

**FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE ITUVERAVA
FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS**

Ana Carolina de Souza Jabur

**OTIMIZAÇÃO DA CADEIA AGROINDUSTRIAL: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA SOBRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS APLICADOS NO SETOR
SUCROALCOOLEIRO**

**ITUVERAVA
2019**

ANA CAROLINA DE SOUZA JABUR

**OTIMIZAÇÃO DA CADEIA AGROINDUSTRIAL: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA SOBRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS APLICADOS NO SETOR
SUCROALCOOLEIRO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras.
Fundação Educacional de Ituverava Ituverava
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia de Produção.**

Orientador: Prof. Me. Ciro Sérgio Abe

**ITUVERAVA
2019**

ANA CAROLINA DE SOUZA JABUR

**OTIMIZAÇÃO DA CADEIA AGROINDUSTRIAL: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA SOBRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS APLICADOS NO SETOR
SUCROALCOOLEIRO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras.
Fundação Educacional de Ituverava Ituverava
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia de Produção.**

Ituverava, _____ de _____ 2019

**Orientador: _____
Prof. Me. Ciro Sérgio Abe**

Examinador: _____

Examinador: _____

RESUMO

O Brasil é um dos principais produtores e exportadores do ramo sucroalcooleiro, setor que vem crescendo consistentemente nos últimos anos e demandando investimentos em novas tecnologias para manter sua competitividade no mercado internacional. O presente trabalho tem como finalidade apresentar os principais métodos de otimização utilizados na cadeia agroindustrial deste setor e demonstrar as possíveis melhorias obtidas com suas aplicações. O estudo foi realizado por meio de uma revisão bibliográfica de artigos científicos que abordam a cadeia produtiva da cana-de-açúcar nos últimos 10 anos. Foram encontradas algumas oportunidades de melhoria para todas as etapas da cadeia agroindustrial, em especial "dentro da porteira", nas fases de plantio e cultivo e dentro das usinas. A mecanização é constantemente mencionada e apresenta altos níveis tecnológicos, fornecendo condições para uma produção mais ágil e com melhor desempenho. A utilização de *softwares* também se mostra como uma forte tendência nas empresas devido ao maior controle sobre a cadeia de produção. Atividades de transporte ocorrem em diversas etapas do processo e sua importância é observada nos estudos, porém a quantidade de pesquisas que apresentassem soluções não computacionais para os problemas desta área pode ser considerada pequena, contrariando expectativas iniciais desta pesquisa. Foi possível avaliar que alguns métodos propostos independem da aquisição de novos bens para melhorias no processo, evidenciando a possibilidade de melhorar de forma contínua sem a necessidade de altos investimentos. As publicações visando otimização de atividades no campo apresentaram ligeiro aumento nos últimos anos, porém ainda apresentam espaço para evolução.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. Inovações. Tecnologia. Produtividade.

SUMMARY

Brazil is one of the main producers and exporters of the sugar and alcohol industry, a sector that has been growing consistently in recent years and demanding investments in new technologies to maintain its competitiveness in the international market. The present work aims to present the main optimization methods used in the agroindustrial chain of this sector and to demonstrate the possible improvements obtained with their applications. The study was conducted through a literature review of scientific articles that addresses the sugarcane production chain in the last 10 years. Some opportunities for improvement were found for all stages of the agroindustrial chain, especially "inside the gate", in planting and cultivation phases and within the plants. Mechanization is constantly mentioned and has high technological levels, providing conditions for a faster and better performance. The use of software also proves to be a strong trend in companies due to greater control over the productive chain. Transport activities occur at several stages of the process and their importance is observed in the studies, but the amount of research that presented non-computational solutions to problems in this area can be considered small, contrary to initial expectations of this research. It was possible to evaluate that some proposed methods do not depend on the acquisition of new goods for process improvements, evidencing the possibility of continuous improvement without the need for high investments. Publications aiming optimizing field activities had a slight increase in recent years, but still have room for evolution.

Key-words: Sugarcane. Innovations. Technology. Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Movimentação financeira gerada nas usinas.....	29
Figura 2	Raio econômico para a utilização dos portos de Santos/SP e Paranaguá/PR.....	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Principais vertentes metodológicas em estudos sobre Sistemas Agroindustriais.....	10
Quadro 2	Definições dos principais termos utilizados em estudos de Sistemas Agroindustriais...	11

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ATR	Açúcar Total Recuperável
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONSECANA	Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol
CPA	Cadeia de Produção Agroindustrial
CSA	<i>Commodity System Approach</i>
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
ECR	<i>Efficient Consumer Response</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ERP	<i>Enterprise Resources Planning</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
IAA	Instituto do Açúcar e Alcool
IAC	Instituto Agrônômico de Campinas
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PPRC	Problema de Planejamento de Rota Colhedora
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Alcool
RIDESA	Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro
SA	Sistema Agroindustrial
SCM	<i>Supply Chain Management</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 Sistemas agroindustriais	10
2.2 Cadeia de produção agroindustrial	12
2.3 Histórico do setor sucroalcooleiro no Brasil	14
2.4 Logística do setor	17
3 METODOLOGIA DE PESQUISA	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 Desperdícios e dificuldades na cadeia agroindustrial	20
4.2 Técnicas e ferramentas para redução de desperdícios.....	23
4.2.1 <u>Antes da porteira</u>	23
4.2.2 <u>Dentro da porteira</u>.....	24
4.2.3 <u>Depois da porteira</u>	28
4.2.4 <u>Outros métodos e considerações</u>.....	34
5 CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS	36
ANEXOS	40

1 INTRODUÇÃO

A agroindústria canavieira representa um importante setor na economia nacional desde o início do século XVI, quando os portugueses perceberam na cana-de-açúcar uma importante fonte de renda dentro do comércio. Através da mesma podem-se obter alguns subprodutos, em especial o açúcar e o etanol, dois dos itens com maior volume de comercialização das empresas do ramo. Historicamente, os preços do açúcar e do álcool já foram definidos por flutuações de oferta e demanda, determinação governamental e coalizão entre os agentes do setor (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

A cana-de-açúcar seguiu ganhando importância dentro do cenário nacional, recebendo investimentos e ampliando a atuação nacional no mercado, sendo o Brasil um dos dois maiores produtores de açúcar e etanol no mundo. No mercado de combustíveis, Brasil e Estados Unidos representam os principais agentes do mercado e possuem os maiores volumes produtivos (ANDRADE, 2017). Já em relação ao açúcar, o Brasil divide este protagonismo junto à Índia, sendo que a produção nacional desta *commodity* possui projeção de atingir, segundo Andrade (2017), 46,7 milhões de toneladas na safra 2019/20, 3,53% maior que a safra anterior.

Decisões sobre qual dos produtos fabricar dependem do momento do mercado, da capacidade de flexibilização das usinas e de possíveis cláusulas contratuais firmadas em certos acordos de distribuição. As empresas nacionais vivem um período em que a produção de etanol vem se sobrepondo à do açúcar, representando em torno de 60% da cana-de-açúcar disponível para processamento. Entre os fatores que contribuem para este favorecimento podem-se citar os altos preços praticados no barril do petróleo aliados à insegurança política e econômica vivida nos principais países extratores de petróleo, elevando a busca por combustíveis de outras fontes (SOUSA *et al.*, 2012).

Independente de qual seja o produto final a ser obtido, as empresas do segmento buscam, além de suprir o mercado nacional, exportarem seus produtos, dado a possibilidade de maior lucratividade e também aos incentivos fiscais para atividades de exportação. Entretanto, para adentrarem o mercado internacional e apresentarem-se competitivas, as agroindústrias buscam maneiras de reduzir os custos envolvidos na produção e transporte de seus itens, a fim de ganharem maior competitividade sem impactos negativos na qualidade dos produtos.

Adicionar valor em uma cadeia produtiva que apresenta altos custos para produtos que operam muitas vezes sob baixos preços, demonstra uma necessidade de investimento em

pesquisa e desenvolvimento de novos métodos (HIGGINS *et al.*, 2007). Portanto, o presente trabalho tem como objetivo identificar e apresentar alguns dos principais métodos e ferramentas de otimização aplicados na agroindústria sucroalcooleira, fazendo-o por meio de uma revisão da literatura. Para facilitar a compreensão da necessidade e aplicabilidade dos modelos propostos, os gargalos e desperdícios mais impactantes também são descritos.

Como mencionam Cirani e Moraes (2011), uma grande parcela destas inovações é composta pelo desenvolvimento e utilização de maquinários e equipamentos, biotecnologia e novos produtos industriais. O uso de sistemas informatizados mais robustos também é feito, assim como a utilização de metodologias e planos de ação, todos visando à redução dos desperdícios em todas as etapas da cadeia de produção.

A pesquisa é iniciada por esta breve introdução, seguida pela seção referencial teórico, que trata sobre uma ilustração da história do setor no país tal como sua importância para o desenvolvimento econômico nacional e alguns números relevantes do setor, tornando mais claro o entendimento do cenário no qual as melhorias apresentadas ocorrem. A seção três, metodologia, caracteriza a pesquisa quanto a seus objetivos e métodos e aborda os conceitos teóricos que baseiam sua aplicação.

Os resultados apresentam os fatores que contribuem efetivamente para a ocorrência de perdas e que oneram ao produto final, descrevendo então os métodos de otimização propostos na literatura para mitigação dos mesmos. A seção cinco aponta como os resultados foram obtidos ou não, de acordo com o esperado no início do estudo e discute sobre a escolha dos modelos propostos e possíveis pontos adicionais a serem elucidados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas agroindustriais

Os avanços tecnológicos mudaram a forma com que visualizamos e entendemos o setor primário. A agricultura passa a depender fortemente dos processos que ocorrem antes e depois do plantio e da produção para obter sucesso (ARAÚJO, 2003). Portanto, o agronegócio passa a ser visto de maneira mais ampla, e pode ser descrito, como definem Davis e Goldberg (1957), como a soma de todos os processos envolvidos nas operações de produção, processamento, armazenamento e distribuição de *commodities* agrícolas.

Batalha (2014) fornece uma definição similar, descrevendo-o como um amplo conjunto de atividades interligadas que possuem por finalidade a produção de produtos agroindustriais, abordando desde a escolha dos insumos até o consumo do produto final. Esta rede abrange a escolha dos insumos e maquinários, plantação, processamento e transporte dos materiais dentro da cadeia de produção, englobando todos os agentes envolvidos nesta transformação.

