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

**Desempenho econômico de um sistema de produção de biomassa da
cana energia**

Fábio Makoto Okuno

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2016**

Fábio Makoto Okuno
Engenheiro Agrônomo

Desempenho econômico de um sistema de produção de biomassa da cana energia
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2016

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

Okuno, Fábio Makoto

Desempenho econômico de um sistema de produção de biomassa da cana energia /
Fábio Makoto Okuno. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de
2011. -- Piracicaba, 2016.

94 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Cana energia 2. Biomassa 3. Modelo 4. Análise de viabilidade econômica I. Título

CDD 338.17361
O41d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, instituição pela qual me formei engenheiro agrônomo, pela oportunidade de realização da graduação e do mestrado.

À 4I.GREEN pela concessão da bolsa de estudos e aos diretores Cleber Guarani e Giuliano Senatore pelo apoio.

Ao Prof. Dr. Marcos Milan, pela orientação na realização desse trabalho. Agradeço o apoio e amizade durante o curso, que auxiliaram no meu desenvolvimento profissional.

A todos os Professores do Programa de Engenharia de Sistemas Agrícolas, em especial os Professores Rubens Coelho e Thiago Romanelli, pelos ensinamentos.

À empresa Vignis pela concessão dos dados para a pesquisa, em especial ao Sizuo Matsuoka pela disposição e apoio.

Aos colegas do CTBE e ao Professor Paulo Magalhães pela confiança.

A todos os amigos da República Pinga Pura que passaram durante os 10 anos de convivência.

À minha família pelo incondicional suporte e à Daniela Okuma pelo companheirismo e incentivo.

Às secretárias do Departamento de Engenharia de Biosistemas, Fernanda B. N. Silva, Davilmar Collevatti e Angela M. D. Silvia pelo apoio e paciência com os pós-graduandos.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Modelagem.....	17
2.2 Modelos de sistemas mecanizados agrícolas e avaliação dos custos	19
2.3 Energia de biomassa.....	21
2.4 Bioetanol	22
2.5 Cana energia.....	23
2.5.1 Histórico do desenvolvimento da cultura	23
2.5.2 Característica da cana energia	26
2.6 Viabilidade técnica.....	28
2.6.1 Critérios de avaliação econômica.....	29
2.7 Considerações.....	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.4 Etapa 1. Desenvolvimento do modelo.....	34
3.4.1 Fluxo de entrada (1).....	36
3.4.2 Fluxo de saída (7)	37
3.4.3 Fluxo de caixa (30).....	43
3.5 Etapa 2. Cenário base: premissas do sistema de produção	45
3.5.1 Produtividade esperada e longevidade	45
3.5.2 Dimensionamento do sistema mecanizado.....	46
3.5.3 Preço de equipamento, insumos e índices	49
3.5.4 Planejamento das operações mecanizadas.....	51
4 RESULTADO E DISCUSSÃO	54
4.4 Etapa 1. Desenvolvimento do Modelo	54
4.4.1 Verificação.....	54
4.4.2 Validação	54
4.5 Etapa 2. Aplicação do Modelo	55
4.5.1 Receita bruta	56

4.5.2	Custos.....	56
4.5.3	Fluxo de caixa	61
4.5.4	Indicadores de atratividade	63
4.5.5	Análise de sensibilidade.....	63
4.5.6	Análise de cenários	64
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIA.....	77

RESUMO

Desempenho econômico de um sistema de produção de biomassa da cana energia

O uso da biomassa como fonte de energia elétrica corresponde a uma alternativa de grande importância para o planejamento estratégico do crescimento econômico de diversos países. A vasta extensão territorial e o clima favorável ao desenvolvimento da agricultura no Brasil trazem como vantagem o poder de planejar sua matriz energética utilizando variadas fontes primárias renováveis. A cana-de-açúcar destaca-se pela rusticidade e grande produtividade. O bagaço como um subproduto resultante do processamento da cana é utilizado como fonte para a cogeração de energia e pode contribuir significativamente para a descentralização das fontes de energia nacional. Com o desenvolvimento da tecnologia de etanol de segunda geração, a busca pela maior produção de biomassa ganha relevância. Os programas de melhoramento identificaram que se caso com redução de 25 a 35% da sacarose na cana, a planta teria um potencial de aumento de mais de 100% da biomassa. Os híbridos derivados de programas de melhoramento da espécie *Saccharum* spp., direcionados exclusivamente para a produção de biomassa, foram denominados de cana energia. Tendo em vista o potencial de produtividade da cultura e consequentemente de geração de energia, torna-se necessário conhecer se esse potencial se traduz em resultado econômico. Com esse enfoque, o objetivo deste trabalho foi analisar a viabilidade econômica da produção de biomassa da cana energia. Para tanto foi desenvolvido um modelo em planilha eletrônica e o modelo foi empregado na simulação de cenários e alternativas. A planilha integra modelos de balanço hídrico, produtividade da cultura e distribuição de chuvas, e suas relações com aspectos econômicos e produtivos. O preço de venda da biomassa, a produtividade da cultura e a distância de transporte se mostraram como os itens que mais influem sobre os indicadores de viabilidade econômica. Diferentemente da eficiência gerencial, a eficiência de campo corresponde a um fator de grande importância a ser considerado para reduzir o custo de produção. A análise da área de colheita como uma variável crítica indicou que existem módulos ideais para a utilização de máquinas agrícolas, reduzindo o seu custo operacional devido ao uso melhor atribuído das máquinas na propriedade. A análise da textura do solo como variável crítica mostrou que o cultivo da planta em diferentes tipos de solos reflete em diferentes custos operacionais, produtividade potencial e no montante de investimento. O ano de reforma corresponde a um fator crítico para a viabilização da atividade. Para o cenário base, o indicador de atratividade financeira apresenta um Valor Presente Líquido de 6,4 milhões de reais e uma Taxa Interna de Retorno de 15,2%, com um horizonte de 20 anos de produção. As análises de sensibilidade mostram que as variáveis que mais impactam nos indicadores de viabilidade econômica financeira são o preço de venda da biomassa e a produtividade média da lavoura.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar; Biomassa; Modelo; Análise de viabilidade econômica

ABSTRACT

Economic feasibility of biomass from energy cane production system

The use of biomass as energy source is an alternative of great importance to the strategic planning of growth for any economy in the world. The vast territory and favorable climate for Brazilian agriculture development, brings advantage to plan its energy matrix using various renewable primary sources. The sugarcane is highlighted by its rusticity and large amount of biomass generated by area. Since the bagasse is a sugarcane by product, it can be used as a source for energy cogeneration, which can significantly contribute to the strengthening of the Brazilian energy matrix. Genetic improvement of the culture has always sought the highest sucrose content, due to the needs of the industrial process. With the development of second generation ethanol technology, the quest for higher biomass production becomes important. If the cane were fully harvested, the total biomass would be increased in more than 100%, with a loss of 25 to 35% in sucrose. The hybrids derived from *Saccharum* spp. breeding programs directed exclusively for biomass production were named energy cane. Considering the potential crop yield and consequently the energy generation, it is very important to know if this potential is related to economic results. Therefore, the aim of this study was to develop a model to analyze the economic feasibility of biomass production from energy cane. It was developed an electronic spreadsheet and the model was used in different scenarios and alternatives. In the base scenario, the financial attractiveness indicators shows a Net Present Value of 6.4 million and an Internal Rate of Return of 15.2%, in 20 years of production. Sensitivity analyzes shows that the variables that most impact the financial viability of economic indicators are the sales price of biomass and the average productivity of the crop.

Keywords: Energy cane; Biomass; Model; Economic feasibility analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do modelo.....	35
Figura 2 - Produtividade esperada no ciclo produtivo	46
Figura 3 - Análise comparativa do custo horário (R\$ h ⁻¹) das operações de preparo de solo para a validação do modelo	55
Figura 4 - Receita bruta por hectare ao longo do ciclo produtivo.....	56
Figura 5 - Representatividade dos componentes do CAPEX.....	57
Figura 6 - Representatividade dos componentes do OPEX	58
Figura 7 - Depreciação anual dos ativos imobilizados.....	60
Figura 8 - Tributação (R\$ ha ⁻¹) sobre a produção de biomassa comercializada	61
Figura 9 - (a) Fluxo de caixa simples; (b) Fluxo de caixa acumulado	62
Figura 10 - VPL em função da variação dos inputs	63
Figura 11 - VPL em função da variação dos inputs	64
Figura 12 - Custo horário de tratores (a) e implementos agrícolas (b) em função da área da propriedade	67
Figura 13 - Custo operacional por hectare em função da área da propriedade	68
Figura 14 - DAS e investimento em função da CAD do solo.....	70
Figura 15 - Produtividade potencial em função da CAD do solo	71
Figura 16 - Produtividade da cana energia para simulação dos anos de reforma	72
Figura 17 - OPEX e Receita total em função do ano de reforma.....	73
Figura 18 - Investimento e Receita total em função do ano de reforma	73
Figura 19 - VPL em função do ano de reforma	74
Figura 20 - Dados de entrada para a geração do balanço hídrico	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Característica das operações de preparo do solo e plantio no cenário-base ..	47
Tabela 2 - Característica das operações de condução da lavoura no cenário-base	47
Tabela 3 - Preço de máquinas e implementos adotados no modelo.....	49
Tabela 4 - Preço de insumos adotados no cenário-base	50
Tabela 5 - Índices técnicos adotados no cenário-base	51
Tabela 6 - Operações e época de realização de atividades de plantio de cana.....	52
Tabela 7 - Operações e época de realização de atividades do manejo da cana soca.....	53
Tabela 8 - Valores de CAPEX	57
Tabela 9 - Valores de OPEX no sistema de produção	59
Tabela 10 - Número de tratores em função das eficiências de campo e gerencial.....	65
Tabela 11 - TIR em função das eficiências de campo e gerencial	65
Tabela 12 - VPL (milhões de R\$) em função da variação da área plantada e da distância de transporte entre a área produtiva e usina de beneficiamento	66
Tabela 13 - Indicadores econômicos em função da textura do solo	71
Tabela 14 - Custo de plantio por hectare	88
Tabela 15 - Dados de entrada do cenário-base para operações de preparo de solo e plantio da cultura	89
Tabela 16 - Dados de entrada do cenário-base para operações de manejo da soca	89
Tabela 17 - Índices comerciais.....	90
Tabela 18 - Recursos humanos	90
Tabela 19 - Custo de transporte	91
Tabela 20 - Coeficiente da cultura (kc) e coeficiente de produtividade (ky) utilizados no balanço hídrico para obtenção dos dias agronomicamente secos e estimativa de produtividade	92
Tabela 21 - Capacidade de água disponível do solo (CAD) para as diferentes texturas de solo	93
Tabela 22 - Dias agronomicamente secos esperados	93

1 INTRODUÇÃO

O uso da biomassa como fonte de energia térmica foi um fator decisivo no desenvolvimento da civilização, embora sua representatividade como matriz energética em âmbito global tenha se reduzido no último século, após a adoção do petróleo e carvão mineral como insumos energéticos. O uso contínuo do petróleo e carvão trouxe como consequência um desequilíbrio das condições climáticas de todo o planeta, devido à liberação dos gases do efeito estufa (GEE). Os gases do efeito estufa absorvem parte da radiação infravermelha e dificultam o escape da mesma, impedindo que ocorra uma perda de calor para o espaço e mantendo a Terra aquecida. Embora seja um fenômeno natural e vital para a manutenção da vida terrestre, a liberação acelerada dos gases na atmosfera, decorrentes da utilização de fontes não renováveis de energia, tem potencializado o aumento da temperatura global.

Nesse contexto, as pesquisas em torno de fontes alternativas de energia renovável para a conservação dos recursos naturais são crescentes. Consequentemente, o aproveitamento da energia contida na biomassa vegetal volta a ser uma das principais alternativas como suprimento energético de modo sustentável. Na década de 1990, surgiram dois fatores capazes de alterar o interesse na produção de energia renovável: o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), do Governo Federal e o Mercado de Créditos Carbono, estabelecido pelo protocolo de Kyoto. Os dois programas trouxeram ao Brasil grandes oportunidades para incrementar e descentralizar a geração de energia elétrica, de modo estratégico, contribuindo para flexibilizar e diversificar a matriz energética.

O aproveitamento da biomassa deve ser fundamentado em dois princípios: ser utilizada em ciclos de transformação energética de alta eficiência, a fim de aproveitar ao máximo o potencial energético; e ser cultivável em áreas agrícolas marginais, onde a produção de alimentos seria pouco viável e a fonte de biomassa possa oferecer um ganho energético.

Nesse contexto, a cultura da cana-de-açúcar ganha destaque, devido à sua grande produção de biomassa e a alta difusão tecnológica no Brasil. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2014), do Ministério das Minas e Energia, a participação de fontes renováveis na matriz energética nacional foi de 41% em 2013, sendo que o balanço energético nacional de 2013 indica que os derivados da cultura da cana-de-açúcar foram responsáveis por 16,1%.

A produtividade média de cana-de-açúcar no Brasil é de 85 t ha^{-1} , sendo que para cada tonelada de cana processada são gerados cerca de 140 kg de palha e 140 kg de bagaço em base seca, ou seja, 12 toneladas de palha e 12 toneladas de bagaço. A palha de cana-de-açúcar

representa 15% do peso dos colmos da cana madura, ou 12% quando seca. Em termos energéticos a palha representa 1/3 da energia potencial da cana-de-açúcar que, atualmente, é subaproveitada.

Apesar do alto potencial de produção de biomassa, o melhoramento genético dessa cultura buscou o aumento do teor de sacarose por meio de sucessivos retrocruzamentos, dada as necessidades industriais de processamento. Com a renúncia da produção de sacarose, a planta produz maior quantidade de fibra e consequentemente uma maior quantidade de biomassa por unidade de área.

Existem hoje programas de melhoramento genético em que se prioriza a produção de fibra, que têm como resultado canas mais rústicas, menos exigentes em solos, clima, água e nutrientes e mais resistentes ao ataque de pragas e doenças, resultando em mais energia produzida pela unidade de energia gasta. A produção de híbridos da espécie *Saccharum* spp., direcionada para a produção exclusiva de biomassa, denomina-se cana energia.

Acredita-se que a cana energia possa ser cultivada em áreas marginais à produção de alimentos, devido a sua rusticidade, se tornando um elemento estratégico para a produção de energia em regiões com difícil acesso à rede nacional de energia elétrica.

Em função da alta produtividade relatada e consequentemente de geração de energia, é razoável presumir que a atividade tenha boa atratividade econômica para novos investimentos. Nesse sentido, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade econômica da produção e comercialização da biomassa de cana oriunda da cana energia. Por meio da análise de sensibilidade, serão verificadas as variáveis que mais impactam economicamente a atividade e por meio da análise de cenários, avaliar os resultados do sistema de produção sob diferentes tamanhos de áreas e texturas de solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise de viabilidade econômica pode ser considerada como o conjunto de técnicas que permitem a comparação entre resultados para uma tomada de decisões. Ela corresponde a uma importante ferramenta no auxílio à tomada de decisões quanto ao investimento, pois expõe as potencialidades e riscos do negócio quanto ao capital investido. O autor ainda cita que, para a elaboração de uma análise de viabilidade, é necessário conhecer profundamente a estrutura de custos da atividade. Conhecer o comportamento dos custos é de fundamental importância para os gestores estimarem o impacto de suas decisões nos resultados da organização. Uma série de fatores como intervalos da época de produção e as sazonalidades de demanda do mercado influenciam o comportamento dos custos associados à produção agrícola. Assim, conhecer o comportamento de todas as variáveis inerentes à produção permite o desenvolvimento de modelos de planejamento e execução de análises “custo/receita” (ZAGO et al., 2009).

Um sistema mecanizado, responsável pelos processos de implantação, condução e retirada da cultura, é estratégico para a redução dos custos. Ele pode representar um custo de produção de até 40% (MILAN, 2004). Desse modo, o adequado planejamento corresponde a uma das etapas mais importantes para a obtenção de resultados satisfatórios.

O planejamento e o dimensionamento de sistemas mecanizados são umas das etapas mais importantes dentro do processo produtivo, as quais são consideradas complexas devido aos diversos fatores que devem ser analisados para o suprimento das necessidades de uma cadeia agroindustrial (BAIO, 2004; TACHIBANA, 2000). Segundo Hunt (1977), o gerenciamento da maquinaria agrícola é a área que tem por interesse a otimização dos estágios mecanizados da produção, cujo princípio primordial de enfoque é a seleção, operação, manutenção e reposição da maquinaria. As operações que compõem os sistemas devem ser ajustadas de modo que os seus desempenhos propiciem maiores retornos aos investimentos realizados.

Segundo Milan (2004) “o planejamento de um sistema mecanizado envolve conhecimentos das áreas de biologia, engenharia e economia, o que demonstra as necessidades para a implantação, condução e retirada da cultura”. O autor mostrou que o planejamento deve considerar o dimensionamento e a seleção dos equipamentos, máquinas e implementos, bem como a análise dos custos que o sistema representará para a atividade agrícola.

2.1 Modelagem

A modelagem pode ser definida como uma técnica de representar a dinâmica de processos de um sistema, a fim de obter informações sobre esse sistema por meio de experimentações com a abordagem do modelo (Dahl, 1968).

O modelo matemático é um conjunto de equações que representam quantitativamente as hipóteses realizadas a respeito do sistema real, permitindo deduzir suas consequências, e pode ser considerado a formalização do conhecimento que se tem do sistema (PEREIRA, 1989). Dent & Blackie (1979) resumiram a modelagem como um trabalho não apenas da transformação de fórmulas aplicadas para a computação, mas antes de tudo, é uma arte que requer genialidade, visão e esforço e, acima de tudo, integridade, por parte do pesquisador. E como em outras artes, a maneira de se usar ou não a técnica em si mesma é o que determina o sucesso ou insucesso.

