), consumo de óleo hidráulico ($L\ h^{-1}$ e $L\ t^{-1}$), disponibilidade mecânica (%), disponibilidade global (%), custo de reparo e manutenção ($R\$ h^{-1}$ e $R\$ t^{-1}$), custo por hora trabalhada ($R\$ h^{-1}$) e custo por tonelada ($R\$ t^{-1}$).

Banchi et al. (2016), discutindo gestão da mecanização do sistema mecanizado de colheita a partir de indicadores gerenciais estratégicos apresenta os seguintes parâmetros: idade média da frota (anos), produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$), utilização média anual ($h\ ano^{-1}$), horas trabalhadas por dia efetivo de safra ($h\ dia\ efetivo^{-1}$), consumo médio de combustível ($L\ t^{-1}$), produção anual ($t\ safra^{-1}$), rendimento diário ($t\ dia\ corrido^{-1}$), rendimento tonelada por hora ($t\ h^{-1}$), máquinas por frente de colheita, relação transbordo por colhedora, eficiência de disponibilidade (%), gasto anual de manutenção ($R\$ ano^{-1}$), custo de manutenção ($R\$ h^{-1}$, $R\$ km^{-1}$ e $R\$ t^{-1}$) e custo do corte, transbordo e transporte ($R\$ t^{-1}$).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Considerando o objetivo do trabalho, a sistemática para o desenvolvimento do modelo teve como ponto de partida a análise do sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar e, sobretudo, na observação de suas relações de interdependência (Figura 1).

Figura 1. Sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar

Fonte: Scania (2016), modificado pelo autor.

A partir de uma demanda industrial (1)⁶, o sistema de colheita é iniciado pelo corte e limpeza parcial da matéria-prima pela colhedora (2), matéria-prima essa que é descarregada no transbordo (3) que acompanha a colhedora. Este transbordo, quando “cheio”, se desloca até um ponto fora do talhão onde é feita a transferência (4) da matéria-prima colhida para um caminhão (5). O caminhão, por sua vez, quando tiver sua capacidade de carga atingida, se desloca até a unidade industrial (1), de modo a entregar a cana-de-açúcar para ser processada. Realizadas as transferências de carga, tanto o transbordo (4) quanto o caminhão (6), retornam para os respectivos pontos, dando início a um novo ciclo. Paralelamente a estas operações, existe ainda um sistema de apoio (7), cujo objetivo é garantir a manutenção em campo (caminhão oficina), reabastecimento de combustível (caminhão comboio) e segurança operacional (caminhão pipa ou bombeiro), tendo em vista o risco de incêndios.

A estruturação do modelo é detalhada sob duas perspectivas centrais, atendendo, respectivamente, ao dimensionamento operacional (item 3.1) e econômico (item 3.2). No caso do

⁶ Os números fazem referência a Figura 1.

dimensionamento operacional, em função das particularidades de cada subsistema, a memória de cálculo é segmentada em corte (item 3.1.1), transbordo (item 3.1.2), transporte (item 3.1.3) e apoio (item 3.1.4). Paralelamente ao dimensionamento do parque de máquinas, a quantidade de mão-de-obra (item 3.1.5) envolvida no processo é determinada, representada pelos operadores dos equipamentos. O dimensionamento econômico tem como base a divisão em custos fixos (item 3.2.1) e variáveis (item 3.2.2).

As equações fundamentais para o desenvolvimento do modelo são baseadas nos trabalhos de Hunt (1973), Mialhe (1974), Whitney (1988), Balastreire (1990), Milan (2004) e American Society of Agricultural and Biological Engineers - ASABE (2011). Algumas informações necessárias para a estruturação da ferramenta foram obtidas a partir dos dados publicados pela ASSISTE⁷.

3.1. Dimensionamento Operacional

O dimensionamento operacional de sistemas mecanizados agrícolas pode ser traduzido como a quantidade de equipamentos necessária para atender a determinada demanda. Em uma unidade industrial sucroenergética essa demanda é dada pela quantidade de açúcar e etanol que se pretende produzir, exigindo, conseqüentemente, uma determinada quantidade de matéria-prima a ser processada.

Considerando a Figura 1, o ponto de partida para a estruturação do modelo é a definição do planejamento de moagem (PM) que, para o segmento agrícola, reflete a quantidade de cana a ser entregue pelo sistema de colheita em um determinado horizonte de tempo. Este período é inicialmente definido em dias, delimitado por datas de início (DIs) e fim (DFs) de moagem, estabelecendo os dias de safra totais (DSt), equação (1):

$$DSt = DFs - DIs \quad (1)$$

Em que:

DSt = Dias de safra totais, em dias;

DFs = Data de fim de safra;

DIs = Data de início de safra.

O processamento de matéria-prima pela usina na safra, entretanto, não é pleno, ocorrendo paradas por diversos motivos, como condições climáticas, manutenções programadas ou não da planta industrial, falta de matéria-prima, entre outros. O desconto destas interrupções resulta nos

⁷ Empresa especializada em sistemas técnicos, atuando, principalmente com ferramentas gerenciais de manutenção em frotas automotoras e custos: www.assiste.net.br

dias de safra efetivos (DSe), equação (2), levando em conta, no caso do modelo em questão, as seguintes variáveis: Número de domingos e feriados (NDF), que podem vir a ser respeitados de acordo com decisões administrativas da empresa; Número de dias de safra úteis impróprios (DSui), entendido como dias em que o funcionamento da usina é limitado por questões climáticas, como chuvas; Eficiência gerencial (EG), que diz que respeito a perdas de tempo por falhas administrativas, como por exemplo, paradas da usina por falta de matéria-prima, em virtude de um planejamento mal realizado.

$$DSe = (DSt - (NDF + DSui)) \times EFg \quad (2)$$

Em que:

DSe = Dias de safra efetivos, em dias;

DSt = Dias de safra totais, em dias;

NDF = Número de domingos e feriados, em dias;

DSui = Dias de safra úteis impróprios, em dias;

EFg = Eficiência gerencial, em %.

A relação entre os dias de safra efetivos (DSe) com a capacidade de moagem diária (CMD) da usina revela a moagem realizável (MR) na safra, equação (3). A MR deve ser obrigatoriamente igual ou superior ao planejamento de moagem (PM) inicialmente proposto, caso contrário, as premissas do modelo devem ser revistas.

$$MR = DSe \times CMD \quad (3)$$

Em que:

MR = Moagem realizável, em t;

DSe = Dias de safra efetivos, em dias;

CMD = Capacidade de moagem diária, em t dia⁻¹.

Dado que os períodos de trabalho estão sujeitos a turnos, especialmente por questões trabalhistas, faz-se necessário a conversão da safra de dias em horas, resultando na determinação do tempo disponível (TD), equação (4):

$$TD = DSe \times JT \quad (4)$$

Em que:

TD = Tempo disponível, em h;

DSe = Dias de safra efetivos, em dias;

JT = Jornada de trabalho, em h dia⁻¹;

A jornada de trabalho (JT), por sua vez, é determinada pela relação entre a quantidade de horas por turno (HTT) e o número de turnos por dia de operação (NT), equação (5):

$$JT = HTT \times NT \quad (5)$$

Em que:

JT = Jornada de trabalho, em h dia⁻¹;

HTT = Horas de trabalho por turno, em h;

NT = Número de turnos por dia.

A relação do tempo disponível (TD) com a área a ser colhida (AR) permite a determinação do ritmo operacional (RO), equação (6), quantidade de área necessária a ser colhida por hora para atender a demanda de cana pela usina.

$$RO = \frac{AR}{TD} \quad (6)$$

Em que:

RO = Ritmo operacional, em ha h⁻¹;

AR = Área a ser colhida, em ha;

TD = Tempo disponível, em h.

A área a ser colhida (AR) é dada em função da relação entre o planejamento de moagem na safra (PM) e a produtividade agrícola líquida (PAliq), que incorpora as perdas na colheita, equação (7):

$$AR = \frac{PM}{PAliq} \quad (7)$$

Em que:

AR = Área a ser colhida, em ha;

PM = Planejamento de moagem, em t;

PAliq = Produtividade agrícola líquida, em t ha⁻¹.

A produtividade agrícola líquida (PAliq), é determinada com base na relação entre a produtividade agrícola (PA) e as perdas na colheita (PEc), equação (8):

$$PAliq = PA - (PA \times PEc) \quad (8)$$

Em que:

$PAliq$ = Produtividade agrícola líquida, em $t\ ha^{-1}$;

PA = Produtividade agrícola, em $t\ ha^{-1}$;

PEc = Perdas na colheita, em %.

A relação entre a produtividade agrícola (PA) e a área a ser colhida (AR) revela a quantidade de matéria prima a ser produzida (QMP_r), equação (9), que deve ser obrigatoriamente superior ao planejamento de moagem (PM).

$$QMP_r = PA \times AR \quad (9)$$

Em que:

QMP_r = Quantidade de matéria prima a ser produzida, em t;

PA = Produtividade agrícola, em $t\ ha^{-1}$;

AR = Área a ser colhida, em ha.

A diferença entre a quantidade de matéria prima a ser produzida (QMP_r) e o planejamento de moagem (PM) revela o montante de perdas do sistema de colheita, que associado ao preço da matéria-prima, determina as perdas monetárias (PEm) da operação, equação (10):

$$PEm = (QMP_r - PM) \times PCA \quad (10)$$

Em que:

PEm = Perdas monetárias, em R\$;

QMP_r = Quantidade de matéria prima produzida, em t;

PM = Planejamento de moagem, em t;

PCA = Preço da cana-de-açúcar, em $R\$ t^{-1}$.

Determinado ritmo operacional, equação (6), a próxima etapa do dimensionamento é quantificar o número de conjuntos necessários para atender a situação proposta, cujos cálculos, por sua vez, são fundamentados nas características técnicas dos equipamentos, bem como nas interrelações do sistema. As equações para determinação do número de equipamentos para os subsistemas de corte, transbordo, transporte e estrutura de apoio são apresentados nos subitens 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 e 3.1.4, respectivamente, enquanto que o subitem 3.1.5 quantifica a mão-de-obra necessária para o processo.

3.1.1. Corte

No dimensionamento de conjuntos motomecanizados, a determinação do número de equipamentos é resultado da relação entre a demanda da operação, representada pelo ritmo operacional (RO), e a capacidade de trabalho da máquina, quantidade de trabalho que a máquina consegue realizar em um horizonte de tempo. Se esta capacidade utiliza um referencial de área para expressar seu desempenho, como hectares por hora, atribui-se o nome de capacidade de campo a tal indicador, enquanto que se a expressão remeter a quantidade de trabalho em termos de volume ou massa, como toneladas por hora, aplica-se o termo capacidade de produção.

A capacidade de trabalho pode ser expressa como capacidade efetiva, que relaciona apenas o tempo que a máquina está de fato trabalhando, realizando a operação para a qual foi projetada, no caso da colhedora, colhendo. A capacidade operacional considera além dos tempos efetivos, os demais tempos necessários à operação, como manobras de cabeceira, reabastecimento de insumos e pequenas regulagens.

Para fins de modelagem, esta diferença entre os tempos pode ser tratada a partir do indicador de eficiência de campo (EF). A capacidade de campo operacional pode ser calculada de acordo com a equação (11)⁸:

$$CCO = \left(\frac{L \times V}{10} \right) \times EF \quad (11)$$

Em que:

CCO = Capacidade de campo operacional, em ha h⁻¹;

L = Largura de trabalho, em m;

V = Velocidade de trabalho, em km h⁻¹;

EF = Eficiência de campo, em %.

Para a colheita, a largura de trabalho é definida como o produto da multiplicação entre o espaçamento (ESP) em que a colhedora está operando e o número de fileiras colhidas por passada (FCP). A capacidade de campo operacional da colhedora de cana é expressa pela equação (12):

⁸ Algumas variáveis, como eficiência de campo, são comuns em termos de conceito, de modo que para identificação do subsistema em questão, será adicionada uma segunda caracterização na sigla, sendo: “c” – colheita, “tb” – transbordo e “tp” – transporte. O denominador “10” trata-se de um fator de conversão para a unidade “ha h⁻¹”.

$$CCOc = \left(\frac{ESP \times FCP \times Vc}{10} \right) \times EFc \quad (12)$$

Em que:

CCOc = Capacidade de campo operacional da colhedora, em ha h⁻¹;

ESP = Espaçamento de plantio, em m;

FCP = Fileiras colhidas por passada;

Vc = Velocidade de trabalho da colhedora, em km h⁻¹;

EFc = Eficiência de campo da colhedora, em %.

Além da capacidade de campo, é necessário determinar para as colhedoras a capacidade de produção operacional, não só pelo fato de ser uma etapa de cálculo intermediária do modelo relacionada ao dimensionamento das estruturas de transbordo e transporte, mas também por ser um dos indicadores mais utilizados no comparativo de desempenho de colhedoras. A capacidade de produção leva em conta a quantidade de produto colhido, relacionando a capacidade de campo operacional da colhedora (CCOc) com a produtividade agrícola líquida (PAliq), equação (13):

$$CPOc = CCOc \times PAliq \quad (13)$$

Em que:

CPOc = Capacidade de produção operacional da colhedora, em t h⁻¹;

CCOc = Capacidade de campo operacional da colhedora, em ha h⁻¹;

PAliq = Produtividade agrícola líquida, em t ha⁻¹.

A capacidade de produção diária de cada colhedora (CPOdc), em função da jornada de trabalho diária (JT), é calculada de acordo com a equação (14):

$$CPOdc = CPOc \times JT \quad (14)$$

Em que:

CPOdc = Capacidade de produção operacional diária da colhedora, em t dia⁻¹;

CPOc = Capacidade de produção operacional da colhedora, em t h⁻¹;

JT = Jornada de trabalho, em h dia⁻¹.

A relação entre o ritmo operacional, calculado na equação (6), e a capacidade de campo operacional das colhedoras, equação (12), resulta na determinação do número de colhedoras (Nc), equação (15):

$$Nc = \frac{RO}{CCOc} \quad (15)$$

Em que:

Nc = Número de colhedoras;

RO = Ritmo operacional, em ha h⁻¹;

CCOc = Capacidade de campo operacional das colhedoras, em ha h⁻¹.

