



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

FELIPE GODOY RIGHETTO

**Avaliação da qualidade dos processos de
conversão de energia na cana-de-açúcar
visando o uso racional da energia na sociedade**

CAMPINAS

2023

FELIPE GODOY RIGHETTO

Avaliação da qualidade dos processos de conversão de energia na cana-de-açúcar visando o uso racional da energia na sociedade

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. CARLOS EDUARDO KEUTENEDJIAN MADY

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO FELIPE GODOY RIGHETTO, E ORIENTADA PELO PROF. DR. CARLOS EDUARDO KEUTENEDJIAN MADY

CAMPINAS

2023

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R449a Righetto, Felipe Godoy, 1991-
Avaliação da qualidade dos processos de conversão de energia na cana-de-
açúcar visando o uso racional da energia na sociedade / Felipe Godoy
Righetto. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Carlos Eduardo Keutenedjian Mady.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Mecânica.

1. Exergia. 2. Cana-de-açúcar. 3. Fotossíntese. 4. Solo - Uso. 5. Políticas
públicas. 6. Biomassa. 7. Sistemas de energia fotovoltaica. I. Mady, Carlos
Eduardo Keutenedjian, 1984-. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Evaluation of the quality of sugarcane energy conversion
processes with a focus on the rational use of energy in society

Palavras-chave em inglês:

Exergy

Sugarcane

Photosynthesis

Land use

Public policies

Biomass

Photovoltaic power systems

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Titulação: Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora:

Carlos Eduardo Keutenedjian Mady

Rafael Nogueira Nakashima

Taynara Geysa Silva do Lago

Data de defesa: 17-11-2023

Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0002-7242-9773>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/4150661973230300>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Avaliação da qualidade dos processos de
conversão de energia na cana-de-açúcar
visando o uso racional da energia na sociedade**

Autor: FELIPE GODOY RIGHETTO

Orientador: CARLOS EDUARDO KEUTENEDJIAN MADY

A Banca Examinadora composta pelos membros citados aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady
IEE/USP

Prof. Dr. Rafael Nogueira Nakashima
EP/USP

Profa. Dra. Taynara Geysa Silva do Lago
DEER/UFPA

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 17 de novembro de 2023.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha esposa, Lara, à minha mãe, Irene, e ao meu pai, Sergio, em reconhecimento ao apoio inestimável que me proporcionaram em todos os momentos e pela confiança constante que têm depositado em mim.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas e instituições que tornaram possível a realização deste trabalho.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady, pela orientação, apoio inestimável e amizade ao longo desse processo, por confiar e acreditar em mim e por me estender a mão nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos bibliotecários da Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura da Unicamp, BAE, e da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP, que forneceram valioso apoio à minha pesquisa.

À amada Lara, minha profunda gratidão pelo apoio constante ao longo dessa jornada. Sem você não teria conseguido realizar este trabalho.

Aos meus pais, por seu amor, encorajamento e apoio inabaláveis, fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos, que sempre estão ao meu lado e com os quais eu sempre poderei contar e cujos incentivos foram fundamentais. Esta conquista também é de vocês.

A todos aqueles que me ajudaram a entender minhas falhas e colaboraram para que eu me tornasse uma pessoa melhor. Este trabalho demonstra esta evolução.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, meu mais profundo agradecimento. Sem o apoio de vocês, este projeto não teria sido possível.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“If I have seen further, it is by standing on the shoulders of Giants.”

(Sir Isaac Newton)

Resumo

Este trabalho tem como objetivo aplicar a análise exergética na produção e uso da cana-de-açúcar, levando em consideração a relação entre a planta e o ambiente. Nesse sentido, foram computados a irradiação solar incidente, a produção de carboidratos, o consumo hídrico e a produção de colmos e palhada. Nenhum estresse hídrico, falta de nutrientes, pragas ou lesões na cultura foram considerados, para que a produção estimada fosse a máxima possível. O modelo de estimativa utilizado baseia-se na literatura, e este trabalho busca contribuir com a literatura, ao propor uma forma de estimar o consumo hídrico e a relação entre folhas verdes e palhada durante o ciclo de vida da cultura. Para a análise de segunda lei, os poucos trabalhos disponíveis são tomados como base, levando-se em conta desde o metabolismo até as trocas térmicas com o ambiente. Após a estimativa de produção é realizada a análise de uma biorrefinaria; assim, todo o ciclo de produção, desde a irradiação solar até o produto da biorrefinaria, do berço até a produção, pode ser comparada à outra forma de uso do solo e aproveitamento da exergia solar. Como objeto de comparação optou-se pelos módulos fotovoltaicos, que já têm uma aplicação consolidada. Os valores encontrados na estimativa de produção da cana-de-açúcar são de 80,7 toneladas por hectare, para um ciclo de 52 semanas, e a estimativa mostrou que o consumo hídrico máximo dessa produção é de 111,2 m³ de água para cada tonelada de colmo colhido, sendo 98,7% deste volume consumido pela transpiração. Com isso, a eficiência exergética média da cana-de-açúcar é de 4,99%, atingindo picos de 8,3%. Se for considerada apenas a exergia útil, gerada apenas na produção de colmos e palhada, se colhem 17,86 kWh/m² anualmente, o que representa uma eficiência exergética de 1,21%; já a eficiência exergética encontrada dos produtos úteis da biorrefinaria foi de 0,38%. A energia fotovoltaica por sua vez, apresenta uma eficiência exergética média de 31,6%, o que gera uma produção de energia elétrica anual de 255,84 kWh/m², tornando a utilização dos módulos fotovoltaicos uma alternativa bem mais eficiente que a cana-de-açúcar para o uso do solo do ponto de vista exergético. Por fim, este trabalho faz uma breve discussão sobre o uso de cana-de-açúcar e dos módulos fotovoltaicos para a transição energética do Brasil, propondo um futuro com a mínima dependência de combustíveis fósseis, usando como base uma proposta apresentada pela Comissão Europeia com a finalidade de acabar com a dependência local dos combustíveis fósseis.

Palavras-Chave: Exergia, Cana-de-açúcar, Fotossíntese, Consumo hídrico, Transpiração, Produção de Palhada, Módulos Fotovoltaico, Uso do solo, REPowerEU, Políticas públicas.

Abstract

This study aims to apply exergy analysis to the production and use of sugarcane, considering the relationship between the plant and the environment. In this way, we compute incident solar irradiation, carbohydrate production, water consumption, and the production of stalks and straws. To maximize the estimated production, we considered no water stress, nutrient deficiencies, pests, or crop injuries. The estimation model used is based on the existing literature, with this work contributing to the literature by proposing a method for estimating water consumption and the relationship between green leaves and straw during the crop's lifecycle. The limited available research is a foundation for the second-law analysis, considering aspects from plant metabolism to thermal exchanges with the environment. Following the production estimate, we analyze a biorefinery. This allows us to compare the production cycle, from solar irradiation to the biorefinery product, from inception to production, with alternative land use and solar exergy utilization. As a point of comparison, we have chosen photovoltaic modules, which already have a well-established application. The estimated sugarcane production values are 80.7 tons per hectare for a 52-week cycle. The estimation reveals that the maximum water consumption for this production is 111.2 cubic meters of water per ton of harvested stalk, with 98.7% of this volume being consumed through transpiration. As a result, the average exergetic efficiency of sugarcane is 4.99%, reaching peaks of 8.3%. When considering only the useful exergy generated in the production of stalks and straw, an annual yield of 17.86 kWh/m² represents an overall exergy efficiency decrease to 1.31%. The exergy efficiency of the useful products from the biorefinery was 0.38% (from cradle to gate). In contrast, photovoltaic panels exhibit an average exergy efficiency of 31.6%, resulting in an annual electricity production of 255.84 kWh/m². This makes using photovoltaic modules a significantly more efficient alternative than sugarcane regarding exergetic land use. In conclusion, this study also briefly discusses the use of sugarcane and photovoltaic modules in the context of Brazil's energy transition towards reduced dependence on fossil fuels, based on a proposal presented by the European Commission to eliminate local fossil fuel dependency.

Key Word: Exergy, Sugarcane, Photosynthesis, Water consumption, Transpiration, Straw Production, Photovoltaic Modules, Land use, REPowerEU, Public policies

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 Relação entre o preço do etanol e da gasolina no período de 05/2004 até 05/2022. Baseado em ANP (2022).....	24
Figura 1.2 Evolução do preço do barril de petróleo em comparação com o preço do etanol. Baseado em ANP (2022) e Index Mundi (2022).....	25
Figura 1.3 Radiação Global Horizontal média do Brasil, autoria própria, baseado em Pereira <i>et al.</i> , 2017.....	27
Figura 3.1 Concentração de CO ₂ na atmosfera em ppm, autoria própria, adaptado de NOAA (2021).....	36
Figura 4.1 Graus-dia para cada semana do ano. Aplicação do modelo de Barbieri adaptado para Campinas.....	55
Figura 4.2 Comparação do desenvolvimento do IAF em função do somatório dos GD. Autoria própria, aplicando as equações das referências Barbieri (1993) e Teruel (1995).	57
Figura 4.3 Variação da pressão atmosférica na cidade de Bragança Paulista. Adaptado de INMET (1992).	67
Figura 4.4 Volume de controle de uma célula de cana-de-açúcar realizando fotossíntese. Autoria própria.	70
Figura 4.5 Diagrama da biorrefinaria de etanol anidro, adaptado de Salazar (2012) e Palacios-Bereche <i>et al.</i> (2013).....	73
Figura 4.6 Diagrama da desidratação do etanol hidratado, adaptado de Salazar (2012) e Palacios-Bereche <i>et al.</i> (2013).....	74
Figura 4.7 Diagrama da biorrefinaria de etanol hidratado. Baseada em Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b)	75
Figura 4.8 Diagrama da concentração da vinhaça baseada em Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b)	76
Figura 4.9 Diagrama da biodigestão adaptado de Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b).....	77
Figura 4.10 Diagrama da produção de biometano, adaptado de Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b)	78
Figura 4.11 Diagrama do modelo de biorrefinaria com concentração e incineração da vinhaça.....	80
Figura 4.12 Diagrama resumido da biorrefinaria de etanol hidratado com concentração e incineração de vinhaça.....	81

Figura 4.13 Diagrama do modelo de biorrefinaria de etanol hidratado com biodigestão da vinhaça.....	82
Figura 4.14 Fluxos energéticos de um módulo fotovoltaico. Autoria própria.....	84
Figura 4.15 Eficiência energética do módulo fotovoltaico em função da temperatura, baseada na Equação 4.66.....	87
Figura 4.16 Disposição entre dois módulos inclinados. Autoria própria.....	90
Figura 5.1 Máxima produtividade por semana em que o plantio é realizado. Autoria própria.....	99
Figura 5.2 Desenvolvimento das massas da cultura. Autoria própria.....	100
Figura 5.3 Acúmulo de folhas verdes e secas a cada semana, após o plantio. Autoria própria, baseado nas equações 4.40 e 4.41.....	101
Figura 5.4 Consumo de água durante as semanas após o plantio. Autoria própria, baseado na equação 4.51 e 4.52.....	102
Figura 5.5 Relação entre o consumo hídrico e a fotossíntese. Autoria própria.....	102
Figura 5.6 Variação da produção de carboidrato em decorrência do estágio fenológico e da radiação no solo. Autoria própria.....	103
Figura 5.7 Diagrama da exergia. Autoria própria.....	105
Figura 5.8 Exergia emitida pela cana por semana. Autoria própria.....	106
Figura 5.9 Exergia das radiações na cultura. Autoria própria, baseada nas equações 4.3, 4.4 e 4.8.....	107
Figura 5.10 Eficiência exergética da fotossíntese e da produção de colmos e folhas por semana após o plantio.....	108
Figura 5.11 Fluxos exergéticos e eficiência da fotossíntese durante o cultivo da cana.....	109
Figura 5.12 Temperatura do módulo em relação às variáveis do ambiente.....	115
Figura 5.13 Fluxo exergético do módulo fotovoltaico para o dia 26 de março.....	116
Figura 5.14 Balanço exergético para a módulo fotovoltaico no dia 26 de março.....	117
Figura 5.15 Eficiência exergética, exergética útil e energética do módulo fotovoltaico para o dia 26 de março.....	118
Figura 5.16 Gráfico de Sankey representando a eficiência energética do módulo fotovoltaico. Autoria própria.....	119
Figura 5.17 Gráfico de Grasmann representando a eficiência exergética do módulo fotovoltaico. Autoria própria.....	119
Figura 5.18 Eficiências do módulo fotovoltaico sem truncamento da radiação.....	121

Figura 5.19 Gráfico do fluxo exergético ao longo da vida útil do sistema fotovoltaico.	121
Figura 5.20 Miscibilidade entre etanol, gasolina e água, autoria própria, adaptado de Johansen e Schramm (2009).....	140

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Comparativo da produção de etanol de diferentes matérias-primas	33
Tabela 4.1 Parâmetros climáticos para a cidade de Campinas-SP	52
Tabela 4.2 Parâmetros para cálculos de IAF	56
Tabela 4.3 Umidade relativa do ar para a cidade de Campinas.....	66
Tabela 4.4 Fluxos de massa e exergia referente à Figura 4.5	73
Tabela 4.5 Fluxos de massa e exergia referentes à Figura 4.6.....	74
Tabela 4.6 fluxos de massa e exergia referente ao diagrama da Figura 4.7	75
Tabela 4.7 Fluxos de massa e exergia referentes à Figura 4.8.....	76
Tabela 4.8 Fluxos de massa e exergia referente à Figura 4.9	77
Tabela 4.9 Fluxos de massa e exergia referente à Figura 4.10, considerando a dessulfurização	78
Tabela 4.10 - Fluxos de massa e exergia referente à Figura 4.10, desconsiderando a dessulfurização	79
Tabela 4.11 Fluxos de massa e exergia referentes à Figura 4.11	81
Tabela 4.12 Fluxos de massa e exergia referentes à Figura 4.13	83
Tabela 4.13 Características do módulo fotovoltaico de referência. Adaptado de BYD (2019)	89
Tabela 5.1 Fluxo exergético da produção de cana-de-açúcar	110
Tabela 5.2 Fluxo exergético referente à biorrefinaria de incineração de vinhaça	110
Tabela 5.3 Fluxo exergético do global, berço ao tanque com incineração da vinhaça	111
Tabela 5.4 Fluxo exergético referente à biorrefinaria com biodigestão de vinhaça...	112
Tabela 5.5 Fluxo exergético do global, berço ao tanque com biodigestão da vinhaça	113
Tabela 5.6 Comparação exergética entre cana-de-açúcar e módulos fotovoltaicos ...	122
Tabela 5.7 Acumulado anual da radiação solar incidente no solo.....	123
Tabela 5.8 Produção máxima por m ² para um ciclo de 52 semanas em base úmida..	123
Tabela 5.9 Consumo hídrico da produção de cana-de-açúcar	124
Tabela 5.10 Eficiência exergética da fotossíntese e produção de partes físicas da cana	124
Tabela 5.11 Produtos úteis da biorrefinaria com incineração da vinhaça para cada m ² de cana plantada	124

Tabela 5.12 Produtos úteis da biorrefinaria com biodigestão da vinhaça para cada m ² de cana plantada	125
Tabela 5.13 Fluxos exergéticos da agricultura	125
Tabela 5.14 Fluxos exergéticos do berço ao tanque com incineração da vinhaça na biorrefinaria	126
Tabela 5.15 Fluxos exergéticos do berço ao tanque com biodigestão da vinhaça na biorrefinaria	127
Tabela 5.16 Características exergéticas do módulo fotovoltaico	127
Tabela 5.17 Fluxos energéticos e exergéticos do módulo fotovoltaico para os dias com maior pico de eficiência exergética e energética	128
Tabela 5.18 Comparação exergética entre cana-de-açúcar e módulos fotovoltaicos ..	128
Tabela 5.19 Área de módulos fotovoltaicos para a demanda residencial	134
Tabela 5.20 Área de módulos fotovoltaicos para a demanda dos transportes	135
Tabela 5.21 Área de módulos fotovoltaicos para a oferta interna de energia.....	136

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ATP	Adenosina Trifosfato
BEN	Balanco Energético Nacional
CP	Comprimento entre Módulos
E27 e E27a	Gasolina com 27% de etanol anidro
E50h	Gasolina com 50% de etanol hidratado
E85	Gasolina com 85% de etanol anidro
E85h	Gasolina com 85% de etanol hidratado
EUA	Estados Unidos da América
DEP	Distância Entre Módulos
GD	Graus dias
IAF	Índice de Área Foliar
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPTU	Imposto sobre a Propriedade Predial e Territorial Urbana
NADP	Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato
NADPH	Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato + H
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
P _i	Fosfato Inorgânico
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
Ppm	Partes por milhão
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
STF	Supremo Tribunal Federal
UE	União Europeia
USP	Universidade de São Paulo
ZAE	Zona Agroecológica
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo

Lista de Símbolos

B	Exergia
CB	Produção de carboidratos
CBC	Produção de carboidratos corrigida
CI	Fator de correção devido à idade
CIAF	Fator de correção devido ao índice de área foliar
CR	Fator de correção devido à respiração
CT	Fator de correção devido à temperatura
d	Número de dias do período estudado, <i>footstep</i>
E	Energia
F	Fração de dias nublados
g	Gravidade
GD	Graus-dia
h	Coefficiente de convecção ou altura
I	Irradiação
IAF	Índice de área foliar
m	Massa
M	Massa molar
MS	Matéria Seca
MST	Matéria Seca Total
N	Fotoperíodo
n	Insolação real ou massa molar
P	Massa colhida ou Pressão
Q	Calor
R	Consumo da respiração ou constante universal dos gases
r	Relação molar entre água e CO ₂
T	Temperatura
V	Velocidade do vento
dia	Dia do ano
z	Concentração molar

Letras gregas

δ	Declinação solar
θ	Latitude
μ	Massa molar do ar
ε	Emissividade
σ	Constante de Boltzmann
φ	Umidade relativa

Subscritos

0	Inicial ou da referência
b	Basal inferior
B	Basal superior
c	Claro
conv	Convecção
cor	Corrigido
eff	Eficiência
ex	Exergético
F	Fotossíntese
g	No solo
H	Hidratação
i	Idade
max	Máximo
min	Mínimo
n	Nublado
p	Planta
prod	Produção
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
rad	Radiação
refle	Refletido
s	Saturado
sist	Sistema
Sol	Solar
T	Temperatura
transp	Transpiração

Sumário

1	Introdução.....	22
	1.1 Estrutura da dissertação.....	28
2	Objetivos	30
	2.1 Objetivos específicos	30
3	Revisão da literatura.....	32
	3.1 A cana-de-açúcar e a fotossíntese	32
	3.2 Modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar	38
	3.3 Segunda lei da termodinâmica aplicada a vegetais	40
	3.4 Biorrefinaria e aproveitamento da energia da fotossíntese	43
	3.5 A Vinhaça – Resíduo do processo de produção de etanol	44
	3.6 Módulos fotovoltaicos e geração de energia elétrica	47
4	Material e Métodos.....	49
	4.1 Parâmetros climáticos relevantes para a produção de cana-de-açúcar	49
	4.2 Parâmetros da cultura de cana-de-açúcar: Metabolismo e área foliar	53
	4.3 BRCANE: Método de estimativa de produção.....	57
	4.4 Estimativa da transpiração da cana-de-açúcar	65
	4.5 Análise exergética da cana-de-açúcar com base na fotossíntese	69
	4.6 Biorrefinaria: Transformando a cana em produtos com valor agregado... ..	72
	4.7 Fazenda solares usando módulos fotovoltaicos	83
	4.8 REPowerEU: Medidas para um mundo livre dos fósseis.....	91
5	Resultados e Discussão.....	98
	5.1 Estimativa de produção da cana-de-açúcar: Palhada e Transpiração.....	98

5.2	Análise exergética da cana-de-açúcar: Eficiências e Fluxos exergéticos...	104
5.3	Desempenho dos módulos fotovoltaicos pela 2ª lei da termodinâmica.....	114
5.4	Avaliação da cana-de-açúcar em paralelo com o módulo fotovoltaico	123
5.5	Uso do REPowerEU com foco nas políticas públicas brasileiras.....	129
5.5.1	Uso racional da energia	129
5.5.2	Diversificação da energia	133
5.5.3	Combustíveis sustentáveis	137
5.5.4	Investimentos inteligentes.....	142
6	Conclusões.....	145
6.1	Limitações e visão geral deste trabalho.....	146
	Referências	149

1 Introdução

Desde 2014, a União Europeia (UE) vem promovendo sanções contra a Rússia como resposta às suas ações na região da Crimeia, Ucrânia, quando os líderes condenaram uma violação da soberania ucraniana na região e solicitaram que as forças armadas russas fossem retiradas, de acordo com o conselho da União Europeia (2022). Em 24/2/2022, a Rússia invade a Ucrânia em uma operação militar (REPowerEU, 2022) e, a partir desse marco, novos pacotes de sanções são aplicados contra a Rússia, gerando uma mudança geopolítica no mercado global de energia, gás natural, dentre outros.

Segundo a *International Energy Agency*, a Rússia produziu 12.4% do petróleo mundial em 2021, 18% do gás natural e 5,3% do carvão. Esses dados mostram a importância dos combustíveis fósseis russos que, em 2021, representaram 45% da importação de gás da UE (IEA, 2021, 2022).

Com base nesse cenário, a Comissão Europeia propôs o plano REPowerEU na intenção de, não apenas combater as mudanças climáticas, mas também acabar com a dependência dos combustíveis fósseis russos até 2030 e, assim, garantir a própria segurança energética.

O plano REPowerEU (2022) reforça o compromisso da UE com a Agenda 2030, um plano da ONU (2021) para um mundo melhor em 2030, compactuado por 193 países, incluindo o Brasil (STF, c2022). A Agenda 2030 tem cinco pilares principais, a saber: pessoas, prosperidade, paz, parceria e planeta. Dentro deste último está a preocupação com as mudanças climáticas, com esforços para manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C (DESA, 2016)

Somam-se, então, duas crises no cenário internacional: os abalos no mercado internacional de energia, causado pela invasão da Rússia à Ucrânia, e as mudanças climáticas, causadas por fatores antropogênicos (liberação de gases de efeito estufa). Em crises anteriores, como a do petróleo de 1973, o Brasil apresentou soluções ao problema em questão, como o programa Proálcool. De acordo com Bray, Ferreira e Ruas (2000), o Proálcool foi um programa do governo federal que teve por objetivo aumentar a produção de etanol, com a finalidade não só de buscar uma alternativa ao combustível fóssil, mas também visando à substituição da gasolina.

Uma das principais vantagens do etanol perante a gasolina é a origem do carbono encontrado em cada combustível. Enquanto o carbono presente no etanol é absorvido da atmosfera pela fotossíntese da cana-de-açúcar, o carbono da gasolina tem origem fóssil, e se fixava em reservas de petróleo. Depois da combustão, é lançado na atmosfera aumentando a emissão dos gases de efeito estufa, tornando o etanol um combustível muito mais sustentável do que o de origem fóssil.

Estima-se que 82% da frota de veículos leves, no ano de 2021, eram de veículos denominados de *flex* (EPE, 2020), o que mostra que o Brasil já tem uma boa estrutura para trabalhar com biocombustível. Porém, no ano de 2021, foram comercializados 39,3 milhões de m³ de gasolina do tipo C, enquanto o etanol hidratado vendeu apenas 16,8 milhões de m³ (ANP, 2022b), salientando que o consumidor preferiu optar pelo combustível fóssil.

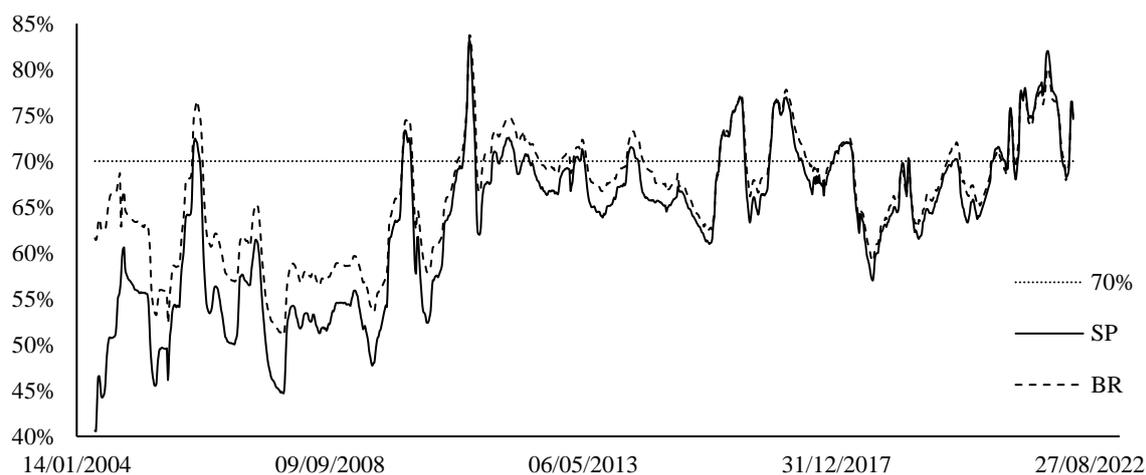
É comum indicar que o etanol tem um poder calorífico de aproximadamente 70% ao da gasolina comum. Inclusive, há um projeto de lei, PL 4525/2016, em que Virgílio (2016) afirma: “Caso o preço do etanol hidratado seja, no máximo, igual a 70 % do preço da gasolina é, via de regra, mais vantajoso o abastecimento do veículo com etanol.” Esse projeto de lei foi rejeitado pela Comissão de Desenvolvimento Econômico, Indústria, Comércio e Serviços no mesmo ano de sua proposta.

Tal afirmação pode ser confirmada mediante uma simples análise usando como dados o programa brasileiro de etiquetagem (PBE, 2022). Avaliando os 384 veículos *flex* disponíveis nos dados do Inmetro, observa-se que a média da razão entre o consumo de gasolina comum pelo consumo de etanol hidratado é de 69,8%, com desvio padrão de 1,1%. Considerando o volume de combustível comercializado e a relação entre as autonomias, é possível estimar que apenas 23% dos quilômetros rodados pelos veículos *flex* no Brasil são percorridos usando etanol hidratado, reforçando a afirmação que o consumidor brasileiro tem preferência pelo combustível fóssil. No banco de dados da ANP (2022), há registros das médias dos preços dos combustíveis praticados desde 2004; por esses dados, pois, é possível avaliar a relação entre o preço médio praticado nos postos de combustíveis para o etanol e o preço para a gasolina, relação demonstrada na Figura 1.1:

Figura 1.1 Relação entre o preço do etanol e da gasolina no período de 05/2004 até 05/2022.

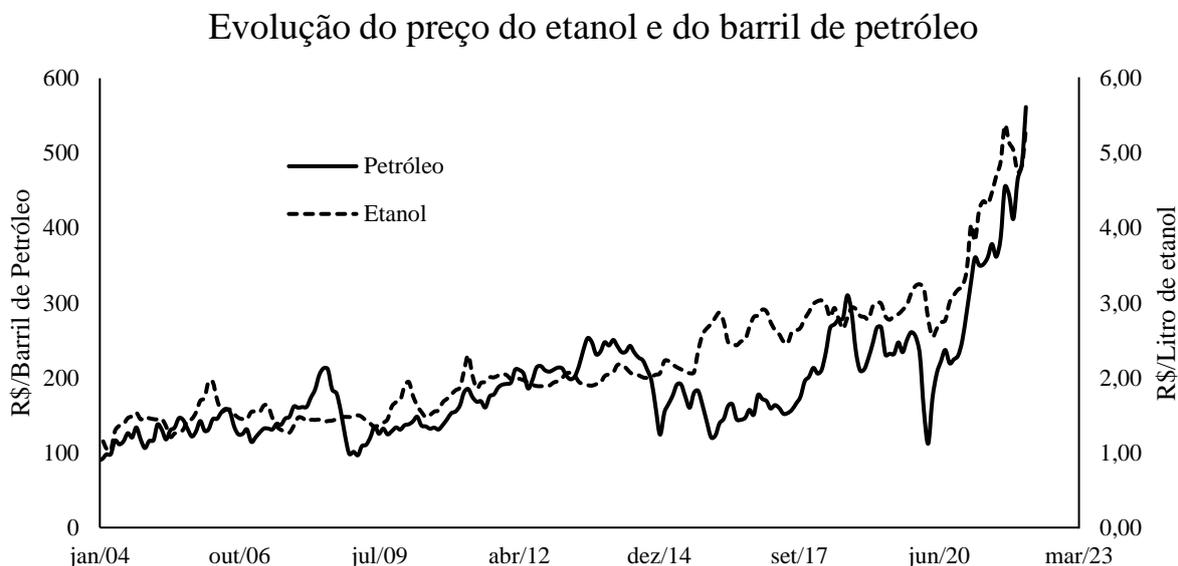
Baseado em ANP (2022)

Relação preço Etanol / Gasolina



É possível observar que, no início dos anos 2000, o valor praticado do etanol era bem inferior aos 70% sugeridos como indicador de compra, ficando próximo dos 40% para o estado de São Paulo e próximo dos 62% para a média nacional. Comparando também a evolução do preço do etanol ao preço do barril de petróleo com os dados da *Index Mundi* (2022), nota-se que os preços desses produtos têm uma relação bem próxima (Figura 1.2). Isso mostra que o biocombustível pode ser uma alternativa barata em comparação ao preço da gasolina, pois a razão entre o preço do etanol e do barril do petróleo é muito próxima quando se comparam os anos de 2004 e 2022. Já a relação entre o preço dos combustíveis não seguiu a mesma proporção, uma vez que o etanol era muito mais vantajoso em 2004 do que em 2022, indicando uma possível margem para o biocombustível ser mais competitivo.

Figura 1.2 Evolução do preço do barril de petróleo em comparação com o preço do etanol.
Baseado em ANP (2022) e Index Mundi (2022)

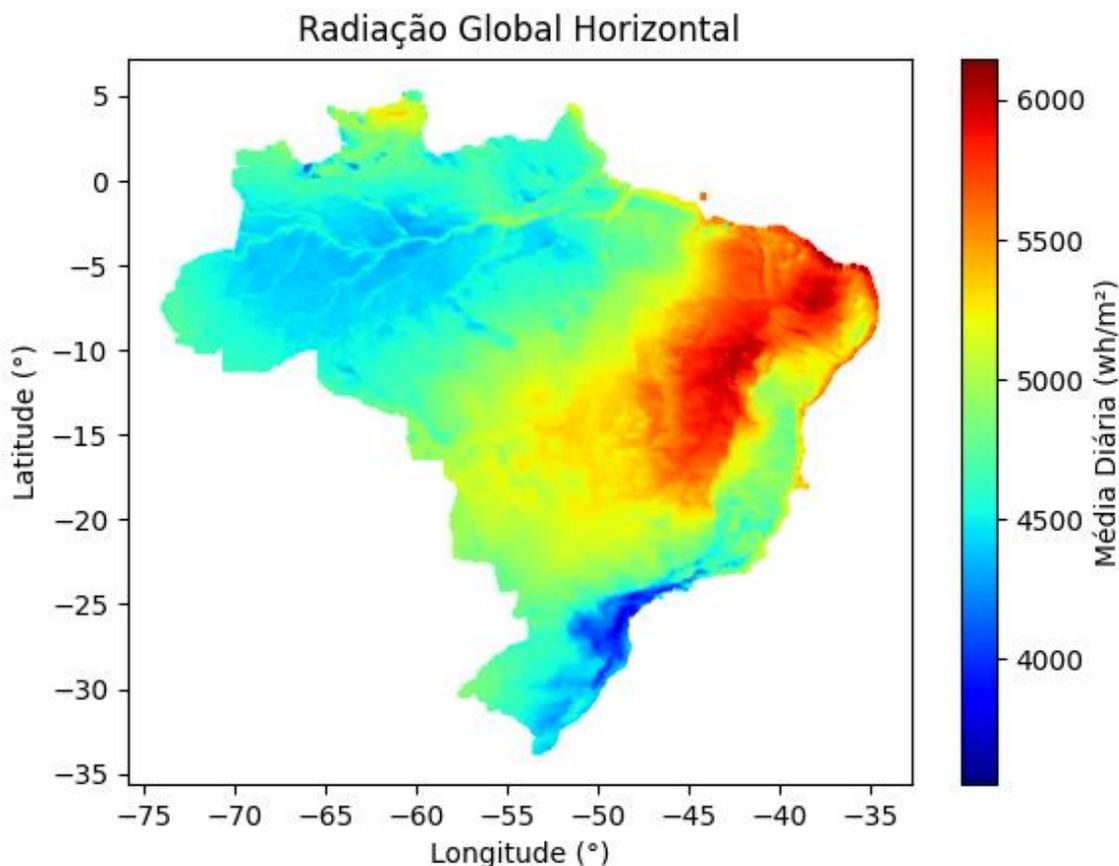


É importante observar que, nos últimos dez anos, a relação entre o preço do etanol e o preço da gasolina tem ficado muito próximo do eixo dos 70%, observado na Figura 1.1. Nesta última década, a média da relação de preços foi de 69,5%, com desvio padrão de 4 %, ressaltando possível interpretação de indexação do preço do etanol e sua relação de intensidade energética com a gasolina vendida no mercado nacional.

Há algumas lavouras que possibilitam a produção de etanol, sendo a de cana-de-açúcar e a de milho as mais utilizadas (SILVA, FREITAS, 2015) - nos Estados Unidos, a partir do milho, e no Brasil, utilizando-se a cana-de-açúcar. Andreoli (2006) afirma que o etanol de cana-de-açúcar tem o balanço energético mais positivo que o etanol do milho. Dos Santos (1997) mostra que o balanço energético da produção do etanol da cana-de-açúcar é positivo, com uma razão de saídas pelas entradas de energia de 5,85. O etanol da beterraba apresenta uma razão de 1,3, seguido pelo etanol de milho, que tem uma razão de 0,9, ou seja, a energia utilizada para produzir o etanol de milho é maior que a energia contida no combustível produzido. Dos Santos ainda conclui que o etanol de cana-de-açúcar tem a menor emissão de carbono por área produzida. Uma das características mais interessantes da cana-de-açúcar é que o caldo dela apresenta um teor de sacarose de 10% a 20% (De Oliveira, 2016).

A energia elétrica proveniente da biomassa tem um papel significativo na matriz elétrica brasileira, correspondendo a 9,1% de toda a geração (BEN, 2021); 65,2% dessa geração tem origem nas hidroelétricas, porém apenas 1,7% da energia elétrica brasileira vem de fonte solar, cerca de 9,2 TWh/ano (BEN, 2021), produção muito pequena quando comparada aos EUA que produzem 94 TWh/ano (IEA, 2021). O Brasil é o quinto maior país do mundo, com proporções continentais - tem uma área de 8,5 milhões de quilômetros quadrados, o que equivale a 1,6% de toda a superfície terrestre. Além dessa proporção, aproximadamente 92% do território nacional se situa na zona intertropical, o que oferece ao país uma boa incidência solar, sendo a média anual da radiação global horizontal do Brasil igual a 4912 Wh/m² por dia (PEREIRA *et al.*, 2017). E, considerando os mais de 8,5 milhões de km² do território nacional (IBGE, 2022), pode-se concluir que incide anualmente no Brasil cerca de 15 milhões de TWh. Essa radiação elevada dá ao País um relevante potencial de produção de energia solar, portanto, grande potencial energético e agrícola. É a quinta maior área cultivada do mundo, com o equivalente a 7,5% (Lima, 2017) do território nacional e apresenta uma ótima disposição de irradiação solar como mostra a Figura 1.3.

Figura 1.3 Radiação Global Horizontal média do Brasil, autoria própria, baseado em Pereira *et al.*, 2017.



Fica claro que o Brasil tem um bom aproveitamento da biomassa para fins energéticos e um baixo aproveitamento da energia solar. Então, entender essa relação e apontar se o país está no caminho certo para uma fonte de energia sustentável não é algo trivial. Para comparar as fontes energéticas e dizer qual tem um melhor aproveitamento da energia que chega à superfície terrestre é preciso não apenas a utilização da primeira lei da termodinâmica, mas também da análise de segunda lei, a análise exérgica. A exergia é “o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global” e que, diferente da energia, não é conservada e pode ser destruída pelas irreversibilidades dos processos termodinâmicos. Tal afirmação já é um consenso na literatura, como em Shapiro e Moran (2009). Uma das vantagens de estudar a exergia é poder apontar quais são os processos mais irreversíveis e, dessa forma, saber onde existe o maior potencial de aumento de eficiência do sistema.

Portanto, utilizando a análise exergética, é possível informar qual dos dois sistemas apresenta um melhor desempenho na realização de trabalho, visto que ambos têm a mesma fonte de energia, ou seja, a irradiação solar. É importante ressaltar que, para uma análise mais completa, se faz necessário ponderar os desafios de cada sistema, tal como o armazenamento de energia elétrica, um dos maiores desafios da atualidade, considerando a dificuldade dos veículos elétricos para substituir os modelos à combustão (LEITE, DELGADO E HAGE, 2017).

Com o cenário que engloba este estudo já visto, apresenta-se agora algumas contribuições desta pesquisa para a literatura. Agregando o modelo já existente, propõe-se neste trabalho um cálculo para estimar a massa das folhas vivas na cana-de-açúcar e, com base nisso, calcular a massa da palhada durante o ciclo de produção da planta. Também contribui com algumas manipulações algébricas para calcular a massa de água transpirada e o consumo hídrico da planta durante toda a sua vida. Na análise dos módulos fotovoltaicos, é apresentada uma forma alternativa para o cálculo da temperatura de trabalho, baseada no balanço energético, além de uma revisão de vários parâmetros climáticos e variáveis utilizados no trabalho.

1.1 Estrutura da dissertação

O texto está estruturado em seis partes:

A introdução, primeiro capítulo, traz a contextualização na qual este trabalho se situa, passando por questões geopolíticas, introduz o etanol de cana-de-açúcar e comenta sobre o cenário energético nacional. Ao final, há uma breve citação das contribuições deste trabalho.

O segundo capítulo esclarece os objetivos deste trabalho, apresentando a proposta do texto de forma clara e resumida.

A revisão da literatura, terceiro capítulo, é dividida em seis partes - trabalhos prévios pertinentes ao estudo, condensados e organizados, dando embasamento sobre a cana-de-açúcar, fotossíntese e os métodos de estimativa, sobre a segunda lei da termodinâmica aplicada em vegetais, modelos de biorrefinaria e manipulação da vinhaça, além de modelos para análise de módulos fotovoltaicos.

No capítulo quatro, material e métodos, foram apresentados os métodos aplicados, bem como as modificações realizadas e os dados-base utilizados. Também estão descritas as contribuições de estimativa de palhada e de consumo hídrico.

Já no capítulo de resultado e discussões, os resultados obtidos são divulgados e se faz breve discussão, comparando os dados obtidos com a literatura. Este capítulo segue uma ordem semelhante ao capítulo de material e métodos, além de resumir os principais dados obtidos e comparar a cana-de-açúcar com o módulo fotovoltaico, e uma discussão de políticas públicas usando com base as fontes energéticas aqui estudadas.

Por fim, o último capítulo, a conclusão, em que se sintetizam os resultados obtidos pelo trabalho. Há ainda uma parte adjacente ao final do capítulo que trata das limitações do trabalho.

2 Objetivos

Neste trabalho, objetiva-se o uso dos princípios da termodinâmica para avaliar os processos de conversão de energia para a produção de cana-de-açúcar, do plantio à colheita, e na sequência, o uso de resultados da literatura adaptados para uma biorrefinaria. O intuito é de obter a eficiência da conversão de energia solar em etanol, energia elétrica e biogás. Dessa forma, se almeja comparar tal cenário para quantificar o desempenho relativo ao uso da área de solo com uma usina de geração elétrica com módulos fotovoltaicos.

2.1 Objetivos específicos

- Aplicar o modelo proposto por Barbieri (1993) para a cidade de Campinas-SP, atualizando os parâmetros de entrada, tomando por referência outros modelos, a fim de estimar o potencial máximo de produção de cana-de-açúcar com base nos parâmetros climáticos da cidade paulista.
- Criar, apoiando-nos em Attorre, Sciubba e Vitale (2019), Petela (2008) e Silva, Seider e Lior (2015), um modelo que descreva as interações de calor e massa da fotossíntese da planta com o ambiente.
- Adaptar o modelo de uma biorrefinaria proposto por PALACIOS-BERECHE *et al.* (2013), de forma a desconsiderar a produção de etanol anidro.
- Propor, tendo por base Silva (2021), um modelo matemático para análise exérgica de um módulo fotovoltaico, a partir da radiação incidente, temperatura ambiente e velocidade do vento.
- Comparar as eficiências exérgicas da cana-de-açúcar e do módulo fotovoltaico, ponderando as vantagens e desvantagens, além de avaliar a melhor alternativa para o uso do solo.
- Aplicar os resultados obtidos neste trabalho em uma análise de como implementar o plano REPowerEU (2022) no Brasil, a fim de correlacionar os objetos de estudo aqui referidos com as políticas públicas para o uso mais

adequado da energia e do solo, e ainda apontar alternativas para uma transição energética adequada ao País, com foco na mitigação de fontes fósseis.

3 Revisão da literatura

Neste capítulo, será efetivada uma revisão da literatura pertinente ao tema em estudo. São explorados trabalhos acadêmicos, pesquisas e estudos anteriores, buscando consolidar o conhecimento existente sobre o assunto. Além disso, são apresentadas teorias, conceitos e descobertas relevantes, permitindo uma compreensão aprofundada do contexto em que esta pesquisa se insere.

3.1 A cana-de-açúcar e a fotossíntese

A cana-de-açúcar é uma gramínea do gênero *Saccharum L* (Do Amaral, Dos Santos e De Souza Barbosa, 2015), caracterizada por um alto teor de açúcar, constituindo cerca de 40% a 50% da matéria seca (Thiago e Vieira 2002). Já Vian (2022) relata que a cana-de-açúcar apresenta uma concentração entre 13% e 17,5% de glicose em base mássica. O autor ainda alerta que algumas variedades de cana muito ricas em açúcar podem estar mais suscetíveis a ataques de pragas.

Por conter uma concentração bem grande de açúcar, principalmente a sacarose, a cana-de-açúcar é uma ótima candidata para a produção de etanol, a partir da fermentação alcoólica, reação que utiliza leveduras, micro-organismos capazes de utilizar a sacarose para respirar de forma anaeróbica, a fim de que se produza o etanol (DE GÓES-FAVONI, 2018).

