

# Avaliação das alternativas de recolhimento do palhiço de cana<sup>1</sup>

Paula Horta Lemos<sup>2</sup>  
José Geraldo Vidal Vieira<sup>3</sup>  
João Eduardo Azevedo Ramos da Silva<sup>4</sup>  
Rosane Faria Nunes<sup>5</sup>

**Resumo** – O setor sucroalcooleiro possui alto potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir do palhiço de cana, mas os problemas ligados ao seu recolhimento são os principais entraves da atividade. Os meios de recolhimento mais em uso são o transporte do palhiço junto com a cana picada colhida mecanicamente (sistemas de colheita integral e parcial) e o enfardamento do palhiço, depois da colheita mecanizada da cana. O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnico-econômica do uso das três alternativas de recolhimento do palhiço para cogeração de energia. A metodologia está dividida em duas partes: 1) desenvolvimento de uma árvore de decisão baseada em valor e probabilidades para calcular o valor esperado do valor presente líquido (VPL) nas três alternativas; 2) formulação de um modelo de decisão multicritério, em que são avaliadas as três alternativas de recolhimento mediante os vários critérios conflitantes nessa escolha. Pela análise econômica, a alternativa escolhida foi a do enfardamento; pela análise técnica, a alternativa escolhida foi a da colheita parcial. As análises fornecem suporte para a proposição de políticas públicas para incentivo ao uso do palhiço como insumo para a geração de energia.

**Palavras-chave:** análise multicritério, cogeração de energia, VPL.

## Evaluation of sugarcane trash picking alternatives

**Abstract** – The sugar and alcohol sector has a high potential for generating electricity surpluses from sugar cane trash, but the problems related to trash harvesting are considered the main obstacles to this activity. The most commonly used picking routes are transporting the trash together with the mechanically harvested cane (integral and partial harvesting system) and baling the straw in bales, carried out after the mechanical harvesting of the cane. The objective of this paper is to analyze the technical and economical feasibility of the use of the three alternatives for collecting the trash for energy cogeneration. The methodology is divided into two independent parts: (1) A decision tree based on value and probabilities is developed to calculate the expected value of NPV in the three alternatives. (2) Formulation of a multicriteria decision model, in which the three alternatives of col-

<sup>1</sup> Original recebido em 30/8/2018 e aprovado em 18/12/2018.

<sup>2</sup> Graduada em Engenharia de Produção, mestre em Engenharia de Produção. E-mail: paula\_lemos\_3@hotmail.com

<sup>3</sup> Graduado em Ciência da Computação, doutor em Engenharia de Produção. E-mail: jose-vidal@ufscar.br

<sup>4</sup> Graduado em Engenharia Agrícola, doutor em Engenharia de Produção. E-mail: jesilva@ufscar.br

<sup>5</sup> Graduada em Economia, doutora em Economia. E-mail: rosane.nunes.faria@gmail.com

lection are evaluated through the various conflicting criteria in this choice. By the economic analysis the alternative chosen was the “Baling”, while by the technical analysis, the alternative chosen was the “Partial Harvest”. The analyzes provide support for the proposal of public policies to encourage the use of trash as an input for the generation of energy.

**Keywords:** multicriteria analysis sugarcane, energy cogeneration, NPV.

## Introdução

Segundo Prado (2007), o setor sucroalcooleiro é considerado autossuficiente em termos de geração de energia elétrica a partir das biomassas da cana: o bagaço, disponível na indústria depois da extração do caldo e já utilizado como insumo energético; e o palhiço, que fica disponível no campo depois da colheita da cana e pode ser recuperado e transportado para fins energéticos (Corrêa Neto & Ramon, 2002). Embora a geração de excedentes de energia do setor seja baixa, o potencial de geração é grande, pois o período de safra da cana-de-açúcar coincide com o período de baixos índices pluviométricos. Ou seja, essa alternativa é bastante viável para o incremento de energia no sistema elétrico (Souza & Azevedo, 2006).

Embora o palhiço e o bagaço de cana tenham características de combustível semelhantes, tornando-os adequados para a produção de energia, o poder calorífico do palhiço é maior. Cada tonelada de palhiço equivale a 1,8 tonelada de bagaço (Khatiwada et al., 2016).

Pesquisas têm abordado os aspectos econômicos referentes à cogeração de energia a partir do palhiço como fatores fundamentais para que a eletricidade se torne um produto tão importante quanto o etanol e o açúcar no setor sucoenergético no Brasil (Florentino & Spadotto, 2007; Dias et al., 2013; Furlan et al., 2013; Germek et al., 2013). Nesses estudos, os custos de recolhimento de palhiço e o preço para a comercialização da energia são frequentemente os fatores mais relevantes na análise das alternativas de recolhimento (colheitas integral e parcial, e enfardamento) e podem ser considerados um modelo de viabilidade econômica. No entanto, aspectos agroindustriais (Hassuani et al., 2005; Carvalho et al., 2017) também são importantes na

escolha das alternativas de recolhimento. Esses aspectos se referem principalmente à umidade e à qualidade do palhiço, que podem interferir na separação cana-palhiço e na produtividade da cogeração de energia (Macedo et al., 2008).

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnico-econômica do uso de três alternativas de recolhimento do palhiço (colheitas integral e parcial, e enfardamento) para cogeração de energia. A análise econômica é feita por meio do cálculo do valor esperado do valor presente líquido (VPL) das três alternativas. O preço, obtido no mercado *spot*, é um dos principais fatores que interferem no cálculo da receita, enquanto os custos operacionais são os mais relevantes no cálculo dos custos. Além da análise técnica, fatores agroindustriais fazem parte de um modelo hierárquico de decisão multicritério. O modelo foi desenvolvido pela aplicação do método *Simple Multi-Attribute Ranking Technique* (Smart).

## Revisão bibliográfica

### Alternativas de recolhimento do palhiço de cana-de-açúcar

Os tipos de recolhimento atualmente mais usados são o transporte do palhiço junto com a cana colhida mecanicamente (sistemas integral e parcial) e o enfardamento da palha mais seca, depois da colheita mecanizada da cana.

**1) Sistema de colheita integral:** a cana é coletada juntamente com o palhiço, por meio do desligamento dos ventiladores de limpeza da colhedora, sendo o material transportado à usina nos mesmos veículos usados na colheita convencional (Michelazzo & Braunbeck, 2008). Em seguida, o palhiço é separado da cana por meio

de uma estação de limpeza a seco, onde uma forte corrente de ar separa os colmos do palhiço. Segundo Germek et al. (2014), tal limpeza deve ser feita porque o palhiço contém partículas de diversos tamanhos e formas que causam queda da eficiência da combustão pela obstrução do sistema de alimentação das caldeiras.

**2) Sistema de colheita parcial:** parte do palhiço é transportada junto com a cana e, depois, na indústria, é separada em uma estação de limpeza a seco. Isso possibilita maior facilidade operacional, pois interfere menos na operação cotidiana da usina (Hassuani et al., 2005).

**3) Enfardamento:** durante a colheita da cana, o palhiço é separado dos colmos por um sistema de ventilação composto por dois extractores localizados na colhedora. De acordo com Michelazzo & Braunbeck (2008), o recolhimento do palhiço ocorre cerca de dez dias depois da colheita – para sua secagem. Depois disso, é feito o aleiramento do palhiço, o enfardamento e seu transporte para a usina.

A Tabela 1 mostra as principais características dos sistemas de recolhimento do palhiço. As alternativas de sistemas de colheita integral e parcial mantêm as mesmas características. A colheita parcial é apenas uma derivação do sistema de colheita integral, cuja diferença está na quantidade de palhiço recolhido, e, consequentemente, nos custos de recolhimento e receita da venda de energia, que são menores para a colheita parcial.