Uma vez que a agricultura se transformou em agronegócio e passou a tratar de uma maior gama de atividades por toda a cadeia produtiva, torna-se relevante a criação de formas de gerenciamento para acompanhamento e controle dos processos. Neste cenário, duas vertentes metodológicas destacam-se na literatura, sendo elas a *Commodity System Approach* (CSA) e a *Analyse de filière*. Boiko (2012) reúne em seu trabalho os principais autores relacionados ao assunto e desenvolve um comparativo entre ambos, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Principais vertentes metodológicas em estudos sobre Sistemas Agroindustriais

	Correntes Metodológicas	
RESUMO	<i>AGRIBUSINESS E COMMODITY SYSTEM APPROACH (CSA)</i>	<i>ANALYSE DE FILIÈRE (OU CADEIAS DE PRODUÇÃO)</i>
Origem	EUA – Universidade de Harvard	França – Escola Industrial Francesa
Autores/Ano x Conceito	i) Davis; Goldberg (1957) – conceito de <i>agribusiness</i> ; ii) Goldberg (1968) – CSA.	Anos 1960 – diferentes definições de Cadeias de Produção
Foco Inicial do Estudo	i) Davis; Goldberg (1957) – caso particular do <i>agribusiness</i> americano; ii) Goldberg (1968) – estudo do comportamento dos sistemas de produção de laranja, trigo e soja nos EUA.	Problemática industrial
Ponto de Partida da Análise	Matéria-prima de base e uma limitação geográfica	Produto agroindustrial final

Fonte: Adaptado de Boiko (2012)

Tais metodologias fundamentam a utilização de novas ferramentas gerenciais desenvolvidas para melhor entendimento das cadeias produtivas e melhoria de desempenho, com destaque para os conceitos de *Supply Chain Management* (SCM) e de *Efficient Consumer Response* (ECR) (OLIVEIRA, 2011). Boiko (2012) também fornece um interessante resumo dos principais termos utilizados nos estudos desta área, agrupando definições de termos chave definidos por autores referência no assunto, apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Definições dos principais termos utilizados em estudos de Sistemas Agroindustriais

Termos	Autores	Definição
AGRONEGÓCIO	Castro (2000)	Um conjunto, entendido como um sistema composto de operações e processos de produção, processamento, armazenamento, distribuição e comercialização de insumos e produtos agropecuários e agroflorestais, incluindo instituições ligadas pelos objetivos comuns de suprir o consumidor final de produtos de origem agropecuária e agroflorestal.
	Callado (2006)	Um conjunto de empresas que produzem insumos agrícolas, as propriedades rurais, as empresas de processamento e toda a distribuição.
	Davis e Goldberg (1957 <i>apud</i> BATALHA; SILVA, 2001, p. 27)	“a soma das operações de produção e distribuição de suprimentos agrícolas, das operações de produção nas unidades agrícolas, do armazenamento, processamento e distribuição dos produtos agrícolas e itens produzidos a partir deles”.
COMMODITY	Goldberg (1968)	Os produtos de origem primária, ou seja, em estado bruto, ou com baixo grau de industrialização que são produzidos em grandes volumes por uma diversidade de produtores e que podem ser estocados por um determinado período sem perda de qualidade.
SISTEMA AGROINDUSTRIAL (SA)	Batalha e Silva (<i>apud</i> BATALHA, 2001, p. 30)	“[...] o conjunto de atividades que concorrem para a produção de produtos agroindustriais, desde a produção dos insumos (sementes, adubos, máquinas agrícolas, etc.) até a chegada do produto final (queijo, biscoitos, massas, etc.) ao consumidor”.
COMPLEXO AGROINDUSTRIAL	Batalha e Silva (<i>apud</i> BATALHA, 2001)	Um conjunto de cadeias de produção agroindustriais, cada uma delas tendo seu conceito associado a um produto final ou família/linha de produtos finais.
CADEIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL (CPA)	Parent (1979 <i>apud</i> BATALHA; SILVA, 2001, p. 41)	A soma de todas as operações de produção e de comercialização que foram necessárias para passar de uma ou várias matérias-primas agroindustriais de base a um produto agroindustrial final.
COORDENAÇÃO DO SA (OU DA CPA)	Corrêa; Silva (2006)	“[...] um processo dinâmico para promover explicitação de normas de relacionamentos vigentes, trazendo uma harmonia entre os agentes dos segmentos envolvidos [...]”.
	Zylbersztajn; Farina (1999)	A habilidade de transmitir estímulos, informações e controles ao longo de um Sistema Agroindustrial.

Fonte: Adaptado de Boiko (2012)

2.2 Cadeia de produção agroindustrial

De maneira mais simples, a cadeia de produção pode ser entendida como a "sucessão linear de operações técnicas de produção" (BATALHA, 2014). Dentro desta cadeia produtiva destaca-se a necessidade de dominar alguns recursos críticos para manutenção no mercado, especialmente para atuação em escala global, tais como o gerenciamento dos recursos financeiros, agrícolas e industriais, estilo de liderança e cultura organizacional, redes de relacionamento e reputação de mercado (MOTA *et al.*, 2014). Dentre as principais aplicações do conceito de Cadeia de Produção Agroindustrial estão, segundo Boiko (2012), a utilização como ferramenta para gestão, desenvolvimento, formulação e melhoria, metodologia para divisão setorial e também negociação.

No setor agroindustrial, esta cadeia produtiva, denominada cadeia de produção agroindustrial, pode ser separada em três segmentos: "antes da porteira", "dentro da porteira" e "depois da porteira" (ARAÚJO, 2003). Essa segmentação facilita a compreensão da cadeia agroindustrial e de todas as atividades nela envolvidas, tornando mais fácil controlá-la e estudá-la setor a setor. A compreensão destes componentes, tal como suas interrelações, é indispensável para a formulação de políticas e estratégias mais eficientes. Tal como descritas por Araújo (2003), cada setor é melhor abordado a seguir.

O "antes da porteira" engloba todos os fornecedores que disponibilizam os insumos necessários e viabilizam o plantio, facilitando o controle da plantação e posterior colheita. Na agricultura, estes insumos referem-se a máquinas e equipamentos, água e energia, fertilizantes e agroquímicos, sementes e inoculantes. A interrelação entre agricultores e produtores de insumos é importante, visto que os agentes econômicos nesta etapa da cadeia produtiva são formadores de preços, enquanto os agricultores são tomadores de preços, fato o qual tem impulsionado o aumento dos custos de produção. Têm-se ainda os prestadores de serviços, caracterizados principalmente por órgãos de pesquisa e fomento, elaboradores de projetos, órgãos governamentais e fornecedores de crédito e financiamentos.

"Dentro da porteira" contempla a produção agropecuária em si, referindo-se ao que ocorre dentro das fazendas. Na área agrícola, este setor refere-se às etapas desempenhadas no campo para preparo do solo, irrigação, colheita, transporte e gestão das culturas vegetais. Nos casos específicos do açúcar e etanol, os produtos já saem processados das fazendas, mas constituem uma etapa posterior à produção, portanto encaixam-se na seção "depois da porteira".

As atividades "depois da porteira" constituem-se do processamento das matérias-primas e distribuição destes produtos aos consumidores, sejam estes *in natura* ou transformados. Atividades de armazenamento, beneficiamento, industrialização e embalagem configuram as operações de processamento existentes no campo da agricultura, seguidas pela comercialização e distribuição. Os canais de comercialização dos produtos se dão em cinco níveis, sendo o primeiro constituído pelos próprios produtores rurais e o último por atacadistas, centros de abastecimento, bolsas de mercadorias, entre outros. Dentre estes canais atuam diversos intermediários, sendo que cada alteração de nível acarreta em elevações de preços dos produtos devido aos custos comerciais embutidos e dos lucros de tais intermediários.

Nestas cadeias agroindustriais, diversos fatores devem ser observados para que se possa controlá-las de maneira efetiva. Boiko (2012) enumera oito aspectos e os descreve como:

- i. Climáticos: fatores ou eventos climáticos, previsíveis ou imprevisíveis;
- ii. Fornecimento: fatores que afetem o fornecimento de insumos ao longo da cadeia de produção, tais como problemas de armazenagem e transporte, aspectos climáticos e ambientais;
- iii. Ambientais: impacto das operações sobre o ambiente próximo, englobando a interferência com agentes externos como meio ambiente, sociedade ou governo;
- iv. Armazenagem e transporte;
- v. Qualidade: propriedades que colaboram para contemplar as necessidades explícitas e implícitas de clientes finais ou intermediários (CASTRO, 2000 *apud* BOIKO, 2012);
- vi. Identificação e rastreabilidade: refere-se à identificação de histórico de produtos, processos, insumos, medidas e outros;
- vii. Tecnologia e inovações na produção e processamento: conhecimentos científicos e tecnológicos que alteram a gestão da cadeia produtiva, tais como bio e nanotecnologia, bioengenharia e desenvolvimento sustentável;
- viii. Comercialização dos produtos e subprodutos: considera fatores de demanda, sazonalidade, concorrência de mercado e precibilidade.

Visto a extensão da cadeia de produção agroindustrial e a quantidade de operações envolvidas nesta, torna-se importante otimizar operações e reduzir desperdícios para evitar prejuízos e tornar-se mais competitivo. Santos e Freitas (2016) afirmam que estes prejuízos

caracterizam uma agregação extra de valor e necessitam de controle rigoroso para que se possa obter um produto final com qualidade e baixo custo. Identifica-se, portanto, a necessidade de compreender quais são os prejuízos que oneram o preço final das mercadorias e buscar soluções otimizadas para todas as atividades envolvidas na cadeia produtiva.

2.3 Histórico do setor sucroalcooleiro no Brasil

As atividades canavieiras brasileiras estão diretamente relacionadas ao desenvolvimento nacional desde 1530, quando estas ganharam notoriedade por sua contribuição para a economia do país e também por seu impacto social e histórico (CLAUDINO, 2015). As atividades seguiram em expansão e ganharam cada vez mais relevância no cenário nacional, tendo, conforme Barros e Moraes (2002), a partir de 1933, acompanhamento e proteção governamentais com a criação do Instituto do Açúcar e Alcool (IAA).

Nesta época, afirmam Oliveira *et al.* (2009), o plantio era direcionado para a produção de açúcar e tinha o álcool apenas como um subproduto da fermentação do mel, sem grande relevância. Segundo os autores, foi a partir de 1975 que houve uma mudança neste cenário, com a criação do Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL). Tratava-se de um incentivo federal que objetivava o aumento na produção e utilização do álcool combustível em território nacional, criado em período de regime militar (RODRIGUES, 2014; RAMOS, 2006).

Tal programa, conforme Rodrigues (2014), juntamente com o incentivo e regulamentação do Governo, iniciou uma transformação na agroindústria canavieira, que deixou de voltar-se exclusivamente para o açúcar e o setor de alimentos e passou a apoiar a produção de combustível nacional.

