

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE ENERGIA

**Visão do potencial de produção de bioenergia da cana-de-açúcar
em Angola**

Adilson João Matias

Outubro de 2024, Itajubá – MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE ENERGIA

Adilson João Matias

**Visão do potencial de produção de bioenergia da cana-de-açúcar
em Angola**

**An assessment of the potential for sugarcane bioenergy production in
Angola**

**Dissertação apresentada submetida ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Energia como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em Ciências em
Engenharia de Energia.**

Área de concentração: Energia, Sociedade e Meio
Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira

Coorientador: Prof. Dr. Eric Alberto Ocampo Batlle

Outubro de 2024, Itajubá – MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a *Jeová Deus*, pela vida, força e coragem de continuar a te servir e conseguir concluir esta pesquisa.

Agradeço imensamente aos meus pais (*Maria Rosa João e Pascoal Matias*), familiares (*Walter Nagas, Indira Matias, Cláudio Matias e Elsa Matias*), que sempre me incentivaram a realizar meus sonhos. O apoio e carinho abundantes que me foram concedidos serviram como combustível para a caminhada árdua, mas satisfatória.

Lógico que não devo me esquecer da minha namorada *Fátima Gabriel* pelo apoio incondicional e por me suportar nos momentos que eu tive que estudar bastante e nunca me abandonou nessa etapa difícil da minha vida. Agradeço aos amigos *Cláudio Correia* (obrigado pelo apoio e visão que me deste para cursar o mestrado), *Matos Falo, Nicolau Sanches, Agabito Estanislau, Edilson Romeu, João Adilson, Mbala Tadeu e Filipe Quissanga* pela disponibilidade em sempre me ajudarem.

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão à UNIFEI pela oportunidade em mim concedida para cursar a pós graduação em Engenharia de Energia, sinto-me honrado em ter tido a oportunidade de fazer parte desta instituição. gradeço aos meus orientadores, Professores Prof. Dr. *Luíz Augusto Horta Nogueira* e Prof. Dr. *Eric Alberto Ocampo Batlle*, pela confiança e paciência, vocês foram como uma família para mim. Professores exemplares que contribuíram em grande parte para a concretização desta etapa da minha formação, Prof. Dr. *Electo Silva Lora*, Prof. Dr. *Dyego Maurício Yepes*, Prof. Dr. *Fernando Braga* e Prof. Dr. *Rafael Capaz*.

Aos colegas do curso Engenharia de Energia da UNIFEI (*Gabriel Baione, Luísa Pinheiro, Fernando Léo, Cláudio Abiar, Katia Yessica e Rodney Silvestre*) meus sinceros agradecimentos.

"If you can't stop thinking about it, don't stop working for it."

(Hernani da Silva Mudanise)

Visão do potencial de produção de bioenergia da cana-de-açúcar em Angola

RESUMO

Por seu clima predominantemente tropical úmido, Angola apresenta condições favoráveis para a produção de culturas energéticas, cujo desenvolvimento depende da existência de áreas para cultivo. O foco do presente estudo foi avaliar a disponibilidade de terras adequadas e a produção da cana-de-açúcar, cultivo de elevada eficiência na conversão de energia solar em biomassa para fins energéticos em Angola. Para tanto, foi utilizada a base de dados Global Agro-Ecological Zones, GAEZ v4, desenvolvida pela IIASA e FAO, com auxílio do software QGIS-Białowieża (versão 3.22.5) para a identificação de áreas apropriadas ao cultivo da cana-de-açúcar, considerando diferentes níveis de aptidão. Visando a sustentabilidade da produção de bioenergia, foram excluídas as áreas dedicadas à produção de alimentos, as áreas protegidas e as áreas com declividade acima dos 16%. Sob tais critérios, esse estudo identificou a existência de 6,3 Mha em terras de boa aptidão agrícola, com recursos hídricos para irrigação, correspondendo respectivamente a 5% do território angolano, distribuídas em sete províncias do país, especialmente nas províncias de Cuando Cubango e Cunene, onde se localizam 85% das terras de primeira qualidade sob irrigação. Adotando um modelo de produtividade agrícola, em função da pluviosidade e temperatura, e assumindo práticas agrícolas adequadas, o potencial de produção nessas duas províncias poderia alcançar 817 Mt/ano de cana-de-açúcar, bastante acima da produção atual em Angola, inferior a 1 Mt/ano. Quatro cenários alternativos desde a produção de etanol 1G à integração de 1G2G foram propostos para a produção de bioenergia, e quatro cenários de análise de impacto ambiental no uso de etanol como combustível em comparação a gasolina. Os resultados obtidos da produção de bioenergia, indicaram que o cenário CIV-1G2G utilizando cana energia, é o cenário promissor com a produção anual de 106 GL de etanol, aumentando em 2,7% quando comparado com o cenário CIII-1G2G que utiliza cana convencional. A eletricidade é destacada no cenário CII-1G (177 TWh) da produção anual, visto que parte da palha é usada para a geração excedente de eletricidade, produzindo 65% a mais em relação ao CIV-1G2G, que usa parte do material lignocelulósico para a produção do etanol 2G. O cenário de uso do etanol E10, pode mitigar até 500 ktCO₂-eq. quando comparado ao impacto da gasolina no país em 2021. A eletricidade proveniente do bagaço, pode reduzir as emissões em 3,4 MtCO₂-eq. das emissões geradas pela queima de combustíveis fósseis na geração de eletricidade.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar, Bioenergia, Angola, Etanol

An assessment of the potential for sugarcane bioenergy production in Angola

ABSTRACT

Due to its predominantly humid tropical climate, Angola presents favorable conditions for producing energy crops, the development of which depends on the existence of areas for cultivation. The present study's focus was to evaluate the availability of suitable land and the production of sugar cane, a highly efficient crop in converting solar energy into biomass for energy purposes in Angola. To this end, the Global Agro-Ecological Zones database, GAEZ v4, developed by IIASA and FAO, was used with the help of the QGIS-Białowieża software (version 3.22.5) to identify areas suitable for sugarcane cultivation, considering different fitness levels. Aiming for the sustainability of bioenergy production, areas dedicated to food production, protected areas, and areas with slopes above 16% were excluded. Under these criteria, this study identified the existence of 6.3 Mha of land of good agricultural suitability, with water resources for irrigation, corresponding respectively to 5% of the Angolan territory, distributed in seven provinces of the country, especially in the provinces of Cuando Cubango and Cunene, where 85% of prime quality land under irrigation is located. Adopting an agricultural productivity model, depending on rainfall and temperature, and assuming appropriate agricultural practices, the production potential in these two provinces could reach 817 Mt/year of sugar cane, well above current production in Angola, lower than 1 Mt/year. Four alternative scenarios from 1G ethanol production to 1G2G integration were proposed for bioenergy production and four environmental impact analysis scenarios for the use of ethanol as a fuel in comparison to gasoline. The results obtained from bioenergy production indicated that the CIV-1G2G scenario using energy sugarcane is promising with annual production of 106 GL of ethanol, increasing by 2,7% compared to the CIII-1G2G scenario using conventional sugarcane. Electricity is highlighted in the CII-1G scenario (177 TWh) of annual production, as part of the straw is used to generate excess electricity, producing 65% more compared to CIV-1G2G, which uses part of the lignocellulosic material for the production of 2G ethanol. The scenario of using E10 ethanol can mitigate up to 500 ktCO₂-eq. when compared to the impact of gasoline in the country in 2021. Electricity from bagasse can reduce emissions by 3.4 MtCO₂-eq. emissions generated by the burning of fossil fuels to generate electricity.

Keywords: Sugarcane, Bioenergy, Angola, ethanol

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Uso da bioenergia Tradicional e Moderna	21
Figura 2.2. Diferentes gerações de biocombustíveis	22
Figura 2.3. Abordagens convencionais para a produção de biocombustíveis	23
Figura 2.4. Esquema de integração do etanol 1G e 2G	27
Figura 3.1. Localização de Angola em África e suas províncias	31
Figura 3.2. Precipitação média anual de Angola (mm)	32
Figura 3.3. Zonas Agroecológicas de Angola	33
Figura 4.1. Fluxograma da pesquisa de dissertação	45
Figura 4.2. Diagrama de fluxo da produção de açúcar e bioenergia – CI-1G	52
Figura 4.3. Diagrama de fluxo da produção de bioenergia – CII-1G	52
Figura 4.4. Diagrama de fluxo da produção de bioenergia – CIII-1G2G	53
Figura 4.5. Diagrama de fluxo da produção de bioenergia – CIV-1G2G	54
Figura 5.1. Mapa de cobertura do solo de Angola	62
Figura 5.2. Áreas protegidas de Angola	63
Figura 5.3. Mapa de declividade de Angola	65
Figura 5.4. Índice de aptidão da cana-de-açúcar em condições de Sequeiro	66
Figura 5.5. Índice de aptidão de culturas da cana-de-açúcar em condições de irrigação	68
Figura 5.6. Tipos de solos no território angolano	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1. Fornecimento global de energia por combustível, 2018	19
Gráfico 2.2. Consumo bruto da bioenergia por continente, 2018.....	20
Gráfico 3.1. Terras aptas para agricultura em Angola, 2020.....	34
Gráfico 3.2. Matriz energética angolana, 2021	38
Gráfico 3.3. Acesso à eletricidade em Angola, 2000-2019 (Total).....	38
Gráfico 3.4. Consumo de energia em Angola por fonte.....	39
Gráfico 3.5. Potência elétrica produzida em Angola por fonte, 2009-2018.....	40
Gráfico 4.1. Distribuição das despesas de produção nos cenários de biorrefinarias	60
Gráfico 5.1. Produção anual de bioenergia por cada cenário	74
Gráfico 5.2. Potencial de produção de energia elétrica da cana-de-açúcar em Angola (TWh)	76
Gráfico 5.3. Redução de emissões de GEE (MtCO ₂ -eq.) do etanol 1G-Base, em relação a gasolina.....	78
Gráfico 5.4. Comparação entre as emissões do etanol 1G-Base, gasolina e mistura	78
Gráfico 5.5. Redução de emissões de GEE (MtCO ₂ -eq.) do etanol 1G-otimizado, em relação a gasolina.....	79
Gráfico 5.6. Comparação entre as emissões do etanol 1G Otimizado, gasolina e mistura	80
Gráfico 5.7. Redução de emissões de GEE (MtCO ₂ -eq.) do etanol 1G + 2G, em relação a gasolina.....	81
Gráfico 5.8. Comparação entre as emissões do etanol 1G + 2G, gasolina e mistura	81
Gráfico 5.9. Metas de redução de MtCO ₂ -eq. 2025.....	82
Gráfico 5.10. Metas de redução de MtCO ₂ -eq. no setor energético 2025	83
Gráfico 5.11. Emissões evitadas pelo excedente de etanol em cada cenário, MtCO ₂ -eq.	84
Gráfico 5.12. Emissão gerada por cada fonte de energia elétrica (MtCO ₂ -eq./ano).....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Produção global de etanol por país em 2021	24
Tabela 4.1. Classes de aptidão do GAEZ v4	47
Tabela 4.2. Resumo das tecnologias e matéria-prima usada para processamento de cana-de-açúcar para bioenergia	51
Tabela 4.3. Parâmetros de produtividade para processamento de cana convencional e cana-energia	54
Tabela 4.4. Fatores de Emissões de GEE	55
Tabela 4.5. Volume do etanol necessário para suprir a demanda do uso da gasolina (GL).....	56
Tabela 4.6. Dados de referência para estimativa de investimento em biorrefinarias	59
Tabela 4.7. Premissas de cálculo para estimativa anual do custo de produção da biorrefinarias	60
Tabela 5.1. Áreas de cobertura do solo de Angola.....	61
Tabela 5.2. Áreas protegidas de Angola.....	61
Tabela 5.3. Áreas cultivadas por outras culturas temporárias e a cana-de-açúcar	64
Tabela 5.4. Área de aptidão da cana-de-açúcar em condições de Sequeiro	66
Tabela 5.5. Área de aptidão de cultura da cana-de-açúcar em condições de irrigação	67
Tabela 5.6. Distribuição de terras de primeira para o cultivo da cana-de-açúcar irrigada nas sete províncias	69
Tabela 5.7. Dados e resultados de modelagem de produção da cana-de-açúcar irrigada.....	70
Tabela 5.8. Resultado da produção da bioenergia do CI-1G.....	72
Tabela 5.9. Resultado da produção da bioenergia do CII-1G	73
Tabela 5.10. Resultado da produção da bioenergia do CIII-1G2G	73
Tabela 5.11. Resultado da produção da bioenergia do CIV-1G2G.....	73
Tabela 5.12. Redução de emissões de GEE do etanol 1G-Base, em relação a gasolina	77
Tabela 5.13. Redução de emissões de GEE do etanol 1G-otimizado, em relação a gasolina ..	79
Tabela 5.14. Redução de emissões de GEE do etanol 1G + 2G, em relação a gasolina	80
Tabela 5.15. Fatores de emissão de GEE das tecnologias de geração de eletricidade e a geração de eletricidade de cada tecnologia	85
Tabela 5.16. Investimentos anuais requeridos para os cenários de biorrefinarias.....	87
Tabela 5.17. Custo unitário de produção da cana-de-açúcar em bioenergia	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira geração
2G	Segunda geração
ACV	Análise de Ciclo de Vida
BP	Turbina a vapor de contrapressão (<i>Back Pressure</i>)
bpd	barris de petróleo por dia
CAPEX	Capital expenditure
CEPCI	<i>Chemical Engineering Plant Cost Index</i>
CEST	Turbina a vapor de condensação/Extração (<i>Condensing/Extraction Steam Turbine</i>)
CFB	Caminhos-de-Ferro de Benguela
CFL	Caminhos-de-Ferro de Luanda
CFM	Caminhos-de-ferro de Namibe/Moçâmedes
DD	Graus dias (Degree Days)
E10	Etanol na proporção 10%
E100	Etanol na proporção 100%
E25	Etanol na proporção 25%
E50	Etanol na proporção 50%
EJ	Exajoule
EU	União Europeia
EUA	Estados Unidos da América
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