## Critérios relevantes para definição da alternativa de recolhimento do palhiço

Segundo Pierossi & Fagundes (2013), os principais pontos a serem considerados na retirada do palhiço do campo são estes: custo de transporte, umidade do palhiço no momento do transporte e desempenho da instalação industrial na remoção de terra e na trituração do palhiço, pois altos teores de impurezas minerais poderão causar danos às caldeiras.

Segundo Hassuani et al. (2005), o índice de impurezas minerais (terra), ou seja, a qualidade do palhiço, é um fator crítico no processo; por isso, torna-se necessária a limpeza do palhiço de modo a alcançar valores abaixo de 2% de impurezas minerais. Em levantamentos de campo de Ripoli (2004), o teor de impurezas minerais encontrado no palhiço enfardado foi de 6,43%. Representando importante fator dessa operação, a densidade de carga é impactada negativamente pelo aumento do teor de impureza vegetal. A densidade da mistura de cana picada com palhiço sofre redução de 1/4 a 1/3 quando se transporta cargas com 10% a 15% de impurezas vegetais. Outro aspecto que deve ser considerado é o teor de umidade do palhiço. A umidade aumenta o peso do palhiço no transporte, além de dificultar a limpeza das impurezas no sistema de limpeza a seco. No sistema de colheita integral, o palhiço possui umidade de 35% a 40%; no palhiço enfardado, a umidade é de aproximadamente 15%, pois o enfardamento é feito dias

**Tabela 1.** Características dos sistemas de recolhimento integral, parcial e enfardamento do palhiço de cana.

Sistemas de colheita integral e parcial	Enfardamento
Apenas uma colheita	Duas colheitas (colheita da cana e do palhiço)
Palhiço recolhido com maior umidade	Palhiço recolhido com menor umidade
Necessário sistema de limpeza a seco	Não necessita do sistema de limpeza a seco
Menor densidade no transporte	Maior densidade no transporte
Menor gasto com combustível	Maior gasto de combustível
Menor compactação do solo	Maior compactação do solo

depois da colheita, exatamente para garantir a secagem do palhiço (Pierossi & Fagundes, 2013).

Outro ponto a ser considerado é o desempenho da separação cana/palhiço. Na colheita integral, esse fator é medido pela eficiência da estação de limpeza a seco, pois o custo deve ser calculado com base na quantidade de palhiço separado na unidade industrial e não em função da quantidade de palhiço transportado (Germek et al., 2013). Já em relação ao enfardamento, a eficiência de separação cana/palhiço depende do desempenho dos ventiladores da colhedora de cana, que, durante a colheita da cana, separam o material mais leve (palhiço) para o solo (Ripoli, 2004). A produtividade de energia elétrica a partir do palhiço também é um critério importante para a determinação da alternativa de recolhimento.

Prado (2007) aponta como aspecto relevante da cogeração com o palhiço a maior possibilidade de geração de material particulado para a atmosfera por causa das impurezas dessa biomassa, o que significa investimentos maiores para a caldeira e os equipamentos de remoção de material particulado, como a estação de limpeza a seco (Pierossi & Fagundes, 2013). Hassuani et al. (2005) afirmam que o custo de investimento é definido de acordo com a tecnologia a ser adotada. Quando se considera o sistema de enfardamento para recolhimento do palhiço, deve-se investir em máquinas enfardadoras, enleiradoras e sistema de transporte para recolhimento dos fardos; já no caso das colheitas integral e parcial, devem ser adquiridos o sistema de limpeza a seco e frota adicional para transporte da cana e do palhiço.

Os custos operacionais da cogeração são calculados anualmente e se referem à operação e à manutenção dos insumos e maquinários. Destacam-se os custos com transporte, consumo de energia, mão de obra e custos de manutenção dos equipamentos agrícolas e industriais. Para Smithers (2014), a grande dificuldade para o aproveitamento do palhiço é o custo do sistema de transporte, principalmente com combustível. Mas o consumo de energia também deve ser considerado. Para Ripoli (2004), o sistema de

colheita integral, que utiliza a estação de limpeza e pré-tratamento das impurezas, consome muita energia com o acionamento de motores elétricos, mas economiza em diesel por fazer a colheita do palhiço juntamente com a cana. Já os custos com mão de obra são maiores para o enfardamento, dada a necessidade das duas colheitas – muita mão de obra é empregada nas operações de transporte, carregamento e descarregamento dos fardos. Além disso, como o recolhimento de palhiço exige a mobilização de intenso maquinário, isso acarreta altos custos de manutenção (Michelazzo & Braunbeck, 2008).

Por fim, segundo Souza & Azevedo (2006), o principal critério para a tomada de decisão sobre a comercialização de excedentes de energia a partir do palhiço é o preço da energia elétrica. A maior limitação é referente à grande volatilidade de preços da energia, por diversos fatores: impossibilidade de armazenamento, sazonalidade de produção e consumo e grande sensibilidade dos custos marginais em relação à quantidade produzida (Pokalsky & Robinson, 1997). Isso faz com que surjam programas de incentivo à comercialização da energia elétrica.

### **Políticas de incentivos à cogeração de energia de biomassa da cana**

De acordo com Prado (2007), as dificuldades inerentes à comercialização dos excedentes de energia elétrica atingem principalmente fatores relacionados ao preço da energia e à escassez de políticas públicas com financiamentos e condições atrativas aos empreendedores. Isso desmotiva o aproveitamento do potencial de geração de eletricidade pelo setor sucroalcooleiro. Porém, alguns programas de incentivos à produção de energia com a biomassa da cana-de-açúcar foram criados e merecem destaque (Souza & Azevedo, 2006).

Um desses programas é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que viabiliza que os países desenvolvidos façam investimentos em projetos sustentáveis nos países subdesenvolvidos, desde reflorestamentos, substituição de

combustíveis, uso final da energia e eficiência energética até a inserção de formas de geração de energia renováveis (Ellis et al., 2007). Assim, os países investidores recebem créditos de carbono, correspondentes à redução de emissões proporcionadas aos países em desenvolvimento, que contabilizarão para atingir suas metas internas estabelecidas pelo Protocolo de Quioto (Torres et al., 2016).

Outro programa com objetivos sustentáveis foi o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). Castro & Dantas (2008) explicam que a meta desse programa foi a diversificação da matriz energética brasileira com o uso de fontes renováveis de energia vislumbrando aumento da participação da energia elétrica produzida com base nas fontes alternativas eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa no Sistema Elétrico Interligado Nacional. De acordo com Souza & Azevedo (2006), o Proinfa atraiu 426 projetos para a geração de 6.601 MW de energia, o dobro do previsto para a 1ª fase do programa. Porém, os projetos para energia gerada a partir da biomassa (bagaço e palhicho de cana, casca de arroz, restos de madeira e biogás) ofertaram apenas 995,25 MW. O baixo interesse do setor sucroalcooleiro pelo Proinfa foi explicado por Castro & Dantas (2008) como resultado do baixo preço do MWh oferecido pela Eletrobrás, de R\$ 93,77. O Proinfa contou com o suporte do BNDES, que implantou em 2000 o Programa de Apoio à Co-geração de Energia Elétrica a partir de Resíduos da Cana-de-Açúcar, porém as linhas de financiamento governamentais podem ser aprimoradas.

O Projeto Sugarcane Renewable Electricity (Sucre) é outro programa de incentivo à cogeração de energia da biomassa da cana. O projeto busca eliminar os gargalos que impedem usinas de gerarem eletricidade de forma plena e sistemática usando o palhicho disponível com a colheita de cana crua. Entre os principais objetivos, o programa se dedica a aumentar significativamente a produção de eletricidade com baixa emissão de GEE pelo uso do palhicho da cana. A iniciativa é promovida pelo Laboratório

Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), que, com usinas parceiras, desenvolve soluções que elevem a geração à plenitude. O projeto é financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente e gerido pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (Pnud). Assim, de acordo com Sucre (2017), a equipe trabalha na solução dos problemas que impedem as usinas de gerarem energia por meio do palhicho. O projeto busca resultados relacionados à operacionalização da tecnologia para coleta e conversão do palhicho de cana em eletricidade, demonstração da viabilidade econômica do palhicho para cogeração de energia, avaliação dos efeitos da coleta de palhicho e formulação do arcabouço legal e regulatório para promover o uso sustentável do palhicho de cana para a produção de eletricidade e venda à rede.