Considerando que o número de colhedoras (Nc), equação (15), pode resultar em um número decimal, o que em prática não se aplica, adicionou-se uma etapa de cálculo condicional, delimitado por um critério de arredondamento (CRA). Caso o número de colhedoras ou qualquer outro equipamento venha resultar em decimal, e o décimo deste valor for menor que o CRA, o valor será arredondado para o número inteiro imediatamente abaixo. Caso contrário, arredondar-se-á para o inteiro imediatamente acima.

Este ajuste reflete, sobretudo, nas quantidades de trabalho realizadas pelas máquinas e, conseqüentemente, nos custos operacionais e na vida útil do maquinário. Quando a aproximação é feita para cima, apesar da capacidade original de trabalho da máquina se manter, têm-se uma redução aparente da capacidade de campo, redução essa que expressa a “folga” do planejamento. Neste sentido, a capacidade de produção operacional diária da colhedora pode ser expressa de acordo com a equação (16):

$$CPOdrc = \frac{PM}{\frac{DSe}{Nic}} \quad (16)$$

Em que:

CPOdrc = Capacidade de produção operacional diária real da colhedora, em t dia⁻¹;

PM = Planejamento de moagem, em t;

DSe = Dias de safra efetivos, em dias;

Nic = Número inteiro de colhedoras.

A relação da capacidade de produção operacional diária real da colhedora (CPOdrc) com a jornada de trabalho (JT) resulta na capacidade de produção operacional real da colhedora (CPOrc), equação (17):

$$CPOrc = \frac{CPOdrc}{JT} \quad (17)$$

Em que:

CPOrc = Capacidade de produção operacional real da colhedora, em t h⁻¹;

CPOdrc = Capacidade de produção operacional diária real da colhedora, em t dia⁻¹;

JT = Jornada de trabalho, em h dia⁻¹.

A partir dos ajustes realizadas nas capacidades, determina-se o número de horas trabalhadas por colhedora na safra, equação (18):

$$HTc = \frac{\frac{QMPr}{CPOrc}}{Nci} \quad (18)$$

Em que:

HTc = Horas trabalhadas por colhedora, em h;

QMPr = Quantidade de matéria-prima produzida, em t

CPOrc = Capacidade de produção operacional real da colhedora, em t h⁻¹;

Nci = Número inteiro de colhedoras.

Como um mesmo equipamento está sujeito a diferentes intensidades de uso, a contabilização da utilização anual é fundamental para determinar a vida útil do bem, indicador contábil de renovação de frota. Nesse sentido, a vida útil anual da colhedora (VUA_c) é estimada pela relação entre a vida útil estimada (VUE_c), indicador estimado pelo fabricante, bibliografia ou usuário, e as horas trabalhadas pela máquina no ano (HT_c), equação (19):

$$VUAc = \frac{VUEc}{HTc} \quad (19)$$

Em que:

VUA_c = Vida útil anual da colhedora, em anos;

VUE_c = Vida útil estimada da colhedora (fabricante, bibliografia ou usuário), em h;

HT_c = Horas trabalhadas por colhedora, em h ano⁻¹.

3.1.2. Transbordo

O subsistema “transbordo” é caracterizado pela movimentação interna no talhão da matéria-prima colhida. Considerando a dinâmica do sistema mecanizado de colheita, o ciclo de transbordo é dado pela somatória dos tempos de carregamento (TCarr), deslocamento (TDesloc)

e descarregamento ($TDescar$). O tempo de carregamento do transbordo refere-se ao período em que o transbordo está acompanhando a colhedora, tempo que leva para que as unidades de carga do conjunto fiquem cheias, em função da capacidade de produção da colhedora. O tempo de deslocamento do transbordo refere-se ao tempo consumido para movimentação entre o talhão e ponto de transbordamento, e leva em conta as distâncias de ida e volta e respectivas velocidades. O tempo de descarga é o tempo gasto para a transferência de carga do transbordo para o caminhão. O tempo de ciclo do transbordo ($TCtb$) é calculado pela equação (20):

$$TCtb = TCarrtb + TDesloctb + TDescargtb \quad (20)$$

Em que:

$TCtb$ = Tempo de ciclo do transbordo, em h;

$TCarrtb$ = Tempo de carregamento do transbordo, em h;

$TDesloctb$ = Tempo de deslocamento do transbordo, em h;

$TDescargtb$ = Tempo de descarregamento do transbordo, em h.

A determinação do tempo de carregamento do transbordo ($TCarrtb$) é dada pela relação entre a capacidade total de carga do transbordo ($CTCtb$) e a capacidade de produção operacional da colhedora ($CPOc$), equação (21):

$$TCarrtb = \frac{CTCtb}{CPOc} \quad (21)$$

Em que:

$TCarrtb$ = Tempo de carregamento do transbordo, em h;

$CTCtb$ = Capacidade total de carga do transbordo, em t;

$CPOc$ = Capacidade de produção operacional da colhedora, em $t \cdot h^{-1}$.

Dado que a composição do conjunto de transbordo pode contar com uma ou mais unidades de carga, a determinação da capacidade total de carga do transbordo ($CTCtb$) é calculada pela multiplicação do número de unidades de carga ($NUCtb$) pelas respectivas capacidades individuais ($CICtb$), equação (22).

$$CTCtb = NUCtb \times CICtb \quad (22)$$

Em que:

$CTCtb$ = Capacidade total de carga do transbordo, em t;

$NUCtb$ = Número de unidades de carga por conjunto de transbordo;

$CICtb$ = Capacidade individual de carga do transbordo, t;

O tempo de deslocamento ($TDesloctb$), por sua vez, é determinado em função da distância até o ponto de descarregamento ($DPitb$) e a velocidade de deslocamento (Vtb), respeitando-se os trechos de ida e volta, equação (22). Esta diferenciação é realizada já que tais variáveis podem apresentar valores diferentes dependendo dos trechos em questão, como por exemplo, layouts de talhão, além de velocidades distintas dado a condição de carga, cheio ou vazio.

$$TDesloctb = \frac{DPitb}{Vtbc} + \frac{DPvtb}{Vtbv} \quad (23)$$

Em que:

$TDesloctb$ = Tempo de deslocamento do transbordo, em h;

$DPitb$ = Distância do ponto de descarregamento no percurso de ida do transbordo, em km;

$Vtbc$ = Velocidade do transbordo carregado, em km h^{-1} ;

$DPvtb$ = Distância do ponto de descarregamento no percurso de volta do transbordo, em km;

$Vtbv$ = Velocidade do transbordo vazio, em km h^{-1} .

O tempo de descarregamento ($TDescargtb$) ou transferência de carga do transbordo para caminhão é um valor de entrada a ser inserido, uma premissa do usuário.

A relação da capacidade total de carga do transbordo ($CTCtb$), do tempo de ciclo ($TCtb$) e da eficiência de campo ($EFtb$), determina a capacidade de produção operacional do transbordo ($CPOtb$), equação (24):

$$CPOtb = \left(\frac{CTCtb}{TCtb} \right) \times EFtb \quad (24)$$

Em que:

$CPOtb$ = Capacidade de produção operacional do transbordo, em t h^{-1} ;

$CTCtb$ = Capacidade total de carga do transbordo, em t;

$TCtb$ = Tempo de ciclo do transbordo, em h;

$EFtb$ = Eficiência de campo do transbordo, em %.

A relação entre as capacidades operacionais da colhedora ($CPOc$) e do transbordo ($CPOtb$), resulta no número de transbordos necessários para atender cada colhedora ($RTbC$), equação (25):

$$RTbC = \frac{CPOc}{CPOtb} \quad (25)$$

Em que:

RTbC = Relação transbordo por colhedora;

CPOc = Capacidade de produção operacional da colhedora, em t h⁻¹;

CPOtb = Capacidade de produção operacional do transbordo, em t h⁻¹.

A relação do índice (RTbC) com o número de colhedoras (Nc), equação (26), fornece o número de conjuntos de transbordo (Ntb):

$$Ntb = Nc \times RTbC \quad (26)$$

Em que:

Ntb = Número de conjuntos de transbordos;

Nc = Número de colhedoras;

RTbC = Relação transbordo por colhedora.

O resultado da equação (26), assim como já destacado para o dimensionamento de colhedoras, está sujeito ao critério de arredondamento (CRA)⁹. Esta aproximação implica na modificação da capacidade de produção operacional diária e horária do maquinário, conforme as considerações realizadas nas equações (16) e (17) para colhedoras. O número de colhedoras e transbordos ajustados, sujeito ao critério de arredondamento, determina a relação transbordo/colhedora real, equação (27):

$$RTbCr = \frac{Nic}{Nitb} \quad (27)$$

Em que:

RTbCr = Relação transbordo por colhedora real;

Nic = Número inteiro de colhedoras;

Nitb = Número inteiro de transbordos.

Como na estruturação do modelo, existe a possibilidade de um conjunto de transbordo ser composto por uma ou mais carrocerias, o dimensionamento do número de carrocerias tracionados por um trator é calculado segundo a equação (28):

⁹ Para maiores informações, ver página 36.

$$NUCttb = Nitb \times NUCtb \quad (28)$$

Em que:

NUCttb = Número de unidades de carga total do transbordo;

Nitb = Número inteiro de transbordos¹⁰;

NUCtb = Número de unidades de carga por conjunto de transbordo.

A determinação das horas trabalhadas por conjunto de transbordo é realizada da mesma maneira da colheita, apresentada na equação (18), respeitando-se, evidentemente, as respectivas variáveis.

3.1.3. Transporte

O subsistema transporte representa a interface final entre a produção agrícola e o processamento industrial da matéria-prima. O dimensionamento operacional é semelhante ao do subsistema transbordo. O tempo total de ciclo do transporte é calculado por meio da equação (29):

$$TCt = TCarrt + TDesloct + TDescargt \quad (29)$$

Em que:

TCt = Tempo de ciclo do transporte, em h;

TCarrt = Tempo de carregamento do transporte, em h;

TDesloct = Tempo de deslocamento do transporte, em h;

TDescargt = Tempo de descarregamento do transporte, em h.

O tempo de carregamento do transporte é calculado por meio da equação (30):

$$TCarrt = \left(\frac{CTCt}{CPOc} \right) \quad (30)$$

Em que:

TCarrt = Tempo de carregamento do transporte, em h;

CTCt = Capacidade total de carga do transporte, em t;

CPOc = Capacidade de produção operacional da colhedora, em t h⁻¹.

A capacidade total de carga do transporte é calculada por meio da equação (31):

¹⁰ Valor final, sujeito ao critério de arredondamento.

$$CTCt = NUCt \times CICt \quad (31)$$

Em que:

$CTCt$ = Capacidade total de carga do transporte, em t;

$NUCt$ = Número de unidades de carga por conjunto de transporte;

$CICt$ = Capacidade individual de carga do transporte, t.

O tempo de deslocamento do transporte é calculado por meio da equação (32):

$$TDesloct = \frac{DPit}{Vtc} + \frac{DPvt}{Vtv} \quad (32)$$

Em que:

$TDesloct$ = Tempo de deslocamento do transporte, em h;

$DPit$ = Distância do ponto de descarregamento no percurso de ida do transporte, em km;

Vtc = Velocidade do transporte carregado, em km h⁻¹;

$DPvt$ = Distância do ponto de descarregamento no percurso de volta do transporte, em km;

Vtv = Velocidade do transporte vazio, em km h⁻¹.

A capacidade de produção operacional do transporte é calculada por meio da equação (33):

$$CPOt = \left(\frac{CTCt}{TCt} \right) \times EFt \quad (33)$$

Em que:

$CPOt$ = Capacidade de produção operacional do transporte, em t h⁻¹;

$CTCt$ = Capacidade total de carga do transporte, em t;

TCt = Tempo de ciclo do transporte, em h;

EFt = Eficiência de campo do transporte, em %;

A relação do transporte por colhedora é calculada por meio da equação (34):

$$RTC = \frac{CPOc}{CPOt} \quad (34)$$

Em que:

RTC = Relação transporte por colhedora;

$CPOc$ = Capacidade de produção operacional da colhedora, em t h⁻¹;

$CPOt$ = Capacidade de produção operacional do transporte, em t h⁻¹.

A determinação do número de conjuntos de transporte é dada pela equação (35):

$$Nt = Nc \times RTC \quad (35)$$

Em que:

Nt = Número de conjuntos de transporte;

Nc = Número de colhedoras;

RTC = Relação transporte por colhedora.

A relação transporte por colhedora real é determinada pela equação (36):

$$RTCr = \frac{Nic}{Nit} \quad (36)$$

Em que:

$RTCr$ = Relação transporte por colhedora real;

Nic = Número inteiro de colhedoras;

Nit = Número inteiro de conjuntos de transportes.

O número de unidades de carga de transporte total é calculado pela equação (37):

$$NUCtt = Nti \times NUCt \quad (37)$$

Em que:

$NUCtt$ = Número de unidades de carga total do transporte;

Nit = Número inteiro de conjuntos de transportes¹¹;

$NUCt$ = Número de unidades de carga por conjunto de transporte.

A única diferença em relação ao subsistema transbordo está na quantificação do trabalho realizado, que no caso dos caminhões é medido em quilômetros, enquanto o transbordo é horário. Dessa forma, a distância percorrida por conjunto de transporte na safra é determinada de acordo com a equação (38):

¹¹ Valor final, sujeito ao critério de arredondamento.

$$DPSt = \frac{\left(\frac{PM}{CTCt}\right) \times (DPit + DPvt)}{Nit} \quad (38)$$

Em que:

DPSt = Distância percorrida na safra por conjunto de transporte, em km;

PM = Planejamento de moagem, em t;

CTCt = Capacidade total de carga do conjunto de transporte, em t;

DPit = Distância até ponto de descarregamento no percurso de ida no transporte, em km;

DPvt = Distância de volta de descarregamento no percurso de volta no transporte, em km;

Nit = Número inteiro de conjuntos de transporte.

3.1.4. Apoio

A estrutura de apoio na colheita de cana-de-açúcar tem por objetivo suprir as demandas auxiliares das máquinas, como reabastecimentos e manutenções *in loco*. No caso a estrutura é representada, respectivamente, por caminhões comboio e oficina. Adicionalmente, por questões de segurança, um caminhão tanque (bombeiro) fica disponível, já que incêndios acidentais podem ocorrer. A atuação desses equipamentos na rotina operacional do sistema, no entanto, acaba por ser pontual, não ocorrendo, geralmente, de forma simultânea. Essa característica possibilita a otimização da estrutura de apoio, com dimensionamento compartilhado entre um grupo de máquinas, na prática denominada de “frente de colheita”.