GAEZ	<i>Global Agro-Ecological Zone</i>
gCO ₂ -eq.	gramas de CO ₂ equivalente
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIS	Sistema de Informação Geográfica (<i>Geographical Information System</i>)
GL	Giga litros
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt hora
ha	hectares
HD	Deficiência hídrica (Annual hídric deficiency)
IGAPE	Instituto de Gestão de Ativos e Participações do Estado
IIASA	Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados
IRENA	Agência Internacional de Energias Renováveis (<i>International Renewable Energy Agency</i>)
IUCN	União Internacional para Conservação da Natureza
kg/tc	quilograma por tonelada de cana
kha	quilo hectares
Km	quilômetro
km ²	quilômetros quadrados
kt	quilotoneladas
kWh	quilowatt hora
kWh/tc	quilowatt hora por tonelada de cana
L	Litro
L/tc	Litro por tonelada de cana

m	metro
MCTA	Ministério da Cultura, Turismo e Ambiente
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
Mha	Milhões de hectares
MINEA	Ministério da Energia e Água
MJ	Mega Joule
ML	Milhões de litros
mm	milímetros
mS	marginalmente adequada (<i>marginally Suitable</i>)
MS	Moderadamente adequado (<i>Moderately Suitable</i>)
Mt	Milhões de toneladas
MtCO ₂ -eq.	Milhões de toneladas de CO ₂ equivalente
MUSD	Milhões de dólares americano
MW	Megawatt
MWh	Megawatt hora
NS	Não adequada (<i>Not Suitable</i>)
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
OEC	Odebrecht Engenharia e Construção
OECD	Organização para Cooperativa e Desenvolvimento Econômico
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PAC	Polo Agroindustrial de Capanda

PIB	Produto Interno Bruto
QGIS	Quantum GIS
RDC	República Democrática do Congo
S	Adequada (<i>Suitable</i>)
SADC	Comunidade de Desenvolvimento da África Austral (<i>Southern Africa Development Community</i>)
SI	Índice de aptidão (<i>Suitability Index</i>)
t/ha	tonelada por hectares
TWh	Terawatt hora
USD	Dólar americano
vmS	muito marginalmente adequada (<i>very marginally suitable</i>)
VS	muito adequada (<i>Very suitable</i>)
ZAE	Zonas Agroecológicas

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE GRÁFICOS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivo geral	16
1.3 Objetivos específicos	16
1.4 Estrutura da dissertação	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - CONCEITOS GERAIS DE BIOENERGIA	18
2.1 Biomassa como recurso energético.....	18
2.2 A transição da bioenergia tradicional para moderna.....	21
2.3 Biocombustíveis.....	22
2.3.1 Produção de biocombustíveis	22
2.3.2 Etanol	23
2.3.3 Biodiesel	24
2.3.4 Biogás	24
2.4 A cana-de-açúcar como cultura bioenergética.....	25
2.4.1 Integração do etanol 1G e 2G	25
2.4.2 Geração de eletricidade.....	27
2.5 Implicações da bioenergia da cana-de-açúcar em África	28
3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO - ANGOLA.....	30
3.1 Geografia	30
3.2 Clima.....	31
3.3 Agricultura	32

3.4	Características Socioculturais	34
3.5	Transportes Rodoviário e Ferroviário	35
3.6	Recursos Naturais e Minerais	36
3.7	Setor energético de Angola	37
3.7.1	O papel das energias renováveis em Angola	41
3.7.2	O setor bioenergético de Angola.....	42
4	METODOLOGIA	44
4.1	Fluxograma da pesquisa.....	44
4.2	Uma Avaliação da Adequação de Terra	45
4.3	Visão geral da metodologia	46
4.4	Ferramentas para avaliação.....	46
4.4.1	GAEZ.....	46
4.4.1.1	Limitações do GAEZ v4	47
4.4.2	Sistemas de Informação Geográfica	48
4.5	Fonte de dados	48
4.6	Avaliação da disponibilidade de terras	49
4.7	Restrições.....	49
4.8	Modelo de produtividade agrícola	50
4.9	Cenários para a produção de bioenergia da cana-de-açúcar	51
4.10	Análise ambiental	55
4.10.1	Impacto do uso de etanol como combustível em substituição da gasolina.....	55
4.10.2	Impacto do uso da eletricidade gerada via bagaço da cana-de-açúcar.....	56
4.11	Avaliação econômica.....	57
4.11.1	Investimento.....	58
4.11.2	Custos operacionais	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1	Aptidão da cana-de-açúcar em condições de Sequeiro.....	65
5.2	Aptidão da cana-de-açúcar em condições de irrigação.....	67

5.3	Condições de Sequeiro vs. Condições de Irrigação	68
5.4	Distribuição das terras de primeira qualidade e modelo de produção	69
5.5	Potencial de produção de bioenergia da cana-de-açúcar em Angola.....	72
5.5.1	Análise comparativa dos cenários.....	74
5.6	Análise das emissões de GEE	77
5.6.1	Avaliação das emissões de GEE nos cenários de biorrefinarias.....	77
5.6.2	Avaliação das emissões de GEE da eletricidade gerada pelo bagaço.....	84
5.7	Resultados de Custos e Investimentos	86
6	CONCLUSÕES	89
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1 INTRODUÇÃO

Energia é vida. É preciso energia para obter energia, pois a vida prospera da energia. Desde a revolução industrial, as principais fontes de energias são petróleo, carvão e gás natural, que são combustíveis fósseis. Os combustíveis fósseis representaram 82% do uso da energia primária em 2020. Atualmente, os recursos de petróleo, carvão, gás natural, energias renováveis e alternativas, têm uma participação de 31%, 27%, 24% e 18%, respectivamente, na matriz energética global (BP, 2022). Energia, economia e crescimento populacional são os principais impulsionadores das emissões de CO₂ em todo o mundo.

O alto consumo de energia em todo o mundo tem sido um problema, visto que a principal matéria-prima energética, as fontes não renováveis estão se esgotando rapidamente. Além disso, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes do processamento de combustíveis fósseis contribuem significativamente para as mudanças climáticas e a poluição do ar, situação que tem se agravado devido às intensas atividades humanas em todo o mundo. O aumento das emissões tem consequências extremas mundialmente, como o aumento do nível do mar, desmatamento, ondas de calor e secas que pode ameaçar a vida e a sobrevivência dos seres vivos (Lucena and Silva, 2021). Um dos contribuintes de GEE é o setor de transportes, com uma participação de mais de 23%. Globalmente, estima-se que a indústria de transporte contribua com 7,0 GtCO₂-eq (Oladunni, Mporu and Olanrewaju, 2022). As emissões de GEE no setor de transporte são contribuídas principalmente pela queima de combustíveis em transportes, incluindo carros, navios, aviões, trens, etc. Vários tipos de combustíveis são usados para transportes, por exemplo, derivados de petróleo, biocombustíveis, gás natural e eletricidade. Os produtos petrolíferos, muitas vezes referidos como combustíveis secundários, como diesel, gasolina, combustível de aviação, etc., são obtidos a partir do processamento de petróleo ou gás natural. O etanol, o biodiesel e o diesel renovável produzidos a partir de matéria-prima renovável são classificados como biocombustíveis (Chia *et al.*, 2022). A emissão de CO₂ é muito menor durante a queima de biocombustíveis, por isso são amigos do ambiente. A grande transição energética de combustíveis fósseis para fontes de energia sustentáveis, renováveis e alternativas é necessária para desacelerar as mudanças climáticas.

As fontes de energia renováveis são conhecidas por serem as opções mais viáveis para aumentar o acesso da população à eletricidade, reduzindo a poluição do ar e as emissões de CO₂ em todo mundo. O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nº 7, da Organização das Nações Unidas (ONU) que busca garantir acesso à energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos e recomenda um crescimento substancial da participação de energia limpa e verde

na matriz energética global para 2050 (IEA, 2021). Energias renováveis como, eólica, solar, biomassa entre outras, são formas de energias que causam pouco impacto ambiental e não participam na escala de poluição global. Dentre tais fontes, a energia advinda da biomassa vem crescendo significativamente nos últimos anos, sendo considerada uma boa alternativa para a diversificação da matriz energética e consequente redução da dependência de fontes fósseis, uma vez que é possível gerar energia para eletricidade, aquecimento, refrigeração e transporte. O uso da energia da biomassa ou bioenergia como substituto de combustíveis fósseis na produção de calor e eletricidade é, em geral, menos dispendioso e mais eficiente em termos de recursos do que a gasolina ou diesel para transporte (Lucena and Silva, 2021).

A biomassa é uma forma indireta de aproveitamento da energia solar absorvida pelas plantas, pois resulta da conversão da luz solar em energia química (Maia and Gomes, 2012). A biomassa pode ser definida como qualquer matéria orgânica que pode ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica, podendo ser de origem florestal (madeira, principalmente), animal (esterco), agrícola (soja, milho, arroz, cana-de-açúcar, entre outras) e resíduos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos). Na combustão direta da biomassa ou uso inadequado da bioenergia ela é usada para aquecer e cozinhar, enquanto no uso mais desenvolvido utiliza tecnologias de processamento para a conversão da biomassa em biocombustíveis líquidos e gasosos produzidos a partir de plantas em biorrefinarias e por digestão anaeróbica de resíduos (Di Fraia *et al.*, 2020; Nunes, Causer and Ciolkosz, 2020).

Além de sua capacidade de mitigar as mudanças climáticas, impactos sociais, ambientais e econômicos, a bioenergia está promovendo o desenvolvimento sustentável dos países industrializados e em desenvolvimento (Cortez *et al.*, 2019). O risco a insegurança de abastecimento de energia, dependência ao petróleo importado e a perspectiva de esgotamento de recursos não renováveis, resultou em maior atratividade no uso da energia da biomassa, como os biocombustíveis para a promoção do desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento (Demirbas and Demirbas, 2007).

Os biocombustíveis, são promovidos como um substituto viável para os combustíveis fósseis, como os derivados do petróleo. Os biocombustíveis podem fornecer respostas às atuais crises energéticas e econômicas globais, tanto como fonte de energia sustentável quanto por meio da promoção do desenvolvimento econômico, especialmente nas áreas rurais dos países em desenvolvimento. A dependência nos combustíveis fósseis não renováveis, bem como preocupações ambientais relacionadas à poluição do ar e aos GEE em contribuir para o aquecimento global e as mudanças climáticas, estimularam o interesse dos formuladores de

políticas e da indústria em promover os biocombustíveis como parte da segurança energética e das estratégias de mitigação das mudanças climáticas (Souza *et al.*, 2015).

Diferentes fontes de biomassa são usadas como recursos bioenergéticos modernos, como a biomassa produzida especificamente para fins energéticos, como a cana utilizada para produzir etanol e eletricidade e a lenha oriunda da silvicultura; biomassa produzida como subproduto de processos agroindústrias e florestais, como a lixívia celulósica na indústria de papel, o bagaço na moagem da cana-de-açúcar, a palha de cana coletada no campo, as cascas de arroz geradas no seu processamento e os resíduos florestais obtidos das operações silviculturais; biomassa produzida a partir de materiais já utilizados pela sociedade, como caixas de madeira e papelão, e uma fração importante dos resíduos líquidos e sólidos urbanos (Nogueira, Capaz and Lora, 2021). A cana-de-açúcar, em particular, tem sido apontada como uma das matérias-primas mais eficiente para a bioenergia, tanto pelos seus resíduos agrícolas que são produzidos em abundância, quanto pelo seu uso como uma cultura energética dedicada. Por exemplo, o etanol é produzido a partir da cana-de-açúcar, que pode ser usado como uma mistura de gasolina ou substituto (Souza *et al.*, 2015). Além da cana-de-açúcar, o etanol também pode ser produzido a partir de outras culturas açucareiras (por exemplo, sorgo doce e beterraba), amidos de grãos (por exemplo, trigo, milho e cevada) e matérias-primas lignocelulósica (por exemplo, madeira, palha e grama) (Kazemi Shariat Panahi *et al.*, 2022).

A variedade de subprodutos produzidos a partir da cana-de-açúcar a torna um dos recursos mais valioso, e seu uso como fonte de energia a classifica como uma cultura bioenergética eficiente. Este estudo, portanto, se concentrará no cultivo de cana-de-açúcar para bioenergia, abordando os biocombustíveis, cogeração de eletricidade e outras variedades de produtos finais de alto valor, que serão discutidos em capítulos seguintes.

1.1 Justificativa

Atualmente o mundo consome petróleo a uma taxa de aproximadamente 88 milhões de barris de petróleo por dia, sendo a Organização para Cooperativa e Desenvolvimento Econômico (OECD) responsável por consumir metade desse petróleo, dos quais 48,6% são utilizados para o transporte (BP, 2021; Statista, 2022b). Essa vasta quantidade de energia não renovável é o que eventualmente precisa ser substituído por combustíveis alternativos, como os biocombustíveis.

