

## Premissas da PalhaCalc

### 1. *Objetivo da calculadora*

A presente calculadora tem como objetivo principal disseminar a importância da remoção e do uso da palha para a geração de eletricidade, visando contribuir para o fortalecimento de uma matriz energética com menores emissões de gases de efeito estufa. Essa ferramenta *online* é um legado do projeto SUCRE, com o intuito de gerar estimativas acerca do potencial técnico, econômico e ambiental de projetos associados ao tema. Recomendamos o seu uso apenas para fins exploratórios, com intuito de fornecer estimativas preliminares e dados de interesse aos usuários a respeito do tema. Portanto, estudos mais aprofundados e que utilizem premissas diferentes das estabelecidas na presente ferramenta, são recomendados em caso de tomadas de decisão em casos reais.

### 2. *Sobre o uso dos resultados*

A versão atual da calculadora é a 1.0. No caso de eventuais atualizações, seus resultados não serão comparáveis aos de versões anteriores; eventuais modificações serão informadas em documento semelhante. O uso dos resultados obtidos a partir do uso da presente calculadora é de total responsabilidade do usuário e, conforme descrito nas declarações legais que antecedem o seu uso na plataforma online, apesar da ferramenta contar com grande parte do conhecimento gerado no projeto SUCRE e da estrutura de modelagem da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar do LNBR, a mesma tem um escopo limitado de atuação, tendo uma finalidade educativa acerca do tema.

### 3. *Escopo dos modelos e das avaliações*

O nível de detalhamento de uma avaliação de um projeto no setor sucroenergético pode ser muito profundo, a depender do tipo de respostas que se deseja obter. A presente calculadora foi desenvolvida apenas para casos onde se deseja avaliar o potencial incremental de remoção e uso da palha. Ou seja, apesar de a avaliação levar em consideração efeitos em uma usina já em operação, os resultados fornecidos aos usuários referem-se apenas aos impactos decorrentes do projeto de geração de eletricidade a partir da remoção adicional de palha. Para criar uma ferramenta de uso universal, assume-se que a usina não realiza a expansão da capacidade atual de suas caldeiras, turbinas e moendas. Do ponto de vista de caldeiras e turbinas, a calculadora tem como premissa fundamental o fato de uma usina/destilaria poder gerar mais eletricidade devido ou ao armazenamento de biomassa para processá-la durante a entressafra (por um período adicional de até 30 dias) ou, caso tenha alguma capacidade ociosa em seu sistema de cogeração de até 20% em suas caldeiras e turbinas. Nesse sentido, a máxima quantidade removida de palha no campo é estabelecida também pelas limitações industriais. Para o caso da rota de recolhimento de palha integral, assume-se que a moenda possui capacidade de processar fibra adicional (em torno de até 10% de aumento da quantidade de fibras processadas). Para valores de palha processada que excedam os limites, um alerta é gerado, já que os resultados calculados estarão fora do intervalo de validade da presente ferramenta.

#### 4. Premissas da avaliação agrícola

Para as simulações da fase agrícola, os cálculos são realizados com base nas especificações da produção de cana-de-açúcar definidas pelo usuário: produtividade, distância de transporte, escolha da rota de recolhimento e disponibilidade de palha para recolhimento.

Na calculadora, considerou-se que cada tonelada de colmo produz cerca de 14% de palha, em base seca. A quantidade de palha disponível para recolhimento corresponde à quantidade de palha produzida menos a impureza vegetal que já foi recolhida junto com os colmos na colheita. Nesse caso, a depender do valor assumido pelo usuário sobre impureza vegetal, tal resultado irá variar.

Para o recolhimento via fardos foi considerado o valor médio de 15% de umidade da palha recolhida. Para a enfardadora, assumiu-se uma operação média de 5 horas efetivas por dia e fardos com densidade de  $180 \text{ Kg/m}^3$ , transportados em rodotrens, com capacidade volumétrica de  $184 \text{ m}^3$ .

Para a colheita integral, considerou-se que o transporte de colmos e palha é realizado em caminhões do tipo Rodotrem, com capacidade volumétrica de  $184 \text{ m}^3$ . A densidade de carga e a umidade da palha, neste sistema de recolhimento, variam de acordo com as quantidades de palha recolhida. Assim, a densidade de carga pode assumir valores entre  $326 \text{ kg/m}^3$  e  $200 \text{ kg/m}^3$  e a umidade da palha pode variar entre 32% a 50%. Quanto maior a quantidade de palha na carga, menores serão a densidade de carga e a umidade da palha recolhida.