Outra iniciativa é o RenovaBio, política de Estado que visa traçar a participação dos combustíveis renováveis de forma compatível com o crescimento do mercado. O que se pretende é a implementação de uma política pública que traga tanto segurança energética quanto a redução de GEE, além de previsibilidade ao mercado de biocombustíveis (Brasil, 2017). Segundo Ribeiro (2018), essa política está alinhada com o Acordo de Paris, no qual o Brasil assumiu o compromisso de contribuir com a meta de redução de 37% das emissões de GEE até 2025. No programa, cada produtor deve se certificar e receberá uma nota relacionada com sua maior ou menor capacidade de mitigar a emissão de GEE. Basta fazer o uso das melhores práticas e tecnologias para produzir um biocombustível com baixa emissão de carbono e conseguir uma nota alta para a usina (Ribeiro, 2018). Na prática, será negociada na bolsa um ativo financeiro chamado Crédito de Descarbonização por Biocombustíveis (CBIO). A usina com nota melhor terá o maior número de CBIO. Portanto, quanto mais eficiente for o processo de uma empresa, mais crédito ela terá para comercializar, trazendo incentivos para que os produtores invistam na melhoria dos processos. Apesar de ser um programa dedicado aos biocombustíveis, a geração de energia também deverá ser estimulada com o RenovaBio. Dessa



forma, nesse processo está a geração de bioeletricidade por meio da biomassa da cana, que já faz parte do tripé que sustenta as receitas das usinas sucroalcooleiras ao lado da produção de açúcar e de etanol. Segundo Jardim (2017), o RenovaBio incorpora o conceito de meritocracia, com reconhecimento não uniforme, considerando níveis tecnológicos e de evolução. Por exemplo, usinas que possuem cogeração receberão tratamento diferenciado; as que possuem cogeração e estão caminhando para o etanol de segunda geração receberão outro, e assim sucessivamente.

Portanto, políticas de incentivos como essas podem, de certa forma, influenciar a escolha das alternativas de recolhimento, à medida que o preço de comercialização de excedentes de energia são diretamente afetados, o que eleva a importância de avaliar o preço da energia quando da escolha da alternativa.

## Material e métodos

A metodologia está dividida em duas partes: 1) o desenvolvimento de uma árvore de decisão baseada em valor e probabilidades para calcular o valor esperado do VPL nas três alternativas, considerando os custos de investimento e operacionais e o preço da energia no mercado *spot* para cálculo da receita; 2) a formulação de um modelo de decisão multicritério, em que são exibidas todas as etapas para avaliação das três alternativas de recolhimento. Nessa etapa, obtém-se a alternativa recomendada pelo decisor, ou seja, a que apresenta a maior utilidade.

### **Análise econômica: uso da árvore baseada em valor e probabilidades**

O primeiro passo para a construção da árvore de decisão é considerar as alternativas importantes (Casarotto Filho & Kopittke, 2011). Para esta pesquisa, a decisão se relaciona com as alternativas de recolhimento do palhicho no campo: enfardamento, colheita integral e colheita parcial. Em seguida, é necessário afastar as ocorrências incertas de cada decisão. Para

esse modelo, tais consequências se referem ao preço da energia elétrica, já que ele depende do mercado.

Posteriormente, devem ser atribuídas probabilidades às diferentes ocorrências incertas do modelo, ou seja, probabilidades de ocorrência serão dadas aos preços da energia, fator essencial para a decisão de comercialização da energia excedente. Em relação ao preço da energia, para que sejam estimadas as probabilidades de sua ocorrência em cada ramo da árvore de decisão, essa etapa considera a realização prévia de uma pesquisa sobre o histórico de preços de energia no mercado *spot*. Esses preços são fornecidos pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que realiza mensalmente o cálculo da média mensal do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) por submercado. Esta pesquisa considera o período de julho de 2016 a junho de 2017, para o Sudeste, pois é nessa região que está a maior parte das usinas do Brasil.

Por último, é calculado o VPL, que avalia os negócios a partir das estimativas dos seus investimentos iniciais, fluxo de caixa no período, utilizando para isso a taxa de desconto exigida pelo mercado para investimentos com risco idêntico ao do projeto.

### **Análise de decisão multicritério**

Opta-se nesta pesquisa pelo uso do método Simple Multi-Attribute Ranking Technique (Smart) (Goodwin & Wright, 2014) para o desenvolvimento do modelo multicritério. A escolha dessa ferramenta deve-se principalmente ao fato de suas principais aplicações serem referentes a assuntos ligados a meio ambiente, transporte, logística em geral e problemas de manuseio de carga (Velasquez & Hester, 2013)

A análise multicritério é elaborada em oito etapas:

**1) Entendimento do problema e classificação** – fase cuja característica é o levantamento de informações relevantes do problema e com-

provação do seu grau de complexidade, por meio da literatura e de visitas às usinas.

**2) Determinação dos critérios e criação da árvore de decisão** – os critérios são as variáveis relevantes para o problema, definidos com base na revisão de literatura e confirmados por meio dos questionamentos aos tomadores de decisão.

**3) Determinação das alternativas** – as alternativas são o conjunto de soluções eficientes para o objetivo selecionado, estimadas a partir da revisão de literatura, participação em eventos, visitas e entrevistas com os decisores.

**4) Avaliação das alternativas para cada critério** – o objetivo é descobrir quão bem é o desempenho das alternativas em relação a cada critério. Curvas de utilidade para cada critério são obtidas, por meio da técnica de equivalente certo (Varian, 2006), para representar o risco dos decisores. Segundo Ensslin et al. (2001), as funções de utilidade são aplicadas para transformar os valores associados aos critérios de cada alternativa em uma escala de dimensão comum.

**5) Hierarquização dos critérios** – a definição das ponderações ou pesos para os critérios reflete a importância deles para o decisor no problema a ser solucionado. Esta pesquisa adota o método Swing Weights do Smart. Nele, os critérios são ordenados de forma decrescente, sendo atribuído o valor 10 para o critério considerado menos importante. Os critérios restantes são avaliados em relação a esse critério, e os valores atribuídos devem ser maiores do que 10 e proporcionais à preferência. Depois, os pesos são normalizados (Goodwin & Wright, 2014).

**6) Avaliação das alternativas** – por meio das funções de utilidade e as ponderações definidas pelo decisor para cada critério, é possível obter um valor de utilidade global para cada alternativa. A alternativa com maior valor nesta função pode ser definida como solução provisória.

**7) Análise de sensibilidade** – permite verificar quão confiável é a solução com melhor de-

sempenho diante das variações nas preferências ou cenários propostos pelos decisores.

**8) Determinação da alternativa com melhor desempenho global** – avalia-se quão bem cada alternativa se aproxima do objetivo global. No fim dessa etapa, a alternativa com melhor desempenho global é então recomendada.

## Resultados e discussão

### Análise econômico-financeira – árvore baseada em valor e probabilidades

Nesta etapa, é feita a análise de decisão baseada na avaliação dos investimentos, por meio do cálculo do VPL, para a venda de excedente de energia, considerando os preços da energia no mercado e as alternativas de recolhimento de palhiço. Os valores foram baseados nos dados fornecidos por usinas convencionais do setor sucroalcooleiro.

As usinas convencionais geram em média 0,8 MWh de energia por tonelada de palhiço a partir da operação de enfardamento. Para a colheita integral, a produtividade cai para 0,7 MWh de energia por tonelada de palhiço; e para a colheita parcial, o valor é de 0,75 MWh de energia por tonelada. Elas produzem em média 100 mil toneladas de palhiço por ano, escala ideal para uma unidade de processamento de fardos e de colheita integral. A colheita parcial recolheria metade dessa quantidade, pois boa parte do palhiço disponível permanece no solo quando é ligado um dos sistemas de ventiladores da colhedora.