A fim de atender a demanda mundial no consumo do petróleo, implicariam milhões de hectares de terras disponíveis para o cultivo de matérias-primas para a produção de biocombustíveis. A

terra é um dos recursos mais importantes para a produção de biocombustíveis (Cortez *et al.*, 2019). A avaliação de uso da terra é importante, pois pode ser um fator chave para determinar a disponibilidade real da biomassa, para a produção de biocombustíveis, sendo uma das tarefas mais difíceis e mais essenciais de qualquer estudo da biomassa (Rosillo-Calle *et al.*, 2007). A fim de obter o máximo benefício dos biocombustíveis, grandes extensões de terra são necessárias para a produção de culturas bioenergéticas (Amigun, Kaviti and Stafford, 2011).

África e a América do Sul possuem algumas das maiores áreas do mundo consideradas adequadas e potencialmente disponíveis para o cultivo de matéria-prima para biocombustíveis. No total, aproximadamente 75-95% dos recursos adequados e potencialmente disponível de terra (dependendo da matéria-prima) está localizada em países subdesenvolvidos (Schoneveld, 2010). De acordo com Cortez *et al.* (2019), 60% da terra potencialmente disponível do mundo poderia ser usada para a produção de bioenergia até 2050, aproximadamente 440 milhões de hectares (Mha), das quais cerca de 60% (250 Mha) será na América Latina e 180 Mha na África. Basicamente o mundo também dependerá da América Latina e África para futura expansão da bioenergia.

Cortez *et al.* (2019), Souza *et al.* (2016), Fischer *et al.* (2013), e Watson (2011), focaram seus estudos e projeções em encontrar áreas adequadas em regiões áridas e semiáridas da África e da América Latina para a produção de bioenergéticos. Muitos países da América Latina e da África Austral compartilham preocupações comuns em relação ao cenário energético, como alta dependência de combustíveis fósseis importados e cobertura limitada de serviços modernos de energia. Os países tropicais e subtropicais com boa pluviosidade apresentam condições favoráveis para a produção e uso de bioenergia, cujas rotas utilizando a cana-de-açúcar são particularmente promissoras, permitindo a implantação de agroindústrias eficientes e sustentáveis, proporcionando benefícios econômicos, sociais e ambientais. Um país com condições favoráveis e localizado no tropico é Angola. Assim como ocorre em outros países, ocorre em Angola, o potencial do país é pouco conhecido ou não avaliado, em termos dos investimentos necessários e implicações associadas para implantação de bioenergéticos. Para esta pesquisa, Angola foi selecionada como a área de estudo sobre a qual será realizada uma avaliação da disponibilidade de terra para o cultivo de bioenergia a partir da cana-de-açúcar.

Geralmente, os estudos de avaliação de terras na África Austral tendem a excluir países que enfrentam instabilidade política, como Angola e a República Democrática do Congo (RDC) e, portanto, se concentram em áreas onde o cultivo de bioenergia parece mais encorajador. Em 2019, a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) realizou um estudo onde avaliou o potencial substancial para aumentar a produção sustentável de bioenergia a partir do

cultivo de cana-de-açúcar na África Austral. O estudo avaliou o potencial de sete países produtores de açúcar na Comunidade de Desenvolvimento da África Austral (SADC): Malawi, Moçambique, África do Sul, Tanzânia, Essuatíni (antiga Suazilândia), Zâmbia e Zimbábue. A situação política enfrentada por Angola desestimulou investigações para delimitação de áreas aptas ao cultivo de cana-de-açúcar e, portanto, não foram considerados como área de estudo. No entanto, como será descrito nessa seção, existem várias razões que apoiam a expansão do cultivo de bioenergia da cana-de-açúcar em Angola, tornando-a uma super potência futura na produção sustentável de bioenergia em África.

Angola foi delimitada como área de estudo devido às grandes áreas de terras agrícolas não florestais disponíveis para o cultivo de culturas energéticas mesmo depois de satisfazer as suas necessidades de alimentos, fibras, rações e lenha para a sua população crescente. O Ministério da Agricultura de Angola estima que o país tem aproximadamente 57 Mha de terras aptas para a agricultura, incluindo 35 Mha de terra arável. Da terra arável, aproximadamente 15% é atualmente cultivada, e 20% é adequada para irrigação (World Bank, 2021). Após quase 27 anos de guerra civil, esforços internacionais agressivos de desminagens, abriram extensas áreas de terras para o desenvolvimento agrícola. Van Den Berg e Rademakers (2007) projetaram que até ao ano 2050 Angola terá terra suficiente e disponível para a produção de culturas energéticas de cerca de 5,9 exajoules (EJ) de energia líquida por ano, depois de atender às necessidades de sua crescente população. No entanto sugere-se que Angola seja a próxima “superpotência dos biocombustíveis”.

1.2 Objetivo geral

Apresente pesquisa visa analisar o potencial de produção de bioenergia sustentável da cana-de-açúcar no contexto angolano.

1.3 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo proposto, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

1. Avaliar a disponibilidade de terras adequadas para cultivo de cana-de-açúcar em condições sustentáveis, sem afetar outras atividades e o meio ambiente;
2. Revisar as tecnologias de interesse na produção da bioenergia (biocombustíveis e eletricidade) a partir da cana-de-açúcar;

3. Estudar as possíveis configurações das usinas para produção de bioenergia e alimentos a partir da cana-de-açúcar em Angola;
4. Desenvolver/modelar o potencial de ofertas do etanol e eletricidade de cana-de-açúcar, com base nos cenários da produção de cana e estimativas de custos;
5. Estimar os impactos socioeconômicos e ambientais associados

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em 6 capítulos. O Capítulo 1 fornece uma introdução ao estudo delineando metas e objetivos. Os antecedentes do estudo são abordados nos Capítulos 2. O Capítulo 2 fornece uma visão geral sobre a bioenergia, destaca o uso da cana-de-açúcar como cultura bioenergética, concluindo com uma visão geral das implicações do uso da cana-de-açúcar em África. A área de estudo é descrita no Capítulo 3, prestando atenção à sua localização geográfica, descrevendo uma visão física e socioeconômica do país. O Capítulo 4 fornece uma visão geral da metodologia realizada no estudo. A abordagem teórica, as fontes de dados e uma descrição detalhada da análise são fornecidas neste capítulo. Os resultados do estudo são apresentados no Capítulo 5. A discussão dos resultados obtidos também está incluída neste capítulo. A dissertação termina com o Capítulo 6, que fornece uma conclusão ao estudo, incluindo também recomendações que se originaram do estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - CONCEITOS GERAIS DE BIOENERGIA

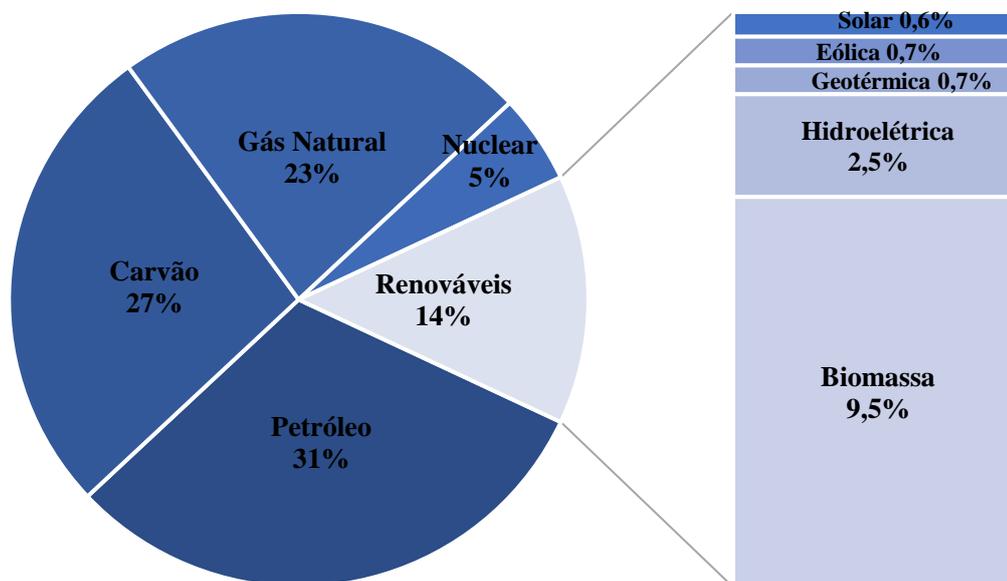
2.1 Biomassa como recurso energético

A biomassa foi o primeiro recurso energético utilizado pela humanidade, a única fonte de combustível por milênios, desde que as pessoas usaram a madeira para cozinhar alimentos ou aquecimento (Souza *et al.*, 2015). Ainda hoje, a biomassa representa cerca de 10-13% do consumo total de energia primária mundial (IEA, 2022). Tradicionalmente, a madeira tem sido o maior recurso de biomassa, o que ainda reflete em muitos países em desenvolvimento. A biomassa é a principal fonte de energia para mais de 2,7 bilhões de pessoas em todo o mundo e desempenha um papel tradicional na África. Estima-se que mais de 81% da população, representando 653 milhões de africanos, dependem da biomassa para atender a sua demanda de energia, e esse número deve aumentar em 2030 para 720 milhões. A população depende perpetuamente de práticas perigosas, como a queima de biomassa, madeira, carvão, esterco de animais, resíduos agrícolas e outros resíduos sólidos como suas fontes primárias de energia (Olatunde *et al.*, 2020). A Organização Mundial da Saúde (OMS), estima que a poluição do ar doméstico causa 490.000 mortes prematuras por ano na África Subsaariana, com um aumento da taxa de mortalidade (cerca de 4,3 milhões anualmente) de doenças cardíacas e respiratórias, especialmente a tuberculose, resultado da poluição do uso desses resíduos para cozinhar e aquecer (Olatunde *et al.*, 2020; WHO, 2021).

A bioenergia refere-se à energia que é derivada da biomassa. No setor de energia, a bioenergia desempenham um papel muito importante no processo de descarbonização da economia, referindo-se ao processo de redução da quantidade de emissões de GEE produzidos pela queima de combustíveis fósseis (Popp *et al.*, 2021). A bioenergia como fonte de energia renovável e se usado de maneira eficiente, ganhou importância política, como sendo o principal facilitador para o desenvolvimento econômico e social nos países em desenvolvimento.

Hoje, a biomassa (principalmente madeira) contribui com cerca de 10% para o mix de energia primária mundial, e ainda é de longe a mais ampla fonte de energia renovável utilizada. Em 2018, os combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) constituíram 81% do fornecimento total de energia primária, a energia nuclear 5% e as fontes de energia renováveis 14%. A biomassa foi a maior fonte de energia renovável utilizada globalmente com aproximadamente 67,2%, seguida por energia hidrelétrica com 18,3% e outras renováveis com 14,5% (Gráfico 2.1.).

Gráfico 2.1. Fornecimento global de energia por combustível, 2018

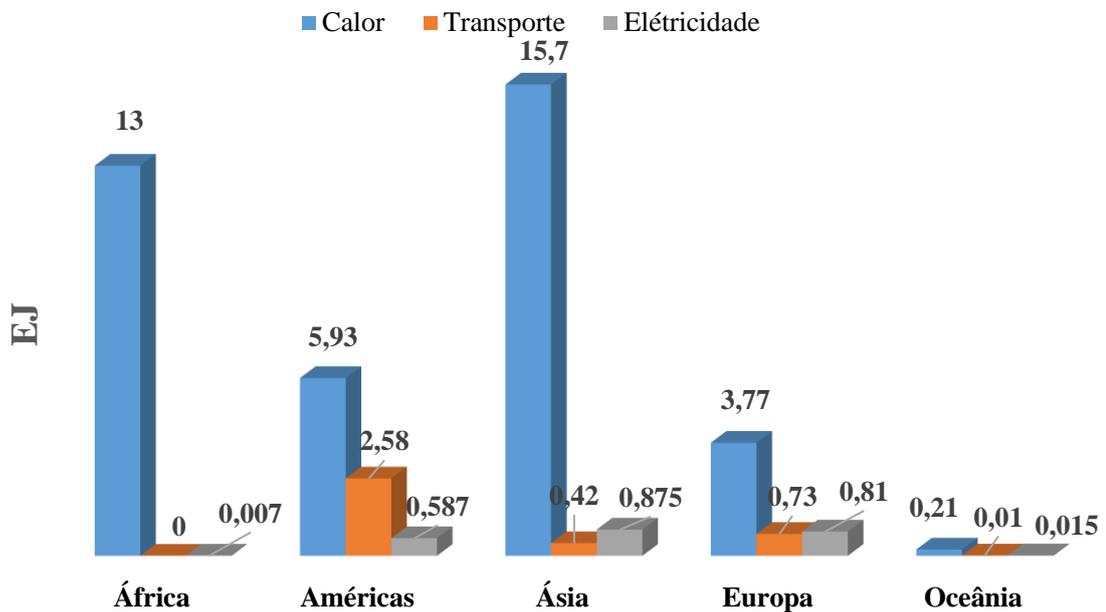


Fonte: (WBA, 2020)

Em 2018, a bioenergia forneceu energia não apenas para aquecimento e transporte, mas também para produzir eletricidade. A bioenergia contribuiu com uma estimativa de 12%, ou seja, 44,6 EJ, para o consumo final de energia, incluindo o seu uso ineficiente (WBA, 2020). O uso moderno da bioenergia, forneceu cerca de 13,9 EJ para aquecimento (8,6% do fornecimento global de energia usado para aquecimento), 3,7 EJ em transporte (3,1% das necessidades de energia de transporte) e 2,2 EJ para o fornecimento global de eletricidade (2,1% do total). O uso da bioenergia moderna cresceu mais rapidamente no setor elétrico, cerca de 6,7% ao ano nos últimos cinco anos, em comparação com cerca de 4,4% nos transportes e apenas cerca de 1,1% no aquecimento (REN21, 2020).