Há outras matérias-primas para a produção do etanol, como o milho, utilizado nos EUA, e a beterraba, produzida na união europeia. Manochio *et al.* (2017) mostra as vantagens da cana, ante o milho e a beterraba. Segundo o autor, a razão entre a energia aplicada na produção de etanol por diferentes fontes, pelo volume de etanol, considerando a fase agrícola e industrial e desconsiderando a irradiação solar, é favorável para a cana, sendo esse balanço energético de 9,4 MJ/L para a cana-de-açúcar, 1,2 MJ/L para o milho e 1,6 MJ/L para a beterraba. Para avaliar a capacidade de trabalhar com a irradiação solar, o autor computa a produção energética média de etanol por área de plantio da matéria prima, concluindo que a cana apresenta 152,6 GJ/ha, enquanto o milho apresenta 2,6 GJ/ha e a beterraba 14,7 GJ/ha. Já em relação à emissão de

gases de efeito estufa, o autor mostra que a cana-de-açúcar emite apenas 0,3 kg de CO₂, equivalente para cada litro de etanol produzido, o milho, 1,7 Kg CO_{2eq}/L, e a beterraba, 0,4 Kg CO_{2eq}/L. Por fim, o autor avalia o custo de produção de cada litro de etanol: para a cana são gastos US\$0,33, para o milho US\$0,69, e para a beterraba US\$0,62. Essas vantagens estão resumidas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 Comparativo da produção de etanol de diferentes matérias-primas

		Cana-de-açúcar	Milho	Beterraba
Balanco energético	MJ/L	9,4	1,2	1,6
Produtividade	GJ/ha	152,6	2,6	14,7
Emissão CO _{2eq}	KgCO ₂ /L	0,3	1,7	0,4
Custo produção	US\$/L	0,33	0,69	0,62

Fonte: Manochio *et al.* (2017)

Manochio *et al.* (2017) avaliam que a grande vantagem da cana-de-açúcar está na fase industrial do processo, pois, enquanto o milho e a beterraba utilizam gás natural para a produção de vapor de processo, a cana-de-açúcar pode queimar o próprio bagaço, tornando-a mais sustentável na produção do etanol.

Outro fator que torna a cana-de-açúcar uma boa matéria-prima para a produção de bioetanol é a sua fotossíntese ser do tipo C4 (LEONARDOS E GRODZINSKI, 2011), o que a torna mais eficiente ao ser comparada à das plantas do tipo C3, quando em maiores temperaturas e luminosidade; porém, menores concentrações de CO₂.

É importante entender os motivos de os seres vivos usarem moléculas características, como ATP e NADPH, para transportar energia. Pois, qualquer oxidação rápida levaria a um aumento de temperatura do sistema inviável de se manter a vida. A forma encontrada pela natureza foi a gradual degradação dos nutrientes com os transportadores intermediários de hidrogênio (NADP) e a moeda energética ATP, prontamente disponíveis para qualquer atividade fisiológica. Lems (2009) avaliou a quebra e formação bioquímica da glicose, considerando os processos de quebra da glicose para animais e plantas como similares; descreveu-as envolvendo os ATPs e NADPHs aos olhos da segunda lei da termodinâmica (análise exérgica), e concluiu que, para as condições intracelulares, a variação da energia livre de Gibbs na produção do ATP é de 57 kJ/mol. O autor chega a calcular a exergia química do ATP, entretanto, surge a incerteza sobre qual é a exergia química da mistura de compostos

orgânicos e inorgânicos e o método de cálculo, apesar de a variação da exergia chegar a resultados iguais aos da variação da energia livre de Gibbs, como seria de se esperar.

Mady e Oliveira (2013) avaliaram a exergia do metabolismo humano e, segundo os autores, a energia liberada no metabolismo de carboidratos, lipídios e proteínas é gradualmente capturada na forma de adição de fosfato inorgânico, P_i , em uma adenosina difosfato, ADP, formando a adenosina trifosfato, ATP, e liberando água. Tal reação tem uma energia livre de Gibbs de 30,5 kJ/mol nas condições padrões bioquímicas (que não são as reais dos seres vivos), corrigindo-as, baseados no trabalho de Lems (2009). Os autores ainda mostram que para um corpo realizar qualquer tipo de trabalho é necessário realizar a reação inversa, a hidrólise do ATP.

A fotossíntese é um processo fotoquímico com as plantas utilizando os fótons para produção de açúcar. Esse processo pode ser dividido em duas etapas: a fase clara e a fase escura (MOREIRA, 2013).

A fase clara, também conhecida como fase fotoquímica, é onde ocorre a fotólise da água, liberando o O_2 para a atmosfera, e produzindo ATP, adenosina trifosfato (toda energia dos seres vivos, ao realizarem qualquer atividade, está relacionada à hidrólise e à formação dessa molécula), e NADPH, nicotinamida adenina dinucleótido fosfato mais hidrogênio (transportadores intermediários de elétrons). O ATP é um produto do fotossistema 2, que se inicia pela absorção dos fótons pela clorofila, junto à produção de ATP, quando ocorre o bombeamento de prótons de hidrogênio para a fotossistema 1. O fotossistema 1 utiliza os prótons de hidrogênio proveniente da fotólise da água para a produção de NADPH (MOREIRA, 2013).

O ATP e o NADPH produzidos na fase clara são enviados para a fase escura, também chamada de ciclo de Calvin, onde é produzido o açúcar, e é nessa fase que ocorre a absorção de CO_2 . Para isso, a planta utiliza a proteína Rubisco (*ribulose difosfato carboxilase-oxidase*). Em algumas condições, a Rubisco pode absorver O_2 ao invés de CO_2 , causando a fotorrespiração, um processo metabólico de alto custo energético, ou seja, ao invés de produzir energia na fotossíntese, a fotorrespiração consome energia da planta (MOREIRA, 2013).

Leonardos e Grodzinski (2011) afirmam que o efeito da fotorrespiração diminui conforme a concentração de CO_2 aumenta; já Nobel (2009) relata que o aumento da temperatura também pode aumentar a taxa de fotorrespiração.

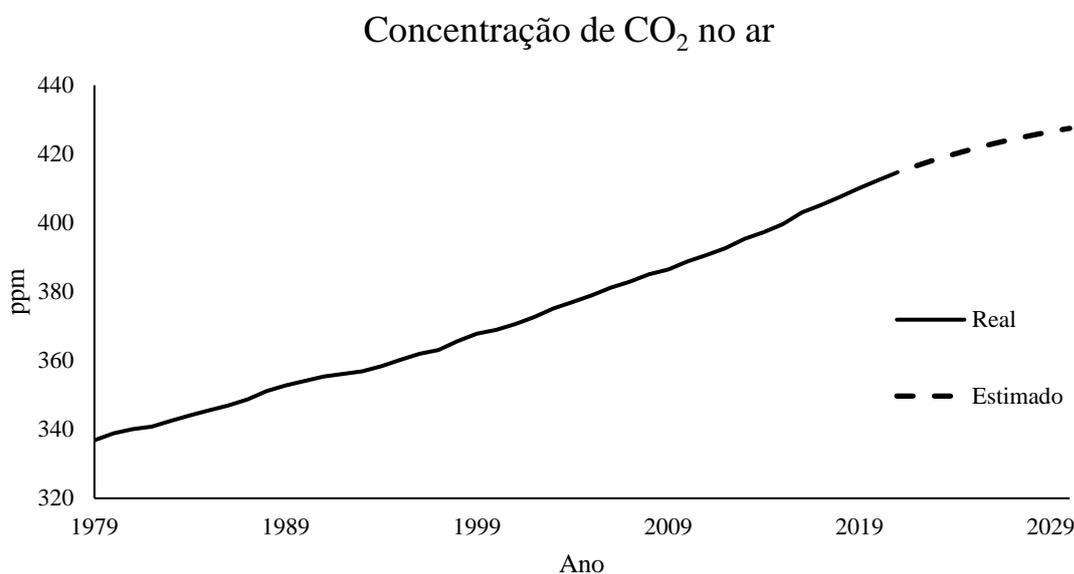
Na fotossíntese de plantas do tipo C3, são necessários 3 ATPs e 2 NADPHs para fixar uma molécula de CO₂ (NOBEL, 2009). Logo, são necessários 18 ATPs e 12 NADPHs para produzir uma molécula de glicose, C₆H₁₂O₆. Já na fotorrespiração, são consumidos 7 ATPs e 4 NADPHs para cada CO₂ liberado (MENDES, LUCENA e MEDEIROS, 2015). Ou seja, ao invés de aproveitar a energia contida nos ATPs e nos NADPHs, provenientes da fotólise da água, para produção de açúcar, a fotorrespiração consome os produtos da fase fotoquímica e produz apenas CO₂.

Como exposto, a fotorrespiração é uma reação que diminui a eficiência energética das plantas, porém as plantas do tipo C4 têm uma estrutura para resolver essa questão, uma vez que criam um ambiente rico em CO₂ para que a reação da proteína Rubisco aconteça, chamada bainha de feixe. Para criar esse ambiente quase sem O₂, as plantas C4 reagem à enzima PEP (fosfoenol piruvato) com o CO₂, formando o Oxaloacetato, composto de quatro carbonos (C4) que, por sua vez, se transforma em ácido malato, um composto capaz de atravessar a fronteira bainha de feixe, liberando CO₂, e gerando um ambiente rico neste gás para que a Rubisco possa iniciar o ciclo de Calvin.

No entanto, há um custo energético para concentrar CO₂, porém os rendimentos das plantas do tipo C4 ainda são maiores que os das plantas que apresentam fotorrespiração (LEEGOOD, SHARKEY e CAEMMERER, 2006). Nobel (2009) afirma que, em uma fotossíntese de plantas do tipo C3, são necessários 3 ATPs e 2 NADPHs para fixar uma molécula de CO₂; já nas plantas C4, o mecanismo de concentração de CO₂ consome de 1 a 2 ATPs a mais para cada CO₂ fixado.

Zhu Long e Ort (2008) avaliaram a eficiência energética da fotossíntese para as plantas C3 e C4, convergindo para os valores de 4,6% para a C3, e 6,0% para a C4, para a temperatura ambiente de 30 °C (note que são para regiões de climas “quentes”) e a concentração de CO₂ na atmosfera de 380 ppm. Os autores também informam que a vantagem energética da planta C4 desaparece quando o nível de CO₂ é próximo a 700 ppm. NOAA (2021) aponta que a concentração de CO₂ na atmosfera, em 2021, era de 414,71 ppm. Na Figura 3.1 é possível avaliar o crescimento da concentração de CO₂ na atmosfera terrestre desde 1979, bem como uma estimativa feita com uma média móvel dos últimos cinco anos, estimando a concentração de CO₂ até 2030.

Figura 3.1 Concentração de CO₂ na atmosfera em ppm, autoria própria, adaptado de NOAA (2021)



Melis (2009) explica que a eficiência da conversão da energia solar pela fotossíntese é da ordem de 8% a 10%, com uma média de insolação de 5 kWh/m². Yuan, Evans e Daniels (1955) avaliaram a alga *Chlorella* e indicaram que a fotossíntese dela utiliza $8,9 \pm 1,0$ fótons para cada CO₂ fixado. Bolton (1991) assume que cada CO₂ fixado utiliza 8 fótons e, considerando apenas a radiação fotossinteticamente ativa, há uma eficiência máxima de 13%. Nem toda a radiação incidente no solo tem efeito na fotossíntese, mas apenas uma fração dela, a que tem comprimento de onda entre 400 e 700 nm. Essa faixa de radiação é conhecida como radiação fotossinteticamente ativa ou PAR (ASSUNÇÃO, 1995).

Estima-se que a máxima produtividade teórica da fotossíntese é de 77 g/m²/dia, algo próximo a 280 toneladas de matéria seca produzida em um hectare, em um ano (MELIS, 2009). Já Waclawovsky e outros (2010) estimam que a produção máxima da cana-de-açúcar é de 381 t/ha/ano, o que equivale a cerca de 177 t/ha/ano de matéria seca.

Leal, Walter e Seabra (2013) comparam a energia primária da cana-de-açúcar com a do milho, concluindo que, para a mesma área cultivada, o milho tem apenas 58% da energia primária da cana-de-açúcar. Os autores também afirmam que a razão entre a energia primária da cana e a energia utilizável com esse material era de 32,4%, em 2010, com uma projeção de

44,3% para 2020, e 48,4% em 2030. Energia primária refere-se à energia contida nos produtos *in natura*, ou seja, que ainda não passaram por nenhum processo de transformação.

Neste trabalho também são apresentadas duas formas para melhorar a eficiência de conversão da energia primária para a energia utilizável, melhorar a eficiência das refinarias e o melhor aproveitamento do bagaço e da palha, além de pesquisar uma variedade de cana que produza o máximo de energia primária, o que é diferente de produzir o máximo de açúcar.

Já Macedo, Seabra e Silva (2008) avaliaram a emissão de gases do efeito estufa da produção e uso do etanol de cana-de-açúcar. Os autores consideraram uma produção de 97 toneladas/ha, e uma concentração de 14,22% de sacarose nos colmos da planta. Apresentando um consumo de energia fóssil de 210,2 MJ por tonelada de cana produzida e 23,6 MJ por tonelada de cana convertida em etanol, totalizando 233,8 MJ por tonelada de cana, e avaliando a produção energética renovável em 2185,2 MJ por tonelada de cana, considerando o etanol produzido e os excedentes, conclui-se que, para cada 1MJ aplicado na produção de cana-de-açúcar e de etanol, colhem-se 9,35MJ de energia renovável. Por fim, os autores estimaram que, em 2020, sem a queima de palhada, segundo a análise de ciclo de vida dos gases de efeito estufa, a emissão equivalente do etanol hidratado era de 330 kg CO₂ equivalente por m³ de etanol.

O etanol também tem sido estudado como reagente para células de combustível, avaliando-se a viabilidade do uso de células de combustível a etanol em locomotivas. Hungria, Sanches e Moscibrocki (2021) indicaram que as células de combustível do tipo SOFC, *solid oxide fuel cell*, podem apresentar uma eficiência elétrica em torno de 60%, o que as torna uma ótima opção entre as células de combustíveis que não utilizam apenas hidrogênio. Para Steil *et al.* (2017), uma célula de combustível do tipo SOFC, com o eletrodo tratado com uma camada à base de cério, apresenta um alto desempenho sem degradar-se por formação de carbono.

Zaparolli (2021) relata que há interesse por parte das montadoras de automóveis para a pesquisa e desenvolvimento das células de combustíveis movidas a etanol. Para o Brasil, essa tecnologia é interessante, pois, além de já utilizar a estrutura de abastecimento de etanol que já existe no País, basta apenas abastecer o veículo, como já ocorre.

3.2 Modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar

Entender como a cana se desenvolve se faz necessário para avaliar a relação sol/planta ao longo de todo o desenvolvimento da cultura. Dentre os vários modelos que predizem a produtividade, como o APSIM-Sugarcane e o CANEGRO-DSSAT, o método da Zona Agroecológica (ZAE) é um dos que se destacam. O método ZAE, que é um modelo agrometeorológico, foi apresentado por Doorenbos e Kassam (1979) e é amplamente utilizado por ser preciso, de fácil aplicação e necessitar apenas de dados meteorológicos e da cultura (OLIVEIRA *et al.* 2012).

O método da zona agroecológica ZAE (Doorenbos e Kassam, 1979) é capaz de estimar a produtividade máxima não só da cana-de-açúcar, mas de várias culturas, sendo um método bem abrangente. O modelo divide a produção em dias claros e em dias nublados, a fim de estimar a produtividade bruta da cultura, a qual é computada em função da temperatura, tipo de cultura e produtividade dos dias claros e nublados. Com a produção bruta calculada, importa proceder a algumas correções para calcular a produtividade máxima da cultura, devido ao índice de área foliar, temperatura ambiente e da proporção entre o produto desejado e a massa total da planta

Rudorff e Batista (1990) utilizaram o método ZAE para estimar a produção de cana na usina de Barra Grande, com o coeficiente de determinação, uma medida de ajuste entre os dados reais e os dados obtidos pelo método, chegando até 0,69, escala variando de 0 a 1, em que 1 (um) significa que os cálculos representam a realidade fielmente, e 0 (zero), o oposto. Oliveira e outros autores (2012) utilizaram o método ZAE para estimar a produtividade de cana-de-açúcar em Minas Gerais. Nesse estudo, encontraram um erro sistemático no modelo, qual seja, superestimava a produção em 37 t/ha, e ao corrigir esse viés, os autores puderam estimar adequadamente os valores de produção da cultura.

Wit (1959) propôs um modelo para avaliar a produção fotossintética em função da irradiação solar, porém o autor não considerou a variação da área foliar da cultura, considerando a cobertura vegetal completa. Métodos mais complexos que consideram, entre outros fatores, a temperatura ambiente e a idade das plantas, foram apresentadas posteriormente, como o de Machado (1981) que propôs um método dedicado a simular o acúmulo de matéria seca na cana-de-açúcar.

Com base em propostas mais complexas, como a de Machado (1981), Barbieri (1993) propôs um novo método dedicado à estimativa de produção da cana-de-açúcar. Esse modelo considera a produção fotossintética de dias claros e dias nublados, utiliza parâmetros como a idade da planta, medida em graus dias, o índice de área foliar (IAF) e temperatura ambiente. Barbieri (1993) ainda analisa o acúmulo de matéria seca, a respiração da planta e a estimativa das perdas na colheita, relacionadas à massa das raízes, toco e folhas.

Barbieri, Silva e Díaz-Ambrona (2010) atualizaram as equações de Barbieri (1993), agora chamadas de BRCANE, e recalcularam as massas das raízes, toco e folhas. Teruel (1995) aperfeiçoou o cálculo do IAF para a cana-de-açúcar em diferentes níveis de regime hídrico, além de considerar se a cana era plantada de soca ou de ressoca. O nome cana soca vem do termo popular soqueira, que é utilizado para se referir à parte remanescente da cana-de-açúcar após a colheita ou corte. Logo, cana soca é o nome utilizado para se referir à cana produzida após o primeiro corte, e o termo ressoca refere-se à cana produzida a partir do segundo corte.

O IAF, índice de área foliar, é fortemente influenciado pela fase fenológica da cultura, a qual não acompanha o tempo diretamente, mas sim, as condições climáticas ao longo do amadurecimento. Uma das abordagens mais simples e usadas para definir a fase fenológica consiste nos graus-dia, proposto por Arnold (1959). O conceito de graus-dia é utilizado para entender como a temperatura ambiental afeta o desenvolvimento da cultura: quando a planta é exposta a uma temperatura maior que a temperatura basal inferior, acumula certa quantidade de graus-dias. Essa quantidade de graus-dia acumulada está diretamente relacionada ao amadurecimento da cultura, a saber: em dias muito frios, a contagem de graus-dia é pequena, podendo zerar, caso a temperatura do dia seja menor que a basal inferior da cultura (RENATO *et al.* 2013). Portanto, não é possível relacionar o desenvolvimento de uma cultura com os dias cronológicos, pois em dias frios o acúmulo de graus-dias, ou o desenvolvimento da cultura, é menor do que em dias mais quentes. Arnold (1959) relaciona apenas a temperatura basal inferior da cultura e a temperatura máxima e mínima do dia para o cálculo dos graus-dia. Ometto (1981), em vista disso, propôs um método que relaciona também a temperatura basal superior da cultura e seu desenvolvimento.

3.3 Segunda lei da termodinâmica aplicada a vegetais

Já no âmbito da segunda lei da termodinâmica, Attorre, Sciubba e Vitale (2019), utilizando um pinheiro como modelo de validação, descrevem um modelo termodinâmico do crescimento de uma planta em que definem dois tipos de eficiência: a eficiência de conversão da radiação em glicose e a eficiência global, considerando todos os fluxos da planta. Nesse modelo, utiliza-se a água como elemento de estudo, contabilizando todas as entradas, como a absorção da água pelo solo e pelas folhas, e também as saídas, como a evapotranspiração e a perda de matéria pelo descascamento da planta. O fluxo de nutrientes também é contabilizado finalizando o balanço de massa do modelo. Nos fluxos exergéticos, os autores introduzem junto aos fluxos de massa a radiação incidente, a radiação emitida e a convecção do ar ao redor da planta. Para os autores, a eficiência exergética solar encontrada depende da idade da planta, que varia entre 2 e 5%, aumentando conforme a planta amadurece.

Considerando apenas a superfície da folha, bem como a camada de ar ao redor dela, e o volume de controle, Petela (2008) diverge de Attorre, Sciubba e Vitale (2009) por não computar os fluxos de nutrientes. Dessa forma, o autor se concentra apenas na fotossíntese, deixando os limites do sistema bem definidos. Foram desconsideradas, também, as condições de dias nublados, bem como o déficit de clorofilas nas folhas e escassez hídrica. Petela (2008) defende que, de todas as entradas de exergia, 87,76% são provenientes da radiação fotossinteticamente ativa, 7,43% são das demais radiações e 4,81%, da água líquida. Já a exergia da glicose produzida representa 2,6%, mostrando uma ineficiência do sistema de 97,4%, valor que está de acordo com os demais autores.

Abordando uma análise de potenciais eletroquímicos, Silva, Seider e Lior (2015) olham internamente para as reações que compõem a fotossíntese, computando a destruição exergética de cada reação do processo. Para uma análise mais completa, consideram-se vários fatores físicos metabólicos da planta, como a reflexão da irradiação solar, a transpiração e a fotorrespiração. Os autores explicam que esse processo é considerado por alguns pesquisadores como um mecanismo para evitar a fotoinibição, que é a “queima” das estruturas intercelulares pelo excesso de O_2 e de luz. Avaliando apenas a radiação fotossinteticamente ativa, os autores convergem para uma eficiência exergética de 3,9%.

Outro estudo sobre a análise da exergia da fotossíntese foi realizado por Saboohi, Valero e Azamian (2020), que realizaram uma análise exérgica focada na interação solo-planta e observaram que essa interação é responsável por 2,5% do desperdício de exergia do organismo. O autor também realizou várias análises da segunda lei da termodinâmica, aplicando-a à dissolução de minerais no solo, precipitação, fertilização, correção da acidez do solo e reação de alguns poluentes. O estudo conclui que a mineração realizada pela planta é responsável por 17,8% de toda a destruição exérgica da interação planta-solo.

O fluxo de água na cana-de-açúcar tem importância para as análises exérgicas, pois está relacionado diretamente aos três processos muito significativos para o metabolismo da planta. Além de participar diretamente nas reações fotossintéticas, produzindo carboidratos, a água também é utilizada na produção da biomassa, visto que 70% da cana-de-açúcar é composto por água (BARBIERI, 1993); esses dois fluxos são facilmente calculados, pois são diretamente proporcionais ao crescimento da planta.

O terceiro processo que utiliza água é a transpiração que, junto com a evaporação do solo, é estudada como evapotranspiração, o que é fundamental para entender a demanda hídrica da cultura. Sentelhas e Angelocci (2012) afirmam que é muito difícil distinguir a transpiração das plantas da evaporação do solo, uma vez que a evaporação do solo é dependente de alguns fatores da cultura, como a densidade populacional, área foliar, altura das plantas e características das raízes.

Doorenbos e Kassam (1979) recomendaram um modelo para a estimativa da evapotranspiração de várias culturas. Barbieri (1981) estudou a evapotranspiração da cana, indicando que são necessários cerca de 8,5 mm de água para produzir 1 tonelada de cana. O autor também afirma que a demanda de água variou de 0,5 mm/dia até 6 mm/dia. Já Oliveira *et al.* (2015) afirmam que a evapotranspiração média da cana-de-açúcar é de 5,31 mm/dia.

Para realizar a sua análise exérgica, Attorre, Sciubba e Vitale (2019) levaram em conta a evaporação do solo, calculando a evapotranspiração do sistema planta solo. Já Silva, Seider e Lior (2015) consideraram que 50% da água utilizada absorvida pela planta foi utilizada pela fotossíntese, sendo a fração restante eliminada pela transpiração do solo.

Petela (2008), com base em Jorgensen e Svirezhev (2004), relaciona os mols de água transpirada com as de dióxido de carbono assimilado e, nessa análise, o autor considera a pressão de saturação de vapor na folha, a umidade do ar, a pressão ambiente e a concentração

molar de CO₂ na atmosfera. Dessa forma, a estimativa de transpiração da cana-de-açúcar fica dependente das condições climáticas e da produção de carboidrato, tornando-a mais fácil de ser estimada.

Além da água, outro fator importante para avaliar a exergia é a temperatura da folha. Petela (2008) considera em seu modelo que a folha está a 5 °C acima da temperatura ambiente, além de realizar uma análise de sensibilidade para a temperatura a 3 °C. Já Nelson e Bugbee (2015) afirmam que, para uma planta sem estresse hídrico, a temperatura da folha é 2 °C acima da temperatura ambiente, podendo chegar até 12 °C, dependendo do nível de estresse.

As folhas são estruturas da planta que recebem a irradiação solar e, em cujas células existem pequenas estruturas chamadas organelas, dentre as quais as responsáveis por absorver a luz e realizar a fotossíntese são os cloroplastos. Periodicamente, uma folha nasce, serve na produção fotossintética e morre. Estima-se que uma folha morre após a formação da nona folha subsequente (BARBIERI, DA SILVA E DIAS-AMBRONA, 2010 E SILVA *et al.* 2018). Após a morte dessa folha, ela seca e se torna a palhada, Santos *et al.* (2012) afirmam que são produzidos cerca de 140 kg de palha e gerados cerca de 140 kg de bagaço em base seca para cada tonelada de cana processada. Para o autor, a palhada da cana-de-açúcar contém cerca de 1/3 do potencial energético da planta. Machado (1981) afirma que cada metro quadrado de folha contém 100 gramas de matéria seca. Já Pinto, Bernardes e Pereira (2006) indicam que são necessários de 13,5 até 15 m² de folhas secas para reunir um quilograma de massa. Romero *et al.* (2007) avaliaram a produção de *trash*, que é a união de folhas verdes, folhas secas e tocos, para quatro variedades de cana-de-açúcar. Para os autores, em média, para cada 100 kg de cana colhida são produzidos 16 kg de *trash*, e que essa razão se mantém independente da produção de cana. Mariani (2006) concorda com a proporção de palhada indicada pelos autores, afirma que a palha da cana-de-açúcar pode gerar uma receita extra na produção de energia quando utilizada como combustível suplementar nas turbinas e salienta que o valor do poder calorífico inferior da palhada é de cerca de 15 MJ/Kg.

Já Ripoli, Molina e Ripoli (2000) concordaram com a razão de 14% entre folhas e colmo colhido, afirmando ainda que a quantidade de folhas vivas na cana pode variar de 1,9 a 2,9 toneladas de matéria seca por hectare, enquanto as folhas secas acumulam próximo de 8,8 toneladas de matéria seca por hectare. Os autores ainda avaliaram o impacto da utilização da palhada para produção de energia elétrica e, segundo eles, cerca de 7 milhões de pessoas

poderiam ser abastecidas apenas com a energia elétrica gerada com a palhada da cana-de-açúcar produzida no ano 2000, e cerca de 5,5 milhões, com a energia elétrica proveniente da queima do bagaço.

3.4 Biorrefinaria e aproveitamento da energia da fotossíntese

O aproveitamento da biomassa da cana tem evoluído com os séculos. No início existiam apenas engenhos, produzindo açúcar e cachaça, os quais evoluíram para usinas que produziam, além do açúcar, etanol e energia elétrica. O último passo nessa evolução foi a introdução das biorrefinarias, que são complexos similares às refinarias de petróleo, capazes de produzirem, além dos produtos da usina, produtos químicos (RODRIGUES, 2011).

Segundo Menezes (2015), uma biorrefinaria pode ser formada com a adição de novos estágios de produção nas usinas de cana-de-açúcar, de forma a aproveitar os resíduos como palha, bagaço e vinhaça na produção de energia elétrica, biocombustíveis e outros bioprodutos.

Kamate e Gangavati (2009) avaliaram, em uma análise exérgica, uma planta de cogeração que utiliza bagaço de cana para produção de energia elétrica. Neste sistema de cogeração, a maior irreversibilidade está localizada na caldeira, e foi apontado que o aumento da pressão e da temperatura do fluido de trabalho gera uma redução na irreversibilidade. Os autores concluíram que uma caldeira moderna é capaz de converter apenas 37% da exergia contida no bagaço da cana-de-açúcar.

Aghbashlo *et al.* (2018) avaliaram uma biorrefinaria anexada a uma usina de cana-de-açúcar, que produz ácido láctico e energia elétrica, encontrando uma eficiência exérgica de 52,71%. O autor concorda com Kamate e Gangavati (2009) no fato de a caldeira ser o maior destruidor de exergia do sistema. Comparando-se com os resultados de Petela (2008), nota-se que a transformação da radiação em glicose é o mecanismo com maior irreversibilidade.

Menezes (2015) comparou uma usina tradicional com essa mesma usina simulada como uma biorrefinaria. Na simulação, foi direcionado todo o bagaço de cana para um tratamento de separação em celulose, hemicelulose e lignina, e esse último produto sendo destinado à caldeira. Com essa etapa intermediária, a produção de energia elétrica foi reduzida para 42,4% da usina tradicional, porém a eficiência exérgica aumentou de 24% para 43,1%.

3.5 A Vinhaça – Resíduo do processo de produção de etanol

Entre os resíduos da produção de etanol da cana-de-açúcar, a vinhaça merece muita atenção, pois é considerada a maior fonte de contaminação da indústria do etanol (PARSAEE, KIANI E KARIMI, 2019). Tem sido usual utilizar a vinhaça *in natura* para a fertirrigação (SILVA-NETO E GALLO, 2021), porém essa prática tem se mostrado inapropriada, devido aos impactos ambientais que ela causa. Esta é outra situação em que a biorrefinaria se destaca, pois ela pode lidar com a vinhaça mais apropriadamente (PALACIOS-BERECHE E NEBRA (2020a). González e Mejía (2015) avaliaram os impactos da fertirrigação de vinhaça nos lençóis freáticos, concluindo que, para lençóis rasos (14 m), há um potencial de contaminação. Marinho e autores (2014) avaliaram o impacto da contaminação da água por vinhaça e apontaram que o poder de contaminação da vinhaça se deve à alta concentração de matéria orgânica. O estudo foi realizado com tilápias, e todos os indivíduos morreram depois de 48 horas em um tanque com concentração de 5% de vinhaça.

Há alternativas estudadas para a vinhaça, como a utilização de pectina para produzir um fertilizante de liberação lenta, sendo uma boa fonte de nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio (Bettani, 2019). Andrade *et al.* (2022) utilizaram a vinhaça para fertilização de culturas hidropônicas apenas adicionando um coagulante para separar a parte líquida e a parte sólida da vinhaça, formando dois produtos ricos em nutrientes e matéria orgânica, e ainda concluíram que apenas uma adição de cálcio na solução de vinhaça líquida foi necessária para suprir as necessidades das culturas hidropônicas.

Uma das alternativas mais consideradas para a vinhaça é a biodigestão anaeróbica deste subproduto. A vinhaça biodigerida é um subproduto com uma concentração de matéria orgânica bem menor. quando comparado à vinhaça *in natura*, apresentando uma redução de 70% a 90% da demanda bioquímica de oxigênio, além do PH neutro e do menor custo de transporte, devido à maior concentração. Quanto ao poder de fertilização, a vinhaça biodigerida pode promover a mesma capacidade de fertilizar o solo que a vinhaça *in natura* (Xavier, 2012).

Moraes *et al.* (2017) avaliaram a redução da emissão dos gases de efeito estufa no armazenamento da vinhaça biodigerida. O autor aponta que nos 21 dias observados de

armazenamento, a vinhaça não tratada emitiu 48,3 kg CO₂eq de CH₄ para cada quilo de vinhaça; já a vinhaça biodigerida não apresentou emissão de CH₄. Também foi apontado que a emissão de óxido nítrico foi 78% menor na vinhaça tratada.

Parsaee, Kiani e Karimi, (2019) afirmam que a biodigestão anaeróbica é um dos meios mais eficientes e promissores para o tratamento da vinhaça. Segundo os autores, cada litro de etanol produzido gera 12 litros de vinhaça, e cada litro de vinhaça pode gerar 14,23 litros de metano. Considerando um ciclo Otto com 25% de eficiência, os autores indicam que o biogás proveniente de uma tonelada de cana-de-açúcar é capaz de prover 22 kWh de energia.

Nakashima (2018) analisou, aos olhos da segunda lei da termodinâmica, a geração de biometano de vinhaça, e explica que a planta de biogás tem uma eficiência exérgica de 20,3%, o que é maior que a eficiência da concentração evaporativa da vinhaça, 16,5% e da fertirrigação, 10%; porém essa eficiência exérgica pode aumentar para um valor entre 24% e 28%, se a planta de biogás for combinada com a concentração por evaporação. Silva-Neto e Gallo, (2021) avaliaram o biogás da vinhaça como substituto para o gás natural, demonstrando que o potencial máximo de biogás da vinhaça, que pode ser produzido no estado de São Paulo, tem a capacidade de suprir 21,5% do gás natural consumido pelo estado, o que significaria uma redução do equivalente a 3,2 milhões de toneladas de CO₂ por ano.

Já Elia Neto *et al.* (2009) afirmam que, apesar da biodigestão anaeróbica reduzir a demanda bioquímica de oxigênio em até 90%, o produto da biodigestão ainda tem um potencial de poluição, se descartado em afluentes. Para resolver a questão desse produto é necessário um pós-tratamento inviável economicamente. A análise do autor, feita em 2009, indicava que o custo de produção de biogás a partir da vinhaça estava entre R\$ 204,82 /MWh e R\$ 256,71 /MWh; já o preço da energia elétrica era de R\$ 150 /MWh. Os autores ainda estimam uma produção de 7,45 gramas de biogás para cada litro de vinhaça tratada, uma produção energética de 14,3 Wh para cada litro de vinhaça, e que, para cada litro de etanol produzido, é possível um acréscimo energético de 11% com o biogás da biodigestão.

Araujo e Oliveira (2021) reavaliaram a viabilidade econômica da geração de energia elétrica proveniente da vinhaça, afirmando que, para usinas com capacidade maior que 1000 m³ de etanol por dia, o preço mínimo de venda da energia elétrica deve ser de US\$ 64,85 /MWh. O contrato de energia elétrica proveniente do biogás está avaliado em R\$ 350 /MWh (ANEEL,

2022. Considerando a cotação do dólar em R\$ 5,30, é possível afirmar que já é viável a utilização da vinhaça para a produção do biogás.

Palacios-Bereche e Nebra (2020a) avaliaram, com base nas comparações energéticas, exergéticas e econômicas, duas alternativas para a vinhaça: a queima de vinhaça concentrada e a queima de biogás proveniente da vinhaça biodigerida. Segundo os autores, a queima de vinhaça concentrada gera a remoção completa dos agentes poluidores, além de melhorar a disponibilidade de água, além de as cinzas geradas poderem ser utilizadas como fertilizantes. Já a vantagem da biodigestão é a produção de biogás, que pode ser usado não apenas nas caldeiras da biorrefinaria. Os autores apontam que, sob o ponto de vista exergético, ambas as soluções apresentam uma eficiência exergética similar e concluem que, levando-se em conta o lado econômico, a concentração e incineração da vinhaça são alternativas mais viáveis.

Salomon e outros autores (2011), analisando cinco alternativas diferentes para a utilização do biogás de vinhaça para produção de energia elétrica, concluíram que, do ponto de vista econômico, a melhor alternativa é utilizar o biogás junto com o bagaço de cana nas caldeiras e vender o excedente de energia elétrica produzido pela queima do conjunto.

Almeida (2015) afirma que a vinhaça biodigerida ainda apresenta uma pequena demanda de oxigênio, o que faz com que a vinhaça biodigerida ainda seja classificada como efluente. E acrescenta que a outra desvantagem da biodigestão da vinhaça é o alto custo de implantação do sistema. Sobre a concentração e incineração da vinhaça, Almeida (2015) afirma que no processo de incineração, os compostos nitrogenados, fosforizados e sulfatados se perdem na queima, restando junto às cinzas apenas os compostos de potássio para serem utilizados como adubo.

Palacios-Bereche *et al.* (2013) e Salazar (2012) realizaram uma análise exergética de todas as etapas de uma biorrefinaria, desde a entrada da cana-de-açúcar até a produção de energia elétrica, biogás, etanol de segunda geração e etanol anidro. Nesse estudo, a vinhaça não é tratada e transformada em biogás. Os autores também realizaram uma análise exergo-econômica, aplicando à vinhaça o mesmo valor de custo específico que o vinho, produto da fermentação. A refinaria estudada apresentou uma eficiência exergética de 36,6% no melhor cenário.

3.6 Módulos fotovoltaicos e geração de energia elétrica

Há formas alternativas de aproveitamento da energia solar, além da produção de biomassa, duas das quais estão sendo amplamente utilizadas na geração de energia elétrica: as usinas heliotérmicas, que são grandes complexos que concentram a irradiação solar utilizando espelhos, e cuja radiação aquece um fluido que pode ser armazenado e alimentar uma turbina a vapor. Em geral, as usinas termossolares apresentam uma eficiência energética superior a 14% (AMADEI *et al.*, 2013), podendo chegar em até 35% (GONZÁLEZ-ROUBAUD, PÉREZ-OSORIO e PRIETO, 2017).

A segunda alternativa é a implementação dos módulos fotovoltaicos, sistemas que apresentam eficiência energética de cerca de 20% e têm sido objeto de muitos estudos. McAdams (1954) sugeriu uma das primeiras correlações para calcular o coeficiente de troca de calor por convecção de um módulo fotovoltaico, porém Duffie e Beckman (2013) afirmam que McAdams (1954) não especificou a inclusão da radiação nas equações, razão pela qual Watmuff, Charters e Proctor (1977) propuseram uma revisão ao modelo de McAdams (1954).

Duffie e Beckman (2013) explicam que, tanto o formato do local onde os módulos são instalados, quanto as estruturas que os circundam, influenciam nas condições do fluxo, e que os modelos de McAdams (1954) e Watmuff, Charters e Proctor (1977) são eficazes para módulos com o comprimento característico de 0,5 m. Na sequência, vários outros autores propõem correlações em que diferentes aspectos do módulo são considerados.

Muller (2010) deixa claro que tanto a parte do módulo que recebe radiação, quanto a que está voltada para o solo perdem calor por radiação e convecção. O autor especifica que o coeficiente de absorvidade do módulo é de 92%, a emissividade do vidro é 84%, e a emissividade do lado sombreado do módulo é de 89,3%.

O modelo de McAdams (1954) foi muito utilizado nos trabalhos de Bayrak, Erturk e Oztop (2017), Akyuz *et al.* (2012), Silva *et al.* (2021) e Costa *et al.* (2014). Já o modelo de Watmuff, Charters e Proctor (1977) foi utilizado por Kumar *et al.* (2020), Rawat (2017) e Sadhakar e Srivastava (2014). Para esse modelo, a troca de calor para o meio deve ser complementada com a transferência de calor por radiação, casos em que os autores adotam a temperatura do céu de 5 °C a 6 °C menor que a temperatura do ar.

Além dos módulos fotovoltaicos, o sistema de geração de energia elétrica fotovoltaico necessita de um inversor de fase, um equipamento que transforma a energia de corrente contínua dos módulos em corrente alternada e injeta essa corrente na rede na mesma fase que a rede se encontra. A eficiência do inversor é computada, ponderando-se a eficiência para diferentes níveis de potência. Comumente é utilizado nos catálogos dos inversores o padrão europeu, porém há também o padrão californiano para definir a eficiência do aparelho (Rampinelli, Krenzinger e Romero, 2010).

Pinto, Zilles e Almeida (2011) propuseram um modelo para determinar a eficiência brasileira de um inversor de fase, almejando um modelo mais confiável para avaliar os inversores que operam no Brasil. Bassan (2017) comparou os três modelos de eficiência e afirma que um inversor de alto rendimento trabalhando no território europeu não teria uma alta eficiência no Brasil, necessariamente, pois, na Europa, um inversor mais eficiente em baixas potências é mais vantajoso, enquanto no Brasil é mais interessante o inversor apresentar uma maior eficiência em altas potências.

Aos olhos da segunda lei da termodinâmica, Rawat (2007), avaliando um módulo fotovoltaico de 300 W e 1,9 m² de área, afirmou que a eficiência exergética média é de 52,93%, enquanto a eficiência da produção de energia elétrica ficou em 11,15%

Para uma análise termodinâmica mais precisa dos módulos fotovoltaicos, a temperatura se mostra uma variável crucial. Estimar essa temperatura não é trivial, pois, alguns autores, como Luque e Hegedus (2011), afirmam que a temperatura do módulo é aproximadamente proporcional à radiação incidente nela, utilizando, então, a temperatura NOCT, *Nominal Operating Cell Temperature*, que torna a temperatura proporcional apenas à radiação incidente, desconsiderando a influência da variação do vento.

Apesar de muito utilizada, a temperatura NOCT nas avaliações termodinâmicas pode causar imprecisões nos resultados e, para resolver essa situação, este trabalho realiza um balanço energético, como demonstrado no capítulo 4.7.

4 Material e Métodos

Neste capítulo, são apresentados o material e os métodos utilizados neste estudo, com o objetivo de descrever detalhadamente os recursos empregados e os procedimentos adotados. São fornecidos os dados utilizados para as simulações e as equações que descrevem o comportamento do ambiente, da cana-de-açúcar, da biorrefinaria e dos módulos fotovoltaicos.

4.1 Parâmetros climáticos relevantes para a produção de cana-de-açúcar

Algumas considerações são necessárias para determinar a forma com que os modelos trabalham: o equinócio de primavera é adotado como o 80° dia do ano, o ano contém exatamente 52 semanas, e a cidade de Campinas-SP, localizada na latitude 22,82° Sul, foi escolhida como referência para os parâmetros utilizados neste trabalho.

Levando em conta que o objetivo dos modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar é encontrar a produção máxima das culturas, não é considerado nenhum tipo de deficiência hídrica e de nutrientes, nem problemas relacionados a doenças ou ao manejo da cultura.

A declinação solar é um fator importante, pois informa o ângulo com que a irradiação solar atinge o solo no ponto de estudo, e é dado pela Equação 4.1.

$$\delta = 23,45^\circ \text{sen} \left(\frac{2\pi}{365} (\text{dia}_i - 80) \right) \quad (4.1)$$

Na qual δ é a declinação solar em graus, $23,45^\circ$ é a latitude dos trópicos, 364, a quantidade de dias do ano de 52 semanas, dia_i é o dia do ano no qual se quer saber a declinação solar, e 80 é o dia do equinócio de primavera. Calculada a declinação do sol, é possível encontrar o fotoperíodo, que é o comprimento teórico do dia em horas, pela Equação 4.2

$$N = \frac{2}{15} \text{arcos}(-\tan \delta \tan \theta) \quad (4.2)$$

Sendo N o fotoperíodo, período com irradiação solar do dia em horas, e θ a latitude do local de estudo.

O CEPAGRI (2021c) fornece informações meteorológicas bem valiosas, como a temperatura mínima e máxima de cada mês do ano desde 1995, dados necessários para os modelos deste trabalho, assim como a insolação real fornecida por Pereira (2006). Os parâmetros climáticos estão compilados na Tabela 4.1.

Outro parâmetro meteorológico relevante é a radiação incidente no topo da atmosfera. Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007) demonstram como a Equação 4.3 pode ser utilizada para esse cálculo.

$$I_0 = 37,6 \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi d}{365}\right) \left(\left(\frac{\pi}{180}\right) \arccos(-\tan \delta \tan \theta) \operatorname{sen}(\delta) \operatorname{sen}(\theta) + \operatorname{sen}(-\tan \delta \tan \theta) \cos(\delta) \cos(\theta) \right) \right) \quad (4.3)$$

Onde I_0 é a radiação incidente no topo da atmosfera no dia d do ano, expresso em MJ/m²

Com base na radiação incidente no topo da atmosfera, é possível estimar a irradiância solar global diária incidente na cultura, mediante equação de Angström-Prescott, conforme a Equação 4.4

$$I_g = I_0 \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (4.4)$$

Temos a e b como os coeficientes da equação de Angström-Prescott, e n , a insolação que realmente chega ao solo, lembrando que N é o fotoperíodo. Para a cidade de Campinas, os valores de a e b são 0,23 e 0,56, respectivamente. Caso os coeficientes não estejam disponíveis, é possível estimar a irradiância utilizando a latitude, conforme a Equação 4.5 (Pereira, Angelocci e Sentelhas, 2007).

$$I_g = I_0 \left(0,29 \cos \theta + 0,52 \frac{n}{N} \right) \quad (4.5)$$

Portanto, para a cidade de Campinas, em um dia totalmente claro, onde a insolação real é igual ao fotoperíodo, o valor de $I_g = 0,79I_0$; já para um dia totalmente nublado, com a insolação real igual a zero, $I_g = 0,23I_0$.