A determinação do custo da palha, nos cenários com recolhimento via fardos, considerou a diferença de custo entre o cenário sem recolhimento (cenário referência) e o cenário com recolhimento. Para os cenários de recolhimento com colheita integral, a diferença foi dividida proporcionalmente às massas de palha (base úmida) e de colmo adicional, em função da menor perda na colheita. Essa redução de perdas na colheita ocorre devido à redução da velocidade do ar no extrator nas colhedoras que, para recolher mais palha, trazem mais colmos na carga. Esse fato contribui para reduzir o custo de produção dos colmos em relação ao cenário sem recolhimento. Tal efeito será levado em consideração na análise de fluxo de caixa que integra a área agrícola com a industrial.

Assumiu-se 5% de perda na colheita para cenários sem recolhimento e com fardos. Já para os cenários com colheita integral, quanto maior a quantidade de palha recolhida, menor será a perda na colheita, com potencial de reduzir pela metade a perda inicial.

A remuneração do capital investido no maquinário (12% ao ano, durante o período da vida útil de cada equipamento), bem como a depreciação das máquinas, os custos de manutenção, garagem e seguro também são considerados no custo da palha.

O investimento agrícola corresponde ao investimento adicional necessário para o recolhimento de palha, e engloba os valores de aquisição de máquinas, implementos e veículos de transporte. Tais valores estão disponíveis no banco de dados do LNBR.

#### 5. *Premissas da avaliação industrial*

Para as simulações industriais, os cálculos são realizados com foco nas etapas de recebimento e preparo da cana-de-açúcar, extração e cogeração de eletricidade.

Com as entradas fornecidas pelo usuário, é construído um cenário base sem recolhimento de palha e outro cenário considerando o recolhimento informado. A partir da diferença de ambos

é calculada a produção incremental de eletricidade devida ao processamento da palha. Na colheita integral, como a palha é recolhida e transportada junto com a cana-de-açúcar faz-se necessário a adição de uma etapa de separação. Considera-se que a palha é separada por um Sistema de Limpeza a Seco com uma eficiência de 35%. Já na colheita por fardos, a palha deixada no campo é recolhida em fardos após secar e transportada para a usina, onde passa por processos de desenfundamento e preparo, como a remoção de terra por peneira rotativa, e posteriormente é picada e misturada ao bagaço para a queima nas caldeiras.

O investimento industrial calculado refere-se apenas ao valor de aquisição dos equipamentos necessários para processamento da palha, na rota especificada pelo usuário, caso ele ainda não possua esses equipamentos (Sistema de Limpeza a seco para a rota integral e desenfundadora, para a rota de fardos – além de equipamentos auxiliares para as duas rotas).

A estimativa do investimento nos equipamentos e instalação é realizada considerando como fator de capacidade a vazão horária de palha processada. Para o cálculo da vazão horária de palha processada, é utilizada a entrada informada pelo usuário para “dias de safra”.

São utilizados como dados de entrada investimentos em CAPEX informados por usinas parceiras do projeto SUCRE com valores atualizados para dezembro de 2018. Os custos são escalonados utilizando o conceito custo-capacidade para investimento de equipamentos que correlaciona o valor de um novo investimento com um investimento similar já realizado através da razão da capacidade da nova instalação pela capacidade da antiga elevada a um fator. Esse fator varia de acordo com a instalação e geralmente está entre 0,6 e 0,7.

Para o caso das caldeiras e turbinas, nenhum investimento adicional é considerado, assumindo-se assim que a unidade possui capacidade de queimar a biomassa adicional (palha) operando durante a entressafra ou possui certo grau de ociosidade na operação desses equipamentos.

As etapas de processamento da palha em ambas as rotas de recolhimento geram um consumo de energia que é calculado e descontado da produção de eletricidade adicional. Para a estimativa de consumo de energia para o processamento de palha enfardada, utiliza-se a seguinte expressão:

$$E_{palha} = 25 * palha\_BS$$

Onde:

palha\_BS (ton) = palha recolhida em base seca;

$E_{palha}$  = energia necessária para o processamento (kW);

Enquanto que para a estimativa de consumo de energia no sistema de limpeza a seco (SLS), um somatório dos fatores abaixo é considerado:

Tabela 1. Relação de valores de consumo de energia para o SLS

<b>Consumo de energia – Sistema de limpeza a seco (SLS)</b>	
Mesa	0,194 kWh/t material no SLS
Transportadores	0,221 kWh/t material no SLS
Ventiladores	0,471 kWh/t material na SLS
Peneira	0,339 kWh/t palha seca
Picador	3,395 kWh/t palha seca

Para a rota integral, dependendo da quantidade de palha informada pelo usuário, uma queda na extração devida ao aumento de fibras na moenda é assumida. A premissa considerada para essa queda na extração supõe que o aumento na quantidade de fibras na moenda causaria um aumento na quantidade de bagaço formado e que o Pol (teor de sacarose) do bagaço seria mantido, resultando em uma queda na extração de açúcares. A queda na extração estimada é então utilizada para calcular uma queda na produção final de açúcar e etanol, a partir das produções informadas pelo usuário.

