

ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE RECOLHIMENTO DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA A COGERAÇÃO DE ENERGIA

Paula Horta Lemos

paula_lemos_3@hotmail.com

João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

jesilva@ufscar.br

JOSE GERALDO VIDAL VIEIRA

jgvvidal@gmail.com



A biomassa da cana é dividida em duas categorias: o bagaço de cana, disponível na indústria após a extração do caldo e já utilizado como insumo energético; e o palhiço, objeto de estudo desta pesquisa. Com a permanência do palhiço de cana-de-açúcar no solo após a proibição da pré-queima na colheita manual, novos problemas surgiram, como a infestação por pragas e o retardamento da brotação da cana. Uma alternativa para o excesso de palhiço no solo é o recolhimento dessa biomassa no campo para a cogeração de energia. Porém, o elevado custo associado ao recolhimento de palhiço constitui a explicação mais plausível para a pequena geração de excedentes de energia pelo setor. As alternativas de recolhimento mais em uso são a colheita integral, colheita parcial e o enfardamento. Na alternativa de colheita integral, a cana como um todo, colmo e palhiço, é transportada para a usina, onde, em uma estação de limpeza se realiza a separação do palhiço. Por outro lado, na colheita parcial, parte do palhiço fica no solo e a outra parte do palhiço é transportada junto com a cana para a indústria onde são separados na estação de limpeza. No enfardamento, após a colheita mecanizada convencional, o palhiço é deixado no campo para uma secagem natural. Após esse período o palhiço é enleirado, enfardado em campo e transportado para a usina. Muitos critérios devem ser considerados para a escolha da melhor alternativa no processo de recolhimento do palhiço como custos com transporte, umidade e densidade do palhiço, a qualidade do palhiço, a eficiência de separação cana/palhiço, custos de investimentos e operacionais do recolhimento, preço da energia, receita com a cogeração, entre outros, existindo assim um trade off em relação a esses critérios e as alternativas de recolhimento de palhiço. Assim, foi elaborado um modelo genérico de análise de decisão multicritério a partir da ferramenta SMART (Simple Multi-Attribute Ranking Technique) para auxiliar empresas do setor sucroalcooleiro sobre a alternativa de

recolhimento de palhico para a cogeraçao de energia. O modelo foi construído a partir da literatura e validado por gestores de usinas sucroalcooleiras. A abordagem proposta permitiu analisar com robustez a decisao mais adequada por meio da análise de Monte Carlo para variaçao do preço da energia. Após a realizaçao da análise de Monte Carlo, os resultados mostraram que em 41% dos preços de energia simulados a soluçao recomendada é a de colheita integral. A soluçao sugerida pela metodologia não é a soluçao ótima em custo visível, mas por outro lado, ela fornece o melhor desempenho geral atendendo os critérios da estr

Palavras-chave: cana-de-açúcar, Recolhimento de palhico, Cogeraçao de Energia, Análise de Decisao Multicritério

1. Introdução

A partir da consolidação da colheita mecanizada de cana sem queima, problemas com o excesso de palhiço no solo são gerados, como a infestação por pragas e o retardamento da brotação devido aos efeitos de sombreamento, da barreira física e da diminuição da temperatura do solo (MACEDO, 2008). Assim, uma alternativa para consumir esse excesso de palhiço no solo é o recolhimento da biomassa no campo e a sua queima para a geração de energia elétrica (TROMBETA et al., 2017). No entanto, o elevado custo associado ao recolhimento de palhiço constitui a explicação mais plausível para a pequena geração de excedentes de energia pelo setor por meio dessa biomassa (SOUZA e AZEVEDO, 2006). As alternativas de recolhimento mais em uso são a colheita integral, colheita parcial e o enfardamento.

Apesar das oportunidades para as usinas sucroalcooleiras, existem muitos fatores que devem ser considerados para a escolha da melhor alternativa no processo de obtenção do palhiço (RIPOLI e RIPOLI, 2009). Segundo Pierossi e Fagundes (2013) os principais critérios são: os custos com transporte, a umidade do palhiço durante o transporte, a qualidade do palhiço que pode ser medida em relação ao seu teor de impurezas minerais, e a eficiência de separação cana/palhiço. Também deve ser considerado o critério “custos de investimentos” que, referente ao sistema de enfardamento, refere-se à aquisição de máquinas enfardadoras, enleiradoras, caminhões e sistema de recolhimento dos fardos. Para a alternativa de sistema de colheita integral e parcial não é necessária esta estrutura de recolhimento, já que o palhiço é transportado com a cana (HASSUANI, 2005). Referente ao critério “custos operacionais” destacam os custos com combustível, energia, mão-de-obra e manutenção dos equipamentos para cogeração (SMITHERS, 2014).

Neste sentido, existem *trade offs* em relação a esses critérios e as alternativas de recolhimento de palhiço, pois cada critério se comporta melhor para uma determinada alternativa. Esta pesquisa propõe indicar a melhor opção dentre as alternativas de recolhimento de palhiço. Diferente de outros estudos, nesta pesquisa é elaborado um modelo genérico multicritério para auxiliar empresas do setor sucroalcooleiro nas decisões sobre o recolhimento de palhiço para a cogeração de energia. Assim, são avaliadas as características econômicas e agroindustriais das principais alternativas de recolhimento para que possa ser indicada a opção ideal.

