

ANÁLISE ECONÔMICA DE CASOS DE COGERAÇÃO DE ENERGIA

EDUARDO LUIS GOLDONI¹; LEANDRO SOUTO DE OLIVEIRA²; RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS³ E PAULO SÉRGIO BARBOSA DOS SANTOS⁴

¹ Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Vargem Limpa, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil, eduardo.goldoni@unesp.br.

² Departamento de Engenharia de Biossistemas, Universidade Estadual Paulista, Rua Domingos da Costa Lopes, 780, Jd. Itaipu, CEP 17602-496, Tupã, SP, Brasil, leandrosouto182@hotmail.com.

³ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Avenida Brasil, 56, Centro, CEP 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil, ricardo.ramos@unesp.br.

⁴ Departamento de Engenharia de Biossistemas, Universidade Estadual Paulista, Rua Domingos da Costa Lopes, 780, Jd. Itaipu, CEP 17602-496, Tupã, SP, Brasil, paulo.sb.santos@unesp.br.

RESUMO: A proibição das queimadas para colheita alavancou o uso da palha da cana-de-açúcar em projetos de cogeração de energia. O presente trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade do *retrofit* de uma usina para incremento de produção de energia elétrica pela queima dessa palha residual. Foram simulados 42 casos de cogeração após modificações no sistema térmico dessa usina, considerando condições de impureza vegetal e umidade do bagaço, e como resultado, obteve-se o incremento de energia elétrica produzida para cada caso. Em seguida, foi calculada a receita do incremento da venda de energia para cinco faixas de preço (R\$ 150,00/MWh, R\$ 180,00/MWh, R\$ 210,00/MWh, R\$ 240,00/MWh e R\$ 270,00/MWh), bem como os custos operacionais, financeiros e de investimento. Na análise econômica foram estabelecidos fluxos de caixa para cada caso, nas cinco faixas de preço de energia. O estudo concluiu que, para o aproveitamento de palha em 10, 12 e 14% o projeto é atrativo e, no melhor dos casos obtêm-se a TIR de 23,12% com *payback* inferior a 6 anos. O valor da energia é um fator de impacto no estudo e o projeto viabiliza-se apenas para valores de energia superiores a R\$ 210,00/MWh.

Palavras-chaves: bioeletricidade, biomassa, cogeração de energia, aproveitamento de palha, análise financeira.

ECONOMIC ANALYSIS OF ENERGY COGENERATION CASES

ABSTRACT: The ban on burning for harvesting leveraged the use of sugarcane straw in energy cogeneration projects. The present work aimed to study the feasibility of retrofitting a plant to increase the production of electricity by burning this residual straw. 42 cases of cogeneration were simulated after modifications in the thermal system of this plant, considering conditions of vegetable impurity and bagasse humidity, and as a result and as a result, the increase in the electric energy produced for each case was obtained. Then, the revenue from the increase in energy sales was calculated for five price ranges (R\$ 150.00/MWh, R\$ 180.00/MWh, R\$ 210.00/MWh, R\$ 240.00/MWh and R\$ 270.00/MWh), as well as operating, financial and investment costs. In the economic analysis, cash flows were established for each case, in the five energy price ranges. The study concluded that, for the use of straw at 10, 12 and 14%, the project is attractive, and, in the best of cases an IRR of 23.12% is obtained with a payback of less than 6 years. The value of energy is an impact factor in the study, the project is only feasible for energy values greater than R\$ 210.00/MWh.

Keywords: bioelectricity, biomass, energy cogeneration, straw use, financial analysis.

1 INTRODUÇÃO

Dados do Plano Nacional de Energia 2050 apontam que o consumo de energia

elétrica no Brasil possa crescer até 3,5% a.a. devido ao crescimento econômico do país, chegando a 241 GW médios. Ações que promovam a eficiência energética e a geração

distribuída na rede podem suprir parte dessa demanda, porém estima-se que a atual rede centralizada deve aumentar sua capacidade de geração em 2,6 vezes até 2050 (GOLDONI *et al.*, 2022). A biomassa pode ser uma das alternativas para alavancar a produção de energia elétrica no país neste período.

No Brasil, a geração de energia através de biomassa é responsável por 8,8% da capacidade instalada da Matriz de Energia Elétrica e o bagaço de cana-de-açúcar tem a maior participação neste tipo de fonte, com 77% (DÍAZ PEREZ *et al.*, 2018). Florestas plantadas (indústria de carvão e celulose) representam 22% da energia produzido por biomassa, enquanto 1% é proveniente de outras fontes (DÍAZ PEREZ *et al.*, 2018).

No centro-sul do Brasil a colheita da cana-de-açúcar se dá entre os meses de abril e novembro, assim a bioeletricidade produzida pela queima do bagaço atinge seu pico de produção nos meses em que há a redução dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas pela escassez de chuvas. Logo, além de expandir o potencial de geração da matriz, a bioeletricidade complementa o sistema no período de baixa disponibilidade das hidrelétricas e conseqüente alta dos preços no mercado de energia (AHMED; ELDIN, 2015; MACEDO; ENSINAS *et al.*, 2007; LEAL; HASSUANI, 2001; MOREIRA *et al.*, 2016; SANTOS; RAMOS, 2020).

O bagaço de cana ganhou destaque na matriz energética nos últimos 20 anos com a proibição das queimadas e a implantação da colheita mecanizada (SANTOS; RAMOS, 2020). Esta palha residual foi identificada como uma matéria-prima valiosa para a produção de bioenergia conforme Carvalho *et al.* (2017) e Menandro *et al.* (2017). Para possibilitar a eficiência na conversão da energia da biomassa excedente, as usinas realizaram o *retrofit* dos seus sistemas industriais concentrando seus investimentos na substituição das caldeiras de 21 bar e 300° C, para modelos mais eficientes de 65 bar e 490 °C, com capacidade de 150 a 250 t/h de vapor (DÍAZ PEREZ *et al.*, 2018). Também foi implementada a utilização de turbinas de multiestágio para acionamento de geradores de energia, e equipamentos de

extração como Moendas e Desfibradores, tradicionalmente acionados por turbinas de simples estágio de 21 bar, passaram a ser acionados por motores elétricos (SANTOS; RAMOS, 2020).