Os custos de investimentos para a cogeração de energia com palhiço são de aproximadamente de R\$ 6.600.000,00 para a alternativa de enfardamento, R\$ 6.000.000,00 para a colheita integral e R\$ 5.000.000,00 para a parcial. Os custos de operação e manutenção somam-se na safra em torno de R\$ 5.000.000,00 para o enfardamento, R\$ 4.400.000,00 para a colheita integral e R\$ 2.900.000,00 para a parcial.

Considerando a taxa de desconto de 11%, calcula-se o VPL do investimento da usina para o final da primeira safra para as três alternativas de recolhimento. Por meio do cálculo do VPL (Casarotto Filho & Kopittke, 2011), obtém-se o valor de cada alternativa, de acordo com o preço da energia.

### Enfardamento

Custo de investimento: R\$ 6.600.000,00; produção de excedente de energia: 0,8 MWh/t × 100.000 t = 80.000 MWh; taxa de desconto: 11% (Tabela 2).

### Colheita integral

Custo de investimento: R\$ 6.000.000,00; produção de excedente de energia: 0,7 MWh/t × 100.000 t = 70.000 MWh; taxa de desconto: 11% (Tabela 3).

### Colheita parcial

Custo de investimento: R\$ 5.000.000,00; produção de excedente de energia: 0,75 MWh/t × 50.000 t = 37.500 MWh; taxa de desconto: 11% (Tabela 4).

A Figura 1 mostra o cálculo do VPL para cada alternativa por meio da árvore de decisão baseada em valores e probabilidades.

Considerou-se para os cálculos do VPL um período de três anos e as probabilidades iguais, de 25%, para cada preço de energia da alternativa de recolhimento.

Portanto, o valor esperado do VPL é de R\$ 17.152.665,00 para o enfardamento. Para as outras alternativas, os valores são de R\$ 14.698.263,00 e R\$ 4.774.859,00. O pior E(VPL) é para a colheita parcial, principalmente por causa da menor quantidade de energia ge-

**Tabela 2.** Cálculo do VPL para a alternativa de enfardamento de palhiço de cana.

Preço da energia (R\$)	Receita (R\$)	Custos op. (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	VPL (R\$)
106,00	8.480.000	5.000.000	3.480.000	1.904.127
125,00	10.000.000	5.000.000	5.000.000	5.618.574
172,00	13.760.000	5.000.000	8.760.000	14.806.941
333,00	26.640.000	5.000.000	21.640.000	46.281.986

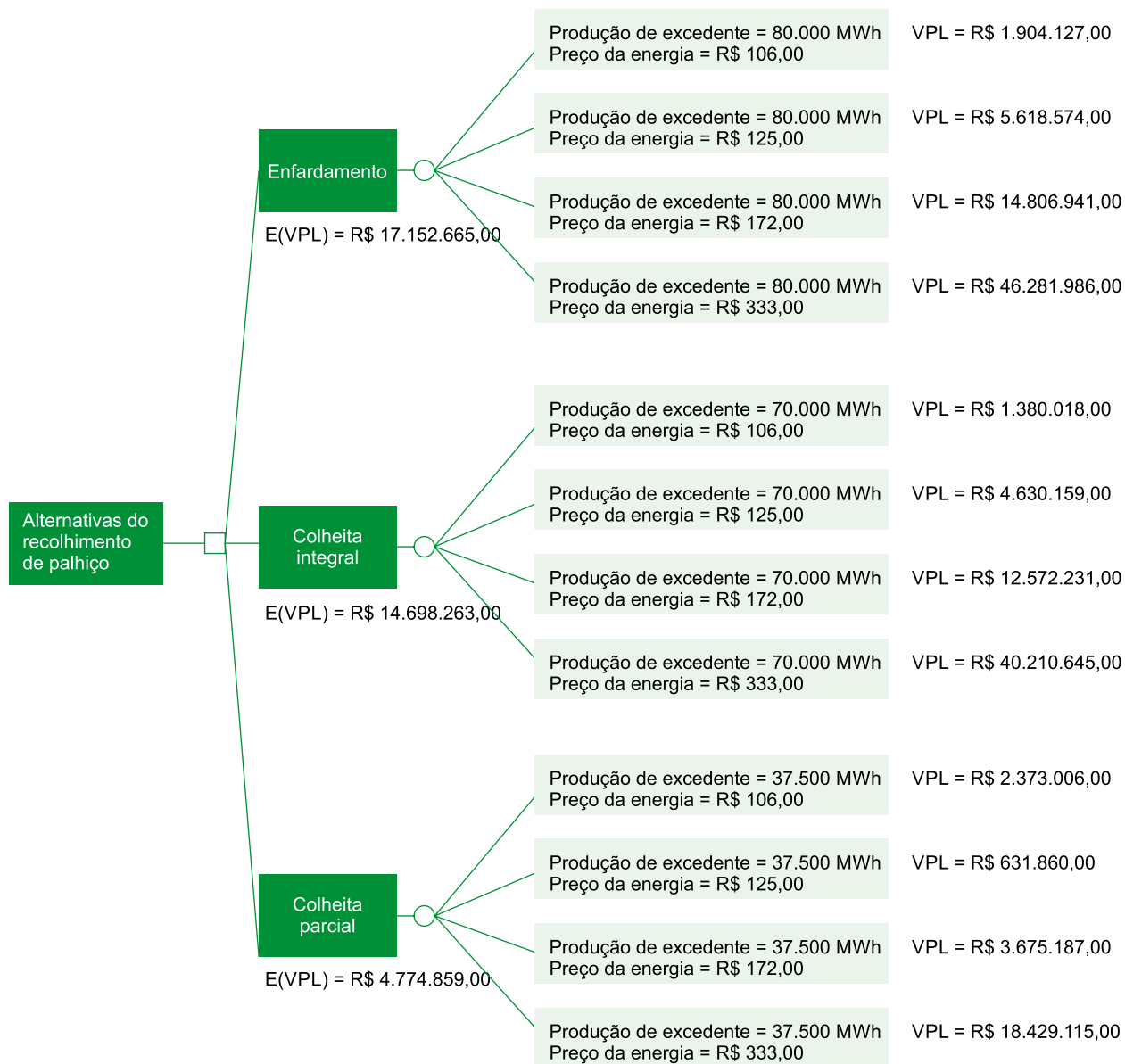
**Tabela 3.** Cálculo do VPL para a alternativa de colheita integral de palhiço de cana.

Preço da energia (R\$)	Receita (R\$)	Custos op. (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	VPL (R\$)
106,00	7.420.000	4.400.000	3.020.000	1.380.018
125,00	8.750.000	4.400.000	4.350.000	4.630.159
172,00	12.040.000	4.400.000	7.600.000	12.572.231
333,00	23.310.000	4.400.000	18.910.000	40.210.645

**Tabela 4.** Cálculo do VPL para a alternativa de colheita parcial de palhiço de cana.

Preço da energia (R\$)	Receita (R\$)	Custos op. (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	VPL (R\$)
106,00	3.975.000	2.900.000	1.075.000	-2.373.006
125,00	4.687.500	2.900.000	1.787.500	-631.860
172,00	6.450.000	2.900.000	3.550.000	3.675.187
333,00	12.487.500	2.900.000	9.587.500	18.429.115





**Figura 1.** Recolhimento de palhiço de cana – árvore baseada em valor.

rada nessa opção. Porém, Hassuani et al. (2005) afirmam que essa menor quantidade energética produzida é consequência da quantidade de palhiço recolhida, que é muito menor nesse caso. Ressalta-se que essa alternativa é a que impacta menos as atividades rotineiras da usina, cujo foco é a produção de açúcar e álcool (Linero, 2017).