O principal uso final da bioenergia globalmente é o calor, compreendendo mais de 95% de calor renovável do consumo bruto final de energia em 2018. A bioenergia teve uma participação significativa em termos de calor direto gerado na África de 100%. Este fator pode ser atribuído a predominância do uso ineficiente da biomassa. Comparado com a Europa e as Américas que usaram 0,73 e 2,58 EJ (Gráfico 2.2) de bioenergia para o transporte respectivamente, é prudente que África deve diversificar o uso da bioenergia no transporte e na geração de eletricidade.

Gráfico 2.2. Consumo bruto da bioenergia por continente, 2018



Fonte: (WBA, 2020)

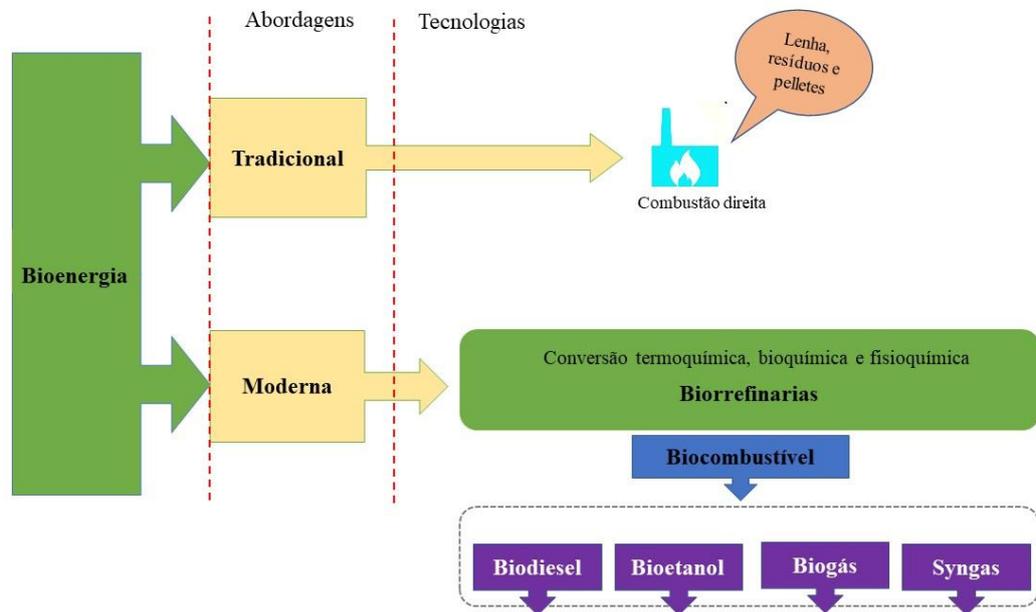
Na África Subsaariana, a dependência no uso da biomassa de forma ineficiente representa mais de 46% do consumo de energia primária. O uso inadequado da biomassa tem vindo a diminuir ligeiramente nos últimos anos, de 27,2 EJ em 2010 para uma estimativa de 26 EJ em 2018. O declínio se deve em parte aos esforços para reduzir o mal uso da biomassa e melhorar o acesso a combustíveis limpos, dados os efeitos negativos da queima de biomassa na qualidade do ar, os impactos associados à saúde e a natureza insustentável de grande parte do fornecimento de biomassa para esses usos (REN21, 2020).

Quase 600 milhões de pessoas na África vivem sem acesso e um abastecimento moderno de energia na forma de eletricidade (IRENA, 2020). Serviços básicos como saúde e educação requerem eletricidade e energia confiável, o que significa que as 600 milhões de pessoas que não têm acesso à energia moderna também serão privados de tais serviços. Além disso, a possibilidade de empreendimento comercial que requer energia moderna é drasticamente reduzida devido à falta de iluminação, dispositivos que economizam mão de obra e telecomunicações, agravando ainda mais a terrível situação socioeconômica. Mulheres e crianças passam horas árduas todos os dias percorrendo longas distâncias para coletar lenhas para combustível, tempo que poderia ser usado para criar oportunidades de geração de renda e educar crianças (Souza *et al.*, 2015). A transição do uso inadequado da bioenergia para serviços modernos de energia torna-se, portanto, um fator essencial para ajudar no desenvolvimento social e económico dos países em via de desenvolvimento.

2.2 A transição da bioenergia tradicional para moderna

A bioenergia produzida de forma sustentável, utilizando tecnologias avançadas e adequada, inclui geração de eletricidade e produção de calor, além de combustíveis para transporte, a partir de resíduos agrícolas, florestais e resíduos sólidos. Por outro lado a bioenergia que é explorada normalmente de forma predatória e não sustentável, utilizada em combustão direta, geralmente é usada para suprimento residencial (cocção e aquecimento de ambientes) com eficiências muito baixas em muitos países em desenvolvimento (Goldemberg and Teixeira Coelho, 2004). Se a biomassa for usada de forma mais eficiente, ela pode fornecer uma considerável variedade e diversidade de combustíveis tanto em pequena quanto em grande escala e pode fazer parte de uma matriz de fontes de combustíveis, que ofereceria maior flexibilidade de abastecimento de combustível e segurança energética. A Figura 2.1 ilustra a utilização de biomassa na combustão direta para aquecimento e cozinhar bem como para cogeração de eletricidade, produção de biocombustíveis que podem ser usados como substituto do petróleo (Coelho, 2004; Perea-Moreno, Samerón-Manzano and Perea-Moreno, 2019).

Figura 2.1. Uso da bioenergia Tradicional e Moderna



Fonte: Moreno, 2019 (Adaptado)

Na África Subsaariana, o mal uso de energia da biomassa aumentará com o crescimento populacional da região e, portanto, a forte dependência da bioenergia inadequada no fornecimento final de energia pode não mudar significativamente, a menos que novas políticas e instituições destinadas a melhorar o acesso à energia e a segurança energética são implementadas. A energia eficaz da biomassa representa um recurso estratégico que a região pode utilizar para apoiar o

desenvolvimento e melhorar a segurança energética. A África Subsaariana tem um potencial substancial para desenvolver energia de biomassa com tecnologias modernas, devido ao seu clima tropical, baixa densidade populacional e dotação de recursos naturais. O desenvolvimento da energia de biomassa eficiente pode abordar as preocupações energética, melhorar os meios de subsistência rurais, substituindo os combustíveis tradicionais de cozinha por alternativas líquidas e gasosas mais limpas, sem fumaça, mitigar alguns dos impactos ambientais e socioeconômicos dos atuais sistemas de energia baseados em combustíveis fósseis (Batidzirai and Johnson, 2017).

2.3 Biocombustíveis

Os biocombustíveis referem-se a combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos que são predominantemente ou exclusivamente produzidos a partir de biomassa (Sharma *et al.*, 2020). Os principais biocombustíveis produzidos no mercado global são o etanol, o biodiesel e o biogás. Os biocombustíveis são classificados em diferentes gerações com base nas matérias-primas e na metodologia de conversão, conforme mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2. Diferentes gerações de biocombustíveis

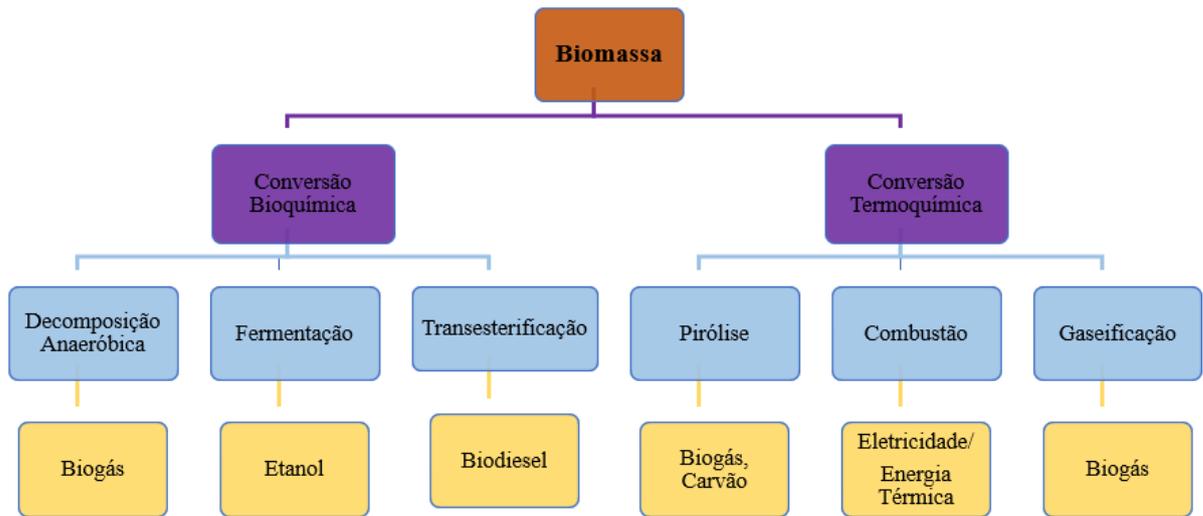
1^a Geração	Biomassa comestível, como açúcar, amido, óleo vegetal, etc.
2^a Geração	Biomassa lignocelulósica/descartada, como matéria-prima agrícola e florestal, resíduos urbanos, etc.
3^a Geração	Matéria-prima cultivada aquática (ex. algas)
4^a Geração	Microrganismos de Bioengenharia e Culturas de Bioengenharia

Fonte: (Sharma *et al.*, 2020)

2.3.1 Produção de biocombustíveis

Convencionalmente, métodos termoquímicos, biológicos e bioquímicos são empregados para a conversão de biomassa primária em biocombustíveis (Figura 2.3)

Figura 2.3. Abordagens convencionais para a produção de biocombustíveis



Fonte: (Sharma *et al.*, 2020)

2.3.2 Etanol

O etanol é um biocombustível de alta octanagem que é produzido a partir de milho, batata, grãos (trigo, cevada e centeio), beterraba sacarina, cana-de-açúcar e resíduos vegetais, dependendo da sua disponibilidade (Içöz *et al.*, 2009). Por exemplo, é produzido principalmente a partir de cana-de-açúcar no Brasil e de milho nos Estados Unidos da América (EUA). O açúcar e o milho são geralmente comestíveis na natureza e, portanto, levam a um conflito de alimentos versus combustível. A biomassa lignocelulósica, como cultura energética, resíduos agrícolas e florestais, são abundantes e não comestível, e portanto, tem se desenvolvido para a produção de etanol (Kumar *et al.*, 2019). No cenário mundial, o etanol tem sido reconhecido como um candidato viável para substituir os combustíveis fósseis em muitos países. O principal impacto da alocação do etanol está no setor de transporte.

A produção global de etanol é concentrada em poucos países, está representada na Tabela 2.1. A produção global de etanol em 2021 foi de 103 bilhões de litros. Juntos, EUA e o Brasil respondem por 82% da produção mundial de etanol. União Europeia (UE), China e Canadá são os outros principais produtores de etanol combustível, e como é visível nas estatísticas globais, a categoria de outros países também tem avançado no uso de etanol combustível (Statista, 2022a).

Tabela 2.1. Produção global de etanol por país em 2021

País	Produção (Milhões de litros)	%
EUA	56 781	55
Brasil	28 390	27
EU	4 921	5
China	3 255	3
Índia	3 104	3
Canadá	1 665	2
Tailândia	1 476	1
Argentina	984	1
Outros	2 801	3

Fonte: Statista, 2022a

2.3.3 Biodiesel

O biodiesel é um combustível para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão, renovável e biodegradável, derivado de óleos vegetais ou gorduras animais, que possa substituir parcial ou totalmente o óleo diesel de origem fóssil (Demirbas and Demirbas, 2007; Singh *et al.*, 2020). O biodiesel pode ser produzido através de matérias-primas comestíveis (óleo de colza, óleo de soja, óleo de palma, óleo de coco), matérias-primas não comestíveis (óleo de *Jatropha*, óleo de sementes de borracha) e a partir de microalgas e óleos residuais (Singh *et al.*, 2020). Muitas vezes, essas matérias-primas são resultado de cultivos específicos de culturas bioenergéticas. Nos últimos anos, o biodiesel tornou-se mais atrativo devido aos seus benefícios ambientais e ao fato de ser produzido a partir de recursos renováveis. Várias razões para o biodiesel ser usado como combustível alternativo são o foco na redução das emissões de GEE, menor efeito sobre o clima global, solução de energia sustentável e renovável, e obter um suprimento alternativo de combustível mais promissor para atender a demanda energética atual. Com ajuda do biodiesel, as emissões de material particulado, monóxido de carbono, hidrocarboneto não queimado e dióxido de carbono podem ser reduzidos (Singh *et al.*, 2020).

2.3.4 Biogás

O biogás é produzido da digestão anaeróbica, que é uma tecnologia que converte resíduos em energia (Pilloni and Hamed, 2021). O biogás é uma mistura de gases (principalmente metano e CO₂) adequada para cozinhar, aquecimento, geração de eletricidade e combustível para transporte (Muth *et al.*, 2021). A matéria-prima comumente usada para a produção do biogás é esterco de

gado, palha, ervas daninhas, resíduos de esgoto e assim por diante. As bactérias produtoras de metano são encontradas naturalmente em todas essas matérias-primas, especialmente no esterco de gado (Thomas, 2003). O biogás como fonte de energia pode ajudar a mitigar os GEE e reduzir o aquecimento global. Em termos de geração líquida de energia, o metano da digestão anaeróbia é considerado competitivo em eficiência e custos em comparação com outras energias de biomassa, e é melhor do ponto de vista ecológico (Pilloni and Hamed, 2021). O uso de biogás ajuda a combater o desmatamento, especialmente em um contexto em que as famílias usam principalmente lenha ou carvão para cozinhar e aquecer, e ajudam a melhorar a qualidade de vida dos beneficiários (enea, 2013).