O potencial de mercado com bioeletricidade também proporciona ganhos financeiros para as usinas e aumenta o fluxo de caixa para enfrentar a crise relacionada ao preço do etanol e a queda no valor do açúcar no mercado internacional (CERVI *et al.*, 2019; MARCELO *et al.*, 2017; PINA *et al.*, 2015; SANTOS; RAMOS, 2020; SOUTO *et al.*, 2018;).

O presente trabalho teve como objetivo estudar tecnologias e condições de processo para aumentar a cogeração de energia, a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar e da palha recolhida na lavoura, e realizar uma análise econômica para as condições de processo propostos, calculando o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o *payback* e a taxa de lucratividade, a fim de verificar a viabilidade do investimento.

O projeto está em linha com o sétimo dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovidos pela ONU, que propõe assegurar o acesso à energia de forma confiável e moderna, aumentar a participação das energias renováveis na matriz e promover investimentos em infraestrutura e tecnologias de energia limpa.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caso 1 – Configuração atual da usina

A usina de açúcar e álcool considerada no estudo tem a capacidade de moagem horária de 708 toneladas de cana picada e não queimada. Desse total, cerca de 4% é classificada como impureza vegetal que refere à palhiços e folhas transportadas do campo para a usina. Essa impureza vegetal representa aproximadamente 14,30% de toda a palha produzida no canavial, ou seja, 85,70% da palha fica na lavoura após a colheita mecanizada.

Ao ser descarregada na mesa alimentadora da unidade industrial a cana passa

por um sistema de limpeza a seco que separa cerca de 28,33 t/h de palha. A produção de bagaço é de 198,33 t/h após o processo em duas linhas de moagem de seis ternos de moendas, o que resulta em um total de biomassa (palha e bagaço) de 226,66 t/h, sendo 172,25 t/h utilizadas nas caldeiras, 18,13 t/h enviadas para reserva técnica e 36,28 t/h reservadas para o uso na entressafra.

A planta energética atual da usina é constituída por duas caldeiras com capacidade

de produção de 170 t/h de vapor à 21 bar e 300 °C. Esse vapor é utilizado em turbinas que acionam equipamentos do processo de extração de caldo como picadores, desfibradores e moendas, na própria geração de vapor, em ventiladores e bombas das caldeiras.

A configuração de acionamento através de turbinas apresenta baixo rendimento termodinâmico conforme é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Características das turbinas de acionamento.

Equipamento	Consumo de vapor (t/h)	Rendimento Termodinâmico (%)	Potência (kW)	Característica de Velocidade
Picador A	7,85	45,0	418,23	Constante
Desfibrador A	9,68	46,4	531,97	Constante
1°/2° ternos MA	13,12	46,1	716,72	Variável
3°/4° ternos MA	13,12	43,1	670,31	Variável
5°/6° ternos MA	13,12	45,2	702,87	Variável
Picador B	12,46	24,5	361,76	Constante
Desfibrador B	12,46	48,2	711,69	Constante
1° terno MB	8,5	47,5	478,54	Variável
2° terno MB	8,5	40,5	408,00	Variável
3°/4° ternos MB	14,35	40,5	688,67	Variável
6° terno MB	11,87	45,0	683,11	Variável
Turbo-bombas	2,8	45,0	149,32	Variável
Exaustores	5,7	45,0	303,96	Variável

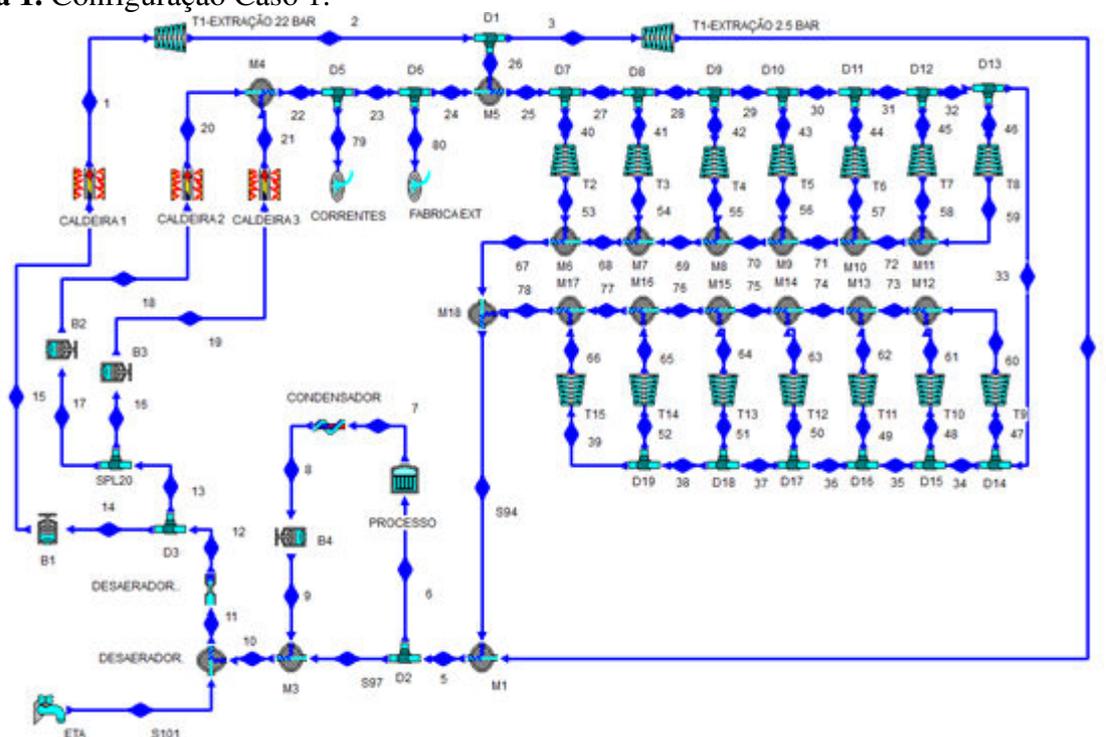
Fonte: Santos e Ramos (2020)

A usina também conta com um sistema moderno de cogeração de energia em um complexo composto por uma caldeira de capacidade nominal de 275 t/h de vapor à 67 bar e 515 °C, e um conjunto turbogerador de potência nominal de 50 MW. Atualmente esse sistema fornece uma potência de 39 MW. Como

a usina tem uma demanda de energia elétrica de 12 MW para suas atividades, o excedente (27 MW) é exportado para o Sistema Interligado Nacional e acrescenta ao faturamento da usina como venda de energia.