Deve-se ressaltar o fato de os preços da energia considerados serem faixas de preços médios do período de julho de 2016 a junho de

2017. Como o fator “preço da energia” é muito volátil, resultados diferentes poderiam ser obtidos para outros valores de preços da energia. Essa grande volatilidade explica a insegurança do setor sucroalcooleiro em investir na geração de energia elétrica (Furlan, 2013). O preço do MWh gerado pelo setor sucroalcooleiro ofertado pela empresa depende também de a geração ocorrer durante todo o ano, e, para isso, há a necessidade de utilização do palhiço, fato que

permitiria a obtenção de biomassa para a entressafra também (Souza & Azevedo, 2006). Nesse contexto, segundo Trombeta & Caixeta Filho (2017), seria essencial a atuação de políticas públicas para incentivar a produção de energia durante o ano todo e prever uma melhor determinação dos preços da energia e formalização ao setor sucroalcooleiro.

Castro & Dantas (2008) relatam a necessidade de políticas para obtenção de preços diferenciados nos leilões de energia para as fontes de biomassa sustentáveis e uma melhor previsibilidade e planejamento econômico do setor, para criar um ambiente mais seguro e com maior probabilidade de melhorias tecnológicas.

Outros resultados também poderiam ser alcançados para diferentes valores de “custos operacionais”. Essa possibilidade não é uma realidade distante, pois políticas públicas têm incentivado a produção de energia por meio da biomassa da cana, e com isso os custos operacionais relacionados à cogeração podem cair por causa da economia de escala.

## **Análise técnica – modelo multicritério**

**Etapa 1. Entendimento do problema:** a implementação do modelo multicritério é elaborada com base nos dados de usinas sucroalcooleiras com capacidade de moagem de aproximadamente três milhões de toneladas de cana para a produção de açúcar, etanol e energia. Essas usinas têm capacidade de geração média de 200 mil a 300 mil MWh de energia por safra, e, geralmente, o consumo de energia elétrica é da ordem de 30 kWh/t cana, o que sugere um consumo de aproximadamente 90 mil MWh por safra.

**Etapa 2. Definição dos critérios e respectivos pesos:** em acordo com os decisores, o desempenho geral do sistema de cogeração de energia pode ser explicado pelo conjunto de critérios e respectivos pesos (Figura 2).

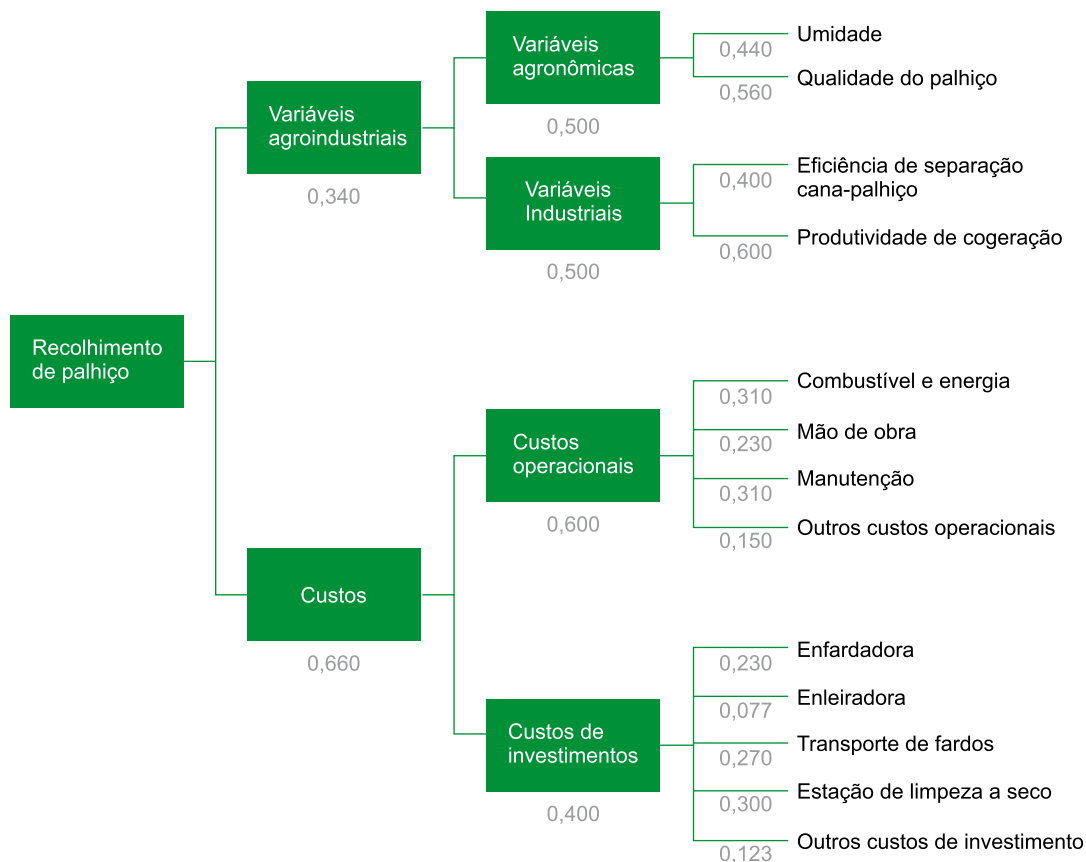
Pelos pesos dos critérios, pode ser concluído que o decisor dá maior preferência para

aquelas soluções de baixo custo – principalmente custos operacionais. Souza & Azevedo (2006), Florentino & Spadotto (2007), bem como Germek et al. (2013) também abordam os aspectos econômicos referentes à cogeração de energia como fatores fundamentais para a otimização do recolhimento de palhiço. No entanto, critérios de variáveis agroindustriais – como a qualidade do palhiço e a produtividade de energia elétrica – também têm alto grau de influência na decisão final, como afirma Carvalho et al. (2017).

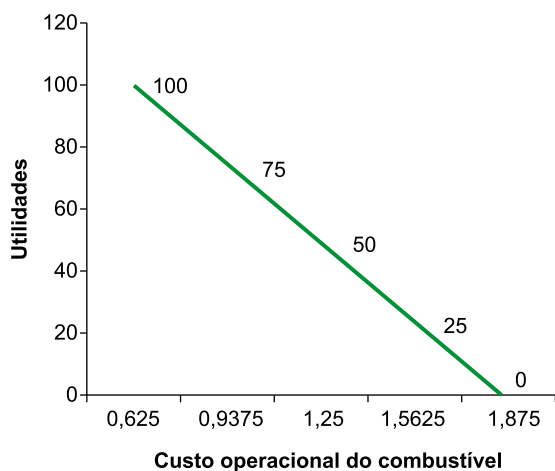
**Etapa 3. Determinação das alternativas:** são definidos três cursos de ação para o modelo multicritério para a decisão da alternativa de recolhimento do palhiço de cana-de-açúcar: enfardamento e colheitas integral e parcial.

**Etapa 4. Avaliação das alternativas para cada critério:** para cada critério, curvas de utilidade são desenhadas. Essas funções permitem medir a preferência dos decisores de uma alternativa sobre outra e em relação a cada critério. A Figura 3 mostra a curva de utilidade para o critério custo operacional de combustível/energia. Essas curvas são definidas, nesta pesquisa, como curvas de utilidade de caráter linear, para facilitar o julgamento do decisor. A Tabela 5 mostra os valores de custo e sua utilidade equivalente, bem como a função de utilidade aproximada conforme o custo.