Neste sentido, a quantificação dos maquinários de apoio, caminhões comboio (cb), oficina (of) e bombeiro (pp), é realizada de acordo com a equação (39). Assim como as demais quantificações em torno do número de conjuntos, o resultado desta relação também está sujeita ao critério de arredondamento.

$$Na = \frac{Nci}{EFt} \quad (39)$$

Em que:

Na = Número de equipamentos de apoio;

Nci = Número inteiro de colhedoras;

EFt = Equipamentos por frente.

A definição de quantas frentes de colheita uma mesma estrutura de apoio irá atender é uma decisão de cunho gerencial e deve respeitar, sobretudo, a sinergia operacional do sistema. A alocação de várias frentes por estrutura pode tornar o apoio uma restrição, reduzindo a eficiência do sistema como um todo.

3.1.5. Operadores

A quantificação da mão-de-obra envolvida no sistema de colheita depende do número de turnos em que a operação vai ocorrer e da quantidade de pessoas alocada por máquina e por turno, equação (40). Em geral, o número de operadores por máquina por turno tende a ser maior do que um, em função de escalas de revezamento para cobrir as folgas dos operadores, previstas pela legislação trabalhista. Além dos “folguistas”, observa-se na rotina operacional a presença de auxiliares de campo, cuja atuação se dá mais em apoiar a coordenação do sistema do que operar as máquinas, aumentando, conseqüentemente o número de pessoas. Em função disso, a equação (40) pode resultar em número decimal e, caso isso ocorra, o mesmo será arredondado para o inteiro mais próximo.

$$NOP = NOPt \times NT \times Ni \quad (40)$$

Em que:

NOP = Número de operadores;

NOPt = Número de operadores por turno;

NT = Número de turnos por dia;

Ni = Número inteiro de conjuntos.

3.2. Dimensionamento Econômico

O desempenho econômico de uma determinada máquina agrícola deve estar relacionado ao seu desempenho operacional. Ainda que o indicador de custos em função da “hora máquina” seja amplamente difundido, inclusive no mercado de terceirização de serviços mecanizados, sua utilização deve ser feita com cautela, já que pouco revela em termos de eficiência econômica. Tal consideração pode ser visualizada de forma clara na equação (41) que define o custo operacional para o subsistema corte (COPc), que tende a diminuir à medida que se aumenta a capacidade operacional pela colhedora. Ressalta-se que o indicador de capacidade utilizado foi o ajustado ou real, conforme considerações realizadas na equação (16).

$$COPc = \frac{CTc}{CPOrc} \quad (41)$$

Em que:

COPc = Custo operacional do corte, em R\$ t⁻¹;

CTc = Custo total do corte, em R\$ h⁻¹;

CPOrc = Capacidade de produção operacional real da colhedora, em t h⁻¹.

No caso do subsistema transbordo o cálculo é semelhante, respeitando-se as respectivas variáveis de custo total (CT_{tb}) e capacidade de produção operacional (CP_{Ortb}), equação (42). O custo do conjunto transbordo é dado pela somatória dos dispêndios com a fonte de potência (no caso, trator) e sua(s) unidade(s) de carga.

$$COP_{tb} = \frac{CT_{tb}}{CP_{Ortb}} \quad (42)$$

Em que:

COP_{tb} = Custo operacional do transbordo, em R\$ t⁻¹;

CT_{tb} = Custo total do transbordo, em R\$ h⁻¹;

CP_{Ortb} = Capacidade de produção operacional real do transbordo, em t h⁻¹;

Para os subsistemas corte e transbordo a relação com o custo horário é direta, dado que o indicador de capacidade de produção já é expresso em “t h⁻¹”. O transporte, por sua vez, em função das especificidades técnicas, utiliza o parâmetro “R\$ km⁻¹” como referencial de custos, de modo que o custo operacional para este subsistema é determinado a partir da equação (43), ressaltando-se que o custo do transporte (CT_t) é dado pela composição dos valores atrelados ao cavalo e carrocerias.

$$COP_t = \frac{CT_t \times DPS}{PM} \quad (43)$$

Em que:

COP_t = Custo operacional do transporte, em R\$ t⁻¹;

CT_t = Custo total do transporte, em R\$ km⁻¹;

DPS = Distância percorrida na safra, em km;

PM = Planejamento de moagem, em t.

O subsistema apoio, por sua vez, como não conta com indicadores operacionais de produção, tem seu custo determinado pela relação do custo total (CT_a) com a moagem realizada, equação (44). Ressalta-se que o custo da estrutura de apoio é dado pela somatória dos custos dos caminhões oficina, bombeiro e comboio.

$$COP_a = \frac{CT_a}{PM} \quad (44)$$

Em que:

COP_a = Custo operacional do apoio, em R\$ t⁻¹;

CT_t = Custo total do apoio, em R\$;

PM = Planejamento de moagem, em t.

A somatória dos custos operacionais dos subsistemas revela o custo operacional do sistema de colheita (COPSc), equação (45):

$$COPSc = COPc + COPtb + COPt + COPa \quad (45)$$

Em que:

COPSc = Custo operacional do sistema de colheita, em R\$ t⁻¹;

COPc = Custo operacional do corte, em R\$ t⁻¹;

COPtb = Custo operacional do transbordo, em R\$ t⁻¹;

COPt = Custo operacional do transporte, em R\$ t⁻¹;

COPa = Custo operacional do apoio, em R\$ t⁻¹.

Como observado, respeitando-se as especificidades de cada subsistema, a determinação dos custos operacionais depende dos custos totais, cuja composição é dada pela somatória dos custos fixos (CF) e variáveis (CV), equação (46). Para o desenvolvimento do modelo em questão, este conceito não é utilizado apenas para a estrutura de apoio, cujos indicadores operacionais atrelados aos custos variáveis são de difícil obtenção e, portanto, não foram considerados. Ou seja, para este subsistema foram considerados apenas os custos fixos.

$$CT = CF + CV \quad (46)$$

Em que:

CT = Custo total, em R\$ h⁻¹ ou R\$ km⁻¹;

CF = Custo fixo, em R\$ h⁻¹ ou R\$ km⁻¹;

CV = Custo variável, em R\$ h⁻¹ ou R\$ km⁻¹;

Nos subitens 3.2.1 e 3.2.2 são detalhados, respectivamente, os componentes de formação dos custos fixos e variáveis. Para os custos variáveis, em função das particularidades técnicas dos equipamentos envolvidos, são realizados ainda detalhamentos individualizados dos parâmetros para os subsistemas.

3.2.1. Custos Fixos

Os custos fixos são aqueles que independem do uso e eles irão ocorrer com utilização ou não da máquina. Para sua determinação utilizou-se a proposta da ASABE (2011) que contempla a depreciação, juros, alojamentos, seguros e taxas. No modelo foi incluído também, como custo fixo,

a mão-de-obra referente aos operadores (subitem 3.2.1.1). Sendo assim, o cálculo do custo é realizado de acordo com a equação (47).

$$CFA = DPA + JRA + ASTA + OPA \quad (47)$$

Em que:

CFA = Custo fixo anual, em R\$ ano⁻¹;

DPA = Depreciação anual, em R\$ ano⁻¹;

JRA = Juros anuais, em R\$ ano⁻¹;

ASTA = Alojamento, seguros e taxas anuais, em R\$ ano⁻¹;

OPA = Operadores anual, em R\$ ano⁻¹.

Tanto para o custo fixo como para seus componentes individualizados a forma de cálculo inicial é realizada em reais por ano (R\$ ano⁻¹). Considerando, entretanto, que um mesmo equipamento pode ter diferentes intensidades de uso ao longo do ano, o cálculo dos custos fixos específicos, por unidade de uso (R\$ h⁻¹ ou R\$ km⁻¹), são calculados de acordo com as equações (48) e (49).

$$CF = \frac{CFA}{HT} \quad (48)$$

Em que:

CF = Custo fixo, em R\$ h⁻¹;

CFA = Custo fixo anual, em R\$ ano⁻¹;

HT = Horas trabalhadas por máquina, em h ano⁻¹.

$$CF = \frac{CFA}{DPSc} \quad (49)$$

Em que:

CF = Custo fixo, em R\$ km⁻¹;

CFA = Custo fixo anual, em R\$ ano⁻¹;

DPSc = Distância percorrida por conjunto transporte, em km ano⁻¹.

Para o cálculo da depreciação anual (DPA) utilizou-se o método linear, equação (50):

$$DPA = \frac{(VI - VF)}{VUA} \quad (50)$$

Em que:

DPA = Depreciação anual, em R\$ ano⁻¹;

VI = Valor inicial, em R\$;

VF = Valor final, em R\$;

VUA = Vida útil, em anos.

Os juros anuais (JRA) foram calculados a partir do capital médio, equação (51):

$$JRA = \left(\frac{VI + VF}{2} \right) \times i \quad (51)$$

Em que:

JRA = Juros anuais, em R\$ ano⁻¹;

VI = Valor inicial, em R\$;

VF = Valor final, em R\$;

i = Taxa de juros, em %.

Para o cálculo dos custos com alojamento, seguros e taxas (ASTA) aplicou-se um fator (FAST) sobre o valor inicial do equipamento, equação (52):

$$ASTA = VI \times FAST \quad (52)$$

Em que:

ASTA = Alojamento, seguros e taxas anuais, em R\$ ano⁻¹;

VI = Valor inicial, em R\$;

FAST = Fator de alojamento, seguros e taxas, em %.

3.2.1.1. Operadores

O custo com operadores (OPA) é dado pela relação direta entre os salários fixos pagos (SFO) aos funcionários, inclusive encargos, em um horizonte de um ano, equação (53). No caso, como o dimensionamento dos custos é feito de forma individualizada, ou seja, por máquina, o valor determinado está sujeito ainda a relação de operadores por máquina.

$$OPA = \frac{SFO \times 12 \times NOP}{Ni} \quad (53)$$

Em que:

OPA = Custo fixo de operadores anual, em R\$ ano⁻¹;

SFO = Salário fixo com encargos de operadores, em R\$ mês⁻¹;

NOP = Número de operadores;

Ni = Número inteiro de conjuntos.

3.2.2. Custos Variáveis

Os custos variáveis (CV), conforme ASABE (2011), referem-se basicamente aos gastos com combustíveis (CC) e reparos e manutenção (CRM). No caso do transporte, entretanto, os pneus, em função da quantidade e intensidade de uso, podem assumir parcela significativa nos custos, sendo considerados no modelo separadamente (CP). Também, dependendo da unidade industrial, os operadores estão sujeitos a bonificações salariais, que em geral estão relacionadas a metas de quantidade e qualidade operacional. Premiações em função de produtividade das máquinas ($t \text{ dia}^{-1}$), índices de matéria estranha vegetal e mineral, consumo de combustível e práticas de manutenção dos equipamentos, são exemplos de bonificações. Dessa forma, o custo variável é determinado a partir da equação (54):

$$CV = CC + CRM + CP + CBO \quad (54)$$

Em que:

CV = Custo variável, em R\$ h^{-1} ou R\$ km^{-1} ;

CC = Custo de combustível, em R\$ h^{-1} ou R\$ km^{-1} ;

CRM = Custo de reparos e manutenção, em R\$ h^{-1} ou R\$ km^{-1} ;

CP = Custo de pneus, em R\$ km^{-1} (apenas para o subsistema transporte);

CBO = Custo de bonificação de operadores, em R\$ h^{-1} ou R\$ km^{-1} .

3.2.2.1. Combustível

O custo com combustível (CC) é determinado pela relação direta entre o consumo (CCB) pelo equipamento ($L \text{ h}^{-1}$ ou $L \text{ km}^{-1}$) e preço (PL), conforme equação (55).

$$CC = CCB \times PL \quad (55)$$

Em que:

CC = Custo de combustível, em R\$ h^{-1} ou R\$ km^{-1} ;

CCB = Consumo de combustível, $L \text{ h}^{-1}$ ou $L \text{ km}^{-1}$;

PL = Preço do combustível, em R\$ L^{-1} .

3.2.2.1.1. Corte

Considerando-se que na operação de corte o consumo de combustível esta associado a produtividade da cultura e a capacidade operacional da colhedora, o cálculo do custo de combustível foi realizado de acordo com a equação (56):

$$CCc = CCBec \times CPOc \times PL \quad (56)$$

Em que:

CCc = Custo de combustível da colhedora, em R\$ h⁻¹;

CCBec = Consumo de combustível específico da colhedora, L t⁻¹;

CPOc = Capacidade de produção operacional da colhedora, em t h⁻¹;

PL = Preço do combustível, em R\$ L⁻¹.

Para determinação do consumo de combustível específico da colhedora, utilizou-se de uma base de dados de 7 ensaios padronizados¹² conduzidos de acordo com metodologia proposta por Ripoli & Ripoli (2009). Esses ensaios foram conduzidos no período de 2010 a 2015, com modelos de colhedoras dos principais fabricantes do mercado (John Deere, Case e Santal¹³), operando em diferentes espaçamentos, números de fileiras colhidas¹⁴, velocidades de trabalho, além de condições distintas de canaviais, tanto no que diz respeito a porte (ereto ou acamado) quanto produtividade agrícola. Ao todo 27 diferentes tratamentos, submetidos a baterias de 5 a 7 repetições foram realizados nos ensaios, perfazendo uma amostra de 159 determinações.

As variáveis utilizadas para análise foram: consumo de combustível (L h⁻¹ e L t⁻¹), velocidade de colheita (km h⁻¹), produtividade agrícola (t ha⁻¹), fileiras colhidas por passada e espaçamento (m). Essas variáveis foram submetidas a análises de regressão para estabelecimento de um modelo empírico de consumo de combustível. Ressalta-se que todas as variáveis têm como base os tempos efetivos de colheita, ou seja, aqueles em que a máquina está efetivamente trabalhando. Neste caso, portanto, não foram considerados demais tempos operacionais, como manobras de cabeceira e descolamentos não produtivos.