Heemst (1986) explica que a fração do dia em que o céu está nublado, é obtida pela razão entre a energia retida pelas nuvens e a máxima energia retida possível, de acordo com a Equação 4.6.

$$F = \frac{I_{g \text{ máx}} - I_g}{I_{g \text{ máx}} - I_{g \text{ mín}}} \quad (4.6)$$

Combinando as Equações 4.5 e 4.6, conclui-se que a fração do dia que está nublado se dá pela Equação 4.7.

$$F = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \quad (4.7)$$

Barbieri, Da Silva e Dias-Ambrona (2010) consideram que, em um dia totalmente limpo, cerca de 40% da radiação que chega ao solo é do tipo PAR; já para os dias totalmente nublados essa proporção é de cerca de 50%. Dessa forma, é possível calcular a radiação PAR incidente na cultura, conforme a Equação 4.8.

$$I_{PAR} = I_g(0,4 + 0,1F) \quad (4.8)$$

Tabela 4.1 Parâmetros climáticos para a cidade de Campinas-SP

Semana	Declinação Solar (°)	Fotoperíodo (horas)	Insolação Real (horas)	Porcentagem dias nublados	I0 (MJ/m²)	T Máx (°C)	T Mín (°C)
1	-22,7	13,4	6,3	53%	42,7	33,8	16,1
2	-21,8	13,3	6,2	54%	42,5	33,7	16,5
3	-20,6	13,2	6,0	55%	42,2	33,7	16,8
4	-19,1	13,1	6,1	54%	41,8	33,8	17,0
5	-17,4	13,0	6,2	53%	41,3	33,8	17,2
6	-15,4	12,9	6,2	52%	40,7	33,9	17,2
7	-13,1	12,8	6,3	51%	40,0	33,9	17,1
8	-10,7	12,6	6,4	49%	39,2	33,9	16,9
9	-8,1	12,5	6,5	48%	38,2	33,7	16,6
10	-5,4	12,3	6,5	47%	37,2	33,5	16,2
11	-2,6	12,1	6,6	46%	36,0	33,3	15,7
12	0,2	12,0	6,9	43%	34,8	33,0	15,1
13	3,0	11,8	7,2	40%	33,5	32,6	14,5
14	5,8	11,7	7,4	36%	32,1	32,2	13,8
15	8,5	11,5	7,7	33%	30,8	31,8	13,1
16	11,0	11,4	7,6	34%	29,4	31,3	12,3
17	13,5	11,2	7,4	34%	28,2	30,9	11,6
18	15,7	11,1	7,3	34%	26,9	30,4	10,9
19	17,7	11,0	7,1	35%	25,8	30,0	10,1
20	19,4	10,9	7,0	36%	24,9	29,7	9,5
21	20,8	10,8	7,1	35%	24,0	29,4	8,9
22	22,0	10,7	7,1	34%	23,4	29,2	8,4
23	22,8	10,6	7,2	33%	22,9	29,0	7,9
24	23,3	10,6	7,2	32%	22,6	29,0	7,5
25	23,4	10,6	7,4	30%	22,5	29,0	7,3
26	23,3	10,6	7,6	29%	22,5	29,1	7,1
27	22,7	10,6	7,7	27%	22,8	29,3	7,0
28	21,9	10,7	7,9	26%	23,3	29,5	7,0
29	20,7	10,8	8,0	26%	23,9	29,9	7,1
30	19,3	10,9	8,0	26%	24,7	30,3	7,3
31	17,5	11,0	8,1	26%	25,7	30,8	7,6
32	15,5	11,1	8,1	27%	26,8	31,3	7,9
33	13,3	11,2	8,2	27%	28,0	31,8	8,3
34	10,9	11,4	7,7	32%	29,2	32,3	8,8
35	8,3	11,5	7,3	37%	30,5	32,8	9,3
36	5,6	11,7	6,8	42%	31,8	33,3	9,9
37	2,8	11,8	6,3	47%	33,2	33,8	10,4
38	0,0	12,0	6,4	47%	34,4	34,2	11,0

Tabela 4.1 Parâmetros climáticos para a cidade de Campinas-SP (cont.)

Semana	Declinação Solar (°)	Fotoperíodo (horas)	Insolação Real (horas)	Porcentagem dias nublados	I0 (MJ/m ²)	T Máx (°C)	T Mín (°C)
39	-2,8	12,2	6,5	46%	35,7	34,5	11,5
40	-5,6	12,3	6,7	46%	36,8	34,8	12,1
41	-8,3	12,5	6,8	46%	37,9	34,9	12,5
42	-10,9	12,6	6,9	45%	38,8	35,0	13,0
43	-13,3	12,8	7,1	45%	39,7	35,0	13,4
44	-15,5	12,9	7,2	44%	40,4	34,8	13,8
45	-17,5	13,0	7,4	44%	41,0	34,6	14,1
46	-19,3	13,1	7,5	43%	41,6	34,3	14,3
47	-20,7	13,2	7,3	45%	42,0	34,0	14,5
48	-21,9	13,3	7,2	46%	42,3	33,7	14,7
49	-22,7	13,4	7,0	48%	42,5	33,4	14,9
50	-23,3	13,4	6,8	49%	42,7	33,3	15,2
51	-23,4	13,4	6,6	50%	42,8	33,3	15,5
52	-23,3	13,4	6,5	52%	42,8	33,7	15,9

Fonte: CRESESB (2000)

4.2 Parâmetros da cultura de cana-de-açúcar: Metabolismo e área foliar

A idade das culturas pode ser ditada pelos estádios fenológicos em que se encontram. Como as fases fenológicas não são diretamente proporcionais à idade cronológica da planta, utiliza-se o modelo proposto por Ometto (1981), ou seja, graus-dia (GD), para descrever essas fases. Para a cana-de-açúcar adota-se a temperatura basal inferior e superior como sendo 20°C e 35°C, respectivamente (Barbieri, 1993).

O modelo de Ometto (1981) contempla cinco condições para os cálculos de graus-dia, considerando as temperaturas: basal superior (T_B), basal inferior (T_b), máxima do dia (T_{max}) e a mínima do dia (T_{min}).

- Se: $T_B > T_{max} > T_{min} > T_b$

$$GD = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} + T_{min} - T_b \quad (4.9)$$

- Se: $T_B > T_{max} > T_b > T_{min}$

$$GD = \frac{(T_{max} - T_b)^2}{2(T_{max} - T_{min})} \quad (4.10)$$

- Se: $T_B > T_b > T_{max} > T_{min}$

$$GD = 0 \quad (4.11)$$

- Se: $T_{max} > T_B > T_{min} > T_b$

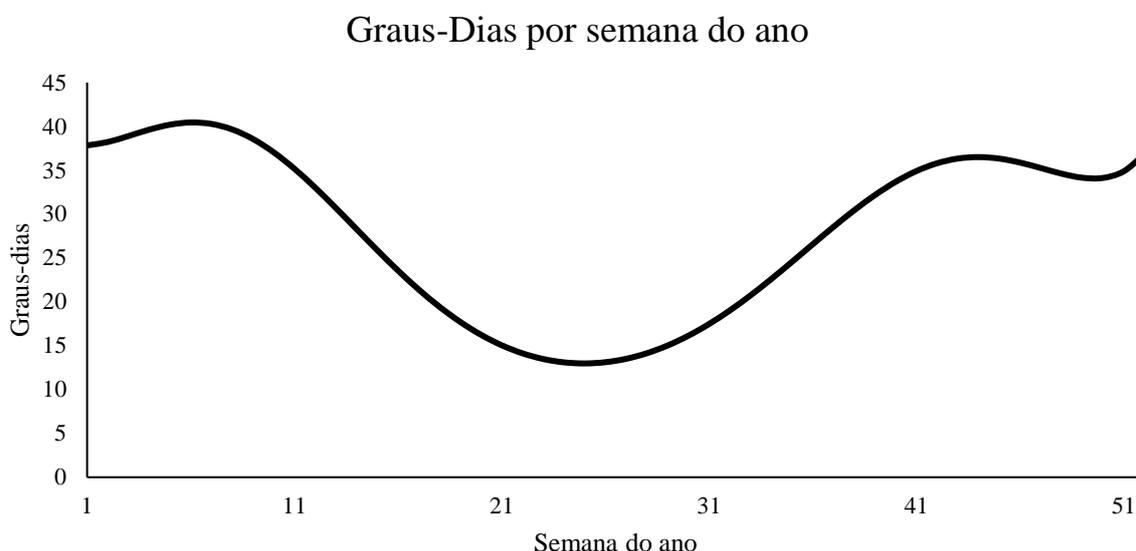
$$GD = \frac{2(T_{max} - T_{min})(T_{min} - T_b) + (T_{max} - T_{min})^2 - (T_{max} - T_B)^2}{2(T_{max} - T_{min})} \quad (4.12)$$

- Se: $T_{max} > T_B > T_b > T_{min}$

$$GD = \frac{(T_{max} - T_b)^2 - (T_{max} - T_B)^2}{2(T_{max} - T_{min})} \quad (4.13)$$

No caso da cultura de cana-de-açúcar cultivada na cidade de Campinas, apenas a condição da Equação 4.10 é atendida. Logo, para calcular quantos graus-dia a cultura amadurece em cada semana do ano basta multiplicar o valor encontrado por 7, conforme mostra a Figura 4.1

Figura 4.1 Graus-dia para cada semana do ano. Aplicação do modelo de Barbieri adaptado para Campinas



O índice de área foliar (IAF), proposto por Watson (1947), é a razão entre a área foliar da folhagem, levando-se em conta apenas um lado da folha da cultura pela área projetada no solo, ou em termos mais simples - área do solo ocupada pela planta. Essa variável adimensional está diretamente relacionada ao desenvolvimento vegetal. Barbieri (1993) propôs uma relação entre o índice de área foliar e os graus-dias da cultura, como mostra a Equação 4.14, válida apenas para $\sum GD > 80$, somatório dos graus-dia maior que 80; caso contrário, se deve considerar $IAF = 0$.

$$IAF = \frac{3,71}{1 + e^{3,149 - 0,00711 \sum GD}} - 0,15 \quad (4.14)$$

Teruel (1995) propôs outra abordagem para estimar o índice de área foliar, levando em conta não apenas os graus-dia, mas também os regimes hídricos e os cortes da cana-de-açúcar. Como a cultura considerada não apresenta déficit hídrico, a Equação 4.15 descreve a estimativa do índice de área foliar.

$$IAF = e^A \left(\sum GD_{Cor} \right)^B e^{C \sum GD_{Cor}} \quad (4.15)$$

Onde os parâmetros A, B e C dependem do corte em que a cultura está: Cana Planta, planta fruto do plantio, Cana Soca, planta fruto da brotação. Os valores dos parâmetros estão na Tabela 4.2. e o autor utiliza os valores de GD corrigidos em função do fotoperíodo, como mostra a Equação 4.16.

Tabela 4.2 Parâmetros para cálculos de IAF

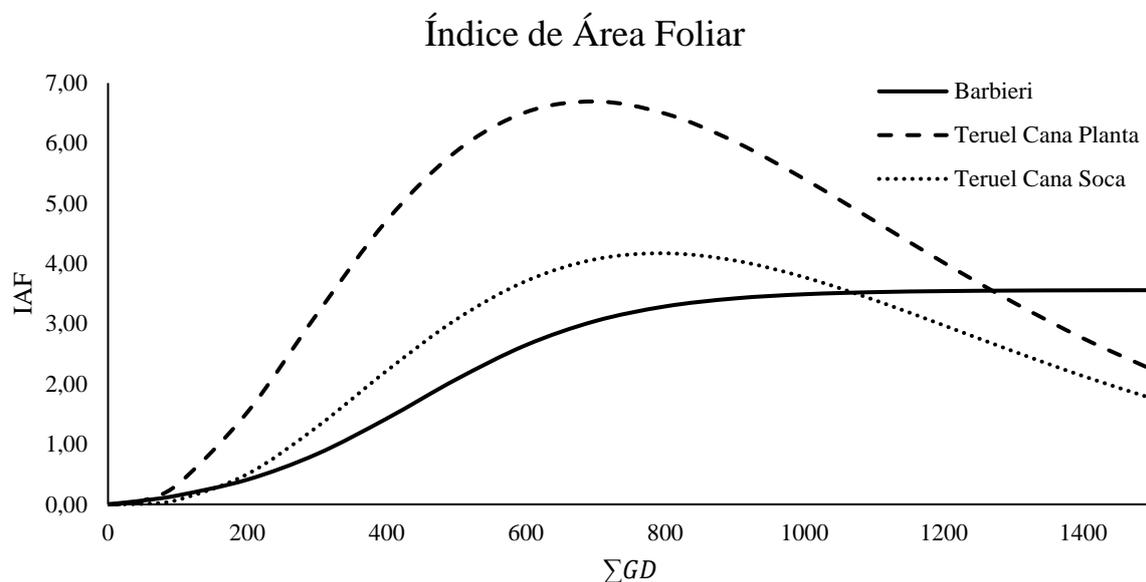
	Cana Planta	Cana Soca
A	-13,521	-17,707
B	2,784	3,373
C	-0,004023	-0,004265

Fonte: Teruel (1995)

$$GD_{Cor} = \frac{GD \cdot N}{12} \quad (4.16)$$

Entendendo como ambos os autores estimam o IAF a partir do GD, é possível analisar as curvas de desenvolvimento (Figura 4.2) e avaliar a melhor opção.

Figura 4.2 Comparação do desenvolvimento do IAF em função do somatório dos GD. Autoria própria, aplicando as equações das referências Barbieri (1993) e Teruel (1995).



O modelo de estimativa do IAF de Barbieri (1993) apresenta um valor máximo de 3,16, enquanto no modelo de Teruel (1995) o valor máximo é de 6,69. Faria *et al.* (2008) observaram que uma cultura de cana-de-açúcar irrigada apresenta um pico de IAF de 6,82, em torno do 152º dia após o plantio, e que esse valor diminui com o amadurecimento da cultura. Fica claro que o modelo de Teruel (1995) concorda com as observações de Faria e outros (2008), enquanto o modelo de Barbieri (1993) está mais distante do observado.

4.3 BRCANE: Método de estimativa de produção

O modelo BRCANE (BARBIERI, 1993) estima a produção de cana-de-açúcar pela irradiância solar global diária incidente na cultura e foi validado comparando os dados com algumas plantações irrigadas das variedades RB72 454, NA 56-79, CB 41-76, CB 47-355, CP 51-22, Q138 e Q141. Dessa forma, o autor encontrou um R^2 superior a 0,88. Barbieri, Da Silva e Dias-Ambrona (2010) e Barbieri (1993) dizem que a quantidade de carboidrato sintetizado pode ser descrita conforme a Equação 4.17.

$$CB = 10^3 \frac{aN}{bk} \ln \left(\frac{1 + bI_0}{1 + bI_0 e^{-k(IAF)}} \right) \quad (4.17)$$

Nesta equação, a e b são constantes que dependem da cultura, k é o coeficiente de atenuação da irradiação solar pelo dossel. Para a cana-de-açúcar considera-se que o valor de a , b e k são respectivamente $6,193 \cdot 10^{-2}$, $0,261$ e $0,58$. CB , carboidrato sintetizado, é calculado em kg/(ha dia). Já I_0 é a irradiação solar média descrita por Barbieri (1993) com a unidade cal/(cm² min) e pode ser calculada pela Equação 4.18, para dias claros, e pela Equação 4.19, para os dias escuros. Para a irradiância dos dias nublados, Barbieri, Da Silva e Dias-Ambrona (2010) consideram um acréscimo de 25% na radiação PAR, concordando com Assunção (1995), e Barbieri (1993) considera um acréscimo de 50%. Os autores concordam que cerca de 40% da radiação que chega no solo em dias claros é da categoria PAR, logo estima-se que 50% da radiação que chega no solo em dias nublados é do tipo PAR.

$$I_{0c} = \frac{0,79 I_0}{60 N} \quad (4.18)$$

$$I_{0n} = \frac{1,25 * 0,23 I_0}{60 N} = \frac{0,23 I_0}{48 N} \quad (4.19)$$

Como Barbieri (1993) utiliza a irradiância na unidade cal/cm², faz-se necessário multiplicar por um fator de conversão para se trabalhar de acordo com o sistema internacional de unidades, MJ/m², o qual é de aproximadamente 23.88, arredondado para a fração 621/26.

Dessa forma, a máxima produção de carboidrato em um dia totalmente claro, considerando o IAF = 5, é dada pela Equação 4.20.

$$CBc = 10^3 \frac{N 6,193 \cdot 10^{-2}}{0,261 * 0,58} LN \left(\frac{1 + \frac{0,79 * 0,261}{60} \frac{621}{26} \frac{I_0}{N}}{1 + \frac{0,79 * 0,261}{60} \frac{621}{26} \frac{I_0}{N} e^{-0,58 * 5}} \right) \quad (4.20)$$

A Equação 4.20 pode ser expressa de forma mais simples, de acordo com a Equação 4.21.

$$CBc = 409,1N.LN\left(\frac{1 + \frac{128}{1560}\frac{I_0}{N}}{1 + \frac{155}{34320}\frac{I_0}{N}}\right) \quad (4.21)$$

Analogamente, para os dias nublados, converge-se para a Equação 4.22.

$$CBn = 409,1N.LN\left(\frac{1 + \frac{233}{7800}\frac{I_0}{N}}{1 + \frac{41}{24960}\frac{I_0}{N}}\right) \quad (4.22)$$

Com a produção de carboidrato máxima definida para os dias claros e nublados, pode-se prosseguir com a finalidade de encontrar uma equação que relacione a produção máxima com a fração de dias nublados. Para isso, Barbieri (1993), apoiando-se em Heemst (1986), propõe a Equação 4.23, na qual é calculada a produção máxima de carboidrato em um dia.

$$CB_{max} = d((1 - F)CBc CT_c(T) + F CB_n CT_n(T)) \quad (4.23)$$

Onde d é o *footstep* do modelo, igual a 7; os dias da semana, C_n e C_c são as correções associadas à temperatura para os dias nublados e claros, respectivamente. Essas equações propostas por Barbieri, Da Silva e Dias-Ambrona (2010) são descritas nas Equações (4.24) e (4.25).

$$CT_c = \frac{-0,29(T + 2)^2 + 17,3(T + 2) - 186,4}{60,39} \quad (4.24)$$

$$CT_n = \frac{-0,29T^2 + 17,3T - 186,4}{60,39} \quad (4.25)$$

No qual T é a temperatura do ambiente em °C, descrita neste trabalho como sendo a média entre a temperatura máxima e a mínima de cada semana.

O cálculo da produção máxima de carboidratos é realizado levando-se em conta o índice de área foliar igual a 5. Porém, durante o amadurecimento da cultura, esse índice não é atingido, fazendo-se necessária uma correção, por causa do índice de área foliar, proposto por Barbieri,

Da Silva e Dias-Ambrona (2010). Por meio da Equação 4.26, calcula-se o C_{IAF} que considera apenas o somatório de graus-dia corrigidos, e não o índice de área foliar diretamente.

$$C_{IAF} = 0,645 e^{-1*\left(\frac{\sum GDC-900}{500}\right)^2} + 0,988 e^{-1*\left(\frac{\sum GDC-1868}{1080}\right)^2} \quad (4.26)$$

Barbieri, Da Silva e Dias-Ambrona (2010) destacam que, quando a Equação 4.26 for maior que 1(um), deve-se considerar $C_{IAF} = 1$.

Outra correção necessária é referente à idade da planta e à idade da folha. Barbieri (1993) destaca que o colmo da cana-de-açúcar dá origem a uma nova folha a cada 10 dias, e que, ao dar origem à décima folha, a primeira folha já deve estar morta. Sendo assim, o autor conclui que a idade das folhas pode ser considerada constante, e que há, em média, 9 folhas vivas para cada colmo da planta, além de relatar que há acúmulo de folhas mortas a partir do 119º dia após o plantio.

Um ano na cidade de Campinas tem aproximadamente 1.500 graus-dia corrigidos, o que é equivalente a uma média de 4,1 graus-dia por dia. Com base nas observações de Barbieri (1993), pode-se estimar que a cada 41 graus-dia nasce uma folha nova no colmo, considerando a média de 9 folhas por colmo, pode-se concluir que a idade média das folhas é de 185 graus dias. Nessa linha de raciocínio, o 119º dia após o plantio equivale a 490 graus dias, que é quando a primeira folha deve morrer, subtraindo desse valor 369 graus dias, que é a idade em que a primeira folha morre, pode-se concluir que a primeira folha nasceu com 121 graus-dia, o que equivale ao 29º dia após o plantio, valor que está de acordo com Mafaron (2012).

A correção pela idade é sugerida como sendo a Equação 4.27, (Barbieri, 1993).

$$CI = 0,6 + \frac{73000}{(\sum GDC)^{2,5}} \quad (4.27)$$

A Equação 4.27 tem valor igual a 1(um) quando o somatório de graus-dia corrigidos é no máximo 127, portanto é preciso considerar que a correção pela idade da folha é igual a 1(um) para o somatório dos graus-dia corrigidos até 127. Para o somatório dos graus-dia entre 127 e 490, é necessário aplicar a Equação 4.27 para determinar o coeficiente de correção; já para o somatório dos graus-dia corrigidos maior que 490 pode-se considerar $C_i = 0,7567$.

Dessa forma, corrigindo a Equação 4.23 com os coeficientes calculados pelas Equações 4.26 e 4.27 obtém-se a Equação 4.28.

$$CBC = CB_{max} C_{IAF} C_{i(folha)} C_{i(planta)} \quad (4.28)$$

Machado (1981) explica que a cana-de-açúcar contém 1,5% de proteína, 88% de carboidrato, 0,8% de lipídios e 7% de lignina de biomassa seca, e avaliando a energia de conversão desses produtos, o autor conclui que é necessário 1,27 grama de carboidrato para sintetizar 1(um) grama de matéria seca da cana-de-açúcar, sendo o gasto energético deste processo os 0,27 grama de carboidrato. Com base nesses dados, Barbieri (1993) propõe a Equação 4.29, que descreve o cálculo da matéria seca.

$$MS = CBC/1,27 \quad (4.29)$$

Até esse ponto está descrita a forma com que a cana-de-açúcar produz a matéria seca, porém a cana precisa respirar para satisfazer suas necessidades metabólicas. Barbieri (1993) estima que o consumo máximo da respiração diária é de 0,023 gramas de matéria seca para cada grama de matéria seca estocada. No entanto, essa taxa diária deve ser corrigida em função da temperatura e da idade da planta, razão pela qual o autor propõe um coeficiente multiplicativo de correção da respiração expresso pela Equação 4.30.

$$CR = 1 - R_{max} CR_i CR_T \quad (4.30)$$

Onde $R_{max} = 0,023$ e CR_i e CR_T são expressos pela Equação 4.31 e 4.32 respectivamente.

$$CR_i = 1,26 \cdot 0,9994^{\Sigma GD} \quad (4.31)$$

$$CR_T = e^{-4,11+0,1383T} \quad (4.32)$$

Na Equação 4.31, o valor de CR_i deve ser considerado 1(um) quando o somatório dos graus-dia for menor que 372. Já na Equação 4.32, o valor de CR_t deve ser igual a 1(um), quando a temperatura for maior que 28,5°C.

Em uma análise para entender o comportamento do acúmulo de matéria seca, Barbieri (1993) sugere que esse acúmulo pode ser expresso pela Equação 4.33.

$$MST = MS_0 CR^d + \frac{MS (CR^d - 1)}{d (CR - 1)} \quad (4.33)$$

Onde MST é a matéria seca total acumulada, MS_0 é a matéria seca remanescente no início do espaço de tempo estudado, MS é a produção média de matéria seca no período estudado e d é o número de dias deste espaço de tempo.

Da matéria seca remanescente é preciso subtrair a massa da palhada. Após morrerem, as folhas param o metabolismo, não consumindo mais açúcares, portanto se recomenda realizar a subtração dessa massa de toda a matéria viva e somá-la paralelamente, a fim de contabilizar o total de matéria seca produzida pela planta (SILVA *et al.* 2018). Logo, subtrai-se da matéria seca remanescente a massa da palhada, como indica a Equação 4.34.

$$MSV = MS_0 - P_{palha} \quad (4.34)$$

Onde MSV é a matéria seca viva e P_{palha} é a massa da palhada. Considerando-se a Equação 4.34, pode-se reescrever a equação 4.33 da seguinte forma:

$$MST = MSV_0 CR^d + \frac{MS (CR^d - 1)}{d (CR - 1)} + P_{palha} \quad (4.35)$$

É importante ressaltar que a matéria seca total acumulada não é referente apenas aos colmos da cana-de-açúcar, mas também a massa contida as folhas, tanto as verdes como as mortas e as raízes. Para determinar a máxima colheita, insta desconsiderar a massa dessas folhas e das raízes, além da massa do toco, que é uma parte do colmo deixada na lavoura, resultante do corte da colheita. Como a massa do toco depende da altura em que a colheita é realizada,

não é possível uma estimativa precisa; é válido, pois, aproximá-lo da massa das raízes (Barbieri, 1993). Tendo em vista que o objetivo desse modelo é avaliar a máxima produção possível, pode-se considerar que a colheita aproveita todo o colmo produzido pela cana, de tal forma que não há nenhuma massa de toco deixada na lavoura.

A massa das raízes depende da massa e da idade da planta; assim, Barbieri, Da Silva e Dias-Ambrona (2010) propõem a Equação 4.36.

$$P_{raiz} = MST \left(-9 \cdot 10^{-8} \sum GD^2 + 2,17 \cdot 10^{-4} \sum GD \right) \quad (4.36)$$

Observa-se que a massa da raiz é proporcional à matéria seca total, e essa proporção é uma parábola em função dos graus-dia, e que atinge o ponto máximo próximo dos 1.250 graus-dia com o valor de 13%. Um ano na cidade de Campinas tem aproximadamente 1.500 graus-dia, fazendo com que essa proporção seja de aproximadamente 12,3% no final do ciclo de um ano.

Já a massa das folhas pode ser estimada pela idade da planta, conforme Barbieri, Da Silva e Dias-Ambrona (2010) propõem na Equação 4.37.

$$P_{folhas} = MST \frac{0,13}{1 + e^{9,62 - 0,00881(200 + \sum GD)}} \quad (4.37)$$

Observa-se na Equação (4.35) que há três fatores que a compõem. O primeiro é a MST que indica que a massa das folhas é proporcional à matéria seca total da planta, o segundo é o 0,13, que é proporcional à matéria seca e à matéria total da planta, e o terceiro é um fator de correção que depende da idade da planta. É possível, então, computar a matéria seca total que pode ser colhida da cultura de cana-de-açúcar, por meio da Equação 4.38.

$$P_{prod} = MST - P_{folhas} - P_{raiz} \quad (4.38)$$

Até este ponto, trabalhou-se com base em matéria seca, porém deve-se levar em conta a umidade que compõe as massas colhidas. Barbieri (1993) e Marafon (2012) utilizam um valor fixo de 70% para toda a cultura. Ripoli, Molina e Ripoli (2000) consideram que o colmo tem

cerca de 82% de umidade, as folhas verdes têm entre 64 e 70% de umidade e as folhas secas entre 8 e 13% de umidade. Já Salazar (2012) e Palacios-Bereche *et al.* (2013) avaliam que o colmo tem 70% de umidade, e as folhas que secam, 10%. Neste trabalho, se considera, então que os colmos e as folhas verdes apresentam 70% de umidade, e as folhas secas, 10%.

Sabe-se que para cada 1.000 kg de colmo colhido são produzidos 140 kg de palhada, base húmida, estimando os colmos com 70% de umidade e a palhada com 10%; em matéria seca, essa proporção é de 420 kg de palhada para cada 1.000 kg de colmo, base seca. Em vista disso, pode-se reescrever a Equação 4.38 da seguinte forma:

$$P_{prod} = MST - 0,42P_{prod} - 0,123 MST \quad (4.39)$$

Ou ainda,

$$P_{prod} = MST \frac{0,877}{1,42} = 0,618 MST \quad (4.39)$$

Logo, como as raízes representam 12,3% de toda a matéria seca, e os colmos representam 61,8%, pode-se concluir que as folhas representam 25,9% de toda a matéria seca. Desse modo, reescreve-se a equação 4.37 assim:

$$P_{folhas} = \frac{0,259 MST}{1 + e^{9,62 - 0,00881(200 + \Sigma GD)}} \quad (4.40)$$

A massa das folhas computada na Equação 4.40 considera tanto as folhas verdes quanto as folhas secas. Nesse caso, , separar essas massas é importante, pois, diferentemente das folhas verdes, as folhas secas não apresentam metabolismo, portanto, não consomem carboidrato para se manter. Para estimar a massa das folhas secas, este trabalho propõe o seguinte raciocínio: Pode-se aproximar a massa das folhas verdes, considerando o IAF, dado pela equação 4.14, a massa específica de matéria seca encontrada nas folhas por Pinto, Bernardes e Pereira (2006) de 13,5 m²/kg, ou 740 kg/ha, ou seja, necessita-se de 13,5 m² de folhas para cada quilograma, e o fator de correção, devido à idade da planta utilizado por Barbieri, Da Silva e Dias-Ambrona (2010), convergindo para a equação 4.41.

$$P_{folhas.verdes} = \frac{740 IAF}{1 + e^{9,62 - 0,00881(200 + \Sigma GD)}} \quad (4.41)$$

Logo, a massa da palhada pode ser obtida subtraindo a Equação 4.40 da equação 4.41. Em resumo, a proposta deste trabalho para estimar a massa da palha é computar a massa de folhas verdes presente na cana e subtrair esse valor da massa total de folhas já computada pelo modelo BRCANE.

$$P_{palha} = \frac{0,259 MST - 740 IAF}{1 + e^{9,62 - 0,00881(200 + \Sigma GD)}} \quad (4.42)$$

4.4 Estimativa da transpiração da cana-de-açúcar

Petela (2008), tomando por base Jorgensen e Svirezhev (2004), propõe que o fluxo de vapor de água resultante da transpiração da planta é proporcional ao fluxo de dióxido de carbono assimilado pela fotossíntese. O autor escreve a relação molar entre a água e o CO₂ pela Equação 4.45.

$$r = \frac{n_{H_2O}}{n_{CO_2}} = 5,4 \frac{P_{ST} - \varphi_0 P_{S0}}{P_0 z_{CO_2_0}} \quad (4.45)$$

No qual, P_{ST} é a pressão de saturação na temperatura da folha, φ_0 é a umidade relativa do ambiente, P_{S0} é a pressão de saturação na temperatura ambiente, P_0 é a pressão ambiente e $z_{CO_2_0}$ é a fração molar de CO₂ no ambiente. Uma forma simplificada de encarar a fotossíntese é, conforme a Equação 4.46:



Observando a Equação 4.46 e considerando as massas molares de cada elemento químico da equação, pode-se concluir que cada mol de CO₂, que pesa 44 gramas, produz 30 gramas de carboidrato. A massa molar da água pode ser aproximada a 18 gramas por mol. Com essas

informações, e realizando algumas operações algébricas, pode-se estimar a vazão de massa de água transpirada, em função do carboidrato produzido, de acordo com a Equação 4.47. Neste, CB é a produção de carboidrato dado em kg/ha/dia; logo, a transpiração também tem a mesma unidade. Considerando que a densidade da água é de 1.000 kg/m³, basta dividir o valor encontrado da transpiração por 10⁴ para obter os dados em mm/dia. A pressão de saturação da água depende apenas da temperatura; para essa variável adota-se, pois, a Equação 4.48, válida para temperaturas de 0,01 °C até 45°C, e a entrada da temperatura em graus Celsius resulta na pressão de saturação em milibar. A umidade relativa do ar varia, constantemente, e através dos dados da Climate-Data (2022) estimou-se a umidade relativa para cada semana do ano, conforme mostra a Tabela 4.3.

$$H_2O = CH_2O \left(3,24 \frac{P_{sT} - \varphi_0 P_{s0}}{P_0 z_{CO_2_0}} \right) \quad (4.47)$$

$$P_s = 6,74122 * 10^{-4} T^3 + 1,03023 * 10^{-3} T^2 + 0,584968 T + 5,781 \quad (4.48)$$

Tabela 4.3 Umidade relativa do ar para a cidade de Campinas.

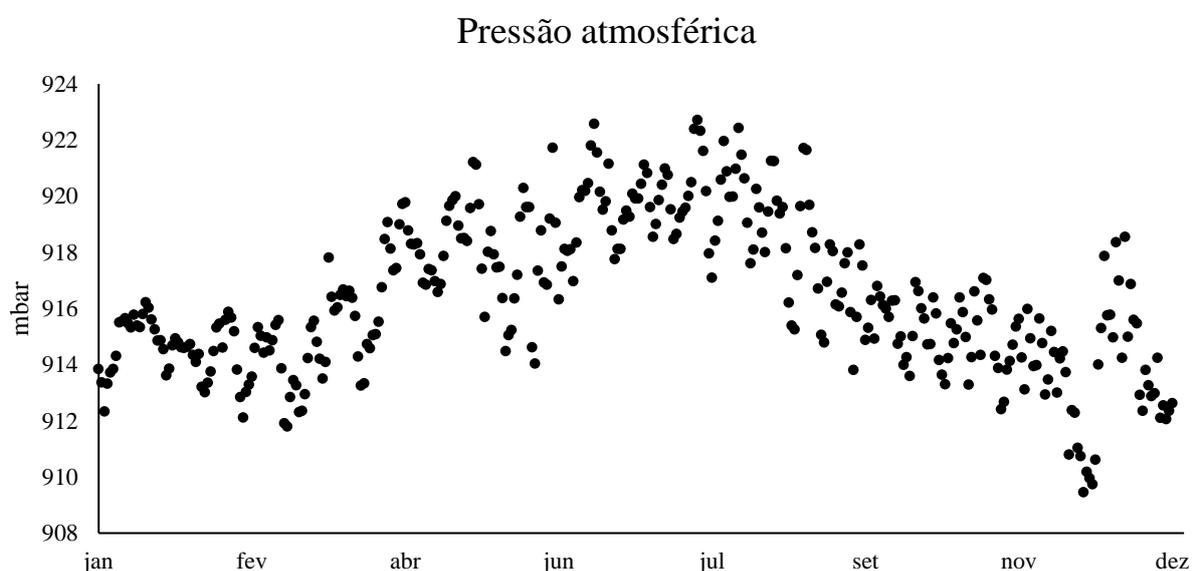
Semana	umidade	Semana	umidade	Semana	umidade	Semana	umidade
1	77%	14	75%	27	65%	40	63%
2	77%	15	75%	28	64%	41	64%
3	76%	16	74%	29	63%	42	65%
4	76%	17	74%	30	62%	43	66%
5	76%	18	73%	31	62%	44	67%
6	76%	19	72%	32	61%	45	69%
7	76%	20	71%	33	61%	46	70%
8	76%	21	70%	34	61%	47	71%
9	76%	22	69%	35	61%	48	73%
10	76%	23	68%	36	61%	49	74%
11	76%	24	67%	37	61%	50	75%
12	76%	25	66%	38	62%	51	76%
13	76%	26	66%	39	62%	52	77%

Fonte: Climate-Data (2002)

A pressão atmosférica, apesar de ser fortemente dependente da altitude, pode variar durante o ano em uma mesma localidade, provocada por outros fatores, como a temperatura

ambiente, pois, em temperaturas menores, a massa específica do ar é maior, causando um aumento na pressão. Utilizando os dados do INMET (1992) para a cidade de Bragança Paulista, a cidade mais próxima de Campinas com os dados disponíveis, pode-se verificar a variação da pressão atmosférica ao longo do ano, conforme mostra a Figura 4.3.

Figura 4.3 Variação da pressão atmosférica na cidade de Bragança Paulista. Adaptado de INMET (1992).



A pressão atmosférica na cidade de Bragança Paulista apresentou uma média de 916,4 milibar no ano de 2021, tendo o conjunto de dados apresentado um desvio padrão de 2,7 milibar, um valor mínimo de 909,5 milibar e máximo de 922,7 milibar. Com um desvio padrão tão pequeno quando comparado com a média, pode-se considerar que a pressão atmosférica é constante ao longo do ano. Para calcular a pressão barométrica, levando-se em conta a altitude, pode-se utilizar a Equação 4.49, com a pressão resultante expressa em bar.

$$P = 1,01325e^{\left(\frac{-\mu gh}{RT}\right)} \quad (4.49)$$

Onde μ é a massa molar equivalente do ar, 0,0289644 kg/mol, g é a gravidade, 9,80665 m/s², h é a altitude estudada, R é a constante dos gases, 8,31432 J/K.mol, e T é a temperatura

absoluta na altitude estudada. Substituindo os valores das constantes na Equação 4.48, pode-se resumi-la como sendo a Equação 4.50, com a pressão resultante expressa em bar.

$$P = 1,01325e^{(-0,034163\frac{h}{T})} \quad (4.50)$$

Bragança Paulista se localiza a 856 metros acima do nível do mar; utilizando-se, pois, a Equação 4.49 e considerando a temperatura ambiente igual a 298,15K, a pressão atmosférica encontrada é de 918,6 milibar, valor muito próximo à média descrita anteriormente. Realizando o mesmo cálculo para Campinas, que está a 685 metros acima do nível do mar, estima-se que a pressão barométrica é de 936,8 milibar.

A concentração de CO₂ na atmosfera é de 414,71ppm, o que representa uma fração molar de $414,71 * 10^{-6}$. Com base nesses dados apresentados, este trabalho propõe uma simplificação da Equação 4.47, que pode ser reescrita conforme a Equação 4.51.

$$m_{transp} = 8,34CB(P_{sT} - \varphi_0 P_{s0}) \quad (4.51)$$

Onde as pressões de saturação devem ser expressas em milibar e a unidade da transpiração é a mesma empregada na produção de carboidrato.

A transpiração não é a única maneira de a planta consumir água, uma vez que é necessário água nas reações químicas da fotossíntese, bem como na hidratação da matéria seca.

Para o cálculo do balanço de água, é estimado apenas o acúmulo de matéria seca no final do período. Sabe-se, ainda, que para a fotossíntese para cada 30 gramas de carboidrato são necessários 18g de água; logo, a proporção é de 0,6 gramas de água para cada grama de carboidrato. Para a hidratação da matéria seca produzida, a proporção de água na cana é de 70%; então, a proporção é de 2,333 gramas de água para cada grama de carboidrato. Portanto, o cálculo da água consumida para produzir e hidratar a matéria seca produzida é expresso pela Equação 4.52.

$$m_{FH} = 2,933(MST - MS_0) \quad (4.52)$$

No qual, m_{FH} é a massa de água consumida pela fotossíntese e pela hidratação da matéria seca, MST é a matéria seca total acumulada, MS_0 é a matéria seca remanescente no início do espaço de tempo estudado.

Outro processo metabólico muito importante que envolve a água e deve ser considerado é a respiração, que pode ser considerada como um processo contrário à fotossíntese, consumindo carboidrato e liberando água, CO_2 e energia. Para este trabalho, considera-se que a água e os gases produzidos pela respiração são liberados dentro dos estômatos. Dessa forma, a água produzida pela respiração é contabilizada junto à transpiração.

4.5 Análise exergética da cana-de-açúcar com base na fotossíntese

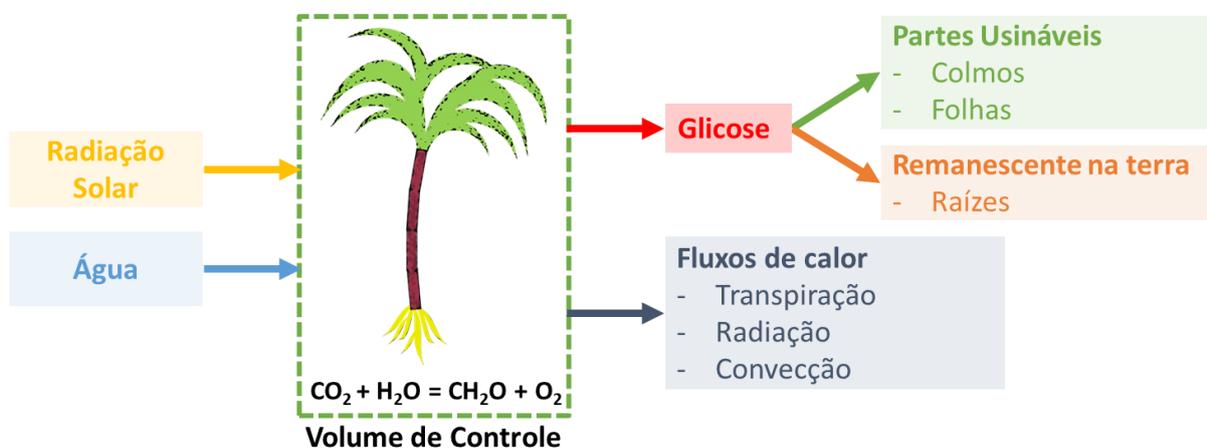
A fotossíntese é o mecanismo pelo qual as plantas produzem carboidratos a partir da luz, consumindo água e dióxido de carbono, e ainda liberando oxigênio. Este trabalho propõe a Figura 4.4 como o volume de controle para a fotossíntese. Para essa análise, a radiação solar considerada é a incidente no solo, independente do estágio fenológico da planta, ou seja, do tamanho da planta. Assim, caso a radiação incida no solo, ela é computada como fluxo de entrada e é perdida.

Define-se como exergia útil os fluxos exergéticos que geram produtos úteis na cultura, como as folhas e os colmos. As raízes permanecem no solo, não sendo computados como úteis os fluxos de calor referentes à transpiração, convecção e radiação os quais são considerados perdidos para o ambiente. Logo, se entende que a exergia útil é a exergia total, que sai do sistema, subtraída da exergia perdida.

É importante salientar que a exergia perdida é diferente da exergia destruída. A destruição exergética acontece devido à irreversibilidade dos processos; já a exergia perdida acontece pela incapacidade de aproveitamento dessa exergia.

Figura 4.4 Volume de controle de uma célula de cana-de-açúcar realizando fotossíntese.

Autoria própria.



A convecção da planta se dá pela diferença de temperatura entre a folha e o ambiente: pode-se considerar a temperatura da folha sendo 2°C mais quente que a temperatura ambiente (NELSON E BUGBEE, 2015). Petela (2008) avalia que o coeficiente de transferência de calor pela folha é de 3 W/m²K, a área das folhas pode ser substituída pelo dobro do índice de área foliar. Considera-se, também, que há diferença de temperatura entre a folha e o ambiente enquanto há fotossíntese. Conforme Barbieri (1993), para dias nublados, a diferença de temperatura da folha com o ambiente é aproximadamente a mesma, portanto, a energia perdida por convecção durante um dia deve levar em conta a insolação real, n . Logo, a Equação 4.53 descreve a convecção em um dia, dada em wh/m².

$$Q''_{conv} = 12 IAF n \quad (4.53)$$

Onde T_p é a temperatura da folha.