**Etapa 5. Hierarquização dos critérios:** a ordem de classificação dos critérios é feita pelo método Swing Wheights do Smart. Perguntou-se ao decisor que dimensão ele melhoraria caso existisse uma alternativa que tivesse a pior pontuação para todos os critérios analisados e houvesse a oportunidade de trocar a avaliação em uma das dimensões, do pior valor para o melhor, entre as alternativas. Ao atributo mais importante, foi atribuído um coeficiente máximo. Sucessivamente, para cada um dos outros atributos, é dada a importância de mudar do pior para o outro nível maior comparativamente ao atributo mais importante. Por fim, os pesos foram normalizados. A Tabela 5 mostra também os pesos para cada critério no modelo hierárquico de decisão.



**Figura 2.** Recolhimento de palhicho de cana – estrutura hierárquica de decisão com os pesos integrados.



**Figura 3.** Função de utilidade: custo combustível.

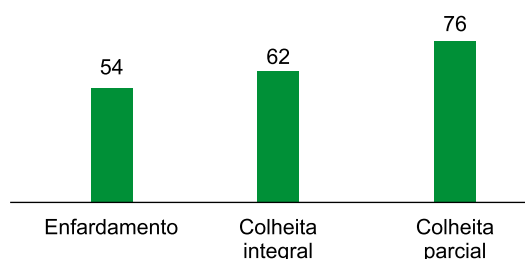
**Etapa 6. Avaliação das alternativas:** a Figura 4 mostra as avaliações de utilidade geral para as alternativas consideradas. Essa avaliação está fundamentada na função de utilidade mul-

**Tabela 5.** Utilidade custo de combustível.

Utilidade $f(x)$	Custo de combustível e energia ( $x$ )
0	$x \geq 1,875$ milhão
25	1,562 milhão
50	1,25 milhão
75	0,937 milhão
100	$x \leq 0,625$ milhão
Função aproximada ( $0 \leq f(x) \leq 100$ )	
$f(x) = -80x + 150$	

tiatributo global. Os resultados são fornecidos em uma escala de 0 a 100%, a porcentagem do desempenho da alternativa com relação a todos os critérios.

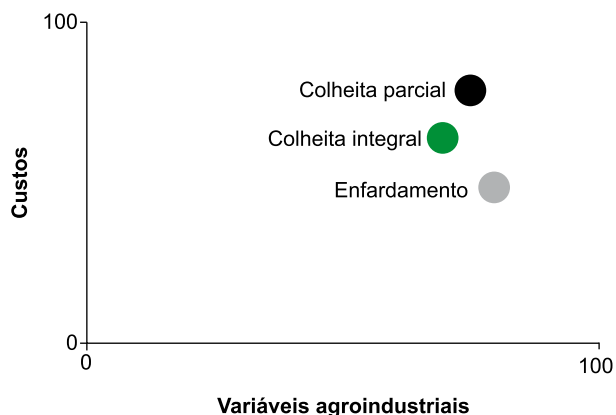
Os resultados indicam que a melhor solução é a alternativa de colheita parcial, que atinge



**Figura 4.** Avaliação geral das alternativas.

76% do objetivo geral. Entende-se que essa solução é a mais adequada para o objetivo de maximizar o desempenho de recolhimento de palhiço com relação às prioridades e à aversão ao risco dos tomadores de decisões. A segunda alternativa escolhida foi a opção de colheita integral, seguida pela solução de enfardamento. Para Ripoli (2004), esses resultados são explicados pelo fato de o sistema de enfardamento ter altos custos nas operações de transporte e descarregamento do palhiço. Além disso, nessa opção de colheita a porcentagem de terra na biomassa afeta o teor de energia contida no palhiço.

A Figura 5 mostra as utilidades para os critérios *custo* e *variáveis agroindustriais*. Observa-se que a alternativa de colheita parcial exibe o melhor desempenho para o *custo*. No entanto, para as *variáveis agroindustriais*, a alternativa de enfardamento é a que possui a maior utilidade; e essa alternativa de recolhimento é a de pior preferência em relação ao critério *custos*.



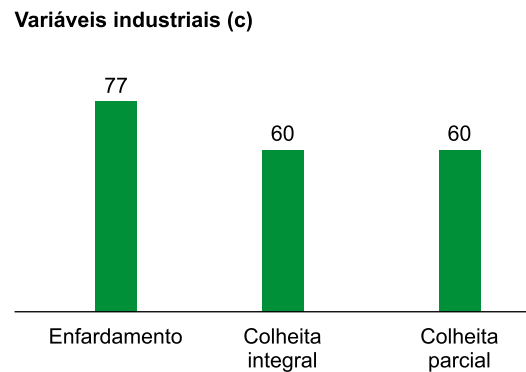
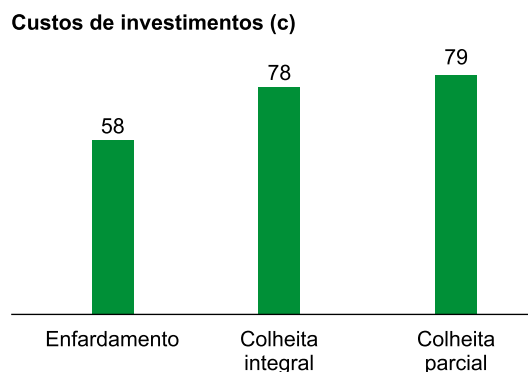
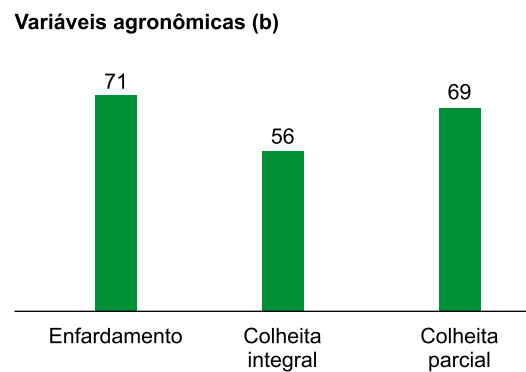
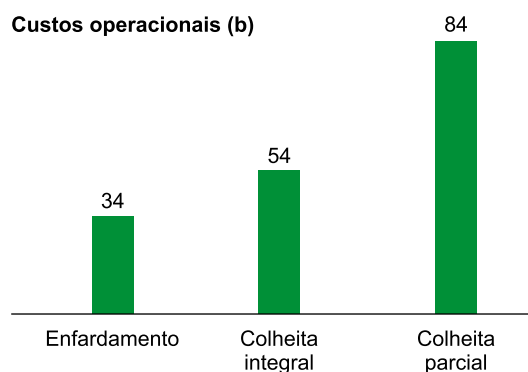
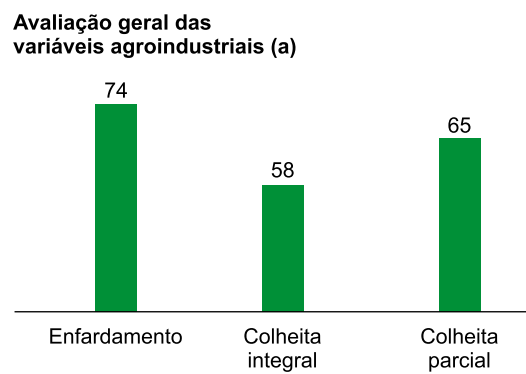
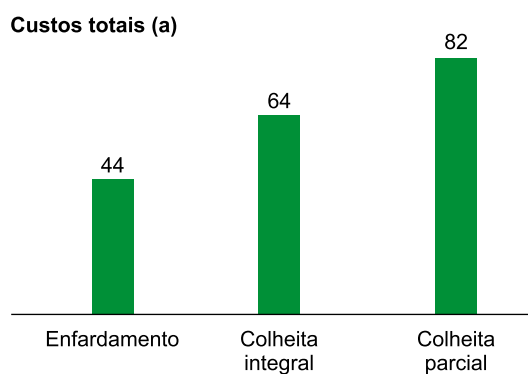
**Figura 5.** Utilidade de critérios: custo x variáveis agroindustriais.