3.2.2.1.2. Transbordo

Considerando que o mercado oferece diferentes modelos de unidades de carga, com capacidades individuais variando de 8 a 21 toneladas, diversas são as opções de arranjo na composição do conjunto de transbordo e, conseqüentemente, de consumo de combustível, o cálculo foi realizado de acordo com a equação (57).

¹² Fonte: Belardo (2010), Rosa (2013) e Belardo (2016).

¹³ Em 2012 a Santal foi adquirida pelo Grupo AGCO, multinacional americana dona das marcas Challenger®, Fendt®, GSI®, Massey Ferguson® e Valtra®, sendo a última a atual representante da linha de colhedora de cana-de-açúcar.

¹⁴ Simples – 1,50 m, Duplo alternado – 0,90 x 1,50 m, Duplo alternado – 0,90 x 1,60 m, Duplo – 1,50 m e Triplo – 1,0 m

$$CCtr = CCBetr \times PotMtr \times PL \quad (57)$$

Em que:

CCtr = Custo de combustível do trator, em R\$ h⁻¹;

CCBetr = Consumo de combustível específico do trator, L h⁻¹ cv⁻¹;

PotMtr = Potência do motor do trator, em cv;

PL = Preço do combustível, em R\$ L⁻¹.

Os valores de consumo específico (CCBetr) foram obtidos junto a Banchi, Lopez & Rocco (2008), Tabela 1. Os autores realizaram o trabalho com base em um histórico de abastecimento de 1.140 tratores, de diferentes faixas de potências, totalizando 5,46 milhões de horas trabalhadas. Por se tratar de um estudo direcionado à produção de cana, optou-se por utilizar estes valores como referências no modelo, de modo que definida a potência do trator pelo usuário, automaticamente a equação correspondente é relacionada.

Tabela 1. Consumo de combustível para tratores agrícolas¹⁵.

Tratores Agrícolas			Consumo de Combustível	
Faixa de Potência (cv)	No de Equipamentos	Horas Estudadas	L h ⁻¹	L h ⁻¹ cv ⁻¹
55 a 69	61	114.262	3,79 ± 0,83	0,0585 ± 0,0128
70 a 79	87	1.194.792	4,22 ± 0,90	0,0563 ± 0,0119
80 a 94	75	24.522	4,74 ± 1,26	0,0554 ± 0,0148
95 a 114	136	384.861	6,14 ± 1,42	0,0598 ± 0,0140
115 a 139	29	42.896	6,76 ± 1,74	0,0546 ± 0,0150
140 a 170	415	2.060.257	9,52 ± 3,12	0,0600 ± 0,0188
171 a 199	254	1.351.034	10,33 ± 3,23	0,0579 ± 0,0179
200 a 229			16,14 ± 4,27	0,0739 ± 0,0198
230 a 259	83	296.417	21,49 ± 2,64	0,0895 ± 0,0110
> 260			26,15 ± 3,39	0,0967 ± 0,0118

Fonte: Banchi, Lopes & Rocco (2008), adaptado pelo autor.

3.2.2.1.3. Transporte

O cálculo do custo de combustível para o transporte segue a mesma metodologia do transbordo, respeitando-se, as especificidades operacionais do subsistema, equação (58).

¹⁵ Apesar do padrão internacional de potência ser fornecido em kW, optou-se por manter a originalidade dos dados, expressando os valores em cavalo-vapor (cv). Ressalta-se que esta unidade é mais difundida na prática, facilitando o uso do modelo. Este procedimento será utilizado em outras tabelas ao longo do texto.

$$CCcc = CCB Ecc \times PotMcc \times PL \quad (58)$$

Em que:

$CCcc$ = Custo de combustível do caminhão, em R\$ km⁻¹;

$CCBEcc$ = Consumo de combustível específico do caminhão, L km⁻¹ cv⁻¹;

$PotMcc$ = Potência do motor do caminhão, em cv;

PL = Preço do combustível, em R\$ L⁻¹.

Os valores referentes ao consumo de combustível específico do caminhão foram obtidos junto a Banchi, Lopez & Rocco (2008), Tabela 2. No caso, 494 caminhões canavieiros foram estudados, totalizando uma distância total percorrida de aproximadamente 57 milhões de quilômetros. No modelo, o valor de $CCBEt$ corresponde à faixa de potência do equipamento inserida pelo usuário.

Tabela 2. Consumo de combustível para caminhões canavieiros.

Caminhões Canavieiros			Consumo de Combustível	
Faixa de Potência (cv)	No de Equipamentos	Distância Estudada (km)	km L ⁻¹	L km ⁻¹ cv ⁻¹
238 a 379	176	20.504.996	1,25 ± 0,19	0,0036 ± 0,0006
380 a 419	85	8.270.728	1,11 ± 0,24	0,0028 ± 0,0006
420 a 459	181	22.944.924	1,09 ± 0,18	0,0025 ± 0,0005
460 a 520	52	5.159.436	0,98 ± 0,21	0,0020 ± 0,0004

Fonte: Banchi, Lopes & Rocco (2008), adaptado pelo autor.

3.2.2.2. Reparos e Manutenção

A determinação dos custos com reparos e manutenção para os equipamentos envolvidos nos subsistemas corte, transbordo e transporte são apresentados, respectivamente, nos subitens 3.2.2.2.1, 3.2.2.2.2 e 3.2.2.2.3. Considerando-se que os trabalhos de referência utilizados para os cálculos datam de 2008 e 2009 os valores foram corrigidos de acordo com o IGP-DI (Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna), Tabela 3.

Tabela 3. Valores de IGP-DI utilizados para deflacionamento dos custos com reparos e manutenção.

Ano	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
IGP-DI	404,21	400,41	445,59	466,28	504,05	532,12	552,98	614,78

Fonte: Brasil (2016).

3.2.2.2.1. Corte

Para determinação dos custos com reparos e manutenção de colhedoras de cana-de-açúcar, utilizou-se a equação (59), proposta por Banchi, Lopez & Zago (2008). A equação foi obtida a partir do estudo de equipamentos fabricados entre 1997 e 2007, de 8 diferentes unidades sucroenergéticas. O coeficiente de determinação da equação (R^2) é de 0,96.

$$CRM_c = 0,0068 \times VUE_c + 25,839 \quad (59)$$

Em que:

CRM_c = Custo com reparos e manutenção de colhedoras de cana-de-açúcar, em R\$ h⁻¹;

VUE_c = Vida útil estimada de colhedoras, em h.

3.2.2.2.2. Transbordo

Considerando a composição do conjunto transbordo, os custos com reparos e manutenção foram determinados para a fonte de potência, tratores, e unidades de carga. Para os tratores, utilizou-se a equação (60), propostas por Banchi, Lopez & Zago (2008).

$$CRM_{tr} = a \times Pot_{Mtr} + b \quad (60)$$

Em que:

CRM_{tr} = Custo com reparos e manutenção de tratores, em R\$ h⁻¹;

a = Coeficiente angular;

Pot_{Mtr} = Potência do motor do trator, em cv;

b = Coeficiente linear;

Os coeficientes angular e linear variam de acordo com a potência, Tabela 4. Os coeficientes foram obtidos a partir do estudo de 921 equipamentos, com datas de fabricação entre 2000 a 2007, em 27 unidades sucroenergéticas.

Tabela 4. Coeficientes de equação linear para determinação do custo com reparos e manutenção (R\$ h⁻¹) em tratores, por faixa de potência (cv), em função do uso acumulado (horas).

Tratores agrícolas		Coeficientes da equação		R ²
Faixa de Potência (cv)	No de Equipamentos	a	b	
55 a 69 cv	19	0,00009	1,48484	0,9356
70 a 79 cv	32	0,00012	2,7727	0,9242
80 a 94 cv	90	0,00059	3,32266	0,9799
95 a 114 cv	161	0,00074	4,144	0,9762
140 a 170 cv	306	0,00068	4,24778	0,9731
171 a 199 cv	244	0,00104	4,14252	0,9888
> 199 cv	69	0,0008	6,95755	0,973

Fonte: Banchi, Lopes & Rocco (2008), adaptado pelo autor.

Para as unidades de carga do conjunto transbordo utilizou-se a equação (61) proposta por Banchi, Lopez & Barreto Junior (2009). O coeficiente de determinação (R^2) da equação é de 0,6386. No caso, a estimativa foi determinada pela análise de 139 equipamentos, em 5 unidades sucroenergéticas, no período de 2000 a 2007.

$$CRMtb = 0,0016 \times VUEtb + 3,4537 \quad (61)$$

Em que:

CRMtb = Custo com reparos e manutenção de transbordos, em R\$ h⁻¹;

VUEtb = Vida útil estimada de transbordos, em h.

3.2.2.2.3. Transporte

As considerações para o subsistema transporte seguem a mesma estrutura do transbordo, de modo que as equações do conjunto são apresentadas de forma individualizada, por cavalo (caminhões canavieiros) e unidades de carga (carrocerias), ambas propostas por Banchi, Lopes & Barreto Junior (2009). Para os caminhões utilizou-se a equação (62), obtida a partir da análise de custos de 317 equipamentos, com anos de fabricação entre 2000 e 2007, e potência entre 238 e 520 cv. Os veículos percorreram uma distância total de aproximadamente 86,7 milhões de km. Os autores não apresentaram o coeficiente de determinação da equação (R^2).

$$CRMcc = 0,0038464 \times VUE^{0,4246} \quad (62)$$

Em que:

CRMcc = Custo com reparos e manutenção de caminhões canavieiros, em R\$ km⁻¹;

VUEcc = Vida útil estimada de caminhões canavieiros, em km.

Já para as carrocerias, utilizou-se a equação (63), cujo coeficiente de determinação (R^2) é de 0,688 e foi apurada a partir da análise de 66 equipamentos, no período de 2000 a 2007.

$$CRMcr = 0,0000003 \times VUEcr + 0,1639 \quad (63)$$

Em que:

CRMcr = Custo com reparos e manutenção de carrocerias, em R\$ km⁻¹;

VUEcr = Vida útil estimada de carrocerias, em km.

3.2.2.3. Operadores

O pagamento de bonificações aos operadores foi indexado no modelo a partir de uma remuneração em reais por tonelada (R\$ t⁻¹), unidade esta de fácil correlação com os indicadores operacionais de produção. Para os subsistemas corte e transbordo o cálculo é realizado pela equação (64):

$$CBO = \frac{SVO \times PM}{Ni \times HT} \quad (64)$$

Em que:

CBO = Custo de bonificação de operadores, em R\$ h⁻¹;

SVO = Salário variável de operadores, R\$ t⁻¹;

PM = Planejamento de moagem, em t;

Ni = Número inteiro de conjuntos;

HT = Horas trabalhadas por conjunto.

Para o subsistema transporte a rotina é a mesma, porém, em vez de utilizar as horas trabalhadas na colheita, utiliza-se a distância percorrida pelos caminhões na safra, equação (65):

$$CBO = \frac{SVO \times PM}{Nic \times DPSc} \quad (65)$$

Em que:

CBO = Custo de bonificação de operadores, em R\$ km⁻¹;

SVO = Salário variável de operadores, R\$ t⁻¹;

PM = Planejamento de moagem, em t;

Nic = Número inteiro de conjuntos de transporte;

DPSc = Distância percorrida por conjunto de transporte, em km.

3.2.2.4. Pneus

A determinação dos custos com pneus para o subsistema transporte seguiu os procedimentos propostos por Carreira (2010), que preconiza dispêndios com pneus novos e recapados, equação (66):

$$CP = CPn \times CPr \quad (66)$$

Em que:

CP = Custo com pneus, em R\$ km⁻¹;

CPn = Custo com pneus novos, em R\$ km⁻¹;

CPr = Custo com pneus recapados, em R\$ km⁻¹.

O custo com pneus novos é calculado pela relação do número de pneus por veículo (NP), valor unitário (VUPn) e durabilidade (DUPn) dos pneus, equação (67):

$$CPn = \frac{NP \times VUPn}{DUPn} \quad (67)$$

Em que:

CPn = Custo com pneus novos, em R\$ km⁻¹;

NP = Número de pneus por veículo;

VUPn = Valor unitário dos pneus novos, R\$ pneu⁻¹;

DUPn = Durabilidade dos pneus novos, em km.

Para o cálculo do custo dos pneus recapados (CPr), equação (68), é necessário considerar o fato de que um mesmo pneu pode sofrer mais de uma recapagem (RP), visando estender sua vida útil.

$$CPr = \frac{NP \times VUPr \times RP}{DUPr} \quad (68)$$

Em que:

CPr = Custo com pneus recapados, em R\$ km⁻¹;

NP = Número de pneus por veículo;

VUPr = Valor unitário da recapagem, R\$ pneu⁻¹;

RP = Número de recapagens por pneu

DUPr = Durabilidade dos pneus recapados, em km.

3.3. Verificação e Validação

Com o objetivo de eliminar inconsistências na memória de cálculo do modelo, verificações foram realizadas no decorrer no desenvolvimento, por meio de simulações pontuais da rotina, contrastando os valores obtidos com resultados aferidos a partir de cálculos manuais. A análise do comportamento do modelo quanto a consistência dos resultados gerados foi realizada a partir da criação de um cenário base, definido em conjunto a Agrícola São João¹⁶, responsável pela produção de cerca de 300 mil toneladas de cana-de-açúcar na região de Lençóis Paulista/SP.

Além da validação pelo cenário base, realizaram-se comparativos com outras fontes de dados. No âmbito dos parâmetros operacionais, optou-se pela comparação com valores apresentados por Banchi et al. (2016). Os autores apresentam indicadores de desempenho para sistemas mecanizados de colheita de cana-de-açúcar a partir da análise de dados de 34 unidades agroindustriais na safra 2015/2016. No caso, por disponibilidade de dados e pela maior difusão entre os agentes envolvidos em processos mecanizados de colheita, os indicadores operacionais selecionados para validação foram: Corte – capacidade de trabalho ($t\ h^{-1}$, $t\ dia^{-1}$ e $mil\ t\ safra^{-1}$), consumo de combustível ($L\ t^{-1}$); Transbordo – relação transbordo por colhedora; Transporte – produtividade média dos caminhões ($t\ dia^{-1}\ km^{-1}$).