O cenário mundial nesta época favorecia uma ampliação na produção do etanol nacional. Em 1973, conforme apontam Sousa *et al.* (2012), constatou-se a necessidade de outras fontes de energia e combustíveis para abastecimento nacional devido ao choque do petróleo asiático. Os autores prosseguem e citam que, paralelamente, os preços do açúcar no mercado internacional sofriam constantes quedas e traziam incertezas para os produtores, o que pressionava o governo.

Rodrigues (2014) aponta que, neste contexto histórico e contando com forte proteção e apoio do governo através de subsídios, a produção e moagem de cana-de-açúcar cresceram vertiginosamente e impulsionaram a criação de uma vasta rede de distribuição do álcool hidratado, veículos adaptados e utilização do álcool anidro como aditivo para outros combustíveis. Este crescimento ocorreu em duas etapas, a primeira entre 1975 e 1979 com o

incentivo à produção do álcool anidro para mistura na gasolina e a segunda a partir de 1979, com forte incentivo para a produção do etanol uma vez que o petróleo passava por uma nova crise e o barril passava a ser ofertado por um preço três vezes maior (SOUSA *et al.*, 2012).

Após um período de forte intervenção estatal, o IAA foi extinto em março de 1990. Sem o órgão para atuar na fixação de preços, afirmam Oliveira *et al.* (2009), criaram-se grupos formados por representantes de produtores e usineiros, como o Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol (CONSECANA) no estado de São Paulo, que estabeleceram um sistema de remuneração com regras de relacionamento. O preço, ainda conforme os autores, passou a basear-se no preço médio ponderado do Açúcar Total Recuperável (ATR), calculado a partir do preço do açúcar, dos tipos de álcool e do *mix* de produção.

Conforme descrito por Claudino (2015), o ATR é uma unidade de medida criada na agroindústria para quantificar o teor de açúcar da cana-de-açúcar e assim definir qual o tipo de produto a ser feito e apontar as oportunidades de criação de valor dentro da cadeia agroindustrial.

Portanto, a combinação dos altos preços do petróleo, a promoção de políticas de incentivo às fontes renováveis e a não intervenção governamental constituíram um panorama promissor para a produção e consumo de etanol no país, tendo como diferencial para uma forte atuação internacional a experiência adquirida durante o período do programa PROÁLCOOL (SOUSA *et al.*, 2012).

O Brasil atualmente é protagonista no mercado internacional quando se trata do setor sucroalcooleiro. O país intercala com a Índia a posição de maior produtor de açúcar nas últimas safras, enquanto divide com os Estados Unidos as duas primeiras posições no ranking de produtores de etanol (primeiro e segundo colocados, respectivamente), sendo o Brasil líder na exportação deste produto. Tal competitividade em ambos os produtos se dá por algumas vantagens competitivas que o país possui frente a seus concorrentes.

No etanol, segundo Sousa *et al.* (2012), a produtividade atingida com a cana-de-açúcar para produção de etanol supera da matéria-prima norte americana, o milho, alavancando a produção nacional. Já em relação ao açúcar, Eduardo Sia – representante da Sucden, empresa líder no segmento de mercado de *soft commodities* – aponta que o Brasil deve retomar o posto de maior produtor devido a uma queda na produção indiana, advinda de fatores climáticos, redução na área destinada ao cultivo e falta de pagamentos no país.

Paralelamente, Shikida *et al.* (2011) complementam que a agroindústria canavieira possui os menores custos de produção do mundo e é qualificada tecnicamente para atender ao

mercado. Porém, Andrade (2017) aponta que, mesmo tendo baixos custos e sendo capaz de atender as demandas, o nível de capacidade tecnológica empregada no Brasil é, em sua maioria, de nível básico ou intermediário. O autor completa que o setor ainda tem um comportamento tímido em relação à inovação e que o nível avançado, caracterizado por tecnologia e maquinário de ponta, ainda tem muito a progredir no cenário nacional e demanda maiores investimentos para as áreas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).

De acordo com a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), o nível de inovação no setor sucroenergético é considerado baixo, em especial no setor agrícola. A adoção de estratégias de diversificação da produção e inovação pode propiciar às empresas brasileiras maior competitividade, abordando processos como a geração de bioeletricidade e etanol de segunda geração (TRAYLEN, 2014). Barros (2008) corrobora que estas inovações tecnológicas e investimento em pesquisa favorecem a distribuição de matérias-primas e produtos, aumentam a produtividade e conseqüentemente contribuem para a competitividade dos produtos no mercado.

No Brasil, a quantidade de usinas capazes de produzirem tanto açúcar como etanol, as denominadas usinas mistas, representava 61,53% do total em operação em 2014, segundo Claudino (2015). O autor menciona então que, nesses casos, passa a existir uma espécie de concorrência interna entre os produtos, o primeiro baseado em cotações do mercado em bolsas de valores e o segundo guiado pelas políticas internas de precificação de combustíveis. Atualmente, segundo a S&P Global Platts, empresa referência no mercado de *commodities* físicas, a previsão é que o *mix* da safra 2019/2020 terá 65% da produção destinada à produção de etanol e 35% destinado à produção de açúcar, seguindo a tendência das duas safras anteriores.

Esse aumento é apontado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) também como um reflexo do aumento da frota de carros *flex* no país, fazendo com a que a substituição de combustíveis no país atinja 46% frente a apenas 10% no mercado americano, principal concorrente no ramo. Todavia, o país vem se destacando e se diferenciando dos demais pela produção em escala industrial não apenas do açúcar e do etanol, mas também pela cogeração de energia a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar e da palha (SANTORO *et al.*, 2014). Além destes produtos, o Brasil comercializa ainda cachaça, rapadura e subprodutos extraídos do caldo da cana, porém em volume e participação econômicas muito menores.

2.4 Logística do setor

A logística apresenta grande relevância na cadeia agroindustrial dos derivados da cana-de-açúcar devido ao grande volume de material movimentado e armazenado durante o processo. Hizo (2015) aponta que a eficiência de uma indústria sucroalcooleira é estreitamente ligada aos processos logísticos da mesma, visto que essa deve selecionar as fazendas para plantio e colheita, coordenar os processos de corte, colhimento e carregamento para evitar perdas e otimizar a quantidade de maquinário e mão-de-obra para atendimento de uma operação, atentando ainda para o rendimento e manutenção dos equipamentos.

Sendo assim, Hizo (2015) ainda salienta que os procedimentos logísticos devem ser tratados com atenção e sugere que estes devem se basear em sistemas computacionais integrados que facilitem a coordenação destas atividades, visto que fazê-las manualmente, considerando a quantidade de operações envolvidas na cadeia de produção, traria incoerências ao processo.

Ele segue apontando que existem três principais fases ao tratarmos sobre a administração logística da cadeia produtiva, sendo estas a compra de insumos e produtos, movimentação e manutenção, e distribuição. A primeira diz respeito aos insumos que serão processados para permitir o plantio adequado e os processos na usina, assim como sua disponibilidade para evitar problemas com qualidade ou paradas produtivas. A segunda envolve as mobilizações entre as áreas da empresa (plantio, armazenagem, estocagem), evitando que fiquem paradas por longos períodos ou comprometam os processos seguintes. Por fim, se refere à terceira etapa a entrega dos insumos ou produtos finais aos seus respectivos clientes.

O escoamento dos produtos ocorre, como apontado por Pera *et al.* (2013), predominantemente pelo modal rodoviário no território nacional, possuindo uma pequena parcela do modal ferroviário como complemento. A logística no Brasil, conforme levantado por Sousa *et al.* (2012), é muito onerosa. Isto ocorre pela falta de uma estrutura ferroviária mais ampla (que traria maior economia para o setor) e pela péssima condição das rodovias pelo país, visto que se trata do modal mais utilizado, mas que trafega em condições desfavoráveis.

A logística, especialmente inserida na cadeia agroindustrial de uma *commodity* de baixo valor agregado como o açúcar, é determinante para a competitividade do produto brasileiro em mercados mais amplos (BUENO, 2012). Tornam-se necessários, então, além das melhorias cabíveis dentro dos processos da cadeia produtiva, uma reestruturação e maior

suporte estatal para auxiliar o produto brasileiro no exterior, seja pela melhoria do modal rodoviário ou pela ampliação da malha ferroviária.

Pensando no setor sucroalcooleiro, Bezuidenhout (2010) apresenta quatro pontos os quais podem ser abordados para adicionar valor na cadeia de produção agroindustrial: a correta utilização das capacidades disponíveis, a gestão de riscos coerente, o gerenciamento de estoques e também da deterioração da cana-de-açúcar até o processamento.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

O presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de verificar as principais dificuldades e desperdícios existentes na cadeia de produção sucroalcooleira brasileira, bem como avaliar quais técnicas vêm sendo aplicadas para a redução destes desperdícios e para otimização da cadeia agroindustrial da cana-de-açúcar e de seus subprodutos. Trata-se de uma revisão bibliográfica, realizada através da busca e análise de produções científicas dos últimos 10 anos em revistas, periódicos e repositórios, com o intuito de avaliar as produções relacionadas ao tema escolhido (neste caso, as técnicas de otimização aplicadas no setor sucroalcooleiro) (MARKONI;LAKATOS, 2006). Tal técnica, como descrita por Bardin (2002), é sistemática e descritiva, abordando qualitativamente os conteúdos.

Neste caso, a análise dos conteúdos para definição dos estudos a serem tratados foi de caráter qualitativo, sendo que a escolha de cada artigo se deu, como descrevem Markoni e Lakatos (2006), através da realização de atividades de identificação, compilação, fichamento, análise e interpretação. Para avaliação dos conteúdos, foi adotada a técnica apontada por Bardin (2002), a qual consiste, como descreve o autor, na identificação das ideias centrais do trabalho, identificação dos núcleos de sentido e a comparação entre estes e o objeto de pesquisa em questão.

Definidos os artigos, os mesmos passaram por novo processo de leitura buscando melhor compreensão do modelo proposto e avaliando a aplicação do mesmo em outros ambientes, agrupando os artigos de acordo com suas similaridades. Os dados foram tratados qualitativamente, não havendo uma escala ou relações de caráter numérico para classificação ou comparação entre os estudos, apenas uma avaliação de caráter subjetivo sobre a eficácia e possibilidade de replicação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão abordados os principais desperdícios e dificuldades encontrados na literatura acerca do cultivo, processamento, transporte e venda de produtos oriundos da cana-de-açúcar, seguidos pelas técnicas e ferramentas que vêm sendo empregadas para a mitigação destes problemas e otimização dos processos visando reduzir os custos e ampliar a competitividade dos produtos no mercado.