A Figura 6a mostra que o enfardamento atinge apenas 44% do objetivo geral de custos. Os custos operacionais são o de menor utilidade para o enfardamento (Figura 6b) porque essa alternativa demanda maior quantidade de mão de obra, além de exigir maior consumo de combustíveis e muitos gastos com manutenção de veículos.

A Figura 6c também mostra que a menor utilidade é para o enfardamento. A razão disso é o grande número de equipamentos e veículos que deve ser adquirido para a colheita. Esses resultados mostram o que já apontou Germek et al. (2013). Segundo esses autores, em termos de custos, os sistemas de colheita parcial e integral são melhores, pois, apesar de a colheita integral exigir a instalação na unidade industrial de equipamentos de pré-limpeza, esses equipamentos são disponíveis comercialmente e podem reduzir os custos das colhedoras mecânicas.

Quanto aos custos, espera-se que eles caiam por força de programas que incentivem a cogeração de energia a partir da biomassa da cana, como o RenovaBio. Assim, em uma futura análise, custos menores poderão ser considerados no software e, talvez, outros resultados serão obtidos.

No que se refere apenas aos custos de investimento, existem políticas públicas que facilitam o financiamento de máquinas e equipamentos para a cogeração de energia a partir da biomassa da cana, caso da política do BNDES. Apesar de representarem um avanço às empresas entrantes no segmento de comercialização de energia elétrica excedente, as linhas de financiamento governamentais podem ser aprimoradas por meio da implementação de diretrizes específicas. Uma dessas diretrizes seria em relação à diferenciação por tecnologia, pois o BNDES adotou a mesma taxa de juros para a compra de equipamentos menos ou mais eficientes. Por isso, os cogeneradores preferem optar por caldeiras de menor potência, já que terão menos riscos e maior taxa de retorno. Outra ideia seria criar incentivos para os pequenos e médios produtores expandirem a geração de energia elétrica para a comercialização; caso contrário, a competi-



**Figura 6.** Avaliação da alternativa de custo.

**Figura 7.** Avaliação das variáveis agroindustriais.

tividade desse produtores seria comprometida (Souza & Azevedo, 2006).

Em relação às *variáveis agroindustriais*, os resultados mostram que a alternativa de enfardamento possui o melhor desempenho (Figura 7).

Tanto para o critério geral (Figura 7a) quanto para os subcritérios *variáveis agrônô-*

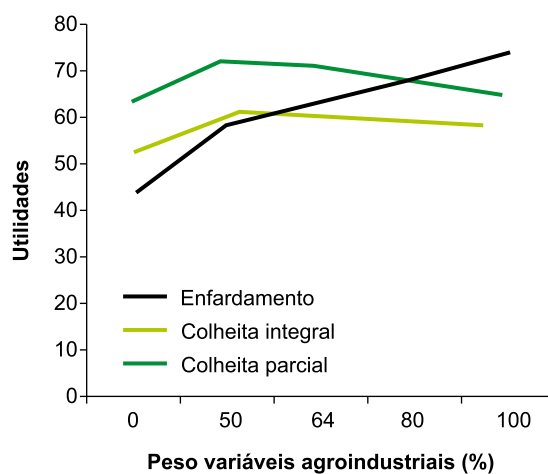
*micas* (Figura 7b) e *variáveis industriais* (Figura 7c), a alternativa de enfardamento é a que exibe maior utilidade. Isso se deve ao fato de que no enfardamento o palhço é recolhido com menor umidade – ele é recolhido alguns dias depois da colheita da cana. Além disso a eficiência de separação cana/palhço é alta para o enfardamento, e a produtividade de geração de energia também



é maior do que nas outras alternativas (Pierossi & Fagundes, 2013). Porém, esse cenário pode variar se os valores considerados para os critérios ligados às variáveis agroindustriais forem otimizados. Políticas públicas, como o RenovaBio, têm incentivado a otimização. Para melhorar a eficiência energética, o programa atribui notas mais altas às usinas mais produtivas e, com base nessas notas, as usinas emitirão créditos a serem comercializados em bolsas de valores. O projeto Sucre também se dedica ao crescimento significativo da produção de eletricidade com baixa emissão de GEE por meio do uso do palhiço da cana. Dessa forma, espera-se que critérios como *produtividade*, *eficiência de separação palhiço/cana* e *qualidade do palhiço* sejam melhorados por esse tipo política pública.

**Etapa 7. Análise de sensibilidade:** considera-se para a análise de sensibilidade a variação da ponderação dos critérios. A Figura 8 mostra o comportamento das soluções diante de mudanças na preferência do critério de primeiro nível *variáveis agroindustriais*. Observa-se que quando o peso do critério *custos* é igual ao peso das *variáveis agroindustriais* a solução provisória continua sendo a escolhida entre as três alternativas, atingindo 73% de utilidade do objetivo geral. Além disso, no ponto onde as variáveis agroindustriais têm peso de 59%, a segunda alternativa sugerida passa ser o enfardamento, com 62% da utilidade; isso acontece por causa do bom desempenho do enfardamento nas variáveis agroindustriais explicado por Hassuani et al. (2005). Observa-se também que quando o peso do critério *variáveis agroindustriais* varia de 0 a 80%, a metodologia sugere a escolha da alternativa de colheita parcial e, unicamente para pesos maiores do que 80% nesse critério, a alternativa de enfardamento torna-se a preferida. Portanto, são necessárias grandes mudanças nas preferências dos decisores para os critérios indicarem outra solução.

**Etapa 8. Alternativa recomendada:** a alternativa provisória “colheita parcial” exhibe amplo intervalo de preferência, o que faz dela a escolhida.



**Figura 8.** Variação da preferência dos critérios variáveis agroindustriais.

## Conclusões

O objetivo deste trabalho foi fazer uma análise técnico-econômica das alternativas de recolhimento do palhiço para fins de cogeração de energia. Pela análise econômica, a alternativa escolhida foi a do enfardamento; pela análise técnica, a alternativa escolhida foi a da colheita parcial. Na análise econômica, para o cálculo do valor esperado do VPL são considerados, além dos custos, a receita da cogeração de energia para cada alternativa de recolhimento, sendo essa receita maior para o enfardamento. A receita para o enfardamento é significativa por causa de sua produtividade de energia, pois as usinas sucroalcooleiras geram em média 0,8 MWh de energia por tonelada de palhiço para essa alternativa de recolhimento. Já para as colheitas integral e parcial, a produtividade cai para 0,7 MWh de energia por tonelada de palhiço. Além disso, a quantidade de excedente de energia produzida pela colheita parcial é metade da gerada pela colheita integral e pelo enfardamento.

Na análise técnica, a colheita parcial atendeu melhor aos objetivos. Esse resultado é explicado pelo fato de a análise considerar critérios agroindustriais e critérios relacionados ao custo – a colheita parcial exhibe alta utilidade para tais critérios. Em relação às variáveis agroin-

dustriais, a colheita parcial apresenta destaque para o critério de eficiência de separação cana/palhiço, pois o palhiço resultante das colheitas integral e parcial tem menos impurezas minerais. Além disso, a quantidade de palhiço presente na colheita parcial é menor, o que facilita a separação (Germek et al., 2013). Quanto aos custos de investimentos, eles são maiores para o enfardamento, que apresenta a menor utilidade, pois essa alternativa requer uma estrutura dedicada para o recolhimento do palhiço, ou seja, uma nova colheita é realizada. Deve-se também investir em máquinas enfardadoras, enleiradoras, caminhões e sistema de recolhimento dos fardos. Para os sistemas de colheita integral e parcial não é necessária tal estrutura, já que o palhiço é transportado com a cana. As maiores aquisições para esses sistemas é em relação ao sistema de limpeza a seco e o aumento de frota para o transporte da cana juntamente com o palhiço (Hassuani et al., 2005). Quanto aos custos operacionais das alternativas de recolhimento, destacam-se os custos com combustível, energia, mão de obra e manutenção dos equipamentos, que também são mais onerosos para o enfardamento, por causa das duas colheitas (Smithers, 2014).