A validação dos parâmetros econômicos, por sua vez, deve ser realizada com cautela, não podendo ser feito um comparativo direto com trabalhos já publicados e com defasagem de tempo, dado as questões de inflação à que estão sujeitas as variáveis. Desta forma, além do comparativo com os resultados apresentados por Banchi et al. (2016), realizou-se uma pesquisa com 19 prestadores de serviços mecanizados de colheita de cana-de-açúcar, coletando-se os preços praticados para corte, transbordo e transporte. Os informantes são usinas localizadas em São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso que prestam serviços a produtores independentes e de menor porte, e que por questão de confidencialidade não terão os nomes revelados.

¹⁶ Para maiores informações: <http://www.gvagro.agr.br>

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo recebeu o nome de “Gescol” e o algoritmo foi desenvolvido no *software* Excel®. Embora a planilha tenha limitações de recursos, em especial quanto a capacidade do processamento de dados e certa fragilidade no que diz respeito à segurança operacional, trata-se de uma plataforma de baixo custo, ampla utilização e fácil manipulação. Um *software* dedicado exige altos investimentos e equipe especializada para desenvolvimento e manutenção, além de que eventuais modificações na rotina são complexas de serem realizadas. Portanto, a estruturação do modelo em planilha eletrônica pode ser vista como uma etapa preliminar de desenvolvimento de um *software* dedicado, tendo por objetivo consolidar os conceitos e relações que representam o sistema em questão. A estrutura do modelo é representada na Figura 2¹⁷.

A rotina de cálculo tem início (1) com a entrada de dados referentes ao planejamento de moagem (2) e capacidade industrial (3), buscando-se estabelecer a quantidade matéria-prima a ser processada em um determinado horizonte de tempo¹⁸. Os valores atribuídos a programação de moagem devem respeitar os limites de capacidade de processamento pela indústria, caso contrário, o planejamento deve ser revisto (4).

Aferidas as premissas de planejamento, a etapa seguinte é a determinação do ritmo operacional (5), que expressa, no caso do sistema de colheita, a quantidade de área a ser colhida em função do tempo disponível para realização da operação. A área a ser colhida depende da relação entre o planejamento de moagem e produtividade agrícola, levando-se em conta as perdas na operação¹⁹. Neste sentido, vale que destacar que área a ser colhida é uma variável de saída do modelo, fato este que difere de modelagens realizadas por outros autores, como Santos et al. (2014), que utiliza a área como premissa de entrada. A lógica de se estimar a área em vez de definir a mesma como premissa, está no fato de que os projetos de instalação de unidades sucroenergéticas partem da capacidade de moagem e não da área de produção.

Na sequência são inseridos os dados técnicos/operacionais (6) dos equipamentos envolvidos nos subsistemas de corte, transbordo, transporte e apoio. Com base nestes dados são realizados os cálculos das capacidades operacionais (7), de campo ou de produção²⁰ e de indicadores de desempenho, tais como: quantidade de cana colhida por máquina; relação transbordo por colhedora; distância percorrida por caminhão na safra, entre outros. A razão entre o ritmo

¹⁷ Os números entre parênteses representam as etapas do modelo.

¹⁸ Para maiores detalhes quanto as variáveis envolvidas e respectivas relações ver equações (1) a (4), nas páginas 32 a 33.

¹⁹ Para maiores detalhes quanto as variáveis envolvidas e respectivas relações ver equações de (5) a (10), nas páginas 33 a 34.

²⁰ Para maiores detalhes quanto as variáveis envolvidas e respectivas relações ver: corte – equações de (11) a (19), da página 35 a 37; transbordo – equações de (20) a (28), da página 38 a 40; transporte – equações de (29) a (38), da página 40 a 42; apoio – equação (39), página 43.

operacional e a capacidade operacional resulta, no caso do corte, no número necessário de colhedoras para atender a demanda industrial, desencadeando, por sua vez, a quantificação dos demais equipamentos envolvidos, número de conjuntos (8), encerrando-se a etapa do dimensionamento operacional.

A inserção dos dados econômicos (9) também é realizada a partir dos subsistemas e servem de base para determinar²¹ os custos totais (10), soma de custos fixos e variáveis, que são expressos em função das horas de utilização ou distância percorrida, no caso do transporte. Relacionando os custos totais (10) com as respectivas capacidades operacionais (7), determina-se o custo operacional (11), expresso em reais por tonelada ($R\$ t^{-1}$). Se tanto o dimensionamento operacional como econômico atenderem as necessidades das premissas propostas (12), a rotina de cálculo é encerrada (13). Caso contrário, as condições iniciais devem ser revistas, iniciando-se uma nova rotina.

²¹ Para maiores detalhes quanto as variáveis envolvidas e respectivas relações ver equações de (41) a (68), da página 44 a 54.

Figura 2. Lógica²² do modelo Gescol.

A Tabela 5 apresenta as variáveis de entrada do modelo, 120 no total. Ela é dividida para atender as variáveis gerenciais, operacionais e econômicas, contemplando os quatro subsistemas: corte, transbordo, transporte e apoio. No caso os dados contidos na tabela representam o cenário base utilizado.

²² Desenvolvido de acordo com simbologia proposta por Oakland (2007).

Tabela 5. Entrada de dados do modelo Gescol: cenário base.

Variável					Variável						
	Variável	Sigla	Und	Valor		Sigla	Und	Valor			
Gerenciais e climáticos	Planejamento de moagem	PM	t	350.000	Horas por turno de trabalho	HTT	h	8			
	Data de início de safra	DIs	data	01/04/2016	Número de turnos	NT	n	3			
	Data de fim de safra	DFs	data	10/11/2016	Produtividade agrícola	PA	t ha ⁻¹	75			
	Domingos e feriados	NDF	n	0	Preço da cana	PCA	R\$ t ⁻¹	75			
	Dias úteis impróprios	DSui	n	25	Critério de arredondamento	CA	N	0,20			
	Eficiência gerencial	EFg	%	75	Espaçamento de plantio	ESP	M	1,50			
	Cap. de moagem diária	CMD	t dia ⁻¹	17.000	Preço do combustível	PL	R\$ L ⁻¹	3,09			
	Variável	Sigla	Und	Corte*	Transbordo		Transporte		Apoio		
				C	TR	UCtb	CM	UCt	OF	PP	CB
Operacionais	Velocidade de trabalho	V	km h ⁻¹	5,30	11,0	-	60,0	-	-	-	-
	Carregado	Vcarg	km h ⁻¹	-	9,0	-	50,0	-	-	-	-
	Vazio	Vv	km h ⁻¹	-	13,0	-	70,0	-	-	-	-
	Filerias colhidas passada	FCP	n	1	-	-	-	-	-	-	-
	Perdas na colheita	PEc	%	6,3	-	-	-	-	-	-	-
	Eficiência de campo	EF	%	55	70	-	90	-	-	-	-
	Potência do motor	PotM	cv	-	180	-	500	-	-	-	-
	Nº de unidades de carga	NUC	n	-	-	2	-	2	-	-	-
	Cap. de carga individual	CIC	t	-	-	8	-	35	-	-	-
	Cap. total de carga	CTC	t	-	-	16	-	70	-	-	-
	Distância descarreg.	DP	km	-	0,5	-	25,0	-	-	-	-
	Ida	DPi	km	-	0,5	-	25,0	-	-	-	-
	Volta	DPv	km	-	0,5	-	25,0	-	-	-	-
	Tempo descarregamento	TDescarg	min	-	-	5	-	40	-	-	-
Equipamentos por frente	EFt	n	3	-	-	-	-	1	1	1	
Econômicos	Valor inicial unitário	VIu	Mil R\$	1.175,0	300,0	86,0	370,0	100,0	325,0	370,0	350,0
	Valor inicial total	VI	Mil R\$	1.175,0	300,0	172,0	370,0	200,0	325,0	370,0	350,0
	Valor final	VF	% de VI	15	15	35	35	60	20	30	30
	Valor final	VF	Mil R\$	176,2	45,0	60,2	129,5	120,0	65,0	111,0	105,0
	Vida útil anual	VUA	anos	5	10	10	10	10	10	10	10
	Vida útil estimada	VUE	h ou km	10.000	12.000	10.000	500.000	300.000	-	-	-
	Taxa de juros	i	%	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75
	Fator aloj, seguros e taxas	FAST	%	2	2	2	2	2	2	2	2
	Nº de pneus por veículo	NP	n	-	-	-	2	16	-	-	-
	Durabilidade do pneu	DUPn	km	-	-	-	80.000	80.000	-	-	-
	Valor unitário do pneu	VUPn	R\$	-	-	-	1.850	1.850	-	-	-
	Recapagens por pneu	RP	n	-	-	-	2	2	-	-	-
	Durab. da recapagem	DUPr	km	-	-	-	64.000	64.000	-	-	-
	Valor unitário recapagem	VUPr	R\$	-	-	-	490	490	-	-	-
	Nº operadores por turno	NOPt	n	1,2	1,5	-	1,5	-	3	1,5	1,7
	Salário fixo operador**	SFO	R\$ mês ⁻¹	5.000	4.250	-	4.850	-	3.500	3.500	3.500
	Salário variável operador	SVO	R\$ t ⁻¹	0	0	-	0	-	0	0	0

*C = Colhedora, TR = Trator, UCtb = Unidade de carga do transbordo, CM = Caminhão, UCt = Unidade de carga do transporte, OF = Caminhão oficina, PP = Caminhão bombeiro, CB = Caminhão comboio. **Com encargos.

A Tabela 6 e Tabela 7 apresentam, respectivamente, as variáveis operacionais e econômicas de saída do modelo, 152 no total. Da mesma forma, contemplam os quatro subsistemas: corte, transbordo, transporte e apoio. No caso os valores contidos na tabela representam os resultados para o cenário base.

Tabela 6. Variáveis operacionais de saída do modelo Gescol: cenário base.

Variável	Sigla	Und	Valor	Variável	Sigla	Und	Valor
Dias de safra totais	DSt	n	224	Área a ser colhida	AR	ha	4.980
Dia de safra efetivos	DSe	n	149	Ritmo operacional	RO	ha h ⁻¹	1,39
Moagem realizável	MR	t	2.537.250	Qtd.cana produzida	QMP _r	t	373.533
Jornada de trabalho	JT	horas	24	Perdas quantitativas	PE _q	t	23.533
Tempo disponível	TD	horas	3.582,00	Perdas Monetárias	PE _m	R\$	1.764.941
Prod. agrícola líquida	PAl _q	t/ha	70,3	Número de frentes	NF	n	1,00

Variável	Sigla	Und	Corte	Transbordo		Transporte		Apoio		
			C	TR	UC _{tb}	CM	U	OF	PP	CB
Cap. campo operacional	CCO	ha h ⁻¹	0,44	-	-	-	-	-	-	-
Tempo de ciclo	TC	h	-	0,70	-	3,80	-	-	-	-
Carregamento	TC _{arr}	h	-	0,52	-	2,28	-	-	-	-
Deslocamento	TD _{esloc}	h	-	0,09	-	0,86	-	-	-	-
Descarregamento	TD _{escar}	h	-	0,08	-	0,67	-	-	-	-
Cap. de produção	CPO	t/h	30,73	16,04	-	16,57	-	-	-	-
Número de colhedoras	Nc	n	3,18	-	-	-	-	-	-	-
Relação transp/col	R	n	-	1,92	-	1,85	-	-	-	-
Nº de conjuntos	N	n	3,18	6,09	-	5,90	-	1,00	1,00	1,00
Nº de conjuntos inteiro	Ni	n	3	6	12	6	12	1	1	1
Relação transp/col real		n	-	2,00	-	2,00	-	-	-	-
Cap. prod. diária real	CPO _{dr}	t dia ⁻¹	781,69	390,84	-	390,84	-	-	-	-
Cap. produção real	CPO _r	t h ⁻¹	32,57	16,29	-	16,29	-	-	-	-
Horas trabalhadas	HT	h	11.468	22.937	22.937	-	-	-	-	-
Horas trabalhadas unt.	HT _u	h	3.822	3.822	3.822	-	-	-	-	-
Dist. percorrida	DPS	km	-	-	-	250.000	250.000	-	-	-
Dist. percorrida unit.	DPSc	km	-	-	-	41.666	41.666	-	-	-
Cons. de combustível	CCBEC	L t ⁻¹ , L h ⁻¹ , km L ⁻¹	0,95	10,42	-	1,00	-	-	-	-
Vida útil anual projetada	VUAp	anos	2,6	3,1	2,6	10,0	7,2	10,0	10,0	10,0
Número de operadores	NOP	n	11	27	-	27	-	9	5	5

*C = Colhedora, TR = Trator, UC_{tb} = Unidade de carga do transbordo, CM = Caminhão, UC_t = Unidade de carga do transporte, OF = Caminhão oficina, PP = Caminhão bombeiro, CB = Caminhão comboio.

Tabela 7. Variáveis econômicas de saída do modelo Gescol: cenário base.