Naylor (1971) define a modelagem como uma técnica numérica para conduzir experimentos com certos tipos de modelos matemáticos, em que se descrevem o comportamento de um sistema complexo em ambiente computacional, por determinados períodos de tempo. Nesse conceito, o uso do computador está explicitamente incluído. Embora, em teoria, isso não seja essencial, em função da complexidade dos sistemas simulados, existe a demanda do uso de um modelo de simulação baseado em computador.

O mesmo autor apresenta que, para o planejamento de experiências de simulação da construção de um modelo, são necessárias nove etapas no processo: formulação do problema; coleta e processamento de dados reais; formulação de um modelo matemático; estimativa de parâmetros para as características operacionais, por meio de dados reais; avaliação do modelo; formulação de um programa de computador; validação; projeto de experiências de simulação e análise dos dados obtidos na simulação.

O modelo desenvolvido deve também ser verificado e validado. Bala (1977) afirma que a validação é o processo que correlaciona o modelo com o sistema real. Se o sistema real não existir, a validação do modelo é baseada em um julgamento subjetivo.

Detomini (2004) se refere a um modelo como uma ordem de grandeza a ser estimada, a qual deverá ser comparada com observações de situações reais, para que então possa ser validada para diversas simulações. Segundo Hoffman (2007), os dados experimentais gerados especialmente para a validação do modelo são os mais adequados. O fator limitante para a validação é geralmente a falta de dados completos para comparação entre dados de entradas simulados e resultados gerados.

Kleijinen (2010) define a verificação de modelos como uma forma de determinar se um programa computacional de simulação está executando conforme o planejado, e a validação

para determinar se o conceito do modelo está de acordo com a representação precisa do sistema em estudo.

2.2 Modelos de sistemas mecanizados agrícolas e avaliação dos custos

Em função da complexidade do arranjo de operações dos sistemas mecanizados agrícolas, a utilização de modelos pode simplificar o processo de seleção e auxiliar o planejamento das atividades e a tomada de decisão. A rotina computacional tem sido utilizada na elaboração de modelos para o planejamento de sistemas mecanizados em propriedades agrícolas ao longo dos anos. Segundo HUNT (1973) e Crossley (1988), devido à complexidade das condições de operação dos sistemas mecanizados agrícolas, os modelos podem auxiliar a simplificar o processo de seleção e auxiliar o planejamento das atividades e a tomada de decisão.

Nos Estados Unidos, a partir do início da década de 1970 e, principalmente, ao longo da década de 1980, os modelos de planejamento e seleção de sistemas mecanizados apresentaram um desenvolvimento elevado com o advento dos microcomputadores, o que pode ser atribuído à sua capacidade de processamento e à possibilidade de se estabelecer interações entre as variáveis envolvidas. Chancellor (1969) desenvolveu um programa computacional para a seleção de tratores e o cálculo do número de conjuntos mecanizados em diferentes tamanhos de áreas, com a consideração de aspectos econômicos. De acordo com o estudo, em pequenas propriedades, o uso de apenas um trator de potência em torno de 74 kW, diminui os custos operacionais do sistema.

Um modelo que efetua a seleção de sistemas mecanizados agrícola, incluindo tratores, implementos e máquinas autopropelidas foi desenvolvido por Hughes e Holtman (1976). O trabalho foi dividido em cinco fases: determinação do requerimento de potência do sistema; seleção de tratores; seleção de conjuntos mecanizados; análise dos custos; consideração dos custos por unidade de área trabalhada. As máquinas agrícolas foram selecionadas segundo o menor custo operacional total. Os conceitos aplicados nesse estudo foram aprimorados para a realização dessa pesquisa.

O planejamento inadequado dos equipamentos para a realização das operações incorre em maiores custos de produção (WITNEY, 1989). Nesse sentido, a modelagem computacional pode se tornar uma ferramenta essencial para garantir que não haja dispêndios desnecessários no sistema de produção.

Um modelo de aprimoramento de acurácia das estimativas de capacidade de campo e de consumo de combustível, com o desenvolvimento de uma ferramenta computacional interativo

a ser utilizado em simulações de campo, foi elaborado por Colvin et al. (1989). O modelo utiliza equações empíricas para o cálculo da força de tração e do consumo de combustível. O cálculo de tempos operacionais interage com os dados obtidos das rotinas descritas às características de área, de formato e de declividade dos talhões. Segundo os autores, a validação dos dados demonstrou elevada correlação com os resultados de dados reais armazenados em diversos anos de operação da maquinaria agrícola.

Uma modelagem de um sistema típico de produção de cana-de-açúcar, com base em seus subsistemas e suas interações foi elaborada por Milan (1992). Foi identificado os fatores críticos e as estratégias relacionadas com os equipamentos utilizados. As análises de sensibilidade realizadas em três cenários distintos mostraram que a capacidade de carga dos caminhões foram os fatores que mais influenciaram o custo da produção.

Tachibana, Milan e Mourão Filho (1999) desenvolveram um modelo empírico para avaliar o desempenho operacional e econômico de um sistema mecanizado em operações de pulverização. Os autores buscaram identificar os fatores que mais influenciaram o custo operacional, possibilitando o estabelecimento de estratégias de trabalho que visaram à redução de custos. A metodologia dos custos dos equipamentos agrícolas baseou-se em Balastreire (1987), os conceitos de capacidade de campo em Mialhe (1974) e em dados obtidos em campo.

Para identificar os fatores que contribuem para o atraso entre a colheita e a moagem de cana, Hansen et al. (2002) elaboraram um modelo computacional de planejamento do sistema de colheita e logística de transporte.

Um modelo baseado na pontualidade do sistema de produção da soja foi desenvolvido por Matos (2007). Observou-se a influência na renda líquida do processo produtivo e do dimensionamento operacional por meio de diferentes janelas de cultivo no sistema produtivo.

A fim de determinar um caminho padrão para a redução do tempo de operação para manobras de cabeceira de colheita, foi desenvolvido um modelo computacional com a simulação de três cenários básicos e diferentes plataformas de colheita (HANSEN et al., 2007).

Por meio do desenvolvimento se um software denominado PRAPAG, foi desenvolvida uma ferramenta de escolha de máquinas e equipamentos agrícolas, visando o menor custo por área, por meio do planejamento de aquisição sob a perspectiva técnico-econômico (Mercante et al., 2010). O software seleciona ao final os melhores conjuntos mecanizados, com base na análise do planejamento de produção e nos parâmetros de desempenho operacional das máquinas.

Para determinar a força e a potência requerida na seleção de máquinas e implementos para a execução de operações agrícola, Klaver et al. (2011), desenvolveram um programa que

permite executar tarefas de cálculo de demanda de potência de máquinas de diversas operações agrícolas de forma simplificada.

Santos (2011) elaborou através de uma planilha eletrônica e em linguagem de programação Visual Basic, um modelo para analisar o desempenho operacional e econômico do processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. O autor observou que a variável que possui maior impacto no sistema de colheita é a eficiência de campo. Destacou-se também que são necessários estudos com relação ao cálculo de perdas de cana em função da velocidade e modelos para predição de consumo em função da produtividade da cultura.

Por meio de uma planilha eletrônica, Oliveira (2012), elaborou um modelo para avaliação do desempenho operacional e econômico do sistema de plantio mecanizado de cana-de-açúcar, que se baseou no ciclo operacional entre o transporte de mudas e o plantio no talhão. Os resultados indicaram que a capacidade de carga da plantadora corresponde ao item de maior impacto no custo operacional do plantio. A autora destaca que de acordo com as condições iniciais do sistema define a área máxima que um conjunto de plantio pode atender. Essa área influencia no número de horas de trabalho e custo operacional.

2.3 Energia de biomassa

Devido a extrema dependência da sociedade moderna em relação ao petróleo como a principal fonte de energia, associado ao aumento do preço do barril de petróleo no mercado internacional, tem-se criado inúmeros programas de pesquisas buscando novas fontes alternativas de energia, principalmente as renováveis (Faccenda & Souza, 1998). Segundo os autores, até a metade da década de 1990, o mundo apresentou uma situação bastante crítica no que se refere à disponibilidade de energia elétrica. A crescente demanda, com as respectivas consequências, aponta para um futuro incerto a todos os povos. Ainda, existem estatísticas preocupantes sobre a oferta e a demanda de energia elétrica no Brasil (SARRIÉS, 1997). Para contornar esse problema, uma alternativa é a cogeração de energia elétrica a partir de resíduos de processos agroindustriais.

O processo de cogeração, segundo Coelho (2001), corresponde à geração de energia térmica e mecânica, a partir de uma fonte primária de energia. A energia mecânica pode ser utilizada na forma de trabalho, como o acionamento das moendas numa usina de açúcar e álcool ou transformada em energia elétrica por meio de geradores de eletricidade. Segundo o autor, o combustível utilizado no processo de cogeração pode ser petróleo, gás natural, carvão ou biomassa. Lanças (1984) discorreu sobre a evolução da utilização das alternativas energéticas,

citando vantagens da utilização de biomassa em larga escala: recursos abundantes, renováveis e disponíveis em diversas formas e grande variedade de uso; produção descentralizada; redução da poluição ambiental em relação aos combustíveis fósseis.

A biomassa pode-se constituir a base de um modelo de desenvolvimento tecnológico e industrial autossustentado, segundo Brito (1986). O autor afirma que o componente energético é quem molda e sustenta civilizações, concluindo que existe um amplo potencial para uma participação efetiva dos combustíveis a partir da biomassa no Brasil.

Perrone (1977) comentou que a necessidade de buscar fontes de energia em alternativa aos combustíveis fósseis seria uma tendência mundial, uma vez que essas são finitas, enquanto que a biomassa vegetal depende da fixação da energia solar via processo fotossintético.

No Brasil, a fonte que tem se destacado é a biomassa de cana-de-açúcar como fonte de energia. De acordo com Dias et al. (2009), além do destaque na produção crescente de etanol, os subprodutos palha e bagaço da cana, possuem elevados teores de materiais lignocelulósicos, fazendo com que se tornem matérias-primas capazes de produzir energia. Gomazako e Oliveira (2007) afirmam que atualmente parte do resíduo é utilizada para a geração de energia térmica e elétrica em usinas de cogeração sucroenergética, assim, essas indústrias possuem autossuficiência energética, sendo que algumas produzem excedentes de eletricidade para serem vendidas às concessionárias de energia elétrica.

De acordo com os dados da ANEEL (2014), estão em operação no Brasil 475 usinas termelétricas a partir de biomassa, fornecendo uma capacidade instalada de 11.407 MW. Destas, 97 unidades não operam com o bagaço de cana como principal matéria-prima.

2.4 Bioetanol

O bioetanol, conhecido como etanol de segunda geração, corresponde a uma molécula similar ao etanol de primeira geração. A principal diferença está na utilização da biomassa lignocelulósica como matéria-prima. Por se tratar de um resíduo abundante e barato, o aproveitamento dessa energia tem se mostrado promissor (PANDEY; SOCCOL; SOCCOL, 2000).

Embora o tema seja bastante antigo, sendo a primeira publicação datada em 1819, especialistas acreditam que as biorrefinarias possam vir a constituir uma indústria-chave do século XXI, em função da importância das tecnologias que empregam e dos efeitos sobre o paradigma industrial. Essas tecnologias são baseadas na utilização de toda a planta (todo o complexo de biomassa) e na integração de processos tradicionais e modernos (KAMM et al.,

2005). No entanto, enquanto a conversão dos carboidratos, açúcar e amido em etanol é relativamente simples, a conversão da biomassa é muito mais complexa e requer pré-tratamento. A produção de etanol com base na biomassa lignocelulósica utiliza processos químicos (ácidos) ou da biotecnologia moderna (enzimas) para a quebra de moléculas de celulose e produção de açúcares, para então produzir o etanol por meio de processos fermentativos alcoólicos da biotecnologia convencional. As inovações mais radicais na produção de etanol com base nos materiais lignocelulósicos envolvem modificações genéticas de microrganismos que produzem enzimas que digerem a celulose e a hemicelulose encontradas na parede celular da planta, bem como variedades transgênicas de plantas mais produtivas (ESTADOS UNIDOS, 2006). Tais processos demandam modificações para se tornarem economicamente viáveis e competitivos em preços com os derivados do petróleo (BRASIL, 2007).

O domínio da tecnologia para utilização em grande escala a um custo competitivo corresponde a um dos maiores desafios dos próximos anos. Os países que conseguirem desenvolver tecnologias alternativas à economia do petróleo deverão ter posição de liderança global (CHEMICAL ENGINEERING, 2006). Quando chegarem ao mercado, serão capazes de revolucionar os processos produtivos existentes ao usarem matérias-primas com disponibilidade quase ilimitada e quase sem valor, definindo um eventual novo paradigma tecnológico e a abertura de um leque de trajetórias tecnológicas para produção de energia, combustíveis e produtos químicos (BRASIL, 2007).

De fato, é a necessidade de ampliação da oferta de matérias-primas para produção de etanol, sem pressionar a área plantada para produção de alimentos, que tem levado empresas e países a investirem em pesquisas para maior utilização de resíduos lignocelulósicos. Os materiais lignocelulósicos são os compostos orgânicos mais abundantes na biosfera e participam com aproximadamente 50% da biomassa terrestre. No caso brasileiro, as vantagens da produção de etanol lignocelulósico são decorrentes de importantes avanços tecnológicos pelos quais passou a cultura da cana ao longo de sua história recente, pela sua alta produtividade e geração de resíduos, entre os quais o bagaço e a palha de cana (CGEE, 2005).

2.5 Cana energia

2.5.1 Histórico do desenvolvimento da cultura

As plantas do gênero *Saccharum*, correspondem a uma das espécies vegetais mais versáteis, dentre as culturas manejadas pelo homem, pois além de possibilitar uma gama de formas e produtos para sua utilização, ainda adapta-se bem em diversas condições edafoclimáticas, seja pela sua adaptação natural ou através da manipulação em programas de melhoramento genético.

O cultivo dessa planta de origem milenar tem contribuído de forma imprescindível para o desenvolvimento social e econômico brasileiro, principalmente pelo fato da geração de energia renovável de modo eficiente e as possibilidades de alteração na composição da matriz energética e a produção de bioenergia.

Existem cinco fases principais na história de melhoramento da cana (MING et al., 2006). A primeira é relacionada ao cruzamento e seleção de clones da cana nobre para obter as cultivares nobres. Na segunda fase ocorreram hibridações interespecíficas entre as canas *Saccharum officinarum* L. e a espécie selvagem *S. spontaneum*, seguido de sucessivos retrocruzamentos com *S. Officinarum*, procedimento que ficou conhecido como nobilização, neste processo o objetivo principal era obter novas cultivares que possuíssem o potencial de produção de açúcar das canas nobres e a robustez, vigor e resistência a doenças de *S. spontaneum*. A terceira fase consistiu no cruzamento das canas nobilizadas. As cultivares utilizadas nas usinas foram desenvolvidas na quarta fase, quando houve o cruzamento dos híbridos obtidos na fase anterior e na nobilização. Nesse período, de acordo com Arceneaux (1965), Roach, (1989) e Jackson (2005), houve um forte efeito de gargalo no desenvolvimento das canas modernas, pois elas são derivadas essencialmente de poucos genótipos parentais. Conscientes desse problema, os melhoristas deram início por volta de 1960 à quinta fase do melhoramento, caracterizada pelo uso de germoplasma selvagem nos programas de melhoramento, na tentativa de ampliar a base genética estreita das cultivares até então desenvolvidas. Portanto, as cultivares modernas de cana-de-açúcar, denominadas coletivamente *Saccharum spp.*, são híbridos interespecíficos obtidos pelo cruzamento entre as espécies selvagens, *S. robustum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. edule*, *S. offinarum* e *S. spontaneum*, principalmente entre as duas últimas, de tal forma que as variedades modernas possuem aproximadamente 80% das características e cromossomos derivados de *S. officinarum*, 10-15% de *S. spontaneum* e o restante 5- 10% são cromossomos recombinantes (D'HONT et al., 1996).

Observa-se que durante todas as fases do melhoramento genético, buscou-se implacavelmente o aumento dos teores de sacarose nas variedades.

O conceito de cana energia surge em um contexto em que se inicia uma busca por alternativas de fontes energéticas renováveis, direcionadas para a produção exclusiva de biomassa.

Segundo Matsuoka et. al. (2012), devido à grande variabilidade de espécies, a mudança de perfil nas cultivares de cana seria possível através de retrocruzamentos dos híbridos atuais com ancestrais selvagens de *S. spontaneum*, para que a condição de alto conteúdo de fibras fosse introgridido nas populações melhoradas, que levam ao aumento da produtividade por área, maior rusticidade e adaptabilidade em áreas agrícolas marginais.

Alexander (1985) demonstrou que com uma renúncia de 25 a 35% na sacarose, se teria aumento no total de biomassa de mais de 100%, se a colheita fosse de cana integral. Em outro resultado Samuels et al. (1984) demonstraram que embora a produção de sólidos solúveis (Brix) fosse 37% menor, a produção de massa seca (Brix + fibra) era 13% maior devido à maior produção de fibra, resultando em produtividade final de massa seca por hectare 20% maior.