2.4 A cana-de-açúcar como cultura bioenergética

Refletindo sobre a eminente escassez das reservas de petróleo, principal combustível para o setor de transporte, juntamente com as preocupações da sociedade com a preservação ambiental associados à queima de combustíveis fósseis, a cana-de-açúcar como cultura bioenergética ganha nova importância. Suas notáveis características fisiológicas, anatômicas e agrônômicas, fazem da cana-de-açúcar um recurso de biomassa integral, com enorme potencial de geração de bioenergia.

A cana-de-açúcar é uma matéria-prima altamente produtiva para a bioenergia devido ao seu ciclo de produção semiperene, que permite colheitas anuais e replantio em intervalos de cinco anos ou mais, e seu alto conteúdo energético. Com tecnologia convencional amplamente implantada, pode produzir mais de 8.000 L de etanol e 6,5 MWh de eletricidade por hectares por ano. O etanol de cana-de-açúcar pode ser competitivo em termos de custos e reduzir as emissões de GEE em até 80% em comparação com a gasolina (IRENA, 2019a).

2.4.1 Integração do etanol 1G e 2G

Usualmente, a produção de etanol é realizada em três etapas: (1) obtenção de uma solução de açúcares fermentáveis, (2) fermentação dos açúcares em etanol e (3) separação e purificação do etanol, geralmente por destilação-retificação-desidratação. A etapa anterior à fermentação, para obtenção de açúcares fermentáveis, é a principal diferença entre os processos de produção de etanol a partir de açúcar simples, amido ou material lignocelulósico (Melo, 2020).

O etanol obtido a partir do caldo de cana-de-açúcar (etanol de primeira geração-1G), é relativamente fácil de fazer a partir do açúcar. Uma solução aquosa de açúcar pode ser diretamente fermentada e convertida em uma solução alcoólica, que pode em seguida ser destilada para produzir etanol combustível (IRENA, 2019a).

Na destilação, o etanol é recuperado inicialmente na forma hidratada, com cerca de 6% de água em peso, deixando a vinhaça ou vinhoto como resíduo, normalmente numa proporção de 10-13 L por litro de etanol hidratado produzido (BNDES, 2008). O etanol hidratado pode ser armazenado como produto final ou pode ser enviado para a coluna de desidratação. Um processo de destilação ou um processo de absorção é necessário para a desidratação. O etanol anidro apresenta menos de 0,4% de água em peso, a especificação usual para a mistura com a gasolina (IRENA, 2019a).

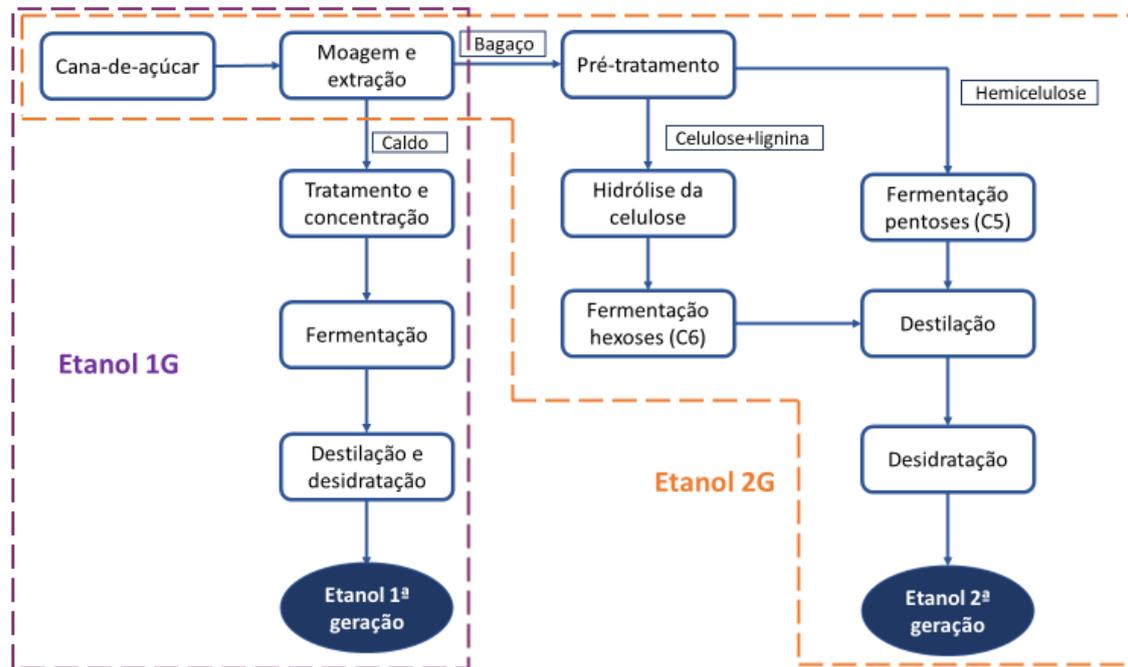
A inovação sempre foi importante para apoiar a melhoria da produtividade, diversificação de produtos, redução de custos e sustentabilidade na agroindústria canavieira. A cana-de-açúcar, além de água e açúcares, é constituída de material lignocelulósicos que podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de etanol por processos de conversão bioquímica ou termoquímica, frequentemente referidos como etanol de segunda geração (2G).

Ao contrário da cana, que deve ser processada após a colheita, os resíduos agrícolas resultantes da produção do etanol 1G podem ser armazenados e utilizados posteriormente, em períodos de entressafra, quando as usinas estão ociosas. Enquanto as tecnologias de primeira geração estão baseadas na fermentação alcoólica de alguns polissacarídeos, a segunda geração consiste na produção de etanol celulósico a partir da quebra dos polissacarídeos presentes na parede celular vegetal dos resíduos lignocelulósicos, a partir de etapas de pré-tratamento e hidrólise da celulose anteriores à fermentação. O bagaço da cana-de-açúcar apresenta quantidade significativa de celulose em sua composição, o que favorece o uso dessa matéria-prima lignocelulósica no processo (Melo, 2020).

Entre os diferentes tipos de biomassa lignocelulósica, a palha de cana-de-açúcar se destaca como fonte de energia, apresentando grande potencial para produção de etanol celulósico. O aproveitamento da palha deverá ocupar um lugar de destaque como matéria-prima para a produção de etanol combustível, adotando o uso de colheita mecanizada (Santos *et al.*, 2012).

Na Figura 4.2 está exemplificado simplificadaamente, como os processos de produção do Etanol 1G e 2G se interligam. A integração da produção de etanol 2G com a produção de etanol convencional 1G é particularmente promissora no contexto da agroindústria canavieira. Há boa disponibilidade de matéria-prima lignocelulósica (bagaço e palha) e concessionárias de energia podem otimizar suas operações. Isso permite a produção totalmente renovável de energia sem uso de combustíveis fósseis para processamento de eletricidade e calor (CGEE, 2017).

Figura 2.4. Esquema de integração do etanol 1G e 2G



Fonte: (Melo, 2020)

2.4.2 Geração de eletricidade

As usinas de processamento de cana-de-açúcar que produzem açúcar e/ou etanol, tradicionalmente também estão produzindo energia nas formas determinadas pela usina: térmica e elétrica (Laplaine, 2015). O avanço na colheita mecanizada da cana nos últimos anos tem proporcionado uma expressiva quantidade de subprodutos agrícolas (a palha de cana). Há um interesse crescente em utilizar esses subprodutos para complementar o bagaço e prolongar a geração de energia nas usinas (SUCRE, 2019). Sendo o bagaço um resíduo fibroso que fica após a moagem da cana para extração do caldo e após a secagem é utilizado junto com a palha para gerar vapor e energia. Tal tecnologia é denominada cogeração de eletricidade e calor, e representa um diferencial importante da cana em relação às outras matérias-primas usadas para a fabricação de açúcar ou etanol, que necessitam de aporte energético externo para o processo industrial. Nenhuma entrada de energia externa é necessária e o excedente a eletricidade pode ser vendida na rede elétrica pública, permitindo assim que a usina seja autossuficiente no atendimento de suas necessidades energéticas.

A utilização da palha e o bagaço dessa maneira também traz benefícios ambientais ao substituir as emissões de combustíveis fósseis e redução das emissões de GEE.

2.5 Implicações da bioenergia da cana-de-açúcar em África

Embora vários países da África Subsaariana tenham reservas inexploradas e significativas de combustíveis fósseis, as perspectivas de grandes aumentos na oferta de combustíveis fósseis são limitadas devido à distribuição desigual das reservas. Angola e Nigéria são dotados de grandes depósitos de petróleo bruto, alcatrão, gás natural e carvão (Olatunde *et al.*, 2020). Ao mesmo tempo, esses países são altamente dotados de diversas plantas ricas em energia e outros biorecursos além de renováveis, como hídrica, solar, eólica e outros.

Existe um potencial substancial para aumentar a produção sustentável de bioenergia a partir do cultivo da cana-de-açúcar nos países da África. Muitos países da África Subsaariana, notadamente África do Sul, Essuatíni (antiga suazilândia), Malawi, Ilhas Maurícias, Moçambique, Tanzânia, Zâmbia, Zimbábue e Madagáscar, tiveram experiências anteriores de trabalho com cana-de-açúcar para produção de açúcar e etanol. Na África do Sul, o etanol era produzido para as indústrias de bebidas, produtos de limpeza e não para biocombustíveis (Cortez *et al.*, 2019). A implementação da bioenergia da cana-de-açúcar faz sentido, podendo ser utilizada como matéria-prima para a produção de um conjunto de vetores energéticos e um conjunto diversificado de bioprodutos úteis (Horta Nogueira, 2018). Além disso, os países da África Subsaariana possuem excelentes condições para o desenvolvimento da produção moderna de bioenergia da cana-de-açúcar, como clima adequado e disponibilidade de terras, sem prejudicar outros usos relevantes, como a produção de alimentos e rações (Horta Nogueira, 2018; Cortez *et al.*, 2019). Watson (2011) descobriu que 6 Mha de terras adequadas (excluindo terras para a produção de alimentos ou áreas de conservação) estão disponíveis na África Subsaariana para a produção de cana-de-açúcar, que poderiam render 390 milhões de toneladas (Mt) de cana-de-açúcar ou 48 Mt de açúcar processada. Se 50% do açúcar for convertido em etanol, quase 14 bilhões de litros de etanol poderão ser produzidos a partir da terra disponível. Por outro lado, como na maioria dos países dessa região, há uma grande dependência de combustíveis importados, e uma demanda urgente de energia limpa e acessível para atender a região, os produtos energéticos da cana-de-açúcar poderiam ajudar a enfrentar a situação de forma adequada (Horta Nogueira, 2018).

De fato, a bioenergia da cana-de-açúcar já começou a participar da matriz energética de vários países do mundo em desenvolvimento. Apesar do amplo interesse em biocombustíveis, até o momento tem havido uma produção muito limitada de biocombustíveis na África, com o Malawi sendo a exceção notável porque seu etanol tem sido misturado com a gasolina desde 1982 (Souza *et al.*, 2015). No nível global, a contribuição total de biocombustíveis na África não é reconhecida. Um número considerável de países africanos (Angola, Malawi e Moçambique) desenvolveram políticas de implementação do etanol E10 à base de cana-de-açúcar, mas o progresso até ao

momento tem sido lento, devido a falta de políticas, incentivos governamentais e investimentos do setor bioenergético (Horta Nogueira, 2018). Se ações forem tomadas, a África Subsaariana pode se tornar um ator importante na área de biocombustíveis, como atualmente é o caso do Brasil, com todos os benefícios socioeconômicos que a acompanham.

Fica claro, portanto, que a cana-de-açúcar é bem conhecida como uma das principais culturas da África, mas não tem sido utilizada de forma otimizada. A cana-de-açúcar apresenta assim oportunidades interessantes e únicas, particularmente na África Subsaariana, para abordar não apenas a produção agrícola e geração de renda, mas também o acesso à bioenergia, seja como combustível de etanol ou eletricidade. Angola é um dos países da África Subsaariana localizada dentro do trópico com terras aráveis consideráveis, solos férteis e um clima favorável para cultivar muitas culturas, incluindo culturas energéticas como a cana-de-açúcar.