4.1 Desperdícios e dificuldades na cadeia agroindustrial

A cadeia agroindustrial da cana-de-açúcar, seja para qual finalidade, demanda uma excelente coordenação das atividades envolvidas para evitar perdas no processo que oneram nos produtos finais. Estes desperdícios ocorrem nas mais variadas etapas da cadeia produtiva e por diferentes razões, sendo necessária a condução de estudos para compreender causas raízes e posteriormente propor soluções. Desta forma, esta sessão se dedica a apresentar estes problemas encontrados na literatura e expor suas ramificações para o restante da cadeia de produção através de diferentes métodos selecionados pelos respectivos autores.

Alguns dos tipos mais comuns de desperdícios estão relacionados às paradas, perdas de insumos ou matérias-primas e necessidade de reprocessamento. Estes problemas foram constatados em diversos estudos e são, na maioria das vezes, os mais cabíveis de serem solucionados sem a necessidade de investimentos maciços ou elevados tempos de aplicação. O balanceamento e controle das atividades podem melhorar o desempenho operacional de uma plantação/usina sem investimentos adicionais.

O aproveitamento de tempo industrial, conforme mencionam Medeiros e Silva (2016), é impactado por falhas de origem mecânica, eletroeletrônica ou operacional. Tal como descrevem os autores, quanto mais tempo um insumo, subproduto ou maquinário fica parado, mais tempo é despendido para o processamento de matéria-prima, onerando assim mais custos ao processo ao reduzir sua eficiência e ainda podendo gerar uma redução no tempo disponível para manutenção e preparo para a próxima safra.

Além disso, ainda conforme os autores, é importante manter um bom fluxo produtivo e reduzir ao máximo tempos de parada para que as reações químicas oriundas do processo, em especial na produção do etanol, não sejam afetadas e comprometam o aproveitamento da cana-de-açúcar colhida. A questão da deterioração da cana, aliás, vai além das reações químicas existentes nas usinas.

Hizo (2015) aponta que a cana-de-açúcar, seja inteira ou picada, se deteriora e perde qualidade caso demore demais a ser processada após a coleta, seja aguardando em veículos em filas ou por armazenamento em pátios de descarga. Essa situação, de acordo com o autor, é agravada nos casos em que a cana passa por processos de queimada no momento da colheita. Sousa *et al.* (2012) confirmam esta circunstância e adicionam que a decomposição biológica que ocorre na matéria-prima diminui seu teor de açúcar, tornando necessária a troca rápida de inventário para que as plantas cultivadas não percam o valor energético desejado.

Nesses casos, existem pequenos gargalos que podem ser resolvidos através de melhor organização das atividades e treinamento, tal como o tempo de espera dos caminhões para descarga (HIZO, 2015). Os equipamentos também devem oferecer condições de trabalho adequadas para não apresentarem problemas durante o processo e comprometerem sua eficiência.

Abordando o maquinário, Santos e Freitas (2016) identificaram uma ociosidade dos equipamentos estudados frente às suas capacidades nominais proveniente da falta de confiabilidade dos trabalhadores nas máquinas e nas informações por estas fornecidas, devido à falta de periodicidade e regularidade na realização de manutenções preventivas. Ao identificar que as paradas constituem um sério problema financeiro e de produtividade, a subutilização de maquinário por falta de manutenção se apresenta como um grave problema a ser solucionado.

Tendo como objeto de estudo a produção de açúcar, os autores identificaram que tal problema trouxe grande impacto para o processo de empacotamento, uma vez que a correta aferição dos equipamentos apontou que pacotes com sobrepeso estavam sendo aprovados e pacotes dentro dos parâmetros eram encaminhados para reprocessamento, sendo ambos de grande impacto financeiro para a empresa.

De forma geral, os equipamentos devem apresentar disponibilidade, confiabilidade e trabalharem dentro de um valor ótimo para trazerem os retornos esperados. Tal como descrito por Hizo (2015), "a balança de pesagem, armazenagem intermediária e descarga de cana-de-açúcar nas moendas devem operar com um fluxo de cana transportada do campo à usina que permita uma alimentação uniforme das moendas". Caso contrário, afirma o autor, pode haver falta de matéria-prima e conseqüente parada nas moendas, situação seriamente prejudicial devido aos elevados custos de ociosidade das máquinas.

Da mesma forma que a subutilização dos equipamentos gera desperdícios, a utilização de maquinário além dos limites estabelecidos também acarreta problemas. No Brasil, segundo Rodrigues (2014), o índice de problemas mecânicos e manutenções corretivas é muito elevado

devido ao fato das máquinas serem utilizadas por períodos superiores àqueles projetados. De acordo com levantamento do autor, o tempo médio de operação das máquinas no Brasil em período de safra é de 20 a 22 horas por dia, o que requer cuidados e manutenções constantes.

Em seu estudo, Medeiros e Silva (2016) elencam as principais causas de paradas de moagem em uma safra, onde os quatro principais motivos – rompimentos de cabos de alimentação, furos nas tubulações das caldeiras, falhas nos inversos e quebras de esteiras distribuidoras – somam aproximadamente 102 horas de paralisação de máquinas por safra.

Alguns fatores devem ser observados para auxiliar a preservação dos equipamentos. Ao trabalhar com a cana-de-açúcar, as impurezas que acompanham esta matéria-prima devem ser devidamente tratadas a fim de evitar danos às máquinas. Souza e Gasparotto (2014) apontam que a cana é acompanhada de 8 a 12% de impurezas, tais como solo e fuligem, podendo chegar a 15% caso a colheita ocorra em períodos de chuva. Eles complementam que estas impurezas podem acarretar em problemas como desgaste dos equipamentos, perda de capacidade de moagem, elevação da depreciação e dificuldade no tratamento do caldo.

A colheita mecanizada, todavia, apresenta significativas melhoras perante a colheita manual ou semi-automatizada. Isso porque, no corte manual da cana-de-açúcar, os trabalhadores ficam sujeitos a diversos riscos devido à forma como desempenham suas atividades, denominados riscos ocupacionais (RODRIGUES, 2014). Riscos ergonômicos, juntamente ao risco de acidentes e ao risco químico devido à queima da palha executada na colheita manual, fazem com que este tipo de colheita tenha caído em desuso e até sido abolida por alguns órgãos. Este método segue sendo utilizado apenas por pequenos produtores, onde é inviável ou desnecessária a aquisição do maquinário, ou em áreas em que as colhedoras não possam atuar.

A colheita manual ainda dificulta o reaproveitamento de insumos, o que, de acordo com Alvarenga e Queiroz (2009), gera desgaste de equipamentos e adiciona custos de transporte e armazenamento, gerando ainda a necessidade de compra de novos insumos. Junto a isso existem as preocupações ambientais das queimadas oriundas deste tipo de processo manual. No estado de São Paulo, por exemplo, Rodrigues (2014) aponta a criação do Decreto Estadual nº. 42.056/97, que segundo ele "previa a eliminação em 8 (oito) anos da queimada nas áreas planas e em 15 (quinze) nas áreas acima de 12% (doze por cento) de declividade". Mesmo tendo sido prorrogada posteriormente, o autor aponta para a criação de uma nova lei, Lei Estadual nº. 11.241/02, regulamentada pelo Decreto nº. 4.700/2003, que segundo ele torna mandatório o fim das queimadas no estado até 2021 e 2031 para áreas com declividade inferiores e superiores a 12%, respectivamente.

As dificuldades encontradas na cadeia de produção agroindustrial vão além da colheita e processamento nas usinas, começando já na escolha da cana-de-açúcar a ser cultivada e nos cuidados com seu monitoramento. Isto se deve ao fato da cana estar exposta a diversos riscos ainda no cultivo, tais como mudanças climáticas, pragas e doenças (CLAUDINO, 2015). Por este motivo, a colheita deve ter um acompanhamento próximo para tomada de ações corretivas antes que a safra seja afetada, necessitando de ferramentas que propiciem este controle com respostas rápidas.

Na outra ponta da cadeia produtiva – a logística –, em especial no transporte dos produtos acabados, também existem desperdícios que oneram no valor final dos mesmos. Deve-se isso às más condições das rodovias e a pobre malha viária disponível no país. Em épocas de elevado volume de produção e também de exportação, os chamados de picos de safra, as cadeias logísticas de distribuição mostram-se ainda mais deficitárias devido à alta demanda vivenciada.

4.2 Técnicas e ferramentas para redução de desperdícios

O desenvolvimento de novas tecnologias tem como objetivo facilitar as atividades e seus gerenciamentos durante a cadeia de produção, melhorando o desempenho e possibilitando maior competitividade às empresas sem perda de lucratividade. No campo, o termo adotado para esta transformação tecnológica recebe o nome de Agricultura 4.0, a qual, como descrita por Luchetti (2019), faz referência à utilização de diversas tecnologias visando estimular as oportunidades de melhorias nos processos e a agregação de valor durante toda a cadeia produtiva. As propostas de melhorias são segmentadas conforme se encaixam nas seções definidas anteriormente e denominadas de "antes da porteira", "dentro da porteira" e "depois da porteira".

4.2.1 Antes da porteira

As inovações apresentadas abrangem toda a cadeia agroindustrial, desde a escolha de insumos, maquinário de ponta, elevação de rendimento e redução de desperdícios nas usinas até a facilidade no transporte do produto final. Antes de abordar as propostas de melhoria para os processos no cultivo e nas usinas, primeiro deve-se avaliar a qualidade da cana-de-açúcar escolhida para cultivo e as opções disponíveis. No Brasil, conforme Proença *et al.* (2009), o melhoramento da cana para plantio é desenvolvido por três diferentes instituições: o Centro de Tecnologia Canaveira (CTC), o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA).

Estes institutos de biotecnologia visam o desenvolvimento de uma planta mais resistente a vírus e pragas, facilitando o plantio e ampliando o atributo econômico da mesma (ANDRADE, 2017). Além disso, como apontado por Rodrigues (2014), plantas de origem mais antiga são inadequadas para o novo perfil produtivo mecanizado das empresas, não resistindo à passagem das máquinas e gerando perdas desnecessárias durante a colheita, sendo substituídas por novas espécies mais resistentes.

A densidade energética também é alvo de estudo, já que esta influencia o rendimento dos processos na usina e também a destinação da cana-de-açúcar colhida, assim como o uso de variações de leveduras que ampliem a eficiência dos processos (SOUSA *et al.*, 2012). De maneira geral, as variedades de cana são classificadas de acordo com seu estágio de maturação, sendo que, tal como descrito por Sousa *et al.* (2012), "as precoces atingem um teor satisfatório de sacarose em maio ou junho; as médias entre julho e agosto; e as tardias no fim de safra, entre setembro e outubro".