Variável	Sigla	Und	Corte	Transbordo			Transporte			Apoio				Total
			C	TR	UCtb	Tb	CM	UCt	T	OF	PP	CB	A	SMC
Depreciação anual	DPA	mil R\$	381,8	81,2	42,74	124,0	24,1	11,1	35,2	26,0	25,9	24,5	76,4	617,3
Juros anuais	JRA	mil R\$	59,1	15,1	10,16	25,3	21,9	14,0	35,9	17,1	21,0	19,9	58,0	178,2
Aloj., seguros e taxas	ASTA	mil R\$	23,5	6,0	3,44	9,4	7,4	4,0	11,4	6,5	7,4	7,0	20,9	65,2
Operadores	OPA	mil R\$	220,0	229,5	-	229,5	261,9	0,0	261,9	378,0	210,0	210,0	798,0	1.509,4
Custo fixo anual	CFA	mil R\$	684,4	331,8	56,34	388,2	315,20	29,11	344,31	427,56	264,34	261,41	953,31	2.370,22
Custo fixo**	CF	R\$ h ⁻¹ , R\$ km ⁻¹	179,04	86,80	14,74	101,54	7,56	0,70	8,26	-	-	-	-	288,84
Combustível	CC	R\$ h ⁻¹ , R\$ km ⁻¹	90,75	32,20	-	32,20	3,09	-	3,09	-	-	-	-	125,95
Reparos e manutenção	CRM	R\$ h ⁻¹ , R\$ km ⁻¹	142,42	25,28	57,96	83,24	1,54	0,77	2,31	-	-	-	-	227,97
Operadores variável	OPAv	R\$ h ⁻¹ , R\$ km ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pneus	CP	R\$ h ⁻¹ , R\$ km ⁻¹	-	-	-	-	0,08	1,23	1,31	-	-	-	-	1,31
Utilização normal	CPn	R\$ h ⁻¹ , R\$ km ⁻¹	-	-	-	-	0,05	0,74	0,79	-	-	-	-	0,79
Recapagem	CPr	R\$ h ⁻¹ , R\$ km ⁻¹	-	-	-	-	0,03	0,49	0,52	-	-	-	-	0,52
Custo variável	CV	R\$ h ⁻¹ , R\$ km ⁻¹	233,07	57,49	57,96	115,44	4,70	2,00	6,71	-	-	-	-	355,22
Custo total	CT	R\$ h ⁻¹ , R\$ km ⁻¹	412,10	144,29	72,70	216,98	12,27	2,70	14,97	-	-	-	-	644,06
Custo operacional	COP	R\$ t ⁻¹	12,65	8,86	4,46	13,32	8,76	1,93	10,69	1,22	0,76	0,75	2,72	39,39
Investimento	INV	milhões R\$	3,53	1,80	2,06	3,86	2,22	2,40	4,62	0,33	0,37	0,35	1,05	13,05

*C = Colhedora, TR = Trator, UCtb = Unidade de carga do transbordo, Tb = Transbordo (TR+UCtb), CM = Caminhão, UCt = Unidade de carga do transporte, T = Transporte (CM+UCt), OF = Caminhão oficina, PP = Caminhão bombeiro, CB = Caminhão comboio, A = Apoio (OF+PP+CB), SMC = Sistema mecanizado de colheita (C+Tb+T+A). **A unidade R\$ km⁻¹ refere-se ao subsistema transporte.

Com a finalidade de facilitar o uso do modelo, desenvolveu-se um painel de controle, Figura 3, com as principais variáveis de entrada e saída do modelo. Para as variáveis de entrada são sugeridos limites de mínimo e máximo (ilustrados pelas barras de rolagem), definidos com base em revisão bibliográfica, restringindo assim os valores a um intervalo técnico-econômico conhecido. Porém, a rotina do modelo não limita eventuais análises fora dos limites sugeridos. Por sua vez, as variáveis de saída são apresentadas em formatos gráficos, permitindo a visualização rápida dos efeitos de modificações realizadas nas variáveis de entrada.

Figura 3. Painel de controle do modelo Gescol.

4.1. Verificação e Validação do Modelo

Ao longo do desenvolvimento do modelo as verificações foram realizadas por meio de comparação dos resultados do modelo com cálculos manuais, não sendo observadas inconsistências, o que permite afirmar que a rotina esta correta. A validação foi realizada de três formas comparando-se os resultados com: um cenário base; dados obtidos em bibliografia; pesquisas com prestadores de serviços. O cenário base foi construído a partir dos dados referentes ao Condomínio Agrícola São João, cujos valores constam na Tabela 5. Considerando que o modelo está fundamentado no dimensionamento operacional e econômico de um sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar, duas variáveis podem ser consideradas centrais na validação dos resultados: número de conjuntos e custos operacionais.

O número de equipamentos dimensionado pelo modelo para o cenário base foi 3 colhedoras, 6 composições de transbordo, 6 conjuntos de transporte e 1 estrutura de apoio (Tabela 6; Figura 3). Tais valores se mostram semelhantes aos informados pela Agrícola São João, exceto

pelo número de colhedoras que é 4. No caso, a diferença de uma colhedora pode ser atribuída a um aspecto gerencial, dado que a empresa opta por manter uma máquina reserva, visando a otimização da frente de colheita nos períodos de paradas regulares das máquinas, além de um seguro operacional no caso de eventuais quebras.

O custo operacional determinado pelo modelo foi 39,39 R\$ t⁻¹ (Tabela 7), enquanto que o informado pela Agrícola São João foi 32,00 R\$ t⁻¹, o que representa um acréscimo de 23,1%. A diferença entre a forma de cálculo da rotina do modelo e a metodologia de coleta de dados do condomínio agrícola, pode ser apontada como a razão desse acréscimo.

4.1.1. Validação dos Indicadores Operacionais

Para o corte, a validação foi baseada nos indicadores de capacidade de trabalho e consumo combustível. No caso do transbordo, o indicador utilizado foi a relação transbordo por colhedora, enquanto que para o transporte utilizou-se da distância percorrida por caminhão na safra.

4.1.1.1. Corte

Considerando o sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar, o subsistema corte é que o tem os indicadores de desempenho mais discutidos na prática e em bibliografia. Em termos operacionais as colhedoras são avaliadas sob três aspectos principais: capacidade de trabalho; consumo de combustível; qualidade da operação, que se traduz em perdas e matéria estranha na operação. Destes, apenas os atributos relacionados a qualidade da operação não foram modelados, sendo considerados no modelo como parâmetros de entrada, o que não possibilita, portanto, uma validação comparativa dos resultados gerados.

4.1.1.1.1. Capacidade de Trabalho

Para a operação de colheita mecanizada de cana-de-açúcar, os indicadores da quantidade de trabalho podem ser expressos de diferentes maneiras, em base horária, diária ou em função da safra. A validação da capacidade operacional de corte horária (t h⁻¹) da colhedora é apresentada na Figura 4, na qual são comparados o resultado do modelo diante dos resultados reais obtidos por Banchi et al. (2016). Como se observa, o resultado do modelo Gescol de 30,7 t h⁻¹, é condizente com a realidade, estando dentro de um limite conhecido de valores, inclusive, com o valor próximo

da média obtida pelas usinas, de 29,1 t h⁻¹, uma diferença de 5,5% a mais. O erro médio do valor calculado pelo em modelo, em relação a comparativos individuais das amostras, foi 2,7 t h⁻¹ ou 8,9% para mais ou menos.

Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Coef. variação (%)	Erro médio	Erro médio (%)
29,1	18,5	39,4	5,2	18,0	± 2,7	± 8,9

Figura 4. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para a capacidade operacional de corte (t h⁻¹). Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Banchi et al. (2016).

A expressão da capacidade operacional da colhedora em função dos dias tem duas vertentes de análise: dias efetivos; dias totais. A determinação da capacidade pelos dias efetivos leva em consideração apenas os dias nos quais a moagem pela unidade industrial é possível, sem paradas por motivos gerenciais ou climáticos, enquanto que pelos dias totais o período é considerado como um todo, dias de safra totais (DSt). Na Figura 5 são comparados o resultado do modelo com os resultados obtidos por Banchi et al. (2016), levando em conta os dias de safra totais.

Como se nota, o valor calculado pelo modelo de 520,8 t dia⁻¹ se encontra fora do intervalo apontado por Banchi et al. (2016), uma diferença de 155,2% a mais em relação a média da amostra, 335,6 t dia⁻¹. Apesar de ser uma diferença expressiva em relação a média, o valor calculado pelo modelo fica próximo ao maior valor apresentado, 492,9 t dia⁻¹, com diferença de 27,9 t dia⁻¹ o que equivale a 5,6%. Na busca pelo motivo da diferença, constatou-se que as unidades industriais, de modo a evitar paradas ou mesmo redução das capacidades das frentes de colheita, trabalham com máquinas reservas na operação, geralmente, na proporção de 3:1, uma máquina reserva para cada três regulares. Tal situação, acaba por reduzir a quantidade de matéria-prima colhida por máquina. No desenvolvimento de um cenário no qual o modelo considera a operação com uma máquina reserva, o número de conjuntos passaria de três para quatro, reduzindo o indicador de capacidade de colheita diária para 390,6 t dia⁻¹, o que significaria uma diferença de 16,4% em relação a média.

Figura 5. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para capacidade operacional de corte (t dia⁻¹)²³.
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Banchi et al. (2016).

Considerando a tecnologia vigente no que diz respeito as colhedoras de cana-de-açúcar, os técnicos do setor discutem que para o dimensionamento de frentes de colheita de cana, em geral, segue-se uma diretriz de 1 máquina a cada 100 mil toneladas de matéria-prima. Tal valor é de certa forma confirmado pelo trabalho de Banchi et al. (2016), Figura 6, no qual os autores consideram como desempenho ideal um valor acima de 83,5 mil toneladas por máquina/safra. O valor de 116,7 mil t safra⁻¹ calculado pelo modelo está, novamente, próximo ao limite superior da amostra, o que pode ser atribuído a não operação de máquinas reservas, fato este que melhora o indicador individual de desempenho calculado.

²³ Dias de safra totais (DSt).

Figura 6. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para capacidade operacional de corte (mil t safra⁻¹).
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Banchi et al. (2016).

4.1.1.1.2. Consumo de Combustível

A partir da análise da base de dados dos ensaios padronizados conduzidos de acordo com metodologia proposta por Ripoli & Ripoli (2009), elaborou-se a Figura 7, que ilustra o consumo de combustível (L t⁻¹) em função da capacidade de colheita da colhedora (t h⁻¹). Como se observa, quanto maior a capacidade de colheita, menor é o consumo de combustível por tonelada colhida, destacando-se que a partir de capacidades superiores 150 t h⁻¹ os valores se mostram mais constantes.

Figura 7. Relação entre consumo de combustível (L t⁻¹) e capacidade de colheita (t h⁻¹).
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Belardo (2010), Rosa (2013) e Belardo (2016).

Conforme Figura 7, o consumo de combustível depende da capacidade de colheita, a qual por sua vez é influenciada por uma série de variáveis. Com base nos resultados dos ensaios padronizados, selecionou-se as seguintes variáveis: velocidade da operação, largura de trabalho, definida por sua vez por espaçamento e fileiras colhidas por passada, e produtividade agrícola. Com base nestas variáveis desenvolveu-se um modelo empírico de cálculo de consumo de combustível específico da colhedora (CCBEc), por meio de uma análise de regressão, equação (69), cujo coeficiente de determinação (R^2) foi 0,9474.

$$CCBEc = EXP(5,96726 - (0,72057 \times \ln(ESP)) - (0,62388 \times \ln(FCP)) - (0,99328 \times \ln(PA)) - (0,85949 \times \ln(VE))) \quad (69)$$

Em que:

CCBEc = Consumo de combustível específico da colhedora, em $L t^{-1}$;

ESP = Espaçamento de plantio, em m;

FCP = Fileiras colhidas por passada;

PA = Produtividade agrícola, em $t ha^{-1}$;

VTc = Velocidade de trabalho da colhedora; em $km h^{-1}$.

Com a aplicação dos dados da amostra ao modelo empírico desenvolvido, Figura 8, obteve-se que 77,8% das previsões resultaram em erros menores do que $\pm 10\%$, 21,5% ficaram entre ± 10 a 20% e, apenas, 0,6% das previsões apresentaram erros entre ± 20 a 25%.

Figura 8. Comparação entre o resultado do modelo de previsão de consumo de combustível específico de colhedoras - CCBEc ($L t^{-1}$) e resultados da base de dados.

Considerando as variáveis de entrada inicialmente inseridas no modelo, o consumo de combustível previsto no Gescol foi $0,95 \text{ L t}^{-1}$. Ao confrontar este resultado com os valores apresentados por Banchi et al. (2016), Figura 9, observa-se que consumo, ainda que próximo do limite inferior, se encontra abaixo dos valores apontados pelos autores, cuja média foi de $1,36 \text{ L t}^{-1}$, uma diferença de 43,2%. Tal situação pode ser explicada pelo fato de que os dados utilizados para geração do modelo foram obtidos a partir de ensaios de campo. No ensaios, os consumos considerados são aqueles relacionados ao desempenho efetivo da máquina, tempos produtivos, não sendo apontados os consumos referentes aos tempos acessórios e auxiliares, como manobras de cabeceira e deslocamento entre talhões próximos. A partir do intervalo de consumo considerado como ideal por Banchi et al. (2016), $1,23$ a $1,29 \text{ L t}^{-1}$, e o valor obtido pelo modelo Gescol, $0,95 \text{ L t}^{-1}$, que tem como base os tempos produtivos, indiretamente é possível supor que em média 32,6% do consumo operacional esta associado a tempos não produtivos.

Figura 9. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para consumo de combustível específico (L t^{-1}).
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Banchi et al. (2016).

4.1.1.2. Transbordo

Para o subsistema transbordo o indicador operacional mais difundido é a relação de equipamentos por colhedora, o qual depende das características dos maquinários e dos tempos de ciclo envolvidos no processo. Na Figura 10 é feita a comparação entre os resultados do modelo, 2 conjuntos de transbordo por colhedora, com os obtidos por Banchi et al. (2016). O valor determinado pelo Gescol é condizente com os resultados obtidos pelos autores, ficando próximo ao intervalo ideal considerado, 2,1 a 2,2 unidades por máquina.

Figura 10. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para relação transbordo por colhedora.
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Banchi et al. (2016).

4.1.1.3. Transporte

Para o subsistema transporte utilizou-se do indicador produtividade média dos caminhões apresentado por Pinto (2002), desenvolvido a partir do acompanhamento de três safras canavieiras, em 65 unidades industriais. Neste trabalho o autor se refere a produção média por caminhão por dia efetivo de safra e por distância dos talhões à indústria. A Figura 11 compara os resultados do modelo Gescol com intervalos referenciados pelo autor. Como se nota, o valor determinado pelo modelo de 15,63 t dia caminhão⁻¹ km⁻¹, se encontra dentro da faixa de valores especificada pelo autor, porém, um pouco acima das médias. Entretanto, um aspecto que deve ser levado em consideração é a desafagem de tempo de mais de 15 anos no comparativo. Neste intervalo de tempo, mudanças tecnológicas no sistema de produção de cana-de-açúcar ocorreram, sugerindo avanços, não somente em aspectos técnicos relacionados aos caminhões e unidades de carga, mas também nos aspectos logísticos, com utilização de ferramentas de apoio dedicados para alocação de áreas e frentes de operação. Com isso, o desempenho pode ter aumentado ao longo dos anos, como sugere a análise de Pinto (2002) a qual, para o horizonte considerado, é crescente a cada safra.