2. Sistemas de recolhimento de palhiço

Embora o uso de palhiço para cogeração de energia seja uma oportunidade para a indústria, problemas logísticos e o alto custo de recolhimento do palhiço são os principais entraves para

a utilização dessa biomassa (MICHELAZZO E BRAUNBECK, 2008). As alternativas de recolhimento do palhiço consideradas no presente estudo são:

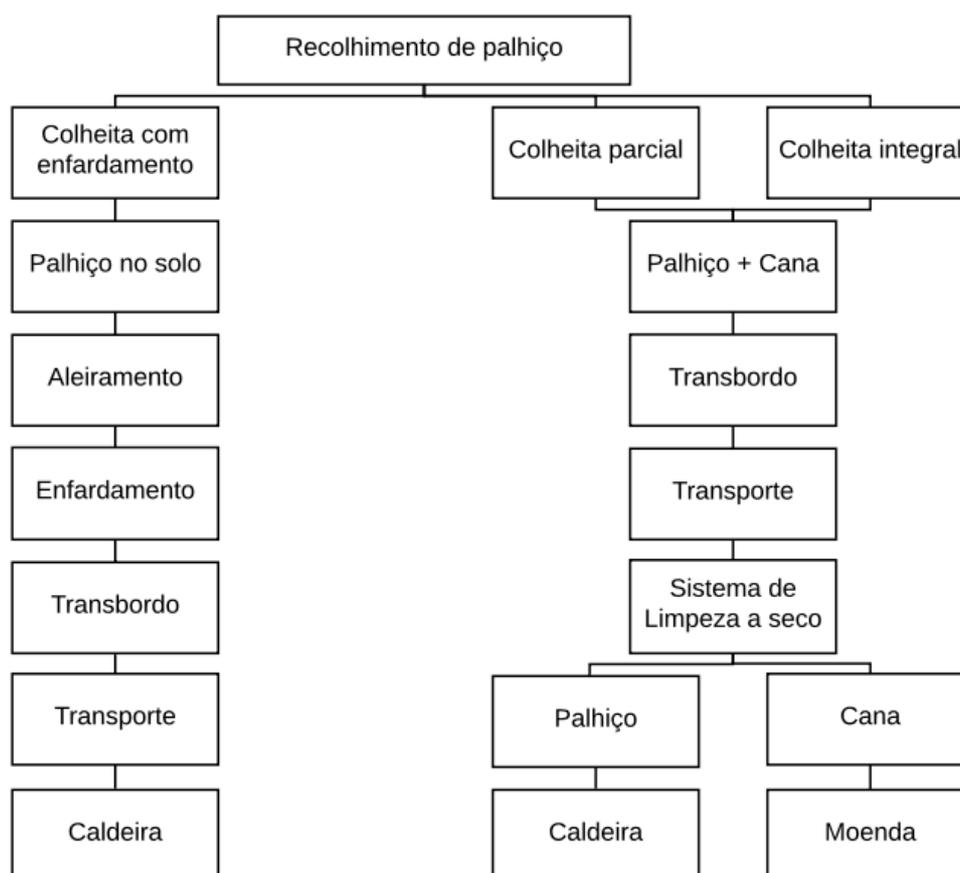
1) Sistema de colheita integral: A cana-de-açúcar é coletada juntamente com o palhiço, por meio do desligamento dos sistemas de limpeza da colhedora, sendo o material transportado à usina nos mesmos veículos utilizados na colheita convencional (GERMEK et al., 2014). Em seguida, o palhiço deve ser separado da cana por meio de uma estação de limpeza a seco. Nesse sistema, a limpeza da cana-de-açúcar é realizada por meio de uma forte corrente de ar que separa os colmos do palhiço. Como consequência da colheita integral, o palhiço juntamente com os rebolos compromete a carga de viagem para a usina, devido à uma redução de densidade, requerendo uma maior infraestrutura de transporte. Hassuani et al. (2005) apresentam resultados em que a carga média transportada é reduzida a menos da metade nas condições de colheita integral.

2) Sistema de recolhimento parcial: Esta alternativa de recolhimento é bem semelhante à colheita integral no que se refere aos equipamentos utilizados e às operações. No entanto, na colheita parcial alcança-se níveis diferentes de biomassa remanescente no campo. De acordo com Hassuani et al. (2005), neste tipo de recolhimento do palhiço, o sistema secundário de limpeza da colhedora está desligado e o sistema primário trabalha com uma velocidade menor, assim, parte do palhiço é transportado junto com a cana e depois, na indústria, eles são separados na estação de limpeza a seco (CARVALHO et al., 2016). A colheita parcial do palhiço realizada desta maneira possibilita uma maior facilidade operacional visto que interfere menos na operação cotidiana na usina. Além disso, em termos de transporte, as cargas transportadas para a usina têm uma maior densidade em comparação ao sistema de colheita integral.

3) Enfardamento: Durante a colheita de cana, o palhiço é separado dos colmos a partir de um sistema de ventilação composto por dois extratores localizados na colhedora de cana picada, deixando a maior parte do palhiço no solo (RIPOLI, 2009). De acordo com Germek et al. (2014), a opção do palhiço enfardado consiste em efetuar seu recolhimento cerca de dez dias após a colheita, ou seja, há um tempo para o palhiço secar. Depois disso, realiza-se o aleiramento desse palhiço, seguido do enfardamento e do transporte para a usina.

A Figura 1 apresenta as alternativas de recolhimento de palhiço.

Figura1- Alternativas e etapas do recolhimento de palhiço



Fonte: Elaboração do autor

3. Análise multicritério

A abordagem multicritério é utilizada para a determinação da melhor alternativa de recolhimento de palhiço a partir de critérios quantitativos e qualitativos. A Tabela 1 apresenta as etapas e os respectivos objetivos e métodos utilizados nesta pesquisa.

Tabela1- Etapas da análise multicritério

	Etapas	Objetivo	Métodos
1	Construção do modelo	Construção da estrutura hierárquica de objetivos fundamentais com seus respectivos critérios, alternativas e pesos.	Literatura, entrevistas semiestruturadas, questionário (método do equivalente certo) e método SMART (Goodwin e Wright, 2004).
2	Avaliação das alternativas	Valor da utilidade de cada alternativa e o valor global	Aplicação do modelo de utilidade global em função de pesos definidos e as funções de utilidade de cada critério (Loken, Botterud e Holen, 2009)

3	Análise de sensibilidade	Verificação da aderência da solução obtida.	Análise de Monte Carlo para variação do preço da energia.
----------	--------------------------	---	---

Fonte: Elaboração do autor

Etapa 1- Construção do modelo

A etapa 1 de construção do modelo é realizada a partir da literatura e confirmação por meio das visitas às usinas. Nestas etapas, são aplicadas entrevistas semiestruturadas e questionários aos entrevistados. Estes entrevistados são responsáveis pelos cargos de coordenador industrial e operacional e gerente industrial nas usinas, com funções que abrangem o planejamento energético, otimização de produtividade, gerenciamento dos custos de recolhimento e mão-de-obra. Assim é possível delinear o problema, identificar os principais critérios, os *trade offs* entre eles e as alternativas de recolhimento de palhço. Com o objetivo de descrever o comportamento dos critérios em relação às alternativas, são atribuídas utilidades para cada critério para transformar os valores associados aos critérios de cada alternativa em uma escala de dimensão comum.