Existem atualmente sete programas de melhoramento genético da espécie *Saccharum spp.* ativos (VIOLANTE, 2012). Esses programas são conduzidos por instituições públicas e privadas, sendo IAC, RIDESA e CTC os representantes públicos e Syngenta, Vignis, GranBio, instituições privadas. Ambos, Vignis e GranBio, conduzem programas de melhoramento genético específicos para a cana energia.

Durante a década de 1970 Alexander (1985) percebeu que a análise de acumulação de açúcar para avaliação da qualidade da planta não era o principal atributo daquela espécie. Segundo Alexander (1985), a cana é uma planta inigualável frente a qualquer outra planta, quando gerenciados como produtor de biomassa. Com esse conceito, um grupo formado por Alexander arrecadou verbas federais para um programa multidisciplinar de cinco anos para gerir a cana como cultura da biomassa. O procedimento foi cunhado com a expressão “energy cane management”, ou gestão da cana energia (Alexander et al., 1984). Com o conceito de cana energia, o autor tentou modificar o conceito de sistema de gestão, reorientando para uma nova meta de produção máxima de biomassa total e utilização industrial, orientando o uso da cana para biomassa, em vez do sistema de gestão tradicional exclusivamente para o açúcar (Matsuoka et al., 2014). Ele ressaltou que “cana energia” foi a definição de um sistema de gestão e não uma denominação de um tipo específico de planta.

No Brasil, Matsuoka e Arizono (1984) utilizaram clones descartados por programas de melhoramento devido ao baixo teor de açúcar e, consequentemente, com maior produção de biomassa e energia, sob o conceito cana energia. Nesse momento, o termo “cana energia” foi denominado em um sentido de distinção botânica, isto é, para designar um novo tipo de planta.

No entanto, mesmo que as plantas tivessem uma conformação e a composição um pouco distinta, eles ainda poderiam ser processados por moinhos convencionais para produção de açúcar, mas com o componente adicional de energia, como um coproduto.

Nas décadas seguintes, a biomassa adquiriu maior importância como fonte de energia renovável. Nesse contexto, o termo cana energia foi adotado e divulgado como uma designação para este novo tipo de planta (Leal, 2007; Rein, 2007 e Botha, 2009), que visa a produção de fibra ou biomassa total e que pode ser usado como matéria-prima para qualquer tipo de indústria, em vez de apenas usinas de açúcar e etanol. A partir da cana energia, pode-se obter uma grande quantidade de produtos de valor acrescentado, tal como sugerido por Alexander (1988) em sua proposta para remodelar a fraca indústria de cana porto-riquenha, com a adoção do conceito cana energia. O grupo de Alexander sempre destacou a possibilidade de utilização de toda a planta, tanto o suco e as fibras e também a parte superior e as folhas, de cultivares mais produtivas, incluindo a produção de etanol (Alexander, 1985 apud Matsuoka, 2014).

2.5.2 Característica da cana energia

Existem diversas características favoráveis ao cultivo e utilização da cana energia como forma alternativa de biomassa (MATSUOKA et al., 2012). Dentre eles destaca-se a importância de ser uma energia renovável, a redução da emissão de gases do efeito estufa; a elevada capacidade de conversão do carbono atmosférico em carbono orgânico na formação de biomassa; corresponde a uma alternativa de diversificação na matriz energética e redução do consumo de petróleo; possui alta densidade de energia; por serem plantas rústicas e resistentes às condições de estresse, além de poderem ser cultivadas em áreas agrícolas marginais; a utilização no controle de erosão devido sua grande densidade de raiz; possui técnicas de produção apuradas; a colheita pode ser realizada durante um longo período do ano e seu produto pode ser armazenado para prolongamento do uso; e por último, possibilidade de se obter formas estéreis, não produtora de sementes, garantindo que a multiplicação seja apenas vegetativa.

GIAMALVA (1984) e ALEXANDER (1985) afirmaram em suas pesquisas que, em função do maior vigor das socas, se a cana for colhida anualmente a produtividade aumenta ou se mantém estável nas socas por pelo menos 6 a 8 anos. A produtividade, segundo os mesmos autores, pode ultrapassar 60 toneladas de matéria-seca por hectare por ano.

Violante (2012), em seu estudo, identificou entre os híbridos de cana energia, materiais com produção de biomassa na proporção de 1,5 vez mais massa seca na fase de soqueira,

quando comparados à cana-de-açúcar tradicional e às outras fontes de biomassa como o capim-elefante e o eucalipto.

Para ser completamente aceita e prontamente adotado como fonte de biomassa, o uso e a tecnologia de transformação em formas úteis da matéria-prima não deve exigir processos complicados ou caros.

A biomassa também deve ter alta densidade energética, pois isso impacta em vários outros fatores, como o menor custo final de uma unidade de energia; assim, é necessária uma elevada produtividade de matéria seca por área (Matsuoka et al., 2014). A cana-de-açúcar desempenha adequadamente essas duas características.

Para ser uma fonte de energia alternativa econômica em um longo prazo, a matéria-prima deve estar disponível durante todo o ano. Um dos pontos fracos de culturas anuais é a sazonalidade e disponibilidade de curta duração. Mesmo a cana tradicional tem um cronograma de colheita ditada pelo acúmulo de amadurecimento e açúcar, o que não é o caso da cana energia. Como a característica principal está no teor de fibra, o conteúdo não varia no decorrer do ano, como acontece com o açúcar (Knoll et al., 2013). A biomassa acumula com o tempo e, por isso, ela é armazenada no campo.

Matsuoka et al. (2014), afirmam que um custo favorável de produção e de entrega é obviamente um fator primordial para qualquer matéria-prima, que é influenciada por um sistema de produção agrônômica bem estabelecida, desde o plantio até a colheita e entrega. Muitas opções de culturas de biomassa potenciais ainda exigem muito do desenvolvimento tecnológico, desde a criação até o uso final, incluindo as tecnologias de produção e de colheita. O preparo do solo, plantio, manejo, colheita e transporte de canas são todos bem estabelecidos e com alto desenvolvimento tecnológico.

Defende-se que as culturas energéticas devem ser cultivadas em terras consideradas marginais para a produção de alimentos de forma a não competir com a produção de alimentos. Esta é uma posição razoável e compreensível, embora se deva ter em conta que a quantidade e custo final dos alimentos são determinados por uma complexidade de fatores. Por ser uma cultura mais resistente ao estresse, a cana energia é passível de ser plantada em solos que não são eficientes para as culturas alimentares. Além disso, devido à sua alta produtividade em comparação com cana convencional, requer aproximadamente duas vezes menos terra para o mesmo rendimento final de massa seca. Quanto à questão da sustentabilidade e contribuição efetiva para a mitigação de gases de efeito estufa, as plantas perenes, como cana energia possui um desempenho muito melhor do que os anuais (Duval et al., 2013; Kell, 2011; Glover et al., 2007; Glover et al., 2010).

De acordo com Johnson et. al. (2007), a cana energia pode ser cultivada em áreas de solo e clima desfavoráveis à produção de alimentos, requerendo menores doses de defensivos agrícolas, e por produzir um maior número de colmos, em relação à cana tradicional, pode proporcionar um maior número de mudas por área. Ainda, segundo os mesmos autores, devido ao vigoroso e abundante sistema radicular, a cultura apresenta características ideais para um eficiente controle de erosão e recuperação de áreas degradadas, caso o planejamento do cultivo seja realizado levando em consideração outros fatores como a localização das estradas, o cultivo em nível e a declividade do terreno.

Macedo e Seabra (2008), afirmam que a cana tem um saldo positivo de GEE de 8-10, sendo assim, pode-se especular que a cana energia terá, pelo menos 20:1 de balanço de energia. Matsuoka et al. (2014) afirma que esse valor e todos os outros relatados na literatura, provavelmente, são subestimados. Estudos para determinar a fixação de C pelo sistema radicular da cana energia, ainda são escassos, assim como os benefícios de GEE acrescentado decorrente da menor perturbação do solo para o replantio, em consequência dos longos ciclos de utilização da soqueira (Matsuoka e Stolf, 2012; Duval et al., 2013).

De acordo com Matsuoka (2012), dados de clones que se destacaram entre centenas de clones F1 de um cruzamento entre um híbrido comercial e *S. spontaneum* mostraram que o número de colmos por metro linear variou de 35 a 40, os teores de fibra variaram de 15,35% a 19,90%, contra 12,05% da variedade comercial, a produtividade de colmos de 155 a 236 t, contra 148 t da variedade comercial e a produtividade de fibra de 30,63 a 40,25 t (equivalente a 60 TMSH, 100% acima das variedades comerciais de cana-de-açúcar).

Desse modo, a cana energia preenche todos os requisitos para uma fonte de bioenergia renovável. Em conclusão, em condições tropicais e subtropicais tem uma produtividade sem paralelo, sendo capaz de produzir mais de 250 t ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria verde total, em condições de sequeiro, ou mais de 60 t ha⁻¹ ano⁻¹ em base de matéria seca (Alexander, 1985; Bischoff et al., 2008).

2.6 Viabilidade técnica

A cana energia (*Saccharum spp.* hybrids) é uma das espécies vegetais mais produtivas conhecidas, uma vez que potencialmente pode produzir de 41 (Cheeroo-Nayamuth et al., 2000) a aproximadamente 65 toneladas de massa seca por hectare por ano (Bakker, 1999). A duração do crescimento da cultura pode variar de 9 meses a 36 meses (Evensen et al., 1997).

Acredita-se que a cana energia possui maior vigor do que cana-de-açúcar comum, pois a cana energia contém uma porcentagem maior de alelos de *S. spontaneum* relação ao *S. officinarum*. Bischoff et. al. (2008) e Giamalva et. al. (1984) comentam que os melhoristas têm frequentemente utilizado clones de *S. spontaneum* como fonte de genes para resistência a doenças, aumento do número de cortes e da resistência. Progenie de germoplasma de espécies nativas, como *S. spontaneum* exibiram altos níveis de vigor, sendo teoricamente mais tolerante ao frio, possui maior número de cortes; aumento do nível de tolerância à umidade extrema, insetos e doenças e utilização de nutrientes mais eficientes (GIAMALVA, 1984) e (BRANSBY, 2010).

Legendre e Gravois (2007) encontraram uma produtividade de 70 t ha⁻¹ em uma avaliação realizada na USDA-ARS Sugarcane Research Unit, em Houma, LA (Bischoff et al., 2008). Giamalva et al. (1984) relataram uma produtividade de massa seca de 21 t ha⁻¹, após a quinta soqueira.

Brown (2012), utilizando dados de produtividade e teor de fibras de cinco variedades de cana energia, juntamente com os dados mais atuais de custo de produção de cana-de-açúcar, sugere um custo de produção bem competitivo, frente às outras fontes de biomassa. O custo variável de produção, considerando somente as atividades agrícolas foi de 11 a 16 dólares por tonelada de matéria úmida.

Uma análise de viabilidade econômica de produção de cana energia utilizando, com certas considerações, dados de produção de cana-de-açúcar foi desenvolvida por Mark, Darby e Salassi (2009). No trabalho, os autores estimaram o preço de equilíbrio que os produtores devem receber, a fim de cobrir o custo de produção da cana energia.

Nunes (2010) e Salassi (2012) desenvolveram modelos para determinar o comprimento do ciclo economicamente adequado de variedades de cana energia. Tal modelo poderia ser revisado para aprimorar a produção de cana energia com rendimentos mais elevados e mais anos de colheita entre os plantios. Os autores indicaram que a localização das instalações de processamento é uma questão importante, se relacionada à produção de novas culturas de matérias-primas.

2.6.1 Critérios de avaliação econômica

A Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VPL) são os critérios mais apropriados para a análise, pois consideram o valor do dinheiro no tempo. Para a avaliação econômica de uma atividade, um esforço temporário empreendido para criar um produto,

serviço ou resultado exclusivo, e o gerenciamento do mesmo são executados em um ambiente interno, que corresponde ao projeto de investimento, e externo, correspondente ao ambiente macroeconômico, associados aos fatores sociais e políticos passíveis de mudanças em um curto intervalo temporal. Dessa forma, para adequado gerenciamento e análise da viabilidade é fundamental a definição do horizonte temporal do projeto, ou seu ciclo de vida, que consiste em fases sequenciais, eventualmente sobrepostas, pois possibilitam o estabelecimento de uma sequência capaz de gerar um empreendimento viável, resultado final e bom gerenciamento; e oferece uma sequência de pontos de decisão de planejamento e sincronização das diferentes áreas envolvidas no projeto. Além disso, a determinação do horizonte temporal é de extrema importância para a análise econômica, uma vez que os índices de atratividade do projeto são calculados em período de tempo pré-determinado (Contador, 2008).

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) é uma taxa de juros que representa o mínimo que o investidor se propõe a ganhar quando faz o investimento, ou o máximo que se propõe a pagar no caso de um financiamento, formada por três componentes básicas: Custo de Oportunidade: remuneração obtida em alternativas que não as analisadas; Risco do Negócio: o ganho tem que remunerar o risco inerente de uma nova ação. Quanto maior o risco, maior a remuneração esperada; Liquidez: capacidade ou velocidade em que um ativo pode ser convertido em caixa.

2.6.1.1 Critérios de decisão

Os critérios de seleção de projetos, utilizando-se dos indicadores apresentados na seção anterior foram definidos por diversos autores (NORONHA, 1987; CONTADOR, 1988 E ROSS, 2007).

Como indicador de atratividade de projetos, o VPL é utilizado da seguinte forma:

- Se $VPL > 0$. A rentabilidade do investimento é maior do que a taxa mínima de atratividade, indicando decisão favorável à realização do empreendimento. Nesse caso, o projeto cobrirá tanto o investimento inicial, bem como a remuneração mínima exigida pelo investidor, gerando ainda um excedente financeiro. É, portanto, gerando mais recursos do que a melhor alternativa ao investimento (taxa mínima de atratividade), para um nível de risco equivalente, uma vez que a TMA reflete o custo de oportunidade de capital. Corresponde a um projeto economicamente viável.

- Se $VPL < 0$. A rentabilidade do investimento é menor do que a taxa mínima de atratividade, ou seja, o projeto é economicamente inviável;
- Se $VPL = 0$. Ponto de indiferença; significa que a rentabilidade do investimento é igual à taxa mínima de atratividade, dada a incerteza associada à estimativa dos *cash flows* que suportam a análise, pode se considerar elevada probabilidade do projeto se revelar inviável.

A TIR como critério de avaliação econômica de projetos é utilizada da seguinte forma:

- Se $TIR \geq TMA$, significa que o projeto é economicamente atrativo;
- Se $TIR < TMA$, significa que o projeto não é economicamente atrativo.

Ichihara (2003) frisa que os indicadores de atratividade devem sempre ser analisados de forma conjunta para comparação de diferentes projetos de investimento. O presente estudo visa somente a obtenção de indicadores econômicos para subsidiar a viabilidade econômica da produção agrícola de biomassa da cana energia, sem levar em consideração os indicadores sociais e ambientais.

2.7 Considerações

Segundo Xavier (2007), entre todas as culturas dedicadas à bioenergia analisadas até o início do século XXI, a cana energia corresponde a que possui o maior potencial produtivo por unidade de área. Se comparado à cana-de-açúcar tradicional, cultura comprovadamente mais eficiente em termos energéticos, a cana energia chega a produzir de duas a três vezes mais. Em decorrência da sua alta produtividade, infere-se que a cana energia corresponda a uma cultura sustentável nos três sentidos amplos: econômica, social e ambiental.

A cana energia possui um grande potencial para sua utilização, principalmente em países tropicais como o Brasil. Em função da sua semelhança com a cana tradicional em questões de gestão do campo e utilização nas indústrias, é possível que o seu cultivo e exploração venha aumentar rapidamente em um futuro próximo (Matsuoka et al., 2014).

Ao considerar, em um futuro próximo, um domínio das técnicas de produção de etanol de segunda geração, a cana energia mostra-se ainda mais estratégico e promissor como uma das principais alternativas energéticas renováveis em ambientes tropicais (Knoll et al., 2013; Duval et al., 2013; Sims et al., 2010). Além do etanol, a partir da cana energia podem ser extraídos os seguintes produtos: querosene de aviação, biobutanol, biodiesel, biogás, metanol, gás de

síntese, e outros (Rein, 2007). Nesse meio tempo, o bagaço pode ser estocado como matéria-prima para ser utilizado em caldeiras industriais e de usinas termelétricas e também como briquetes ou pellets em aquecedores para pequenas indústrias e residências.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este item tem como propósito apresentar a metodologia utilizada para atender ao objetivo de avaliar a viabilidade econômica da produção e comercialização da biomassa de cana. Nele, os métodos de cálculo para a elaboração da modelagem, para posteriormente validar os números e analisar cenários, serão descritos. Em função da influência das características da cultura no planejamento do sistema de produção, desenvolveu-se um modelo que permite avaliar todas as variáveis e suas inter-relações. A modelagem é uma representação simplificada da realidade, na tentativa de explicar e entender um processo ou conceito de grande complexidade.

O item foi dividido em 2 etapas. A etapa 1 apresenta um referencial analítico sobre análises de viabilidade econômica de projetos, em que são definidas as equações utilizadas para o desenvolvimento e validação do modelo e para o cálculo dos indicadores financeiros. Por sua vez, a etapa 2 tem como objetivo delimitar as premissas básicas e aplicação do modelo no dimensionamento de sistemas mecanizados.

A fim de demonstrar a influência dos itens que compõe o sistema de produção, serão realizadas análises de sensibilidade dos componentes de fluxo de caixa e dos resultados. As principais variáveis de entrada serão alteradas ao ponto máximo que inviabilizam a produção e através da análise de cenários, serão avaliados os efeitos das variações da área de cultivo, tipo de solo e ano de reforma sobre os indicadores de viabilidade econômica.