Logo, a exergia da convecção pode ser calculada pela Equação 4.54

$$B_{conv} = 12 IAF n \left(1 - \frac{T_0}{T_p} \right) \quad (4.54)$$

A exergia da irradiação solar incidente na cultura é descrita por Petela (2003) pela Equação 4.55.

$$B_{Sol} = I''_g \left(1 - \frac{4T_0}{3T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^4 \right) \quad (4.55)$$

Onde T_0 é a temperatura de referência, 293K, e T_s é a temperatura do sol, 5778K, e I_g é a irradiação solar que chega ao solo e que deve ser expressa em wh/m², já tratado no capítulo 4.1. O mesmo pode ser aplicado para a radiação PAR, utilizando a Equação 4.9 e 4.55.

$$B_{SolPAR} = I''_g (0,4 + 0,1F) \left(1 - \frac{4T_0}{3T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^4 \right) \quad (4.56)$$

Já a exergia da radiação que a planta emite pode ser descrita de acordo com Petela (2008) pela Equação 4.57.

$$B_{rad\ Planta} = F_{IAF} n \frac{5,667 \cdot 10^{-8}}{60} (3T_p^4 + T^4 - 4T^3 T_p) \quad (4.57)$$

Onde n é a insolação real e F_{IAF} é definido como o valor do IAF quando o IAF for menor que 1, ou igual a 1 quando o IAF for maior que 1. Dessa forma, tem-se a exergia calculada em wh/m² para um dia.

A exergia dos gases envolvidos, CO₂, O₂ e vapor de água, é igual a zero, pois, nesse caso, esses estados estão em equilíbrio com o ambiente (PETELA, 2008).

A exergia da água é dada pela soma da exergia física com a exergia química da água (PETELA, 2008) e, para calcular essa exergia pode-se aplicar a Equação 4.58.

$$B_{agua} = m_{transp} \left(h_{fg} - T_0 s_{fg} + \frac{R}{M_{H_2O}} T_0 \ln \left(\frac{P_{sT}}{P_{s0}} \right) \right) \quad (4.58)$$

Onde h_{fg} e s_{fg} são a entalpia e a entropia de evaporação das substâncias, M_{H_2O} é a massa molar da água e m_{transp} é a massa de água transpirada pela planta em um dia. Já a exergia da glicose pode ser estimada pela Equação 4.59, conforme propõe Petela (2008), dado em wh/m².

$$B_{glicose} = \frac{CBC}{7 * 648} \left(2942570 + 1409,5(T_0 - 293) + 430227 \left((T_p - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_p}{T_0} \right) \right) \right) \quad (4.59)$$

Onde a produção de carboidrato em um dia, $CBC/7$, deve ser expressa em kg/m^2 .

Com base nas Equações de 4.54 a 4.59, é possível determinar a eficiência exergética da fotossíntese, conforme a Equação 4.60.

$$\eta_{ex} = \frac{B_{sai}}{B_{entra}} = \frac{B_{conv} + B_{rad} + B_{\acute{a}gua} + B_{glicose}}{B_{sol}} \quad (4.60)$$

O cultivo da cana-de-açúcar envolve muitas etapas com fluxos exergéticos que não estão contabilizadas no modelo descrito acima. Para suprir a demanda desses fluxos, podem-se utilizar os dados de Moya *et al.* (2013) que realizaram uma análise de ciclo de vida juntamente com uma análise exergética, em uma usina de açúcar cubana. Para tanto, os autores consideraram, no período de cultivo, as exergias envolvidas com o uso de defensivos agrícolas, fertilizantes, combustíveis, plantio, irrigação, operações agrícolas e transporte. Com base no estudo dos autores, encontrou-se um uso exergético total de $1,56 \text{ kWh}/m^2$ no ano de plantio.

4.6 Biorrefinaria: Transformando a cana em produtos com valor agregado

O modelo de biorrefinaria aplicado neste trabalho tem como base os trabalhos de Salazar (2012) e Palacios-Bereche *et al.* (2013). Os autores avaliaram uma biorrefinaria de cana-de-açúcar que processa 500 toneladas de material por hora, na produção de etanol de primeira e segunda gerações, e que apresenta um sistema de concentração do licor de glicose por evaporação até chegar em um teor de 5%. Torna-se necessária uma avaliação macro, porém com aderência aos resultados da literatura, a fim de quantificar a qualidade dos diferentes processos de conversão de energia do momento que a cana-de-açúcar deixa a plantação (modelo citado nas seções anteriores) e entra na planta de produção de energia, de etanol e de açúcar.

Um esquema resumido da biorrefinaria utilizada pelos autores é ilustrado na Figura 4.5; já as vazões mássicas de cada fluxo e as respectivas exergias estão listadas na Tabela 4.4.

Figura 4.5 Diagrama da biorrefinaria de etanol anidro, adaptado de Salazar (2012) e Palacios-Bereche *et al.* (2013).

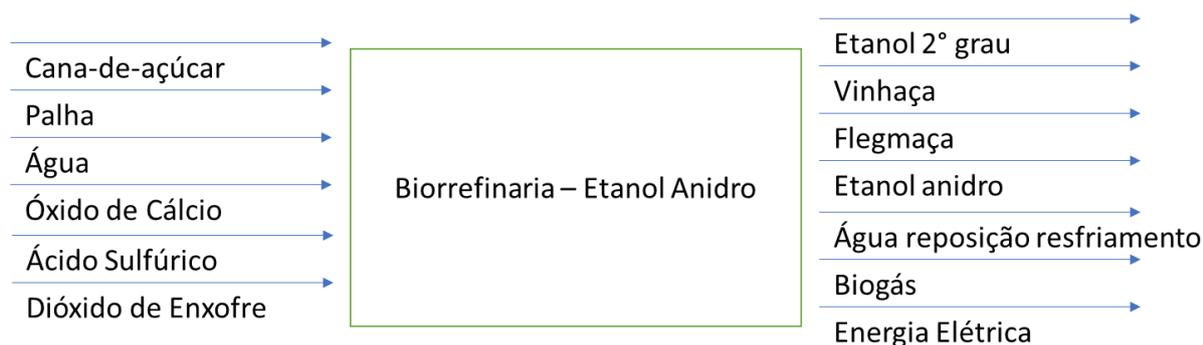


Tabela 4.4 Fluxos de massa e exergia referente à Figura 4.5

Fluxo	Entrada		Fluxo	Saída	
	kg/s	Exergia (kW)		kg/s	Exergia (kW)
Cana	138,9	800225	Etanol 2 Grau	0,3	7806
Palha	10,8	171644	Vinhaça	136,3	60366
Água captada	143,3	7160	Flegmaça	11,7	1255
Oxido de Cálcio	0,1	136	Etanol Anidro	9,5	279224
Ácido Sulfúrico	0	2	Água	103,5	5170
Dióxido de Enxofre	0,3	8262	Biogás	0,924	27935
			Energia Elétrica	-	31252,5

Neste esquema, os fluxos de Óxido de Cálcio, Ácido Sulfúrico e Dióxido de Enxofre podem ser resumidos a Produtos Químicos; já o Etanol de 2º Grau e a flegmaça podem ser considerados como subproduto.

Nota-se que a biorrefinaria utilizada pelos autores produz etanol anidro, porém esse estudo se limita ao etanol hidratado - o combustível que pode ser utilizado nos veículos *Flex*. Para isso, vale analisar a etapa de desidratação da biorrefinaria e excluí-la do processo. A Figura 4.6 ilustra o diagrama do processo de desidratação; as informações dos fluxos de massa e exergia estão na Tabela 4.5.

Figura 4.6 Diagrama da desidratação do etanol hidratado, adaptado de Salazar (2012) e Palacios-Bereche *et al.* (2013).

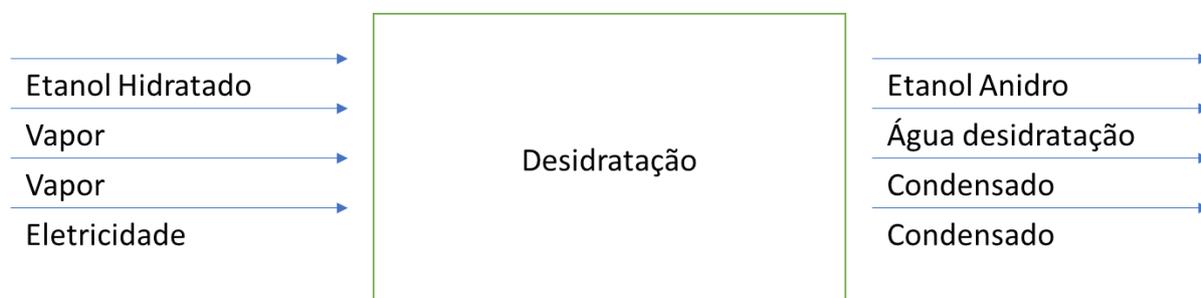


Tabela 4.5 Fluxos de massa e exergia referentes à Figura 4.6

	Fluxo	Kg/s	Exergia (kW)
Entrada	Etanol hidratado	10,1	277.838
	Vapor	3,6	2.830
	Vapor	1,3	1.011
	Energia elétrica	-	450
Saída	Etanol Anidro	9,5	279.224
	Água Destilação	0,6	174
	Condensado	3,6	531
	Condensado	1,3	190

Observa-se que, no processo de conversão do etanol hidratado para anidro, 2010 kW de exergia são destruídos para o fluxo de 10,1 kg/s de etanol hidratado, o que equivale a 55,3 Wh.

Mediante essas duas informações, é possível propor um modelo para a produção de etanol hidratado, fazendo algumas considerações. A água proveniente da desidratação se somaria ao fluxo da água de reposição, porém, como não há mais a desidratação, para manter o fluxo inalterado, acrescenta-se essa diferença na água captada pela biorrefinaria. Dessa forma, não se alteram as correntes do diagrama. A energia elétrica que seria utilizada na desidratação do etanol é acrescentada ao excedente. Já o vapor utilizado na desidratação tem apenas a exergia referente à sua condensação computada no modelo. Desse modo, o diagrama da biorrefinaria de etanol hidratado é ilustrado na Figura 4.7, e os detalhes dos seus fluxos estão contidos na Tabela 4.6.

Figura 4.7 Diagrama da biorrefinaria de etanol hidratado. Baseada em Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b)

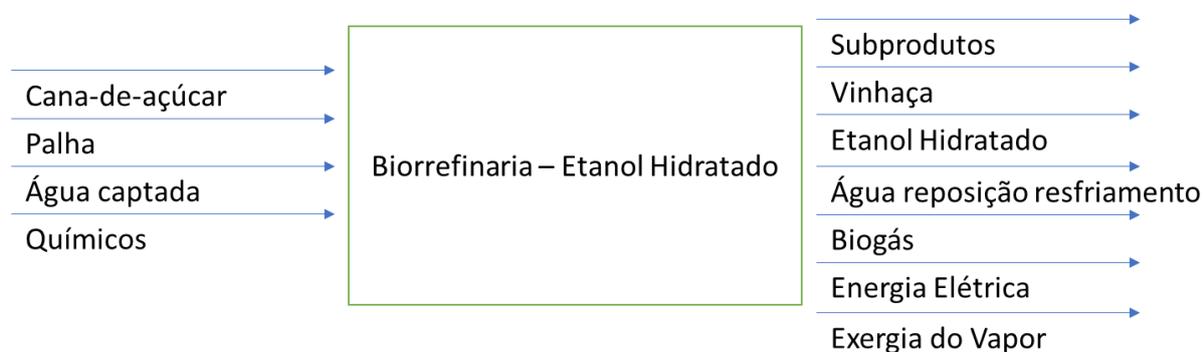


Tabela 4.6 fluxos de massa e exergia referente ao diagrama da Figura 4.7

Fluxo	Entrada		Fluxo	Saída	
	kg/s	Exergia (Kw)		kg/s	Exergia (Kw)
Cana	138,9	800.225	Subprodutos	12	9061
Palha	10,8	171.644	Vinhaça	136,3	60.366
Água fresca	143,3	7.160	Etanol Hidratado	10,1	277.838
Químicos	0,4	8400	Água	103,5	5.170
			Refrigeração		
			Biogás	0,924	27.935
			Energia	-	31.253
			Exergia do vapor	-	3.120

Destaca-se a alta vazão de vinhaça da biorrefinaria, em uma proporção de quase 1:1 com a cana de açúcar. Utilizar a vinhaça *in natura* não é uma alternativa para esse estudo. Então, seguem-se as soluções estudadas por Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020a). A primeira solução é desidratar a vinhaça para que o valor do Brix se eleve de 3% para 65% e, depois desse processo, utilizar a vinhaça concentrada como combustível para as caldeiras de geração de energia elétrica. Já a segunda solução consiste na biodigestão da vinhaça, produzindo biogás.

A concentração da vinhaça demanda de água e vapor para o processo, liberando o condensado do vapor utilizado, a água utilizada para o resfriamento e a água proveniente da desidratação da vinhaça, além da vinhaça concentrada. A Figura 4.7 ilustra o diagrama da concentração da vinhaça, baseado em Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b). E a Tabela 4.7 descreve o fluxo de massa e exergia referente à Figura 4.8.

Figura 4.8 Diagrama da concentração da vinhaça baseada em Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b)

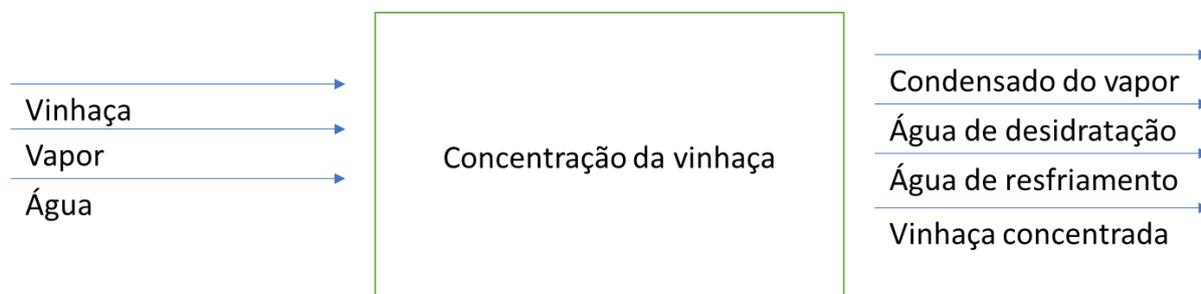


Tabela 4.7 Fluxos de massa e exergia referentes à Figura 4.8

Fluxo	Concentração da Vinhaça		
	kg/s	Ex KJ/kg	Ex kw
Entrada			
Vinhaça	136,3	443	60380,9
Vapor	29,13	668,4	19472,4
Água	546,9	50,13	27415,6
Saída			
Vapor condensado	29,13	110,70	3225,00
Condensados da água de desidratação	16,04	105,20	1687,22
	16,96	99,43	1686,50
	17,78	93,19	1657,01
	18,48	86,35	1596,03
	19,05	78,66	1498,40
	19,44	69,58	1352,43
Água de resfriamento	566,6	54,15	30682,3
Vinhaça concentrada	9,0	8935	80375,9

Já o modelo de Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b) para a biodigestão da vinhaça demanda apenas energia elétrica, produzindo a vinhaça biodigerida e o biogás. A Figura 4.9 contém o diagrama da biodigestão baseado em Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b); já a Tabela 4.8 descreve os fluxos de massas e exergias respectivas.

Figura 4.9 Diagrama da biodigestão adaptado de Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b)



Tabela 4.8 Fluxos de massa e exergia referente à Figura 4.9

Fluxo	Biodigestor		
	kg/s	Ex kJ/kg	Ex kW
Entrada			
Vinhaça	136,3	443	60.381
Energia elétrica	-	-	20,8
Saída			
Vinhaça Biodigerida	135,2	130,3	17.616
Biogás	1,1	30233	30.729

A biodigestão da vinhaça apresentou uma eficiência exergética de 84,9%. Se for levado em conta apenas o produto útil, o biogás, a eficiência exergética útil do biodigestor cai para 55,7%.

O biogás proveniente tanto da biodigestão da vinhaça como o liberado pela biorrefinaria contém 60% de metano, 38,1% de dióxido de carbono e 1,9% de sulfeto de hidrogênio, H₂S, (ELIA NETO *et al.* 2009). Sendo necessário, então, a dessulfurização e a posterior purificação do biogás para poder produzir o biometano, caso seja de interesse da operação. Neste trabalho, a produção de biometano, a partir do biogás, não será considerada, visto que esse processo gera uma redução exergética do gás, e essa etapa do processo só é interessante dependendo da aplicação desse produto. Caso o gás seja destinado à caldeira para produção de energia elétrica, não se faz necessária a transformação em biometano, porém essa transformação é adequada para aplicações em motores.

Para a produção do biometano, Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b) consideram apenas a necessidade de ar, energia elétrica e água no processo. A Figura 4.10, baseada em Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b), ilustra o diagrama da produção do biometano, enquanto as Tabelas 4.9 e 10 descrevem os fluxos de massa e exergia da Figura 4.9, considerando e desconsiderando a dessulfurização, respectivamente.

Figura 4.10 Diagrama da produção de biometano, adaptado de Palacios-Bereche, Palacios-Bereche e Nebra (2020b)

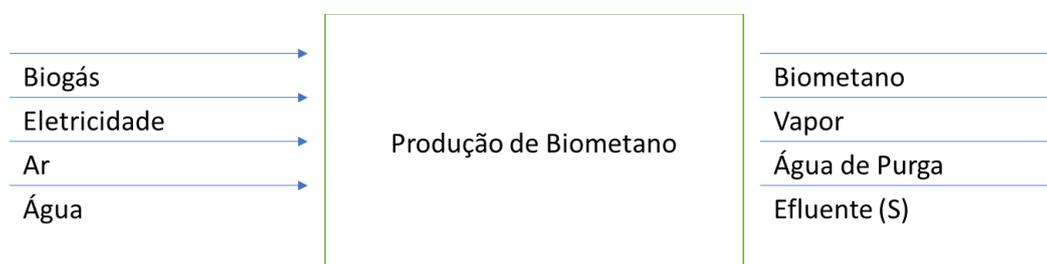


Tabela 4.9 Fluxos de massa e exergia referente à Figura 4.10, considerando a dessulfurização

Biometano com dessulfurização			
Fluxo	kg/s	Ex kJ/kg	Ex kW
Entrada			
Biogás	1,11	30233	33671,2
Ar	3,16	0,00	0,00
Energia elétrica		-	869,91
Água líquida	5,21	50,14	261,28
Saída			
Efluente Enxofre	0,17	0,00	0,00
Biometano	0,38	49116	18610,06
Vapor	3,73	64,59	241,23
Água de Purga	5,21	50,68	264,09

Tabela 4.10 - Fluxos de massa e exergia referente à Figura 4.10, desconsiderando a dessulfurização

Biometano desconsiderando o Enxofre			
Fluxo	kg/s	Ex kJ/kg	Ex kW
Entrada			
Biogás	0,95	30233,00	28644,77
Ar	3,16	0,00	0,00
Energia elétrica		-	747,18
Água	5,21	50,14	261,28
Saída			
Biometano	0,38	49116,0	18610,06
Vapor	3,73	64,59	241,23
Água de Purga	5,21	50,68	264,09

Vistos os vários blocos dos modelos de biorrefinaria e tratamento da vinhaça, propõem-se para esse trabalho dois modelos adaptados dos autores. O primeiro modelo produz etanol hidratado e realiza a concentração da vinhaça e a posterior incineração na cogeração. O segundo modelo produz etanol hidratado e realiza a biodigestão da vinhaça, sendo o biogás produzido considerado um produto da biorrefinaria.

No processo de concentração da vinhaça, há uma demanda de vapor saturado à 2,5 bar, maior que o excedente produzido pela combustão da vinhaça concentrada. Para contornar essa questão, propõe-se utilizar a exergia economizada na desidratação do etanol para a produção desse vapor necessário, mediante um processo reversível. Assim, a exergia economizada na desidratação do etanol produzido a partir de uma tonelada de cana é capaz de aquecer 40,3 kg de líquido saturado até a condição de vapor saturado à 2,5 bar.

Mesmo com a utilização da exergia excedente na produção de vapor, ainda resta uma demanda de 25,6 kg de vapor para cada tonelada de cana processada. Para suprir essa demanda, optou-se por aquecer o líquido saturado até a condição de vapor saturado à 2,5 bar, em um processo reversível, utilizando a energia elétrica como fonte de exergia. Nessa condição, é preciso aplicar 3,97 kWh de energia elétrica para produzir os 25,6 kg de vapor necessário. Dessa forma, o modelo proposto que considera a concentração e posterior incineração da vinhaça é descrito pela Figura 4.11.

Figura 4.11 Diagrama do modelo de biorrefinaria com concentração e incineração da vinhaça.

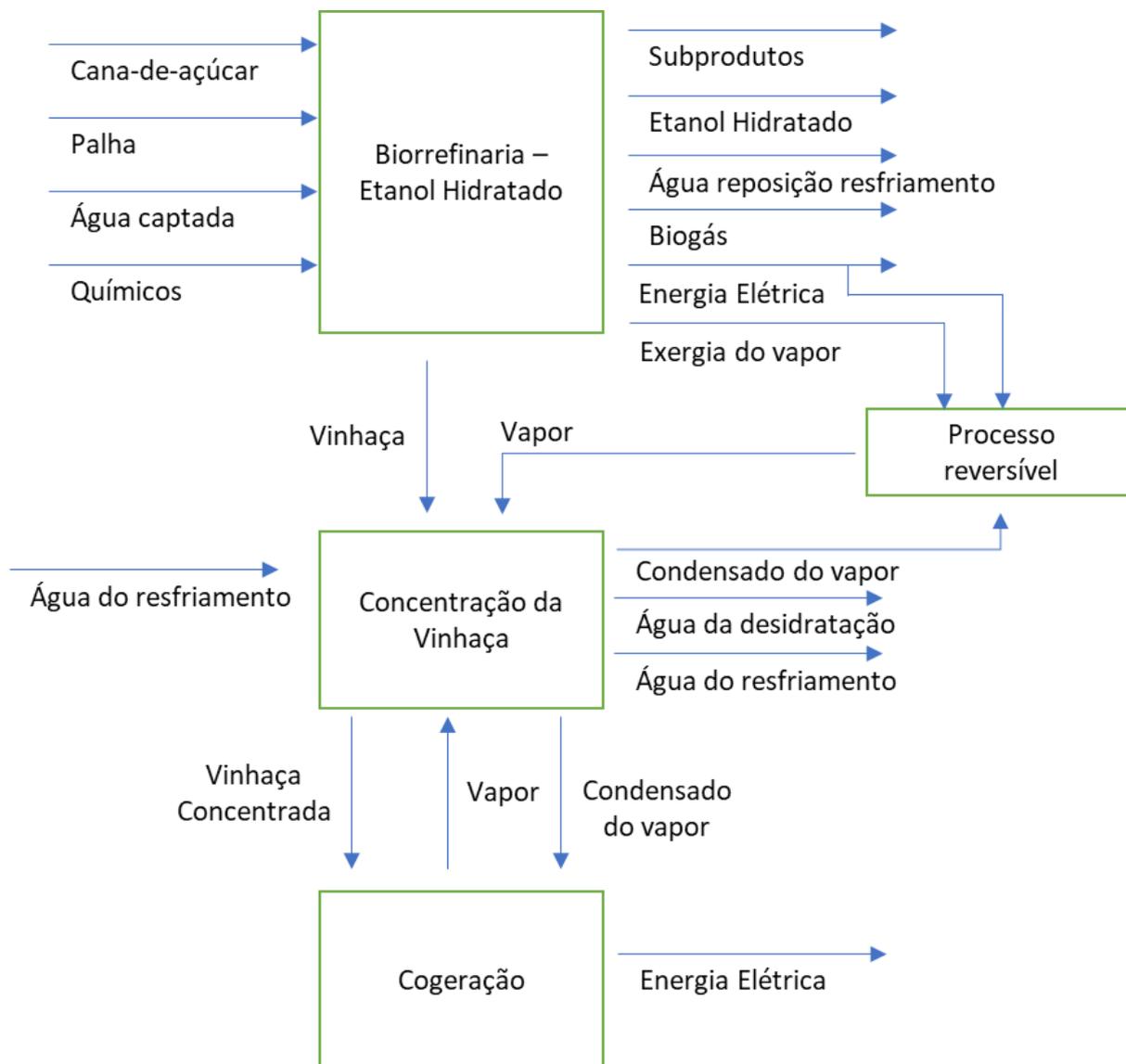
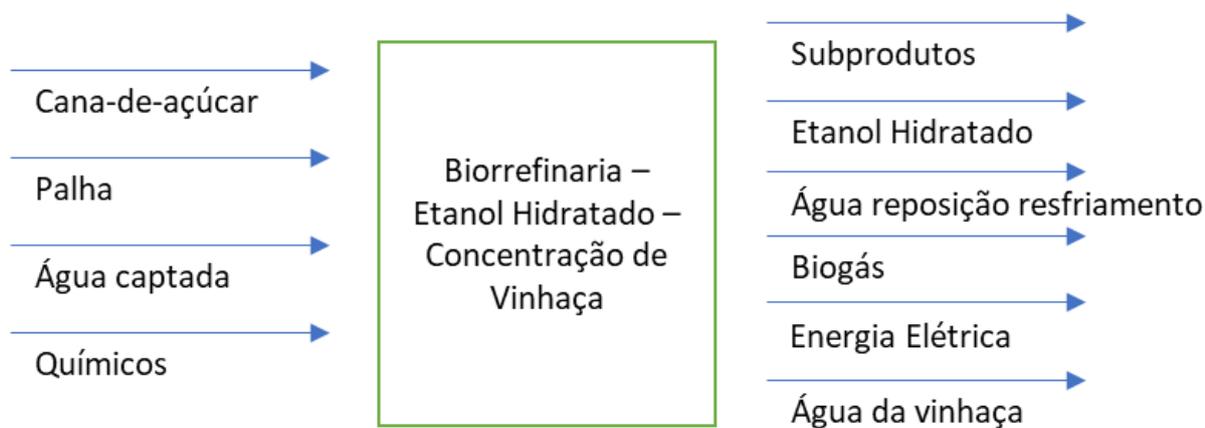


Tabela 4.11 Fluxos de massa e exergia referentes à Figura 4.11

Entrada		
Fluxo	kg/t cana	Exergia (kWh/t cana)
Cana	1000,00	1600,56
Palha	77,76	343,01
Água fresca	1036,08	14,39
Químicos	2,88	3,33
Saída		
Fluxo	kg/t cana	Exergia (kWh/t cana)
Subprodutos	86,40	18,61
Etanol Hidratado	72,72	558,23
Água refrigeração	745,20	10,35
Biogás	6,65	55,87
Água de desidratação	775,80	18,96
Energia elétrica		77,84

A água proveniente da desidratação da vinhaça é apresentada nesse modelo como produto. A água do resfriamento, que apresenta uma diferença de temperatura de 20,4°C entre a saída e a entrada dos fluxos, trabalha de forma cíclica, na qual a diferença de exergia referente à diferença de temperatura pode ser considerada como exergia perdida. Dessa forma, o modelo da Figura 4.11 pode ser resumido, conforme mostra a Figura 4.12.

Figura 4.12 Diagrama resumido da biorrefinaria de etanol hidratado com concentração e incineração de vinhaça



Já para o modelo de biorrefinaria que utiliza o processo de biodigestão da vinhaça, o diagrama que resume esse modelo é descrito pela Figura 4.13., em que o efluente de enxofre é desprezado, devido ao baixo fluxo mássico e o fluxo exergético A Tabela 4.12 descreve os fluxos de massa e exergia da Figura 4.13.

Figura 4.13 Diagrama do modelo de biorrefinaria de etanol hidratado com biodigestão da vinhaça.

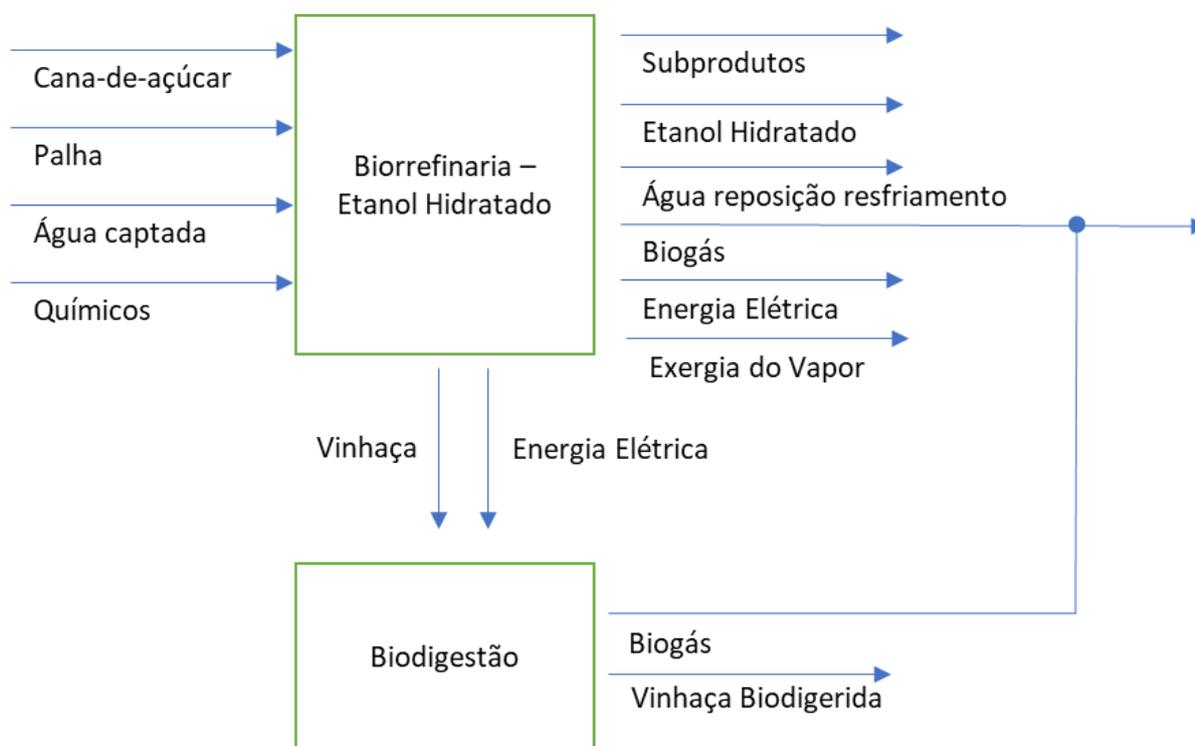


Tabela 4.12 Fluxos de massa e exergia referentes à Figura 4.13

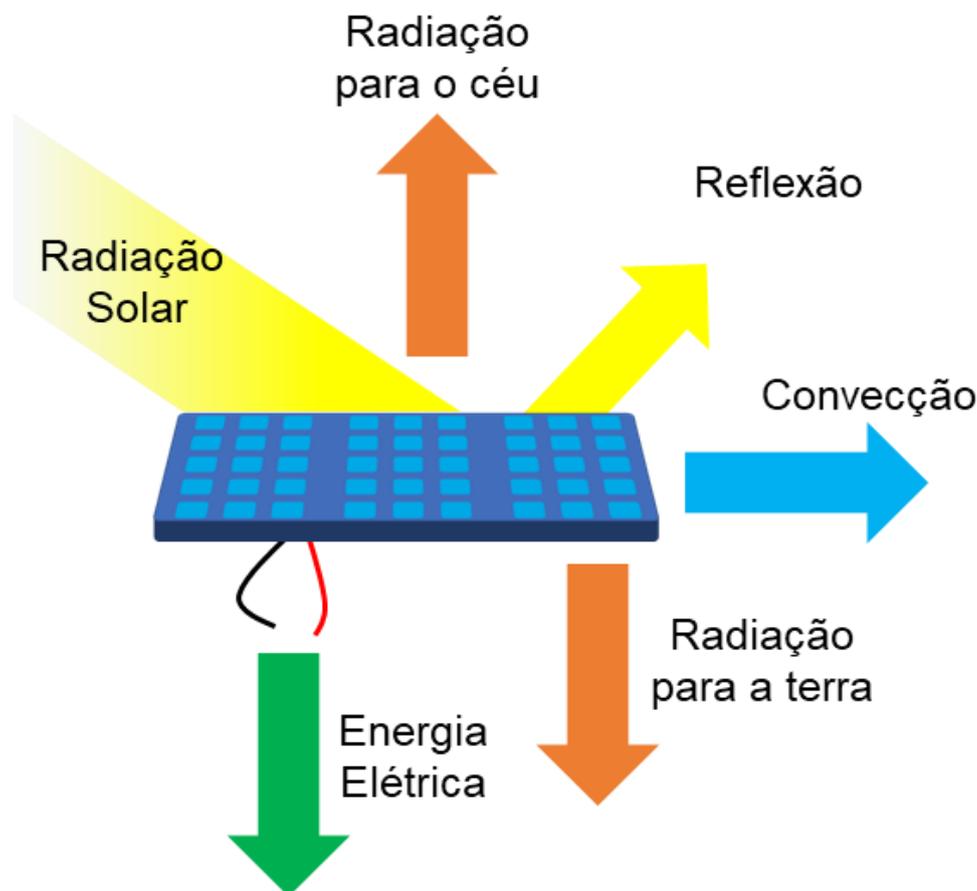
Entrada		
Fluxo	kg/t cana	Exergia (kWh/t cana)
Cana	1000,00	1600,56
Palha	77,76	343,01
Água fresca	1036,08	14,39
Químicos	2,88	3,33
Saída		
Fluxo	kg/t cana	Exergia (kWh/t cana)
Subprodutos	86,40	18,61
Etanol Hidratado	72,72	558,23
Água refrigeração	745,20	10,35
Biogás	14,67	123,21
Energia elétrica		63,11
Exergia do vapor		6,24
Vinhaça Biodigerida	972,20	35,19

4.7 Fazenda solares usando módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são opções consolidadas no mercado para aproveitar a energia solar e produzir energia elétrica, uma vez que absorvem a irradiação solar e a transformam em energia elétrica e calor. O calor é um fator desvantajoso para os módulos fotovoltaicos, pois, quanto maior a temperatura do módulo, menor a eficiência para gerar energia elétrica.

O módulo possui quatro meios para tratar da radiação emitida pelo sol, dos quais o primeiro fator é a reflexão de parte da luz solar incidente no módulo. Autores como Silva (2021) admitem que essa reflexão representa 10% da incidência total, sem refletir em grandes desvios dos resultados da literatura. Já o segundo fator é a radiação que o módulo fotovoltaico emite quando sua temperatura aumenta. O terceiro fator é a convecção, que varia com a velocidade do vento e da diferença de temperatura entre o módulo e o ar. Por último, a energia elétrica que o módulo produz, e que depende da eficiência dele. Nota-se que a radiação emitida, a convecção e produção de energia elétrica são dependentes da temperatura ambiental e do módulo; logo, a temperatura do módulo é um fator muito importante para descrever o funcionamento de um módulo fotovoltaico. O diagrama da Figura 4.14 ilustra os fluxos energéticos do módulo fotovoltaico.

Figura 4.14 Fluxos energéticos de um módulo fotovoltaico. Autoria própria.



Luque e Hegedus (2011) afirmam que a temperatura do módulo é aproximadamente proporcional à radiação incidente nela. Para essa aproximação, o autor utiliza a NOCT, *Nominal Operating Cell Temperature*, que é a temperatura aferida em laboratório quando o módulo está recebendo 800 W/m^2 de radiação, a temperatura do ambiente é de 20°C e vento de 1 m/s . Apesar de muito utilizada, a aproximação de Luque e Hegedus (2011) leva em consideração a velocidade do vento. Por isso, realizar um balanço energético para determinar a temperatura do módulo se mostra uma opção mais viável, ao considerar que o balanço energético está em regime permanente, ou seja, a módulo se encontra em temperatura constante. O balanço energético para encontrar a temperatura do módulo é dado pela Equação 4.61.

$$I''_g = Q''_{refle} + Q''_{rad} + Q''_{conv} + W''_{eletrica} \quad (4.61)$$

Onde I''_g é a irradiação solar, $Q''_{refletido}$ representa 10% da irradiação solar (SILVA, 2021). $Q''_{radiado}$ é o calor da radiação emitida pelo módulo para o céu, representado pela Equação 4.62, conforme Rawat (2017).

$$Q''_{rad(céu)} = \varepsilon\sigma(T_{placa} + T_{céu})(T_{placa}^2 + T_{céu}^2)(T_{placa} - T_{céu}) \quad (4.62)$$

Temos então, que a emissividade ε é 0,9, σ é a constante de Boltzmann, e T_{placa} , $T_{céu}$ e T são as temperaturas do módulo, do céu e do ambiente, respectivamente. A temperatura do céu é 6 °C abaixo que a do ambiente (Rawat, 2017). Além de radiar calor para o céu, o módulo também emite radiação para o solo, que é calculado de forma similar à equação 4.62, conforme mostra a Equação 4.63.

$$Q''_{rad(terra)} = \varepsilon\sigma(T_{placa}^4 - T^4) \quad (4.63)$$

Já o termo Q''_{conv} é o calor perdido na convecção, expresso pela Equação 4.63.

$$Q''_{conv} = 2h(T_{placa} - T) \quad (4.63)$$

O fator 2 se refere às duas faces do módulo fotovoltaico, e h é o coeficiente de troca de calor por convecção, proposto por Watmuff, Charters e Proctor (1977), dado pela Equação 4.64, para velocidades do vento entre 0 e 7 m/s.

$$h = 2,8 + 3V \quad (4.64)$$

No qual, V é a velocidade do vento em m/s. Os dados da velocidade do vento são obtidos do INMET (1992), que além da velocidade do vento informa a umidade relativa, pressão atmosférica, radiação global e as temperaturas horárias. Como os dados para as simulações dos módulos fotovoltaicos não estão facilmente disponíveis para a cidade de Campinas, são

utilizados os dados disponíveis da cidade mais próxima, no caso, Bragança Paulista. Os valores utilizados para cada dia do ano são a média dos anos 2018, 2019, 2020 e 2021. Dessa forma, conseguem-se dados para todos os dias do ano. Para uma melhor análise, os dados foram truncados, de forma que as radiações incidentes no solo menores que 200 W/m² foram desconsideradas.

Unindo as Equações 4.63 e 4.64 e multiplicando pelo fator 2, que considera a área de ambos os lados do módulo, tem-se que o calor transferido pela convecção é expresso pela Equação 4.65:

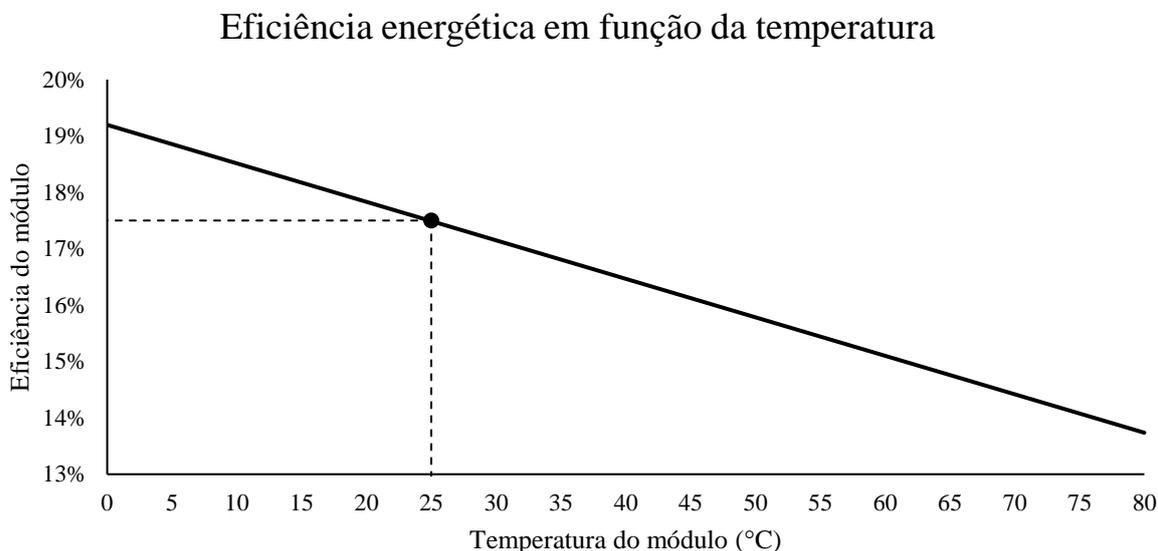
$$Q''_{conv} = 2 (2,8 + 3V) (T_{placa} - T) \quad (4.65)$$

Por último, tem-se $W''_{eletrica}$ que é a energia elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico. Sabe-se que a eficiência do módulo diminui com o aumento da temperatura, considerando que a eficiência do módulo é de 17,5% a 25°C e o coeficiente de perda de potência por temperatura é de -0,39 %/°C; logo, pode-se estimar a energia elétrica produzida pela Equação 4.66:

$$W''_{eletrica} = 0,175 I''_g (1 - 0,0039 (T_{placa} - 298,15)) \quad (4.66)$$

Assim, a eficiência energética do módulo fotovoltaico representada pela equação 4.66 varia conforme mostra a Figura 4.15.

Figura 4.15 Eficiência energética do módulo fotovoltaico em função da temperatura, baseada na Equação 4.66



Unindo as Equações 4.8.1, 4.8.2, 4.8.4 e 4.8.5, encontra-se o balanço energético dado pela Equação 4.67, na qual a temperatura do módulo para determinada hora e condições ambientais do dia pode ser avaliada, levando-se em conta apenas a irradiação solar, a temperatura ambiente e a velocidade do vento. Nota-se, ainda, que o formato do módulo não é relevante para o balanço energético, mas, sim, os calores inseridos na equação em W/m^2 .

$$\begin{aligned}
 0,9I''_g = & 0,9 \frac{5,67}{10^8} (T_{placa} + T - 6)(T_{placa}^2 + (T - 6)^2)(T_{placa} - T) \\
 & + 0,9 \frac{5,67}{10^8} (T_{placa}^4 - T^4) + 2(2,8 + 3v)(T_{placa} - T) \quad (4.67) \\
 & + 0,175 I''_g (1 - 0,0039 (T_{placa} - 298))
 \end{aligned}$$

Para a análise exérgica considera-se a eficiência calculada como a Equação 4.68:

$$\eta_B = \frac{B_{sai}}{B_{entra}} \quad (4.68)$$

A exergia que entra no sistema é a mesma calculada pela Equação 4.55. Já a exergia que sai é o somatório das exergias referentes à reflexão, convecção, radiação e produção de energia

elétrica. Avalia-se a exergia referente à reflexão como sendo 10% da exergia do sol que incide no módulo fotovoltaico (levando-se em conta a respectiva perda de qualidade associada a temperatura da placa ser inferior à do sol). A exergia da convecção é representada pela Equação 4.69, já a exergia referente à radiação pode ser representada pela Equação 4.70. Nota-se que não é usual a noção de que a exergia perdida para o ambiente na forma de calor seja computada, porém, como está exposto em diversos artigos de fenômenos biológicos tal sistematização (subtração da exergia fornecida pela destruída), adotou-se uma mesma escala termodinâmica para as duas soluções deste texto. Portanto, os cálculos são analisados em exergia útil e exergia total, que é a útil incrementada pela exergia perdida.

$$B_{conv} = Q''_{conv} \left(1 - \frac{T}{T_{placa}} \right) \quad (4.69)$$

$$B_{rad} = Q''_{rad} \left(1 - \frac{T}{T_{placa}} \right) \quad (4.70)$$

Já a exergia referente à energia elétrica tem o mesmo valor que a energia. Logo, podemos reescrever a Equação 4.68 da seguinte forma:

$$\eta_B = \frac{B_{refle} + B_{conv} + B_{rad} + W''_{eletrica}}{B_{Sol}} \quad (4.71)$$

No qual, B_{Sol} é dado pela Equação 4.55.