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 este critério. Depois, os pesos são normalizados (GOODWIN e WRIGHT, 2005) (Tabela 2).

Tabela2 - Atribuição de pesos com o método SMART

Critério A (mais importante)	100	100/235 = 0,425532
Critério B	70	70/235 = 0,297872
Critério C	30	30/235 = 0,127660
Critério D	25	25/235 = 0,106383
Critério E (menos importante)	10	10/235 = 0,04255
Somatório	235	

Fonte: Goodwin e Wright, 2005

Etapa 2 - Avaliação das alternativas

Por meio das funções de utilidade e as ponderações definidas pelo decisor para cada critério, obtém-se valores de utilidade global para cada alternativa. Este valor fundamenta-se na função de utilidade multicritério, definida na forma aditiva pela Equação (1) por Loken et al., (2009).

$$U(a) = \sum_{i=1}^I k_i u_i(x_i(a)) \quad (1)$$

Na Equação 1, a representa a alternativa avaliada, $U(a)$ é o valor global da função utilidade da alternativa a ; i representa os critérios do problema; $x_i(a)$ é o desempenho da alternativa a em relação ao atributo do critério i ; $u_i(.)$ é a função de utilidade parcial do critério i e finalmente k_i é a ponderação ou preferência do critério i , que se refere ao grau de importância relativa. A alternativa com maior valor nesta função pode ser então definida como solução provisória.

Etapa 3 - Análise de sensibilidade

Segundo Belton e Stewart (2002), a análise de sensibilidade permite verificar se as conclusões são muito sensíveis a determinadas mudanças nas variáveis do modelo. Dessa forma, é realizada como análise de sensibilidade a simulação de Monte Carlo, para avaliar a variação no preço da energia elétrica. Dado que o preço da energia muda dinamicamente e influencia o valor esperado da receita dentro da estrutura hierárquica, a análise de Monte Carlo é indicada por simular possíveis valores do valor esperado da receita e então encontrar a alternativa de recolhimento de palhiço sugerida para cada uma dessas medidas.

4. Resultados e discussões

4.1 Construção do modelo

Com capacidade de moagem de aproximadamente 3 milhões de toneladas de cana por safra, as usinas típicas do setor sucroalcooleiro produzem açúcar, etanol e energia. Tais usinas têm capacidade de geração em média de 200.000 a 300.000 MWh de energia por safra, e, geralmente, o consumo de energia elétrica é da ordem de 30kWh/t.cana, o que sugere um consumo de aproximadamente 90.000 MWh por safra.

Essas usinas enxergam possibilidades de melhoria na eficiência energética devido principalmente à maior utilização do palhiço para cogeração e à geração de energia também na entressafra. Porém, a maior dificuldade apontada pelas usinas para a venda de excedentes de energia é a falta de previsibilidade do preço da energia, pois como o preço do recolhimento do palhiço é alto, a venda de energia deve compensar esse gasto, além de serem avaliados outros critérios para a escolha da alternativa de recolhimento.

Os critérios são as variáveis relevantes para o problema, que quando agrupados de forma estruturada, representam a estrutura hierárquica de objetivos do problema a ser resolvido. Os critérios que compõem a estrutura hierárquica são definidos na Tabela 3.

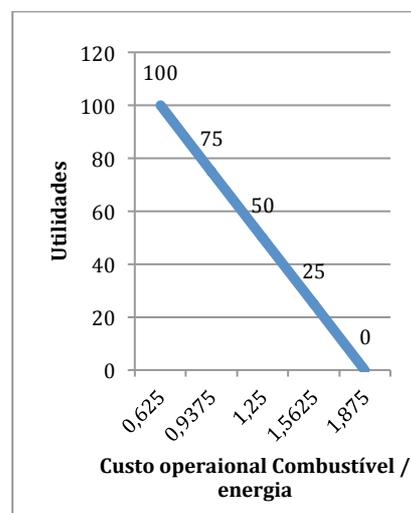
Tabela3– Descrição dos critérios

Critérios (Pesos)	Descrição
Custos	
<i>Custos de investimentos</i>	
Custo da enfardadora	Custo de aquisição da máquina que compacta o palhiço em fardos.
Custo da enleiradora	Custo de aquisição da máquina que agrupa o palhiço em leiras.
Custo dos transportes de fardos	Custo de aquisição dos carregamentos que transportam os fardos até a usina.
Custo do sistema de limpeza a seco	Custo de aquisição da estrutura e máquinas que fazem a limpeza do palhiço e separação da cana.
Custo de outros equipamentos	Custo de outros equipamentos necessários, de apoio e transporte como tratores, conjunto semirreboque, cavalo mecânico.
<i>Custos operacionais</i>	
Combustível / Energia	Custos anuais relacionados ao consumo de combustível e energia.
Mão-de-obra	Custos anuais gastos com mão-de-obra necessária para os processos de recolhimento e cogeração de energia a partir do palhiço
Manutenção	Custos anuais relacionados à manutenção do maquinário agrícola e industrial.
Outros custos operacionais	Custos anuais relacionados a operações menores ou eventuais.
Variáveis agroindustriais	
<i>Variáveis agronômicas</i>	
Umidade/ Densidade	Relacionado ao aumento de peso do palhiço no transporte e a dificuldade de limpeza das impurezas.
Qualidade do palhiço	Mensurada de acordo com o teor de impurezas minerais. As impurezas prejudicam a eficiência de cogeração de energia.
<i>Variáveis industriais</i>	
Eficiência de separação cana/palhiço	Medida pela eficiência da estação de limpeza a seco (para as colheitas integral e parcial) ou pelos ventiladores da colhedora de cana (para o enfardamento)
Produtividade da cogeração	Relacionada a energia produzida por tonelada de palhiço
Valor esperado da Receita	Receita anual da comercialização da energia. Relacionada com o preço da energia no mercado e com a produtividade de energia. Este é o único critério que foi construído a partir de um modelo de árvore de valor e probabilidades.