A principal limitação desta pesquisa é o fato de as análises serem construídas de forma independente. Embora a análise técnica tenha sido bem fundamentada em vários critérios da literatura e mediante a escolha e preferência dos decisores, não é possível afirmar que a alternativa escolhida é, de fato, a mais econômica. Já a análise econômica via cálculo do valor esperado do VPL não leva em consideração outros critérios na decisão, mas avalia a volatilidade do preço, uma variável de incerteza que deve ser considerada para o problema em questão.

Uma segunda limitação diz respeito às probabilidades e preços, que deveriam ser modelados dinamicamente, ou seja, o decisor poderia escolher determinado preço mediante uma probabilidade de ocorrência. Assim, adotar uma distribuição de probabilidade faria mais sentido na análise. No entanto, considera-se oportuna

a análise à medida que os custos reais foram levantados e, certamente, os cálculos poderão facilmente ser refeitos de acordo com a variação de preço de determinado período.

Uma terceira limitação se refere ao cálculo dos custos nos modelos. Embora sejam análises independentes, a análise de custos deveria ser implementada de forma única a satisfazer toda a análise técnica e econômica. Por parte da análise técnica, embora os critérios tenham sido amplamente revistos na literatura, existe subjetividade inerente aos decisores quanto à escolha e ponderação dos critérios e aos dados fornecidos. Porém, pelo fato de tornar suas preferências explícitas, os decisores são mais conscientes das suas escolhas.

A perspectiva de pesquisas futuras consiste, então, de uma análise conjunta por meio de um modelo hierárquico de decisão que considere o valor esperado da receita, já que diferentes alternativas de recolhimento resultam em valores diferentes de receita. Para isso, recomenda-se a incorporação de métodos que possam permitir a variação dinâmica dos preços na escolha das alternativas. Nessa proposta, os valores de custos são considerados somente no modelo multicritério, juntamente com o valor esperado da receita a ser calculado pela árvore de decisão de valor e probabilidades.

Além disso, o modelo pode ser usado para análises futuras considerando certa variação dos dados, seja pela adoção de outros preços de energia, seja pela alteração de informações ao longo do tempo, pois políticas públicas têm incentivado a diminuição dos custos para a geração de energia a partir do palhiço de cana, bem como o aumento da produtividade e da eficiência.

## Referências

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **SPG**: Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: A política de petróleo, gás natural e combustíveis. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/politica-de-petroleo-gas-natural-e-combustiveis>>. Acesso em: 23 nov. 2017.

CARVALHO, J.L.N.; NOGUEIROL, R.C.; MENANDRO, L.M.S.; BORDONAL, R. de O.; BORGES, C.D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H.C.J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **GCB Bioenergy**, v.9, p.1181-1195, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12410>.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B.H. **Análise de investimentos**: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial. 11.ed. São Paulo: Atlas, 2011.

CASTRO, N.J. de; DANTAS, G. de A. Lições do PROINFA e do leilão de fontes alternativas para a inserção da bioeletricidade sucroalcooleira na matriz elétrica Brasileira. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 3., 2008, Curitiba. [Anais]. Curitiba: [s.n.], 2008.

CORRÊA NETO, V.; RAMON, D. **Análises de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucroalcooleiro**. Brasília: USAID/Brazil, 2002. Contract nº DE-AC36-99GO10337.

DIAS, M.O.S.; JUNQUEIRA, T.L.; CAVALLET, O.; PAVANELLO, L.G.; CUNHA, M.P.; JESUS, C.D.F.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. **Applied Energy**, v.109, p.72-78, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.081>.

ELLIS, J.; WINKLER, H.; CORFEE-MORLOT, J.; GAGNON-LEBRUN, F. CDM: Taking stock and looking forward. **Energy Policy**, v.35, p.15-28, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.09.018>.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER NETO, G.; NORONHA, S.M. **Apoio à decisão**: metodologia para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas. Florianópolis: Insular, 2001.

FLORENTINO, H. de O.; SPADOTTO, A.F. O problema da mochila no carregamento do palhico da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 30., 2007, Florianópolis. [Anais]. [São Carlos: SBMAC], 2007.

FURLAN, F.F.; TONON FILHO, R.; PINTO, F.H.P.B.; COSTA, C.B.B.; CRUZ, A.J.G.; GIORDANO, R.L.C.; GIORDANO, R.C. Bioelectricity versus bioethanol from sugarcane bagasse: is it worth being flexible? **Biotechnology for Biofuels**, v.6, art.142, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-142>.

GERMEK, H.A.; PATROCÍNIO, A.B. do; SILVA, F.C. da; SIMON, E.J.; RIPOLI, T.C.C. Analysis decision about the sugarcane straw recovery for cogeneration in unity operation industry. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, ano3, p.9-17, 2013.

GOODWIN, P.; WRIGHT, G. **Decision Analysis for Management Judgment**. 5<sup>th</sup> ed. Chichester: J. Wiley and Sons, 2014.

HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I. de C. (Ed.). **Biomass power generation**: sugar cane bagasse and trash. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. (Caminhos para sustentabilidade).

JARDIM, A. RenovaBio: revolução econômica e socioambiental. **AgroANALYSIS**, v.37, p.48, 2017.

KHATIWADA, D.; LEDUC, S.; SILVEIRA, S.; MCCALLUM, I. Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable Energy**, v.85, p.371-386, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.009>.

LINERO, F.A.B. Aproveitamento da palha de cana. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL EM LOGÍSTICA AGROINDUSTRIAL, 14., 2017, Piracicaba. **Corte, Transbordo e Transporte de Cana**: [anais]. Piracicaba: ESALQ-LOG, 2017.

MACEDO, I.C.; SEABRA, J.E.A.; SILVA, J.E.A.R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v.32, p.582-595, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.006>.

MICHELAZZO, M.B.; BRAUNBECK, O.A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhico na colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.546-552, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000500017>.

PIERROSSI, M.A.; FAGUNDES, S.A. Enfardamento de palha. In: SANTOS, F.; BORÉM, A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**: do plantio à colheita. Viçosa: Ed. da UFV, 2013. p.223-244.

POKALSKY, J.; ROBINSON, J. Integrating Physical and Financial OTC Contract Portfolios. In: JAMESON, R. (Ed.). **The US Power Market**: Restructuring and Risk Management. London: Risk, 1997. p.112-115.

PRADO, T.G.F. **Externalidades no ciclo produtivo da cana-de-açúcar com ênfase na produção de energia elétrica**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo. Não paginado.

RIBEIRO, C.H. **Proposta e avaliação socioeconômica de um sistema de pagamento de cana-de-açúcar levando em consideração os produtos do bagaço e da palha**. 2018. 288p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RIPOLI, M.L.C. **Ensaio de dois sistemas de obtenção de biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) para fins energéticos**. 2004. 213p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu.

SMITHERS, J. Review of sugarcane trash recovery systems for energy cogeneration in South Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.32, p.915-925, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.042>.

SOUZA, Z.J. de; AZEVEDO, P.F. de. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.44, p.179-199, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-20032006000200002>.

SUCRE. **Projeto Sucre (Sugarcane Renewable Electricity)**. Disponível em: <<http://pages.cnpem.br/sucre/>>. Acesso em: 15 out. 2017.

TORRES, C.; FERMAM, R.K.S.; SBRAGIA, I. CDM Projects in Brazil: market opportunity for companies

and new designated operational entities. **Ambiente & Sociedade**, v.19, p.199-212, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC142054V1932016>.

TROMBETA, N. de C.; CAIXETA FILHO, J.V. Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.55, p.479-496, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550304>.

VARIAN, H.R. **Microeconomia**: princípios básicos: uma abordagem moderna. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

VELASQUEZ, M.; HESTER, P.T. An analysis of multi-criteria decision making methods. **International Journal of Operations Research**, v.10, p.56-66, 2013.