Para a geração de vapor, o usuário deve informar o vapor gerado por unidade de biomassa queimada (kg de vapor/kg de bagaço). Para os cálculos da situação inicial (antes do recolhimento de palha), esse índice é aplicado para cálculo do vapor produzido.

A partir do PCI calculado para a palha dependendo da rota de recolhimento selecionada (integral ou fardos), a produção de vapor por unidade de palha é estimada. Não são considerados impactos na eficiência da caldeira devido à utilização da palha.

O cálculo da eletricidade gerada é feito a partir dos valores informados pelo usuário para kW gerado por kg de vapor, para as duas situações (cenário base sem recolhimento e cenário com recolhimento).

Os parâmetros fixados através da base de dados do SUCRE encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros fixos da simulação industrial.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Entalpia vapor gerado	3.380,98	kJ/kg
Entalpia água alimentada	444,94	kJ/kg
PCI bagaço	7.472,28	kJ/kg
PCI palha não separada (u=50%)	7.093,35	kJ/kg
Fibra da palha (base seca)	91,59	%
Fibra do bagaço (base seca)	92,68	%
Consumo de energia da usina (sem considerar processamento da palha)	30	kWh/TC
Eficiência de separação de palha do SLS	35	%
Umidade do bagaço	50	%

#### 6. *Premissas da avaliação técnico-econômica*

As análises de custos e de viabilidade levam em consideração uma ampliação no aumento da exportação de eletricidade usando como matéria-prima a palha de cana-de-açúcar. Todos os resultados, portanto, referem-se ao projeto de palha e não da usina como um todo. A análise de fluxo de caixa incremental de eletricidade tem como condição uma vida útil do projeto de 20 anos e a consideração de taxa de desconto de 12% ao ano (taxa real). A alíquota de imposto de renda considerada é de 34% sobre a renda tributável (IRPJ+CSLL).

As receitas adicionais calculadas são obtidas multiplicando-se a produção pelo preço da eletricidade sugerido pelo usuário. Além da eletricidade, a usina em operação pode ter a produção de etanol e açúcar (a depender do caso) afetada. No caso da rota integral, são descontadas das receitas as eventuais perdas de etanol e açúcar devido à redução nos rendimentos de extração. Em relação a esses produtos, para a quantificação do preço do etanol usou-se como referência a média histórica do anidro para a última década, com data de

referência para dezembro de 2018 para o estado de São Paulo (R\$ 1,86/L). Similarmente, para o preço do açúcar (R\$ 1,51/kg), utilizou-se os valores para o açúcar cristal considerando as mesmas condições descritas para o etanol. A base de dados utilizada foi a disponibilizada pelo CEPEA/ESALQ.

Para o cômputo dos custos agroindustriais da palha, considera-se a soma de custo agrícola da palha com os custos industriais anuais da planta. A calculadora considera que o projeto é do tipo verticalizado, ou seja, a usina controla as operações tanto na fase agrícola quanto na industrial. Assim, os custos agrícolas anuais do recolhimento de palha calculados pelo modelo são absorvidos pela indústria como custo operacional da matéria-prima usada na geração de eletricidade. Para os demais custos operacionais industriais, foram considerados os desembolsos adicionais com salários e encargos trabalhistas para a mão-de-obra adicional, bem como o consumo de insumos industriais de acordo com as médias praticadas pelo setor. Para a manutenção, foi considerado o valor anual de 3% sobre o investimento adicional em capital fixo. Na presente análise não foram quantificados os eventuais aumentos da manutenção de equipamentos industriais (principalmente sobre as caldeiras) devido à maior corrosão, paradas e redução de vida útil. Além de tais resultados demandarem estudos com muitos anos de duração, alguns parceiros do projeto SUCRE relatam que, baseados em suas observações, não há correlação entre aumento de palha e aumento adicional de manutenção quando comparada ao bagaço.

Em relação aos custos associados ao investimento industrial, esse custo anual é contabilizado como o seu custo de oportunidade remunerado à 12% ao ano pelo período de 20 anos. Para o cômputo do investimento, foram estimadas as aquisições adicionais de pá carregadeira, sistema de limpeza a seco e/ou sistema de desenfundamento (a depender da rota de recolhimento selecionada) e estrutura de movimentação da palha (como esteiras, por exemplo). A depreciação considerada para a pá carregadeira foi linear, tendo valor de 25% ao ano. Já os demais investimentos industriais possuem depreciação linear em uma taxa de 10% ao ano. Para a estimativa de capital de giro, foi considerado um valor de 15% sobre o capital fixo investido.