3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO - ANGOLA

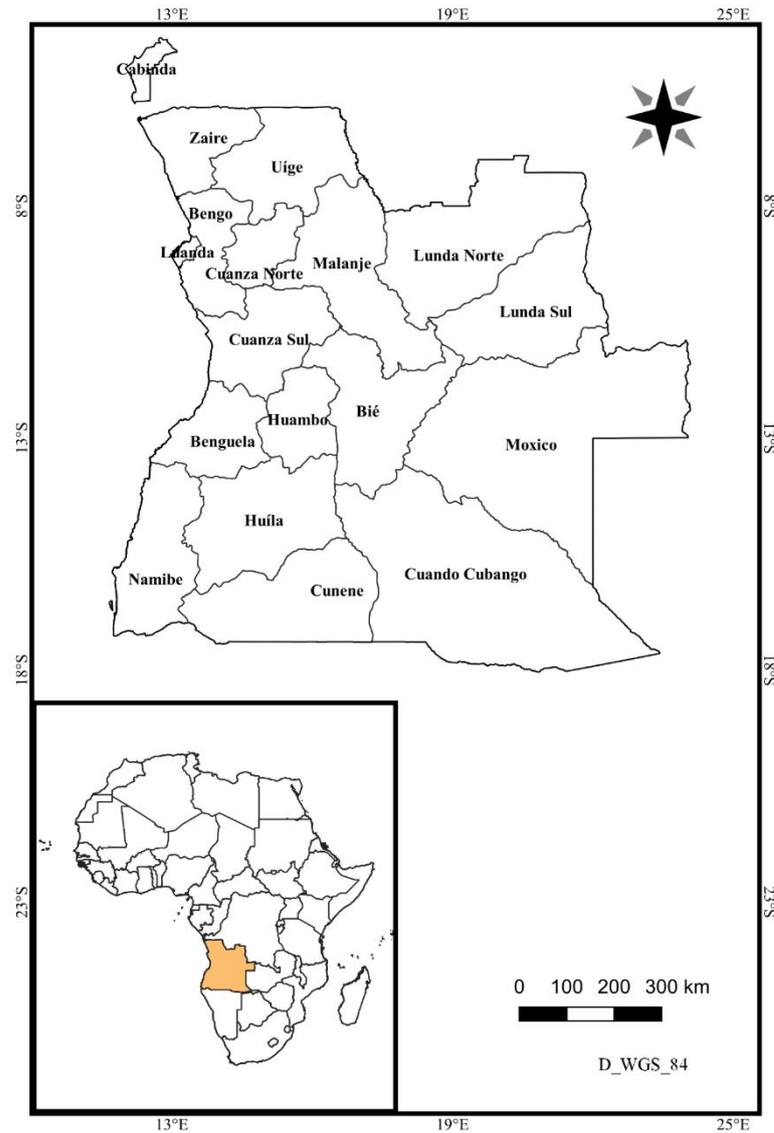
Em 2002, Angola emergiu de 27 anos de guerra civil que devastou o país após a independência e deixou grande parte de sua infraestrutura destruída ou danificada, e a maioria de sua população deslocada. Grande parte da infraestrutura existente foi construída bem antes da independência, que ocorreu em 1975. A rápida urbanização e industrialização levou Angola a se tornar um grande consumidor de energia, e o seu desempenho energético tem causado muita preocupação. Assim, aumentar o acesso a fontes de energias modernas de maneira sustentável ajudaria a melhorar os meios de subsistência direta, bem como indireta, por meio da promoção do desenvolvimento econômico. Este capítulo vai apresentar o perfil de Angola, começando em uma visão geral do país, culminando com o tema central com o foco em bioenergias.

3.1 Geografia

Angola está localizada na costa da África Austral, ao Norte é limitada pela República Democrática do Congo (RDC), ao Este pela Zâmbia e ao Sul pela Namíbia. Uma das suas províncias, Cabinda, faz fronteira com a República do Congo e com RDC. A capital comercial de Angola é Luanda, uma grande cidade portuária na costa Norte, que combina marcos coloniais de estilo português e habitações tradicionais africanos, e modernos complexos industriais (Angola: Country Profile Report 2020).

Angola é reconhecida como o 20º maior país do mundo, com uma área total de 1.246.700 km², e uma população estimada em 33 milhões de habitantes, é quase cinco vezes o tamanho do Reino Unido e do dobro do estado do Texas nos EUA (Bookworldfact, 2020; Road Transport Agency, 2021). Devido a vasta extensão do país, Angola está dividida em 18 províncias, conforme ilustra a Figura 3.1.

Figura 3.1. Localização de Angola em África e suas províncias



Fonte: Autor

3.2 Clima

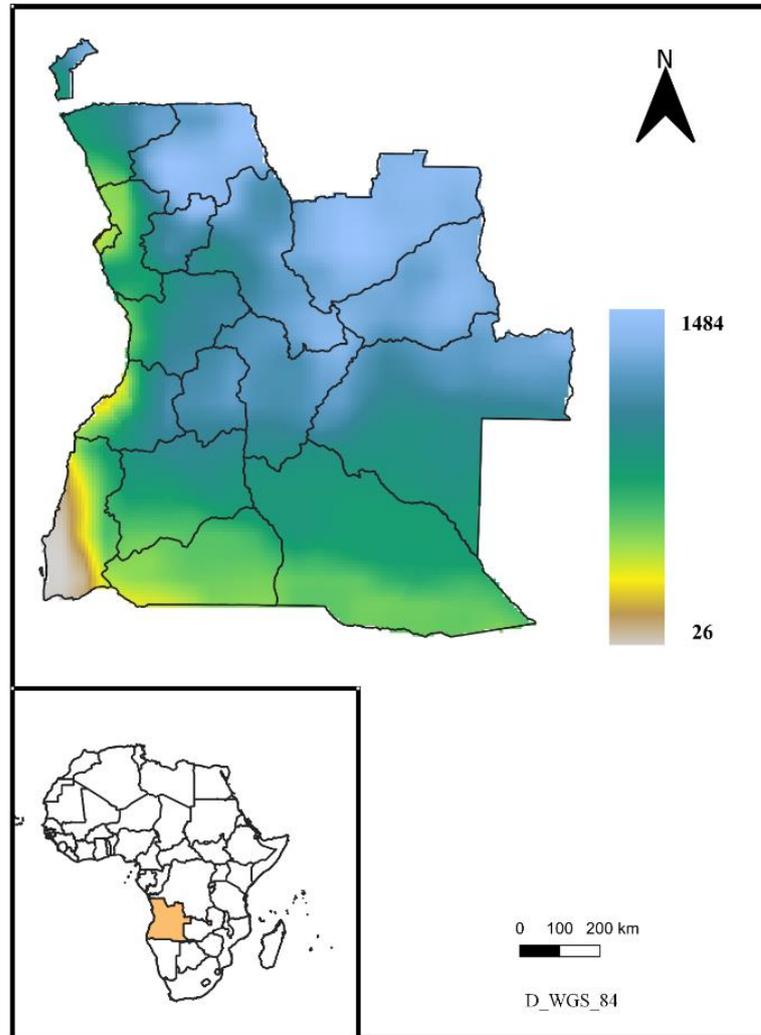
As condições climáticas de Angola, assim como o resto da África tropical variam amplamente, desde planícies húmidas no Norte e Nordeste até o deserto na costa Sul da fronteira com a Namíbia. Angola tem um clima tropical com alternância de estações chuvosas e secas que são condições ideais para o cultivo da cana-de-açúcar (MCTA 2021).

A estação de inverno, seca e fria vai de maio a outubro, enquanto a estação de verão, quente e húmida vai de novembro a abril. Chuvas fortes, que geralmente são acompanhadas por tempestades violentas, são registradas durante o mês de abril (Road Transport Agency, 2021).

A temperatura na região costeira é moderada pela corrente fria da província de Benguela ao largo da costa, que subsequentemente reduz a precipitação. As áreas costeiras são, portanto muito mais

seca com uma precipitação média anual de menos de 100 mm. A precipitação média anual mais elevada em Angola é observada no Norte, aproximadamente 1500 mm, e reduz à medida que se move para o Sul para 750 mm (Figura 3.2.).

Figura 3.2. Precipitação média anual de Angola (mm)



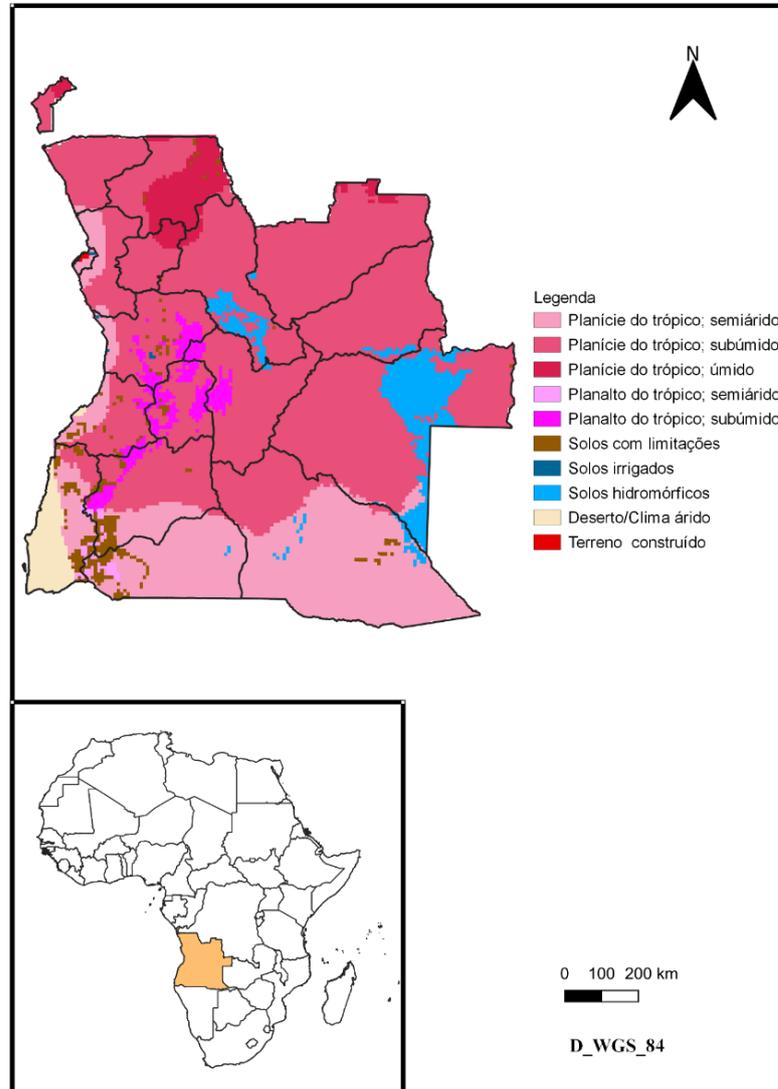
Fonte: Autor, com base no GAEZ v4, 2022

3.3 Agricultura

Angola é um país potencialmente rico em agricultura, possui abundância de terras aráveis, água doce e diversidade de condições climáticas adequadas à produção de variedades de produtos agrícolas, mas esse potencial é subutilizado. Do total de 1 milhão de km², com aproximadamente 1.600 km de costa. A estreita planície costeira eleva-se abruptamente para um vasto planalto interior com um ponto mais alto, o Morro do Moco, a 2.620 m de altura. O país está dividido em três zonas agrícolas principais que correspondem às principais características climáticas e geográficas do país: o Norte húmido; o semiárido do Sul e o Planalto Central, de clima semiúmido

(Figura 3.3.), que forma uma zona de transição entre o Norte e o Sul (FAO/WFP, 2006; World Bank, 2021).

Figura 3.3. Zonas Agroecológicas de Angola

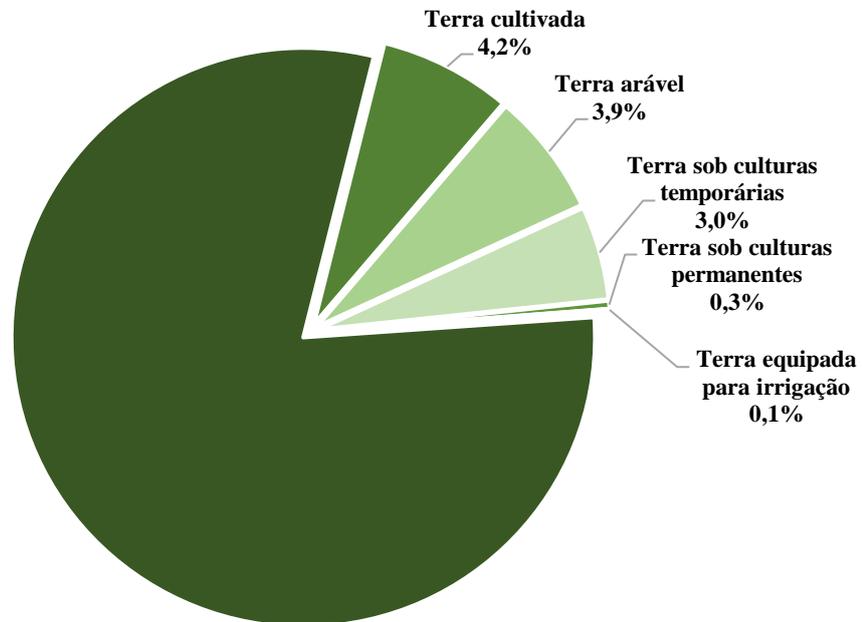


Fonte: Autor, com base no GAEZ v4, 2022

A produção agrícola é baseada na principal estação de cultivo de sequeiro, de setembro a maio (o plantio pode variar de setembro a fevereiro). No entanto, no Norte e no Centro, a precipitação mostra uma modalidade distinta com um período de seca entre meados de dezembro e meados de janeiro, dando-lhe assim duas épocas de plantio eficazes. O período de setembro a maio representa cerca de 95% da produção total de cereais, leguminosos e principais culturas alimentares como: milho, arroz, feijão, amendoim, mandioca, batata-doce. Os padrões de cultivo do país são variados. No Norte (Cabinda, Uíge, Cuanza Norte, Zaire, Malange) e no Nordeste (zona de Lundas), as principais culturas são a mandioca, feijão, amendoim e milho. No Planalto Central, o milho e o feijão dominam a área de cultivo de raízes, é consideravelmente menor do que no Norte. Como ilustra o Gráfico 3.1, as terras aptas para agricultura em Angola respondem por 57 Mha, o que

representa 45,7% da terra total, dos quais apenas 14,4 Mha encontram-se em atividades agrícolas (FAO, 2021; World Bank, 2021).

Gráfico 3.1. Terras aptas para agricultura em Angola, 2020



Fonte: FAOSTAT, 2021

Embora a agricultura represente apenas 9% do Produto Interno Bruto (PIB) do país, emprega 85% da população e é a principal fonte de emprego no país. Antes da Independência (1975), a produção de alimentos era alta e o país era grande exportador de milho e café.