A configuração da planta térmica da usina é demonstrada na Figura 1.

Figura 1. Configuração Caso 1.



Fonte: Próprio Autor.

2.2 Caso 2 – Proposta de modernização da usina

É proposto neste trabalho a substituição das duas caldeiras de 21 bar por uma caldeira que produz 360 t/h de vapor a 67 bar e 515 °C, além da instalação de uma turbina de extração-condensação acoplada a um gerador de energia de potência nominal de 80 MW.

A escolha deste tipo de turbina é justificada pela necessidade de suprimento de vapor à baixa pressão de 1,50 bar, para o processo de evaporação de caldo. Da vazão total que passa pela turbina, uma fração de vapor é extraída ao processo e a outra passa pelo condensador e retorna para a caldeira. Assim, apesar do seu maior custo esse tipo de turbina possui maior flexibilidade para as entregas de energia elétrica e térmica para o processo da usina (SANTOS; RAMOS, 2020).

Além da alteração do processo de geração de energia, foi proposto que todos os acionamentos realizados por turbinas de 21 bar seriam substituídos por acionamentos a partir de motores elétricos de alta eficiência. O

picador de cana foi removido pois a usina processa apenas cana picada, de modo que o equipamento atualmente não tem relevância no processo de preparo.

Santos e Ramos (2020) propuseram o uso de motores de indução trifásico para os acionamentos dos equipamentos de uma usina, adotando motores de média-tensão (MT - 4,16 kV) com partida direta para acionamentos de velocidade constante, e motores de baixa-tensão (BT - 690V) para acionamentos de velocidade variável por meio de dispositivos inversores de frequência.

O montante de energia elétrica adicional P_a para substituir o trabalho mecânico realizado por turbinas a vapor W_t , é dado pela Equação 1, levando-se em consideração o fator de correção ponderado de eletrificação (F_c).

$$P_a = W_t \cdot F_c \quad (1)$$

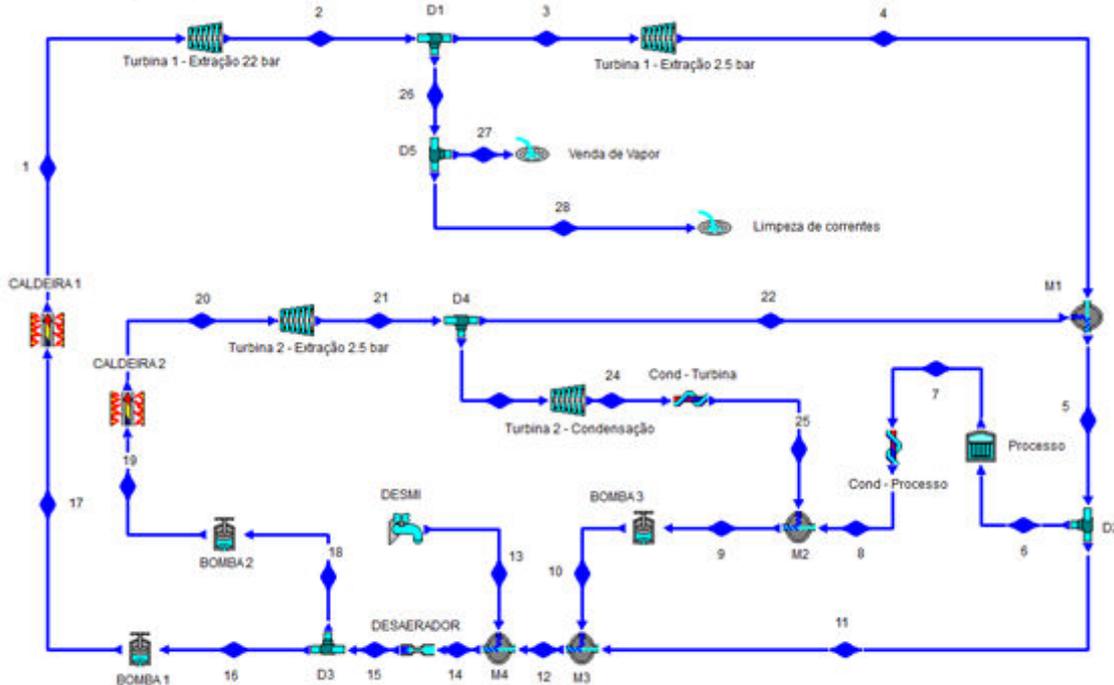
O fator de correção de eletrificação ponderado (F_c) é determinado de acordo com o consumo em média tensão (C_m) e baixa tensão (C_b), além de eficiências em média tensão (η_m)

e baixa tensão (η_b) através da Equação 2 (SANTOS; RAMOS, 2020).

$$F_c = \frac{1}{[(\eta_m \cdot C_m) + (\eta_b \cdot C_b)]} \quad (2)$$

O modelo proposto para o Caso 2 é apresentado na Figura 2.

Figura 2. Configuração do Caso 2.



Fonte: Próprio Autor.

Quanto ao aproveitamento de palha foram considerados seis casos para a impureza vegetal da usina. A impureza vegetal representa a fração de palha trazida do campo em relação ao total de carga transportada. Na Tabela 2, estão relacionados o percentual de impureza

vegetal da carga de cana-se-açúcar transportada, a fração de palha colhida do campo e a vazão total de palha, em toneladas, descarregada na mesa alimentadora para cada caso simulado neste trabalho.

Tabela 2. Casos de utilização de palha.