Fonte: Elaboração do autor

Para avaliação das alternativas para cada critério é utilizado um questionário, pelo qual utilidades são atribuídas para transformar os valores associados aos critérios de cada alternativa em uma escala de dimensão comum. Assim, a curva de utilidade para o critério "Custo operacional de combustível/energia" é desenhada (Figura 2), como um exemplo. A Tabela 4 apresenta os valores de custo e a sua utilidade equivalente, bem como a função de utilidade aproximada em função do custo.

Figura2- Função de utilidade do Custo combustível



Fonte: Elaboração do autor

Tabela3- Utilidades do Custo de combustível

Utilidade $f(x)$	Custo de combustível (x)
0	$x \geq 1,875$ milhão
25	1,562 milhão
50	1,25 milhão
75	0,937 milhares
100	$x \leq 0,625$ milhares

Função aproximada ($0 \leq f(x) \leq 100$)

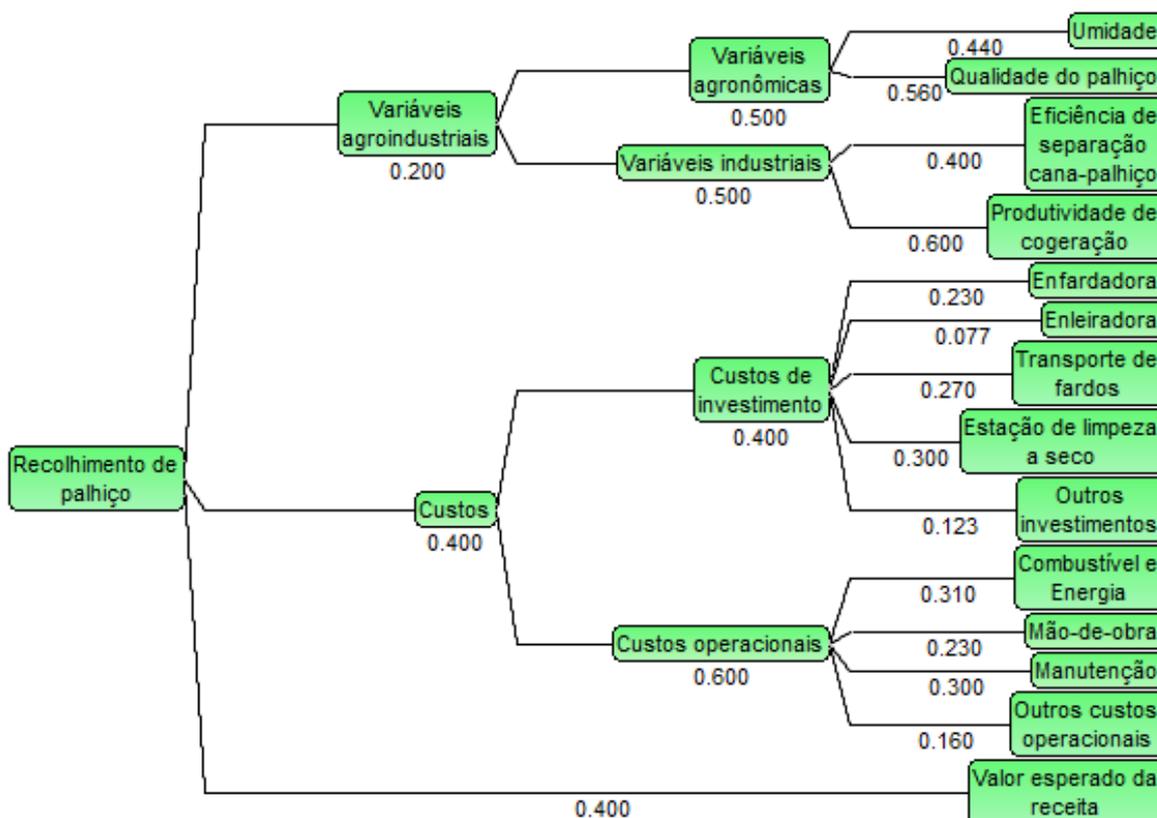
$$f(x) = -80x + 150$$

Fonte: Elaboração do autor

Foram construídas funções utilidades para todos os critérios do modelo.

Em relação aos pesos dos critérios, pode ser concluído que os decisores dão maior preferência para aquelas soluções de baixo custo e maior valor esperado de receita, no entanto, critérios de variáveis agroindustriais (como a qualidade do palhicho e produtividade de energia elétrica) também têm alto grau de influência na decisão final. A Figura 3 apresenta a estrutura hierárquica de objetivos com os pesos incorporados.

Figura3- Estrutura hierárquica de objetivos com pesos integrados

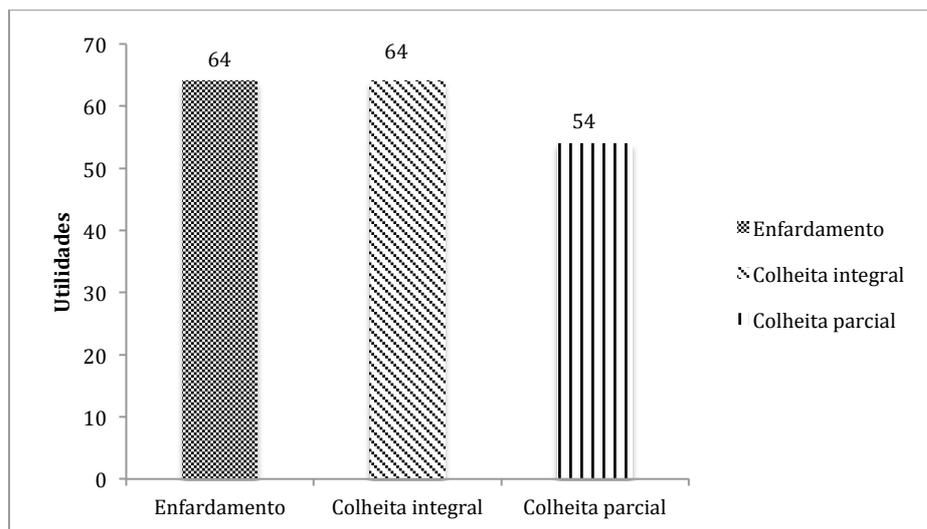


Fonte: Elaboração do autor

4.2 Avaliação das alternativas

A Figura 4 representa a avaliação de utilidade geral para as alternativas consideradas. Os resultados são fornecidos em uma escala de 0 a 100%, indicando a porcentagem em que a alternativa se desempenha com relação a todos os critérios. Os resultados indicam as alternativas de enfardamento e colheita integral com o mesmo desempenho, ambas atingindo 64% do objetivo geral. Entende-se que o modelo escolheu essas soluções como as mais adequadas para o objetivo de maximizar o desempenho de recolhimento de palhicho com relação às prioridades e aversão ao risco dos tomadores de decisão.