3.4 Etapa 1. Desenvolvimento do modelo

O modelo foi desenvolvido por meio do levantamento de dados, indicadores de eficiência, preços e custos dos itens que compõe o sistema de produção de cana energia, por meio de entrevistas com revendas, casas agropecuárias e uma empresa que atua no setor de produção e venda de biomassa de cana energia e estudos bibliográficos. Todos os valores foram plotados em planilha eletrônica para análise do comportamento das variáveis e, posteriormente, realizar a análise de viabilidade econômica.

A estruturação das entradas (receitas) e saídas (depreciações, tributos, financiamentos e custos) intrínsecos dos processos são os principais itens que definem um fluxo de caixa. O algoritmo utilizado para a elaboração do modelo pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do modelo

O algoritmo inicia-se por meio da entrada de dados (1)¹, que são referentes às receitas da atividade (2). A receita é decorrente da produção (3), que por sua vez é resultado da área colhida (4) pela produtividade da cultura (5) e pelo preço de venda no período da colheita (6).

O fluxo de saída (7) são todos os dispêndios decorrentes para o desenvolvimento da atividade e foram divididos em dois grupos: custo/despesa (8) e investimento (20).

O custo/despesa corresponde aos sacrifícios monetários incorridos para produzir a cana, como insumos (9), mão-de-obra (10), depreciação/amortização (11), pagamento de impostos (12) e custos das operações mecanizadas (13). As operações mecanizadas possuem custos fixos e variáveis (14), que é resultado da interação entre a capacidade de trabalho (15) do conjunto mecanizado, pela quantidade de trabalho (16) que pode ser realizada pela máquina na unidade de tempo (18) levando-se em conta a eficiência (19). A quantidade de trabalho e o tempo para realizar a operação têm estreita ligação com a potência disponível e requerida (17).

O investimento (20) é a aplicação de capital em meios de produção, visando ao aumento da capacidade produtiva como as máquinas e implementos agrícolas (21), benfeitorias (27), equipamentos industriais (28) e operações e insumos para a implantação da cultura (29). A definição do número de conjuntos mecanizados (22) é resultado do planejamento operacional, que se inicia pelo levantamento das operações a executar (26) e a definição da época prevista para a realização das mesmas (25), prazo inicial e o final. Calcula-se o tempo disponível (24) e o ritmo operacional (23). Com o ritmo operacional associado com a capacidade de trabalho do conjunto mecanizado (15) estima-se o número de conjuntos (22).

O fluxo de caixa (30) corresponde à interação entre os valores de entrada e saída. Após estabelecer o horizonte temporal de análise, os indicadores de atratividade financeira valor presente líquido (31) e taxa interna de retorno (32) são obtidos.

3.4.1 Fluxo de entrada (1)

O fluxo de entrada se refere à receita bruta (2), RB, que compreende o valor bruto obtido com a venda do produto principal. A receita bruta é determinada por meio da produção obtida (3) e do valor de venda do produto (6). Destaca-se que a produção é decorrente da área colhida (4) e da produtividade (5) da biomassa, considerando-se a influência do ano de corte, uma vez que o rendimento varia conforme o número de cortes, eq. (1).

¹ Os números entre parêntesis referem-se aos números da Figura 1.

$$RB = A_i \times Pd_i \times Pb \quad (1)$$

Em que,

RB = receita bruta no período i (R\$);

Ai = área colhida no período i (ha);

Pdi = produtividade da biomassa na área i (t ha⁻¹);

Pb = preço da biomassa (R\$ t⁻¹).

3.4.2 Fluxo de saída (7)

O fluxo de saída se refere aos custos envolvidos com os insumos agrícolas e do processamento industrial, a mão-de-obra, os custos do sistema mecanizado e os investimentos em máquinas e equipamentos, benfeitorias e implantação da cultura.

3.4.2.1 Custo/despesa (8)

Os custos operacionais equivalem ao total de recursos demandados para executar as atividades no processo de produção da empresa durante um período (BUARQUE, 1991). São os custos contínuos associados à manutenção e ao aperfeiçoamento dos ativos físicos do empreendimento

Os custos operacionais do sistema de produção agrícola de cana podem ser fixos ou variáveis e foram divididas em três:

- Insumos (9): são os itens necessários para a continuidade da atividade e para propiciar boas condições para o desenvolvimento da planta.

Os insumos utilizados no processo produtivo, como fertilizantes, inseticidas, herbicidas, fungicidas e sementes, e seu custo total serão obtidos com base nos valores médios praticados no mercado nacional e na dosagem utilizada nas operações agrícolas. O somatório dos custos dos insumos por área fornece o seu custo total previsto.

- Mão-de-obra operacional e administrativa (10): envolve todos os recursos humanos necessários para o desenvolvimento da atividade como tratoristas, ajudantes, engenheiros agrônomos e a equipe administrativa.

A mão-de-obra representa uma grande parcela do custo operacional de sistemas agrícolas. Serão levantados o número e os postos hierárquicos e alocados os custos, conforme o salário vigente, encargos e benefícios, de toda a mão-de-obra necessária para operacionalizar a cadeia de produção, tanto de cargos operacionais como administrativos.

- Depreciação contábil e amortização (11). A depreciação é definida como o custo ou despesa decorrente do desgaste ou da obsolescência dos ativos imobilizados como as máquinas e equipamentos agrícolas ao longo do horizonte temporal do projeto. A amortização consiste na alocação sistemática do valor amortizável de ativo intangível como o plantio de cana, ao longo da sua vida útil, ou seja, o reconhecimento da perda do valor do ativo ao longo do tempo. Esses recursos relativos à depreciação são considerados como um fundo de reserva contábil para a substituição dos investimentos, quando o mesmo perder sua utilidade econômica.

Para o presente estudo o método de depreciação utilizado foi o linear, segundo Noronha (1987), conforme equação 6.

$$D = \frac{Vi - Vf}{Vu} \quad (2)$$

Em que:

D = depreciação anual (R\$ ano⁻¹);

Vi = valor inicial do ativo (R\$);

Vf = valor final do ativo (R\$);

Vu = vida útil do ativo (anos).

- Impostos (12). Corresponde aos encargos financeiros sobre o contribuinte por um estado a partir da ocorrência de um fator gerador. Foram incluídos na modelagem os principais impostos que irão incidir sobre os resultados do projeto, conforme obrigações previstas na legislação brasileira, assim como os benefícios existentes de acordo com a natureza do empreendimento. Foram consideradas as contribuições de PIS/COFINS e ICMS Interestadual nos valores de 1,65%, 7,60% e 12% sobre o valor da receita, respectivamente, e ainda, 25% de imposto de renda e 9% de contribuição social sobre o lucro líquido (CSLL).

- Operações mecanizadas: correspondem às operações de campo para a implantação, condução e colheita da cultura: preparo de solo, plantio, tratos culturais e colheita.

Os custos com máquinas e equipamentos, mão-de-obra, insumos e despesas administrativas envolvidas na implantação da cultura (preparo do solo, sulcação, adubação e plantio) são considerados como investimento.

3.4.2.2 Custos associados ao sistema mecanizado

Os custos dos sistemas mecanizados serão calculados relacionando-se o desempenho operacional e econômico de acordo com a metodologia proposta por Mialhe (1974) e Molin e Milan (2002). O cálculo do custo operacional relaciona o custo horário do equipamento com a capacidade de trabalho, conforme a equação 3:

$$COp = \frac{CHT}{CCO} \quad (3)$$

Em que,

COp = custo operacional (R\$ ha⁻¹);

CHT = custo horário total dos equipamentos que compõe sistema mecanizado (R\$ h⁻¹);

CCO = capacidade de campo operacional (ha h⁻¹)

Para o conhecimento do desempenho econômico do sistema mecanizado é necessário calcular os custos fixos e variáveis.

Os componentes dos custos fixos independem do uso das máquinas e envolvem as obrigações sociais, seguro, juros financeiros sobre capital investido, depreciação de máquinas e abrigo. Para o cálculo do custo fixo, utilizou-se a metodologia de ASABE (2011), em que para o cálculo e são necessários o preço inicial, o valor final e a vida útil do equipamento, além da taxa, em decimal, de alojamento, seguros e juros aplicados ao capital.

$$CFh = Vi \times \frac{\left[(1-Vf) + \left[\left(\frac{1+Vf}{2} \right) x i \right] + AST \right]}{\left(\frac{Vuh}{Vua} \right)} \quad (4)$$

Em que,

CFh = custo fixo anual (R\$ h⁻¹);

Vi = valor inicial do sistema mecanizado (R\$);

Vf = valor final do sistema mecanizado, em decimal;

i = taxa de juros, em decimal;

AST = alojamento, seguros e taxas, em decimal;

Vuh = vida útil dos equipamentos que compõe o sistema mecanizado, em horas (h);

Vua = vida útil do sistema mecanizado, em anos.

O custo variável é calculado levando-se em conta o gasto com combustível e aqueles referentes aos reparos e manutenção. Os custos variáveis podem ser influenciados pelo local de trabalho, habilidade do operador, manutenção e regulagem da máquina.

O fator de reparo e manutenção é referente às peças e a mão-de-obra para execução dos reparos e manutenção. Para o cálculo, a ASAE (2003) propõe uma porcentagem em relação ao valor inicial da máquina, que será desembolsado ao longo da vida útil.

3.4.2.3 Número de conjuntos (22)

O planejamento do número de conjuntos do sistema mecanizado inicia-se pelo processo de identificação da necessidade de máquinas agrícolas. As etapas posteriores correspondem aos processos de levantamento das operações a executar (26) e determinação da época de realização (25).

Tempo disponível (24) refere-se às horas que a máquina poderá trabalhar em função das condições edafoclimáticas e das decisões gerenciais na janela de operação.

$$Td = \{[Ndp - (Ndf + Ndui)] * (Jt * Efg)\} \quad (5)$$

Em que:

Td = tempo disponível para operação (h);

Ndp = número de dias das operações;

Ndf = número de domingos e feriados no período da operação;

Ndui = número de dias úteis impróprios;

Jt = jornada de trabalho (h dia⁻¹);

Efg = eficiência gerencial, em decimal.

O ritmo operacional (23) corresponde a razão entre área a ser trabalhada e o tempo disponível para a realização da operação.

$$Ro = \frac{Apl}{Td} \quad (6)$$

Em que:

Ro = ritmo operacional (ha h⁻¹);

Apl = área total (ha).

O número de conjuntos é a razão entre o ritmo operacional e a capacidade de trabalho do equipamento.

$$Nc = \frac{Ro}{Cco} \quad (7)$$

Em que:

Nc = número de conjuntos;

Ro = ritmo operacional (ha h⁻¹);

Cco = capacidade de campo (ha h⁻¹).

A segunda parte do processo de dimensionamento do sistema mecanizado corresponde a etapa de levantamento de especificação da potência disponível/requerida (17) e eficiência das máquinas (19). A capacidade de trabalho (15) das máquinas agrícolas pode ser calculada de acordo com a quantidade de trabalho (16), que corresponde à velocidade de deslocamento de um conjunto para cobrir uma determinada área pela unidade de tempo (18).

A capacidade de campo operacional é a quantidade de trabalho na unidade de tempo efetivamente obtida no campo, durante a operação e inclui os tempos de manobras da cabeceira, de abastecimento de insumos e de pequenas regulagens, e pode ser calculado conforme a equação 8:

$$Cco = \frac{(L \times V)}{10} \times Ef \quad (8)$$

Em que,

L = largura de trabalho (m);

V = velocidade de operação (km h^{-1})

E_f = eficiência de campo (%).

3.4.2.4 Custo de instalação ou investimentos (20)

Os investimentos compreendem o montante de recursos financeiros despendido na aquisição (ou introdução de melhorias) de bens de capital no projeto e comporta a aquisição máquinas agrícolas (21), benfeitorias (27), equipamentos industriais (28) e implantação da cultura (29). Tais investimentos são feitos visando implantar, manter ou aumentar o escopo de suas operações. A conta comporta também o reinvestimento advindo da depreciação real dos ativos. A terminologia utilizada para os investimentos será o mesmo utilizado no mercado de investimentos, o CAPEX (*Capital expenditure*).

O volume de capital necessário para a aquisição de bens será determinado conforme os preços médios praticados no mercado e a necessidade de aquisição, obtida no estabelecimento de um cenário base.

3.4.3 Fluxo de caixa (30)

Neste item serão descritos os métodos de cálculo de duas diferentes medidas de valor do investimento, o valor presente líquido (31) e a taxa interna de retorno (32).

3.4.3.1 Horizonte temporal de análise

Para a geração dos indicadores, foi utilizado um horizonte temporal de 20 anos, período que permite a compreensão do período crítico relativo aos custos de implantação, pagamento da dívida e depreciação, bem como as receitas sujeitas a essas variáveis nos diferentes momentos do projeto.

3.4.3.2 Valor Presente Líquido (VPL)

O valor presente líquido (31) ou método de valor atual permite calcular o valor presente de pagamentos futuros, somados a um custo inicial. O VPL é o resultado da soma de todos os capitais de entrada e saída do fluxo de caixa, descontados a uma determinada taxa de juros, considerada como Taxa Mínima de Atratividade (TMA), e subtraídos pelo custo do investimento inicial. O VPL foi calculado de acordo com a proposta de Ross (2007) (equação 9).

$$VPL = -C_0 + \sum_{i=1}^T \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (9)$$

Em que:

C_0 = fluxo de caixa no período 0;

C_i = fluxo de caixa no período i;

T = ano;

r = taxa de desconto.

Salienta-se que o sinal negativo representa a saída de capital no período 0, que representa a situação de investimentos que ocorrem no primeiro período após a instalação de um projeto.

3.4.3.3 Taxa Interna de Retorno

A taxa interna de retorno (TIR) (32) é uma taxa de desconto hipotética que, quando aplicada ao um fluxo de caixa, faz com que os valores das despesas, trazidos ao valor presente, sejam iguais aos valores dos retornos do investimento, também trazidos ao valor presente.

A TIR representa o valor de taxa no qual reduzirá o VPL a zero, de outra maneira seria a taxa que igualaria o fluxo de receitas com o de despesas, caracterizando assim a taxa de remuneração do capital investido (Ponciano et al., 2004), as equações 10 a 13:

$$VPL = -C_0 + \sum_{i=1}^T \frac{C_i}{(1+r)^i} = 0 \quad (10)$$

Ao substituir $\frac{1}{1+r}$ por x se obtém:

$$-C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_Tx^T = 0 \quad (11)$$

Dessa forma tem-se um polinômio cujas raízes podem ser um ou mais “ x ”, que por sua vez apresentam a taxa r a ser calculada:

$$x = \frac{1}{1+r} \quad (12)$$

Ou

$$r = TIR = \left(\frac{1}{x}\right) - 1 \quad (13)$$

Na análise de viabilidade econômica por meio do indicador VPL, a TMA será utilizada como taxa de juros referência, e considerando o componente custo de oportunidade, risco do negócio e liquidez, foi determinada uma TMA de 12% como significativa para caracterizar a viabilidade do empreendimento.

3.4.3.4 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade tem como objetivo mensurar os efeitos da alteração de variáveis de entrada nos indicadores de interesse. Quanto maior o impacto da variável dentro do modelo, mais significância possui a premissa. Desta forma é possível identificar as variáveis-chave que mais alteram os resultados, ou seja, o quão sensível é a mudança no indicador a uma variação em um dos componentes que agregam o modelo.

A análise de sensibilidade foi realizada de acordo com a proposta de Souza e Clemente (2001). Realizou-se alterações nas variáveis de um percentual conhecido, uma variável por vez, e observou-se a influência dessas alterações em relação ao sistema de produção.

3.5 Etapa 2. Cenário base: premissas do sistema de produção

Para a aplicação do modelo foi elaborado um cenário base em que se considerou uma área de colheita total de 1.367 ha, que foi estimado a partir da premissa que envolve a demanda de biomassa para abastecer uma usina termelétrica (UTE) com capacidade instalada de 10.000 kW de potência.

Para o desenvolvimento estabeleceu-se um conjunto de operações em dois períodos distintos. O primeiro corresponde às operações de preparo de solo e plantio, que englobam as atividades de dessecação, subsolagem, distribuição de corretivos, gradagem pesada e niveladora, aplicação de herbicida pré-emergente, sulcação e adubação, plantio e cobertura. O segundo conjunto de operações corresponde à etapa de condução da cultura e configura-se com as operações de aplicação de herbicida pós-emergente, adubação de cobertura, colheita, transbordo e a passagem do cultivador. Determinou-se que as operações de reforma da área serão as mesmas do primeiro conjunto de operações.

Os dados utilizados para a elaboração deste estudo advêm de fontes primárias e secundárias. A coleta via primária deu-se através de entrevistas com analistas de uma empresa que atua na área, Vignis², com base nas condições de mercado do ano de 2014.

Os parâmetros que não foram obtidos na entrevista foram determinados via fontes secundárias, por meio de dados disponibilizados em artigos científicos. Todos dados estarão presentes ao longo do texto e nos anexos.

3.5.1 Produtividade esperada e longevidade

² Empresa privada de melhoramento genético e produção de cana energia.

Alguns estudos demonstram que a cana energia pode obter ciclos produtivos de até 10 cortes seguidos antes da reforma, sem uma redução considerável de produção. As produtividades esperadas nos anos de corte utilizados no cenário-base estão descritas na Figura 2.

Figura 2 - Produtividade esperada no ciclo produtivo³

Fonte: entrevista de pesquisa da Empresa Vignis.