Os inversores de frequência, em geral, apresentam alta eficiência, atingindo cerca de 97% no modelo europeu de eficiência com pico de mais de 98%. Por conseguinte, é seguro afirmar que a eficiência exérgica do sistema é a mesma que a eficiência energética, 97% e se considera o calor gerado por essa ineficiência como exergia destruída, pois tem uma magnitude pequena. Consequentemente, a eficiência do sistema fotovoltaico, módulos e inversor, pode ser expresso conforme a Equação 4.72:

$$\eta_{Bsist} = \frac{B_{refle} + B_{conv} + B_{rad} + 0,97 W''_{eletrica}}{B_{Sol}} \quad (4.72)$$

Como os fluxos envolvidos na reflexão, convecção e radiação emitida não são úteis, sendo a exergia perdida para o ambiente, pode-se assumir que a eficiência exergética útil do sistema fotovoltaico é dado pela Equação 4.73:

$$\eta_{B_{sist\ útil}} = \frac{0,97 W''_{elétrica}}{B_{Sol}} \quad (4.73)$$

Para este trabalho é utilizado um módulo fotovoltaico modelo 340P6K-36 da BYD (2019), que apresenta uma garantia de desempenho de 80% para módulos com 25 anos de uso, o que corresponde a uma perda linear de aproximadamente 0,8% de rendimento por ano. Outras características relevantes para este trabalho estão na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 Características do módulo fotovoltaico de referência. Adaptado de BYD (2019)

BYD 340P6K-36	
Eficiência do Módulo	17,5%
Temperatura de operação	-40°C até 80°C
Coefficiente de temperatura da potência	-0,39%/°C
NOCT	45 ± 2 °C

Há uma equação que tenta estimar a temperatura de funcionamento do módulo em função da temperatura ambiente, da insolação e da NOCT, descrita na Equação 4.74.

$$T_{placa} = T + (NOCT - 20) I''_g/800 \quad (4.74)$$

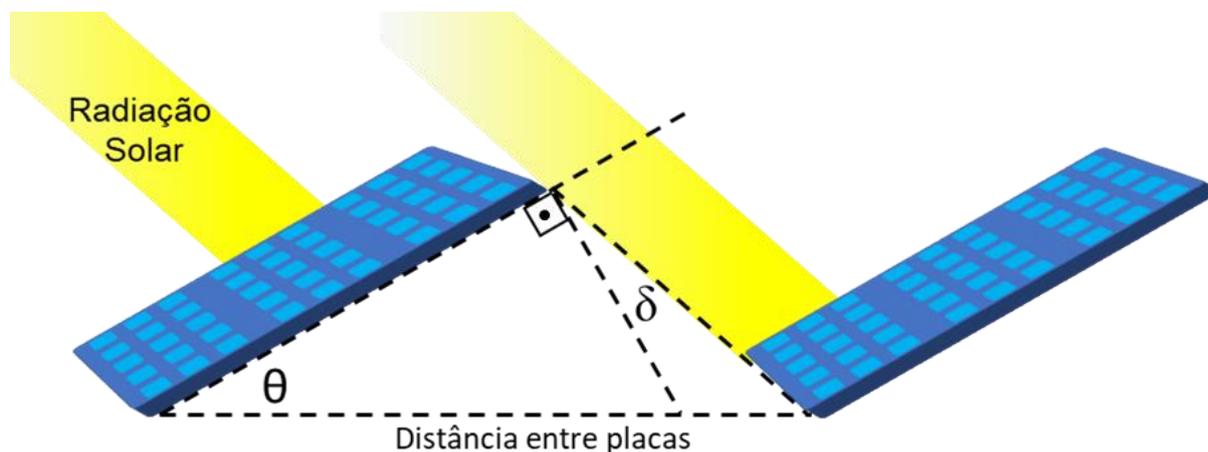
Essa equação é nitidamente frágil, considerando que a diferença entre a temperatura do módulo com o ambiente é diretamente proporcional à insolação, desconsiderando as perdas de calor por convecção e a não linearidade das perdas por radiação.

No que diz respeito à produção dos módulos, Gong e Wall (2014) realizaram uma análise exergética de ciclo de vida de alguns sistemas de produção de energia solar, dentre os quais consta uma planta fotovoltaica de 4,2 kWp. Os autores afirmam que para um uso conectado à rede elétrica, portanto sem baterias, e não utilizando materiais reciclados, o uso de exergia para a produção dos módulos é de aproximadamente 120 GJ. Convém salientar que o

módulo estudado ocupou uma área de 35 m² (GARCIA-VALVERDE *et al.* 2009), o que apresenta uma exergia envolvida na produção de aproximadamente 950 kWh/m².

O modelo aqui exposto considera que os módulos estão no plano horizontal, portanto, recebendo a radiação global horizontal. Para a cidade de Campinas, a radiação anual média no plano horizontal é de 4914 Wh/m², já no plano inclinado, ou seja, com a inclinação da latitude, a radiação média diária é de 5172 Wh/m² (PEREIRA *et al.*, 2017). Isso representa uma radiação 5,25% maior, porém questões geométricas devem ser consideradas, e a Figura 4.16 mostra como ficaria a distribuição entre dois módulos.

Figura 4.16 Disposição entre dois módulos inclinados. Autoria própria



Assim, θ é o ângulo de inclinação do módulo, e δ é a declinação solar máxima, 23,45°; desse modo, pode-se calcular a distância entre os módulos, conforme a Equação 4.75.

$$DEP = CP(\cos \theta + \sin \theta \tan(\theta + 23,45^\circ)) \quad (4.75)$$

Onde DEP é a distância entre os módulos, e CP é o comprimento do módulo. A declinação solar máxima é computada para que, mesmo com a maior declinação, o módulo não fique sombreado pelo que está próximo. Com isso, pode-se avaliar se a inclinação do módulo agrega ou reduz a eficiência global.

4.8 REPowerEU: Medidas para um mundo livre dos fósseis.

O REPowerEU (2022) propõe cinco ações para suprimir a demanda de combustíveis fósseis oriundos da Rússia, quais sejam: reduzir o consumo de energia, diversificar as importações de energia, substituir os combustíveis fósseis e acelerar a transição da Europa para as formas de energia mais limpa, realizar investimentos inteligentes e reforçar a preparação para demanda de energias futuras.

Poupar energia é a forma mais rápida e barata de combater a crise energética, considerada vital para a transição para energias renováveis. Para conseguir economizar energia o texto cita dois caminhos. O primeiro, com efeitos imediatos, é a mudança comportamental, para a qual a IEA (2022a) emitiu um plano com nove pontos de como economizar energia, mediante algumas alterações:

1. Diminuir o aquecimento e o uso do ar-condicionado. No texto, explica-se que, com o incremento de 1°C na regulagem do ar-condicionado, é possível economizar quase 10% de energia e, analogamente, os aquecedores podem economizar até 7% na mesma situação, concluindo que esse ajuste no termostato não só faz a diferença nas residências, mas também em todo o tipo de construção. Tais resultados estão de acordo com a literatura da área, conforme destacado por Molliet e Mady (2021).

2. Adequar a temperatura de controle dos aquecedores de água, tanto os elétricos como os de passagem. Assim como ocorre com os aquecedores e ar-condicionado, o aquecimento da água pode ser ajustado para aumentar a eficiência do sistema e diminuir o gasto energético.

3. Trabalhar de casa. Fazer *homeoffice*, quando possível, diminui o deslocamento dos trabalhadores, reduzindo combustível. De acordo com o documento, um trabalhador em *homeoffice* três vezes por semana economiza cerca de 35 euros, já considerando o aumento no consumo de energia da casa.

4. Usar o carro mais economicamente. É comum observar carros com apenas um ocupante. Então, dividir a viagem mediante caronas, economiza dinheiro e combustível. Ajustar o ar-condicionado do carro para alguns graus mais quente também pode melhorar imediatamente o consumo de combustível.

5. Reduzir a velocidade nas rodovias. Essa medida indica que dirigir rápido é ineficiente e gasta combustível; em contrapartida, reduzir a velocidade média em cerca de 10 km/h diminui o consumo de combustível.

6. Deixar o carro na garagem aos domingos, em cidades grandes. Promover o *Car Free Sunday* é uma política pública que visa retirar os carros das ruas aos domingos, promovendo a saúde pública, voltando o espaço para a comunidade e eventos culturais. Como benefício, além da redução do consumo de combustível, tem-se o ar mais limpo, a redução da poluição sonora e a maior segurança nas estradas.

7. Caminhar ou andar de bicicleta em trajetos curto, em vez de dirigir. Essa iniciativa propõe que, em trajetos de até três quilômetros, é possível ir caminhando ou de bicicleta, reduzindo o consumo de combustível.

8. Usar transporte público. Substituir o carro particular por transporte público, além de mais barato, é bem mais eficiente energeticamente.

9. Substituir o avião por trens. Essa ação é considerada para trajetos de até 1.000 km, e consiste em estimular a substituição de aviões por trens.

Além dos nove pontos acima, o documento da *Playing My Part*, divulgado pela IEA (2022b), ainda aponta mais três alternativas para colaborar com a economia de energia no seu uso final. A instalação de controles inteligentes para a climatização de ambientes, tornando os equipamentos mais eficientes. A instalação de módulos fotovoltaicos e do melhor isolamento térmico das residências, bem como a substituição de caldeiras por bombas de calor, com potência oriunda dos módulos fotovoltaicos. E, por fim, o documento indica a compra de eletrodomésticos e veículos mais eficientes, sendo um dos exemplos um carro elétrico.

Em longo prazo, o texto sugere que as políticas incentivem a atualização e construção de edifícios mais eficientes energeticamente, considerando a instalação de melhores sistemas de isolamento térmico dos edifícios, bem como a utilização de aparelhos mais eficientes e a substituição de caldeiras por bombas de calor.

A segunda ação é diversificar a importação de energia, medida que visa diversificar o fornecimento de gás natural, aumentando os fornecedores. Para apoiar essas medidas, foi criado no dia 5 de maio de 2023 um grupo de trabalho que terá três funções:

- Avaliar as demandas internas da União Europeia de gás natural e incentivar a diversificação em longo prazo das ofertas de gás.

- Otimizar a utilização, armazenamento e transporte do gás, bem como criar uma ferramenta de gestão das informações para melhorar a transparência da infraestrutura.
- Realizar ações conjuntas com parceiros internacionais para a aquisição do gás e de desenvolvimento de projetos de energias limpas.

Também está prevista a criação de um mecanismo para negociar o gás em nome dos países da UE, garantindo a competitividade no mercado internacional. O texto indica o biometano e o hidrogênio renovável como alternativas “limpas” para o gás natural. Analogamente, se podem aplicar os mesmos princípios para a aquisição de urânio para usinas nucleares.

Com a diversificação das importações e a substituição do gás por fontes renováveis, espera-se aumentar a segurança energética da União Europeia. Com a substituição dos combustíveis fósseis na produção de energia elétrica, na indústria, edifícios e transporte, espera-se, além da diminuição da dependência do petróleo, a redução dos custos de energia elétrica. Para realizar tal substituição, no texto são apresentados seis apontamentos:

1. Promover as energias renováveis.

Entre os meios para promover as energias renováveis estão o aumento da diretiva de energia renovável para 45% até 2030, ante os 40%; o incentivo para implementação de energia solar e uma iniciativa europeia para obrigar a produção de energia solar em alguns tipos de edifícios.

Além da energia solar, indica-se que a energia eólica tem importância para um futuro com energia limpa, principalmente a energia eólica marítima.

Outro ponto de grande atenção do REPowerEU é o sistema de aquecimento urbano. Entende-se que a modernização dos sistemas, implantando bombas de calor, pode substituir os combustíveis fósseis. Também se cita o aproveitamento do calor industrial e de um sistema de aquecimento coletivo para otimizar o sistema. Para aumentar a sustentabilidade dos sistemas de energia solar, eólica e bombas de calor, a comissão europeia vai melhorar a regulamentação dos sistemas, revendo os requisitos de etiquetagem energética.

2. Acelerar a implantação do hidrogênio.

O documento considera o hidrogênio renovável como um meio essencial para a substituição do gás, petróleo e carvão. Para conseguir acelerar a implementação do hidrogênio, a Comissão Europeia orienta o alinhamento de metas para reforçar a implementação, investirá

na produção interna de hidrogênio renovável, prioriza as avaliações dos projetos sobre hidrogênio, orienta as indústrias a acelerarem os trabalhos sobre a produção, infraestrutura e utilização do hidrogênio e supervisionará, periodicamente, a implementação do hidrogênio em parceria com os estados membros.

A comissão apoia também a criação de três grandes corredores para importação do hidrogênio renovável e para contribuir com a concretização dessas metas, a comissão irá rastrear as necessidades e investirá em infraestrutura, além de se dedicar à aquisição de hidrogênio para a EU.

3. Expansão da utilização do biometano.

Assim como o hidrogênio renovável, o biometano é essencial para a substituição dos combustíveis fósseis. Para facilitar a expansão do biometano, a comissão pretende estimular a produção, incentivar a criação de comunidades de energia, a transformação de biogás em biometano, promover a adaptação das redes de gás europeias para o biometano, investir em pesquisa, desenvolvimento e inovação e facilitar o acesso ao financiamento para o assunto.

Para não impactar na segurança alimentar, a produção do biometano deve ser proveniente de resíduos orgânicos, florestais e agrícolas.

4. Reduzir o consumo de combustíveis fósseis nos setores industrial e de transporte, em que obter essa redução é difícil.

Tornar os processos industriais livres dos combustíveis fósseis, além de reduzir as emissões, reforça a competitividade da indústria, pois a protege das oscilações do mercado de combustíveis fósseis.

Há grande potencial de redução de combustíveis fósseis nas indústrias de mineração não metálicas, na produção de químicos e nas refinarias. Existe também potencial considerável com a eletrificação da indústria e espera-se que ela aumente com a evolução tecnológica e com a implementação das energias renováveis.

Para apoiar a utilização do hidrogênio e da eletrificação na indústria, a comissão irá apoiar a transição total do gás natural para energias renováveis, bem como os sistemas produtivos baseados em hidrogênio. Também vai orientar os estados membros sobre as energias renováveis e sobre os contratos de aquisição de energia, além de criar um mecanismo de apoio técnico.

Os meios de transportes têm bastante possibilidade de reduzir combustíveis fósseis combinando-se a eletrificação com o uso de hidrogênio renovável. Para reduzir o consumo de petróleo nos transportes, a Comissão Europeia vai sugerir leis para aumentar a porcentagem de veículos sem emissão nas frotas públicas e de empresas. Dependendo do tamanho, orienta sobre priorizar as propostas legislativas pendentes a respeito da mobilidade ecológica e combustíveis alternativos, e adotará um pacote de leis para tornar o transporte de mercadorias mais ecológicos.

5. Concretizar o REPowerEU – com pessoas qualificadas, matérias-primas e um quadro regulamentar completo.

Além de diversificar os fornecedores de energia, a comissão apoia um modelo de economia circular no qual a pesquisa e desenvolvimento de sistemas e equipamentos reduzam o consumo de materiais, aumente a capacidade de reciclagem e substituam as matérias-primas. Para proteger a indústria reforçando o apoio ao REPowerEU e aumentando a competitividade, a comissão propõe criar uma aliança de indústrias de energia solar, aumentar a produção de eletrolisadores e intensificar os trabalhos para fornecimento de matérias-primas.

No caso dos trocadores de calor, a comissão tenciona aumentar as taxas de importação para esses equipamentos, aumentar a produção interna e facilitar o financiamento para a aquisição do produto.

Nesse novo cenário tecnológico, é fundamental uma mão de obra qualificada e um sistema de fornecimento robusto. Com isso, espera-se um aumento nas oportunidades de trabalho e na qualificação dos trabalhadores. Para suprir a demanda de pessoas qualificadas, a comissão incentiva os setores energéticos e as autoridades a estabelecerem parcerias técnicas em grande escala.

6. Acelerar o licenciamento e a inovação.

Os processos burocráticos, como a liberação de alvará, são os principais obstáculos para a promoção das fontes energéticas renováveis. Para ajudar a reduzir os impactos burocráticos, a comissão emitiu, no dia 18 de maio, um documento com recomendações para acelerar os processos de licença dos projetos. Os principais tópicos deste documento orientam para criar procedimentos mais rápidos e mais curtos, facilitar a participação da comunidade, melhorar os processos internos, tornar os procedimentos claros e digitalizados, organizar a mão de obra e os materiais de forma suficiente para o atendimento, melhorar a identificação e o planejamento

dos locais do projeto, facilitar a ligação com as redes elétricas, incentivar os projetos inovadores, facilitar os contratos de aquisição de energia e acompanhar os relatórios e análise.

Por meio desses seis pontos, espera-se que a transição de combustíveis fósseis para fontes renováveis seja acelerada.

Outra ação é o investimento inteligente: a aplicação do REPowerEU vai ter um custo inicial elevado, porém esse investimento compensará, pois haverá bastante economia com importação de gás, petróleo e carvão. É possível que, durante a transição, os preços da energia fiquem mais elevados, portanto, para minimizar os efeitos, mantendo o preço controlado e protegendo as pessoas mais pobres, a comissão propõe a criação de um fundo social para apoiar as famílias vulneráveis e as pequenas empresas durante o período de transição.

Três grandes áreas devem receber uma maior atenção nos investimentos: a infraestrutura e a comunicação energética da Europa, reforma e investimento específico para cada estado membro da EU e os financiamentos para investimento a curto prazo das orientações do REPowerEU.

Para a implementação do REPowerEU, é indispensável a adequação no sistema de transporte energético europeu, ou seja, construir uma malha energética integrada que garanta o fornecimento para toda a união. Espera-se, por exemplo, que os países-membros da EU tenham acesso a, pelo menos, três fontes de gás, após a adequação dos sistemas energéticos.

Visando ao fornecimento de gás, além da adequação dos gasodutos, indica-se como fundamental investir no armazenamento e nos terminais de importação. Dessa forma, pode-se substituir o gás natural russo, além dos outros produtos de origem fóssil.

Já para as redes elétricas, é fundamental a interligação elétrica transfronteiriça, para que todos os estados tenham acesso à energia elétrica renovável, o que deve garantir a segurança energética de toda a Europa. Além das redes, o armazenamento de energia merece muita atenção, pois, garante a flexibilidade do sistema em flutuações de demanda e a segurança do fornecimento de energia, facilitando a mudança para fontes renováveis e reduzindo a utilização de termoelétricas.

Como cada estado-membro tem a própria particularidade, espera-se que todos façam as reformas e investimentos específicos para concretizar os objetivos de diversificação de fornecimento de energia e a redução da dependência do petróleo.

A última ação é reforçar a preparação para o plano, pois há riscos de abastecimento energético na Europa. Durante a transição, é possível que a demanda de gás seja significativa e que o fornecimento e o armazenamento não sejam suficientes para garantir o abastecimento. Para evitar esse cenário, a comissão orienta os estados-membros a aplicarem medidas para economizar energia, atualizar o plano de contingência, aumentar a capacidade de fluxo bidirecional dos gasodutos e concluírem os acordos bilaterais pendentes em matéria de solidariedade entre os estados.

Por fim, a comissão europeia conclui que a redução da dependência energética europeia é urgente, em decorrência da crise climática e da dependência dos combustíveis fósseis russos.

5 Resultados e Discussão

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos, tomando por base a análise dos dados coletados, seguidos de uma discussão minuciosa desses resultados à luz dos objetivos da pesquisa e da revisão da literatura. São demonstrados tabelas, gráficos e figuras relevantes para ilustrar e descrever os achados. Ademais, são exploradas as limitações do estudo e sugeridas direções futuras para pesquisa.

5.1 Estimativa de produção da cana-de-açúcar: Palhada e Transpiração

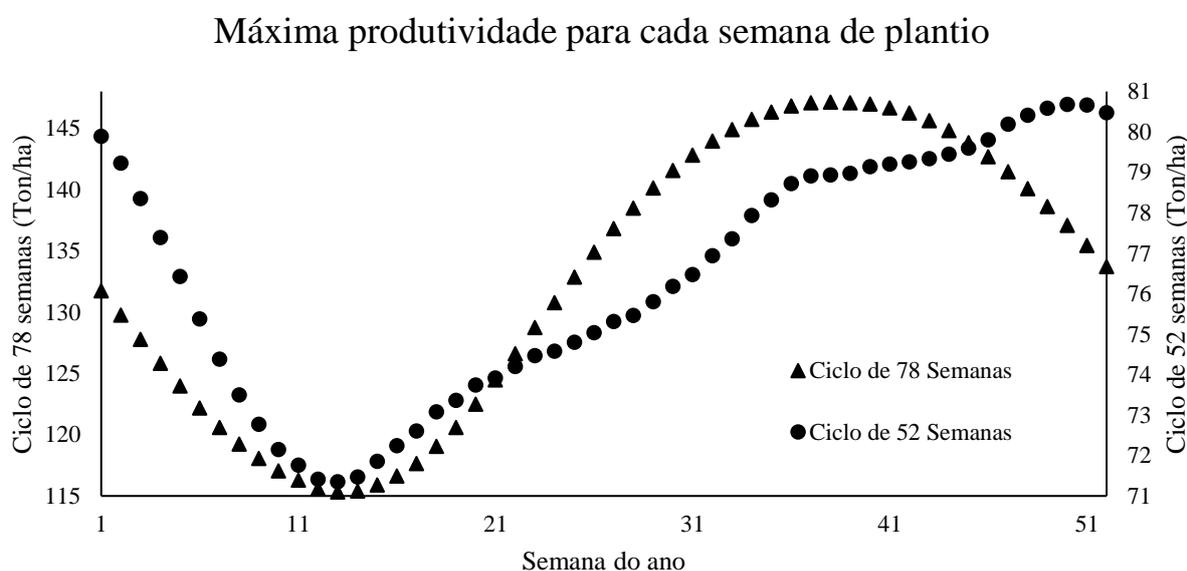
O modelo BRCANE mostrou bons resultados na estimativa de produção da cana-de-açúcar, em um ciclo de 52 semanas, atingindo uma produtividade máxima de 81 toneladas por hectare; já o ciclo de 78 semanas atingiu 147 toneladas por hectare. A fim de se compararem esses resultados com os valores obtidos por Barbieri, Silva e Díaz-Ambrona (2010) para a cidade de Piracicaba-SP, foram de 79 toneladas para o ciclo de um ano e 140 toneladas para o ciclo de um ano e meio. É importante ressaltar que esses valores se referem à produção colhida, sendo descartada a massa das folhas.

É natural o ciclo de ano e meio ter uma produção maior que o ciclo de 52 semanas, pois a cultura, além de ter mais tempo para amadurecer, pode passar por dois estágios de verão cuja produção tende a ser maior. Teruel (1995) mostra que o desenvolvimento do índice de área foliar da cultura diminui após o primeiro corte, mas o modelo utilizado não calcula a correção do índice de área foliar (C_{IAF}) em função do IAF, diretamente, e sim, em função da idade fenológica da planta, graus-dia, portanto, impossibilitando calcular a produção após os cortes. Quanto à escolha entre os ciclos de 52 e 78 semanas, depende da estratégia do produtor. Este pode optar pelo primeiro corte com 78 semanas e os posteriores com 52 semanas. Dessa forma, haveria um espaço de tempo de 26 semanas para preparação do solo, a fim de receber a lavoura. Assim, nessa estratégia, o primeiro plantio ocorre na época de menor produção para o ciclo de 78 semanas, porém os ciclos de 52 semanas estão na melhor época de produção.

Rosseto e Santiago (2022) afirmam que a melhor época de plantio para uma cana com ciclo de um ano é entre os meses de outubro e novembro, divergindo. Por outro lado, Rehagro

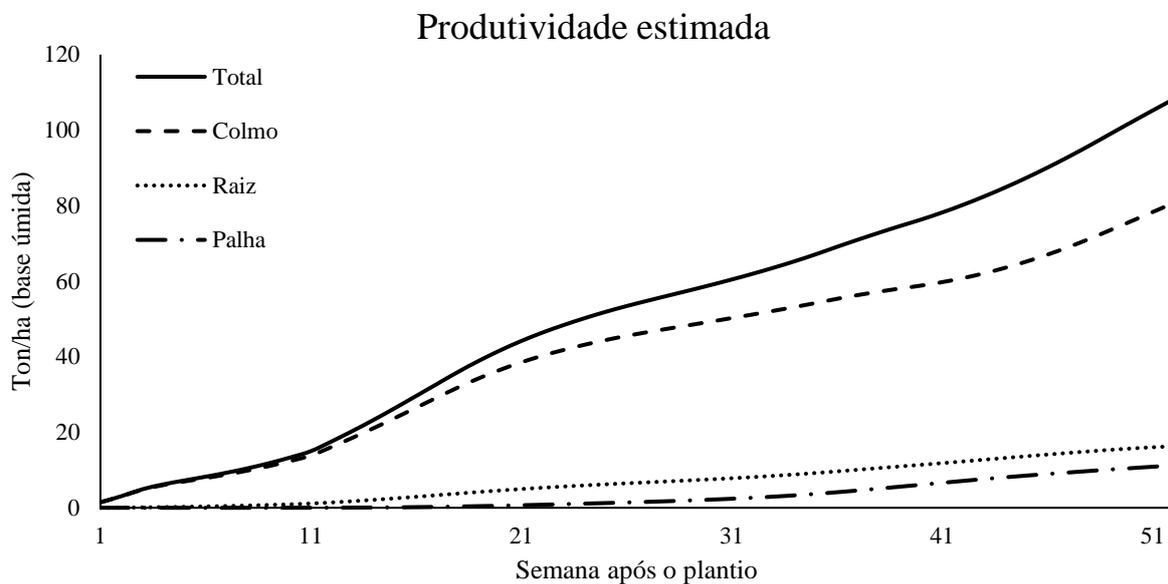
(2018) expõe que essa época de plantio é a mais adequada, pois é o início da estação chuvosa. A simulação deste trabalho mostra que a melhor semana de plantio é a 49ª semana, ou seja, em dezembro, divergindo um pouco da literatura, porém é importante lembrar que o modelo deste trabalho desconsidera qualquer estresse hídrico. A Figura 5.1 mostra a produtividade máxima para cada semana de plantio para os ciclos de um ano e de ano e meio.

Figura 5.1 Máxima produtividade por semana em que o plantio é realizado. Autoria própria.



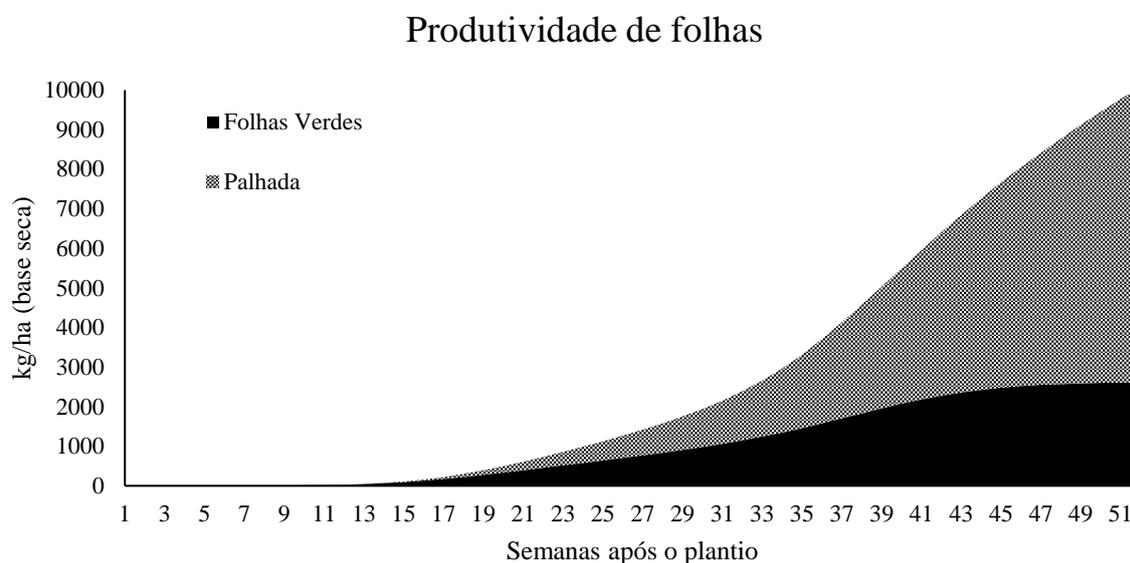
Avaliando um ciclo de 52 semanas com a data de plantio na 49ª semana, obtém-se a curva de crescimento, ilustrada na Figura 5.2, na qual é possível notar a evolução em base úmida da palha (traço e ponto), raiz (pontilhado), colmo (tracejado) e a soma de todos (linha contínua). Ao final da simulação, a produção máxima de palhada foi de 11,2 toneladas por hectare, e a de raízes foi de 16,3 toneladas por hectare. Já os colmos foram de 80,7, totalizando 108,2 toneladas de biomassa produzida para cada hectare de terra.

Figura 5.2 Desenvolvimento das massas da cultura. Autoria própria.



As estimativas das folhas verdes e da palhada realizadas pelas equações 4.41 e 4.42 se mostraram bem satisfatórias, não só por respeitarem o início da produção de folhas secas que se dá próximo ao período de 490 graus-dia, conforme afirma a literatura, mas também por concordar com a quantidade de palhada esperada de 14%, em relação à produção de colmos e em concordância com a literatura sobre a quantidade de folhas verdes remanescentes na cultura. A Figura 5.3 mostra esta estimativa.

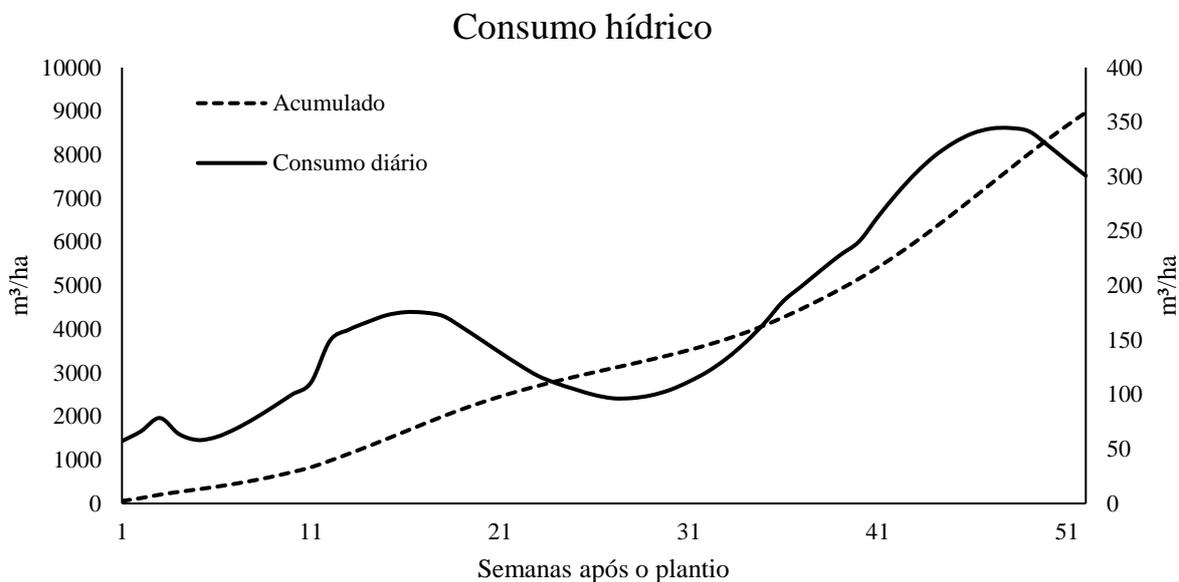
Figura 5.3 Acúmulo de folhas verdes e secas a cada semana, após o plantio. Autoria própria, baseado nas equações 4.40 e 4.41



O consumo de água da planta é calculado pela soma da água utilizada na fotossíntese, a água utilizada na hidratação da matéria seca, a respiração da planta e a água transpirada pela planta, a qual representa sozinha cerca de 98,6% do volume. Para o ciclo de 52 semanas, o consumo total de água foi de 8.970 m³ para cada hectare, o que representa o equivalente a 9,17 mm de água para cada tonelada produzida, ou 111,1 kg de água para produzir 1 kg de cana. A Figura 5.3 mostra o consumo de água durante as semanas após o plantio. Para o ciclo de 78 semanas, o consumo de água por tonelada produzido foi menor, 9,5 mm, valor muito próximo ao computado por Barbieri (1981), de 8,5 mm/tonelada, lembrando que este trabalho estima o máximo consumo hídrico possível.

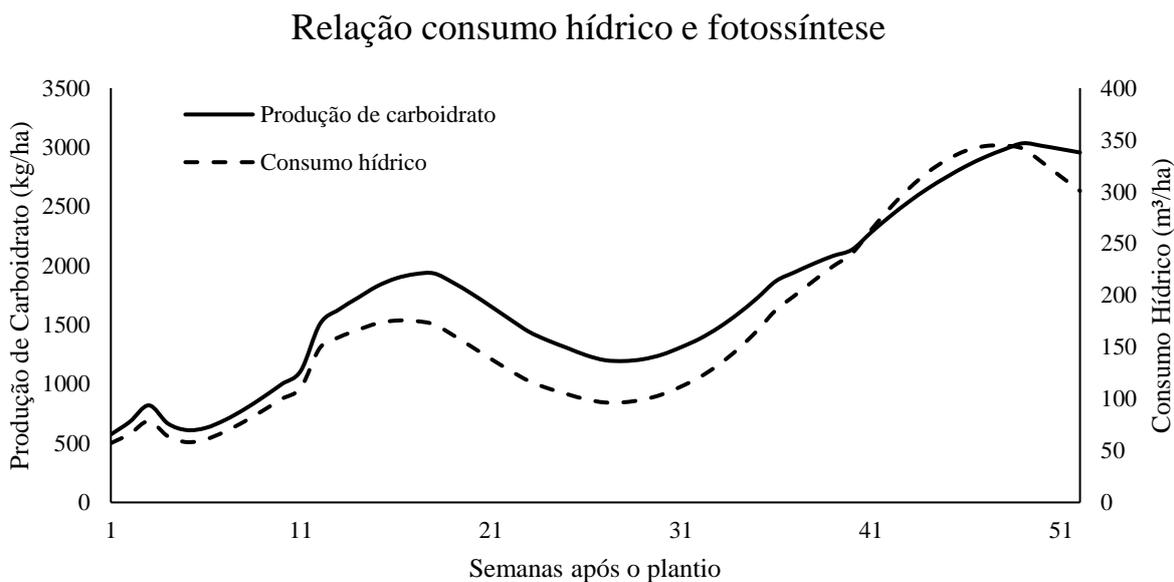
Os 8.970 m³/ha de água, encontrados anteriormente, representam um consumo hídrico de 897 mm durante todo o ciclo e, como se trata de um ciclo de 365 dias, o consumo hídrico médio estimado é de 2,45 mm/dia. Oliveira e outros autores (2015) afirmam que o consumo hídrico médio é de 5,31 mm/dia, porém o autor considera a evapotranspiração, ou seja, a evaporação da água do solo; Silva, Seider e Lior (2015) estimam que metade da água consumida na evapotranspiração é devido à cultura, sendo a outra metade a evaporação da água do solo. Considerando essa proporção, estima-se, então, que a evapotranspiração média da cana-de-açúcar é de 4,92 mm/dia, valor próximo ao encontrado por Oliveira *et al.* (2015).

Figura 5.4 Consumo de água durante as semanas após o plantio. Autoria própria, baseado na equação 4.51 e 4.52



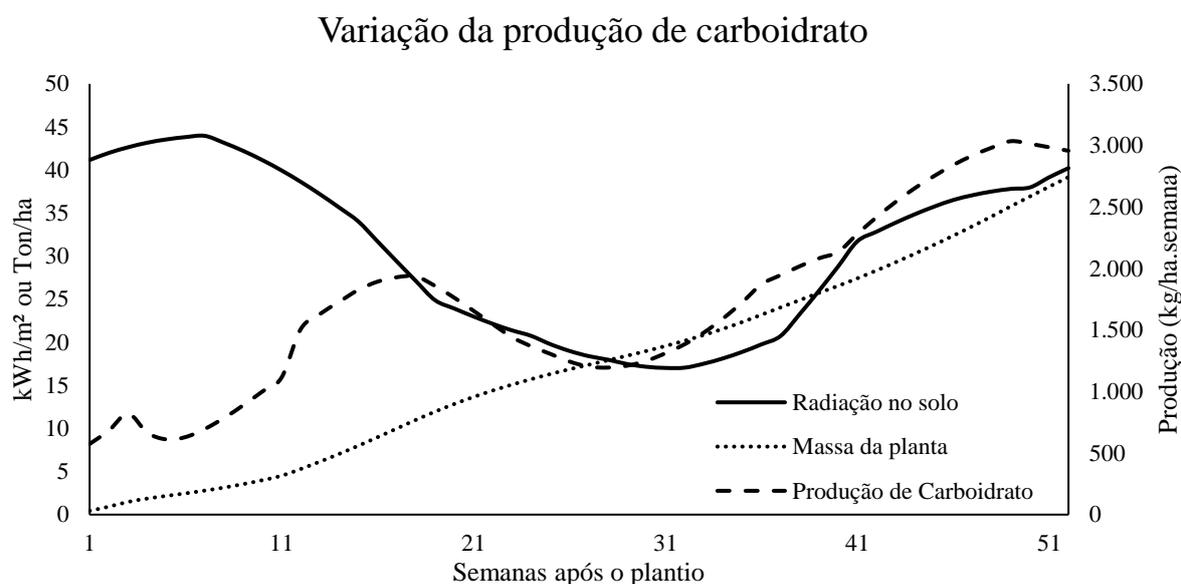
Fica claro que o consumo hídrico é fortemente dependente da produção de carboidrato, fato que é ilustrado pela Figura 5.5.

Figura 5.5 Relação entre o consumo hídrico e a fotossíntese. Autoria própria



A produção de carboidrato é bastante dependente da radiação incidente no solo, bem como o estágio fenológico em que a planta se encontra, o qual pode ser representado pela massa total da planta. A Figura 5.6 exhibe essa relação.

Figura 5.6 Variação da produção de carboidrato em decorrência do estágio fenológico e da radiação no solo. Autoria própria.



Por meio da Figura 5.6, fica fácil identificar o motivo pelos picos e vales da produção de carboidrato. No início da cultura, espera-se uma baixa taxa fotossintética, visto que a planta ainda é pequena, acompanhando o desenvolvimento fenológico. Na metade do ciclo, há uma queda na produção de carboidrato, em virtude das condições climáticas - nessa época, a planta está se desenvolvendo no inverno, com baixa radiação solar incidente. Ao final do ciclo, há a maior produção de carboidrato, pois a planta já está desenvolvida fenologicamente, e a radiação incidente na planta está na máxima intensidade.

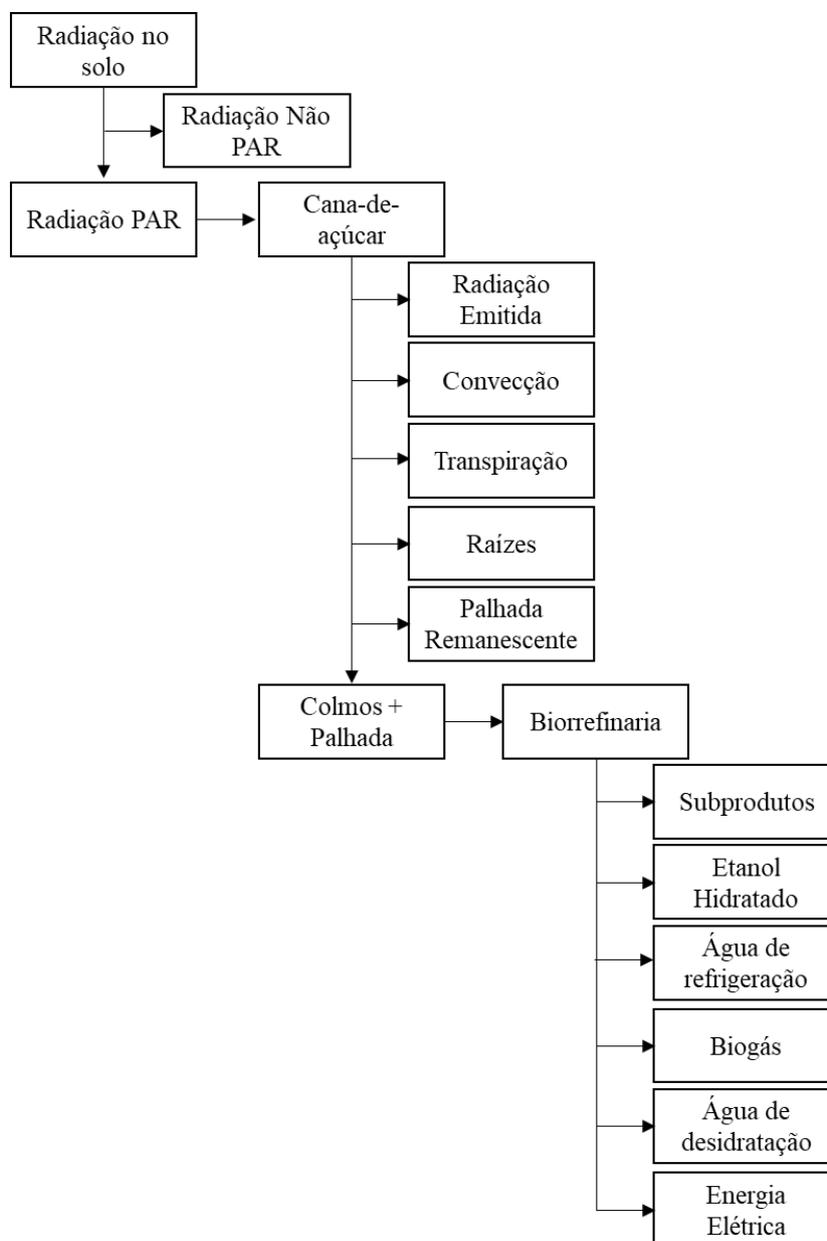
Cada metro quadrado de solo, em Campinas, recebe anualmente cerca de 1,6 MWh de irradiação solar; utilizando-se a cana-de-açúcar como biomassa para aproveitamento dessa radiação é possível coletar cerca de 8 kg de colmos de cana-de-açúcar, 1,1 kg de palha e 1,6 kg de raízes, considerando o modelo de biorrefinaria com incineração da vinhaça, aplicado neste trabalho. Essa produção equivalente a um metro quadrado produz aproximadamente 0,6 kg de etanol hidratado, 0,05 kg de biogás e 0,6 kWh de energia elétrica. Já para o modelo de

biorrefinaria com biodigestão da vinhaça, cada metro quadrado produz aproximadamente os mesmos 0,6 kg de etanol hidratado, porém a produção de biogás e energia elétrica se alteram para 0,12 kg e 0,51 kWh, respectivamente.