Casos	Impureza vegetal (%)	Palha da lavoura (%)	Vazão de palha (t/h)
Caso 2.1	4,00	14,29	28,32
Caso 2.2	6,00	21,43	42,48
Caso 2.3	8,00	28,57	56,64
Caso 2.4	10,00	35,71	70,80
Caso 2.5	12,00	42,86	84,96
Caso 2.6	14,00	50,00	99,12

Fonte: Próprio Autor.

Outro fator importante para o estudo é a umidade do bagaço, que é enviado para a

queima nas caldeiras, pois impacta diretamente a eficiência da geração de vapor. Para cada um

dos casos de impureza vegetal foram simulados valores de umidade de bagaço que variaram de 54 a 48%, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Umidade do bagaço.

Casos	Umidade Bagaço (%)
2.X.1	54,00
2.X.2	53,00
2.X.3	52,00
2.X.4	51,00
2.X.5	50,00
2.X.6	49,00
2.X.7	48,00

Fonte: Próprio Autor.

Portanto, para cada caso de utilização de palha foram simulados sete casos de umidade de bagaço, totalizando, assim, 42 análises técnicas, com o objetivo de verificar o incremento de potência disponível para exportação ao Sistema Interligado Nacional após a alteração da configuração da planta energética da usina.

2.3 Análise técnica

A análise técnica deste projeto consiste na simulação do novo fluxo energético proposto para a usina nas condições de utilização de palha e umidade da biomassa definidos e como resposta, obtêm-se a potência mecânica a ser extraída das turbinas e disponibilizada para geração de energia elétrica.

Primeiramente, foi verificada a disponibilidade de biomassa para a queima nas caldeiras no Caso 2. Neste passo, somou-se a quantidade de bagaço produzido na moagem à quantidade de palha adicionada para cada caso de utilização de palha conforme Tabela 2.

Em seguida, calculou-se o *PCI* da biomassa a ser queimada, conforme a Equação 3, apresentada por (HUGOT, 1977).

$$PCI = 4250 - 12s - 48,5w \quad (3)$$

sendo: *PCI*, o Poder Calorífico Inferior, *s* a pol da biomassa e *w* a umidade da biomassa.

No terceiro passo foram obtidos os valores de entalpia da água de alimentação da caldeira h_1 (437,50 kJ/kg) e do vapor de saída h_2 (3.412,00 kJ/kg).

Obtidos os valores de biomassa disponível para a queima, o seu *PCI*, calculado pela Equação 2, estimando o rendimento do gerador de vapor de 86,20%, bem como a entalpia de entrada e saída do gerador de vapor foi possível estimar a produção de vapor das caldeiras para cada um dos 42 casos.

O último passo da análise técnica foi a simulação do fluxo energético da usina utilizando o programa *CyclePad*, desenvolvido pelo *Qualitative Reasoning Group* da *Northwestern University* (FORBUS *et al.*, 1999).

Foi implementada a configuração de modernização da usina conforme a Figura 2, sendo estabelecidas as condições de processo como pressão e temperatura das linhas, além de modos de operação e rendimento dos equipamentos da indústria, tais como caldeiras, turbinas, bombas e trocadores de calor.

Finalmente, para cada uma das 42 vazões de vapor consideradas, obteve-se como saída da simulação o Trabalho Mecânico, em Watts, que pode ser extraído das turbinas para a geração de energia elétrica.

2.4 Análise financeira

A análise financeira é muito utilizada em projetos dos mais diversos tipos, uma vez que a mesma fornece um panorama considerado indispensável, que permite o estudo de indicadores financeiros que auxiliam na tomada de decisão como um todo.

As técnicas de análise de investimento de capital levam em consideração o fator tempo no valor do dinheiro e envolvem conceitos de fluxo de caixa supostamente conhecidos que são utilizados ao longo da vida útil do projeto (GITMAN, 1984).

O valor presente líquido (VPL) demonstra o lucro líquido real que o investidor deve obter ao final do projeto. Neste método a entrada líquida anual (ELC), que é obtida através das receitas pela venda de energia descontadas das despesas operacionais e impostos para cada período k , em anos, é atualizada para o ano base, por meio de uma taxa de desconto chamada taxa mínima de atratividade (TMA) e em seguida é somada ao capital a ser investido (C). A variável n refere-se ao tempo do projeto, e neste trabalho foi estabelecida em 20 anos. O VPL com valor positivo indica que o projeto é viável.

$$VPL = \sum_k^n \frac{ELC}{(1+TMA)^k} - C \quad (4)$$

A taxa interna de retorno (TIR) de um investimento é a taxa em que o valor presente líquido do projeto se iguala a zero, tratando-se de um critério mais objetivo para avaliação e se baseia no custo do capital. O projeto apresentará viabilidade apenas quando a TIR for superior à TMA, e ainda podemos comparar o retorno do projeto em questão com outros projetos do portfólio da empresa ou mesmo com outras modalidades de aplicações financeiras disponíveis para o investidor.

$$\sum_k^n \frac{ELC}{(1+TIR)^k} - C = 0 \quad (5)$$

Um outro fator importante é o tempo de retorno do projeto, ou *payback* do projeto, e se refere ao tempo que deve decorrer para o fluxo de caixa atualizado cancelar o investimento inicial. Neste trabalho utilizamos o conceito de *payback* descontado, onde se leva em conta o

custo do capital empregado. Quando menor for o *payback* descontado mais interessante será o projeto.

O último indicador que utilizamos nesta análise de investimento é o retorno sobre o capital investido (ROIC - *Return on Invested Capital*) que é a razão entre o lucro líquido operacional menos os impostos ajustados (L) e o capital investido (C). Quanto maior o ROIC do projeto, mais rentável e eficiente será o investimento.

$$ROIC = \frac{L}{C} \quad (6)$$

O primeiro passo para a análise financeira foi realização de uma pesquisa para definir o investimento que a usina deve fazer para o incremento de geração de energia. A simulação do modelo técnico definiu a necessidade de compra de uma caldeira de alta pressão, 67 bar, 515 °C, 360 t/h, além de um turbogerador de 80 MW para o máximo aproveitamento do sistema térmico. Todo o investimento para a compra desses equipamentos e demais itens necessários para o seu funcionamento, tais como estação de tratamento de água (ETA), torres de resfriamento e tubulações, foram estimados através de pesquisa com fornecedores e totalizaram o valor de R\$ 141.856.478,00.