A plenitude da produção será obtida no quarto, quinto e sexto corte após o plantio, com um rendimento esperado de 60 t ha⁻¹ de matéria-seca. A produtividade da cultura corresponde a um dos principais fatores responsáveis pela viabilidade econômica do sistema.

Credita-se o crescimento da produtividade até o quarto ano pela melhor ocupação da gramínea ao longo dos anos. Com o melhor ajuste, há um maior perfilhamento das touceiras. Após o ápice, o decréscimo é em virtude da redução do vigor das plantas.

3.5.2 Dimensionamento do sistema mecanizado

Determinada todas as operações necessárias para o bom desenvolvimento da lavoura, estabeleceram-se as datas de início e fim de cada atividade, assim como a velocidade e a largura de trabalho, para obtenção da capacidade de campo de cada conjunto máquina/implemento, conforme a eficiência das operações e a fonte de potência necessária para a execução. Os dados

³ Dados estimados a partir de observações de campo.

foram obtidos junto à empresa Vignis após conversa pessoal com os responsáveis pela produção.

Tabela 1 - Característica das operações de preparo do solo e plantio no cenário-base

Operação	Tempo disponível (h)	Capacidade de campo efetiva (ha h ⁻¹)	Trator (Potência - kW)
Dessecação	117,6	9,6	55
Subsolagem	453,6	1,8	132
Distribuição de corretivos	369,6	8,0	77
Gradagem pesada	369,6	7,5	132
Gradagem leve	453,6	3,0	88
Herbicida pré emergente	319,2	3,6	55
Sulcação / Adubação	924,0	1,5	132
Plantio ⁴	308,0		
Cobrição	308,0	4,5	55

Tabela 2 - Característica das operações de condução da lavoura no cenário-base

Operação	Tempo disponível (h)	Capacidade de campo efetiva (ha h ⁻¹)	Trator (Potência - kW)
Herbicida pós-emergente	420,0	9,6	55
Adubação cobertura	3.763,2	8,0	77
Colheita	3.763,2	0,48	441
Transbordo	3.763,2	0,48	132
Cultivador	1.260,0	1,6	132

O tempo disponível corresponde ao período viável para a realização de uma determinada operação e depende basicamente do número de dias reservados para a operação, dos dias de descanso e impróprios para o trabalho e da jornada de trabalho.

Para todas as operações foram estabelecidas uma eficiência gerencial de 70%, uma eficiência de campo de 65% para as operações de preparo de solo, 60% para as operações de corte e carregamento e 50% para as operações de pulverização e adubação, em função das

⁴ Operação semi-mecanizada.

manobras de cabeceira e abastecimento, para cada operação de campo. Assim como ocorre nas maiorias das propriedades agrícolas, desconsideraram-se os feriados e finais de semana. Outro fator essencial para o dimensionamento de máquinas corresponde ao número de dias úteis impróprios (Nui), que correspondem aos dias úteis em que a umidade do solo encontra-se inadequada para os maquinários executarem as atividades. Como premissa, adotou-se que aproximadamente 70% dos dias do ano são adequados para a realização das operações de campo. O valor foi obtido através do modelo de cálculo do balanço hídrico com base no método de Penman-Monteith (Santiago, 2001). Os dados climáticos diários para o cálculo foram obtidos na Estação Agrometeorológica de Piracicaba, campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em Piracicaba, SP (latitude de 22°42'30"S; longitude de 47°38'30"W; altitude de 546 m). Os dados utilizados correspondem ao período de janeiro de 1917 a dezembro de 2013. Após a geração do balanço hídrico, caso a relação armazenamento do solo pela capacidade de água disponível estiver abaixo de 90% ou a precipitação no dia for inferior a 5 mm, o dia é próprio ao trabalho.

Eficiência de gerenciamento pode ser conceituada como um fator de correção para a jornada de trabalho. São as perdas ou redução de horas de trabalho originadas de falhas administrativas como o atraso na entrega de insumos, reparos de máquinas, erros na alocação logística, deslocamento entre outras, não sendo atribuídas ao conjunto mecanizado.

Para o dimensionamento do conjunto de caminhões para o transporte da cana foram consideradas duas fases. A primeira corresponde ao transporte da biomassa até a unidade de processamento para redução do teor de umidade. A segunda fase é o transporte da biomassa com 50% de umidade até a indústria para queima da biomassa e transformação em energia elétrica. Em ambos os casos determinou-se uma distância média de 40 km pelo modal rodoviário.

O plantio é realizado no sistema semimecanizado. O processo segue as seguintes etapas: na área de mudas, a despalha é realizada manualmente para evitar danos às gemas. Essas mudas são encaminhadas, com o apoio de caminhão ou trator acoplado a uma carreta, até a área de plantio. O veículo entra no talhão de plantio, após a sulcação efetuada mecanicamente, e as mudas são distribuídas manualmente nos sulcos em forma de colmo e, por fim, uma equipe munida de facões percorre as linhas individualizando os colmos das mudas em rebolos de aproximadamente três gemas. Em seguida, são realizadas as operações de aplicação de defensivos e cobertura dos sulcos, com o apoio de um conjunto de trator e cobridor. Toda a atividade é terceirizada, portanto, as máquinas e equipamentos utilizados no plantio não entram no dimensionamento.

3.5.3 Preço de equipamento, insumos e índices

As informações referentes aos preços de investimentos em máquinas e equipamentos e insumos foram estabelecidas através de valores obtidos em revendas e no Instituto de Economia Agrícola (IEA, 2014) e podem ser observados na Tabela 3 e na Tabela 4.

Tabela 3 - Preço de máquinas e implementos adotados no modelo

Máquina/Implemento	Descrição	Especificação	Valor (R\$)	Vida útil
Trator	Potência do motor	55 kW	90.000,00	12.000 h
Trator	Potência do motor	77 kW	126.000,00	12.000 h
Trator	Potência do motor	88 kW	144.000,00	12.000 h
Trator	Potência do motor	132 kW	216.000,00	12.000 h
Colhedora	Potência do motor	441 kW	1.100.000,00	12.000 h
Caminhão truco	Potência do motor	235 kW	400.000,00	20.000 h
Caminhão bombeiro	Potência do motor	220 kW	270.000,00	20.000 h
Pulverizador de barra	Comprimento da barra	12 m	24.000,00	2.000 h
Subsolador	Número de haste	5 hastes	30.000,00	2.000 h
Distribuidor de adubos e corretivos	Capacidade de carga	3,8 m ³	12.000,00	2.000 h
Grade pesada	Dimensões da grade	20" x 34" x 340 mm	50.000,00	2.000 h
Grade leve	Dimensões da grade	48" x 20" x 200 mm	12.000,00	2.000 h
Sulcador/adubador	Dimensões	2 linhas	40.000,00	2.000 h
Cobridor	Dimensões	2 linhas	16.000,00	2.000 h
Cultivador	Dimensões	2 linhas	40.000,00	2.000 h
Reboque (Romeu e Julieta)	Capacidade de carga	50 t/100 m ³	50.000,00	2.000 h
Unidade industrial	Moagem	30 t h ⁻¹	3.230.000,00	10 anos

Fonte: entrevista com revendas, empresa Vignis, FNP (2012), IEA (2014), ASAE (2003).

Tabela 4 - Preço de insumos adotados no Cenário-Base

Insumo	Unidade	Valor
Calcário	R\$ t ⁻¹	105,00
Gesso	R\$ t ⁻¹	130,00
Adubo 05-25-25	R\$ t ⁻¹	1.350,00
Adubo 20-00-20	R\$ t ⁻¹	1.100,00
Mudas	R\$ t ⁻¹	55,00
Formicida	R\$ kg ⁻¹	9,15
Herbicida dessecação	R\$ L ⁻¹	12,50
Herbicida pré (mistura)	R\$ L ⁻¹	102,00
Herbicida pós (mistura)	R\$ L ⁻¹	102,00
Inseticida (plantio cobertura)	R\$ kg ⁻¹	600,00
Fungo Metharizium (5% da área)	R\$ kg ⁻¹	46,00
Vespa Cotesia flavipes	R\$ mil ⁻¹	2.000,00
Preço de energia elétrica	R\$ kWh ⁻¹	0,13
Preço do óleo diesel	R\$ L ⁻¹	2,40

Fonte: entrevista de pesquisa de vendas, empresa Vignis, FNP (2012), IEA (2014).

Com base em estudos de casos, foram determinados os índices técnicos produtivos, que foram determinantes para o cálculo do custo operacional do sistema mecanizado, conforme a Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 - Índices técnicos adotados no cenário-base

Índice técnico	Unidade	Valor
Eficiência gerencial	%	75
Eficiência de campo (operações de preparo do solo)	%	65
Eficiência de campo (colheita e carregamento)	%	60
Eficiência de campo (pulverização e adubação)	%	50
Fator de consumo de combustível para tratores	L kw ⁻¹ h ⁻¹	0,16
Consumo de combustível de caminhões	km L ⁻¹	2,50
Fator de reparos e manutenção	%	50
Consumo de energia elétrica	kWh	520
Custo de operação da empilhadeira na indústria	R\$ h ⁻¹	90,00
Taxa residual	%	30
Taxa de juros	%	6
Taxa de seguro	%	1

A eficiência gerencial da atividade foi considerada em 75%, sendo as eficiências de campo determinadas de acordo com o tipo de operação agrícola (ASAE, 2003). O fator consumo de combustível foi estabelecido de acordo com Molin e Milan (2002) e o fator de reparo e manutenção estabelecido de acordo com ASABE (2011). Embora possa ocorrer diferenças desse fator conforme o tipo de operação e o número de horas de utilização no ano, para todas as máquinas e equipamentos considerou-se o mesmo índice. O consumo de combustível dos caminhões foi determinado de acordo com as especificações do fabricante e o preço do combustível (Diesel) considerado foi de R\$ 2,40 para a cidade de Piracicaba, conforme dados disponíveis no site: www.precodoscombustiveis.com.br, em maio de 2015. O valor final das máquinas e equipamentos considerado foi de 30%, a taxa de juros anual de 6% foi baseada tendo em vista a taxa de juros média de programas de financiamento nacional de máquinas e equipamentos agrícolas e a taxa de seguro estabelecida como 1%.

3.5.4 Planejamento das operações mecanizadas

A estruturação do algoritmo, a ser utilizado na seleção e dimensionamento do sistema de produção, pode ser realizada através de etapas interligadas.

Tabela 7 - Operações e época de realização de atividades do manejo da cana soca

Período	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2
Herbicida pós-emergente												
Adubação cobertura												
Colheita												
Transbordo												
Cultivador												

No decorrer do desenvolvimento da cultura, podem ser necessários operações de tratamento fitossanitário. No modelo foram consideradas apenas as operações com a maior probabilidade de ocorrência, de acordo com os técnicos entrevistados.

Após a realização de simulações, foi identificado que o melhor resultado econômico acontece quando todo o plantio é realizado em apenas 1 ano, sem escalonamento. Em função disso, definiu-se arbitrariamente a implantação de toda a área em um ano, entre a segunda quinzena de fevereiro à meados de maio.

A janela de colheita determinada entre abril e novembro é em função da dificuldade de colheita nos períodos de maior ocorrência de chuvas, que tem como consequência o aumento da ineficiência produtiva tanto da área agrícola, como da industrial.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.4 Etapa 1. Desenvolvimento do Modelo

O modelo foi construído para possibilitar a inclusão dos diversos aspectos inerentes ao sistema de produção da cana energia que influenciam no planejamento operacional, dimensionamento de máquinas, fluxo de insumos e mão-de-obra. O resultado final da análise, avaliado pelos indicadores de atratividade financeira, reflete os efeitos das características da cultura sobre o desempenho de retorno econômico.

A base do modelo foi construída em planilha eletrônica, desenvolvido de forma a permitir a análise do sistema como um processo completo, demonstrando a sequência lógica para o planejamento e desenvolvimento do sistema de produção.

4.4.1 Verificação

A rotina do modelo foi verificada ao longo do desenvolvimento nas etapas intermediárias do processo por meio de simulações para averiguar erros de lógica. A verificação em cada etapa foi efetuada por meio da análise comparativa dos resultados atingidos pelo modelo com cálculos manuais. Constatou-se que a rotina está correta e permite realizar simulações de cenários.

4.4.2 Validação

A validação do modelo foi realizada por meio da comparação dos resultados de custo de produção obtidos com a bibliografia.

Avaliou-se a consistência em relação aos custos mostrados pelo sistema mecanizado, utilizando-se os custos horários e operacionais das máquinas agrícolas como os indicadores comparativos na análise.

A Figura 3 apresenta uma análise comparativa do custo horário das operações mecanizadas de preparo de solo.

Figura 3 - Análise comparativa do custo horário (R\$ h⁻¹) das operações de preparo de solo para a validação do modelo

A avaliação comparativa do custo horário das operações de preparo de solo, mostra que o modelo obteve um custo por hora máquina superior que todas as operações, frente a referência FNP (2012).

A diferença nos valores de custo horário pode estar vinculada aos valores iniciais das máquinas e equipamentos, na referência utilizada para validação. Outro fator que pode estar refletindo na diferença dos valores está relacionado às horas de uso do conjunto de máquinas/equipamentos no ano. Quanto maior a quantidade de horas utilizadas pelas máquinas e equipamentos no ano, menor será o custo fixo específico em termos de custo por hora. O modelo desenvolvido leva em conta essa variação e é calculado conforme a janela de operação.

4.5 Etapa 2. Aplicação do Modelo

O modelo foi elaborado para aplicação no sistema de produção agroindustrial com a consideração para o diagnóstico da viabilidade econômica do cultivo, em função do custo de produção, da produtividade esperada e do preço de comercialização do produto. Para o estudo do modelo, consideraram-se as premissas destacadas nos itens anteriores e sincronizadas para a elaboração do cenário-base na modelagem computacional.

Os resultados econômicos obtidos através dos cálculos dos indicadores de atratividade financeira VPL, TIR e as análises de sensibilidade são expostos neste item. Inicialmente são apresentados os fluxos de caixa e os indicadores econômicos, em seguida serão expostas as

análises de sensibilidade, a fim de identificar a resiliência dos parâmetros mais sensíveis do projeto avaliado.

A estrutura financeira do trabalho deu-se a partir da engenharia de custos, receitas e resultados programados ao longo da vida útil predeterminada. Cada item do projeto foi dimensionado e organizado contabilmente na forma de custos, lucros, investimentos e impostos.

4.5.1 Receita bruta

A receita é mais importante variável dentro de qualquer projeto investimento, pois a mesma está diretamente relacionada à possibilidade de retorno financeiro e incremento no valor do investimento. A receita bruta na cultura foi analisada considerando-se as produtividades estimadas pelo preço de venda do bagaço de cana e do caldo resultante da moagem.

Figura 4 - Receita bruta por hectare ao longo do ciclo produtivo

A oscilação em relação à receita bruta entre os anos é devido à variação da produtividade e do escalonamento das áreas de plantio e reforma planejada. As maiores receitas concentram-se entre os anos de 4, 5 e 6, que correspondem aos anos de maior produtividade do canavial.

4.5.2 Custos

Esta etapa tem por finalidade apresentar custos de forma geral e agrupados, de acordo com o volume de produção esperada por ano, em um horizonte de 20 anos.

4.5.2.1 Capital expenditure (CAPEX)

Os componentes do *capital expenditure* compreendem o montante de recursos financeiros gastos na aquisição (ou introdução de melhorias) de bens de capital. Os itens que mais influenciam nos custos de investimento são os custos com a implantação da cultura, as máquinas e equipamentos agrícolas e o componente industrial (Figura 5).

Figura 5. Representatividade dos componentes do CAPEX

O valor monetário correspondente a cada um dos itens do CAPEX pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de CAPEX

Descrição	Unidade	Valor
Formação do canavial	R\$	5,3 mi
Custo de implantação	R\$ ha ⁻¹	3.847,34
Benfeitorias	R\$	650 mil
Máquinas e equipamentos agrícolas	R\$	5,9 mi
Equipamentos de Transporte	R\$	2,0 mi
Indústria	R\$	3,2 mi

A implantação da cultura, contando somente as operações de plantio e insumos, tem um custo de R\$ 3.847,34 por ha.

4.5.2.2 Operation expenditure (OPEX)

O OPEX compreende a categoria de custos e despesas que incorrem como resultado da realização de atividades regulares da etapa agrícola. Os insumos agrícolas e as operações mecanizadas são os itens mais representativos do OPEX (Figura 6).

Figura 6 - Representatividade dos componentes do OPEX

As incidências dos dispêndios monetários deverão ser maiores nos primeiros anos de produção, devido aos investimentos realizados na implantação da cultura. Nos anos de estabilidade o OPEX deverá permanecer em torno de 47,82 R\$ t⁻¹ e 8.293,20 R\$ ha⁻¹, já considerando os custos do processo industrial (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores de OPEX no sistema de produção

Operações	Valor de OPEX	
	R\$ ha ⁻¹	R\$ t ⁻¹
Sistema mecanizado	1.508,44	8,73
Transporte	1.960,38	11,20
Insumos	747,79	4,31
Mão-de-obra operacional	1.647,54	9,53
Arrendamento	1.080,00	6,25
Operações industriais	897,18	5,19
Despesa administrativa	451,86	2,61
Total	8.293,20	47,82

Observa-se que grande parte do custo de produção corresponde aos gastos com a operação de transporte, mão-de-obra operacional e sistema mecanizado (61,6%). O custo agrícola de produção agrícola, que é composto pelo sistema mecanizado, insumos, mão-de-obra e arrendamento soma R\$ 28,82 por t.