5.2 Análise exérgica da cana-de-açúcar: Eficiências e Fluxos exérgicos

O diagrama da qualidade dos processos de conversão de energia em uma planta pode ser expresso pela Figura 5.7. O fluxo começa com a radiação incidente no solo, dividida em duas classificações: a radiação PAR, ou fotossinteticamente ativa, e a não PAR. A radiação não PAR não é absorvida pela planta, ficando responsável pelo aquecimento do ambiente, portanto, nessa etapa ela não deve ser considerada destruída, mas sim, perdida ou destruída no ambiente. Alguns fluxos de massa como água, CO₂ e O₂ não estão representados na Figura 5.7, pois, por estarem em equilíbrio com o ambiente, a exergia das entradas materiais é zero. Os reagentes químicos utilizados na biorrefinaria também não estão presentes no fluxo, uma vez que a ordem de grandeza desse fluxo quando comparado aos fluxos de colmo e palha os torna desprezíveis.

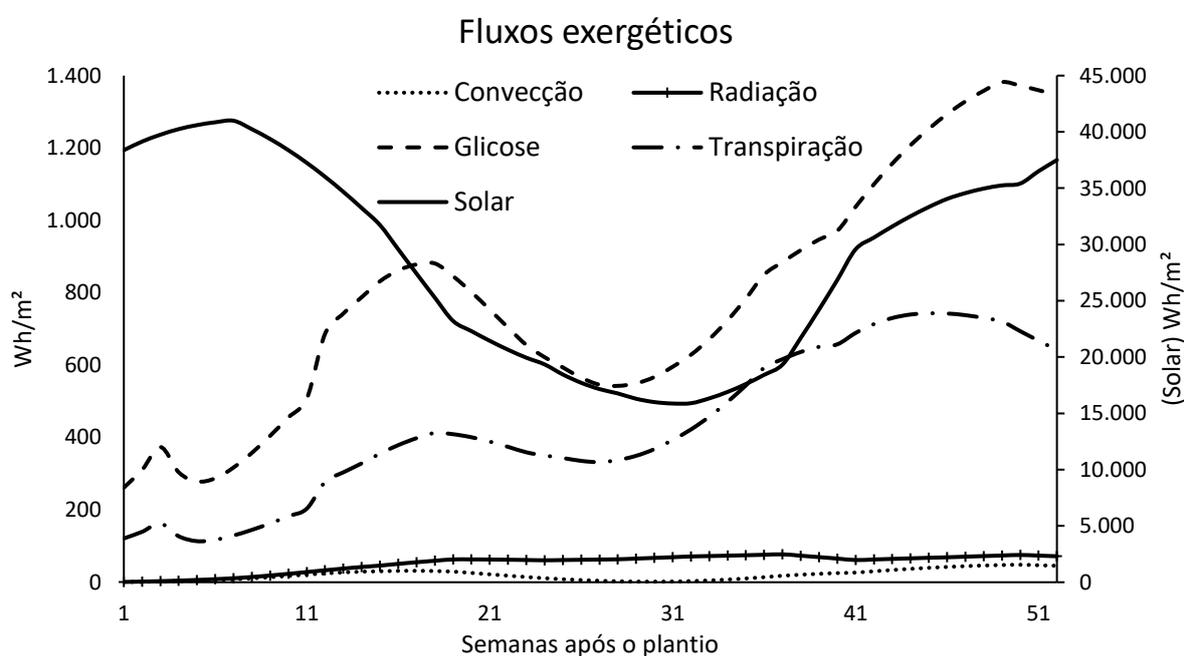
Figura 5.7 Diagrama da exergia. Autoria própria.



A Figura 5.8 apresenta as exergias associadas à produção de glicose a partir da irradiação solar (Wh/m^2), ou seja, o produto útil principal. Ademais, se mostra a exergia associada à transpiração, notando-se que é uma alta taxa de exergia associada à vaporização de água na superfície da planta. Salienta-se que essa grandeza física apresenta valores altos, pois é a forma que a planta possui para não aumentar a temperatura dela e de eliminar a água consumida nos processos metabólicos e de crescimento. Ou seja, a exergia da água eliminada

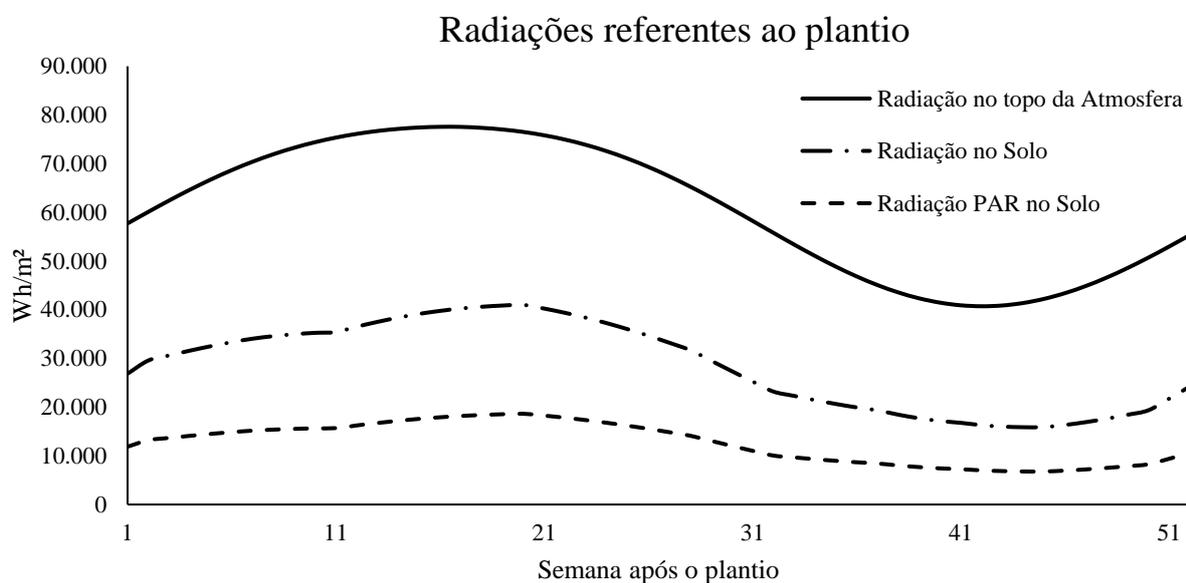
pela transpiração, além de ter a parcela física associada à energia removida na mudança de fase, possui a parcela química que é a mudança de concentração da água saturada na superfície até sua concentração no ambiente. Já a exergia relacionada à convecção e à radiação está diretamente associada ao tamanho da planta e à temperatura ambiente, sendo a convecção mais sensível às variações térmicas.

Figura 5.8 Exergia emitida pela cana por semana. Autoria própria.



Já a exergia relacionada às radiações do topo da atmosfera, incidente no solo e a PAR incidente no solo para cada semana após o plantio são ilustradas na Figura 5.9:

Figura 5.9 Exergia das radiações na cultura. Autoria própria, baseada nas equações 4.3, 4.4 e 4.8.

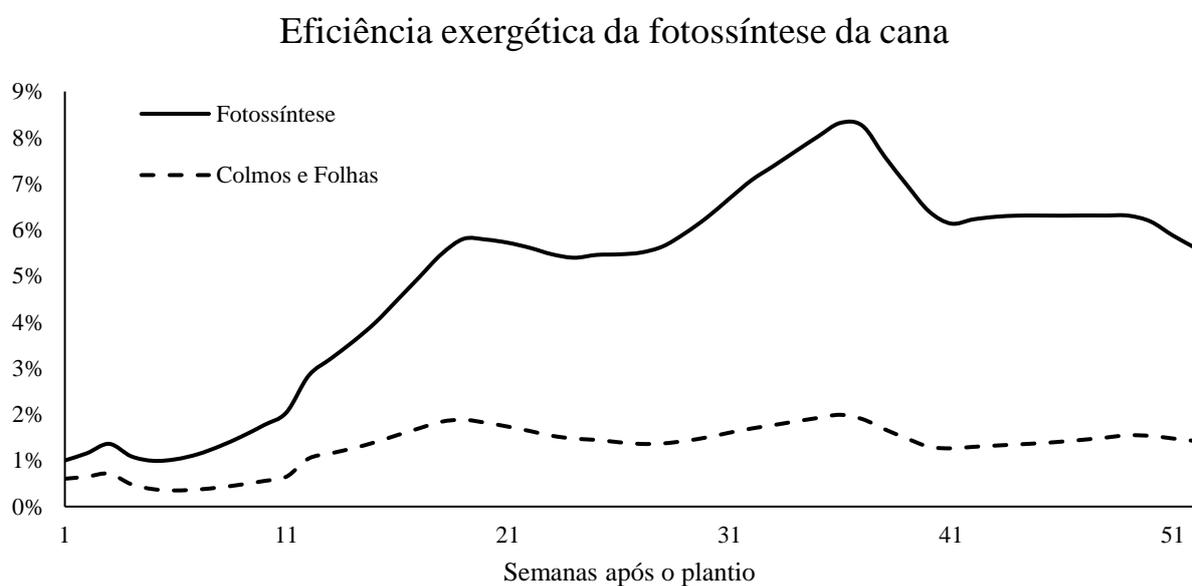


A Figura 5.10 mostra como a eficiência exergética da cana-de-açúcar se comportou para cada semana desde o plantio da cultura, levando em consideração a eficiência fotossintética e a eficiência útil. A eficiência da fotossíntese considera apenas a produção de glicose, não computando a formação das estruturas da planta. Já a eficiência da produção de matéria seca avalia a produção das partes físicas da planta, como colmos, folhas e raízes, portanto, subtrai os gastos exergéticos para a transformação de glicose em partes físicas e para a manutenção da cultura. Por fim, a eficiência exergética útil trata apenas da produção de colmos e folhas, desconsiderando os fluxos perdidos para o ambiente, como transpiração, além de levar em conta as raízes como fluxo perdido.

A média da eficiência exergética da fotossíntese durante o ciclo de um ano da planta foi de 4,99%, valor um pouco maior do que o encontrado por Petela (2008), de 2,6%, e do valor encontrado por Silva, Seider e Lior (2015), de 3,9%. Essa diferença pode ser explicada pelo olhar otimista que este trabalho tem em relação à cana-de-açúcar, uma vez que avalia que a produção é maior para a mesma quantidade de radiação incidente e a eficiência exergética útil da cana-de-açúcar, considerando apenas a produção de colmos e folhas, é de 1,21%, sendo a diferença relacionada à transformação de glicose nas partes físicas da planta, ao metabolismo de manutenção da cultura e à perda exergética relacionada às raízes que permanecem no solo.

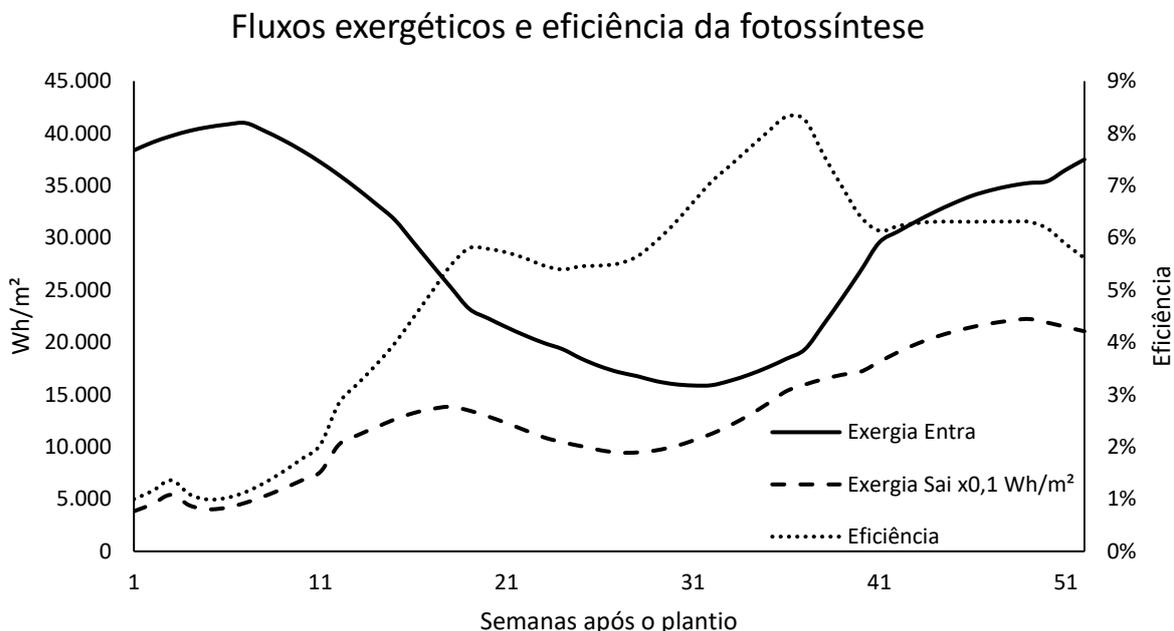
Olhando apenas para o estágio agrário do processo, com apenas a radiação solar como entrada e produzindo cana-de-açúcar, palha, raízes e emitindo os calores provenientes da radiação, convecção e transpiração, a eficiência exergética encontrada é de 3,15%, valores mais próximos aos encontrados pelos autores.

Figura 5.10 Eficiência exergética da fotossíntese e da produção de colmos e folhas por semana após o plantio



Observa-se que há um pico de eficiência por volta da 37ª semana, após o plantio. Tal pico se deve não pela capacidade fotossintética da planta, mas sim, pelas alterações ocorridas no ambiente. Para ilustrar essa condição e tornar a explicação mais clara, tem-se a Figura 5.11.

Figura 5.11 Fluxos exergéticos e eficiência da fotossíntese durante o cultivo da cana



Na Figura 5.11, constam a exergia de entrada e o somatório do fluxo de saída para a fotossíntese, bem como a eficiência exergética do sistema. A fim de ilustrar melhor, o fluxo de saída foi multiplicado por 10, para que fique em uma ordem de grandeza próxima ao fluxo de entrada. Desse modo, para saber o valor dos fluxos de saída, deve-se dividir o valor do gráfico por 10. Observa-se que, por volta da semana 37, o fluxo exergético que sai do sistema continua crescendo, porém, como o fluxo de entrada tem um forte incremento em sua intensidade, a eficiência do sistema diminui. Portanto, a queda da eficiência no final do ciclo se deve à cultura não acompanhar a intensidade da radiação incidente nela.

É importante ressaltar que a análise exergética considera a exergia de 1 m² de área cultivada, independentemente de a planta ter já toda a cobertura foliar da área ou não. Por essa razão, as eficiências nos primeiros estágios de desenvolvimento da planta são muito baixas.

Olhando apenas para o estágio agrário, pode-se resumir o fluxo exergético, conforme mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Fluxo exergético da produção de cana-de-açúcar

Agricultura	Fluxo	Wh/m²
Entrada	Radiação no solo	1.481.365
Saída	Colmo	12.913
	Palha	4.941
	Raízes	2.608
	Calor por Radiação	2.752
	Calor por Convecção	1.057
	Calor por Transpiração	22.422
	Destruída	

Fonte: Autoria própria

A tabela 5.1 mostra dados interessantes sobre o cultivo da cana-de-açúcar, a saber: grande parte da exergia da radiação que chega até o solo é destruída, os 1,43 MWh/m² destruídos representam 96,8% do total, a exergia restante é composta por calores, que são perdidos para o meio, e alguns produtos como os colmos, as palhas e as raízes juntos representam 20,4 kWh/m² de exergia. Descontando ainda as raízes, que não são aproveitadas, os produtos úteis da cana-de-açúcar se resumem em colmos e palhas, que juntos representam 17,85 kWh/m², apenas 1,2% da exergia incidente no solo.

Porém, o corte da cana não é o último estágio da produção, pois é preciso transformar a biomassa em combustíveis e produtos energéticos. Os fluxos exergéticos para uma biorrefinaria, que desidrata e incinera a vinhaça, pode-se resumir conforme indica a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Fluxo exergético referente à biorrefinaria de incineração de vinhaça

Biorrefinaria	Fluxo	Wh/m²
Entrada	Cana	12.913
	Palha	2.767
Saída	Subprodutos	150
	Etanol Hidratado	4.504
	Água refrigeração	84
	Biogás	451
	Água de desidratação	153
	Energia Elétrica	628
Destruída		9.712

Fonte: Autoria própria

A eficiência exergética da biorrefinaria com incineração da vinhaça é de 38,07%. Considerando o fluxo exergético global, encontramos a eficiência exergética máxima de 2,50%, fluxo que pode ser verificado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Fluxo exergético do global, berço ao tanque com incineração da vinhaça

Global	Fluxo	Wh/m²
Entrada	Radiação no solo	1.481.365
Saída	Palha remanescente	2.173
	Raízes	2.608
	Calor por Radiação	2.752
	Calor por Convecção	1.057,0
	Calor por Transpiração	22.422
	Subprodutos	150,12
	Etanol Hidratado	4.504
	Água refrigeração	83,51
	Biogás	450,8
	Água de desidratação	152,9
	Energia Elétrica	628,0
Destruída		1.444.384

Fonte: Autoria própria

Levando-se em conta apenas os fluxos úteis como palha remanescente, etanol hidratado, biogás e energia elétrica, o fluxo exergético global, berço ao tanque, e considerando a biorrefinaria com incineração da vinhaça, resume-se à produção de 7,756 kWh/m², culminando para uma eficiência exergética útil de apenas 0,52%.

Já para a biorrefinaria com biodigestão da vinhaça, uma alternativa à incineração, pode-se estimar a Tabela 5.4, a seguir, como resumo dos fluxos exergéticos.

Tabela 5.4 Fluxo exergético referente à biorrefinaria com biodigestão de vinhaça.

Biorrefinaria	Fluxo	Wh/m²
Entrada	Cana	12913,5
	Palha	2767,4
Saída	Subprodutos	150,1
	Etanol Hidratado	4503,8
	Água refrigeração	83,5
	Biogás	994,1
	Energia Elétrica	509,2
	Exergia Vapor	50,3
	Vinhaça Biodigerida	283,9
Destruída		9105,9

Fonte: Autoria própria

A saída de Exergia Vapor refere-se à exergia disponível para condensar o vapor que está disponível na biorrefinaria, fluxo que não foi utilizado no modelo. Por isso, é possível incrementar o vapor nas turbinas para produção de energia elétrica e, em virtude de não ter sido usado esse fluxo, destaca-se na tabela para não ser destruído. Nota-se que a exergia destruída neste modelo de biorrefinaria é menor do que naquele que incinera a vinhaça. Isso resulta em uma eficiência exergética da biorrefinaria de 41,93%.

Já o modelo global da biodigestão da vinhaça pode ser resumido pela Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Fluxo exergético do global, berço ao tanque com biodigestão da vinhaça

Global	Fluxo	Wh/m²
Entrada	Radiação no solo	1481365
Saída	Palha remanescente	2173,3
	Raiz	2607,9
	Calor por Radiação	2751,8
	Calor por Convecção	1057,0
	Calor por Transpiração	22421,7
	Subprodutos	150,1
	Etanol Hidratado	4503,8
	Água refrigeração	83,5
	Biogás	994,1
	Energia Elétrica	509,2
	Exergia Vapor	50,3
	Vinhaça Biodigerida	283,9
	Destruída	

Fonte: Autoria própria

Do ponto de vista global, a eficiência exergética aumentou de 2,50% para 2,54% em favor à biorrefinaria com biodigestão de vinhaça. Considerando apenas os produtos úteis para esse tipo de biorrefinaria, palha remanescente, etanol hidratado, biogás e energia elétrica, a exergia produzida é de 8,18 kWh/m², o que faz a eficiência exergética útil subir de 0,52% para 0,55%. Caso a palha remanescente seja deixada na lavoura, o que a configura como exergia perdida, a eficiência exergética útil é de 0,38% para a biorrefinaria com incineração, e 0,41% para biorrefinaria com biodigestão.

Moya *et al.* (2013) afirmam que, a partir de Contreras (2009), para o cultivo da cana são necessários 1.600 GJ de exergia para produzir 2.300 toneladas de colmo, entre insumos e operações, valor muito pequeno, quando comparado à exergia solar. Com base nesse número, e avaliando a produção estimada por este trabalho, 8,07 kg/m² de cana, a cana-de-açúcar consome 1,56 kWh/m² de exergia não renovável para produzir 17,85 kWh/m² de exergia útil, apenas colmos e palhada. Dessa forma, tem-se um balanço exergético positivo de 16,29 kWh/m² de área cultivada. Olhando para a biorrefinaria, apenas com os produtos úteis, palha remanescente, etanol hidratado, biogás e energia elétrica, o saldo exergético é de 6,20 kWh/m² para a biorrefinaria com incineração da vinhaça, e 6,62 kWh/m² para a biorrefinaria com biodigestão da vinhaça. Esses valores representam 223 e 238 GJ/ha para a biorrefinaria com

incineração e com biodigestão, respectivamente, e são próximos do ganho médio líquido de energia para a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, estimado por Manochio e autores. (2017) 203,4 GJ/ha. Lembrando que o modelo deste trabalho é otimista.

Apesar de o modelo de biorrefinaria que realiza a biodigestão da vinhaça ser mais eficiente exergeticamente, quando comparado ao modelo de incineração, a vinhaça biodigerida ainda é considerada um efluente, pois contém uma demanda de oxigênio, como explica Almeida (2015). E outro fator que favorece o incinerador, segundo o autor, é o custo do sistema.

Dois pontos merecem uma observação neste capítulo: como as exergias não solares são muito pequenas quando comparadas à solar, por exemplo, as exergias químicas dos insumos e das operações agrícolas, esses valores são assumidos como irrelevantes para o cálculo final da eficiência global. E, ao observar o modelo de biorrefinaria, pode-se verificar que, de forma empírica, o aumento do uso de torta de lignina diminui a produção de energia elétrica, porém aumentará a produção de etanol e biogás.

5.3 Desempenho dos módulos fotovoltaicos pela 2ª lei da termodinâmica

As simulações realizadas neste trabalho, desde o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar até a produção nas biorrefinaria, apresentam-se sob um olhar otimista, desconsiderando perdas e fatores que diminuem a produtividade em geral. Por outro lado, o olhar para a alternativa das usinas solares visa utilizar aquela com menor eficiência energética, isto é, os módulos fotovoltaicos constituem uma escolha conservadora para comparar com a produção de cana-de-açúcar de uma forma sistêmica; dessa forma, deixa evidentes as diferenças entre as opções. No entanto, até a forma de cálculo de eficiência foi alterado para que seja equivalente à de um sistema biológico, aceitando algumas saídas exergéticas como exergia perdida, conforme Garcia *et al.* (2018).

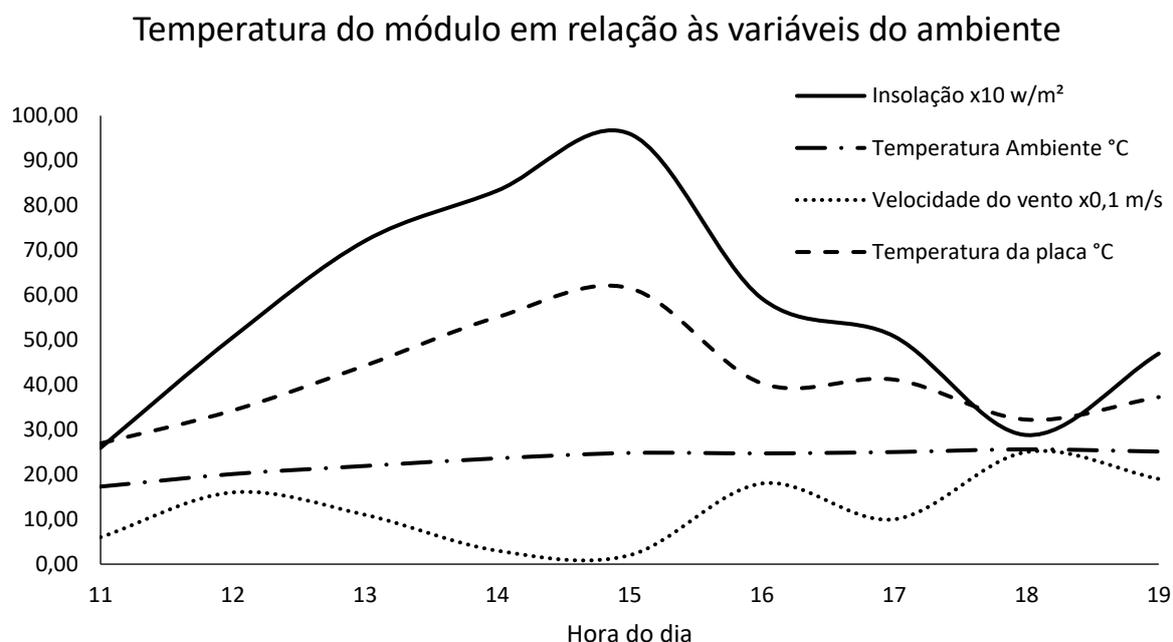
A maior dificuldade da análise exergética dos módulos fotovoltaicos está em estimar a temperatura que ela atinge durante o funcionamento; utilizar a estimativa de coeficiente de convecção proposto por Watmuff, Charters e Proctor (1977), portanto, foi a melhor alternativa, pois o trabalho emprega os fluxos em relação à área, desconsiderando a geometria dos módulos,

além de trabalhar com as radiações emitidas separadamente, o que excluiu a proposta de McAdams (1954).

Determinar a temperatura de trabalho é um dos maiores desafios relacionados à análise exergética dos módulos fotovoltaicos. Porém, a estimativa por balanço energético se mostrou satisfatória, além de atender à temperatura de NOCT nas condições do teste.

O dia com o maior pico de eficiência exergética ocorreu em 26 de março, quando a temperatura do módulo, temperatura ambiente, velocidade do vento e a insolação variaram conforme se verifica na Figura 5.9:

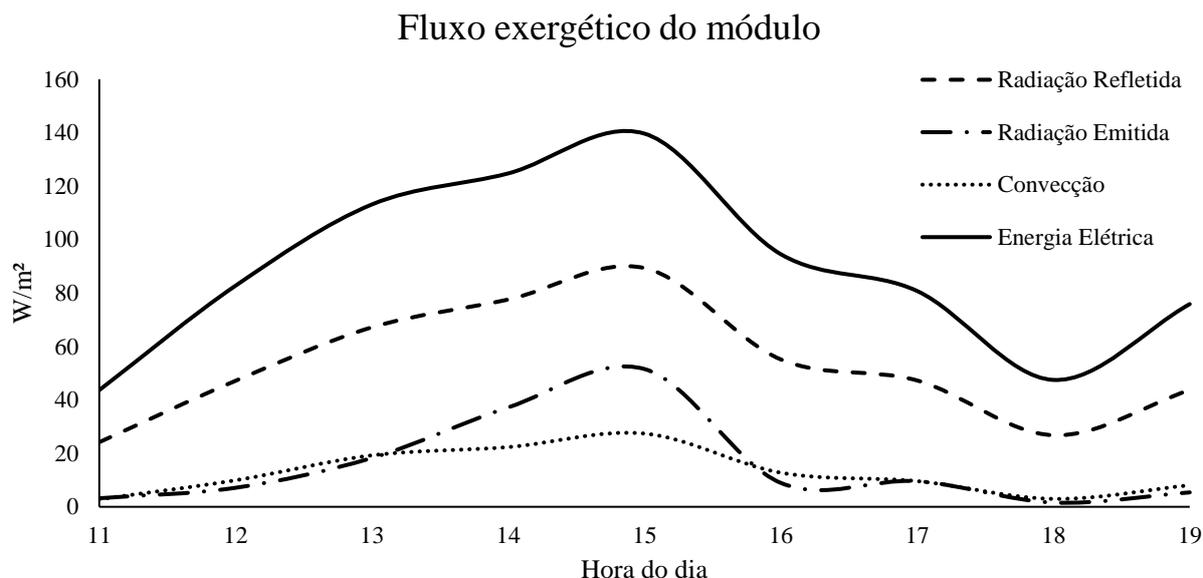
Figura 5.12 Temperatura do módulo em relação às variáveis do ambiente



A Figura 5.12 demanda uma descrição mais detalhada: visto que a insolação e a velocidade do vento não estão em escala, para entender a insolação, se deve multiplicar a escala por 10. Assim, a insolação terá um pico de quase 1.000 W/m². Já a velocidade do vento deve ter a escala multiplicada por 0,1, ou seja, atingindo um valor máximo pouco acima de 2 m/s. Essas alterações nas escalas são importantes para se conseguir manter todos os parâmetros um gráfico legível. Visto isso, fica mais simples o entendimento da temperatura do módulo em decorrência da insolação, temperatura ambiente e velocidade do vento.

Mediante tais dados é possível calcular os fluxos exergéticos emitidos pelo módulo, conforme mostra a Figura 5.13.

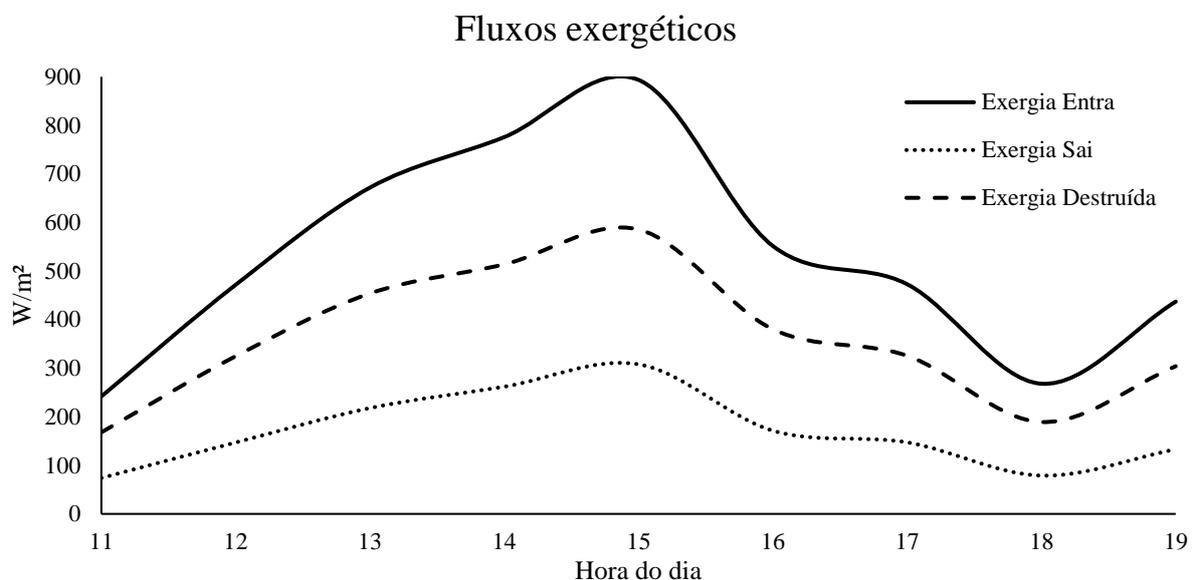
Figura 5.13 Fluxo exergético do módulo fotovoltaico para o dia 26 de março



Observa-se que o maior fluxo exergético emitido pelo módulo é devido à produção de energia elétrica, que representa, em média, 50% dos fluxos que saem do módulo, para o dia analisado. O segundo fluxo exergético com maior intensidade é a radiação refletida, o que se deve à qualidade da irradiação solar, pois não se avalia nenhum tipo de destruição exergética no processo de reflexão. A radiação emitida, por causa da temperatura do módulo, tem baixa intensidade exergética, assim como o fluxo exergético de convecção, pois ambos dependem da temperatura do módulo, o que gera uma perda na qualidade exergética.

Conhecendo os fluxos exergéticos emitidos pelo módulo e do fluxo exergético proveniente do sol, pode-se comparar os fluxos que entram, saem e são destruídos pelo módulo, como se observa na Figura 5.14.

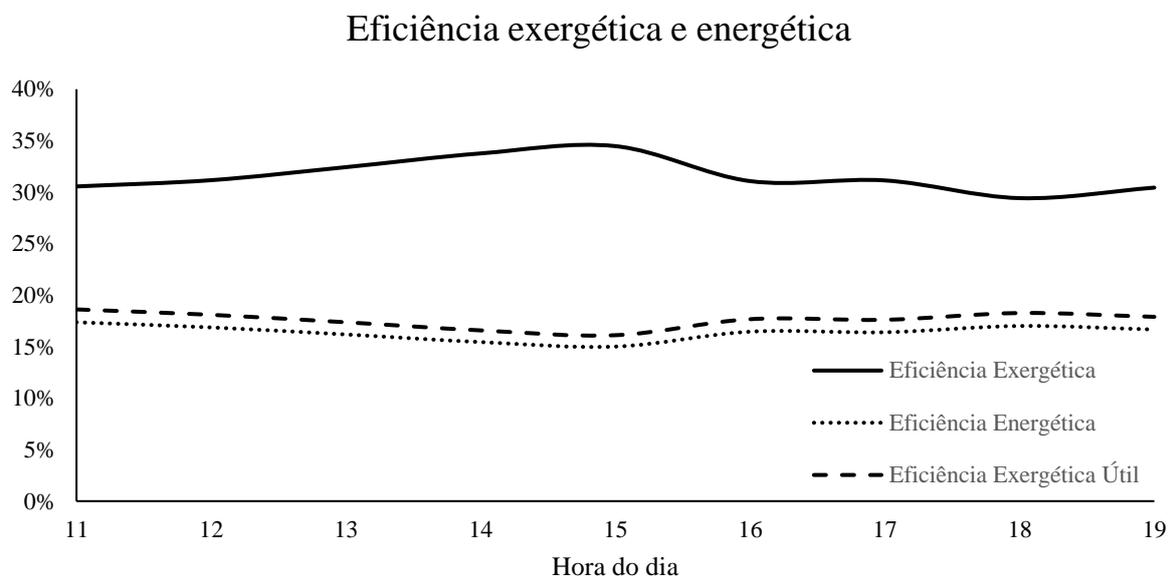
Figura 5.14 Balanço exergético para a módulo fotovoltaico no dia 26 de março



Em média, para o dia analisado, a eficiência exergética foi de 31,6%, com pico de 34,5%, o qual foi observado às 15 horas, horário com maior intensidade de irradiação. O que contribuiu também para esse pico de eficiência foi a alta temperatura que o módulo atingiu, observando-se que, nesse horário, a velocidade do vento foi quase nula, contribuindo para o aumento da temperatura. Então, o fluxo exergético relacionado à radiação aumentou, e o fluxo exergético relacionado à convecção manteve-se alto, contribuindo para o aumento da eficiência exergética do módulo, apesar de o aumento da temperatura diminuir a eficiência energética do módulo fotovoltaico.

Já para o sistema fotovoltaico, que considera tanto o módulo quanto o inversor, é possível comparar a eficiência exergética à eficiência energética e à eficiência exergética útil do sistema - exergia relacionada à energia elétrica produzida, conforme mostra a figura 5.15.

Figura 5.15 Eficiência exergética, exergética útil e energética do módulo fotovoltaico para o dia 26 de março



Observa-se claramente que, quando a eficiência energética aumenta, a eficiência exergética diminui. Isso porque o aumento da temperatura do módulo diminui a eficiência energética, enquanto esse mesmo aumento de temperatura faz com que mais calor seja dissipado na forma de radiação e de convecção, aumentando a eficiência exergética.

Outra forma notar a diferença entre eficiência energética e eficiência exergética é utilizar gráficos do tipo Sankey, para a eficiência energética, e gráficos do tipo Grasmann, para a eficiência exergética. Optou-se por representar as condições para o dia 26 de março, às 15 horas, horário com maior eficiência exergética computada, levando-se em conta que o módulo está em regime permanente, portanto a temperatura não varia durante a hora especificada; também não é considerada a eficiência do inversor de frequência, 97%. Nesses gráficos, a unidade de medida é Wh/m^2 , ou seja, é a quantidade de energia, ou exergia que flui pelo módulo na hora avaliada, 15 horas. Portanto, pode-se entendê-la como potência, W/m^2 , sem nenhum ônus. Abaixo estão representados os gráficos de Sankey e Grasmann nas Figuras 5.16 e 5.17, respectivamente.

Figura 5.16 Gráfico de Sankey representando a eficiência energética do módulo fotovoltaico.

Autoria própria.

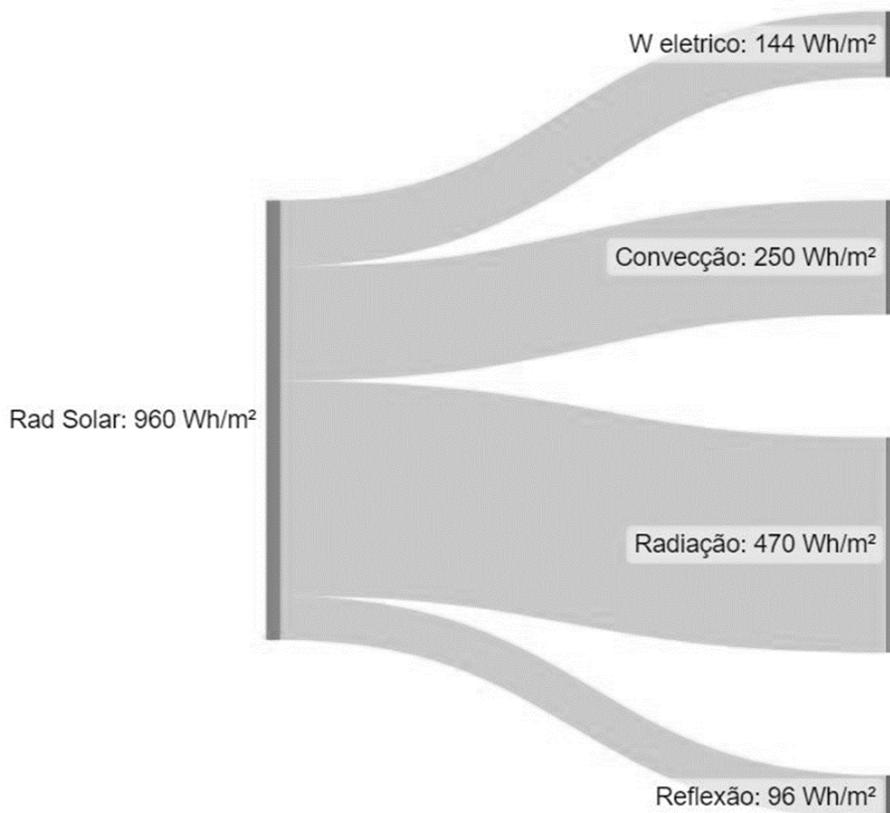
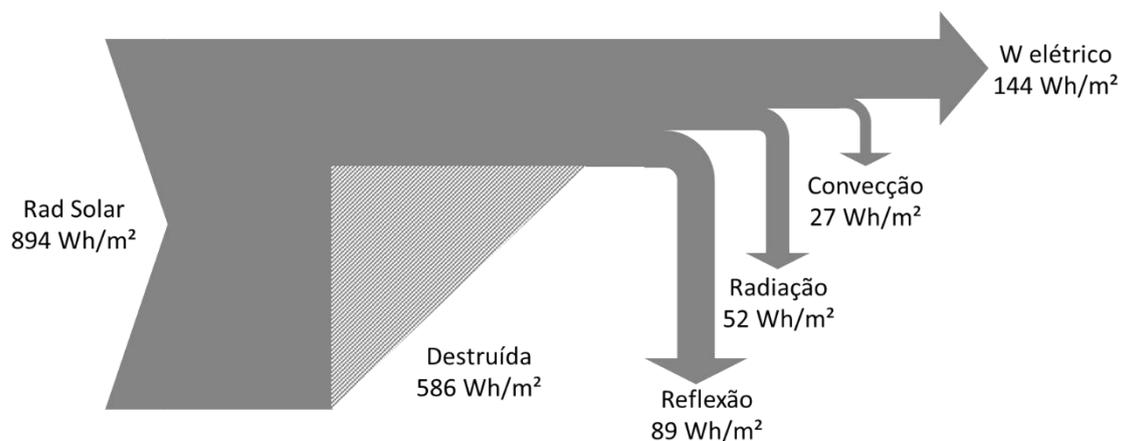


Figura 5.17 Gráfico de Grasmann representando a eficiência exérgica do módulo fotovoltaico. Autoria própria.

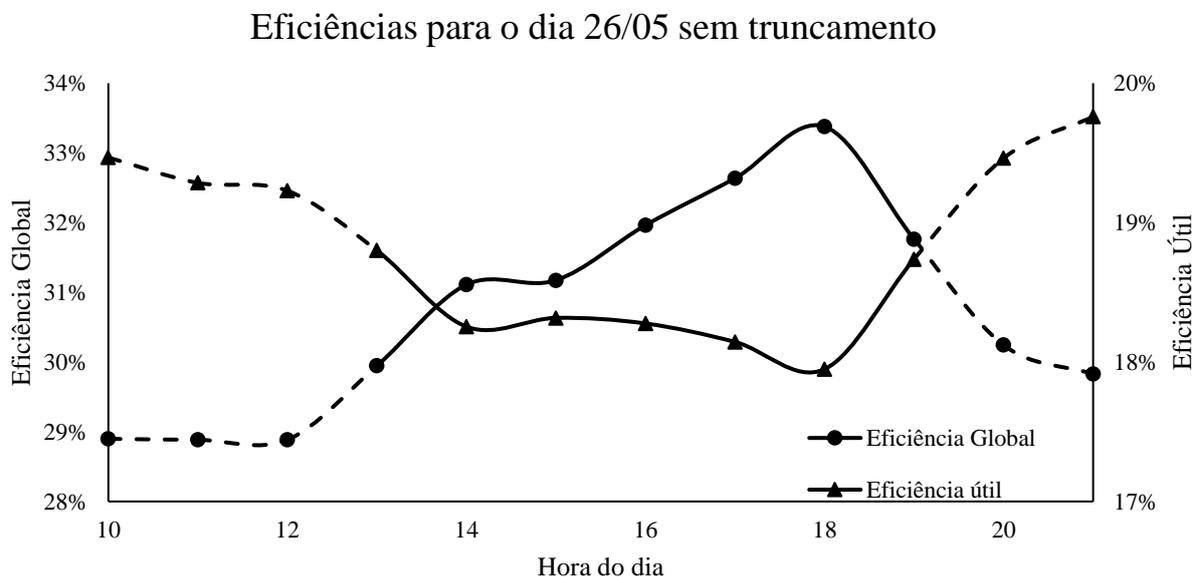


Ambos os gráficos contêm a mesma entrada, radiação solar, e as mesmas saídas, trabalho elétrico, radiação do módulo, reflexão do módulo e convecção do módulo, além de estarem em Wh/m². Observando-se os gráficos, fica mais fácil entender o conceito de exergia, uma vez que, com exceção do trabalho elétrico, todos os fluxos exergéticos têm menor intensidade quando comparados aos equivalentes energéticos. Isso mostra que o máximo trabalho possível que pode ser realizado com os fluxos energéticos é representado pelos fluxos exergéticos. Por exemplo, a convecção do módulo fotovoltaico transferiu para o ambiente um total de 250 Wh/m², durante a hora avaliada, 15 horas. Se fosse possível aproveitar essa energia para produzir trabalho, se produziria um trabalho máximo de 27 Wh/m². Essa queda na qualidade da energia, representada pela exergia, se deve à baixa temperatura da fonte do calor; no caso, o módulo fotovoltaico que está a 61°C, nas condições descritas.