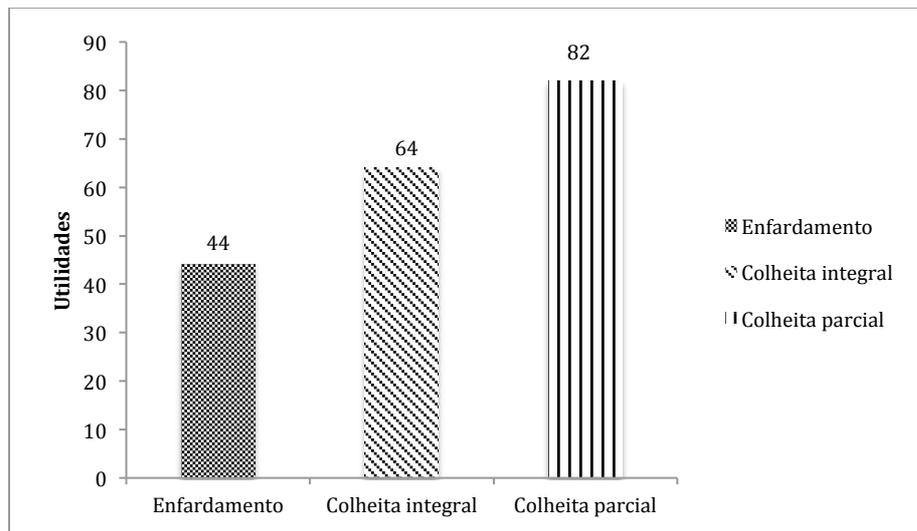
Figura4- Avaliação geral das alternativas



Fonte: Elaboração do autor

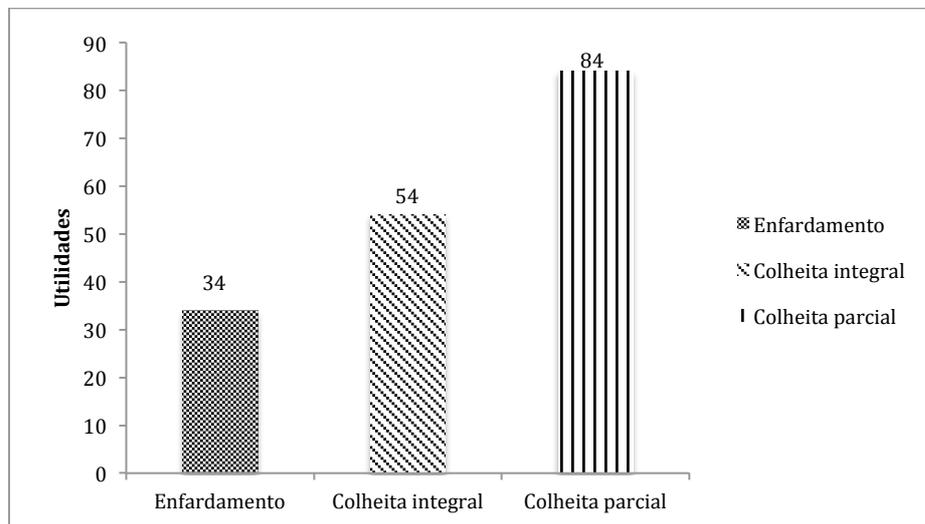
A Figura 5 apresenta o comportamento das alternativas de desempenho para o critério “custos”. A Figura 6 apresenta os custos operacionais, que tem uma utilidade menor para o enfardamento por necessitar de uma maior quantidade de mão-de-obra, além de ter um maior consumo de combustíveis pelos veículos que operam e ter mais gastos com manutenção de veículos. A Figura 7 apresenta os custos de investimentos e mostra uma menor utilidade para o enfardamento, com um desempenho semelhante para a colheita integral e parcial. Isso ocorre, pois um maior número de equipamentos e veículos devem ser adquiridos pela usina para a colheita com enfardamento e praticamente os mesmos investimentos devem ser feitos para a colheita integral e parcial.

Figura5- Avaliação do critério “custo”



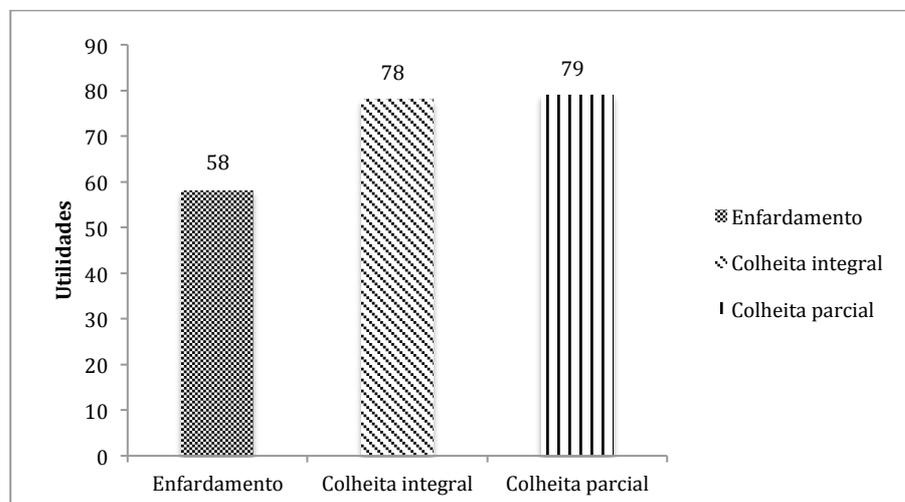
Fonte: Elaboração do autor

Figura6- Avaliação do critério “custo operacional”