4.5.2.3 Depreciação fiscal

O método linear de cálculo da depreciação foi utilizado gerando o valor monetário anual da depreciação constante. Para os ativos depreciables, o valor a depreciar foi estimado a partir do valor-base, ou o preço de compra, uma vez que existe o pressuposto da utilização de maquinário novo.

No Brasil, em termos contábeis, o cálculo da depreciação deve obedecer aos critérios determinados pelo governo, através da Secretaria da Receita Federal, art. 305 do RIR/99, que estipula prazos para depreciar todos os ativos imobilizados.

Figura 7 - Depreciação anual dos ativos imobilizados

Ressalta-se que os valores obtidos foram estipulados de modo aproximado e que os valores reais de depreciação para utilização na contabilidade, deverão ser realizados por auditores, que irão verificar a vida útil dos bens a cada ano ao longo do projeto.

O custo com depreciação não é obrigatório, mas os empreendimentos que auferem lucros farão uso como redutor "artificial" dos seus resultados a oferecer à tributação.

No modelo foi considerado a compra de equipamentos em dois anos, sendo os ativos adquiridos à medida que forem demandados. Quanto menor o acumulado de ativos imobilizados, menor também será a quantia passível de depreciação. O ano "0" tem pouco mais de 50% do valor de ativos depreciables que nos demais anos da atividade.

4.5.2.4 Tributação

A principal tributação considerada nas análises corresponde ao imposto de renda (IR) e a contribuição social sobre o lucro líquido (CSLL). Considerou-se uma taxa de 25% de IR e de 9% de CSLL ao ano sobre o lucro obtido no ano fiscal.

Figura 8 - Tributação (R\$ ha⁻¹) sobre a produção de biomassa comercializada

O IR e a CSLL incorrem sobre o lucro líquido da atividade, no ano fiscal. A grande variação é decorrente da variabilidade de obtenção de receita com a venda da biomassa, que por sua vez está diretamente relacionada com a produtividade da cultura. Os maiores anos de pagamento de tributos são diretamente proporcionais aos anos de maior produtividade da cana, que correspondem aos anos 4, 5 e 6, após o plantio.

4.5.3 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa do projeto conta com todos os resultados projetados desde o ano de implantação (ano 0) até um ano futuro predeterminado (ano 20). A estrutura básica é elaborada a partir da projeção de entrada (receita) e saída (custo) monetária no horizonte temporal, estas por sua vez foram estimadas com base nos dados técnicos gerados, para construção do fluxo de caixa, correlacionados a uma análise dos mercados de insumos e produtos, responsáveis pela determinação dos custos de produção e preços de venda (Figura 9).

(a)

(b)

Figura 9 - (a) Fluxo de caixa simples; (b) Fluxo de caixa acumulado

Os anos iniciais são marcados por fluxos negativos em função da aquisição de maquinários e infraestruturas de produção. Posteriormente se observa um padrão oscilatório devido as áreas de reforma e os reinvestimentos em bens imobilizados.

O fluxo de caixa acumulado mostra valores positivos a partir do ano 6, o que indica o retorno do capital investido após o sexto ano do plantio. A queda do montante acumulado entre os anos 9 e 13 são decorrentes de um período de reforma dos canaviais, período que há investimentos na atividade. Embora a reforma do canavial implique em anos de valores negativos ao fluxo de caixa, ela é fundamental para a saúde financeira da atividade nos anos posteriores.

4.5.4 Indicadores de atratividade

O conjunto de resultados financeiros distribuídos ao longo do fluxo permite a elaboração dos indicadores de atratividade, que são as principais ferramentas na tomada de decisão em projetos de investimentos quanto à execução ou não do empreendimento. Nos moldes propostos a Taxa Interna de Retorno obtida foi de 15,14% e o Valor Presente Líquido de R\$ 6.371.054.

Os resultados indicam que o projeto é economicamente viável em um horizonte temporal de 20 anos. A taxa interna de retorno é superior à taxa mínima de atratividade e o VPL superior a R\$ 6,3 milhões, nos moldes projetados.

4.5.5 Análise de sensibilidade

A sensibilização dos componentes do fluxo de caixa de maior relevância em relação aos indicadores de rentabilidade é um instrumento chave para a análise financeira do projeto. Tal análise é no molde *ceteri-paribus*, ou seja, cada dado analisado varia segundo intervalos predeterminados enquanto as outras se mantêm constantes no cenário-base adotado. O teste altera os valores de cada uma das variáveis e avalia quais os componentes que possuem maiores impactos sobre os indicadores de rentabilidade. A Figura 10 mostra a sensibilidade do VPL em função da variação dos inputs.

Figura 10 -VPL em função da variação dos inputs

Observa-se na Figura 11 que a variável preço da biomassa e a produtividade são os fatores que mais influenciam na viabilidade econômica da atividade, sendo esses os pontos em que o administrador da atividade deve ter o maior controle para reduzir os riscos do empreendimento. Caso os preços de venda e a produtividade sejam reduzidos, independentemente, a valores abaixo de 10%, o VPL fica com valor abaixo de 0, indicando a baixa atratividade econômica. A ordem dos itens que mais afetam os resultados do VPL pode ser observada na Figura 11.

Figura 11 - VPL em função da variação dos inputs

Os resultados indicam que as variáveis que mais impactam na atratividade do projeto correspondem ao preço de venda da biomassa e a produtividade máxima. Caso a produtividade máxima passe de 250 t ha⁻¹ (cenário base) para 300 t ha⁻¹ (aumento de 20%), o VPL deverá ser de mais de R\$ 20 milhões. Caso o preço de venda, médio do horizonte de 20 anos de projeto, da biomassa passe dos R\$ 50,00 t⁻¹ atuais para R\$ 40,00 t⁻¹ (redução de 20%), a atividade perde sua atratividade financeira, passando o VPL dos R\$ 6,4 milhões para valores menores que R\$ -9 milhões.

4.5.6 Análise de cenários

A análise de cenários corresponde a um importante instrumento no desenvolvimento de estratégias para mitigar riscos e incertezas para a tomada de decisão. A análise explora os diversos caminhos que o empreendimento pode seguir e então avaliar aqueles que melhor condizem com os objetivos idealizados.

4.5.6.1 Análise da eficiência de campo e eficiência gerencial como variável crítica

A eficiência gerencial corresponde a relação entre o tempo disponível e o que está sendo utilizado para o trabalho. Já a eficiência de campo é relação entre o tempo de trabalho e o que está sendo efetivamente executado e leva em conta tempo de manobras das máquinas no campo, abastecimento de insumos e pequenas paradas para regulagem e desembuchamento. A eficiência gerencial corresponde a todos os outros tempos que não estão ligados diretamente ao trabalho da máquina. As tabelas seguintes apresentam a efeito da variação das eficiências sobre o número de tratores e sobre a taxa interna de retorno.

Tabela 10 - Número de tratores em função das eficiências de campo e gerencial

		Eficiência de campo								
		40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%
Eficiência gerencial	40%	45	40	36	34	32	30	29	26	26
	45%	40	36	35	31	30	28	26	24	23
	50%	36	34	32	28	26	25	24	22	20
	55%	34	32	29	26	25	23	22	20	19
	60%	32	30	27	24	23	22	21	19	19
	65%	30	28	25	23	22	21	20	18	17
	70%	29	26	24	22	21	19	19	17	17
	75%	26	25	23	20	19	19	18	17	16
	80%	26	24	21	19	19	18	18	16	16

Tabela 11 - TIR em função das eficiências de campo e gerencial

Eficiência gerencial	Eficiência de campo									
	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	
	40%	5%	8%	10%	11%	13%	14%	14%	16%	16%
	45%	6%	9%	10%	12%	13%	14%	15%	16%	17%
	50%	6%	9%	11%	12%	14%	15%	15%	16%	17%
	55%	7%	10%	11%	13%	14%	15%	16%	17%	17%
	60%	7%	10%	12%	13%	14%	15%	16%	17%	17%
	65%	7%	10%	12%	13%	15%	15%	16%	17%	18%
	70%	7%	11%	12%	14%	15%	16%	16%	17%	18%
	75%	8%	11%	12%	14%	15%	16%	17%	18%	18%
80%	8%	11%	13%	14%	15%	16%	17%	18%	18%	

Nota-se nas Tabela 10 que não há grande diferença no número de tratores quando os parâmetros são nivelados para 40%. Mas na TIR (Tabela 11), esses parâmetros têm comportamentos totalmente distintos. Quando a eficiência gerencial passa de 70% para 40%, a

TIR reduz 2%, mas quando a eficiência de campo passa de 65 para 40%, a TIR vai para 7% e perde a sua atratividade financeira.

4.5.6.2 Análise da área da propriedade e a distância de transporte

Devido à grande quantidade de biomassa produzida e a baixa densidade do material, o transporte possui grande representatividade no custo de produção. Conforme os resultados apresentados na Figura 6, 33% do Opex da atividade é relativo ao transporte da biomassa, desses, 20% são custos fixos e outros 80%, custo variável, que por sua vez, é diretamente relacionada à distância percorrida pelo caminhão entre o campo e a usina de beneficiamento.

A Tabela 12 a seguir apresenta o indicador de viabilidade econômica do empreendimento em relação à distância do campo a usina e o tamanho da área de plantio.

Tabela 12 - VPL (milhões de R\$) em função da variação da área plantada e da distância de transporte entre a área produtiva e usina de beneficiamento

Área de plantio (ha)	Valor Presente Líquido (VPL – milhões de R\$)							
	Distância de transporte da biomassa (km)							
	35	40	45	50	55	60	65	70
1.000	-0,1	-1,4	-3,3	-4,6	-7,1	-8,5	-10,2	-12,9
1.100	3,2	1,6	-0,9	-2,3	-3,7	-5,5	-8,2	-9,7
1.200	6,0	3,5	2,0	0,2	-2,4	-4,0	-5,6	-9,8
1.300	6,8	5,1	3,2	0,6	-1,1	-2,8	-7,0	-8,8
1.367	8,9	6,4	4,2	2,4	0,7	-3,5	-5,2	-7,1
1.400	10,1	8,0	5,3	3,5	1,4	-2,4	-4,3	-7,5
1.500	13,1	10,2	8,3	5,1	2,2	0,3	-3,3	-5,2
1.600	15,4	13,4	11,1	7,1	5,0	1,4	-0,7	-3,8

O valor em destaque (6,4) corresponde ao cenário-base. Nota-se que no modelo proposto a distância máxima limite, antes que a atividade apresente baixo retorno financeiro, são valores superiores a 55 km entre área produtiva e usina. Caso a distância seja de 40 km, a área mínima economicamente viável é aproximadamente 1.100 ha. Áreas produtivas com valores menores que 1.000 ha demandam sistemas produtivos com custos menores ou com maiores produtividades, para que a atividade mantenha sua atratividade financeira.

Como pode ser observado, quanto maior a área de plantio, maior a distância que pode ser percorrida entre o campo e a indústria, uma vez que quanto maior a área, mais eficiente e com menor custo fixo se torna a atividade. Uma área maior, além do ganho em escala pela maior receita bruta obtida, ainda permite uma melhor ocupação dos recursos e dispêndios fixos, pela otimização do uso da mão-de-obra e das máquinas e implementos adquiridos.

4.5.6.3 Análise da área da propriedade e o custo de mecanização

O custo operacional da mecanização corresponde ao terceiro item que mais impacta no custo de produção. A influência da área de plantio no custo horário das máquinas e equipamentos é apresentada na Figura 12, em que se observam os equipamentos utilizados no dimensionamento do sistema mecanizado do modelo em função da área.

(a)

(b)

Figura 12 - Custo horário de tratores (a) e implementos agrícolas (b) em função da área da propriedade

O aumento da área da propriedade resultou em variações no custo horário da mecanização. Essas diferenças ocorrem em função da otimização de utilização dos bens. Quanto maior a área para o uso de máquinas e equipamentos, menor será seu custo horário devido à redução do custo fixo específico, até um determinado limite a partir do qual é necessária aquisição de um novo conjunto para cobrir a área produtiva. Reduz-se o número de horas de uso por equipamento e eleva-se o custo fixo.

Na Figura 12 observa-se que sempre que há um aumento no custo horário, significa a entrada de mais um item a ser investido, demandado para cobrir a área produtiva.

Cada operação mecanizada demanda um determinado conjunto composto por um trator e implemento. A Figura 13 apresenta o custo por hectare das operações mecanizadas de implantação e manejo da cana soca, em função da área.

Figura 13 - Custo operacional por hectare em função da área da propriedade

Quando a área da propriedade corresponde a uma variável crítica no dimensionamento de sistemas mecanizados, observa-se que existem módulos ideais para a utilização de máquinas agrícolas, que reduz o custo de produção.

Observa-se que para ambas as operações, o menor custo por hectare encontra-se quando a área da propriedade é de 2.900 ha. Essa grandeza de área corresponde ao menor valor de custo horário do trator de 132 kW, o que indica que o correto dimensionamento do equipamento que possui o maior custo por hora pode fazer grande diferença nos resultados de um empreendimento.

4.5.6.4 Análise da textura do solo

A textura do solo possui grande influência sobre os resultados de um sistema de produção agrícola. O indicativo relaciona-se diretamente com a capacidade de água disponível do solo (CAD), que na prática significa o máximo de água que o solo pode reter levando em consideração suas características físicas. Cada tipo e textura de solo diferente, possuem CADs diferentes. A CAD influencia na demanda da força do trator para execução de atividades de revolvimento do solo, no déficit ou excedente hídrico, que são fatores preponderantes para a produtividade das culturas e na velocidade de escoamento da água do solo, que afetará diretamente os dias agronomicamente secos (DAS).

Solos com textura argilosa reduzem os dias agronomicamente secos em função do maior tempo em que o solo permanece úmido após um período de molhamento, pela sua maior capacidade de contenção hídrica nos poros. Períodos maiores de umidade do solo implicam na redução dos dias agrícola trabalháveis, ou seja, os dias em que as máquinas e implementos podem entrar nos campos sem causar maiores problemas ambientais como a compactação do solo e consequentemente no número de conjuntos mecanizados para a execução das operações. Por outro lado, espera-se que solos com textura argilosa apresentem maior produtividade pelo menor período de déficit hídrico, se comparado a solos arenosos.

4.5.6.5 Dias agronomicamente secos

O clima e a umidade do solo são os dois fatores que determinam o número de dias agronomicamente secos disponíveis para o trabalho das máquinas ao longo do ano. A incerteza climática traz como consequência duas alternativas para o dimensionamento do sistema mecanizado: demanda elevada de equipamentos para atender as condições mais críticas, que trazem consigo a pouca utilização em anos normais e consequentemente elevação dos custos ou dimensionamento para anos favoráveis, reduzindo o investimento, mas aumentando o risco de perda da cultura por não se realizar as operações dentro do prazo.

Para avaliação de cenários, foi estabelecido que um dia agronomicamente seco fosse aquele que apresentasse um regime pluviométrico inferior a 5 mm por dia ou em que o solo permanecesse abaixo de 90% da sua capacidade máxima de armazenamento de água no solo (Erthal & Sentelhas, 1995; Aviad et al., 2009), calculado pelo modelo de balanço hídrico. Com uma menor janela de operações, mais eficientemente deve ser realizado a atividade ou maior será a demanda por um conjunto de máquinas e equipamentos agrícolas, para executar uma operação em uma determinada área.

A Figura 14 apresenta a variação do custo das operações mecanizadas e do investimento na propriedade em função da CAD do solo. Os pontos correspondem aos cenários adotados para um solo de textura arenosa (CAD 45 mm), média (CAD 55 mm) e argilosa (CAD 65 mm).

Figura 14 - DAS e investimento em função da CAD do solo

Observa-se que a cada 10 mm que se aumenta a CAD do solo, elevam-se os custos e os investimento. O aumento do custo é em função da maior demanda da potência do motor para realizar as operações de revolvimento do solo. Os investimentos também seguem a mesma tendência por duas razões: a primeira é o acréscimo do investimento devido ao maior custo com as operações de preparo do solo. A segunda pela redução dos dias agronomicamente secos, que implica em uma maior quantidade de tratores e implementos para cobrir a mesma área.

Caso esses dias se coincidam com operações que possuem uma pequena janela de cultivo, como o período de semeadura de culturas anuais, o dispêndio com máquinas e implementos pode elevar-se substancialmente.

Por outro lado, a maior retenção de água no solo pode favorecer culturas que são sensíveis ao déficit hídrico. Portanto, quanto maior a CAD do solo, espera-se que maior seja a produtividade potencial. A Figura 15 a seguir apresenta uma simulação da variação da CAD do solo e seu impacto na produtividade média da cana. Para o estabelecimento da produtividade potencial, utilizou-se o conceito de coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (k_y), proposto por Doorenbos e Kassan (1979).

Figura 15 - Produtividade potencial em função da CAD do solo

Portanto, pode-se inferir que embora a maior CAD do solo reduza os dias agronomicamente secos e demande maiores investimentos para operacionalizar a mesma área, a maior produtividade desses solos podem compensar tais dispêndios. A Tabela 13 apresenta um comparativo entre os tipos de solos e suas influências nos resultados econômicos.

Tabela 13 - Indicadores econômicos em função da textura do solo

Descrição	Textura do solo		
	Argiloso	Média	Arenosa
CAD (mm)	65	55	45
Investimento (milhões de R\$)	17,4	17,1	16,9
Produtividade média (t ha ⁻¹)	174	170	166
VPL (milhões de R\$)	6,4	5,1	3,4

Os resultados da Tabela 13 indicam que embora os solos com textura argilosa tenham maiores custos operacionais e de investimentos, se comparado com solos com texturas média e arenosa, a maior produtividade desse tipo de solo é vantajoso pela sua maior influência na construção do fluxo de caixa. Nessa simulação o custo da terra permaneceu o mesmo, independentemente do tipo de solo, com o valor de R\$ 800 por ha ano⁻¹.