A agricultura em Angola é predominantemente uma atividade de trabalho familiar para pequenos camponeses de subsistência, que plantam em média 1,4 ha por família em duas ou mais parcelas. A área plantada tem aumentado ligeiramente nos últimos quatro anos e depende principalmente da disponibilidade de mão-de-obra familiar para o preparo da terra. Recentemente, o governo investiu fortemente na produção de café e do etanol a partir da cana-de-açúcar, o que deve ajudar a diversificar as receitas agrícolas e as exportações (MCTA, 2021).

3.4 Características Socioculturais

Nos últimos 50 anos, a população de Angola cresceu substancialmente de 6,04 para 33 milhões de pessoas, aumentando a uma taxa anual crescente que atingiu um máximo de 4,07% em 1974 e depois diminuiu para 3,27% em 2020. Um pouco mais da metade da população total de Angola, 63% vive em áreas urbanas e 37% em áreas rurais, e uma forte concentração de 6,9 milhões de

peessoas na Capital da província de Luanda. O país tem uma das menores densidades demográficas do mundo com apenas 30,6 habitantes por km², no entanto continua a ter uma das taxas de fertilidade mais alta da África (registrando 5,9 filhos por mulher em média de 2010-2015). Apesar da densidade demográfica ser globalmente baixa, é extremamente desigual. As áreas urbanas em constante expansão, contrastam com grandes áreas escassamente povoadas, especialmente nas províncias localizadas ao longo da costa do país (MCTA, 2021).

A taxa de desemprego em Angola atinge quase metade da população, e aproximadamente 70% dos angolanos vivem abaixo da linha da pobreza (com menos de 2 US \$ por dia), sendo a pobreza mais prevalente nas zonas rurais (58%) do que nas urbanas (19%). A força de trabalho total é estimada em 13,29 milhões, dos quais cerca de 11 milhões estão engajadas na agricultura (MCTA, 2021).

Angola é um país multicultural e multilingue. O português, única língua oficial é conhecida por 80% da população como língua primária ou secundária. As seis línguas Bantu mais amplamente faladas são: Umbundu (23%), Kikongo (8,2%), Kimbundu (7,8%), Chokwe (6,5%), Ngangela (3,1%), Kwanyama (2,3%) (MCTA, 2021).

A educação em Angola melhorou com o governo prometendo uma campanha para reduzir drasticamente a taxa de alfabetismo. Seus esforços foram refletidos pelo aumento na porcentagem de alfabetização de meros 42% em 1990 para 71,1% em 2020 (CIA, 2022).

HIV/AIDS é outro problema que afeta a população angolana. Estima-se que a taxa de prevalência do HIV seja de 1,8%, ou seja, aproximadamente 340 mil pessoas vivem com HIV (UNAIDS, 2020). No entanto, isso é muito baixo em comparação com outros países africanos. Angola é considerada o país com a taxa de prevalência de HIV mais baixa na região da África Austral, por exemplo, em comparação com a África do Sul que tem uma taxa de 17,30%, Moçambique (12,10%) e Namíbia (12,10%) (CIA, 2022).

3.5 Transportes Rodoviário e Ferroviário

O setor de transportes rodoviário ou ferroviário têm um papel estratégico na economia de um país, com as empresas atuando em territórios integrados de bens e insumos em especial no escoamento da produção agrícola, a conexão entre as estradas é um meio de facilitar a comercialização de produtos agrícolas, o que é especialmente relevante em Angola. O setor de transportes nos próximos anos terá implicações para o crescimento do país tanto em termo populacional quanto econômico.

Um relatório especial de 2006 sobre a situação das safras e abastecimento de alimentos em Angola, produzido pela FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura), fez um amplo reconhecimento das más condições das redes de estradas de Angola. Conseqüentemente, as más condições tiveram implicações para a segurança alimentar de algumas províncias de Angola. A maior parte da carga em Angola é transportada por estradas em caminhões (FAO/WFP, 2006; MCTA, 2021).

A rede rodoviária cobre 75.000 km, dos quais 7.955 km são pavimentadas. O eixo principal liga a capital ao interior (Leste à Oeste). Ao mesmo tempo, há uma série de ramos que conectam as rodoviárias principais e permitem a comunicação com países vizinhos, especificamente com a Namíbia, a República Democrática do Congo e a República do Congo (MCTA, 2021).

O transporte público de passageiros está subdesenvolvido em Angola, sendo a utilização do transporte individual principalmente em detrimento do transporte coletivo. “*Candongueiros*”, velhas vans de público informal, são amplamente utilizados no país. Nos horários de pico, o tráfego nas áreas urbanas é muito intenso, e as emissões de gases poluentes são especialmente agravadas porque grande parte do país, a frota de automóveis é composta por veículos velhos com motores antigos e ineficientes (MCTA, 2021).

O sistema ferroviário em Angola consiste em cerca de 2.750 km, dividida em três ferrovias principais que foram construídas a leste da costa durante a época colonial, ligando os principais portos atlânticos de Angola ao interior. Muitas dessas linhas foram destruídas durante a guerra civil, mas um programa de reabilitação está em andamento desde 2005 (MCTA, 2021).

As três linhas ferroviárias são:

- 1** Caminhos-de-ferro de Luanda (CFL): Liga Luanda a Malanje, do centro à Norte do país;
- 2** Caminhos-de-ferro de Benguela (CFB): Liga o Porto do Lobito e o Luau na fronteira oriental da República Democrática do Congo;
- 3** Caminhos-de-ferro de Namibe/Moçâmedes (CFM): Liga o porto do Namibe às províncias meridionais de Cuando Cubango e Hull (vila de Menongue) e à fronteira com a Namíbia.

3.6 Recursos Naturais e Minerais

Angola é potencialmente um dos países mais ricos do mundo em recursos naturais e minerais, tendo o petróleo o seu maior recurso. A produção de petróleo e suas atividades de apoio contribuem

com aproximadamente 50% do PIB, mais de 70% das receitas do governo e mais de 90% das exportações do país. Produzindo mais de 800.000 barris de petróleo por dia (bpd), Angola é o segundo maior produtor de petróleo da África Subsaariana, um produtor líquido de gás natural. A produção de petróleo chegou aos 172.000 bpd, o máximo do período colonial. Em 1986 Angola produziu 280.000 bpd, e em 2020 Angola produziu em média 27,2 mil bpd, mantendo assim a posição de segundo maior produtor africano de petróleo, atrás da Nigéria (Road Transport Agency, 2021).

Os diamantes continuam a ser o segundo mineral mais importante em Angola, o país é o terceiro maior produtor de diamantes do continente, superado apenas pelo Botswana e pela República Democrática do Congo, com receitas de exportação representando 5% das receitas do governo. Outros minerais e recursos naturais importantes incluem minério de ferro, gás natural, fosfatos, cobre, feldspato, ouro, bauxita e urânio. No geral, suas principais exportações de minerais são petróleo bruto, diamantes, produtos petrolíferos refinados e gás (MCTA, 2021).

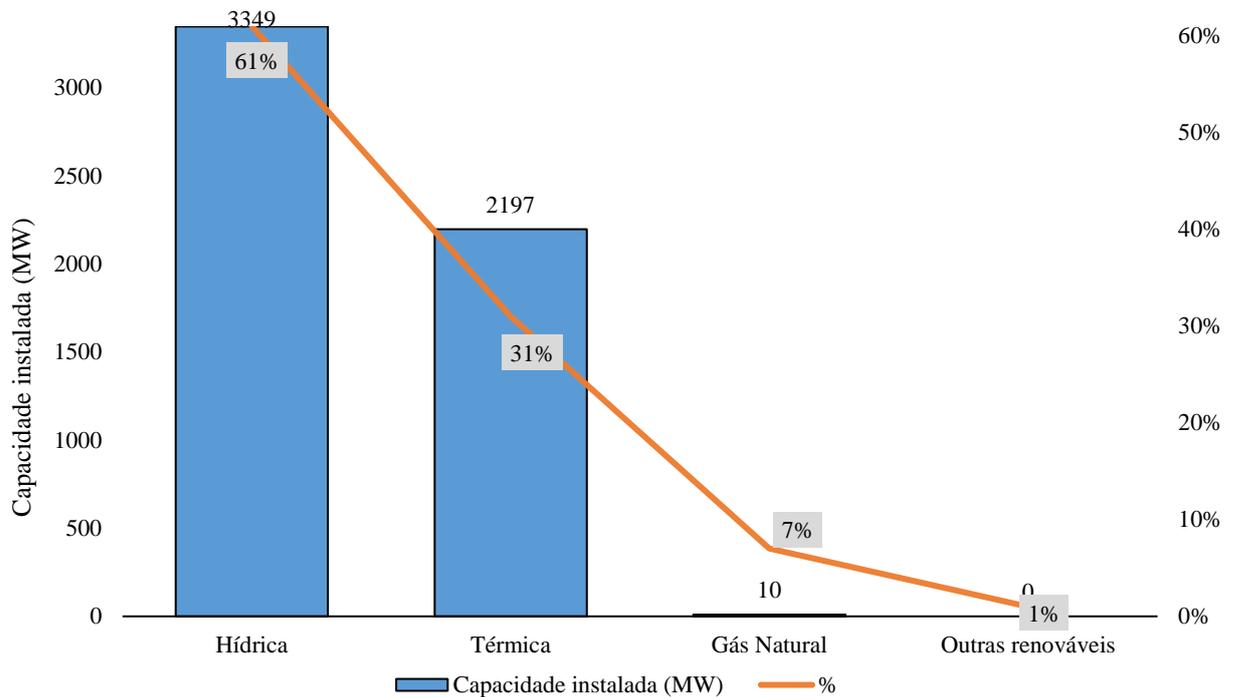
No entanto, apesar de Angola ser potencialmente rico em recursos naturais e minerais, grande parte das receitas das exportações de petróleo, está hipotecada através do reembolso de empréstimos anteriores garantidos pelo petróleo. Além disso, como Angola está reconstruindo sua infraestrutura, há forte demanda por aplicação de recursos governamentais em diversos setores do país.

O setor de energia é visto como essencial para a melhoria da situação socioeconómica do país e, portanto, investimentos em áreas como bioenergia parecem atraentes. Especificamente, a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar é uma forma de diminuir a dependência da receita do petróleo e tornando Angola autossuficiente em energia.

3.7 Setor energético de Angola

A atual matriz energética de Angola, no que diz respeito à eletricidade (Gráfico 3.2), assenta fundamentalmente em duas fontes: a hídrica com 61% o que representa mais de 3000 MW de potência instalada e térmica (a partir dos derivados do petróleo) com 31%, ou seja, 2197 MW de potência. As novas energias renováveis, como a eólica, solar e bioenergia não têm expressão e representam menos de 1% da energia consumida no país (MCTA, 2021; Petroangola, 2021).

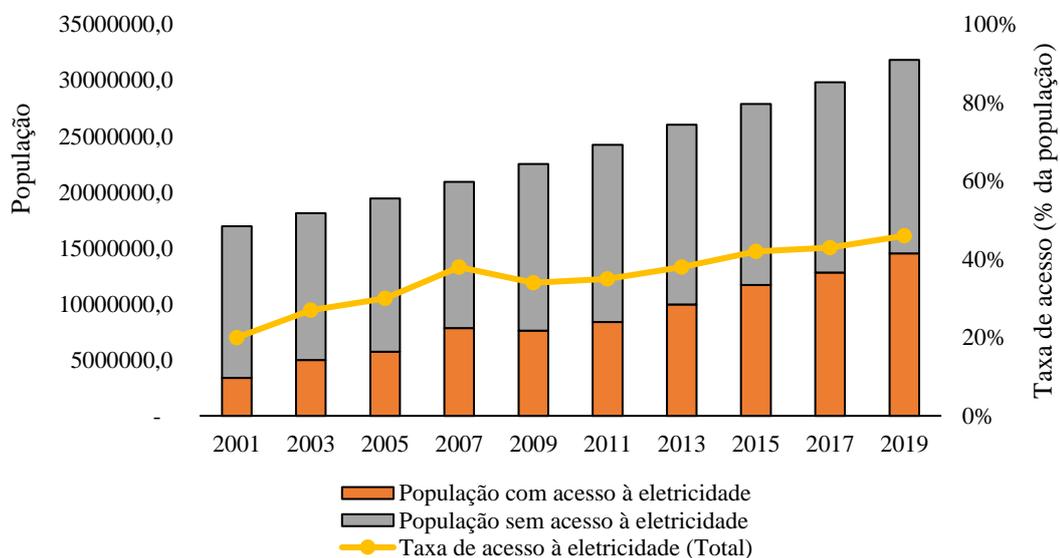
Gráfico 3.2. Matriz energética angolana, 2021



Fonte: (Petroangola, 2021)

O nível de eletrificação em Angola, é muito baixo, aproximadamente 46% da população tem acesso à eletricidade, o correspondente a 61% nas áreas urbanas e cai para 6,2% nas áreas rurais, no entanto, o fornecimento não tem sido confiável, pois os apagões ocorrem com frequência. Mais da metade da população, isto é, 18,3 milhões de angolanos não têm acesso a eletricidade (Gráfico 3.3). Além disso, esse número tende a aumentar em face ao rápido crescimento populacional.