Fonte: Elaboração do autor

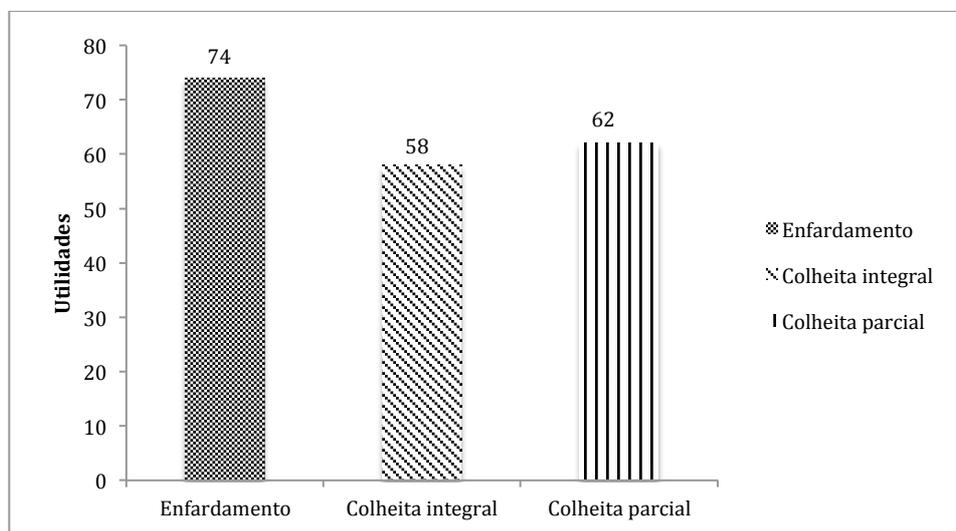
Figura7- Avaliação do critério “custo de investimento”



Fonte: Elaboração do autor

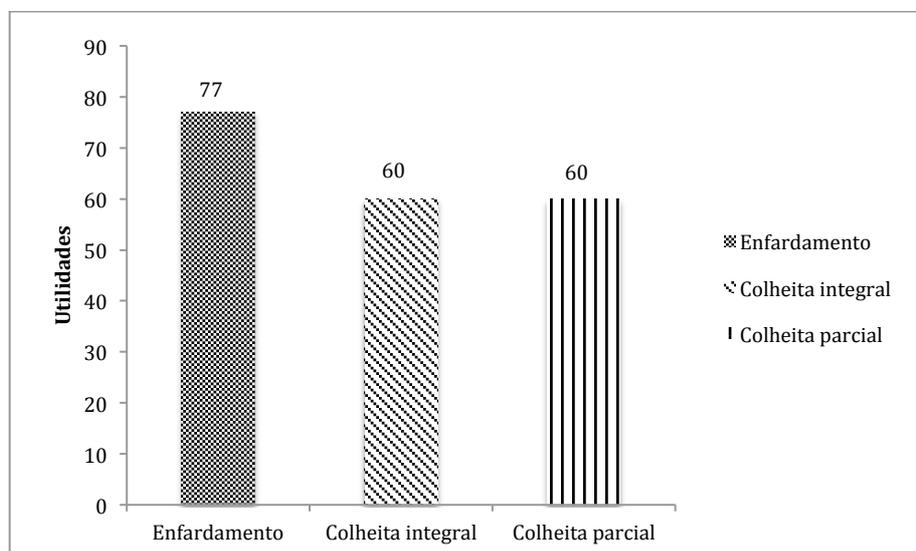
Em relação às “variáveis agroindustriais”, os resultados mostram que a alternativa de enfardamento tem um melhor desempenho ao analisar o critério geral apresentado pela Figura 8 e os seus subcritérios, “variáveis agronômicas” e “variáveis industriais”, apresentados pelas figuras 9 e 10, respectivamente. Um desempenho relativamente maior é observado na alternativa de colheita parcial em relação à alternativa de colheita integral, devido ao subcritério “Eficiência de separação cana/palhão” que tem uma utilidade maior para essa alternativa devido ao fato do palhão recolhido de forma parcial possuir uma menor quantidade de impurezas.

Figura8- Avaliação do critério “variáveis agroindustriais”



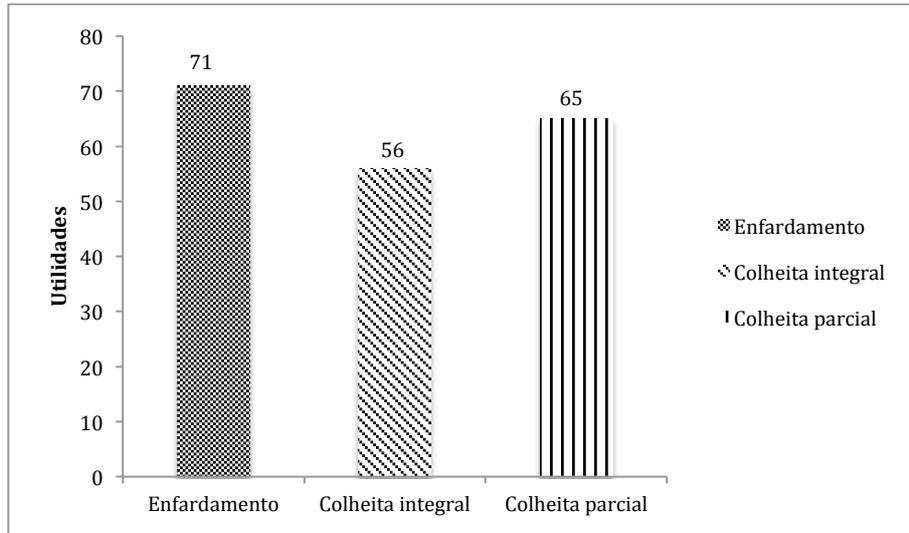
Fonte: Elaboração do autor

Figura9- Avaliação do critério “variáveis agronômicas”