4.5.6.6 Ano da reforma como variável crítica

O ano de reforma como variável crítica tem como objetivo determinar o estágio econômico mais adequado para a reforma do canavial. O indicador utilizado foi o Valor Presente Líquido, a receita total e o OPEX total em um horizonte de produção de 20 anos.

A reforma periódica dos canaviais é uma prática comum do setor sucroenergético. A lavoura de cana-de-açúcar é uma atividade agrícola classificada como semi-perene, que se exauri ao longo dos anos de produção e que exige renovação para a manutenção do fluxo contínuo de matéria-prima à indústria. Para a avaliação desse cenário, considerou-se a reforma entre o quinto e o décimo sexto corte, com as seguintes estimativas de produtividade (Figura 16).

Figura 16 - Produtividade da cana energia para simulação dos anos de reforma

A longevidade do canavial decorre basicamente das características biológicas das variedades plantadas. A capacidade de rebrota da planta possibilita vários cortes, porém após o completo estabelecimento e aproveitamento da área, que ocorre entre o quarto e o sexto corte, a cada colheita a produtividade da cana decresce. Com a postergação da renovação dos canaviais, o investimento para formação e reforma é diluído, contudo, com a antecipação da reforma pode-se obter níveis contínuos de alta produtividade na lavoura.

Ressalta-se que a reforma é uma atividade complexa que envolve aspectos de ordem técnico, operacional e financeiro. A simulação foi realizada em área total.

A Figura 17 a seguir apresenta a receita e o OPEX total de um horizonte de 20 anos de produção, em função do ano de reforma.

Figura 17 - OPEX e Receita total em função do ano de reforma

Observa-se que a maior receita ocorre quando a reforma ocorre após o sétimo corte (R\$ 403 mi), por outro lado corresponde também ao ano com o maior OPEX acumulado, devido aos maiores dispêndios com colheita e transporte, relacionados à maior produção. A próxima análise é em relação ao investimento na atividade em função do ano de reforma.

Figura 18 - Investimento e Receita total em função do ano de reforma

Conforme observado na Figura 18, quanto maior a longevidade do canavial, menor se torna o investimento na atividade. Caso as reformas sejam realizadas a cada 5 ou 6 anos, no horizonte de 20 anos seriam necessárias 3 reformas em toda a área, ou um investimento em ativos de pouco mais de R\$ 40,8 milhões. A reforma aos 7, 8 e 9 anos, seriam 2 reformas, ou

R\$ 35,6 milhões e a partir de 10 cortes, apenas 1 reforma seria necessário para o horizonte projetado, ou R\$ 30,3 milhões.

Por fim, realizou-se uma simulação da atratividade financeira do projeto em função da antecipação ou postergação do ano de reforma, em comparação ao cenário-base (ano 10).

Figura 19 - VPL em função do ano de reforma

De acordo com os resultados da Figura 19, uma reforma no ano 7 gera um VPL 3% superior, se comparado a reforma no ano 10. Salienta-se mais uma vez que os valores são correspondentes a um cenário base, estático, em que o preço de venda é igual todos os anos. Não foi realizada nenhum tipo de otimização com parcelamento das áreas de reforma.

A tomada de decisão da área e do período de reforma deve ser realizada avaliando-se ano a ano o desempenho produtivo dos talhões, assim como os aspectos mercadológicos e operacionais.

5 CONCLUSÃO

O investimento em cana energia demonstrou atratividade financeira em um horizonte de produção de 20 anos, no cenário-base, sendo o preço de venda da biomassa e a produtividade os itens que mais impactam na construção do fluxo de caixa.

Observa-se uma economia de escala na atividade, sendo que quanto maior a área cultivada, maior a atratividade do projeto. Em função da grande quantidade de produtos gerados e de sua baixa densidade, o custo de transporte corresponde ao item mais representativo do custo de produção, sendo que a distância entre a área de produção agrícola e a unidade de beneficiamento pode ser o fator limitante para a viabilidade econômica do empreendimento.

A textura do solo possui influência no dimensionamento do conjunto de máquinas e implementos agrícolas e conseqüentemente na atratividade financeira do modelo de negócio, sendo que, de acordo com as equações utilizadas, os solos argilosos resultam em maiores quantidades de máquinas, pelo menor número de dias agronomicamente secos, se comparados com solos de textura média e arenosa, ainda geram maiores custos nas operações de revolvimento do solo. Por outro lado, espera-se que solos com maior CAD possui maior potencial produtivo, devido ao menor risco de ocorrer déficit hídrico nos estádios fenológicos mais críticos.

O ano de reforma corresponde a uma variável de grande importância no planejamento da produção, sendo que uma decisão equivocada do período de reforma pode comprometer a viabilidade da atividade. Caso a reforma seja erroneamente antecipada, o investimento com reforma será maior, por outro lado, se for realizada muito tardiamente, o potencial produtivo da cultura pode-se reduzir ao ponto que o custo seja maior que o retorno.

REFERÊNCIA

ALEXANDER, A.G. **Energy cane as a multiple-products alternative**. In: POST-CONFERENCE SEMINAR, Hawaii, USA, 1984. **Proceedings...** Hawaii, USA: Aiea Library, Hawaii Natural Energy Institute, Aiea, Hawaii, USA, Nov., 1984. 17p.

ALEXANDER, A.G. **Sugarcane as a source of biomass**. In: Sugarcane as Feed. SANSOURCY, R.; AARTS, G.; PRESTON, T.R. (Ed.), FAO Corporate Document Repository, Rome, Italy, 1988. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/003/s8850e/S8850E04.htm>. Acesso em: 05 out. 2014.

ALEXANDER, A.G. **The Energy Cane Alternative**. New York: Elsevier, 1985. 530p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. Agricultural machinery management data - D497.4. St. Joseph: **ASAE Standards**, 2003. p. 372-380.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. Agricultural machinery management data ASAE D497.7. In: _____. **ASABE standards**. St. Joseph, 2011. p. 1-8.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp?tipo=5&ger=Combustivel&principal=Biomassa>. Acesso em: 02 jan. 2014

ARCENEUX, G. Cultivated sugarcane of the world and their botanical derivation. In: **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, San Juan, v. 12, p. 844-854, 1965.

AVIAD, Y.; KUTIEL, H.; LAVIE, H. Variation of Dry Days Since Last Rain as a measure of dryness along a Mediterranean – Arid transect. **Journal of Arid Environments**, Oxford, UK, v. 73, p. 658-665, 2009.

BAIO, F.H.R.; ANTUNIASI, U.R.; BALASTREIRE, L.A.; CAIXETA FILHO, J.V. Modelo de programação linear para seleção de pulverizadores agrícolas de barras. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 9, p. 38-52, 2004.

BAKKER, H. **Sugar Cane Cultivation and Management**. Kluwer: Academic/Plenum Publisher, 1999. 679p.

BALA, B.K. Simulation and modeling techniques of agricultural systems, **Agricultural Mechanization in Asia**, Tokyo, v. 8, n. 4, p. 13-15, 1977.

BALASTREIRE, L.A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 307p.

BISCHOFF, K.P.; GRAVOIS, K.A.; REAGAN, T.E.; HOY, J.W.; KIMBENG, C.A.; LABORDE, C.M. Registration of L 79-1002 sugarcane. **Journal of Plant Registrations**. Madison, v. 2, n. 3, p. 211–217, 2008. BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO

ECONÔMICO E SOCIAL. Etanol, Alcoolquímicas e Biorrefinarias. Rio de Janeiro, n. 25, 2007. 35p.

BOTHA, F.C. **Energy yield and cost in a sugarcane biomass system**. In: Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, v. 31, p. 1–10, 2009.

BRANSBY, D.I.; ALLEN, D.J.; GUTTERSON, N.; IKONEN, G.; RICHARD E.P.; ROONEY, W. 2010. Engineering advantages, challenges, and status of grass energy crops. MASCIA, P.N.; SCHEFFRAN, J.; THOMAS, S.R.; WIDHOM, J.M.; (Ed.). **Plant Biotechnology for Sustainable production of energy and Co-products**. Dordrecht (NL): Springer, 2010. p. 125–141.

BRITO, S.S. Energia de biomassa: uma alternativa para os trópicos. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENERGIA, 3., 1986. Guatemala. **Anais...** São Paulo: CONFEA; CREA., 1986. 20p.

BROWN, K. **The economic feasibility of utilizing energy cane in the cellulosic production of ethanol**. 2012. 70p. A Thesis (Master of Science) - Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Department of Agricultural Economics and Agribusiness, Louisiana, 2012.

BUARQUE, C. **Avaliação econômica de projetos**: uma apresentação didática. Rio de Janeiro: Campus, 1991. 266p.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ENERGÉTICOS. **Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo**. Nipe/Unicamp, 2005. 538p.

CHANCELLOR, W.J. Selecting the optimum-sized tractor. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph: ASAE, v. 12, n. 2, p. 411-414, 1969.

CHEEROO-NAYAMUTH, F.C.; ROBERTSON, M.J.; WEGENER, M.K.; NAYAMUTH, A.R.H. Using a simulation model to assess potential and attainable sugar cane yield in Mauritius. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 66, p. 225–243, 2000.

COELHO, S.T. **Cogeração de eletricidade a partir de biomassa no setor industrial**. Disponível em: <<http://www.ambienta.com.br/cenbio/biomassa/cogera.htm>>, Acesso em: 15 out. 2013.

COLVIN, S.T.; McCONNELL, K.L.; CATUS, B.J. “TERMS”: a computer model for field simulation. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph: ASAE, v. 32, n. 2, p. 391-396, 1989.

CONTADOR, C.R. **Avaliação social de Projetos**. São Paulo: Atlas, 1988. 316p.

CONTADOR, C.R. **Projetos sociais**: avaliação e prática. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 400p.

CROSSLEY, C.P. Computer programs for mechanization and transport planning in developing countries. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 88., 1988, Paris. **Paper...** Paris: Agronomy Engineer, 1988. 12p.

D'HONT, A.; GRIVET, L.; FELDMANN, P.; RAO, S.; BERDING, N.; GLASZMANN, J. C. Characterization of the double genome structure of modern sugarcane cultivars (*Saccharum*

spp.) by molecular cytogenetics. **Molecular and General Genetics**, Berlim, v. 250, n. 4, p. 405-413, 1996.

DAHL, O. J. Discrete event simulation languages. In: GENUYS, F. (Ed.). **Programming languages**. London; New York: Academic Press, 1968. cap. 5, p. 349-395.

DENT, J.B.; BLACKIE, M.J. **Systems simulation in agriculture**. London: Applied Science, 1979. 180p.

DETOMINI, E.R.; **Modelagem da produtividade potencial de *Brachiaria brizantha* (VARIEDADES CULTIVADAS MARANDU E XARAÉS)**. 2004. 112p. Dissertação (Mestrado na Área de Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

DIAS, M.O.S.; ENSINAS, A.V.; NEBRA, S.A.; FILHO, R.M.; ROSELL, C.E.V.; MACIEL, M.R.W. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. **Chemical Engineering Research & Design**, London, v. 87, p. 1206-1216, 2009.

ESTADOS UNIDOS. Department of Energy. **Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: a joint research agenda**. A research roadmap resulting from the Biomass to Biofuels Workshop. Rockville, Maryland, 2005. 206p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 172p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DUVAL, B.D.; ANDERSON-TEIXEIRA, K.S.; DAVIS, S.C. Predicting greenhouse gas emissions and soil carbon from changing pasture to an energy crop. **Plos One**, San Francisco (CA), v. 8, n. 8, Article ID e72019, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 10 dez. 2014.

ERTHAL L.C.; SENTELHAS P.C. Probabilidade da sequência de dias secos em Campinas-SP como subsídio ao planejamento do uso de máquinas agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. 1995. Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995.. p. 409-411.

EVENSEN, C.I.; MUCHOW, R.C.; EL-SWAIFY, S.A.; OSGOOD, R.V. Yield accumulation in irrigated sugarcane. I. effect of crop age and cultivar. **Agronomy Journal**, Madison (WI), n.89, p.638-646, 1997.

FACCENDA, O.; SOUZA, L.G. Desempenho em cogeração em uma indústria de processamento de cana. **Engenharia Rural**, Jaboticabal, v. 9, n. 1, p. 1-70, 1998.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrianual 2012**: Anuário estatístico da agricultura brasileira. São Paulo, 2012. 482p.

GIAMALVA, M.J.; CLARKE, S.J.; STEIN, J.M. Sugarcane hybrids of biomass. **Biomass e Bioenergy**, Aberdeen, UK, v. 6, p. 61-68, 1984.

GLOVER, J.D.; COX, C.M.; REGANOLD, J.P. Future farming: a return to roots? **Scientific American**, Washington, D.C, v. 297, n. 2, p. 82–89, 2007.

GLOVER, J.D.; REGANOLD, J.P.; BELL, L.W. Increased food and ecosystem security via perennial grains. **Science**, Washington, D.C, v. 328, n. 5986, p. 1638–1639, 2010.

GOMAZAKO, M.S.; OLIVEIRA, C.J. Geração de Bagaço e Cogeração de Energia Elétrica na Indústria Sucroalcooleira. In: WORKSHOP INTERNACIONAL BRASIL-JAPÃO EM BIOCOMBUSTÍVEIS, MEIO AMBIENTE E BIOMASSA, 5., 2007, Campinas-SP. **Anais...** Campinas: UNICAMP: SP, 2007. 8p.

HANSEN, A.C.; BARNES, A.J.; LYNE, P.W.L. Simulation modeling of sugarcane harvest-mill delivery systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 45, n. 3, p. 531-538, Jan. 2002.

HANSEN, A.C.; ZHANG, Q.; WILCOX, T.A. Modeling and analysis of row harvest harvesting patterns by combines. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 1, p. 5-12, Nov. 2007.

HOFFMANN, B.M. **Parametrização e validação de um modelo de estimativas das exigências e do desempenho de gado de corte**. 2007. 112p. Dissertação (Mestrado na Área de Zootecnia) - Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

HUGHES, H.A.; HOLTMAN, J.B. Machinery complement selection based on time constrains. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph: ASAE, v. 19, n. 5, p. 812-814, 1976.

HUNT, D.R. **Farm power and machinery management**. 6th. ed. Ames: Iowa University Press. 1973. 315p.

ICHIHARA, S.M. **Desmatamento e recuperação de pastagens degradadas na região amazônica: uma abordagem através das análises de projetos**. 2003. 106 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Consulta ao banco de dados**. Disponível em: < <http://www.iea.sp.gov.br/out/bancodedados.html>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

JACKSON, P.A. Breeding for improvement sugar content in sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 277-290, 2005.

JOHNSON, J.M.F.; COLEMAN, M.D.; GESH, R.; JARADAT, A.; MITCHELL, R.; REICOSKY, D.; WILHELM, W.W. Biomass-bioenergy crops in the United States: a changing paradigm. **The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology**, Kagawaken, v.1, n.1, p.1-28, 2007.

KAMM, B., KAMM, M, GRUBER, P. (eds.). **Biorefineries – biobased industrial processes and products: status quo and future directions**. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. 949p.

KELL, D.B. Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. **Annals of Botany**, Oxford, UK, v. 108, n. 3, p. 407–418, 2011.

KLAVER, P.P.C.; VASCONCELOS JUNIOR, J.S.; GARCIA, R.F. Escolha num click: programa computacional para calcular a potência requerida de máquinas e implementos agrícolas ajuda o produtor a definir qual o melhor implemento para cada trator, **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v. 10, n. 109, p. 32-33, jul. 2011.

KLEIJNEN, J.P.C. Verification and validation of simulations models. **European Journal of operational research**, Amsterdam, v. 82, n. 1, p. 145-162, 1995.

KNOLL, J.E.; ANDERSON, W.F.; RICHARD, E.P. Harvest date effects on biomass quality and ethanol yield of new energycane (*Saccharum hyb.*) genotypes in the Southeast USA. **Biomass and Bioenergy**, Aberdeen, UK, v. 56, p. 147-156, 2013.

LANÇAS, K.P. **A evolução das alternativas energéticas com a crise do petróleo e a projeção da biomassa**. Botucatu: UNESP, 1984. 34p.

LEAL, M.R.L.V. **The potential of sugarcane as an energy source**. In: CONGRESS, INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 26., 2007. Durban, South Africa. **Proceedings...** Durban, South Africa. July 2007. p. 23-34.

LEGENDRE, B.L.; GRAVOIS, K.A. The 2006 Louisiana sugarcane variety survey. **Sugar Bulletin**, Thibodaux, Louisiana, v. 85, p. 23-27, 2007.

MACEDO, I.C.; SEABRA, J.E.A. Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol. In: SUGARCANE ETHANOL: CONTRIBUTION TO CLIMATE CHANGE MITIGATION AND THE ENVIRONMENT. ZUURBIER, P.; VOOREN, J. VAN DER (Ed.). Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic, 2008. p. 95-111.

MARK, T.; DARBY, P.; SALASSI, M. 2009. **Energy Cane Usage for Cellulosic Ethanol: Estimation of Feedstock Costs**. Selected paper prepared for presentation at the Southern, Atlanta, Georgia: Agricultural Economics Association Annual Meeting, 2009. 19p.

MATOS, M.A. **Modelo informatizado para planejamento operacional e econômico de sistemas mecanizados com a consideração da pontualidade**. 2007. 89p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MATSUOKA, S.; BRESSIANI, J.A.; MACCHERONI, W.; FOUTO, I. Bioenergia da Cana. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.) **Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Alcool**. 2 ed. Viçosa: UFV, v.1, 2012. p. 487-517.