Figura 11. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para produtividade média dos caminhões (t dia caminhão⁻¹ km⁻¹).

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Pinto (2002).

4.1.2. Validação dos Indicadores Econômicos

A validação dos indicadores foi realizada por subsistema e para o total, sistema mecanizado de colheita. Nesse processo os resultados de Banchi et al. (2016) e de uma pesquisa realizada com 19 prestadores de serviços mecanizados de colheita, localizados no estados de SP, MG e MT, foram utilizados para o comparativo.

Para o subsistema corte, o valor determinado pelo modelo foi 12,65 R\$ t⁻¹, valor este dentro dos valores praticados pelo mercado, Figura 12, média de 14,17 R\$ t⁻¹, uma diferença de -10,4%. Observa-se ainda a diferença entre os valores máximo e mínimo, obtidos por Banchi et al. (2016) e pela pesquisa, 21,74 e 10,24 R\$ t⁻¹. Essa amplitude de 11,50 R\$ t⁻¹ reflete as diferenças entre os sistemas de produção, tanto no que diz respeito a aspectos técnicos como gerenciais.

Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Coef. variação (%)	Erro médio	Erro médio (%)
14,17	10,24	21,74	2,55	17,97	-1,02	± -8,03

Figura 12. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para custo do corte ($\text{R\$ t}^{-1}$).

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Banchi et al. (2016).

Para o subsistema transbordo, o valor determinado pelo modelo foi $13,32 \text{ R\$ t}^{-1}$, enquanto que a média do comparativo foi de $6,98 \text{ R\$ t}^{-1}$, o que equivale a uma diferença de 90,8%. O maior valor obtido no comparativo foi $9,74 \text{ R\$ t}^{-1}$, equivalente a uma diferença de $3,58 \text{ R\$ t}^{-1}$. Portanto, em relação a amostra, o modelo está superestimando o indicador.

Em uma análise detalhada observou-se que o cálculo do custo horário do trator obtido pelo modelo foi $144,29 \text{ R\$ h}^{-1}$, o que está dentro dos valores praticados pelo mercado para um trator dessa faixa de potência, 180 cv, com valores em torno de $140 \text{ R\$ h}^{-1}$ (AGRIANUAL, 2016). Relacionando este valor com a capacidade operacional do transbordo, têm-se o valor de $8,86 \text{ R\$ t}^{-1}$, sendo possível associar, portanto, que os $4,46 \text{ R\$ t}^{-1}$ restantes referem-se as duas unidades de carga. A decomposição desse valor mostra que $14,74 \text{ R\$ h}^{-1}$ é equivalente aos custos fixos e $57,96 \text{ R\$ h}^{-1}$ ao variável, no caso, aos reparos e manutenção. Para a determinação do custo fixo, utilizou-se da metodologia da ASABE (2011), método linear, enquanto que para os custos de reparos e manutenção utilizou-se a equação proposta por Banchi, Lopez & Barreto Junior (2009), resultando em $28,98 \text{ R\$ h}^{-1}$ de custos com reparos e manutenção por unidade de carga. Considera-se este valor questionável, sendo superior aos custos com reparos e manutenção do trator, $25,28 \text{ R\$ h}^{-1}$. Na falta de outros dados para comprovação, optou-se por manter os valores determinados pelo modelo.

Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Coef. variação (%)	Erro médio	Erro médio (%)
6,98	4,20	9,74	1,27	18,18	13,06	± 98,02

Figura 13. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para custo do transbordo ($\text{R\$ t}^{-1}$).
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Banchi et al. (2016).

Para o subsistema transporte, o valor determinado pelo modelo para um raio médio de 25 km foi $10,69 \text{ R\$ t}^{-1}$, valor este dentro dos praticados pelo mercado, Figura 14, média de $9,30 \text{ R\$ t}^{-1}$, uma diferença de $-14,9\%$. Assim como para o subsistema corte, observa-se uma diferença significativa entre os valores de máximo e mínimo, obtidos por Banchi et al. (2016) e pela pesquisa, $14,00$ e $6,90 \text{ R\$ t}^{-1}$ respectivamente, uma amplitude de $7,10 \text{ R\$ t}^{-1}$, considerando o mesmo raio de captação de matéria-prima.

Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Coef. variação (%)	Erro médio	Erro médio (%)
9,30	6,90	14,00	1,35	14,54	1,82	± 17,02

Figura 14. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para custo do transporte (R\$ t⁻¹) para raio médio de 25km.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Banchi et al. (2016).

No caso da pesquisa com as associações, os custos do transporte estavam disponíveis por intervalo de raio médio, possibilitando assim uma análise mais detalhada, Figura 15. Nota-se que os resultados do modelo Gescol se encontram dentro dos intervalos comuns, independentemente do raio. Na figura é possível observar ainda que a medida que se aumenta o raio médio de transporte os custos também aumentam. Para o resultado das associações, os custos podem ser representados pela equação proposta na figura, cujo coeficiente de determinação (R^2) é de 0,8362, e em média a mudança dos intervalos de raio médio, de 5 em 5 km, representa um acréscimo no custo de transporte de 1,06 R\$ t⁻¹.

Figura 15. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para custo do transporte (R\$ t⁻¹) por raio médio (km).

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Banchi et al. (2016).

Como resultado geral, para o sistema mecanizado de colheita, o valor determinado pelo modelo foi 39,39 R\$ t⁻¹, estando dentro do intervalo obtido por Banchi et al. (2016) e na pesquisa com as associações, Figura 16, média de 30,45 R\$ t⁻¹, uma diferença de 29,4%. Os motivos para essa diferença podem associados ao custos do transbordo e consideração pelo modelo das estruturas de apoio. No trabalho de Banchi et al. (2016) e pesquisa com as associações, não foi possível determinar se os custos com estrutura de apoio foram considerados.

Figura 16. Comparação entre o resultado do modelo e resultados reais para custo do sistema de colheita (R\$ t⁻¹).
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de resultados do trabalho e Banchi et al. (2016).

4.1.3. Utilização do Modelo como Ferramenta de Apoio a Tomadas de Decisão

A realização de simulações é uma das vantagens da utilização de modelos dedicados. A Figura 17, ilustra o comportamento do número de colhedoras e custo do sistema mecanizado de colheita, mediante variações do planejamento de moagem, tendo como início o cenário base. Um primeiro ponto a se observar é que, para as condições iniciais, as simulações são possíveis até aproximadamente o processamento de 2,5 milhões de toneladas. A partir desta quantidade, o modelo exige que haja uma revisão dos dados iniciais de entrada, visto que a quantidade de cana que se pretende processar, em função das características industriais, não atende ao período de moagem, definido, por sua vez, pelos dados gerenciais e climáticos.

A segunda observação esta na influência da quantidade de cana a ser colhida no dimensionamento do parque de máquinas e custo operacional de colheita. Como se observa na Figura 17, a tendência é o que custo por tonelada colhida tenha uma redução à medida que se aumenta a escala de produção. Tal comportamento é válido desde que a mesma quantidade de

equipamentos, no caso, as colhedoras, atendam a nova demanda operacional sem que haja necessidade de aquisição de uma nova máquina. Quando isto ocorre, são observadas elevações pontuais, “picos”, nos valores de custos.

Figura 17. Número de colhedoras e custo do sistema de colheita (R\$ t⁻¹) em função do planejamento de moagem (t).

As considerações sobre o comportamento dos custos operacionais em função da escala são semelhantes as apresentados por Santos et al. (2014) e, de certa forma, são observações consolidadas na temática de dimensionamento de sistemas mecanizados agrícolas. Apesar de tendências semelhantes, os resultados da análise a partir do Gescol se mostram menos suavizados que a de Santos et al. (2014), fato este que pode ser associado ao critério de arredondamento atribuído ao dimensionamento operacional do parque de máquinas. Este critério de arredondamento representa um critério gerencial na utilização da ferramenta. Na Tabela 8 é realizada uma análise do impacto do critério, em conjunto com o planejamento da moagem, para o dimensionamento do número de colhedoras. Como se observa, para cada intervalo de moagem é identificado o limite de influência do critério, delineando a aquisição de mais ou menos uma máquina para o cenário em questão.

Tabela 8. Número de colhedoras em função do planejamento de moagem e critério de arredondamento.

Planejamento de moagem - t	Número de colhedoras								
	Critério de arredondamento								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
350.000	4	3	3	3	3	3	3	3	3
500.000	5	5	5	5	5	4	4	4	4
650.000	6	6	6	6	6	6	6	6	6
800.000	8	8	7	7	7	7	7	7	7
950.000	9	9	9	9	9	9	8	8	8
1.100.000	10	10	10	10	10	10	10	10	10
1.250.000	12	12	12	11	11	11	11	11	11
1.400.000	13	13	13	13	13	13	13	12	12
1.550.000	14	14	14	14	14	14	14	14	14
1.700.000	16	16	16	16	15	15	15	15	15
1.850.000	17	17	17	17	17	17	17	17	16
2.000.000	19	18	18	18	18	18	18	18	18
2.150.000	20	20	20	20	20	19	19	19	19
2.300.000	21	21	21	21	21	21	21	21	20
2.450.000	23	23	22	22	22	22	22	22	22

A simulação dos valores de moagem influencia em outras variáveis do sistema, como por exemplo, o dimensionamento da área para atender a demanda industrial. No Gescol, a área é uma variável de saída, possibilitando, portanto, a realização de simulações dedicadas, Tabela 9. Por exemplo, para o cenário base, uma produtividade estimada de 90 t ha⁻¹ com perdas na colheita de 5,0%, demanda uma área de 4.094 ha para atender o planejamento de moagem. Análises dessa natureza podem ser utilizadas, por exemplo, para determinar eventuais necessidades de compra de matéria prima de terceiros, em função de condições operacionais e produtividade.

Tabela 9. Área a ser colhida (ha) em função de produtividade agrícola (t ha⁻¹) e perdas na colheita (%).

Produtividade agrícola – t ha ⁻¹	Área a ser colhida - ha				
	Perdas - %				
	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
70	5.155	5.208	5.263	5.319	5.376
80	4.510	4.557	4.605	4.654	4.704
90	4.009	4.051	4.094	4.137	4.182
100	3.608	3.646	3.684	3.723	3.763
110	3.280	3.314	3.349	3.385	3.421
120	3.007	3.038	3.070	3.103	3.136

Alterações na eficiência gerencial refletem nos custos do sistema de colheita, como ilustrado para o cenário base na Figura 18. Como se observa, em geral, à medida que se aumenta a eficiência o custo do sistema reduz, exceto em determinados intervalos, como por exemplo, entre 50 a 55% e 75 a 85%. Nestes intervalos, pela lógica aplicada ao modelo, o aumento da eficiência gerencial resulta em maior tempo disponível para realização das operações, pois as datas de início e fim de safra são pré-definidas, com a mesma quantidade dimensionada de equipamentos. Com isso, a quantidade de trabalho realizada por máquina diminui, aumentando os custos operacionais. Observa-se que nestes intervalos seria possível a antecipação do fim de safra, com novo aumento das capacidades operacionais, refletindo nos custos operacionais.

As possibilidades de análises a partir do uso de modelos são praticamente infinitas, dependendo das necessidades e cenários a serem avaliados. Ressalta-se, entretanto, que as alternativas indicadas podem não serem tangíveis na prática ou exigem profundas modificações no sistema, devendo, portanto, serem estudadas com cautela na definição das estratégias.

Figura 18. Custo do sistema de colheita (R\$ t⁻¹) em função da eficiência gerencial (%).

4.1.3.1. Corte

A velocidade de deslocamento da colhedora tem influência direta na capacidade de trabalho da máquina e, conseqüentemente, no número de conjuntos e custos operacionais. Esta relação pode ser visualizada na Figura 19, e como se observa, a medida que se aumenta a velocidade da colhedora, a tendência é que se tenha redução de custos e do número de equipamentos necessários para realizar a operação.

As relações, apesar de seguirem a mesma tendência de análises semelhantes realizadas por outros autores, como Santos et al. (2014), não apresentam tendências tão suavizadas, revelando intervalos de impacto. Este fato está associado ao critério de arredondamento utilizado no modelo. Em uma análise pontual, verifica-se que o comportamento dos custos operacionais do sistema e número de colhedoras são praticamente os mesmos nesses intervalos, independente da velocidade de colheita, como por exemplo, no intervalo de 5,5 a 6,5 km h⁻¹. Observa-se também que as reduções nos custos tendem a diminuir à medida que se aumenta os valores de velocidade da colhedora.

Ainda que a tendência seja de redução de custos e investimentos à medida que se aumenta a velocidade, deve-se levar em consideração que altas velocidades resultam em maiores riscos à

cultura, o que pode comprometer a produtividade nos anos seguintes (ROSA, 2013). Este autor afirma, inclusive, que uma velocidade de trabalho da colhedora entre 5 e 6 km h⁻¹, atende de forma satisfatória a operação, visto que alia menores custos, boa qualidade de processamento e maior conservação da máquina. Portanto, o importante não é operar em velocidades elevadas, mas sim, não operar em baixas velocidades. A manutenção do ritmo de trabalho é uma das premissas da produção enxuta, *lean production*.

Figura 19. Custo do sistema de colheita (R\$ t⁻¹) e número de colhedoras em função da velocidade da colhedora (km h⁻¹).

4.1.3.2. Transbordo

As recentes propostas de avanço em relação ao subsistema transbordo dizem a respeito, basicamente, ao aumento da capacidade e redução do número de unidades de carga da composição. O conjunto tradicional “1 trator + 2 unidades de carga”, com capacidade unitária variando de 8 a 12 toneladas, totalizando, de 16 a 24 toneladas por composição, está sendo substituído por unidade simples, “1 trator + 1 unidade de carga”, com capacidade em torno de 21 toneladas. A principal justificativa para essa substituição é obter maior agilidade do conjunto em manobras, tendo em vista o menor raio de giro do equipamento, além da transferência de carga mais rápida para o transporte, dado o basculamento de apenas uma unidade de carga. Para analisar a viabilidade de tal situação, um cenário alternativo foi desenvolvido, denominado de TMC (transbordo de maior capacidade), incorporando os eventuais ganhos de eficiência com a adoção da proposta, contraponto com o investimento a ser realizado. As premissas utilizadas para gerar o TMC foram baseadas em Melo e Rosa (2015), Tabela 10.