Como investimento para a implementação do Caso 2 também está o aporte para a eletrificação dos acionamentos dos equipamentos antes acionados por turbinas de baixa eficiência. Neste item foram considerados os motores elétricos, redutores, cabos, inversores e todo sistema elétrico de potência a ser instalado, tais como transformadores, cubículos e centro de controle de motores, totalizando o montante de R\$ 64.004.885,00.

Considerou-se que ativos como as caldeiras e turbinas desativadas podem ser vendidos e essa verba, avaliada em R\$ 53.166.875,00, foi utilizada para amortizar o investimento.

Em seguida, foi estabelecido o fluxo de caixa para 20 anos de operação do projeto. As receitas provenientes do incremento da venda de energia foram calculadas para cinco faixas

de preço, R\$ 150,00/MWh, R\$ 180,00/MWh, R\$ 210,00/MWh, R\$ 240,00/MWh e R\$ 270,00/MWh, para cada um dos 42 casos apresentados na análise técnica. As despesas indicadas no fluxo de caixa foram as operacionais, como transporte de palha, custo de operação e manutenção da área de geração

de energia; as despesas com impostos sobre vendas (PIS, COFINS); além de depreciação, amortização e imposto de renda. A Tabela 4 apresenta os custos de transporte de palha, operação e manutenção do sistema de geração de energia.

Tabela 4. Custos operacionais.

Impureza vegetal (%)	Custo transporte palha (R\$)	Custo operação e manutenção (R\$)
4,00	3.654.000,00	3.150.000,00
6,00	5.983.659,00	3.217.021,00
8,00	8.677.565,00	3.286.956,00
10,00	11.760.000,00	3.360.000,00
12,00	15.257.454,00	3.436.363,00
14,00	19.198.883,00	3.516.279,00

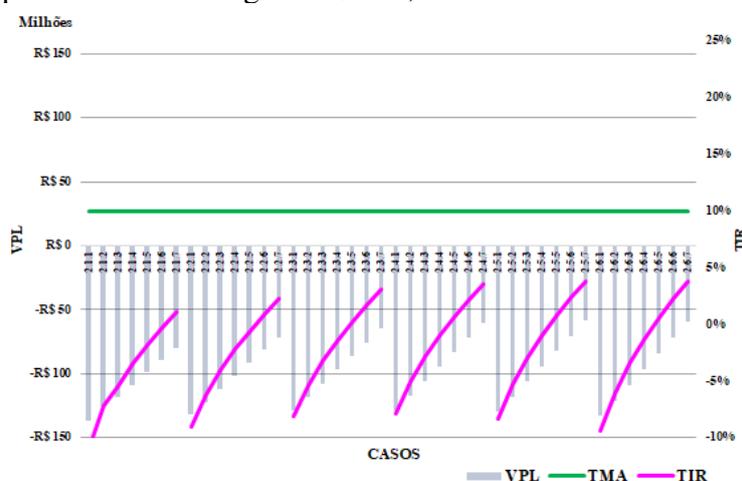
Fonte: Próprio Autor.

Assim, foram feitas 210 análises financeiras com o objetivo que verificar o *VPL*, *TIR*, *payback* descontado e *ROIC* do projeto. Tais indicadores, saídas propostas para o trabalho, são essenciais para a tomada de decisão assertiva por parte do investidor e são apresentados no tópico seguinte.

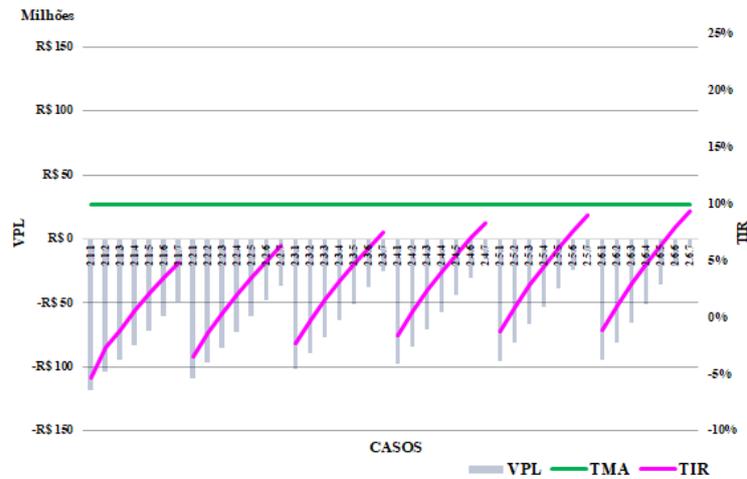
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não houve casos de viabilidade com os preços de venda de energia de R\$ 150,00/MWh e R\$ 180,00/MWh como pode ser visto pelos gráficos da Figuras 3 e 4. A *TIR* em ambos os casos não cruza com a linha da *TMA* de 10%, representada na cor verde, e o *VPL* é negativo para todos os casos de utilização de palha e umidade do bagaço.

Figura 3. *VPL* e *TIR* para venda de energia a R\$ 150,00/MWh.



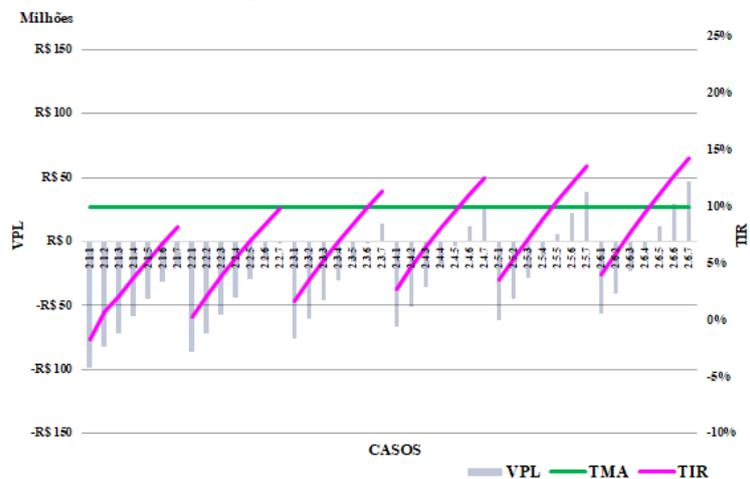
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4. *VPL e TIR* para venda de energia a R\$ 180,00/MWh.