MATSUOKA, S.; STOLF, R. Sugarcane tillering and ratooning: key factors for a profitable cropping. In: GONCALVES, J.F.; CORREIA, K.D. (Ed.). **Sugarcane: Production, Cultivation and Uses**. New York; NY, USA, 2012. p. 137-157.

MATSUOKA, S.; ARIZONO, H. Avaliação de variedades pela capacidade de produção de biomassa e pelo valor energético. **STAB**, Piracicaba, v. 6, n. 2, p. 39-46, 1987

MATSUOKA, S.; KENNEDY, A.J.; SANTOS, E.G.D; TOMAZELA, A.L; RUBIO, L.C.S; **Energy Cane: Its Concept, Development, Characteristics, and Prospects**. **Advances in Botany**, v. 2014. Article ID 597275, 13p., 2014.

MERCANTE, E.; SOUZA, E.G. de; JOHANN, J.A.; GABRIEL FILHO, A.; URIBEOPAZO, M.A. PRAPAG: software para planejamento racional de máquinas agrícolas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 322-333, 2010.

MIALHE, L.G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974. 301p.

MILAN, M. **Gestão sistêmica e planejamento de máquinas agrícolas**. 2004. 100p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

MILAN, M. **Improving operational management of harvest, transport and mechanization for sugar cane in Brasil**. 1992. 226p. Ph.D. (Thesis) - Silsoe College, Cranfield Institute of Technology, Silsoe, 1992.

MING, R; MOORE, P.H.; D'HONT, A.; GLASZMANN, J.C.; TEW, T.L; MIRKOV, T.E.; Da SILVA, J.; JIFON, J.; RAI, M.; SCHELL, R.J.; BRUMBLEY, S.M.; LAKSHMANAN, P.; COMSTOCK, J.C.; PATERSON, A.H. Sugarcane Improvement through Breeding and Biotechnology. In: JANICK, J. (Ed). **Plant breeding reviews**. New York: John Wiley, chap. 2, 2006. p. 15-118.

MOLIN, J.P.; MILAN, M. Trator-implemento: dimensionamento, capacidade operacional e custo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, cap.13, 2002. p. 409-436.

NAYLOR, T.H. **Computer simulation experiments with models of economic systems**. New York: John Wiley, 1971. 502p.

NORONHA, J.F. **Projetos agropecuários**: administração financeira, orçamento e viabilidade econômica. São Paulo: Atlas, 1987. 269p.

NUNES, J.S. **Determination of the Economic Optimal Cycle Length for Major Sugarcane (Saccharum spp.) Varieties in Louisiana**. 2010. 57p. (M.S. Thesis) - Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. 2010.

OLIVEIRA, C. **Plantio Mecanizado de Cana-de-Açúcar: Aspectos Operacionais e Econômicos**. 2012. 107p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

PANDEY, A.; SOCCOL, C.; SOCCOL, V. Biotechnological potential of agro-industrial residues: Sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 74, n. 2, p. 69, 2000.

PEREIRA, A.R. Balanço de carbono: uso de modelos e simulação. **O Agrônomo**, Campinas, v. 41, n. 3, p. 187-198, 1989.

PERRONE, J.C. Os processos hidrolíticos no aproveitamento dos recursos renováveis. **Silvicultura**, São Paulo, ed. Especial, p. 22-33, 1977.

PONCIANO, N.J.; SOUZA, P.M.; MATA, H.T.C., VIEIRA, J.R.; MORGADO, I.F. Análise de viabilidade econômica e de risco da fruticultura na região norte Fluminense. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 42, n. 4, p. 615-635, 2004.

REIN, P. W. Prospects for the conversion of a sugar mill into a biorefinery. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, v. 26, 2007. p. 44–60.

RIPOLI, T.C.C.; MOLINA Jr., W.F.; RIPOLI, M.L.C. Energy potential of sugarcane biomass in Brazil. Piracicaba, **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, p. 677-681, 2000.

ROACH, B.T. Origin and improvement of the genetic base of sugarcane. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, Tweed Heads, v. 10, p. 34-37, 1989.

ROSS, S.A.; WESTERFIELDS, R.W.; JAFFE, J.F. **Administração financeira**: corporate finance. São Paulo: Atlas, 2007. 776p.

SALASSI, M.E. **Sugarcane Crop Cycle Length Evaluation Model Users Guide**. Department of Agricultural Economics and Agribusiness, L.S.U. Agricultural Center, Staff Report No. 2012-02, 2012.

SAMUELS, G. The production of energy cane in Puerto Rico: the Hatillo project. **Journal of American Society Sugar Cane Technology**, Baton Rouge, LA, v. 3, p. 14-17, 1984.

SANTIAGO, A.L. **Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Montheit (FAO-56), nas escalas mensal e decendial**. 2011. 37p. Dissertação (Mestrado em Física do ambiente agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SANTOS, N.B. **Identificação dos fatores críticos de colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. 2011. 82p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SARRIÉS, G.A. **Controle estatístico da qualidade para impurezas minerais em carregamentos de cana-de-açúcar**. 1977. 88p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1977.

SIMS, R.E.H.; MABEE, W.; SADDLER, J.N.; TAYLOR, M. An overview of second generation biofuel technologies, **Bioresource Technology**, Trivandrum, v. 101, n. 6, p. 1570–1580, 2010.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos**: fundamentos, técnicas e aplicações. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2001. 168p.

TACHIBANA, A.; MILAN, M.; MOURÃO FILHO, F.A.A. Modelo para avaliar um sistema mecanizado para a cultura do limão siciliano (*Citrus limon*, BURM.). **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 18, n. 3, p. 34-43, 1999.

VIOLANTE, M.H.S.R. **Potencial de Produção de Cana-Energia em Áreas Agrícolas Marginais no Brasil**. 2012. 110p. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2012.

WITNEY, B. **Choosing and using farm machines**. Essex: Longman Scientific & Technical, 1988. 412p.

XAVIER, M.R. **The Brazilian Sugarcane Ethanol Experience**, Issue Analysis, n.3, Competitive Enterprise Institute, 2007.

ZAGO, C.A.; WEISE, A.D.; HORNBURG, R.A. **A Importância do Estudo de Viabilidade Econômica de Projetos nas Organizações Contemporâneas**. VI CONVIBRA – Congresso Virtual Brasileiro de Administração. Disponível em:
http://www.convibra.com.br/2009/artigos/142_0.pdf. Acesso em: 12 jul. 2014.

ANEXOS

Os dados de entrada utilizadas no modelo para o cenário-base podem ser observados na Tabela 15 e na Tabela 16. Os dados foram divididos em operações de preparo de solo e de manejo da cultura. O período de operações foi apresentado na Tabela 6 e na Tabela 7. O número de domingos e feriados foi considerado zero.

Para inserção do número de dias úteis impróprios foi utilizado um cálculo de balanço hídrico. A jornada de trabalho considerada foi de 24 horas para as operações de revolvimento de solo e de 8 horas para operações de pulverização e plantio, com uma eficiência gerencial de 70%.

Para cada operação foram consideradas máquinas com diferentes potencias nominal de motor e implementos específicos para o tipo de operação a se realizar, assim como a largura e velocidade de trabalho.

O plantio é realizado de modo semi-mecanizado, sendo todas as atividades terceirizadas. O custo operacional do plantio foi estimado em R\$ 1.199,00 por hectare, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 - Custo de plantio por hectare

Operação	Unidade	Valor unitário	Quantidade	Total
Operação mecanizada				
Embarque de mudas	V.E.	20,00	1,2	24,00
Transporte de mudas	km	5,00	40,0	200,00
Carregadeira	h M ⁻¹	120,00	1,5	180,00
Operação manual				
Corte de mudas	d H-1	150,00	3,0	450,00
Distribuição de mudas	d H-1	150,00	1,5	225,00
Alinhador de cabeceira	d H-1	150,00	0,5	75,00
Recobrimento	d H-1	150,00	0,3	45,00
Total				1.199,00

VE – Viagem embarcadora;

h M⁻¹ – Hora máquina;

d H⁻¹ – Dias por homem;

Tabela 15 - Dados de entrada do cenário-base para operações de preparo de solo e plantio da cultura

	N	NDF	DU	DAS	NUI	JT	EG	TD	RO	L	V	CCE	EFC	CCO	NC	Trator	Implemento
Dessecação	74	0	74	23	51	8	70%	128,8	10,6	12	8	9,6	50%	4,8	2,2	75	Pulverizador de barra
Subsolagem	83	0	83	26	57	24	70%	436,8	3,1	4	4,5	1,8	65%	1,2	2,7	180	Subsolador
Distribuição de corretivos	82	0	82	25	57	24	70%	420,0	3,3	10	8	8,0	65%	5,2	0,6	105	Distribuidor
Gradagem pesada	82	0	82	25	57	24	70%	420,0	3,3	7,5	10	7,5	65%	4,9	0,7	180	Grade pesada
Gradagem leve	75	0	75	20	55	24	70%	336,0	4,1	3,8	8	3,0	65%	2,0	2,1	120	Grade leve
Herbicida pré emergente	61	0	61	49	12	8	70%	274,4	5,0	6	6	3,6	50%	1,8	2,8	75	Pulverizador de barra
Sulcação / Adubação	89	0	89	50	39	24	70%	840,0	1,6	2,54	6,1	1,5	65%	1,0	1,6	180	Sulcador/Adubador
Plantio	89	0	89	50	39	8	70%	280,0	4,9								
Cobrição	89	0	89	50	39	8	70%	280,0	4,9	4,5	10	4,5	65%	2,9	1,7	75	Cobridor

Tabela 16 - Dados de entrada do cenário-base para operações de manejo da soca

	N	NDF	DU	DAS	NUI	JT	EG	TD	RO	L	V	CCE	EFC	CCO	NC	Trator	Implemento
Herbicida pós-emergente	76	0	76	65	11	8	70%	364,0	3,8	12	8	9,6	65%	6,2	0,6	75	Pulverizador de barra
Adubação cobertura	244	0	244	190	54	24	70%	3192,0	0,4	10	8	8,0	65%	5,2	0,1	105	Distribuidor
Colheita	244	0	244	190	54	24	70%	3192,0	0,4	1,6	3	0,48	65%	0,3	1,4	600	Colhedora
Transbordo	244	0	244	190	54	24	70%	3192,0				0,48	65%	0,3	2,7	180	Transbordo
Cultivador	76	0	76	65	11	24	70%	1092,0	1,3	4	4	1,6	65%	1,0	1,2	180	Cultivador

N – Número de dias;

NDF – Número de domingos e feriados;

DU – Dias úteis;

DAS – Dias agronomicamente secos;

NUI – Dias úteis impróprios;

JT – Jornada de trabalho, em horas;

EF – Eficiência gerencial, em decimal;

TD – Tempo disponível de trabalho, em horas;

RO – Rendimento operacional (ha h⁻¹);

L – Largura de trabalho (m);

V – Velocidade (km h⁻¹);CCE – Capacidade de campo efetiva (ha h⁻¹);

EFC – Eficiência de campo, em decimal;

NC – Número de conjuntos;

As demais premissas podem ser observadas nas tabelas abaixo.

Tabela 17 - Índices comerciais

Índices comerciais	Valor	Unidade
Preço Biomassa + frete (40 km)	68	R\$ t ⁻¹
Arrendamento	800	R\$ ha ⁻¹
Preço do caldo	45	R\$ t ⁻¹
ICMS Estadual	0,17	%
ICMS Energia	0,25	%
ICMS Interestadual	0,12	%
PIS	0,0165	%
COFINS	0,076	%
IR	0,25	%
ITR	0,45%	%
FUNRURAL	0,023	%

Tabela 18 - Recursos humanos

	Salário (R\$)	Encargos sociais (R\$)	Total mensal (R\$)	Quantidade
Agrícola				
Tratorista comum	1.200	940	2.140	9
Colhedora	2.500	1.958	4.458	6
Motorista Veiculos Pesados	2.500	1.958	4.458	21
Gerente Agricola	9.000	7.050	16.050	1
Técnico Agrícola	2.500	1.958	4.458	1
Auxiliar Agrícola	2.000	1.567	3.567	1
Auxiliar Mecânico	2.000	1.567	3.567	1
Bombeiro	2.500	1.958	4.458	6
Industrial				
Gerente industrial	9.000	7.050	16.050	1
Auxiliar	3.000	2.350	5.350	1
Coordenador	5.000	3.917	8.917	1
Operação	900	705	1.605	5
Tratorista	1.200	940	2.140	1
Administrativo				
Diretor	15.000	11.750	26.750	1
Gerente Administração	5.000	3.917	8.917	1
Coord. Administrativo	4.000	3.133	7.133	1
Auxiliar Escritório	2.500	1.958	4.458	1
Contratos				
Advogado			2.000	
Contador			3.000	

Tabela 19 - Custo de transporte

Dados operacionais	Unidade	Valor
Horas de trabalho mês	h mês ⁻¹	176
Consumo de combustível	km L ⁻¹	2,50
Intervalo entre trocas de óleo para motor	km	15.000
Intervalo entre trocas de óleo para diferencial	km	60.000
Litros de óleo para motor por troca	litro	30,00
Litros de óleo para diferencial por troca	litro	10
Número de pneus		10
Intervalo entre recapagens	km	100.000
Número de recapagens		2
Custos estimados de manutenção	R\$ km ⁻¹	0,29
Intervalo entre lubrificações	km	2.000
Vida útil do conjunto	km	1.000.000
Dados de mercado		
Valor do conjunto	R\$	286.422,00
Vida útil do conjunto	meses	120
Valor residual do veículo (40% valor novo)	R\$	114.568,80
Preço do óleo para motor	R\$ L ⁻¹	7,52
Preço do óleo para diferencial e câmbio	R\$ L ⁻¹	7,53
Preço do combustível	R\$ L ⁻¹	1,90
Preço do pneu	R\$	1.547,25
Preço da recapagem	R\$	478,20
Preço da lubrificação/lavagem	R\$	180,00
IPVA / seguro obrigatório	R\$ ano ⁻¹	3.761,39
Seguro do conjunto (7% aa)	R\$ ano ⁻¹	20.049,54
Itens de custo fixo		
Depreciação	R\$ mês ⁻¹	1.432,11
Remuneração de capital	R\$ mês ⁻¹	2.283,97
IPVA / seguro obrigatório	R\$ mês ⁻¹	313,45
Seguro	R\$ mês ⁻¹	1.670,80
Custo fixo	R\$ mês ⁻¹	1.984,24
Itens de custo variável		
Combustível	R\$ km ⁻¹	0,76
Óleo para motor	R\$ km ⁻¹	0,02
Óleo para diferencial	R\$ km ⁻¹	0,001
Pneu	R\$ km ⁻¹	0,25
Lubrificação/lavagem	R\$ km ⁻¹	0,09
Manutenção	R\$ km ⁻¹	0,29
Custo variável	R\$ km⁻¹	1,40
Custos fixos	R\$ h⁻¹	11,27

A Figura 20 apresenta dados, de modo agrupado por mês, de temperatura e precipitação, utilizadas para a elaboração do balanço hídrico.

Figura 20 - Dados de entrada para a geração do balanço hídrico

Para o cálculo do balanço hídrico, são necessários ainda o valor do coeficiente da cultura, que corresponde a razão entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) e a evapotranspiração de referência (ET_o). Seu valor é variável de acordo com o estágio fenológico em que se encontra.

Tabela 20 - Coeficiente da cultura (k_c) e coeficiente de produtividade (k_y) utilizados no balanço hídrico para obtenção dos dias agronomicamente secos e estimativa de produtividade

Mês	Kc	Ky	Mês	Kc	Ky
Janeiro	0,7	0,1	Julho	1,25	0,5
Fevereiro	0,4	0,75	Agosto	1,25	0,5
Março	0,4	0,75	Setembro	1,25	0,5
Abril	0,75	0,75	Outubro	1,25	0,5
Maio	0,75	0,75	Novembro	1,25	0,5
Junho	0,75	0,75	Dezembro	1,25	0,5

Com os dados organizados, é possível através da modelagem matemática, estimar a quantidade de água armazenada no solo a cada dia. Caso a quantidade de água armazenada no solo seja inferior a 90% da capacidade de água disponível (CAD) e se a chuva no dia for inferior

a 5 mm, significa que o dia é agronomicamente seco, ou seja, possível de trabalhar sem maiores dificuldades ou que não causem nenhuma adversidade à produção. A CAD do solo utilizado para a elaboração do modelo foi a seguinte (Tabela 21).

Tabela 21 - Capacidade de água disponível do solo (CAD) para as diferentes texturas de solo

Textura do solo	CAD (mm)
Argiloso	65
Médio	55
Arenoso	45

Os dias agronomicamente secos gerados no modelo podem ser observados na Tabela 22.

Tabela 22 - Dias agronomicamente secos esperados

Meses	Dias secos esperados
Janeiro	12
Fevereiro	3
Março	13
Abril	23
Maio	26
Junho	26
Julho	28
Agosto	27
Setembro	25
Outubro	21
Novembro	14
Dezembro	23
Total	241

Para a simulação da produtividade da cultura de acordo com a textura do solo, utilizaram-se os coeficientes de produtividade (ky), apresentados na Tabela 20. Para o cálculo, avaliou-se o período de 1 mês. Caso houvesse déficit hídrico em algum momento, o valor é confrontado com o ky do período e descontado da produtividade potencial.

Observa-se pelos resultados da Tabela 13 que quanto maior a CAD do solo, menor será o período de déficit hídrico. Consequentemente, maior será a produtividade.