O controle de pragas, independente do tipo de cana-de-açúcar escolhida, é importante para evitar infecções da lavoura e perdas no plantio. Neste quesito, o método mais utilizado é a utilização de sensores para controle das áreas afetadas. O sensoriamento remoto é utilizado para obtenção de dados e análise da área cultivada visando o fornecimento de dados sobre áreas afetadas por pragas e variáveis meteorológicas que possam trazer danos ao plantio, reduzindo ainda o custo com a aquisição de defensivos agrícolas (PROENÇA *et al.*, 2009; GSI BRASIL, 2018). Fachin (2019) afirma que os dados obtidos nos boletins dos sensores facilitam o manejo do plantio e a tomada de decisões para ações corretivas.

4.2.2 Dentro da porteira

Definido o tipo de cana-de-açúcar a ser cultivada e o método para controle da plantação, avançamos para a etapa de plantio. O sistema de plantio mecanizado de cana compreende todas as operações de colheita de mudas, transporte para área de cultivo e o plantio em si (VOLTARELLI, 2015). Este sistema vem ganhando cada vez mais força no setor, onde, na safra de 2013/2014, já era utilizado em 84,8% das usinas do estado de São Paulo. A mecanização do plantio se fortaleceu não apenas por proporcionar maior agilidade, mas também pela possibilidade de reaproveitamento de materiais e ganhos ambientais.

Dessa forma, é possível recolher parte da palhada que futuramente pode ser utilizada para geração de bioenergia (CLAUDINO, 2015). Além disso, apontam Proença *et al.* (2009), o plantio mecanizado mantém o teor de umidade do solo, dado que abre o sulco, aduba, distribui os toletes e fecha os sulcos em uma operação única, propiciando melhor brotação. Os

autores mencionam que a razão do método não ser mais aplicado se deve aos altos índices de danos às gemas da cana-de-açúcar nas operações de colheita e transbordo.

O processo de mecanização estende-se também para a colheita. O primeiro ponto a ser abordado são os ganhos ambientais e sociais da substituição da colheita manual pela realizada através de colhedoras. Por tornar desnecessária a queima de resíduos para desempenhar a colheita, a mecanização propicia ganhos ambientais por não emitir gases decorrentes desta queima, reduzindo ainda a insalubridade envolvida no corte manual da cana-de-açúcar (CLAUDINO, 2015; SANTORO *et al.*, 2014). Tal como definido por Narimoto (2012), as máquinas colhedoras classificam-se de acordo com quatro quesitos:

- i. Auto propelidas ou montadas lateralmente ao trator;
- ii. Rodados de pneus ou esteiras;
- iii. Uma ou duas ruas (linhas de cana cortadas simultaneamente);
- iv. Fornece colmos inteiros ou fracionados.

Para facilitar a colheita através de máquinas, é necessário um preparo prévio do solo a fim de evitar dificuldades no tráfego e na operação das colhedoras. Tornar o solo mais uniforme, evitando deslocamentos e oscilações durante o trânsito das máquinas facilita o processo e prolonga a vida útil do maquinário (VOLTARELLI, 2015). Ainda, completam Santoro *et al.* (2014), o paralelismo entre os sulcos e a redução de falhas no estande, juntamente a uma maior suavidade do terreno, proporcionam também uma redução quantitativa nas perdas envolvidas no processo. Esse tratamento do solo é desempenhado, em alguns casos, pelos próprios operadores em períodos de entressafra, envolvendo operações como sulcamento, adubação, subsolagem e gradeação (RODRIGUES, 2014).

Existem, como descrito por Voltarelli (2015), doze indicadores críticos para avaliação da qualidade do processo de colheita, sendo os principais o índice de danos, a altura de corte, a velocidade de trabalho e a porcentagem de gemas inviáveis, devido ao índice de prioridade de risco definido pelo autor. O controle e análise destas variáveis possibilitam acompanhar a qualidade do processo e das máquinas envolvidas.

O relevo também influencia na operação de colheita mecanizada. Quanto mais sulcos, maior será o tempo de operação devido à quantidade de manobras necessárias, dado que cada manobra demanda em torno de 1,5 a 2 minutos (SANTORO *et al.*, 2014). Rodrigues (2014) complementa que a existência de trincheiras em curvas de nível e pedras no canavial também inviabilizam a utilização da colheita mecanizada. Portanto, estes fatores tornam as linhas descontínuas e impedem o tráfego das máquinas devido à falta de paralelismo, gerando ainda as chamadas ruas mortas (SANTORO *et al.*, 2014).

Mesmo que alguns fatores possam ser alterados para facilitar a mecanização da colheita, outros se mostram como um grande obstáculo para sua aplicação e dificilmente podem ser trabalhados nas grandes áreas de cultivo. Trata-se do declive do terreno, fator que impede o uso de maquinário em terrenos que apresentem declive igual ou superior a 12%, valor a partir do qual se torna necessário a aplicação da colheita manual ou, em alguns casos, semi-automática (SOUSA *et al.*, 2012). Este fator é tão importante para a definição da área de plantio e da aplicação de maquinário que as regulamentações, tais como as leis contra queimadas, estipulam prazos e valores diferentes para cada tipo de terreno.

Existem tecnologias complementares que podem ser utilizadas para melhorar ainda mais a eficiência deste tipo de colheita. O piloto automático mostra-se como uma das principais tecnologias utilizadas nesta etapa, pois, segundo Baio (2011) e Voltarelli (2015), o piloto automático garante um nível mais elevado de acurácia ao reduzir os erros de alinhamento da máquina em relação às linhas, dispondo maior conforto ao operador durante turnos noturnos e evitando o pisoteio de soqueiras. A velocidade de trabalho é outro importante fator a ser observado, visto que uma velocidade demasiadamente alta de operação pode resultar em perdas do tipo cana inteira devido à deficiência gerada no corte basal (VOLTARELLI, 2015). A altura de corte também deve ser monitorada, já que afeta diretamente os destinos o quais as mudas terão após a colheita (VOLTARELLI, 2015).

De modo amplo, este tipo de colheita apresenta maiores benefícios frente ao corte manual, dado que permitem o pré-processamento da matéria-prima, a padronização da colheita, maior controle das operações e fornecem maior segurança para o processo e seus envolvidos (ANDRADE, 2017).

A mecanização apresenta-se como um dos métodos mais recorrentes para melhoria de produtividade no campo, algo esperado ao analisarmos a tendência nos demais setores. Com os avanços tecnológicos, surgem novos meios para a criação de máquinas mais robustas, que desempenham mais atividades e de maneira cada vez mais eficiente. Esse maquinário pode apresentar um alto custo de investimento, valores os quais não foram o foco do trabalho, porém é possível verificar que as melhorias obtidas pela substituição do trabalho manual, com todos os fatores ambientais e sociais atrelados à significativa evolução de rendimento, tornam tais investimentos quase mandatórios para empresas que busquem a ampliação de mercado.

O cuidado com o equipamento é um assunto relevante neste cenário, porém não existem tantas referências a planos ou métodos de manutenção específicos para os maquinários utilizados no setor como esperado no início da pesquisa. Existem, de fato, pesquisas sobre melhorias no processo de manutenção e redução nos tempos de manutenção e

setup de máquinas, mas por não estarem diretamente vinculados ao maquinário mencionado no estudo, optou-se por não tratar dos mesmos, buscando manter o objetivo proposto inicialmente.

Modelos matemáticos também são aplicados para melhorarem o desempenho de atividades na cadeia produtiva, visto que estes modelos, apesar de complexos quanto à sua estruturação, são flexíveis e aplicáveis na maioria dos campos de estudos. Um destes modelos, apresentado por Santoro *et al.* (2014), tenta solucionar os Problemas de Planejamento de Rota Colhedora (PPRC), buscando obter um tempo mínimo de manobra das colhedoras para que estas atendam todas as linhas da área definida, visto que o layout é previamente conhecido. O modelo, apresentado na Equação 1, é constituído por uma função objetivo e suas restrições, sendo que a definição de cada variável é apresentada em anexo.

Equação 1: Função objetivo e restrições para solução PPRC

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A} t_{ij}x_{ij} + t_{ji}x_{ji} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; \end{array} \right. \quad (2)$$

$$x_{ij} + x_{ji} = 1, \text{ para todo } (i, j) \in A_r; \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \text{ para } S \subset \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \text{ e } S \neq \emptyset \quad (4)$$

$$s. a \left\{ \begin{array}{l} \sum_{(o,j) \in A} x_{oj} \geq 1; \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\sum_{(i,o) \in A} x_{io} \geq 1; \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \text{ para todo } (i,j) \in A. \quad (7)$$

Fonte: Adaptado de Santoro *et al.* (2014)

No modelo apresentado, como definem Santoro *et al.* (2014): (1) representa a função objetivo, minimizar o tempo total de manobras; (2) garante a continuidade do percurso; (3) assegura que todas as linhas existentes serão atendidas; (4) inviabiliza a criação de sub-rotinas; (5) e (6) garantem que a máquina finalizará seu percurso e (7) delimita que estas variáveis são binárias. Após a aplicação do modelo, o autor atingiu redução de 31,25% no tempo de manobra, gerando ganhos com economia de combustível, preservação de maquinário e ganhos ambientais. É possível constatar que o modelo mostrou-se eficaz e demanda baixo investimento quando comparado a outras opções, apesar de serem necessárias novas aplicações para comprovar o nível de melhoria que se pode obter ao utilizar o modelo.

4.2.3 Depois da porteira

Efetuada a colheita, as atenções se voltam para as oportunidades de melhoria "depois da porteira", ou seja, dentro das usinas e nas etapas de processamento da cana-de-açúcar colhida e seus subprodutos, já que 24 a 28% desta tornam-se bagaço que eram considerados rejeitos. Um dos principais tópicos abordados nesta área é a cogeração de energia, a qual se apresenta como um destino para antigos rejeitos do processo e uma fonte complementar de renda para as empresas (ANDRADE, 2017; CLAUDINO, 2015).

Como destacam Alvarenga e Queiroz (2009), a cogeração tem um impacto ambiental positivo ao destinar rejeitos para uma nova finalidade, sendo que, se considerarmos o bagaço da cana-de-açúcar, o Brasil possui potencial de geração de energia equivalente a 25 GW/h. O mesmo menciona três maneiras pelas quais é possível ainda ampliar o potencial de geração, sendo estas a substituição de caldeiras de baixa pressão por alta pressão, a conservação de energia no processo e a consequente sobra de potência para produção de eletricidade e a utilização de palha junto ao bagaço como combustível.