Fonte: Próprio Autor.

Os primeiros casos de viabilidade do uso de palha aparecem nas simulações para o preço de venda de R\$ 210,00/MWh, dado no gráfico da Figura 5. Em nove dos 42 casos simulados para este valor a *TIR* superou a Taxa de 10%, apresentando *VPL* positivo para casos com utilização de 8 a 14% de impureza vegetal.

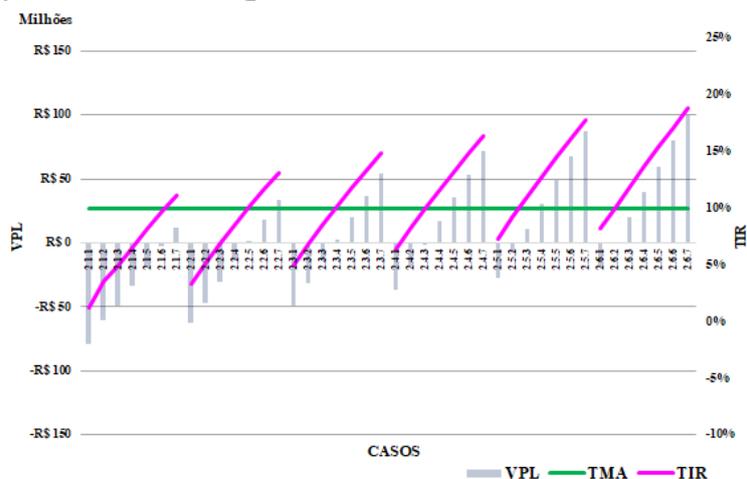
Observa-se a importância do controle da umidade do bagaço no processo, visto que para a utilização de 8% de impureza vegetal, apenas com a umidade de 48%, valor excelente para os padrões de operação atuais, o projeto apresenta viabilidade.

Figura 5. *VPL e TIR* para venda de energia a R\$ 210,00/MWh.

Fonte: Próprio Autor.

No gráfico da Figura 6 tem-se o *VPL* e o *TIR* para o valor de venda de energia a R\$ 240,00/MWh. Para os 42 casos simulados, 22 apresentaram viabilidade, inclusive um caso para a carga transportada com 4% de palha e folhas, condição atual da usina, demonstrando que investir na modernização das unidades industriais com a eletrificação de acionamentos

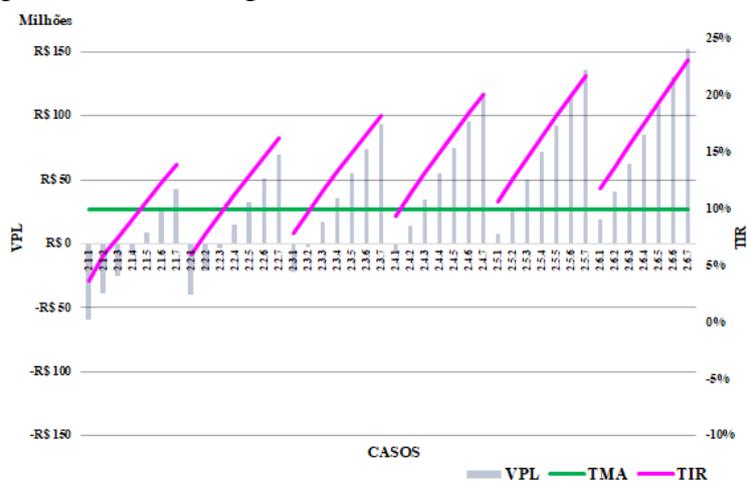
e utilização de rolos de alta drenagem pode ser lucrativo, a depender de condições externas como a alta do preço da energia. Em um cenário de crescimento da demanda por energia e dificuldade em expandir o parque energético, a atratividade para a modernização da unidade industrial aumenta.

Figura 6. VPL e TIR para venda de energia a R\$ 240,00/MWh.

Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 7 é apresentado os indicadores de viabilidade para o valor de venda de energia de R\$ 270,00/MWh. Apenas 10 dos 42 casos não apresentaram viabilidade,

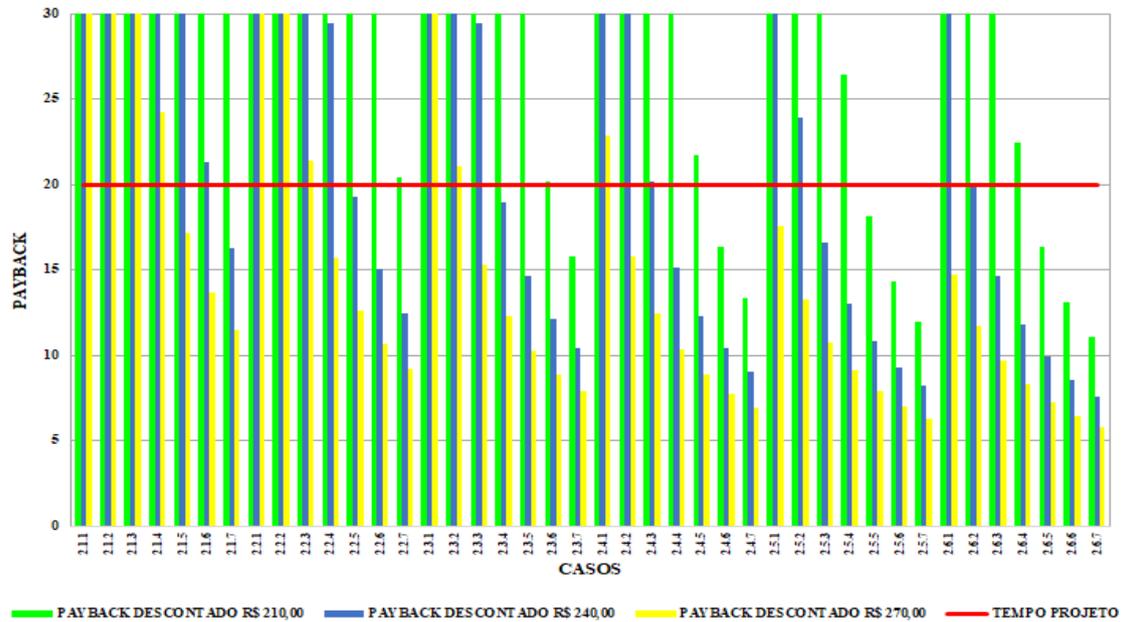
a TIR para os casos de lucratividade variou de 10,69% a 23,12%, e o VPL variou de R\$ 7.275.964,00 no Caso 2.5.1 a R\$ 152.673.914,00 no Caso 2.6.7.