Tabela 10. Simulação de cenários para o subsistema transbordo.

Variável	Sigla	Unidade	Cenário	
			Base	TMC ²⁴
Número de unidades de carga	NUC	n	2	1
Capacidade de carga individual	CCI	t	8,00	21,00
Valor Inicial	Vit	R\$	86.000,00	170.000,00
Tempo transferência de carga	TDesc	min	5,00	2,70
Eficiência de campo	Efc	%	70,00	80,00

A comparação dos resultados entre os cenários é apresentada na Figura 20. O cenário TMC reduziu o custo do transbordo em 3,64 R\$ t⁻¹, e o investimento em 1,51 milhões de reais. Portanto, caso garantidos os ganhos do novo cenário, a melhor opção seria a implementação de transbordos de maior capacidade.

Figura 20. Custo do transbordo (R\$ t⁻¹) e investimento em conjuntos de transbordo (milhões de R\$) para os cenários base e TMC.

4.1.3.3. Transporte

A rentabilidade da produção da cana-de-açúcar pode ser comprometida por vários motivos, entre outros, pela distância entre o canavial a ser colhido e a unidade industrial, tendo em vista os altos custos atrelados ao transporte. O raio médio, nomenclatura associada a esta distância, é um fator decisivo na implantação de novas unidades e manutenção das atuais. Nos últimos anos, as restrições à queima e o consequente aumento da mecanização, vem exigindo uma escolha mais criteriosa das áreas, dado que a utilização de colhedoras e outros equipamentos esta sujeita a limites de declividade.

²⁴ Transbordo de maior capacidade.

Na Figura 21 pode ser verificada a relação entre o custo e o número de conjuntos de transporte, mediante alterações na distância lavoura-usina. Como se observa, o aumento do custo é linear em relação ao raio médio, enquanto que o número de conjuntos aumenta de forma mais pontual, revelando o excedente de máquinas no planejamento. Em um intervalo de 12 a 29 km de raio, a mesma quantidade de equipamentos atenderia a operação, no caso 6 conjuntos, enquanto que o custo aumentaria de 8,15 para 11,49 R\$ t⁻¹. A partir de 30 km, entretanto, a necessidade de conjuntos de transporte aumenta, sendo necessário, portanto, a aquisição de mais um conjunto de caminhão/carreta para atender ao sistema. Essa relação se mantém até um raio médio de 49 km, onde há necessidade de um novo conjunto.

Figura 21. Custo do transporte (R\$ t⁻¹) e número de conjuntos de transporte em função do raio médio (km).

5. CONCLUSÕES

A partir da verificação e validação da estrutura e rotinas de cálculo pode-se afirmar que o modelo representa o sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar, podendo ser utilizado na gestão da atividade para a avaliação de cenários, direcionamento da estruturação de orçamentos e acompanhamentos gerenciais, constatando o planejado com o realizado.

O estudo do interrelacionamento dos subsistemas e suas variáveis é fundamental para a representação do sistema mecanizado de colheita. Embora o modelo permita a análise de várias interrelações, existe a necessidade do estudo e aprimoramento para melhoria das análises.

Não foram destacadas variáveis de maior ou menor importância do sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar, visto que as conclusões são dependentes e relacionadas aos cenários. Deve-se atentar, entretanto, que os resultados gerados para um determinado cenário, podem não ser aplicáveis ou exigirem profundas modificações no sistema.

A incorporação do critério de arredondamento ao modelo revela intervalos constantes em relação aos resultados de desempenho operacional e econômico, o que está relacionado às capacidades excedentes dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

- Agrianual (2016) **Anuário da Agricultura Brasileira** Informa Economics FNP p.217-220
- Akinnuli BO, Akerele FO, Nathaniel BC (2014) Model developed for farm tractors and implements selection for optimum utilization. **Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences** p.248-255
- Araújo A (2002) **Indicadores da função motomecanização aplicados em usina de açúcar e álcool em um ambiente gerenciado por processos: um estudo de caso**. 112 p Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis
- Arjona E, Bueno G, Salazar L (2001) An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation systems of a sugarcane plantation. **Computers and Electronics in Agriculture** 32 p.247–264
- Asabe (2011) Agricultural machinery management data ASABE D497.7. In: __. **ASABE standards**. St. Joseph p.1-8
- Assis JP de (2004) **Modelos e modelagem em agricultura e meio ambiente: princípios e aplicações**. 148p.
- Balastreire, LA (1990) **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Editora Manole 308p.
- Banchi AD, Lopes JR, Rocco GC (2008) Uso anual e consumo de combustível em frotas agrícolas **Revista Agrimotor** São Paulo n. 39 p.8-10.
- Banchi AD, Lopes JR, Zago CA (2008) Estudo dos custos com reparo e manutenção em colhedoras de cana-de-açúcar: Parte II **Revista Agrimotor** São Paulo n. 31 p. 8-10.
- Banchi AD, Lopes JR, Barreto Junior EA (2009) Implementos I: Custos de reparo e manutenção dos implementos rodoviários. **Revista Agrimotor** São Paulo n. 41 p. 8-10.
- Banchi AD, Lopes JR, Barreto Junior EA (2009) Implementos II: Custos de reparo e manutenção dos implementos agrícolas. **Revista Agrimotor** São Paulo n. 42 p. 8-10.
- Banchi AD, Barreto Junior EA, Lopes JR (2009) Caminhões canavieiros **Revista Agrimotor** São Paulo n.49 p. 10-12.
- Banchi AD, Lopes JR, Ferreira V, Favarin LGA (2016) Gestão com mecanização com indicadores gerenciais estratégicos. In: **SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR**, 18, Ribeirão Preto. Anais.
- Barnes AJ, Meyer E, Hansen AC, Harpe ER de la, Lyne PWL (1998) Simulation modeling of sugarcane harvesting and transport delays. **Proc S Afr Sug Technol Ass** p. 18-23.
- Belardo GC (2010) **Avaliação de desempenho efetivo de três colhedoras em cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) sem queima**. 137p. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de

concentração: Máquinas agrícolas) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo. Piracicaba.

Belardo GC (2016) **Avaliação do desempenho de colhedoras multilinhas de cana-de-açúcar em três espaçamentos**. 200p. Tese (Doutor em Agronomia. Área de concentração: Produção Vegetal) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Jaboticabal.

Bochtis DD, Sørensen CGC, Busato P (2014) Advances in agricultural machinery management: A review. **Biosystems engineering** vol. 126 p.69-81.

Brasil (2016) Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Ipeadata**. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/>. Acesso em 15 abr. 2016.

Busato P (2014) A simulation model for a rice-harvesting chain. **Biosystems engineering**, vol. 149 p.149-149.

Carreira ML (2007) **Desempenho operacional, econômico e energético do transporte de cana de açúcar: um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Ciências) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz Universidade de São Paulo. Piracicaba.

CEPEA (2016). **PIB Cadeias agropecuárias. Desaceleração da economia brasileira reflete em baixa nas cadeias do agronegócio**. Disponível em: http://www.cepea.esalq.usp.br/pibpec/PIB_Cadeias_relatorio_2015.pdf. Acesso em 02 nov. 2016.

Cervi RG, Esperancini MST, SILVA H de OF, Isler PR, Oliveira PA de (2015) Avaliação do desempenho operacional da colheita e transbordo de cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, Botucatu vol. 30 n.3 p.232-241.

Cunha JPB, Silva FM da, Andrade ET de, Carvalho, LCC (2016) Modeling of operational performance parameters applied in mechanized harvest of coffee. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.20 n.10 p.946-952.

Díaz JA, Pérez IG (2000) Simulation and optimization of sugarcane transportation in harvest season. **Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference** p. 1114-1117.

FNQ (2016). **Sistema de indicadores**. 16p. Disponível em: <http://www.fnq.org.br/informe-se/publicacoes/e-books>. Acesso em: 10 out. 2016

Gadanha Jr CD, Molin JP, Coelho JLD, Yahn CH, Tomimori SMAW (1999) **Máquinas e Implementos Agrícolas do Brasil** IPT. São Paulo. 468p

- Higgins AJ, Muchow RC, Rudd AV, Ford AW (1998) Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. **Field Crops Research** 57 p. 153-162.
- Higgins A, Davies I (2005) A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. **Computers and Electronics in Agriculture** 47 p. 85-102.
- Hunt D (1973) **Farm Power and Machinery Management**. Iowa State University Press, Ames, Iowa. Sixth edition.
- Iannoni AP, Morabito R (2002) Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta. **Gestão & Produção** v.9 n.2 p. 107-128.
- IDEA (2012) **Indicadores de desempenho da agroindústria canavieira: safras 2010/11 e 2011/12**. Nunes Junior, D. (Coord) 100p.
- Melo MO, Rosa JHM (2015) Corte, transbordo e transporte (CTT): uso de transbordo na colheita mecanizada e seus impactos no CTT. In: Belardo GC, Cassia MT, Silva RP **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal SBEA Cap. 18.1 p. 429-437.
- Meyer R (1997) Factors to consider when implementing a fully mechanised sugarcane harvesting system. **Proc S Afr Sug Technol Ass** 71 p. 79-81.
- Mialhe LG (1974) **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo Editora Agronômica Ceres 301p.
- Milan M (1992) **Improving operational management of harvest, transport and mechanization for sugar cane in Brazil**. 241 p. Thesis (PhD. in Agricultural Engineering) Cranfield Institute of Technology, Silsoe College.
- Milan M (2004) **Gestão sistêmica e planejamento de máquinas agrícolas**. 100 p. Tese (Livro-Docência) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo. Piracicaba.
- Milan M, Rosa JHM (2015) Corte, transbordo e transporte (CTT): aspectos relevantes e uso de modelagem para o CTT. In: Belardo GC, Cassia MT, Silva RP **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal SBEA Cap. 18. p. 415-427.
- Mundim JUC (2009) **Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) Escola Politécnica Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Najafi B, Dastgerduei ST (2015) Optimization of Machinery Use on Farms with Emphasis on Timeliness Costs. **J. Agr. Sci. Tech** Vol. 17 p.533-541.
- Neves P de T (2011) **Manutenção produtiva total (total productive maintenance): estudo de caso na colheita mecanizada de cana-de-açúcar (Saccharum spp.)**. Dissertação

- (Mestrado em Ciências) 100p. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo. Piracicaba.
- Oakland JS (2007) **Gerenciamento da qualidade total**. São Paulo Nobel 459p.
- Oliveira C de (2012) **Plantio mecanizado de cana-de-açúcar: aspectos operacionais e econômicos**. Dissertação (Mestrado em Ciências) 108p. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo. Piracicaba.
- Oliveira MAE de (2015) Gerenciamento de sistemas mecanizados: Seleção de colhedoras. In: Belardo GC, Cassia MT, SILVA RP **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: SBEA Cap. 24.1 p. 569-587.
- PECEGE (2016) **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: fechamento da safra 2015/2016**. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil.
- Pinto RS de A (2002) **Indicadores de desempenho de frota de empresas agroindustriais canavieiras brasileiras**. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo. Piracicaba.
- Ramos RP (2014) **Planejamento do plantio e da colheita de cana-de-açúcar utilizando técnicas matemáticas de otimização**. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- Ripoli TCC, Ripoli MLC (2009) **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Edição dos autores. Piracicaba, 333p.
- Rosa JHM (2013) **Avaliação do desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) em espaçamento duplo alternado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz Universidade de São Paulo. Piracicaba.
- Salassi ME, Champagne LP (1998) A spreadsheet-based cost model for sugarcane harvesting systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, 20 p. 215-227.
- Salassi ME, Champagne LP, Legendre BL (1999) Maximizing economic returns from sugarcane production through optimization. **Bulletin Number 868** Louisiana State University Agricultural Center.
- Santos NB dos, Silva RP da, Gadanha Junior CD (2014) Economic analysis for sizing of sugarcane (*Saccharum spp.*) mechanized harvesting. **Engenharia Agrícola** v.34 n.5 p. 945-954.
- Scania (2016) Caminhões para cana e madeira. **Folheto de divulgação**. Disponível em: <http://www.scania.com/br/pt/home.html>. Acesso em: 18 mar. 2016.

- Silva JEAR da (2006) **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.
- Silva JEAR da, Alves MRPA, Costa MAB da (2011) Planejamento de turnos de trabalho: uma abordagem no setor sucroalcooleiro com uso de simulação discreta. **Gest. Prod.** São Carlos v. 18 n. 1 p. 73-90.
- Silva ATB (2012) **Modelagem e simulação de processos (corte, carregamento e transporte) na produção agrícola de açúcar e álcool**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia Civil Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
- Singh G, Pathak, BK (1994) A decision support system for mechanical harvesting and transportation of sugarcane in Thailand. **Computers and Eletronics in Agriculture** 11 p. 173-182.
- UNICA (2015). Documentos. Apresentações. **Coletiva de imprensa: Estimativa safra 2015/2016**. <http://www.unica.com.br/documentos/apresentacoes>. Acesso em 22 jun 2016.
- UNICA (2016). Documentos. Apresentações. **Situação atual do setor sucroenergético, com ênfase na geração de energia com bioeletricidade**. Disponível em: <http://www.unica.com.br/documentos/apresentacoes/pag=1>. Acesso em: 02 nov. 2016.
- Whitney B (1988) **Choosing and using farm machines**. Longman Scientific & Technical, Essex. 412p.
- Yamada MC, Porto AJV, Inamasu RY (2002) Aplicação dos conceitos de modelagem e redes de Petri na análise do processo produtivo da indústria sucroalcooleira. **Pesq. agropec. bras.** Brasília v. 37 n. 6 p. 809-820.
- Yousif LA (2016) Mathematical models to predict repair and maintenance cost for 2WD tractors in the mechanized rainfed areas, eastern Sudan. **Gezira j. of agric sci.** 14 (1) p. 1-17.
- Zakidizaji IH, Bougari E, Khorasani ME (2016) Simulation of economic damage at mechanized wheat harvesting in Khuzestan province of Iran. **Iran Agricultural Research** (2017) 36(1).
- Zhou K (2015) **Simulation Modelling for In-field Planning of Sequential Machinery Operations in Cropping Systems**. PhD Thesys Aarhus University Department of Engineering. Denmark.