O custo equivalente em bagaço consiste na multiplicação do custo agroindustrial da palha por um fator que expressa a relação de poder calorífico inferior entre bagaço e palha. Esse cálculo considera as diferentes umidades existentes entre bagaço, palha integral e palha em fardos calculadas pelos modelos industriais. O bagaço tem umidade fixa de 50%. Para a rota de fardos, a umidade é fixada em 15%. Para a rota integral, a umidade varia de acordo com a quantidade recolhida de palha.

O preço mínimo de venda da eletricidade é o valor capaz de zerar o Valor Presente Líquido dos fluxos de caixa do projeto, resultando taxa interna de retorno de 12% ao ano. O preço mínimo de venda é o preço pago ao produtor, livre de impostos (ICMS, PIS/Cofins) e demais tarifas. O *payback* calculado pelo modelo é o simples, ou seja, calcula o tempo de retorno do investimento em anos, considerando os fluxos de caixas sem a incidência da taxa de desconto.

#### *7. Premissas da avaliação ambiental*

A avaliação ambiental foi realizada utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerando as normas ISO 14040 e ISO 14044, e as emissões de gases do efeito estufa (GEE) em gramas de dióxido de carbono equivalente (g CO<sub>2</sub>eq) por kWh de eletricidade produzida.

Foi realizada uma avaliação do berço ao portão, levando em conta todos os insumos e emissões da produção da cana-de-açúcar, do transporte dos colmos e palha até a usina, e da etapa industrial.

Para distribuir as emissões totais da usina entre seus produtos (etanol anidro, açúcar e eletricidade) conforme a metodologia atribucional, foi considerada uma alocação energética, utilizando os valores de poder calorífico da Tabela 3.

O inventário de ciclo de vida foi construído com base nos bancos de dados e simulações agroindustriais da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC) adaptados para a Calculadora.

Após realizar a ACV atribucional, calculamos as emissões evitadas assumindo que a bioeletricidade extra produzida devido ao recolhimento de palha substitui a eletricidade produzida a partir do gás natural. As emissões evitadas de GEE são a diferença entre a intensidade de carbono (IC) da eletricidade de gás natural e a da bioeletricidade, multiplicado pelo total de eletricidade extra produzida pelo recolhimento da palha.

Consideramos a emissão de 550,8 gCO<sub>2eq</sub> por kWh de eletricidade a partir de gás natural, de acordo com o banco de dados Ecoinvent (Ecoinvent, n.d.); as emissões de CO<sub>2eq</sub> da bioeletricidade da cana-de-açúcar são resultado da ACV realizada pela Calculadora e variam de acordo com os resultados de cada cenário simulado.

Relacionamos a quantidade de emissões evitadas pela bioeletricidade de cana-de-açúcar com a quantidade de árvores necessárias para sequestrar a mesma quantidade de CO<sub>2eq</sub>. Para isso, foi considerado o quanto uma árvore sequestra de CO<sub>2eq</sub> em seus 20 primeiros anos.

Também avaliamos quantas casas podem ser supridas com a eletricidade extra que o recolhimento de palha proporciona. Para isso, utilizamos dados de consumo residencial anual do Anuário Estatístico da EPE (EPE, 2018).

Tabela 3: Parâmetros utilizados da avaliação ambiental

Parâmetros	Valor	Unidade	Referência
Poder calorífico inferior - Etanol anidro	22.35	MJ/L	(ANP, 2019)
Poder calorífico inferior - Açúcar	16.19	MJ/kg	(NEPA, 2011)
Conversão - Eletricidade	3.60	MJ/kWh	
Consumo residencial anual (kWh)	1896	kWh/ano	(EPE, 2018)
Intensidade de carbono - gás natural	153	gCO <sub>2eq</sub> /MJ	(Ecoinvent, n.d.),
Sequestro por árvore em 20 anos	163.14	kg CO <sub>2eq</sub> /árvore	(USP ESALQ, 2013)

## 8. Referências

ANP, 2019. Fatores de conversão, densidades e poderes caloríficos inferiores.

CEPEA (2019). Preços do açúcar e etanol no Estado de São Paulo. Disponível em:  
<https://www.cepea.esalq.usp.br/br>

Ecoinvent, n.d. Ecoinvent database.

EPE, 2018. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 - ano base 2017.

NEPA, N. de E. e P. em A., 2011. Tabela Brasileira de Composição de Alimentos.

USP ESALQ, 2013. Uma árvore da Mata Atlântica chega a tirar 163kg de CO2 da atmosfera.