Figura 7. VPL e TIR para venda de energia a R\$ 270,00/MWh.

Fonte: Próprio Autor.

Para a análise do *payback* descontado do projeto foi utilizada a Figura 8. A linha vermelha representa o tempo do projeto,

estipulado em 20 anos, ou seja, para os casos onde o *payback* descontado é menor que 20 anos o projeto apresenta viabilidade.

Figura 8. *Payback* descontado do projeto.

Fonte: Próprio Autor.

Neste gráfico estão representados o *payback* descontado para simulações para valores de venda de energia de R\$ 210,00/MWh, R\$ 240,00/MWh e R\$ 270,00/MWh, pois para os demais valores não houve casos de viabilidade como observados nos gráficos das Figuras 3 e 4.

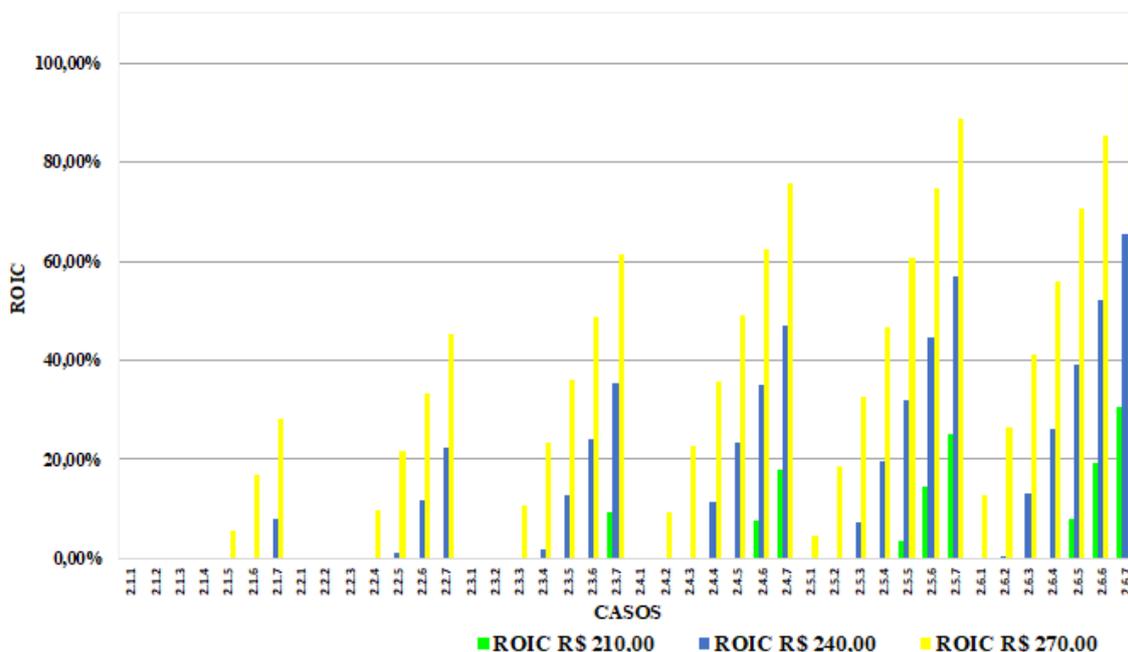
O menor valor simulado do preço de energia que apresenta viabilidade para o projeto é de R\$ 210,00/MWh, no caso 2.3.7 o *payback* foi de 15,8 anos. Neste caso, deve ser aproveitada cerca de 28% da palha da lavoura.

Para valores de venda de R\$ 240,00/MWh, temos um caso de viabilidade para 14,29% de utilização da palha da lavoura, porém mantendo a umidade do bagaço em 48%, caso 2.1.7. No melhor caso para este valor de venda chegamos ao *payback* de 7,6 anos, na condição de 14% de aproveitamento de palha

em relação à carga transportada e 48% de umidade do bagaço.

O primeiro caso com viabilidade para R\$ 270,00/MWh é o caso 2.1.5, ou seja, utilizando 14,29% de palha da lavoura e umidade do bagaço em 50%, porém nessas condições o projeto se pagaria em 17 anos. Para o mesmo valor de venda, temos um *payback* de pouco menos de 6 anos para o caso 2.6.7, 50% palha da lavoura e 48% de umidade do bagaço.

Por fim, é apresentada a análise do *ROIC*, também para valores de venda de energia de R\$ 210,00/MWh, R\$ 240,00/MWh e R\$ 270,00/MWh. O *ROIC* representa quanto o investidor terá de lucro para cada R\$ 1,00 investido. Na Figura 9, os casos que apresentam viabilidade possuem um valor de *ROIC* superior a 0%.

Figura 9. Retorno do capital investido.

Fonte: Próprio Autor.

Para o caso com maior utilização de palha e folhas da lavoura (50%), e umidade do bagaço de 48%, caso 2.6.7, com valor de venda de energia de R\$ 270,00/MWh o *ROIC* projetado é de 100%, ou seja, o investidor teria um lucro, em 20 anos, de R\$ 1,00 para cada R\$ 1,00 investido, considerando a *TMA* de 10% a.a., em outras palavras, o investidor dobraria o seu capital investindo neste projeto.