Considerando que a exergia referente à reflexão, radiação emitida e convecção não são aproveitadas, portanto é uma exergia perdida, para o sistema fotovoltaico pode-se afirmar que a exergia útil é obtida apenas pela energia elétrica gerada pelo módulo. De forma geral, a média da eficiência exergética anual para as radiações maiores que 200 W/m² são de 30,92%, sendo que a exergia relacionada à produção de energia elétrica representa cerca de 57,4% desse valor, ou seja, a eficiência exergética útil do sistema fotovoltaico foi de 17,75%, o que representa uma produção energética anual de 255,84 kWh/m².

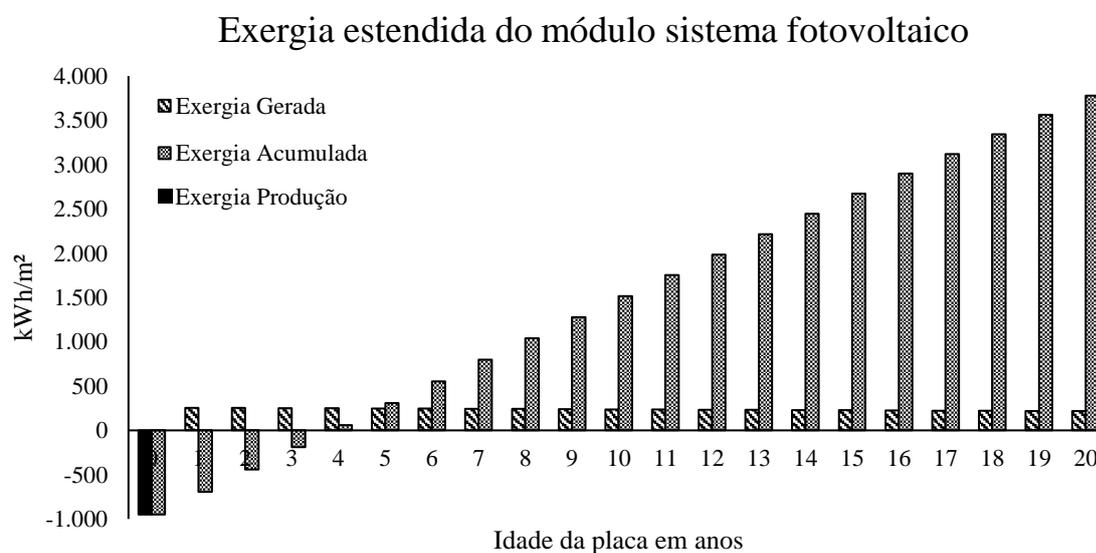
Analisando as radiações menores que 200 W/m², mostra-se a importância do truncamento, pois, nessa condição, a eficiência exergética útil média foi de 18,95%, atingindo picos de 19,9%, e a eficiência exergética média foi de 29,2%. Já a produção energética média foi de apenas 11 Wh/m² para cada hora de produção. Esses valores de eficiência para baixas radiações podem gerar conclusões equivocadas, dando a entender que essa seria a melhor condição de trabalho dos módulos. A Figura 5.18 exemplifica essa situação, com as linhas tracejadas representando as eficiências para condições de radiação menores que 200 W/m².

Figura 5.18 Eficiências do módulo fotovoltaico sem truncamento da radiação



Analisando os dados divulgados por Gong e Wall (2014) de 950kWh/m^2 de exergia envolvida na produção dos módulos, a queda de eficiência de 0,8% ao ano estimada pela garantia do fabricante dos módulos (BYD, 2019), uma vida útil de 20 anos, e desconsiderando o fluxo solar e considerando a produção exergética útil de $255,84\text{ kWh/m}^2$, pode-se calcular o gráfico exergético não solar, ao longo da vida útil do módulo, conforme mostra a Figura 5.19.

Figura 5.19 Gráfico do fluxo exergético ao longo da vida útil do sistema fotovoltaico.



Na Figura 5.19 a barra preta representa a exergia envolvida na produção do módulo fotovoltaico; as barras tracejadas, a exergia gerada ao longo dos anos, exergia relacionada à produção de energia elétrica; e as barras pontilhadas representam a exergia acumulada ao longo da vida útil do sistema fotovoltaico.

A exergia acumulada no sistema fotovoltaico ao final da vida útil, 20 anos, é de 3,78 MWh/m², o que representa um acúmulo médio anual de 188,9 kWh/m², quando comparada apenas a exergia elétrica produzida à exergia necessária para a produção. Ao se comparar à produção de cana-de-açúcar, saldo de 5,83 kWh/m² por ano para as exergias não solares, fica nítida a vantagem do sistema fotovoltaico, sendo mais de 30 vezes mais eficiente, lembrando que os processos da biorrefinaria não estão computados nesta breve análise.

Avaliando a inclinação do módulo, utilizando a inclinação como sendo a latitude de Campinas, 22,82°, a distância entre os módulos equivale a 133% do comprimento do módulo. Ou seja, apesar do acréscimo de 5,25% da radiação no plano inclinado, a área ocupada pelo módulo fica 33% maior, para os cálculos em Campinas. Logo, inclinar os módulos faz com que a radiação aproveitada diminua para 79% em relação aos módulos horizontais. Outro fator que não foi incluído é a área de manutenção que deve existir entre os módulos. Nesse quesito, pode-se estimar a área útil e relacionar com a área total da fazenda solar, estimando esse fator para encontrar a eficiência global do sistema.

Por fim, comparando a cana-de-açúcar, do berço ao tanque, aos módulos fotovoltaicos do ponto de vista exergético, tem-se a Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Comparação exergética entre cana-de-açúcar e módulos fotovoltaicos

	Cana-de-açúcar (Wh/m ²)		Fotovoltaica (Wh/m ²)	
	Biogás	450,8		
Produto útil	Etanol	4.503,80	Energia elétrica	255.838
	Energia elétrica	628		
Total útil		5.582,60		255.838
Total Global		36.981		468.004
Entrada		1.481.365		1.481.365
Eficiência Global		2,50%		31,60%
Eficiência útil		0,38%		17,30%

Fonte: Autoria própria

Fica claro que a vantagem exergética do módulo fotovoltaico é inquestionável, e do ponto de vista de exergia útil, o módulo é 45,8 vezes mais eficiente do que a cana-de-açúcar, ou seja, para produzir a mesma capacidade de trabalho que 1 m² de módulos fotovoltaicos, são necessários 45,8 m² de cana-de-açúcar plantada.

5.4 Avaliação da cana-de-açúcar em paralelo com o módulo fotovoltaico

Este capítulo reúne os resultados apresentados por este trabalho, compilando-os e comparando-os para avaliar o desempenho da cana-de-açúcar paralelamente ao módulo fotovoltaico.

A Tabela 5.7 mostra as radiações incidentes no solo de Campinas, acumuladas durante um ano.

Tabela 5.7 Acumulado anual da radiação solar incidente no solo

Radiação anual incidente no solo	kWh/m²	
Fotossinteticamente Ativa	657	44,3%
Não Fotossinteticamente Ativa	825	55,7%
Total	1.481	100,0%

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.8 evidencia a produtividade máxima alcançada pela cana-de-açúcar durante um ciclo de 52 semanas.

Tabela 5.8 Produção máxima por m² para um ciclo de 52 semanas em base úmida

Produção	kg/m²
Palha	1,12
Raíz	1,63
Colmos	8,07
Total	10,82

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.9 mostra o consumo hídrico máximo da cana-de-açúcar para o ciclo de 52 semanas de três formas diferentes: o consumo total, o consumo para a produção de um quilograma de colmo em base úmida e o consumo médio diário.

Tabela 5.9 Consumo hídrico da produção de cana-de-açúcar

Consumo	Valor	Unidade
Consumo hídrico total	897	kg/m ²
Litros por kg de colmo	111,2	litros/kg
Média diária	2,45	mm/dia

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.10 mostra a eficiência exergética encontrada para a fotossíntese e para a produção dos produtos úteis, colmo e folhas.

Tabela 5.10 Eficiência exergética da fotossíntese e produção de partes físicas da cana

Eficiência exergética		
Fotossíntese		4,99%
Produção de Colmos e Folhas		1,21%

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.11 mostra a produção dos produtos úteis da biorrefinaria com incineração da vinhaça e os respectivos fluxos exergéticos, com base em um metro quadrado de cultivo de cana-de-açúcar.

Tabela 5.11 Produtos úteis da biorrefinaria com incineração da vinhaça para cada m² de cana plantada

Produto	Produção mássica	Unidade	Produção Exergética	Unidade
Biogás	0,05	kg/m ²	451	Wh/m ²
Energia elétrica			628	Wh/m ²
Etanol	0,59	kg/m ²	4.504	Wh/m ²
Total			5.583	Wh/m²

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.12 mostra a produção dos produtos úteis da biorrefinaria com biodigestão da vinhaça e os respectivos fluxos exergéticos, com base em um metro quadrado de cultivo de cana-de-açúcar.

Tabela 5.12 Produtos úteis da biorrefinaria com biodigestão da vinhaça para cada m² de cana plantada

Produto	Produção mássica	Unidade	Produção Exergética	Unidade
Biogás	0,12	kg/m ²	994	Wh/m ²
Energia elétrica			509	Wh/m ²
Etanol	0,59	kg/m ²	4.504	Wh/m ²
Total			6.007	Wh/m²

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.13 mostra os fluxos exergéticos para a etapa agrícola da produção de cana-de-açúcar.

Tabela 5.13 Fluxos exergéticos da agricultura

Agricultura	Fluxo	Wh/m²	
Entrada	Radiação no solo	1.481.365	100,0%
Saída	Colmo	12.913	0,872%
	Palha	4.941	0,334%
	Raiz	2.608	0,176%
	Calor por Radiação	2.752	0,186%
	Calor por Convecção	1.057	0,071%
	Calor por Transpiração	22.422	1,514%
Destruída		1.434.672	96,85%

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.14 mostra todos os fluxos exergéticos, desde o cultivo da cana-de-açúcar até a produção da biorrefinaria com incineração da vinhaça.

Tabela 5.14 Fluxos exergéticos do berço ao tanque com incineração da vinhaça na biorrefinaria

Global	Fluxo	Wh/m²	
Entrada	Radiação no solo	1.481.365	100,0%
Saída	Palha remanescente	2.173	0,147%
	Raiz	2.608	0,176%
	Calor por Radiação	2.752	0,186%
	Calor por Convecção	1.057,00	0,071%
	Calor por Transpiração	22.422	1,514%
	Subprodutos	150,12	0,010%
	Etanol Hidratado	4.504	0,304%
	Água refrigeração	83,51	0,006%
	Biogás	450,8	0,030%
	Água de desidratação	152,9	0,010%
	Energia Elétrica	628	0,042%
Destruída		1.444.384	97,50%

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.15 mostra todos os fluxos exergéticos, desde o cultivo da cana-de-açúcar até a produção da biorrefinaria com biodigestão da vinhaça.

Tabela 5.15 Fluxos exergéticos do berço ao tanque com biodigestão da vinhaça na biorrefinaria

Global	Fluxo	Wh/m²	
Entrada	Radiação no solo	1481365	100,0%
Saída	Palha remanescente	2173,3	0,147%
	Raiz	2607,9	0,176%
	Calor por Radiação	2751,8	0,186%
	Calor por Convecção	1057	0,071%
	Calor por Transpiração	22421,7	1,514%
	Subprodutos	150,1	0,010%
	Etanol Hidratado	4503,8	0,304%
	Água refrigeração	83,5	0,006%
	Biogás	994,1	0,067%
	Energia Elétrica	509,2	0,034%
	Exergia Vapor	50,3	0,003%
	Vinhaça Biodigerida	283,9	0,019%
	Destruída		1443778

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.16 mostra as características exergéticas do módulo fotovoltaico, bem como a exergia estendida e a utilização do módulo por 20 anos.

Tabela 5.16 Características exergéticas do módulo fotovoltaico

Módulo fotovoltaico	Valor	Unidade
Eficiência média anual	31,6%	
Eficiência pico	34,5%	
Exergia estendida na produção	950,0	kWh/m ²
Exergia útil no primeiro ano	255,8	kWh/m ²
Exergia estendida média em 20 anos	188,9	kWh/m ²
Exergia acumulada em 20 anos	3,78	MWh/m ²

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.17 mostra as características exergéticas e energéticas do módulo fotovoltaico para dois dias distintos: o dia com maior eficiência exergética, denominado pico exergético, e o dia com maior eficiência energética útil, ou pico energético.

Tabela 5.17 Fluxos energéticos e exergéticos do módulo fotovoltaico para os dias com maior pico de eficiência exergética e energética

Fluxo	Pico Exergético	Pico Energético	Unidade
Insolação	959,6	1108,3	W/m ²
Velocidade do vento	2,0	3,5	W/m ²
Temperatura ambiente	24,8	22,2	m/s
Temperatura do módulo	61,5	43,6	°C
Energia Radiação emitida	469,9	247,6	°C
Energia Radiação refletida	96,0	110,8	W/m ²
Energia Convecção	249,8	570,0	W/m ²
Energia elétrica	144,0	179,9	W/m ²
Exergia Insolação	893,7	1032,7	W/m ²
Exergia Radiação emitida	51,6	16,7	W/m ²
Exergia Radiação Refletida	89,4	103,3	W/m ²
Exergia convecção	27,4	38,6	W/m ²
Exergia energia elétrica	144,0	179,9	W/m ²
Eficiência energética útil	15,0%	16,2%	
Eficiência exergética global	34,5%	32,2%	
Eficiência exergética útil	16,1%	17,4%	
Relação entre eficiência energética global e útil	46,7%	54,0%	

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5.18 traz a comparação já realizada no capítulo 5.3, colocando lado a lado o módulo fotovoltaico com a cana-de-açúcar.

Tabela 5.18 Comparação exergética entre cana-de-açúcar e módulos fotovoltaicos

	Cana-de-açúcar		Fotovoltaica	
	(Wh/m²)		(Wh/m²)	
	Biogás	450,8		
Produto útil	Etanol	4.503,80	Energia elétrica	255.838
	Energia elétrica	628		
Total útil		5.582,60		255.838
Total Global		36.981		468.004
Entrada		1.481.365		1.481.365
Eficiência Global		2,50%		31,60%
Eficiência útil		0,38%		17,30%

Fonte: Autoria própria

5.5 Uso do REPowerEU com foco nas políticas públicas brasileiras

As orientações do REPowerEU podem ser aplicadas para o Brasil, a fim de auxiliar na redução da dependência dos combustíveis fósseis. Porém, nesta seção são analisados os potenciais ganhos, associados à geração de energia fotovoltaica e produção de etanol.

As ideias constantes deste capítulo estão alinhadas com algumas dos ODS (objetivos de desenvolvimento sustentável) da ONU (2021). Promover a energia limpa e acessível é um objetivo que pode ser alcançado com o auxílio da cana-de-açúcar e dos módulos fotovoltaicos, aumentando a participação das energias renováveis na matriz energética brasileira. Tornar as cidades mais sustentáveis também é um ponto para o qual as matrizes energéticas abordadas por este trabalho colaboram, pois elas contribuem diretamente para o transporte público ser mais sustentável. Este capítulo também expressa ideias para um consumo responsável, outro tópico dos ODS, porque, por meio de um consumo racional, a necessidade de grandes áreas de cultivo ou de grandes instalações fotovoltaicas fica reduzida. Lembrando que as duas primeiras diretrizes se referem a erradicação da pobreza e fome, portanto a cana-de-açúcar precisa ser validada como não competidora por espaço por alimentos. Por fim, as metas que referentes às ações contra as mudanças climáticas têm contribuição da cana-de-açúcar, devido ao potencial de descarbonização e substituição dos combustíveis fósseis.

5.5.1 Uso racional da energia

A primeira ação está na poupança de energia e, para isso, alguns pontos são destacados, dentre os quais se ressalta a diminuição do uso do ar-condicionado, aquecedores e chuveiros, seja no tempo de uso ou ajustando a temperatura para mais próximo da temperatura ambiente. Molliet e Mady (2021) mostram que utilizar roupas leves alteram a temperatura de conforto em ambientes com ar-condicionado, proporcionando uma economia energética de 22,2%. Um exemplo concreto da maneira pela qual é possível alcançar eficiência econômica pode ser observado no comportamento de um indivíduo que utiliza um sistema de ar-condicionado em temperaturas muito baixas, combinando-o com o uso de um cobertor durante o sono. Se esse

indivíduo ajustar o termostato do aparelho para uma temperatura mais elevada, alcançando o conforto térmico sem recorrer ao uso de cobertores, o ar-condicionado terá uma carga de trabalho reduzida, resultando em economia energética.

Essas são formas que contribuem para a poupança de energia, porém estão diretamente relacionadas ao comportamento humano, o que a torna uma ação complexa de ser atingida. Essa mudança comportamental é essencial para o Brasil, pois o modelo de consumo atual não é sustentável e o quanto antes o nosso país começar a mudar, mais gradual e menos agressiva será essa transição.

Em um primeiro momento, economizar energia parece não estar diretamente associado à produção de cana-de-açúcar ou fazendas fotovoltaicas, porém, com um consumo energético menor, a necessidade de grandes áreas produzindo energia, seja cana ou fotovoltaica, diminui, o que fortalece o setor energético, pois, infelizmente, não é possível substituir imediatamente toda a gasolina por etanol nos veículos *flex* brasileiros. Portanto, economizar contribui para tornar o cenário energético atual menos nocivo.

Os demais pontos para a economia de energia estão relacionados ao uso de transportes. Pereira Carvalho e Mady (2022) explicam que, para uma casa brasileira teórica, os combustíveis representam cerca de 63% dos gastos energéticos por indivíduo. Alternativas como realizar *home office*, para não ser necessário se deslocar, dependem da disponibilidade e da cultura da empresa, sendo possível um incentivo governamental para realizar tal ação, a saber, redução de impostos como IPTU para as empresas que incentivarem tais propostas. Já as alternativas que tangem à necessidade de transportes, que podem ser aplicadas no Brasil, indicam a utilização de transportes públicos, transportes alternativos ou o uso mais eficiente dos veículos, contudo, novamente, esses itens esbarram no comportamento humano e cabem às políticas públicas incentivarem. Não basta, pois, produzir mais energia renovável, mas deve-se reduzir no consumo final para se obter reais economias de exergia nos diferentes setores.

É possível alterar o comportamento humano para um consumo mais consciente de energia, mediante campanhas nacionais e documentos oficiais que ajudem a população a entender a situação e saber como agir, assim como faz o documento *Playing My Part* (IEA, 2022b). Essas são alternativas viáveis.

No passado, já foram necessárias medidas para mudança de comportamento da população, como aconteceu em 2001 e durou até fevereiro de 2002, durante a crise energética

conhecida como “apagão” (CECHIN, 2017). Durante a crise, o governo determinou metas de redução de consumo e deixou a população livre para decidir como atingir, isto é, quem ultrapassasse a meta de consumo pré-definida teria um adicional na tarifa que podia chegar a 200%, como mostra Bardelin (2004). O referido autor também indica que, no primeiro mês de racionamento, mais de 60% da população conseguiu ficar abaixo da meta. Ademais, houve a necessidade por falta de oferta, sendo, portanto, uma política necessária. Ele também afirma que, seis meses após o início do racionamento, 90% da população pretendia continuar poupando energia. Nos dois anos seguintes à crise, 2002 e 2003, o consumo de energia elétrica cresceu, porém ficou abaixo do consumo observado em 2000 e abaixo da capacidade instalada (CECHIN, 2017).

Fica claro que mudar o estilo de vida nas residências brasileiras é possível, porém apenas associadas a uma taxaço. No primeiro momento, se deve pensar em programas que incentivem o consumo consciente e que mostrem métodos para atingir a economia, como o documento *Playing My Part* (IEA, 2022b). Desta forma, pode-se gerar economia de energia elétrica, com o excedente podendo ser aplicado em outras áreas, contribuindo para a substituição dos combustíveis fósseis.

A mudança comportamental na condução de veículos pode contribuir muito com a economia de energia, no caso combustíveis. Técnicas de condução econômica, como o *Hypermiling* (BARNARD, 2009), são pouco conhecidas e divulgadas, então, expor esse conhecimento para os motoristas pode abrir portas para a mudança comportamental que resultará em menos consumo de combustível. Momcilovic, Dimitrijevic e Stokic (2017), em estudo realizado na Sérvia, mostraram que a maioria das empresas relacionadas ao transporte pesado não treinam os motoristas para uma condução econômica. Das empresas que treinam, 68% tiveram bons resultados. Os autores ainda concluíram que 63,3% dos entrevistados esperam uma economia de combustível de 10% com o treinamento de condução econômica. Barth e Boriboonsomsin (2009) afirmaram que é possível uma economia de combustível entre 10% e 20% em uma viagem, sem expressivos efeitos no tempo gasto, utilizando a condução econômica. Dado que o consumo de energia nesse setor é um dos principais, tanto em volume como em emissões (não quantificados por este trabalho), uma substituição do diesel seria interessante. Nas cidades onde transitam ônibus elétricos e para os caminhões de carga, o uso de biodiesel, ou ainda etanol, descarbonizaria o setor com tecnologias já existentes no mercado.

A qualidade das estradas também é responsável pela baixa eficiência energética do setor. Tal discussão pode ser vista em Torelli, Carvalho e Mady (2012).

Das diversas ações para uma condução econômica para veículos leves algumas são essenciais e geram bons resultados, como expõe Killian (2012) - realizar acelerações e frenagens suaves e manter velocidades constantes, respeitando o limite de velocidade ou até mesmo trafegando um pouco abaixo desse limite. Fica claro que antecipar as ações, ter respostas suaves e ter constância na condução contribui para reduzir o consumo de combustível. Checar a pressão dos pneus, deixar a manutenção em dia e não levar carga desnecessária também são pontos apresentados pelo autor, bem como reduzir o uso do ar-condicionado. No que se refere ao setor automotivo de passeio, análises das emissões e consumo são realizadas por Fusco, Seixas e Mady (2023). Os autores salientam que, apesar de o carro elétrico ter um consumo de energia menor, por ter uma eficiência de conversão de energia maior, as emissões associadas ao etanol são de difícil superação, porém este trabalho levanta uma perspectiva exergética na produção de combustível, mostrando que, se se levar em conta a produção de cana-de-açúcar, o setor automotivo pode ter uma eficiência do berço ao túmulo maior, quando abastecido de energias renováveis oriundas de módulos fotovoltaicos. Ressalta-se que essa análise não leva em conta a exergia para produção da bateria.

Os veículos elétricos têm se mostrado a tendência do mercado automotivo. Do ponto de vista exergético, utilizar energia oriunda de módulos fotovoltaicos é muito vantajoso, porém, quando esses veículos são alimentados com energia gerada em termoeletricas, a vantagem ambiental fica comprometida, mostrando que existe espaço no mercado internacional para exportação de etanol e das tecnologias envolvidas, apesar da produção atual não suprir a demanda interna de combustíveis. O Brasil é um país com uma matriz energética que favorece os veículos elétricos, porém os altos custos desses veículos acabam tornando-os uma exclusividade da parcela mais rica da população. Nesse sentido, o veículo a etanol pode ser uma vantagem para a população, porque, além de uma tecnologia já desenvolvida, o custo menor e o potencial de descarbonização tornam o veículo a etanol uma melhor alternativa para o País, perante frente aos veículos elétricos.

Como a mudança de comportamento nem sempre é fácil, uma alternativa que o *Playing My Part* (IEA, 2022b) expõe é a produção da própria energia com a instalação de módulos fotovoltaicos. O Brasil tem um bom potencial de produção de energia solar fotovoltaica,

podendo ser uma alternativa para as residências do País, no entanto, não é uma tecnologia barata e acessível, mas como ela já se mostrou útil e com retorno econômico, pode-se considerá-la como uma boa opção, se houver apoio do governo. Existem políticas de incentivos, porém ainda não pode ser um mecanismo atrativo individual, dado que a taxa de retorno é menor do que a taxa de juros nacional.

5.5.2 Diversificação da energia

A segunda ação apresentada pela proposta REPowerEU foca na diversificação da importação de energia. Sob esse ponto de vista, o Brasil tem capacidade de não depender da importação de energia. Atualmente existe a importação de gás natural boliviano, que pode ser substituído pelo biogás proveniente de biorrefinaria e outros biodigestores. Outro fator que pode ser utilizado para reforçar a independência energética brasileira é a ampliação da área produtiva. De acordo com a publicação *Biofuels in Emerging Markets* (BIOENERGY, 2023), a conversão de 3,1% das pastagens em plantações poderia dobrar a produção de biocombustíveis no Brasil; além disso, a área produtiva do País representa 7,6%, enquanto a média internacional varia entre 20 e 30% (MIRANDA, 2018).

A área de pastagem plantada no Brasil representa 13,2% do território nacional (CARVALHO, 2017), onde a produtividade é, em média, 1,23 cabeças de gado por hectare (LOPES e BASSO, 2016), ou seja, cada bovino necessita de mais de 8 mil m² para se desenvolver. Considerando que apenas uma pequena parte da produção pecuária brasileira é de gado confinado, cerca de 4% (MALAFAIA e CANELLA, 2020), e que o gado nessas condições ocupa um espaço de 12 m² por cabeça (QUINTILIANO e PARANHOS DA COSTA, 2006), pode-se ganhar espaço para o aumento da área produtiva, seja no cultivo de cana, na instalação de fazendas fotovoltaicas, ou até mesmo uma poligeração que combine essas alternativas. Assim, se aumenta a produtividade energética do País, sem comprometer as reservas florestais, mantendo a segurança alimentar, pois a área de cultivo de alimentos não é afetada, a cana-de-açúcar não compete com grãos, hortaliças e cereais, e aumentando a produtividade do solo que antes era pastagem.

Sobre o consumo de carne, Pereira Carvalho e Mady (2022) afirmam que uma dieta vegetariana tem uma economia exergética diária de 19,7 MJ por indivíduo, o que representa uma redução de aproximadamente 13% do fluxo exergético de uma residência brasileira. Kovarsky e autores (2023) realizam uma projeção dizendo que a carne sintética, a partir da cana-de-açúcar, pode contribuir para uma descarbonização, tornando a cana-de-açúcar até dez vezes mais eficiente que os módulos fotovoltaicos, o que ainda não é realidade, apenas uma projeção para 2050.

Como exposto, a área de pastagem brasileira pode ser convertida em lavoura para aumentar a produção de biocombustíveis, mas também é possível avaliar um cenário em que essa área seja transformada em fazendas solares. A radiação global horizontal média do Brasil é muito próxima da observada em Campinas-SP, 4.912 e 4.914 Wh/m², respectivamente, (PEREIRA *et al.*, 2017), portanto se pode considerar, grosso modo, que o caso de Campinas pode representar a média nacional. A produção energética anual dos módulos fotovoltaicos foi de 255,84 kWh/m² e algumas análises foram efetivadas com base nesses valores e nos dados do BEN (2021).

No âmbito residencial, o BEN (2021) informa que ainda são utilizadas algumas fontes energéticas de origem fóssil, como o gás natural, gás liquefeito de petróleo e querosene; e, em uma análise de sensibilidade de um cenário limite, em que todas essas fontes fossem substituídas por módulos fotovoltaicos de forma a manter a entrega energética em toneladas equivalentes de petróleo (TEP), obteve-se a Tabela 5.19. O cenário limite em questão omite deliberadamente as desvantagens e obstáculos associados aos módulos fotovoltaicos, além de negligenciar as ineficiências dos processos térmicos que ainda afetarão os produtos derivados de combustíveis fósseis. Portanto, não se configura como a solução energética ideal para o Brasil. Entretanto, proporciona uma percepção da imensidão da capacidade energética do país.

Tabela 5.19 Área de módulos fotovoltaicos para a demanda residencial

Residencial	TEP (10³)	kWh	m²	ha
Gás Natural	444,5	5,17E+09	2,02E+07	2.020
Gás Liquefeito de Petróleo	6.740,0	7,84E+10	3,06E+08	30.639
Querosene	1,6	1,86E+07	7,25E+04	7
Total	7.186,0	8,36E+10	3,27E+08	32.666

Fonte: BEN (2021)

Observa-se, então, que, para substituir a mesma energia utilizada pelo gás natural, gás liquefeito de petróleo e querosene utilizado nas residências brasileiras, basta uma fazenda com uma área de módulos fotovoltaicos com 32.666 hectares, e considerando que o estado de São Paulo tem 24.820.900 hectares, basta uma pequena porção de 0,13% do território desse estado para a substituição.

Em relação ao setor dos transportes, produtos como gás natural, óleo diesel, óleo combustível, gasolina automotiva, gasolina de aviação e querosene poderiam ser substituídos no mesmo cenário limite utilizado nas residências, conforme se obteve com base na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 Área de módulos fotovoltaicos para a demanda dos transportes

Transportes	TEP (10³)	kWh	m²	ha
Gás Natural	1.658,7	1,93E+10	7,54E+07	7.540
Óleo Diesel	35.200,2	4,09E+11	1,60E+09	160.013
Óleo Combustível	826,6	9,61E+09	3,76E+07	3.758
Gasolina Automotiva	20.136,5	2,34E+11	9,15E+08	91.536
Gasolina de Aviação	29,8	3,46E+08	1,35E+06	135
Querosene	1.894,7	2,20E+10	8,61E+07	8.613
Total	59.746,4	6,95E+11	2,72E+09	271.596

Fonte: BEM (2021)

Percebe-se que o consumo energético de combustíveis fósseis do setor de transporte é maior que o gasto residencial, e nessa análise estão compilados os transportes terrestres, aquaviários e aéreos. A área necessária dos módulos é de 271.596 hectares, 1,09% da área do estado de São Paulo.

Aplicando o mesmo cenário limite para a oferta interna de energia, com as fontes não renováveis sendo classificadas como petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e coque e outras fontes não renováveis, obtém-se a Tabela 5.21.

Tabela 5.21 Área de módulos fotovoltaicos para a oferta interna de energia

Oferta interna	TEP 10³	kWh	m²	ha
Petróleo e Derivados	95.246,9	1,11E+12	4,33E+09	432.974
Gás Natural	33.824,0	3,93E+11	1,54E+09	153.758
Carvão Mineral e Coque	13.954,9	1,62E+11	6,34E+08	63.436
Outras Não Renováveis	1.838,0	2,14E+10	8,36E+07	8.355
Total	144.863,8	1,68E+12	6,59E+09	658.523

Fonte: BEM (2021)

E, no cenário limite, onde todas as matrizes energéticas fósseis são substituídas por módulos fotovoltaicos, a fim de ofertar a mesma quantidade energética, a área necessária para o montante dos módulos é de 658.523 hectares, um montante equivalente a apenas 2,65% da área do estado de São Paulo. Quando se compara à área territorial brasileira, tal proporção fica ainda menor, aproximadamente 0,08% do território nacional. Sabendo que a cana-de-açúcar necessita de 45,8 vezes a área dos módulos fotovoltaicos para produzirem a mesma capacidade de trabalho, estima-se que a produção de cana-de-açúcar deveria ser acrescida de 30,2 milhões de hectares, o equivalente a 11% da das pastagens brasileiras.

Os números supracitados parecem animadores para o módulo fotovoltaico, mas há alguns pontos a serem discutidos que são desfavoráveis à substituição total das fontes fósseis por módulos fotovoltaicos.

A malha elétrica brasileira deve ser alimentada constantemente, apresentando picos de consumo energético em algumas horas do dia; o módulo fotovoltaico não produz energia a todo o momento, apenas quando recebe radiação solar, evidenciando a uma fraqueza do sistema fotovoltaico, pois ele não atenderá diretamente à demanda energética brasileira em determinados horários e em dias de baixa incidência solar. Para resolver essa questão, sistemas de armazenamento de energia são necessários, ao contrário do etanol, que já é energia armazenada quimicamente. Utilizar baterias não parece uma solução viável, conforme demonstram Fusco, Seixas e Mady (2023), isto é, que as baterias têm bastante impacto ambiental durante a sua produção, emitindo grandes quantidades de CO₂ equivalente. Métodos alternativos de armazenamento de energia, como por exemplo, bombear água para barragens elevadas, podem contornar os impactos das baterias, porém apresentam ineficiências que demandariam uma área fotovoltaica maior.

Apesar da pequena área das fazendas fotovoltaicas, quando comparada ao território nacional, ainda se trata de um número de módulos muito alto: se forem considerados módulos com 2 m² de área útil, são necessários, segundo os cálculos realizados acima, aproximadamente 3,3 bilhões de módulos para a substituição dos fósseis na demanda interna de energia, além de milhões de inversores e outros equipamentos imprescindíveis para o funcionamento dessa fazenda ambientada no cenário limite, o que se traduz em um investimento gigantesco e uma enorme demanda de materiais, como silício e alumínio.

Os módulos têm uma vida útil de aproximadamente 20 anos, cuja eficiência energética diminui anualmente, por isso, seria necessário um aumento no número de módulos para atender à demanda energética, e após 20 anos seria preciso dar um destino adequado para as placas, seja a reciclagem, ou a extensão da vida útil em aplicações secundárias.

Nota-se que a completa substituição das fontes fósseis por módulos fotovoltaicos não é viável, sendo o etanol uma alternativa melhor para complementar os módulos, pois o armazenamento é bem mais simples, o investimento é menor e não demanda de reciclagem. Os módulos fotovoltaicos devem, sim, representar uma parcela na matriz energética brasileira, principalmente em locais de grande consumo energético já ocupados com construções, como as cidades, no formato de geração distribuída.

5.5.3 Combustíveis sustentáveis

A terceira ação trata da substituição dos combustíveis fósseis e da utilização de energia limpa, para a qual se visa promover as energias renováveis, acelerar a implantação de hidrogênio, expandir a utilização de biometano, reduzir o consumo de combustíveis fósseis da indústria e dos transportes e reduzir a burocracia para projetos de fontes energéticas e inovações. A cana-de-açúcar e os módulos fotovoltaicos têm grande potencial de implementação para executar essas ações, como já dito: das biorrefinarias podem ser retirados tanto a energia elétrica como o biometano, combustíveis da indústria, e nos transportes pode-se utilizar biometano, hidrogênio verde, energia elétrica e etanol.

Um incentivo governamental pode promover a implementação de geração distribuída de usinas solares, ou mesmo grandes estações de geração termossolar, de tal forma que a fatia

da geração atual proveniente de combustíveis fósseis seja dispensável. Substituir o gás natural por biogás, exigir uma cota de veículos elétricos no setor de transporte público e uma cota de geração própria para empresas pode contribuir com a substituição dos fósseis, além de incentivar ainda mais essas tecnologias.

No setor de transportes leves, incentivar os veículos elétricos, apesar do alto custo de aquisição, pode ser uma alternativa. Por outro lado, a substituição total da gasolina pelo etanol se mostra mais acessível, porém quase inviável pela quantidade de etanol produzida. Infelizmente, a produção de diesel é atrelada à produção de gasolina, portanto, fazer a substituição completa da gasolina pelo etanol impactaria no setor de carga, então, para resolver essa questão, pode-se optar por fontes alternativas como o etanol, biodiesel, biogás, hidrogênio verde e bioquerosene para os transportes pesados (KOVARSKY *et al.* 2023), bem como combustíveis sintéticos, como o metanol, produzidos a partir da hidrogenação do gás carbônico (LIMA, 2023).

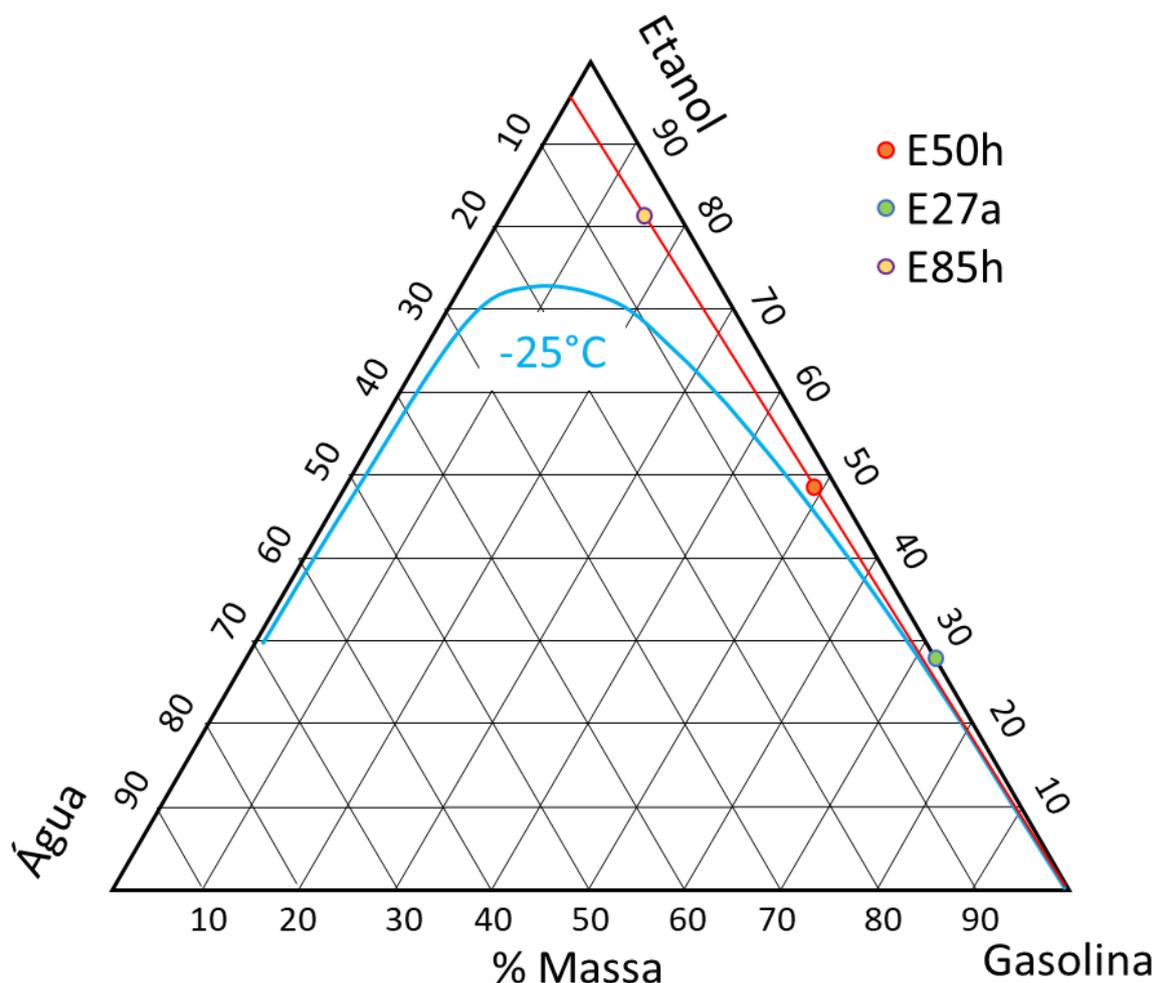
A substituição de diesel por etanol, biogás ou células de hidrogênio seria uma alternativa para tornar os meios de produção da cana-de-açúcar ainda mais sustentáveis. A esse respeito, Sousa (2023) aponta que parte do diesel poderia ser substituído por biometano proveniente de biodigestores de resíduos agrícolas, complementando que o Brasil aproveita apenas 2% do potencial desses resíduos, e que, se apenas os dejetos dos suínos fossem aproveitados, seria suficiente para substituir o equivalente a 2,5 bilhões de litros de diesel, valor que representa 4% da demanda nacional de 2021 (ANP, 2022b). Abastecer uma máquina com um combustível líquido parece ser muito vantajoso pela facilidade e rapidez do reabastecimento, tornando interessante a proposta de Hungria, Sanches e Moscibrocki (2022), qual seja, a de utilizar reformadores de etanol para produção de hidrogênio que é enviada para uma célula de combustível do tipo óxido sólido e, assim, produzir energia elétrica.

Yamamoto (2023) divulga que a USP terá a primeira estação experimental do mundo de abastecimento de hidrogênio com base no do etanol e, segundo o autor, a estação deve estar operando a partir do segundo semestre de 2024, com uma produção horária de 4,5 quilos de hidrogênio e deve alimentar uma frota composta por um veículo leve e três ônibus, que irão operar dentro da Cidade Universitária. E ainda de acordo com o autor, a estação de hidrogênio é uma parceria entre centros de pesquisas e empresas privadas, o que indica a viabilidade do uso do etanol para produção de hidrogênio e a utilização desse gás como alternativa para o

transporte pesado equipado com células de combustível. Todavia, se trata de uma tecnologia em desenvolvimento, cuja eficácia ainda não está comprovada.

Voltando aos transportes leves, uma observação importante deve ser feita sobre a gasolina comercializada no Brasil: contendo 27%, em volume, de etanol anidro, essa gasolina pode ser misturada em qualquer proporção com o etanol hidratado no abastecimento dos veículos *flex*, sem a separação da mistura em duas fases, o que pode ser verificado nos estudos de Johansen e Schramm (2009), nos quais analisaram a miscibilidade da gasolina com etanol e água na temperatura de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e na temperatura de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, apresentada na Figura 5.14 que descreve a separação de fase entre etanol, água e gasolina. Outro combustível que contém uma mistura de etanol anidro e gasolina é o E85 comercializado nos EUA, e que apresenta parte das vantagens dos biocombustíveis ante a gasolina, em relação à descarbonização, e ainda contorna o baixo desempenho do etanol em temperaturas baixas. O E85 apresenta um ponto de fulgor de $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ (GLOBALP, 2016), porém o ponto de fulgor elevado não é um problema para os veículos *flex* brasileiros, pois a tecnologia aplicada nesses motores é capaz de trabalhar com o etanol hidratado que apresenta um ponto de fulgor de $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ (SPENCER e COLONNA, 2002). Utilizar gasolina ainda se justifica, pois a produção atual do biocombustível não é suficiente para suprir toda a demanda nacional, gasolina mais etanol, portanto, aumentar gradativamente a proporção de etanol no combustível brasileiro auxilia na transição energética do País. Observa-se que tanto o E27 brasileiro quanto o E85 vendido nos EUA utilizam etanol anidro na composição, e para cada kg de etanol hidratado usado na produção do etanol anidro são destruídos 55,3 Wh de exergia. Nesse caso, utilizar etanol hidratado na mistura com gasolina pode ser uma vantagem exérgica e econômica, já que a desidratação do etanol hidratado não seria mais necessária, porém a miscibilidade desse combustível misto deve receber atenção, o que se detalha na Figura 5.20:

Figura 5.20 Miscibilidade entre etanol, gasolina e água, autoria própria, adaptado de Johansen e Schramm (2009)



Na Figura 5.20, a curva formada pela linha azul representa a divisão entre uma e duas fases para a temperatura de -25°C , temperatura suficiente para cobrir as condições térmicas do Brasil. O ponto E27a representa o combustível atual utilizado no Brasil, 27% de etanol anidro e 73% de gasolina; a linha vermelha representa todas as possíveis misturas de gasolina pura com etanol hidratado, 4% de água em massa. O ponto E50h representa uma mistura de 50% de etanol hidratado e 50% de gasolina. Observa-se que essa mistura está distante da formação de duas fases, representando segurança de miscibilidade, já o ponto E85h representa uma mistura de 85% de etanol hidratado e 15% de gasolina, similar ao E85 dos EUA. Esses pontos mostram que há a possibilidade de um combustível com grandes proporções de biocombustível, sem a

necessidade de desidratar o etanol. Sobre a água presente nesses combustíveis, Kyriakides *et al.* (2013), ao estudarem um motor trabalhando com um combustível contendo 60% de gasolina, 36% de etanol e 4% de água, observaram reduções significativas nas emissões de óxidos de nitrogênio, quando comparado ao uso de um combustível contendo 60% de gasolina e 40% de etanol anidro. Portanto, além de um menor preço, em decorrência da retirada de um processo químico e de evitar a destruição de exergia no processo de desidratação, utilizar uma mistura de etanol hidratado com gasolina pode gerar benefícios na emissão de gases de efeito estufa.