A utilização da palha na cogeração, como já mencionado, caracteriza o etanol celulósico, de 2ª geração ou 2G, combustível produzido utilizando materiais resultantes da biomassa da cana-de-açúcar (SOUSA *et al.*, 2012). Esta técnica proporciona, sem a necessidade de ampliação da área plantada ou do volume colhido, um aumento de até 100% na quantidade de álcool produzido por unidade em comparação ao álcool de primeira geração (SOUSA *et al.*, 2012).

O caráter financeiro que acompanha a cogeração também é apontado como um importante fator para a utilização deste método. Em virtude da alta volatilidade dos preços do açúcar e do etanol, afirma Claudino (2015), a existência de uma receita estável e de longo prazo tal como a oferta de eletricidade melhora o espectro econômico-financeiro do setor. Além disso, completa o autor, a complementação energética fornecida pelo processo ganha mais importância ao constatarmos que essa geração ocorrerá durante períodos de estiagem devido à época de seca na qual a colheita da cana-de-açúcar ocorre, tornando-se importante alternativa para o parque hidrelétrico neste período.

Uma diferente alternativa de inovação nas usinas é a incorporação do milho na produção do etanol, aponta Claudino (2015). As usinas *flex*, como cita o autor, operam com a cana-de-açúcar em período de safra e trabalham com o milho em períodos de entressafra ou mesmo com ambos simultaneamente, visando, nos dois casos, ampliar a produção de etanol e bioeletricidade ao longo do ano. Os principais ganhos advindos desta flexibilização, conforme

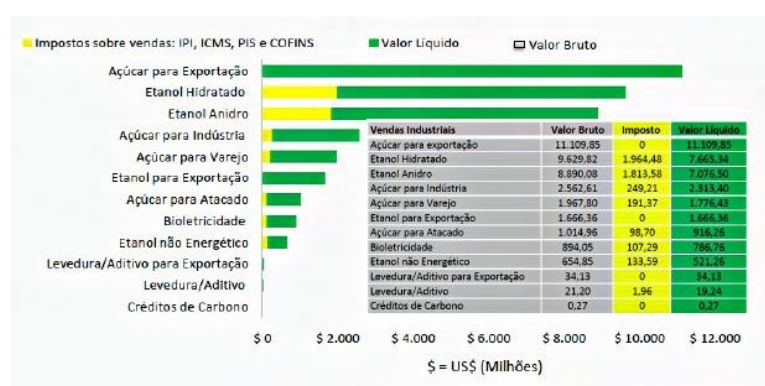
descrito por Milanez (2012), são o baixo grau de investimento para adaptação do milho às usinas, capacidade de aproveitamento do milho safrinha (ou 2ª safra) e o processamento do milho junto à produção, barateando o custo logístico imposto pelas dificuldades na infraestrutura de transporte nacional.

A capacidade de produzir tanto açúcar quanto álcool e a capacidade de alteração de um para o outro caracterizam também uma interessante vantagem econômica, visto as flutuações existentes nos preços de cada um dos itens. Porém, tais mudanças e alterações no *mix* de produção não são tão simples e estão sujeitas a alguns compromissos, tais como apontado por Czinar (2013):

- Custo de *washout*, referente ao custo para deixar de fornecer o volume de um contrato;
- Avaliação de caixa da empresa, dado que a liquidez do mercado do açúcar é mais baixa,
- Compromissos de entrega e estocagem de etanol;
- Dificuldades e limitações técnicas, já que em épocas de maior moagem é mais vantajoso produzir açúcar em contrapartida ao etanol.

Enfim, é interessante poder alterar também o tipo de combustível que está sendo produzido, buscando, mais uma vez, vender o produto de maior rentabilidade de momento no mercado. Para isso, Claudino (2015) afirma que as usinas devem possuir peneiras moleculares, as quais permitem a migração completa da produção de etanol hidratado para etanol anidro e também o inverso. O autor afirma que, mesmo com um menor impacto financeiro, a venda de créditos de carbono também auxilia o fluxo de caixa das usinas e sua imagem socioambiental. A Figura 1 apresenta um balanço financeiro das receitas de uma usina por segmento de produto fornecido.

Figura 1: Movimentação financeira gerada nas usinas



Fonte: Neves e Trombin (2014) *apud* Claudino (2015)

Durante todo o processo de transformação da cana-de-açúcar, um dos insumos mais utilizados é a água, empregada desde o cultivo até nos processos existentes dentro das usinas para produção do açúcar ou etanol (MEDEIROS *et al.*, 2011). Portanto, devido ao aumento dos problemas com escassez de recursos hídricos e com custos da água potável, o reuso ganha notoriedade uma vez que aumenta a disponibilidade de água para os processos, reduz a captação de águas subterrâneas e superficiais e auxilia o meio ambiente reduzindo o lançamento de descartes industriais.

Reduzir a captação de água gera uma consequente redução nos custos com uso e tratamento da mesma, estabelecendo-se uma meta de utilização de um metro cúbico de água por tonelada processada (FREITAS *et al.*; ELIA NETO, 2009). Já nas usinas, como descrito pela Federação das Indústrias do Estado de São Paulo – FIESP (2009), utilizam-se em média 22 m³/ton para a produção de um *mix* de metade açúcar e metade etanol, sendo que de 62 a 71% vão para o resfriamento da destilaria, evaporadores e cozedores. Neste caso, Freitas *et al.* (2019) apontam para a possibilidade de redução de desperdícios de 5-8% para 1,5-3% através da utilização de sistemas de refrigeração por aspersão pela torre de resfriamento.

As instalações usualmente utilizam água captada de mananciais ou represas para resfriamento nas usinas; a reutilização da água para resfriamento através de recirculação em circuito fechado reduz a necessidade de captação e ainda possibilita ganhos de eficiência nas trocas térmicas (MEDEIROS *et al.*, 2011). A água residual pode, ainda, retornar para uma represa e ser utilizada para fins não potáveis, como na lavagem de áreas externas e veículos ou na irrigação de gramados e jardins (MEDEIROS *et al.*, 2011).

Outra possibilidade é a utilização da tecnologia de limpeza a seco da cana-de-açúcar, efetuada através da utilização de caldeiras de alta pressão para queima da palha, fornecendo uma redução no consumo de água de 11 a 13% em relação ao método mais usado atualmente (EMBRAPA, 2018). Já Andrade (2017) confronta que é possível realizar este processo separando-se a palha da cana antes de ir ao picador através do uso de peneiras e sopradores, viabilizando o uso desta palha para cogeração. O processo de limpeza a seco, prossegue o autor, proporciona à empresa, além da economia de água, aumento na capacidade de moagem.

Avaliando o cenário externo à usina, dois métodos vêm sendo mais empregados recentemente. De acordo com Massruha e Leite (2017), é possível utilizar sistemas de irrigação inteligentes interligados a outros sistemas para compreender a necessidade real de água e nutrientes do plantio em determinado momento, evitando o desperdício e também a subutilização dos recursos para, de qualquer forma, não comprometer a lavoura. Outra opção

é a utilização da vinhaça, subproduto de fabricação do etanol, para fertirrigação, uma vez que além de prevenir seu lançamento no ambiente e fornecer água para o plantio, a mesma apresenta-se como fonte de nutrientes e pode auxiliar no cultivo da cana-de-açúcar (FREITAS *et al.*, 2019; MEDEIROS *et al.*, 2011).

A utilização da fertirrigação com vinhaça apresenta-se como um fator recorrente em estudos de redução de desperdícios, devido a reutilização de um possível rejeito do processo, eliminando a necessidade e custo de descarte e aquisição de insumos para realizar tal atividade. Todavia, algumas revistas e sites especializados no mercado sucroalcooleiro apontaram que o uso demasiado da vinhaça para irrigação do plantio pode contaminar o solo e acabar se tornando prejudicial. Infelizmente, o assunto não é abordado por periódicos ou artigos científicos, não possuindo um embasamento científico concreto, portanto não estando presentes quando o assunto foi abordado. Sugere-se que estudos e pesquisas voltados a essa área aconteçam, visando fornecer informação sobre um fator crítico na cadeia de produção sucroalcooleira.

No campo da informática, existem programas que podem auxiliar as empresas durante as operações existentes dentro das usinas. Um deles é o *Leaf*, *software* baseado na lógica difusa (ou "*fuzzy*") e que faz uso de algoritmos para ampliar as formas de desempenhar uma tarefa, aplicado neste caso aos processos mecanizados da usina (ANDRADE, 2017). O programa vem sendo aplicado para reduzir variações de pressão em torres de destilação de etanol e, conforme Andrade (2017), é capaz de reduzir as variações em 61% e melhorar a produtividade do processo em 11%. Segundo o autor, o *Leaf* pode ser usado ainda para controlar e otimizar processos em caldeiras de cogeração, nos processos de evaporação e também em cozedores, onde possibilita obter a concentração ideal de açúcar nas misturas.

Saindo das usinas, as principais atividades a serem realizadas são o transporte dos produtos e o relacionamento com o cliente. O segundo tópico é pouco abordado e não se faz menção à utilização de ferramentas de auxílio nesta etapa, ao menos não voltadas especificamente para relações comerciais na área agroindustrial. Já os transportes são atividades chave e afetam de forma direta e considerável o custo total dos produtos, portanto destacam-se nesta etapa.

Além dos ERPs (*Enterprise Resources Planning*), ou Sistemas Integrados de Gestão Empresarial, e macro sistemas utilizados nas empresas, alguns *softwares* mais específicos são desenvolvidos para ampliar a eficiência de determinado processo. Visto a relevância das atividades de transporte, alguns destes se dedicam a ampliar a eficiência das operações, tanto de movimentação como das dependentes das mesmas. Estes *softwares* de gestão da cadeia

produtiva fornecem de maneira otimizada o controle de tráfego canavieiro, reduzindo a necessidade de criação e manutenção de estoques e as possíveis perdas atreladas a este armazenamento (HIZO, 2015). Com eles, é possível obter os seguintes resultados conforme apresentados por Hizo (2015):

- Redução de 5 a 8% nos custos de transporte;
- Redução de horas de fila e paradas de equipamento;
- Melhoria no dimensionamento da frota;
- Abastecimento uniforme de insumos.

Modelagens matemáticas, tal como o exemplo apresentado anteriormente, são constantemente utilizadas e possuem aplicação também na área logística. Foi desenvolvido um modelo para assessorar a tomada de decisão quanto à obtenção de frota própria ou terceirização dos serviços. O desenvolvimento deste modelo, apontado por Pera *et al.* (2013), auxilia no planejamento de transportes e na decisão de localização geográficas das unidades industriais. Este modelo, cuja função objetivo é apresentada na Equação 2, tem seu detalhamento descrito em anexo.