Fonte: Elaboração do autor

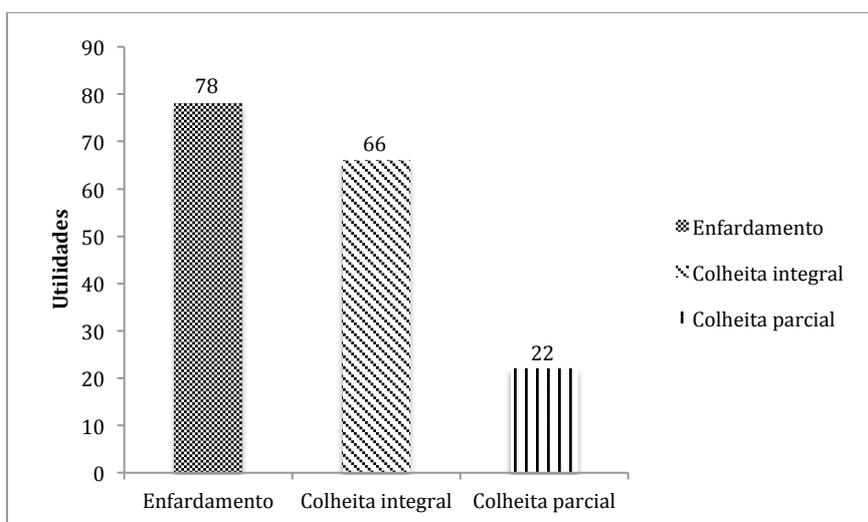
Figura10- Avaliação do critério “variáveis industriais”



Fonte: Elaboração do autor

Ao se comparar os resultados do modelo para o recolhimento de palhicho considerando apenas o critério “valor esperado da receita”, nota-se uma grande discrepância entre as alternativas de recolhimento. O enfardamento apresenta uma utilidade de 78%, enquanto a colheita integral atinge 66% do objetivo geral e a colheita parcial apenas 22%. Isso se deve ao fato da produtividade de energia produzida pelo enfardamento ser maior e também devido à quantidade de palhicho recolhido pela colheita parcial ser metade das outras alternativas. A Figura 11 mostra esses resultados.

Figura11- Avaliação do critério "valor esperado da receita"



Fonte: Elaboração do próprio autor

4.3 Simulação de Monte Carlo como análise de sensibilidade

O critério “valor esperado da receita” para avaliação das alternativas de recolhimento de palhiço utiliza informações futuras como a produção de excedente de energia e o preço da energia. Neste caso, a análise de sensibilidade por meio do método de Monte Carlo permite conhecer qual a variação do “valor esperado da receita” e avaliar as alternativas de recolhimento de palhiço mediante a variação do preço da energia. Para isso, é utilizado o histograma gerado com os dados históricos do PLD de 4 anos (2014 a 2017), o qual foi utilizado para simular 200 valores para avaliação.

Definido o número de classes e seus intervalos, a Tabela 5 apresenta os limites inferiores e superiores de cada classe, o número de ocorrências e a frequência do PLD entre esses limites.

Tabela5- Limites inferior e superior, número de ocorrências e frequência dos dados de PLD

Classe	Limite inf	Limite sup	Ocorr	Frequência	Frequência acumulada	Limite inferior	Limite superior
1	0	100	7	14,6%	14,6%	0	14,6%
2	100	200	10	20,8%	35,4%	14,6%	35,4%
3	200	300	7	14,6%	50,0%	35,4%	50,0%
4	300	400	8	16,7%	66,7%	50,0%	66,7%
5	400	500	3	6,3%	72,9%	66,7%	72,9%
6	500	600	4	8,3%	81,3%	72,9%	81,3%
7	600	700	1	2,1%	83,3%	81,3%	83,3%
8	700	800	3	6,3%	89,6%	83,3%	89,6%
9	800	900	5	10,4%	100,0%	89,6%	100,0%

Fonte: Elaboração do autor

A partir da simulação de preços da energia, é possível calcular as receitas e, analisar as utilidades para cada opção de recolhimento de palhiço juntamente com os demais critérios. Assim, são obtidas as alternativas sugeridas pelo modelo genérico para cada preço de energia.

A Tabela 6 mostra o resultado da simulação. A partir da simulação de 200 números aleatórios do preço de energia, por exemplo, os resultados mostram que quando o preço da energia estiver até R\$ 162,00 a alternativa escolhida é a de colheita parcial. Isso acontece pois preços de energia baixos refletem em uma receita menor e conseqüentemente em baixas utilidades para as alternativas (frequentemente utilidade 0). Dessa forma, uma menor interferência por parte do critério “valor esperado da receita” é verificada no modelo. Assim os critérios de custo e variáveis agroindustriais, os quais a opção de colheita parcial tem um bom desempenho, apresentam uma força maior neste caso.

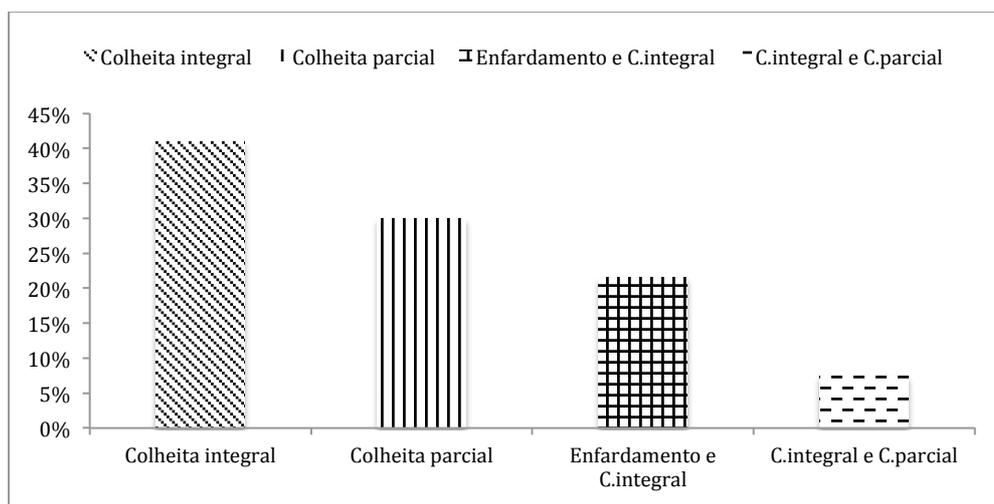
Tabela6- Faixa de preço e alternativa sugerida