4 CONCLUSÕES

Tão importante quanto analisar o investimento agrícola para o envio de palha do campo para a indústria, é necessário modernizar o sistema industrial para a máxima cogeração, substituindo equipamentos industriais que utilizam o vapor como energia motriz por equipamentos acionados por energia elétrica, além de investir em caldeiras modernas de alta pressão. Devemos ainda planejar os custos operacionais e impostos ao longo do tempo de vida do projeto para a tomada de decisão por parte do empreendedor.

Evidencia-se, pelas análises feitas, a importância da umidade final do bagaço a ser queimado, pois umidades acima 52% comprometem o sistema de combustão e provocam prejuízos financeiros às usinas. Um

sistema de moagem com rolos de alta drenagem, como o Rolo Lotus, é uma das soluções viáveis que aumentariam rendimento da cogeração de energia, com umidades próximas a 49% (SANTOS; RAMOS, 2020).

Para a taxa mínima de atratividade de 10%, apenas 32 das 210 das simulações (30,47%), apresentaram valor presente líquido positivo, ainda assim, metade dessas com a venda de energia em R\$ 270,00/ MWh, valor bem superior à média do mercado atual (R\$ 185,00/MWh). Nenhuma simulação apresentou atratividade para valores de venda de energia em R\$ 150,00 e R\$ 180,00.

À medida que aumentamos a palha enviada do campo para a indústria o custo agrícola cresce, mesmo assim, para aproveitamento de palha em 10, 12 e 14%, podemos visualizar o crescimento da atratividade, com a taxa interna de retorno chegando a 23,12% e *payback* descontado inferior a 6 anos no caso 2.6.7 para valor de venda de energia a R\$ 270,00/MWh.

Esse projeto, nas condições estudadas, teria dificuldades de alavancagem por parte do investidor, visto que apresenta um aporte inicial alto e lucratividade apenas em condições excelentes de processo de moagem e com um risco elevado em relação ao mercado pela

variação do preço de energia. Tem-se como sugestão para trabalhos futuros o estudo das condições externas que afetam o investimento, como a análise da conjuntura energética do Brasil para os próximos 20 anos, estabelecendo cenários de crescimento da demanda e expansão do parque energético para investigar a atratividade dos novos projetos de cogeração de energia em usinas sucroalcooleiras.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Reitoria da UNESP pela Bolsa PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica) conforme Projeto 2024.

6 REFERÊNCIAS

- AHMED, A. E.; ELDIN, A. O. M. A. An assessment of mechanical vs manual harvesting of the sugarcane in Sudan – The case of Sennar Sugar Factory. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, Riyadh, v. 14, n. 2, p. 160-166, 2015.
- CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Global Change Biology Bioenergy**, Hoboken, v. 9, p. 1181–1195, 2017.
- CERVI, W. R.; LAMPARELLI, R. A. C.; SEABRA, J. E. A.; JUNGINGER, M.; HILST, F. Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in Brazil: A spatially explicit assessment. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 122, p. 391-399, 2019.
- DÍAZ PEREZ, A. A.; ESCOBAR PALACIO, J. C.; VENTURINI, O. J.; MARTÍNEZ REYES, A. M.; RÚA OROZCO, D. J.; SILVA LORA, E. E.; ALMAZAN DEL OLMO, O. A. Thermodynamic and economic evaluation of reheat and regeneration alternatives in cogeneration systems of the Brazilian sugarcane and alcohol sector. **Energy**, Oxford, v. 152, p. 247-262, 2018.
- ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; LOZANO, M. A.; SERRA, L. M. Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 48, n. 11, p. 2978-2987, 2007.
- GITMAN, L. J. **Princípios da administração financeira**. 3. ed. São Paulo: Harba, 1984.
- GOLDONI, E. L.; OLIVEIRA, L. S.; RODRIGUEIRO, M. M. S.; OLIVEIRA, K. S. M.; MOLLO NETO, M.; RAMOS, R. A. V.; SANTOS, P. S. B. dos. Use of sugarcane straw to increase electricity generation: systematic literature review. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 12, p. e176111234232, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i12.34232. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/34232>. Acesso em: 1 maio 2023.
- HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira**. São Paulo: Mestre Jou, 1977. 2 v.
- FORBUS, K. D.; WHALLEY, P. B.; EVERETT, J. O.; UREEL L.; BROKOWSKI M.; BAHER J.; KUEHNE S. E. CyclePad: An articulate virtual laboratory for engineering thermodynamics. **Artificial Intelligence**, New York, v. 114, p. 297-347, 1999.
- MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; HASSUANI, S. J. Sugar cane residues for power generation in the sugar/ethanol mills in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, Bangalore, v. 5, n. 1, p. 77-82, 2001.
- MARCELO, D.; BIZZO, W.; ALAMO, M.; VÁSQUEZ, E. Assessment of sugarcane byproducts for energy use in Peru. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 115, p. 397-408, 2017.
- MENANDRO, L. M. S.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J.; KÖLLN, O. T.; PIMENTA, M. T. B.; SANCHES, G. M.;

RABELO, S. C.; CARVALHO, J. L. N. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. **Biofuels Bioproducts and Biorefining**, Chichester, v. 11, p. 488-504, 2017.

MOREIRA, J. R.; ROMEIRO, V.; FUSS, S.; KRAXNER, F.; PACCA, A. S. BECCS potential in Brazil: Achieving negative emissions in ethanol and electricity production based on sugar cane bagasse and other residues. **Applied Energy**, London, v. 179, p. 55-63, 2016.

PINA, E. A.; BERECHÉ, R. P.; RODRIGUEZ, M. F. C.; ENSINAS, A. V.; MODESTO, M.; NEBRA, S. Reduction of process steam demand and water-usage

through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane - Evaluation of different plant configurations. **Energy**, Oxford, v. 138, p. 1263-1280, 2015.

SANTOS, P. S. B.; RAMOS, R. A. V. Increased energy cogeneration in the sugar-energy sector with the use of sugarcane straw, electrification of drives, and high-drainage rollers in the extraction. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 2, p. 249-257, 2020.

SOUTO, T.; COELHO, A.; HOLANDA, R.; MORAES, A.; PAZ, Y.; DA SILVA, R. Viabilidade da bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 409-429, 2018.