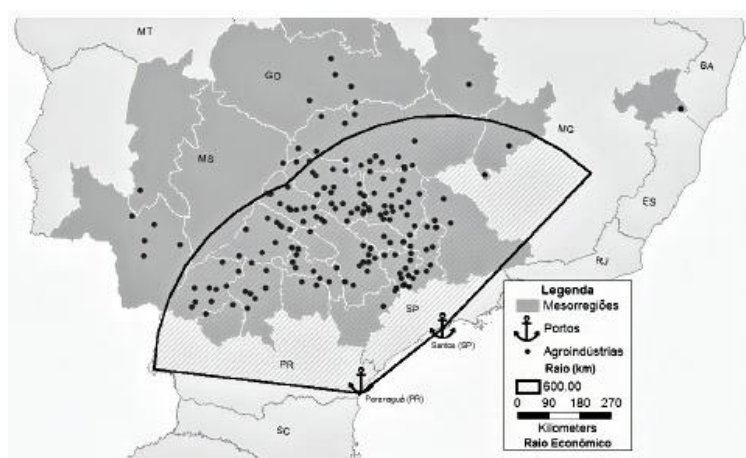
Equação 2: Minimização do custo total de transporte

$$CT = \sum_i \sum_j \sum_k cr_{ijk} \cdot FR_{ijk} + \sum_i \sum_t \sum_k cpr_{itk} \cdot FP_{itk} + \sum_t \sum_j cf_{tj} \cdot FF_{tj}$$

Fonte: Adaptado de Pera *et al.* (2013)

Após sua aplicação, Pera *et al.* (2013) puderam constatar que, em um raio de até 650 km, torna-se mais vantajoso utilizar veículos de frota própria frente a contratação de terceiros, sendo esta distância o ponto de paridade de custos entre ambos. Focando no comércio para exportação, desenvolveu-se uma representação deste raio econômico tendo como base os principais portos utilizados para este fim pelos estados do Sudeste e Centro-Oeste, como ilustra a Figura 2. Neste arranjo, as cidades com maior viabilidade para aquisição de frota própria são, como lista o autor da pesquisa, "Campinas, Piracicaba, Itapetininga, Araraquara, Bauru, Norte Paranaense e Ribeirão Preto".

Figura 2: Raio econômico para a utilização dos portos de Santos/SP e Paranaguá/PR



Fonte: Pera *et al.* (2013)

O mesmo modelo pode ser replicado em qualquer região, alterando-se apenas as variáveis apresentadas para obtenção do novo resultado. Uma ressalva feita por seus criadores é para o fato de o modelo ter sido criado utilizando-se dados externos à pesquisa, os quais podem sofrer alterações ao longo do tempo e também com o momento da safra, sendo considerado aqui um momento de pico de produção. É interessante buscar replicar o modelo em outros momentos da safra ou regiões para obter resultados mais satisfatórios para cada situação.

Os processos logísticos caracterizam grande parte das operações envolvidas na cadeia de produção, e possuem sempre sua importância salientada durante os estudos levantados. Porém, ao contrário do esperado no início do estudo, existem poucas proposições de ferramentas e métodos mais simples, de menor investimento e rápida aplicação, que auxiliem as atividades do setor. Devido ao volume de operações deste tipo, torna-se difícil um controle sem a utilização de *softwares*, mas estes muitas vezes possuem um alto valor para aquisição e uma curva de aprendizado lenta, devendo ser tratados desde o início do projeto de implantação para não acarretarem em problemas operacionais futuramente. A solução rápida para problemas de urgência, nos quais o sistema atual não seja capaz de auxiliar, fica portanto sem uma proposta.

A necessidade de apoio externo mostra-se importante para auxiliar o setor, especialmente pelo setor logístico. A falta de uma malha férrea impacta muito nos custos dos produtos, visto que os transportes devem ocorrer através de rodovias sem qualidade para veículos com carga. O transporte acaba então onerando no preço dos produtos nacionais, possivelmente reduzindo sua competitividade em mercados internacionais. Propor um modelo

de certificação generalizado para as empresas do setor, especialmente se feito em escala global, foi uma característica interessante abordada em certas fontes, uma vez que facilitam a padronização dos sistemas de avaliação e possíveis comparações além de apenas valores monetários e qualidade do produto final.

4.2.4 Outros métodos e considerações

Com o avanço da tecnologia, vão surgindo novas oportunidades de inovações para facilitar o controle sobre os processos da cadeia de produção agroindustrial. Uma destas inovações, com elevado grau tecnológico, que passou a ser utilizada também na agricultura é a utilização de drones. Estes, de acordo com Gomes (2018), desempenham atividades semelhantes aos métodos por satélites e aviões, porém são capazes de apresentar mais dados e desempenharem atividades em um tempo menor. Alguns problemas os quais podem ser observados pelos drones são a existência de pragas e ervas daninhas, problemas de irrigação e compactação do solo, falhas no plantio e identificação da falta de nitrogênio (LUCHETTI, 2019). Bastos (2015) vai além e lista outras aplicações, como a demarcação do plantio, o monitoramento de desmatamento e de nascentes de água, identificação de focos de incêndio, o auxílio para abertura de estradas, a pulverização da plantação e vigilância.

A opção de adoção destas tecnologias é influenciada por diversos fatores. Segundo resultados da pesquisa desenvolvida por Cirani e Moraes (2011), empresas de capital nacional apresentam probabilidade de adoção de tecnologias 61,45% maior que empresas com capital de origem estrangeira, sendo que a utilização de capital próprio também eleva esta probabilidade em 73,8% frente a outras fontes de financiamento. Empresas voltadas para exportação também possuem taxas de adoção 42,31% maiores devido à maior competitividade e grau tecnológico dos concorrentes nesse meio, buscando suportar as pressões do mercado (CIRANI E MORAES, 2011). Um fator com resultado surpreendente foi a constatação de que a área de cultivo não influencia na decisão de adoção de novas tecnologias, contrariando uma tese inicial do autor.

Um ponto interessante a ser destacado é a necessidade de criação de certificações, de preferência internacionais, para o setor, trazendo maior confiabilidade aos consumidores e facilidade para comparações e pesquisas de qualidade (SOUSA *et al.*, 2012). A transformação do etanol em uma *commodity* é, segundo Sousa *et al.* (2012), um objetivo do setor visto que essa é tida como uma condição indispensável para a criação de um mercado global mais sólido.

5 CONCLUSÃO

A busca pela excelência e melhoria contínua são fatores imprescindíveis para empresas que buscam ampliar sua atuação no mercado e manterem-se competitivas em um meio tão acirrado, especialmente se considerarmos o desejo de exportação. Atingir estes níveis requer um alto grau de organização, o que também deve ser acompanhado por ferramentas e tecnologias que dispõem maior facilidade na obtenção destes altos padrões de qualidade e funcionamento, descritos no meio agrícola, como apontado anteriormente, como agroindústria 4.0.

Através de uma revisão da literatura, foi possível agrupar os principais gargalos e dificuldades encontrados durante a cadeia agroindustrial da cana-de-açúcar, processos que oneram o produto final sem agregação de valor. Foi necessário primeiro entender o ambiente em que ocorre a produção do açúcar, do etanol e dos demais produtos obtidos através da cultura da cana a fim de avaliarmos a dimensão, impacto e real necessidade de aplicação dos métodos propostos. Foram listados alguns dos métodos e ferramentas considerados mais relevantes, definidos pela quantidade de referências a estes assuntos, a solidez dos desenvolvimentos e/ou as aplicações dos métodos ou até ambos.

Alguns estudos apresentaram proposições interessantes, porém trataram muito superficialmente do método ou aplicaram-no de forma demasiadamente específica, em alguns momentos com quantidade insuficiente de dados ou informações, sendo que, sem outras fontes para corroborar o exposto, terminaram por não serem apresentados. Vale ressaltar que este trabalho não aborda todos os métodos existentes, apenas aglomera o conhecimento existente em diferentes artigos e visa apresentar de forma sintetizada as técnicas que vêm facilitando o cultivo e o processamento da cana-de-açúcar.

De modo geral, as técnicas levantadas mostraram-se efetivas e abrangem diversas fases da cadeia produtiva da cana-de-açúcar, para qualquer que seja seu fim. O avanço tecnológico e utilização de máquinas mais inteligentes já é algo esperado nos tempos atuais, porém é interessante avaliar o impacto que técnicas e ferramentas mais simples também podem propor, demonstrando a capacidade de melhorar de maneira contínua sem necessariamente efetuar alterações de maquinário ou de sistemas operacionais. A gama de estudos na área se estende e acaba se entrelaçando com outros setores, principalmente indústrias e empresas do setor primário, sendo interessante a realização de estudos desta natureza para setores mais específicos da cadeia de produção, porém mais abrangentes quanto à matéria-prima e a produtos acabados.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, R. P.; QUEIROZ, T. R. **Produção mais Limpa e Aspectos Ambientais na Indústria Sucroalcooleira**. Key elements for a sustainable world: energy, water and climate change. São Paulo, 2009.
- ANDRADE, M. C. Inovações tecnológicas no setor sucroalcooleiro: determinantes, estágio vigente e perspectivas no contexto brasileiro (2005 - 2014). **Revista Brasileira de Gestão e Inovação**. v.4, n.3, Maio/Agosto 2017. Disponível em: <<http://www.uces.br/etc/revistas/index.php/RBGI/index>>. Acesso em: 22/09/2019.
- ARAÚJO, M. J. **Fundamentos de Agronegócios**. Editora Atlas S.A. 2 ed. São Paulo, 2007.
- BAIO, F. H. R. **Evaluation of an auto-guidance system operating on a sugarcane harvester**. Precision Agriculture, v. 13. 2011.
- BARDIN L. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70; 2002.
- BARROS, F. F. **A melhoria contínua no processo de plantio de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Agricultura). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
- BARROS, G. S. C. ; MORAES, M. A. F. D. A desregulamentação do setor sucroalcooleiro. **Revista de Economia Política**, v. 22, n. 2, p. 156-173. São Paulo, 2002.
- BASTOS, 2015. **15 usos de drones na agricultura e pecuária**. Disponível em: <<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Pesquisa-e-Tecnologia/noticia/2015/05/15-usosde-drones-na-agricultura-e-na-pecuaria>> Acesso em: 28/09/2019.
- BATALHA, M. O. **Gestão agroindustrial**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2014.
- BOIKO, T. J. P. **Produção e sistemas agroindustriais**. Centro Universitário de Maringá. Maringá, 2012.
- BUENO, M. S. **Análise da cadeia logística de exportação de açúcar**. Universidade de São Paulo, 2012.
- CIRANI, C. B. S.; MORAES, M. A. F. D. Inovação na indústria sucroalcooleira paulista: os determinantes da adoção das tecnologias de agricultura de precisão. **RESR**, vol. 48, nº4, p. 543-565. Piracicaba, 2011.
- CLAUDINO, E. S. **Responsividade na gestão da cadeia de suprimentos: uma análise na agroindústria da cana**. Universidade Federal Da Grande Dourados. Dourados, 2015.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2017. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. 2017.
- CZINAR, M. M. Setor sucroalcooleiro: sinais distorcidos. **Revista Eletrônica da FGV**. v. 33. 2014.
- ELIA NETO, A. **Água, Indústria e Sustentabilidade: FNS – Gestão dos Recursos Hídricos na Agroindústria Canavieira**. Manual de Conservação de Reuso de Água na Agroindústria Sucroenergética. 2009.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Agroindústria**. 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/grandes-contribuicoes-para-a-agricultura-brasileira/agroindustria>> Acesso em: 13/10/2019.