Os veículos brasileiros apresentam benefícios fiscais, se forem do tipo *flex*, porém esse benefício está ligado apenas à possibilidade de utilizar gasolina ou etanol no tanque, não favorecendo a utilização do biocombustível, que apresenta descarbonização; portanto, aumentar gradualmente a porcentagem de etanol na gasolina torna-se uma alternativa mais adequada do que os benefícios para veículos *flex*. Para o cenário dos incentivos fiscais serem mais efetivos, deve-se atribuir, além do já existente, menores taxas para veículos puramente a etanol.

Kovarsky e outros autores (2023) estimam que, em termos de descarbonização, a cana-de-açúcar terá um potencial dez vezes maior que a energia solar, podendo atingir 196 toneladas de CO₂ por hectare. Os autores também afirmam que o etanol pode ser uma plataforma de produção de combustíveis limpos para embarcações, aviões e na produção de plásticos. Promover a descarbonização, ser uma plataforma para novos combustíveis do setor aéreo e naval, além de já ser um combustível estabelecido, tornam o etanol da cana-de-açúcar uma forma valiosa de atender à quarta e à quinta ações do REPowerEU.

A substituição de veículos a combustão por elétricos pode ser uma alternativa viável, dependendo da matriz energética, porém, como Fusco, Seixas e Mady (2023) afirmam, no cenário brasileiro o veículo elétrico precisa ser utilizado por mais de 200 mil quilômetros para começar a ter uma vantagem em descarbonização ante o veículo a combustão abastecido com etanol. O que mostra que, para o cenário brasileiro, veículos elétricos não são a melhor solução, uma vez que há o etanol como alternativa mais barata, já consolidada e que apresenta melhor descarbonização.

5.5.4 Investimentos inteligentes

As últimas ações propostas pelo REPowerEU visam realizar investimentos nos setores corretos e preparar as reservas energéticas para uma transição bem planejada. Apesar de ser bem menos eficiente que os módulos fotovoltaicos, a cana-de-açúcar mostra vantagens que podem ser exploradas, durante a transição entre os combustíveis fósseis e a energia renovável. O plantio fácil e bem dominado pelo Brasil, a estrutura já existente para a produção e utilização do etanol e o potencial de descarbonização podem ser um importante passo para a transição e, quando a substituição dos fósseis estiver bem estabelecida, será possível mudar a direção dos esforços para soluções mais eficientes.

Observa-se que o etanol é uma das chaves para um futuro sustentável no Brasil, seja como uma medida de transição ou uma alternativa energética, portanto, a precificação do etanol deve ser tratada com mais critério. Há fortes indícios de que o preço praticado nas bombas do etanol é baseado apenas no preço da gasolina e não nos custos de produção desse combustível. Um etanol mais barato que os 70% do preço da gasolina gera interesse dos consumidores, fortalecendo a indústria de etanol e diminuindo o uso do combustível fóssil.

No dia 11 de agosto de 2023, o governo brasileiro lançou um novo programa de aceleração do crescimento denominado Novo PAC (2023), o qual prevê um investimento de 1,7 trilhões de reais em vários eixos de investimento. Desse montante, 540,3 bilhões de reais são destinados à transição e segurança energética, cerca de 32%, um número animador e que condiz com o cenário internacional na busca de matrizes energéticas sustentáveis. Porém, dos 540 bilhões destinados à energia, 335,1 bilhões de reais serão investidos em petróleo e gás, ou seja, 62% dos investimentos serão aplicados em combustíveis fósseis, atitude que vai contra as necessidades globais, pois, cada vez mais se observa a busca pela independência dos combustíveis fósseis e investimento em fontes sustentáveis. O Novo PAC (2023) cita os poços de alta produtividade localizados na costa brasileira e promove a exploração de petróleo, o que equivale a favorecer a emissão de gases do efeito estufa na atmosfera, em um momento que há preocupações com as mudanças climáticas, e o mundo faz esforços para manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2 °C (DESA, 2016). Investir em petróleo e gás se mostra contrário às necessidades globais, por conseguinte, diante das demandas climáticas atuais, é

essencial diminuir a prioridade dos combustíveis fósseis, apesar da sua alta densidade energética.

Quanto aos investimentos do Novo PAC (2023) em combustíveis de baixo carbono, como o etanol, que este trabalho sugere como alternativa para a transição energética, serão de 26,1 bilhões de reais, o que representa apenas 4,8% dos 540 bilhões, uma porcentagem aquém do esperado para as alternativas energéticas. Vale ressaltar que o investimento em usinas eólicas, 22 bilhões, e em usinas fotovoltaicas, 41,5 bilhões, complementam os combustíveis de baixo carbono, porém, nos investimentos em energia sustentável, esse montante de 89,6 bilhões de reais representa cerca de 16% dos investimentos em transição e segurança energética, muito distante dos 62% destinados ao petróleo e gás.

Se o governo ajustar o Novo PAC (2023) para transferir parte dos recursos que serão aplicados em petróleo e gás em combustíveis de baixo carbono e geração de energia sustentável, pode-se aumentar a produção de etanol, visto que a conversão de 3,1% das pastagens em plantações pode dobrar a produção atual do biocombustível (BIOENERGY, 2023), para a substituição da gasolina e aproveitar o potencial de descarbonização do combustível de cana (FUSCO, SEIXAS e MADY, 2023). E também aumentar a produção de biometano proveniente de biodigestores de resíduos agrícolas, que têm potencial para substituir 2,5 bilhões de litros de diesel, apenas com os dejetos dos suínos (SOUSA, 2023), além de estimular a pesquisa e desenvolvimento sobre o etanol, como já acontece com a produção de hidrogênio a partir do biocombustível (YAMAMOTO 2023).

Sabe-se que a indústria do petróleo tem grande poder aquisitivo e influência política; tentar ir contra essa potência será muito custoso e em vão. Visto isso, e aceitando que a extração do petróleo não vai cessar instantaneamente, pode-se imaginar alternativas para essa realidade com o intuito de utilizar a indústria petroleira para acelerar a transição energética. Pode-se utilizar os lucros provenientes dos combustíveis fósseis para impulsionar o desenvolvimento de fontes de energia renovável, à medida que avançamos rumo à autossuficiência em energia limpa, pode-se impor taxas crescentes nos produtos fósseis no mercado interno, desestimulando o seu consumo e tornando as fontes limpas ainda mais atrativas. Essa tributação adicional pode gerar um excedente de produtos fósseis que, por sua vez, pode ser exportado, com os lucros reinvestidos em fontes de energia sustentável. Portanto, embora o investimento em petróleo e gás no Novo PAC seja quatro vezes maior do que o destinado às fontes limpas, essa estratégia

tem o potencial de gerar resultados positivos para o Brasil, preparando o país para uma transição energética bem-sucedida, desde que os investimentos e recursos sejam aplicados de forma inteligente. Com uma indústria do petróleo focada em alimentar as fontes renováveis, a transição se torna segura, gradual e controlada.

O Brasil tem o domínio da produção de etanol de cana-de-açúcar, o que é bem mais vantajoso que a produção de etanol a partir do milho ou da beterraba (MANOCHIO *et al*, 2017), vantagem que deve ser explorada. Ademais, investimento em pesquisa e desenvolvimento, bem como a ampliação da produção devem ser feitos para que o País se mantenha na liderança desse biocombustível e siga um caminho com as alternativas energéticas condizentes com o cenário nacional.

6 Conclusões

Esse trabalho propôs um modelo que avaliasse a qualidade da conversão da energia em diversos processos metabólicos da cana-de-açúcar, com o intuito de avaliar e adaptar resultados já existentes na literatura, por meio do método BRCANE para as condições ambientais da cidade de Campinas-SP. Dessa forma, foi possível obter um modelo mais simples que o original, mas que ainda apresenta resultados pertinentes, porém levando-se em conta as reações metabólicas e transferências de calor e massa de forma mais precisa.

Realizando uma simulação com um ciclo de 52 semanas com o plantio sendo realizado na 49ª semana do ano, semana de maior produtividade, obteve-se uma produção máxima de 81 toneladas por hectare de colmos de cana, junto a uma produtividade de 11,2 toneladas por hectare de palha, valores em base úmida.

A proposta para o consumo hídrico também se mostrou aderente à literatura, pois a simulação mostrou um consumo hídrico máximo de 8970 m³/hectare, durante todo o ciclo da cultura. Esse volume hídrico representa uma necessidade de 110,7 litros de água para a produção de um quilograma de colmo, bem como as raízes e palha adjacentes a esse colmo.

Vale lembrar que tanto a produção quanto o consumo hídrico são os teóricos máximos, podendo ser alterados, dependendo dos fatores externos à cultura. A estimativa da produção de palha também foi condizente com a literatura nas porcentagens de palha e folhas verdes observadas, 14%, atingindo ao final da simulação a massa, em base seca, de aproximadamente 2.600 kg por hectare de folhas verdes e 7.500 kg por hectare de palhada. Quanto ao início da produção de palhada, também houve concordância com a literatura, ocorrendo o início da produção de folhas secas a partir de 490 graus dias.

Mesmo sendo otimista em relação à cana-de-açúcar, este estudo mostrou expressiva vantagem para o fotovoltaico, opção mais eficiente exergeticamente para o uso do solo. Enquanto a cana-de-açúcar conseguiu uma eficiência exergetica de aproximadamente 3,15% ao longo do cultivo, o módulo fotovoltaico manteve um patamar de 30,9%. Se forem considerados apenas os produtos úteis, a eficiência do módulo fotovoltaico cai para 17,8%, ou 255,84 kWh/m²ano, gerada apenas pela produção de energia elétrica. Já os produtos úteis da cana-de-açúcar, colmo e palha, geram uma eficiência de apenas 1,21%, o que equivale a 17,86 kWh/m² por ano.

Adicionando ainda os processos envolvidos na biorrefinaria, para transformar a cana-de-açúcar em produtos de valor agregado, a eficiência diminui ainda mais, ou seja, a eficiência global que antes era 3,2% passa para valores entre 2,50% e 2,54%, dependendo do modelo de biorrefinaria escolhido para o tratamento da vinhaça.

Apoiando-nos nos resultados desse modelo, pode-se concluir que utilizar a terra para cultivar cana é uma opção viável, de fácil implementação, e que fornece energia que pode ser utilizada facilmente pela infraestrutura já existente no País, porém essa forma de utilização de solo e energia não é a mais eficiente exergética e energeticamente. Questões econômicas não foram avaliadas por este trabalho, bem como as comparações dos impactos ambientais das alternativas de uso do solo. Desse modo, afirma-se que, do ponto de vista exergético, a implementação de módulos fotovoltaicos, ou usinas de fonte solar mais eficientes, é mais vantajosa que cultivar cana de açúcar.

Em paralelo à análise de uso de solo foi realizado uma breve discussão das alternativas para diminuir o gasto energético e a dependência dos combustíveis fósseis; neste ponto, o cultivo de cana-de-açúcar apresenta vantagens significativas no contexto da redução da dependência dos combustíveis fósseis no Brasil. Através da produção de etanol e geração de energia fotovoltaica, é possível alcançar ganhos exergéticos expressivos. Ações de poupança de energia, como a diminuição do uso de ar-condicionado, aquecedores e chuveiros, contribuem para reduzir a necessidade de grandes áreas de produção de energia, cana-de-açúcar ou módulos fotovoltaicos, fortalecendo o setor energético. Além disso, a mudança comportamental na condução de veículos, incentivando a condução econômica, pode reduzir significativamente o consumo de combustíveis. E a substituição gradual dos combustíveis fósseis pelo etanol da cana-de-açúcar também se apresenta como uma alternativa viável de descarbonização. A cana-de-açúcar, portanto, pode ser uma solução importante durante a transição para fontes de energia mais limpas e eficientes no Brasil.

6.1 Limitações e visão geral deste trabalho

Este trabalho deixa claro que a aplicação dos métodos de produção de cana-de-açúcar não prevê nenhum estresse hídrico, desnutrição, pragas ou lesões na cultura, sendo a estimativa

de produção a máxima possível, o que possibilita o ajuste do modelo para computar os fatores que diminuam a produtividade e, assim, aproximar a estimativa de produção para a produção real.

O intervalo entre as interações da simulação para este trabalho foi de sete dias. Tal procedimento resultou em uma produtividade média para esse intervalo de tempo e sendo possível reduzir esse *timestep* para valores menores, como horas ou minutos, afinando, assim, a malha e obtendo resultados mais precisos. Com um *timestep* mais refinado pode-se avaliar, por exemplo, as eficiências da cana-de-açúcar para cada hora do dia.

A interação entre a planta e o solo, no que diz respeito à absorção de nutrientes não foi considerada na análise exergética, mas pode-se implementar essa interação, a fim de aproximar ainda mais o modelo a uma planta real.

O modelo de biorrefinaria não apresenta perdas ou falhas que possam diminuir a eficiência, o que abre espaço para a implementação das imperfeições da instalação, bem como a manipulação da cana-de-açúcar, desde o plantio até o transporte para a biorrefinaria, que não apresenta perdas em nenhuma etapa.

A simulação apresentada foi validada para algumas variedades de cana-de-açúcar, sendo necessário algumas alterações no modelo para se adequar a novas variedades. Caso se desenvolva uma planta mais eficiente e com mais produção de açúcar, o modelo pode se tornar defasado. Porém, como a vantagem exergética dos módulos fotovoltaicos é muito maior do que a da cultura de cana, os resultados apresentados neste trabalho não teriam alterações significativas qualitativamente.

O trabalho mostrou que, do ponto de vista exergético, a utilização do solo por usinas solares se mostra muito mais vantajosa do que o plantio de cana-de-açúcar. Porém, avaliações de pegada de carbono, pegada hídrica, econômica, impacto ambiental e social, devem ser realizadas para definir, por uma análise mais ampla, qual a melhor alternativa para o uso do solo, sendo essas as sugestões para trabalhos futuros. Contudo, realizar a substituição total da cana-de-açúcar por usinas solares não se mostra adequada por este trabalho, devendo-se fazer primeiro uma análise do ciclo de vida da cana-de-açúcar para avaliar os impactos ambientais, sociais e aspectos econômicos dessa substituição. A cana-de-açúcar tem mostrado um efeito imediato de descarbonização promissor (FUSCO, SEIXAS & MADY, 2023), fator que está a seu favor, bem como os outros produtos derivados da cana, como a cachaça, açúcar, caldo de

cana e rapadura, que são consumidos pela população e tornam a produção da planta ainda necessária.

Referências

AGHBASHLO, Mortaza *et al.* **Exergy analysis of a lignocellulosic-based biorefinery annexed to a sugarcane mill for simultaneous lactic acid and electricity production.** *Energy*, v. 149, p. 623-638, 2018.

AKYUZ, E. *et al.* **A novel approach for estimation of photovoltaic exergy efficiency.** *Energy*, v. 44, n. 1, p. 1059-1066, 2012.

ALMEIDA, M. **Vinhaça - Principais técnicas de utilização.** 2015. Disponível em: <<https://www.piracicabaengenharia.com.br/vinhaca-principais-tecnicas-de-utilizacao/>>. Acesso em: 2 dez. 2022.

AMADEI, C. A. *et al.* **Simulation of GEMASOLAR-based solar tower plants for the Chinese energy market: influence of plant downsizing and location change.** *Renewable energy*, v. 55, p. 366-373, 2013.

ANDRADE, Luís Cláudio Lopes *et al.* **New Paradigm for Vinasse Use as Fertilizer in Hydroponics.** *Sugar Tech*, p. 1-12, 2022.

ANDREOLI, C. *et al.* **Sugarcane: The best alternative for converting solar and fossil energy into ethanol.** *Economia e Energia*, v. 9, 2006.

ANEEL. **Leilão de Energia Nova A-5 tem edital aprovado e está confirmado para 16 de setembro.** Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/leilao-de-energia-nova-a-5-tem-edital-aprovado-e-esta-confirmado-para-16-de-setembro>>. Acesso em: 14 out. 2022.

ANP, Agência Nacional do Petróleo. **Série histórica do levantamento de preços.** 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/serie-historica-do-levantamento-de-precos>>. Acesso em: 30 de maio de 2022.

ANP. **Vendas de derivados de petróleo e biocombustíveis.** 2022b. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/vendas-de-derivados-de-petroleo-e-biocombustiveis>>. Acesso em: 06 de set. de 2022.

ARAUJO, Geraldo Jose Ferraresi de; OLIVEIRA, Sonia Valle Walter Borges de. **Análise de viabilidade econômica financeira do uso de vinhaça para geração de energia elétrica no Brasil.** *Cadernos EBAPE. BR*, v. 18, p. 936-955, 2021.

ARNOLD, Charles Y. *et al.* **The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system.** In: *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 1959. p. 430-445.

ASSUNCAO, Hildeu Ferreira da. **Relações entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global em Piracicaba-SP**. 1995. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ATTORRE, F.; SCIUBBA, E.; VITALE, M. **A thermodynamic model for plant growth, validated with Pinus sylvestris data**. Ecological Modelling, v. 391, p. 53-62, 2019.

BARBIERI, Valter. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (Saccharum spp)**. 1981. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BARBIERI, Valter. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (Saccharum spp.): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BARBIERI, Valter; DA SILVA, Fabio César; DIAS-AMBRONA, Carlos Gregorio Hernandez. **Modelagem de cana de açúcar para previsão de produtividade de canaviais no Brasil e na Austrália**. 2010

BARDELIN, Cesar Endrigo Alves. **Os efeitos do racionamento de energia elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no consumo de energia elétrica**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BARNARD, Phoebe. **Hyper-miling**. 2009

BARTH, Matthew; BORIBOONSOMSIN, Kanok. Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 14, n. 6, p. 400-410, 2009.

BASSAN, Telma Aparecida Meneghette dos Santos. **Análise das equações de eficiência de inversores fotovoltaicos através de comparativos teóricos e práticos**. 2017.

BAYRAK, Fatih; ERTÜRK, Gamze; OZTOP, Hakan F. **Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels**. Journal of cleaner production, v. 164, p. 58-69, 2017.

BETTANI, Silvia Raquel *et al.* **Sugarcane vinasse and microalgal biomass in the production of pectin particles as an alternative soil fertilizer**. Carbohydrate polymers, v. 203, p. 322-330, 2019.

BIOENERGY, I. E. A.; TASK, 39. **Biofuels in Emerging Markets**. Feb. 2023.

BOLTON, James R.; HALL, David O. **The maximum efficiency of photosynthesis**. Photochemistry and Photobiology, v. 53, n. 4, p. 545-548, 1991.

BRAY, Sílvio Carlos; FERREIRA, Enéas Rente; RUAS, Davi Guilherme Gaspar. **As políticas da agroindústria canavieira e ao proálcool no Brasil**. Editora Oficina Universitária, 2000

BYD. 2019. **P6K-36SÉRIE-5BB**. Disponível em: <https://www.byd.ind.br/2020/wp-content/uploads/2020/09/P6K_36_SERIE_5BB_pnl_solar_byd_01_020320.pdf> Acesso em: 09 out 2022.

CARVALHO, C. A. **Ocupação e uso de terras no Brasil a partir do Cadastro Ambiental Rural-CAR**. 2017.

CECHIN, Kalcia Graminho. **Os impactos da crise energética de 2001 e seus reflexos em usos alternativos de energia: uma revisão Bibliográfica**. 2017.

CEPEAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura – UNICAMP. 2021c. Disponível em: <<https://www.cpa.unicamp.br/graficos>>. Acesso em: 27 abr. 2021.

CLIMATE-DATA. Disponível em:<<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/campinas-745/#climate-table>>. Acesso em 24 nov. 2022.

CONTRERAS, Ana M. *et al.* **Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production**. Journal of Cleaner Production, v. 17, n. 8, p. 772-779, 2009.

COSTA, Suellen Caroline Silva *et al.* **análise energética e exergética de sistemas fotovoltaicos e térmicos**. 2014

CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. 2000. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=2>>. Acesso em: 27 abr. 2021.

DA SILVA, Fábio Cesar; ALVES, Bruno Jose Rodrigues; DE FREITAS, Pedro Luiz (Ed.). **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Embrapa, 2015.

DE GÓES-FAVONI, Silvana Pedroso *et al.* **Fermentação alcoólica na produção de etanol e os fatores determinantes do rendimento**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 9, n. 4, p. 285-296, 2018.

DESA, U. N. *et al.* **Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development**. 2016.

DO AMARAL, Adriane Leite; DOS SANTOS, João Messias; DE SOUZA BARBOSA, Geraldo Veríssimo. **Denominação de Cultivares de Cana-de-Açúcar como Suporte à Documentação e Utilização do Germoplasma Conservado**. Embrapa Tabuleiros Costeiros-Documentos (INFOTECA-E), 2015.

DO NASCIMENTO, Kellyana Siqueira *et al.* **Análise exergética de biorrefinaria de cana-de-açúcar em paralelo a usina sucroalcooleira tradicional**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 9, p. 70293-70310, 2020.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Irrigation and drainage paper, n. 33, p. 257, 1979.

DOS SANTOS, Marco Aurélio. Energy **Analysis of crops used for producing ethanol and CO₂ emissions**. The International Virtual Institute of Global Change (IVIG), 1997.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar engineering of thermal processes**. John Wiley & Sons, 2013.

ELIA NETO, A. *et al.* **Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética**. ANA, Brasília, 2009.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] **Balanco Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2020**. Disponível em < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 16 de abr. de 2022

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. 2020. **Demanda de energia dos veículos leves: 2021 – 2030**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/demanda-de-energia-dos-veiculos-leves>>. Acesso em: 06 de set. de 2022.

FARIAS, Carlos H. de A. *et al.* **Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba**. Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental, v. 12, p. 356-362, 2008.

GARCIA, Matheus M. *et al.* **Exergy analysis and human body thermal comfort conditions: evaluation of different body compositions**. Entropy, v. 20, n. 4, p. 265, 2018.

GARCÍA-VALVERDE, R. *et al.* **Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system**. Solar energy, v. 83, n. 9, p. 1434-1445, 2009.

GLOBALP. **Safety data sheet E85 Ethanol/Gasoline Blend**. 2016. Disponível em < https://www.globalp.com/wp-content/uploads/2019/10/SDS_E85_Ethanol_Gasoline_Blend_Final.pdf> Acesso em: 4 de ago de 2023.

GONG, Mei; WALL, Göran. **Life cycle exergy analysis of solar energy systems**. Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications, v. 5, n. 1, 2014.

GONZÁLEZ, Luis; MEJÍA, Miguel. **Impact of Ferti-Irrigation with Vinasse on Groundwater Quality**. Irrigation and Drainage, v. 64, n. 3, p. 400-407, 2015.

GONZÁLEZ-ROUBAUD, Edouard; PÉREZ-OSORIO, David; PRIETO, Cristina. Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 80, p. 133-148, 2017.

HEEMST, H. D. J. V. **Physiological principles**. In: Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Pudoc, 1986. p. 13-26.

HUNGRIA, Luiz Henrique; DOS SANTOS SANCHES, Vinícius; MOSCIBROCKI, Camila. **Utilização de células de biocombustível movidas a etanol para trens de carga.** 2022

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Área territorial.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?t=acesso-ao-produto&c=1>>. Acesso em 06 Out. 2022

IEA. **How Europe can cut natural gas imports from Russia significantly within a year - News.** International Energy Agency, 2022a. Disponível em: <<https://www.iea.org/news/how-europe-can-cut-natural-gas-imports-from-russia-significantly-within-a-year>>. Acesso em: 06 de set. de 2022

IEA. **Playing [My Part.** How to save money, reduce reliance on Russian energy, support Ukraine and help the planet. International Energy Agency. 2022b. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/playing-my-part>>. Acesso em: 06 de set. de 2022

IEA. **Supply – Key World Energy Statistics 2021 – Analysis.** International Energy Agency, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply#oil>>. Acesso em: 15 de jul. de 2022.

INDEX MUNDI. **Petróleo bruto - Preço Mensal (Real brasileiro por Barril) - Preços das Mercadorias.** 2022 Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/pt/pre%E7os-de-mercado/?mercadoria=petr%C3%B3leo-bruto&meses=360&moeda=brl>>. Acesso em: 30 de maio de 2022.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia.** 1992. Disponível em <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 09 ago. 2022.

JOHANSEN, Troels; SCHRAMM, Jesper. **Low-temperature miscibility of ethanol-gasoline-water blends in flex fuel applications.** Energy Sources, Part A, v. 31, n. 18, p. 1634-1645, 2009.

JORGENSEN, Sven Erik; SVIREZHEV, Yuri M. **Towards a thermodynamic theory for ecological systems.** Elsevier, 2004.

KAMATE, S. C.; GANGAVATI, P. B. **Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries.** Applied Thermal Engineering, v. 29, n. 5-6, p. 1187-1194, 2009.

KILLIAN, Ronald. Ecodriving: The science and art of smarter driving. **TR News**, n. 281, 2012.

KOVARSKY, Paula; LOPES, Mateus Schreiner Garcez; SILVA, Fábio Ferreira da; ASANO, Laura Makiko; WERNECK, André Valente; PEREIRA, Samuel Luis Oliveira and EL-ASSAD, Alan Barbagelata. **How tropical countries can accelerate their protagonism in the net zero economy.** 2023

KUMAR, Nallapaneni Manoj *et al.* **Exergy analysis of thin-film solar PV module in ground-mount, floating and submerged installation methods.** Case Studies in Thermal Engineering, v. 21, p. 100686, 2020.

KYRIAKIDES, Alexios *et al.* **Evaluation of gasoline–ethanol–water ternary mixtures used as a fuel for an Otto engine.** Fuel, v. 108, p. 208-215, 2013.

LEAL, Manoel Regis LV; WALTER, Arnaldo Silva; SEABRA, Joaquim EA. **Sugarcane as an energy source.** Biomass Conversion and Biorefinery, v. 3, n. 1, p. 17-26, 2013.

LEEGOOD, Richard C.; SHARKEY, Thomas D.; VON CAEMMERER, Susanne (Ed.). **Photosynthesis: physiology and metabolism.** Springer Science & Business Media, 2006.

LEITE, Nelson da Costa; DELGADO, Marco Antonio de Paiva; HAGE, Fábio Augusto Santana. **Os desafios do armazenamento de energia no setor elétrico.** Revista Boletim da Conjuntura, 2017.

LEMS, Sander. **Thermodynamic explorations into sustainable energy conversion: Learning from living systems.** 2009.

LEONARDOS, E. D.; GRODZINSKI, B. 4.14 **Photosynthesis and Productivity of Vascular Plants in Controlled and Field Environments.** 2011.

LIMA, J. **NASA confirma dados da Embrapa sobre área plantada no Brasil.** Embrapa. 2017 Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/30972114/nasa-confirma-dados-da-embrapa-sobre-area-plantada-no-brasil> >. Acesso em 05 Jul 2022.

LIMA, Tainan Pedro Rodrigues de. **Viabilidade técnico-econômica da produção de metanol via hidrogenação do CO₂.** 2023.

LOPES, Indaia Dias; BASSO, David. **ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ENTRAVES PARA AS EXPORTAÇÕES BRASILEIRAS DE CARNE BOVINA.** Salão do Conhecimento, 2016.

LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven (Ed.). **Handbook of photovoltaic science and engineering.** John Wiley & Sons, 2011.

MACEDO, Isaias C.; SEABRA, Joaquim EA; SILVA, João EAR. **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, n. 7, p. 582-595, 2008.

MACHADO, Eduardo Caruso *et al.* **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (Saccharum sp).** 1981.

MADY, Carlos Eduardo K., OLIVEIRA Jr. S. **Human body exergy metabolism.** International Journal of Thermodynamics, v. 16, n. 2, p. 73-80, 2013.

MALAFAIA, Pedro; CANELLA FILHO, Camillo FC. **VISÃO CRÍTICA DOS ARTIGOS PUBLICADOS NO BRASIL SOBRE A NUTRIÇÃO DE BOVINOS E BUBALINOS TERMINADOS EM CONFINAMENTO OU A PASTO, RECEBENDO OU NÃO SUPLEMENTOS PROTEICO-ENERGÉTICOS**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 17, n. 2, 2020.

MANOCHIO, C. *et al.* **Ethanol from biomass: A comparative overview**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 80, p. 743-755, 2017.

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático**. Embrapa Tabuleiros Costeiros-Documents (INFOTECA-E), 2012.

MARIANI FILHO, Luigi. **Utilização da palha de cana-de-açúcar para aumento da capacidade energética de plantas de utilidades**. TecMec 2006, 2006.

MARINHO, Júlia Fernanda Urbano *et al.* **Sugar cane vinasse in water bodies: Impact assessed by liver histopathology in tilapia**. Ecotoxicology and environmental safety, v. 110, p. 239-245, 2014.

MCADAMS, W. H. **Heat transfer**. McGraw-Hill, New York, v. 1, n. 51, p. 3, 1954.

MELIS, Anastasios. **Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency**. Plant science, v. 177, n. 4, p. 272-280, 2009.

MENDES, R. M. de S.; LUCENA, E. M. P.; MEDEIROS, J. B. L. de P. **Princípios de fisiologia vegetal**. 2. ed. [s.l.] EdUECE, 2015.

MENEZES, Rubéria da Silva Caminha de. **Termodinâmica e o uso eficiente de recursos: análise exérgica de uma biorrefinaria de cana-de-açúcar**. 2015.

MIRANDA, Evaristo Eduardo de. **Áreas cultivadas no Brasil e no mundo**. AgroANALYSIS, v. 38, n. 2, p. 25-27, 2018.

MITCHELL, John W. **Heat transfer from spheres and other animal forms**. Biophysical Journal, v. 16, n. 6, p. 561-569, 1976.

Molliet, D. S., & Mady, C. E. K. (2021). **Exergy analysis of the human body to assess thermal comfort conditions: Comparison of the thermal responses of males and females**. Case Studies in Thermal Engineering, 25, 100972.

MOLLIET, Débora Silva; MADY, Carlos Eduardo Keutenedjian. **Exergy analysis of the human body to assess thermal comfort conditions: Comparison of the thermal responses of males and females**. Case Studies in Thermal Engineering, v. 25, p. 100972, 2021.

MOMČILOVIĆ, V.; DIMITRIJEVIĆ, B.; STOKIĆ, M. **Eco-driving—potentials and opportunities within green logistics**. In: **Proceedings of the 3rd Logistics International Conference LOGIC**. 2017. p. 222-227.

MORAES, Bruna S. *et al.* **Reduction in greenhouse gas emissions from vinasse through anaerobic digestion.** Applied Energy, v. 189, p. 21-30, 2017.

MOREIRA, Catarina. Fotossíntese. **Revista de Ciência Elementar**, v. 1, n. 01, p. 0003, 2013.

MOYA, Contreras *et al.* **Exergetic analysis in cane sugar production in combination with Life Cycle Assessment.** Journal of Cleaner Production, v. 59, p. 43-50, 2013.

MULLER, M. NREL Test & Evaluation PV Performance Modeling Workshop Albuquerque, NM **Measuring and Modeling Nominal Operating Cell Temperature (NOCT).** 2010. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/49505.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2023.

NAKASHIMA, Rafael Nogueira. **Avaliação exergetica da geração e uso de biogás no setor sucroenergético.** no. May, p. 140, 2018.

NELSON, Jacob A.; BUGBEE, Bruce. **Analysis of environmental effects on leaf temperature under sunlight, high pressure sodium and light emitting diodes.** PloS one, v. 10, n. 10, p. e0138930, 2015.

NOAA. Global Monitoring Laboratory - **Carbon Cycle Greenhouse Gases.** 2021. Disponível em: <<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>>. Acesso em: 05 de out. de 2022

NOBEL, Park S. *et al.* **Physicochemical & environmental plant physiology.** Academic press. Fourth Edition, 2009.

Novo PAC. **Novo PAC Desenvolvimento e Sustentabilidade.** 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/casacivil/novopac>>. Acesso em: 16 ago. 2023.

OLIVEIRA, LD da S. *et al.* **Evapotranspiração da cana-de-açúcar cv. VAT 90-212 irrigada por gotejamento subsuperficial no Submédio do Vale São Francisco.** 2015.

OLIVEIRA, Robson A. *et al.* **Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE I.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, p. 549-557, 2012.

OMETTO, José Carlos. **Bioclimatologia vegetal.** Piracicaba: Agronômica Ceres, 1981.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil.** 2021. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 5 set. 2023

PALACIOS-BERECHE, Milagros Cecilia; PALACIOS-BERECHE, Reynaldo; NEBRA, Silvia Azucena. **Comparison through energy, exergy and economic analyses of two alternatives for the energy exploitation of vinasse.** Energy, v. 197, p. 117231, 2020a.

PALACIOS-BERECHE, Milagros Cecilia; PALACIOS-BERECHE, Reynaldo; NEBRA, Silvia Azucena. **Energy and Exergy Cost Analysis of Two Different Routes for Vinasse Treatment with Energy Recovery.** EasyChair, 2020b.

PALACIOS-BERECHE, Reynaldo *et al.* **Exergetic analysis of the integrated first-and second-generation ethanol production from sugarcane.** *Energy*, v. 62, p. 46-61, 2013.

PBE. **Veículos Automotivos (PBE veicular).** Disponível em: <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>>. Acesso em: 31 de maio de 2022.

PEREIRA, Antonio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo Cesar. LCE 306. **Meteorologia Agrícola.** 2007.

PEREIRA, Enio Bueno *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar 2.ed.** São José dos Campos: Inpe, 2017.

Pereira, M. T. R. M., Carvalho, M., & Mady, C. E. K. (2022). **Addressing energy demand and climate change through the second law of thermodynamics and LCA towards a rational use of energy in Brazilian households.** *Entropy*, 24(11), 1524.

PEREIRA, Marina Torelli Reis Martins; CARVALHO, Monica; MADY, Carlos Eduardo Keutenedjian. **Addressing energy demand and climate change through the second law of thermodynamics and LCA towards a rational use of energy in Brazilian households.** *Entropy*, v. 24, n. 11, p. 1524, 2022.

PETELA, Richard. **An approach to the exergy analysis of photosynthesis.** *Solar Energy*, v. 82, n. 4, p. 311-328, 2008.

PETELA, Richard. **Exergy of undiluted thermal radiation.** *Solar energy*, v. 74, n. 6, p. 469-488, 2003.

PINTO, Aimé; ZILLES, Roberto; ALMEIDA, Marcelo. **Eficiência brasileira de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 15, 2011.

PINTO, Luís Fernando Guedes; BERNARDES, Marcos Silveira; PEREIRA, Antônio Roberto. **Yield and performance of sugarcane in on-farm interface with rubber in Brazil.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, p. 251-255, 2006.

QUINTILIANO, Murilo Henrique; PARANHOS DA COSTA, M. J. R. **Manejo racional de bovinos de corte em confinamento: Produtividade e bem-estar animal.** *Anais da IV SINEBOV, Seropédica*, 2006.

RAMPINELLI, Giuliano Arns; KRENZINGER, Arno; ROMERO, Faustino Chenlo. **Análise de características de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede em função da tensão de entrada.** In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2010.

RAWAT, Pratih. **Exergy performance analysis of 300 W solar photovoltaic module.** *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, v. 6, n. 3, p. 381-390, 2017.

REHAGRO. **Cana-de-açúcar: saiba qual a melhor época para o plantio**. 2018 Disponível em: <<https://rehagro.com.br/blog/plantio-da-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 2 jan. 2023.

RENATO, Natalia dos Santos *et al.* **Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 28, p. 382-388, 2013.

REPOWEREU. **REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition**. European Commission, 2022. Disponível em: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131>. Acesso em: 15 de jul. de 2022.

RÍPOLI, Tomaz Caetano Cannavam; MOLINA JR, Walter Francisco; RÍPOLI, Marco Lorenzo Cunali. **Energy potential of sugar cane biomass in Brazil**. Scientia Agricola, v. 57, p. 677-681, 2000.

RÍPOLI, Tomaz Caetano Cannavam; MOLINA JR, Walter Francisco; RÍPOLI, Marco Lorenzo Cunali. **Energy potential of sugar cane biomass in Brazil**. Scientia Agricola, v. 57, p. 677-681, 2000.

RODRIGUES, José Augusto R. **Do engenho à biorrefinaria: a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis**. Química nova, v. 34, p. 1242-1254, 2011.

ROMERO, E. R. *et al.* **Sugarcane potential trash estimation: variety and cane yield effect**. In: Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. 2007. p. 421-425.

ROSSETTO R., SANTIAGO A.D., **Plantio da cana-de-açúcar**, 2022 – Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/manejo/plantio>>. Acesso em: 12 mar. 2022.

Rovai, F. F., da Cal Seixas, S. R., & Mady, C. E. K. (2023). **Regional energy policies for electrifying car fleets**. Energy, 278, 127908.

RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor; BATISTA, Getulio Teixeira. **Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models**. Remote sensing of Environment, v. 33, n. 3, p. 183-192, 1990.

SABOOHI, Y., A. VALERO, and S. AZAMIAN. "Exergy Analysis of a Bio-System: Soil-Plant Interaction." *Entropy (Basel, Switzerland)* 23.1 (2020).

SALAZAR, Klever João Mosqueira. **Uso de água e análise exérgica na produção integrada de etanol de primeira e segunda geração a partir da cana-de-açúcar**. 2012

SALOMON, Karina Ribeiro *et al.* **Cost calculations for biogas from vinasse biodigestion and its energy utilization**. Sugar industry, v. 136, n. 4, p. 217-223, 2011.

SANTOS, Fernando A. *et al.* **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol.** Química nova, v. 35, p. 1004-1010, 2012.

SENTELHAS, Paulo Cesar; ANGELOCCI, Luiz Roberto. **Evapotranspiração.** ESAL/USP. Obtido de http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/Aula8_2012.pdf. Acesso em: 22 nov. 2022.

SHAPIRO, Howard N.; MORAN, Michael J. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** LTC, Ed, v. 6, 2009.

SILVA NETO, Jorge Vinicius; GALLO, Waldyr LR. **Potential impacts of vinasse biogas replacing fossil oil for power generation, natural gas, and increasing sugarcane energy in Brazil.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 135, p. 110281, 2021.

SILVA, Cory S.; SEIDER, Warren D.; LIOR, Noam. **Exergy efficiency of plant photosynthesis.** Chemical engineering science, v. 130, p. 151-171, 2015.

SILVA, Fabio Cesar *et al.* **Development of ecophysiological simulation model to estimate a potential productivity of sugar cane in Brazil and Australia.** Revista Biociências, v. 24, n. 1, 2018.

SILVA, Tatiane Caetano *et al.* **Estudo da implantação de uma miniusina solar fotovoltaico na UNIFEI, aspectos técnicos, econômicos e exergéticos.** 2021.

SOUSA, Guilherme Castro. **Brasil utiliza apenas 2% do seu potencial em biocombustíveis.** 2023 Disponível em: <<https://jornal.usp.br/atualidades/brasil-utiliza-apenas-2-do-seu-potencial-em-biocombustiveis/>>. Acesso em: 10 ago. 2023.

SPENCER, Amy Beasley; COLONNA, Guy R. (Ed.). **Fire protection guide to hazardous materials.** Quincy: National Fire Protection Association, 2002.

STEIL, M. C. *et al.* **Durable direct ethanol anode-supported solid oxide fuel cell.** Applied energy, v. 199, p. 180-186, 2017.

STF, **Agenda 2030 no STF.** Disponível em: <<https://portal.stf.jus.br/hotsites/agenda-2030/>>. Acesso em: 06 de set de 2022

SUDHAKAR, K.; SRIVASTAVA, Tulika. **Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module.** International Journal of Ambient Energy, v. 35, n. 1, p. 51-57, 2014.

TERUEL, Dioger Alexandre. **Modelagem do índice de área foliar da cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos.** 1995. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

THIAGO, LRL de S.; VIEIRA, Jairo Mendes. **Cana-de-açúcar: uma alternativa de alimento para a seca.** Embrapa Gado de Corte-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2002.

UNIÃO EUROPEIA. **Cronologia – Medidas restritivas da UE contra a Rússia a respeito da Ucrânia.** Disponível em:

<<https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/sanctions/restrictive-measures-against-russia-over-ukraine/history-restrictive-measures-against-russia-over-ukraine/>>. Acesso em: 06 de set. de 2022.

VIAN, C. E. F. **Qualidade de matéria prima.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/gestao-industrial/qualidade-de-materia-prima>>. Acesso em: 29 set. 2022.

VIRGÍLIO, Arthur. 2016. **PL 4525/2016.** Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/2078024>>. Acesso em: 31 de maio de 2022.

VISCONTI, P. *et al.* **Measurement and control system for thermosolar plant and performance comparison between traditional and nanofluid solar thermal collectors.** International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems, v. 9, n. 3, 2016.

WACLAWOVSKY, Alessandro J. *et al.* **Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content.** Plant Biotechnology Journal, v. 8, n. 3, p. 263-276, 2010.

WATMUFF, J. H.; CHARTERS, W. W. S.; PROCTOR, D. **Solar and wind induced external coefficients-solar collectors.** Cooperation Mediterranee pour l'Energie Solaire, p. 56, 1977.

WATSON, D. Jh. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. **Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years.** Annals of botany, v. 11, n. 41, p. 41-76, 1947.

XAVIER, Terezinha Ferreira. **Vinhaça In Natura e Biodigerida Concentrada: Efeitos nas características químicas e bioquímicas do solo e no crescimento inicial da cana-de-açúcar.** 2012.

YAMAMOTO, Erika. **Cidade Universitária terá a primeira estação de hidrogênio renovável a partir do etanol do mundo.** 2023. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/institucional/cidade-universitaria-tera-a-primeira-estacao-de-hidrogenio-renovavel-a-partir-do-etanol-do-mundo/>>. Acesso em: 14 ago. 2023.

YUAN, Edward Lung; EVANS, Robert W.; DANIELS, Farrington. **Energy efficiency of photosynthesis by Chlorella.** Biochimica et Biophysica Acta, v. 17, p. 185-193, 1955.

ZAPAROLLI, D. **Elétricos movidos a etanol.** Pesquisa FAPESP, p. 66–69, out. 2021.

ZHU, Xin-Guang; LONG, Stephen P.; ORT, Donald R. **What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?** Current opinion in biotechnology, v. 19, n. 2, p. 153-159, 2008.