Faixa de preços (R\$)	Alternativa sugerida
< 162,00	Colheita parcial
163,00 a 183,00	Colheita parcial e Colheita integral
184,00 a 301,00	Colheita integral
302,00 a 452,00	Enfardamento e Colheita integral
453,00 a 821,00	Colheita integral
822,00 a 838,00	Colheita integral e Colheita parcial
> 839,00	Colheita parcial

Fonte: Elaboração do autor

Adicionalmente, em 41% das simulações feitas com o preço da energia a alternativa sugerida foi a de colheita integral e 30% a de colheita parcial. Além disso, em 21,5% das tentativas, a utilidade do enfardamento ou de colheita integral são sugeridas. E em 7,5% das simulações as alternativas de colheita integral e parcial também têm a mesma valoração. A Figura 12 apresenta a frequência das alternativas de recolhimento de palhiço sugeridas pela análise de Monte Carlo.

Figura12- Frequência das alternativas de recolhimento sugeridas pela análise de Monte Carlo



Fonte: Elaboração do autor

Conclui-se assim, que ao realizar grandes variações no preço da energia, a alternativa escolhida é a de colheita integral.

5. Conclusão

Esta pesquisa teve como objetivo propor uma metodologia para abordar o problema do recolhimento de palhicho para a cogeração de energia em que as alternativas de colheita, enfardamento, colheita integral e colheita parcial estão disponíveis. A metodologia de análise de decisão multicritério, bem como a análise de simulação de Monte Carlo para escolha aleatória dos preços de mercado, são as principais contribuições desta pesquisa.

Os resultados da análise de Monte Carlo apresentam que para 41% dos preços de energia simulados, a solução de colheita integral é a sugerida. Conclui-se assim que, ao se considerar o caráter estocástico do preço da energia, a alternativa de colheita integral mostrou-se mais interessante. Neste sentido, é interessante notar que a solução sugerida pela metodologia não é a solução ótima em custo visível.

Diferente de outras abordagens, este trabalho tem foco na integração de critérios qualitativos e quantitativos, que não estão relacionados somente com o custo e receita do recolhimento e cogeração de energia, mas também com fatores agroindustriais responsáveis pelo bom desempenho da biomassa para a cogeração de energia elétrica. Além disso, a metodologia proposta também apresenta uma contribuição para o setor, à medida que foi validada por meio da aplicação do modelo utilizando dados de usinas com moagem de aproximadamente 3 milhões de toneladas de cana por safra. Neste sentido, o modelo pode ser utilizado por qualquer usina apenas com adaptações referentes às suas preferências e atualizações em

relação aos valores. Os decisores podem também formular cenários de interesse e comparar o seus resultados.

Por fim, a pesquisa apresenta também uma contribuição teórica para o campo de análise à medida que adiciona critérios importantes ao modelo de decisão para avaliar as alternativas de recolhimento do palhiço para a cogeração de energia. Para a escolha dessas alternativas, o modelo considerou *trade-offs* clássicos como custo e receita, mas também avaliou, conjuntamente a estes, as variáveis agroindustriais. O conjunto desses três fatores não foram objeto de estudos em trabalhos prévios.

Algumas limitações da abordagem proposta também são apresentadas como segue: nem todas as usinas têm todos os dados, ou não operam com as mesmas alternativas ou até não levam em consideração todos os critérios, por isso foram utilizados dados de cinco usinas que mantêm o mesmo padrão de operação e quantidade de palhiço disponível de 100 mil toneladas. Talvez um outro porte de usina pudesse indicar outro resultado. Como sugestão de trabalhos futuros é o uso combinado de alternativas. Pode ser que em determinadas áreas mais longe, a colheita integral com enfardamento seja a alternativa escolhida, enquanto para áreas mais perto a colheita integral ou parcial seja a recomendada, devido aos baixos custos de transporte.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES. Esta pesquisa também teve financiamento do CNPq, Projeto 309516/2016-1

REFERÊNCIAS

- BARRON, F. H.; BARRET, B. E. The Efficacy of SMARTER – Simple Multi-Attribute Rating Technique Extended to Ranking. *Acta Psychologica*, v. 93, p. 23-36, 1996.
- BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple Criteria Decision Analysis: an Integrated Approach**. New York: Springer, 2002.
- CARVALHO, J. L. N., NOGUEIROL, R. C., MENANDRO, L. M. S., BORDONAL, R. D. O., BORGES, C. D., CANTARELLA, H., & FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *GCB Bioenergy*. 2016.
- GERMEK, H. A., PATROCÍNIO, A. B., SILVA, F. C., SIMON, E. J., & RÍPOLI, T. C. Analysis decision about the sugarcane straw recovery for cogeneration in unity operation industry. *Bioenergia em Revista: Diálogos*. 2014.
- GOODWIN, P.; WRIGHT, G. **Decision Analysis for Management Judgment**. 3. ed. England: John Wiley & Sons, 2005.
- HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V., & MACEDO, I. Biomass power generation. Sugar cane bagasse and trash. **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento and Centro de Tecnologia Canavieira**, Piracicaba, Brazil, 2005.
- KEENEY, R. L.; WINTERFELDT, D. Practical Value Models. **Published articles & Paper**, v. 36, 2009.
- LOKEN, E.; BOTTERUD, A.; HOLEN, A. T. Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems. *European Journal of Operational Research*. 2000.

- MACEDO, I. C., SEABRA, J. E., & SILVA, J. E. 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**, 2008.
- MICHELAZZO, M. B., BRAUNBECK A. O. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhico na colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2008.
- PIEROSI, M.A.; FAGUNDES, S.A. Enfardamento da Palha. **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2013.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Edição dos Autores, 2009.
- SMITHERS, J. Review of sugarcane trash recovery systems for energy cogeneration in South Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014.
- SOUZA, Z. J. D., & AZEVEDO, P. F. D. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Revista de Economia e Sociologia rural**, 44(2), 179-199. 2006.
- TROMBETA, N. D. 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**, 2017.
- VELASQUEZ, M., HESTER, P. T. An analysis of multi-criteria decision making methods. **International Journal of Operations Research**, 2013.