FACHIN, R. **Agricultura 4.0**: revolução tecnológica no campo. Disponível em: <<https://www.grupocultivar.com.br/artigos/agricultura-4-0-revolucao-tecnologica-no-campo>> Acesso em: 08/09/2019

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (FIESP). **Conservação e reuso de água: manual de orientações para o setor industrial**. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/acoesadministrativas/cdoc/CatalogoPublicacoes_2004.asp> Acesso em: 30/10/2019.

FREITAS, A. H. L.; FREITAS, J. B.; FREITAS, L. H. D. Importância do uso consciente da água nos processos produtivos da agroindústria sucroalcooleira. **Rev. Eletrônica Organ. Soc.**, Iturama (MG), v. 8, n. 9, p. 37-55, jan./jun. 2019.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). **Inovação no setor sucroenergético brasileiro ainda é baixa**. São Paulo, 2015.

GOMES, 2018. **Drones na agricultura**: tudo sobre a tecnologia que está mudando o setor. Disponível em: <<https://pixforce.com.br/drones-na-agricultura>>. Acesso em: 23/10/2019

GSI BRASIL, 2018. **Agricultura 4.0**: a incorporação de tecnologia, sensoriamento e dados às atividades do campo. Disponível em: <<https://www.gsibrasil.ind.br/noticia/agricultura-4-0--a-incorporacao-de-tecnologia--sensoriamento-e-dados-as-atividades-docampo>> Acesso em: 12/10/2019.

HIGGINS, A. *et al.* Opportunities for value chain research in sugar industries. **Agricultural Systems**, v. 94. 2007.

HIZO, E. M. **Uso e aplicabilidade do software Gatec na etapa de transporte da cana-de-açúcar**. Universidade Estadual de Maringá - Departamento de Engenharia de Produção. Maringá, 2015.

LUCHETTI, A. **Utilização de drones na agricultura**: impactos no setor sucroalcooleiro. Universidade Do Sul De Santa Catarina, Palhoça, 2019.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa**: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados. São Paulo: Atlas; 2006.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A. **Agro 4.0** - rumo à agricultura digital. JC na Escola Ciência, Tecnologia e Sociedade: mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil. 2. ed. São Paulo, 2017.

MEDEIROS, G. A.; JUNIOR, O. O. C.; VACCARI, G. B. Potencialidades do reuso da água: estudos de caso no setor sucroalcooleiro e universitário. **Engenharia Ambiental -Espírito Santo do Pinhal** , v. 9, n. 1, p. 003-016, jan./mar. 2012.

MEDEIROS, K. V. L.; SILVA, A. M. M. **Uso de ferramentas da qualidade em análises de falha em uma usina de cana-de-açúcar**. Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2016.

- MILANEZ, A. Y. *et al.* A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. **Revista do BNDES**, n° 41. 2014.
- MOTA, J. C. V.; MACHADO, A. G. C.; MORAES, W. F. A. Condicionantes para exportação no setor sucroenergético brasileiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 52. 2014.
- NARIMOTO, L. R. **O trabalho dos operadores de máquinas colhedoras de cana-de-açúcar**: uma abordagem ergonômica. Universidade de São Carlos. São Carlos, 2012.
- OLIVEIRA, A. F.; VICTORIA, D. C.; ANEFALOS, L. C. **Monitoramento da safra de cana-de-açúcar**: elementos econômicos e contribuições do sensoriamento remoto. Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Porto Alegre, 2009.
- OLIVEIRA, V. **Sistemas Agro Industriais**. 2011.
- PERA, T. G. *et al.* **Modelo de otimização da logística de açúcar para exportação com o objetivo de avaliar impactos econômicos da frota própria**. Universidade de São Paulo, 2013.
- PROENÇA, E. R. *et al.* **Inovações Tecnológicas adotadas por Usinas do Setor Sucroalcooleiro na regional de Andradina**. Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural -SOBER, Porto Alegre, 2009.
- RODRIGUES, A. H. **Três patamares tecnológicos na produção de etanol**: a usina do Proálcool, a usina do futuro. Universidade Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.
- RODRIGUES, D. A. **Acidentes graves e fatais no trabalho de corte mecanizado de cana-de-açúcar**: o olhar através do método mapa. Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2014.
- SANTORO, E.; SOLER, E. M.; CHERRI, A. C. **Otimização do processo de colheita mecanizada de uma indústria de açúcar e álcool**. UNESP - Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2014.
- SANTOS, W.; FREITAS, I. R. **Gerenciamento da qualidade para redução de sobrepeso no processo de empacotamento do açúcar**. XXXVI Encontro Nacional De Engenharia De Produção - Contribuições da Engenharia de Produção para Melhores Práticas de Gestão e Modernização do Brasil. João Pessoa, 2016
- SHIKIDA, P. F. A.; AZEVEDO, P. F.; VIAN, C. E. F. (2011). **Desafios da Agroindústria Canavieira no Brasil Pós-desregulamentação**: uma análise das capacidades tecnológicas. Piracicaba, v. 49, n. 03, p. 599-628.
- SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA, 2016. **Novas tecnologias da informação devem melhorar atividades no campo**. Disponível em: <<https://www.sna.agr.br/novastecnologias-da-informacao-devem-melhorar-atividades-no-campo>>. Acesso em: 19/09/2019.
- SOUSA, P. N.; SCUR, G.; SOUZA, R. C. Panorama da cadeia produtiva do etanol no Brasil: gargalos e proposições para seu desenvolvimento. **GEPROS**. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Ano 7, n° 3, jul-set/2012, p. 145-159.
- SOUZA, T. F.; GASPAROTTO, A. M. S. Avaliação da melhoria com kaizen na qualidade do açúcar final. **Revista Interface Tecnológica**. Taquaritinga, 2014.

TRAYLEN, D. **Heading South**. BiofuelsInternational. Abr 2014.

VOLTARELLI, M. A. **Ferramentas da qualidade na colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, 2015.

ANEXOS

Anexo 1. Variáveis do modelo matemático para o Problema de Planejamento da Rota da Colhedora, tal como apresentado por Santoro *et al.* (2014)

Assim, este problema reduz-se ao Problema do Carteiro Rural (Eiselt *et al.*, 1995), em que dado um grafo $G = (V, A)$, em que V corresponde ao conjunto de vértices, com $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, e A representa o conjunto de arestas entre os vértices, $A = \{(i, j), i \neq j\}$. Definimos um subconjunto $A_r \subseteq A$, de arestas obrigatórias. O problema consiste em determinar um caminho fechado de custo mínimo, partindo de um ponto de origem e passando por cada aresta de A_r uma vez.

Os parâmetros utilizados na modelagem matemática foram:

A : conjunto de arestas do grafo;

A_r : conjunto de arestas obrigatórias (correspondem as linhas de cana);

t_{ij} : tempo de manobra da colhedora associado à aresta (i, j) , $(i, j) \in A$.

As variáveis de decisão são:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se aresta } (i, j) \text{ é percorrida pela colhedora} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Anexo 2. Parâmetros e restrições do modelo de minimização de custo de transporte, assim como apresentado por Pera *et al.* (2013)

Conjuntos:

i : É o conjunto de municípios produtores de açúcar bruto no Centro-Sul brasileiro (265 elementos);

j : É o conjunto de portos de exportação de açúcar bruto no país (3 elementos);

t : É o conjunto de terminais ferroviários de embarque de açúcar no Centro-Sul brasileiro (15 elementos);

k : É o conjunto da frota a ser utilizada para o transporte rodoviário de açúcar, podendo utilizar frota própria ou terceirizada (2 elementos);

Variáveis:

FR_{ijk} é a variável de fluxo rodoviário entre a origem i ao destino j utilizando a frota k , definida em toneladas;

FP_{itk} é a variável de fluxo da ponta rodoviária entre a origem i ao terminal ferroviário t utilizando a frota k , definida em toneladas;

FF_{tj} é a variável de fluxo ferroviário entre o terminal de embarque t e o destino j , definida em toneladas;

Parâmetros:

cr_{ijk} é o parâmetro estimado custo de transporte rodoviário entre a origem i e destino j utilizando a frota k , definido em R\$/tonelada;

cpr_{itk} é o parâmetro estimado de custo de transporte da ponta rodoviária entre a origem i e o terminal t , definido em R\$/tonelada;

cf_{tj} é o parâmetro estimado de custo de transporte ferroviário entre o terminal t e o destino j , definido em R\$/tonelada;

$PRODUCAO_i$ é o parâmetro relativo a produção de açúcar bruto de cada município produtor i , definido em tonelada;

$EXPORTACAO_j$ é o parâmetro relativo a exportação de açúcar bruto de cada porto j , definido em tonelada;

$CAPACIDADE_t$ é a capacidade de transporte ferroviário de cada terminal j , definido em tonelada.

Restrições:

$$\sum_j \sum_k FR_{ijk} + \sum_t \sum_k FP_{itk} \leq \text{PRODUCAO}_i, \quad \forall i$$

$$\sum_i \sum_k FR_{ijk} + \sum_t FF_{tj} \geq \text{EXPORTACAO}_j, \quad \forall j$$

$$\sum_i \sum_k FP_{itk} - \sum_j FF_{tj} = 0, \quad \forall t$$

$$\sum_i \sum_k FP_{itk} \leq \text{CAPACIDADE}_t, \quad \forall t$$

$$\sum_j FR_{ijk=\text{proprio}} + \sum_t FP_{itk=\text{proprio}} \leq \beta \cdot (\sum_j \sum_k FR_{ijk} + \sum_t \sum_k FP_{itk}), \quad \forall i \cap \beta \in (0,1)$$

$$\sum_t \sum_k FP_{itk} \leq \alpha \cdot \text{PRODUCAO}_i, \quad \forall i \cap \alpha \in (0,1)$$