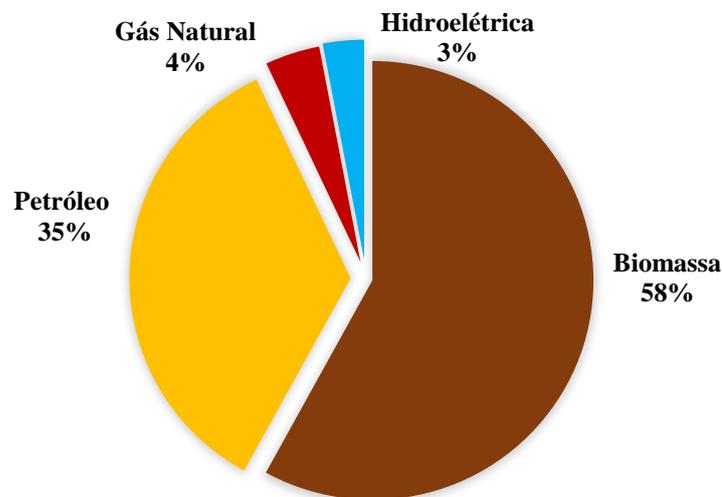
Gráfico 3.3. Acesso à eletricidade em Angola, 2000-2019 (Total)



Fonte: (ESMAP, 2022)

Em meio a falta de combustíveis modernos, conjugada com a pobreza local, a população recorre a outras alternativas para satisfação das suas necessidades energética, que por sua vez causam impactos negativos à saúde humana bem como ao meio ambiente. Estima-se que 58% (Gráfico 3.3.) da energia primária utilizada pela população angolana provenha da fonte biomassa, principalmente nas zonas rurais, onde concentra-se a maior parte da população pobre do país (Cativa, 2018; EIA, 2019).

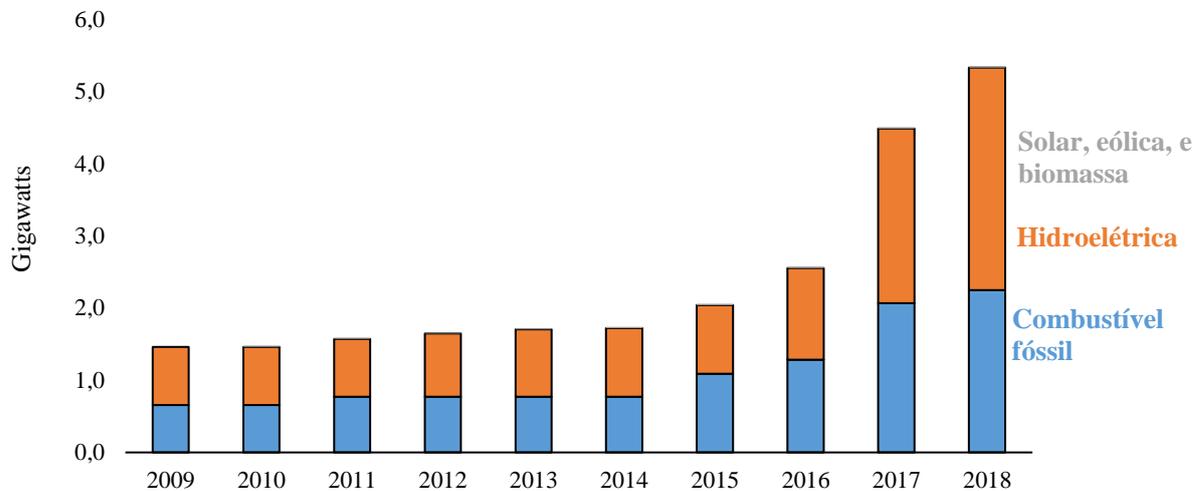
Gráfico 3.4. Consumo primário de energia em Angola por fonte, 2021



Fonte: EIA, 2021

Em 2018, Angola produziu 5,4 Gigawatt (GW) de potência elétrica dos quais 57,4% da fonte hidrelétrica (3,1 GW), 42,6% de combustíveis fósseis (2,3 GW) e gerou 13 Terawatts horas (TWh) de eletricidade, principalmente de fontes hidrelétricas e de combustíveis fósseis (Gráfico 3.4.).

Gráfico 3.5. Potência elétrica instalada em Angola por fonte, 2009-2018



Fonte: EIA, 2021

Em 2016, o governo angolano desenvolveu o “Angola Energia 2025”, um documento que estabelece os objetivos e metas para o setor elétrico de 2018 à 2025. De acordo com este documento, a oferta de eletricidade deverá aumentar, com novos projetos em andamento e o crescimento da demanda deverá atingir 7,2 GW até 2025, quatro vezes o valor atual, como resultado da eletrificação de 60% do território (MINEA, 2016). Segundo a Estratégia para as Energias Renováveis do governo angolano, os polígonos florestais existentes, as áreas agrícolas favoráveis para plantação de cana-de-açúcar ou outras culturas com potencial energético, as explorações de gado e os resíduos sólidos urbanos, todos apresentam um potencial para produção de potência elétrica que pode superar 3 GW (MINEA, 2015). Essa expansão garantirá maior acesso da população à energia elétrica e aumento do consumo residencial de eletricidade, contribuindo para o crescimento da riqueza nacional, melhoria dos serviços e desenvolvimento industrial.

Muito do crescimento na geração de eletricidade veio de projetos hidrelétricos que foram colocados a funcionar durante os últimos anos. Mas fornecer acesso confiável aos usuários finais continua sendo um desafio significativo porque a rede de transmissão e distribuição no país não foi atualizada ou expandida. A rede de distribuição também sofre perdas significativas de energia devido a conexões ilegais e à aplicação inadequada da coleta de receitas de usuários finais sem medições (EIA, 2021).

A rede elétrica de Angola é constituída por três sistemas principais independentes, baseados em bacias hidrográficas, nomeadamente, os Sistemas Norte, Centro e Sul (UNDP, 2015; MINEA, 2016).

- 1- Sistema Norte que abastece as províncias de Luanda, Bengo, Cuanza Norte, Malange e Cuanza Sul;
- 2- Sistema Central que abastece as províncias de Benguela, Huambo e partes do Bié;
- 3- Sistema Sul que abastece as províncias da Huíla e Namibe.

3.7.1 O papel das energias renováveis em Angola

Como a taxa de eletrificação de Angola comparado aos outros países africanos é muito baixa, aproximadamente 54% da população não tem acesso a eletricidade (ESMAP, 2022). O governo angolano vê as energias renováveis e limpas como um empreendimento promissor para atender às necessidades básicas de desenvolvimento da população de baixa renda. Em 2015, o governo angolano implementou a Estratégia Nacional para as Energias Renováveis. A presente estratégia procura contribuir para a Política e Estratégia de Segurança Energética Nacional, ao promover a diversificação da matriz energética nacional, bem como o Programa de Desenvolvimento Rural Integrado e Combate à Pobreza, e para a promoção do crescimento e emprego.

O governo angolano prevê através da presente estratégia como meta para 2025 que pelo menos 7,5% da eletricidade gerada no país será proveniente de novas energias renováveis. A bioenergia é uma das fortes apostas com uma meta de 500 MW (Mega Watt), dos quais 250 MW provenham de usinas sucroalcooleiras. Na vertente internacional, a presente estratégia contribui para o combate às alterações climáticas e está articulada com a participação de Angola na SADC e IRENA (MINEA, 2015). Em países em subdesenvolvimento, como é o caso de Angola, a pobreza é concentrada principalmente nas áreas rurais onde as formas de energias usada é predominantemente a lenha e outras formas de biomassa.

A situação socioeconômica e energética de Angola realça a necessidade de introdução de fontes de energia não poluentes. Ao introduzir a bioenergia, além da segurança energética, proporcionaria acesso a serviços de energia sem impactos adversos à saúde e ao meio ambiente, e atividades geradoras de renda para os pobres, o que poderia aliviar a pobreza. Portanto, a introdução da bioenergia, facilitará a jornada para o desenvolvimento sustentável, melhorando as condições ambientais, o bem-estar social e o padrão de vida no país. O potencial de utilização de eletricidade a partir do bagaço da cana pode servir de incentivo para implementação da bioenergia e mitigar a pobreza energética no setor elétrico angolano. Por outro lado, Angola está em um processo de reconstrução das suas infraestruturas danificadas pelos 27 anos de guerra civil, a bioenergia da cana-de-açúcar tem potencial para ser uma opção financeira e de

desenvolvimento sustentável do país. Além disso, como 85% da força de trabalho de Angola está envolvida na agricultura, é plausível iniciar uma transformação social e econômica neste mesmo setor, facilitada pelo cultivo de matérias-primas para a bioenergia.

3.7.2 O setor bioenergético de Angola

Angola começou a dar os primeiros passos rumo ao desenvolvimento do setor bioenergético em 2014, com o surgimento da primeira Companhia de Bioenergia de Angola (Biocom). A usina da Biocom é um investimento privado, com 20% do capital da empresa estatal angolana do ramo petrolífero (Sonangol), 40% do Instituto de Gestão de Ativos e Participações do Estado (IGAPE) e 40% do capital da Odebrecht Engenharia e Construção (OEC) (Biocom, 2022).

A Biocom foi criada para diversificar a economia por meio do acionamento da agroindústria canavieira e da geração de empregos e renda. A usina é fortemente dependente de tecnologia transferida do Brasil no modelo agroindustrial da cana-de-açúcar (Souza *et al.*, 2016; BIOCUM, 2021). Com a entrada da Biocom em Angola, a produção da cana-de-açúcar tem aumentado significativamente, por exemplo, em 2020, Angola dedicou cerca de 20 mil hectares de terra na produção de aproximadamente 807 mil toneladas de cana-de-açúcar, com um rendimento de 39,04 t/ha, diferente da produção de 2010 de 500 mil toneladas antes do aparecimento da Biocom (FAO, 2021).

A usina fica instalada no Polo Agroindustrial de Capanda (PAC), na província de Malanje. O parque industrial ocupa uma área de 81.201 ha sendo: 70.106 ha agricultáveis e 11.095 ha de áreas de preservação ambiental. A Biocom produz açúcar, etanol e energia elétrica a partir da cana-de-açúcar. Em 2019 a usina produziu 110 mil toneladas de açúcar, 14 mil metros cúbicos de etanol e 60 mil MW de energia renovável. A usina é autossuficiente na produção de energia (através de um processo de cogeração que utiliza componentes da cana-de-açúcar) e tem uma capacidade excedente que é vendida à Rede Nacional de Transportes de eletricidade, enquanto o etanol é destinado às empresas de bebidas, alimentos e produtos de limpeza (Biocom, 2022).

Perspectiva-se que até 2026 a usina da Biocom aumente a sua produção ao limite da capacidade para moer 2,2 Mt de cana-de-açúcar, que darão origem a 256 mil toneladas de açúcar e a 30 milhões de metros cúbicos de etanol, além de 235 GWh de energia elétrica por ano. O etanol será vendido às distribuidoras de combustíveis para ser adicionado à gasolina e 30% da energia produzida a partir da queima do bagaço e palha garantirem a autossuficiência energética da usina. Os 70% excedentes serão vendidos às centrais de abastecimento do país (Biocom, 2022). Impactos sociais são visíveis com a instalação da usina da Biocom na localidade. Atualmente a usina conta

com 2800 trabalhadores, maioritariamente nacionais, dos quais 2500 oriundos da província de Malanje. Mais de 300 famílias vêm se beneficiando da política ao incentivo de desenvolvimento econômico e sustentável para a promoção de renda.

Com os seus enormes recursos de petróleo, gás natural, diamantes, disponibilidade de terras agrícolas e precipitação adequada, Angola é um país potencialmente rico. No entanto, ainda é um dos países mais pobres do mundo, refletindo o pesado tributo do colonialismo e os 27 anos de guerra civil. O desempenho do país fora do setor de minerais ainda não atingiu todo o seu potencial devido à falta de capacidade institucional e ao ambiente de negócio desafiador e, como resultado, deixou a maioria dos angolanos sem uma estrutura de renda sustentável. Para que o país aproveite o máximo dos seus recursos naturais, teria de implementar reformas governamentais e reduzir a corrupção. No entanto, a introdução de energia renováveis, como o etanol ou eletricidade cogeraada com bagaço é outro esforço promissor para promover atividades geradoras de renda. Os programas de bioenergia têm potencial para levar Angola ao seu pleno desenvolvimento aproveitando as vastas extensões de terras agrícolas não florestais disponíveis.

Os recursos de energias renováveis, além de diversificar a matriz energética mundial, também são imperativos para atender às necessidades de energia de Angola, uma vez que a demanda e o consumo de petróleo devem aumentar à medida que a infraestrutura é renovada e expandida. Além disso, visto que apenas 46% do país tem acesso à energia elétrica, a eletricidade gerada a partir da bioenergia (cogeração de eletricidade), é mais um incentivo para a implantação da bioenergia partir da cana-de-açúcar.

Tendo em vista o seu grande potencial de bioenergia da cana-de-açúcar, é interessante explorar a quantidade real de terras existentes que poderiam ser adequadas para a produção de cana-de-açúcar. Também interessa a quantidade de cana que poderia ser produzida nessas terras, cujas tecnologias podem converter em recursos bioenergéticos. Avaliar o potencial de um país em produzir bioenergia da cana-de-açúcar requer saber quanta terra está disponível para o cultivo da safra, e isso pode ser feito por meio de novas ferramentas de estudos. A seção a seguir vai descrever as ferramentas utilizadas na pesquisa para avaliar o potencial de terra disponível para a produção da bioenergia a partir da cana-de-açúcar em Angola.

4 METODOLOGIA

As seções anteriores forneceram o enquadramento que constitui o referencial teórico desta pesquisa, bem como uma descrição da área de estudo. Este capítulo fornecerá uma visão geral da abordagem metodológica adotada na pesquisa para identificar áreas adequadas para o cultivo de cana-de-açúcar e as ferramentas utilizadas para avaliar a adequação da área de estudo, bem como as etapas tomadas para produzir os resultados.

4.1 Fluxograma da pesquisa

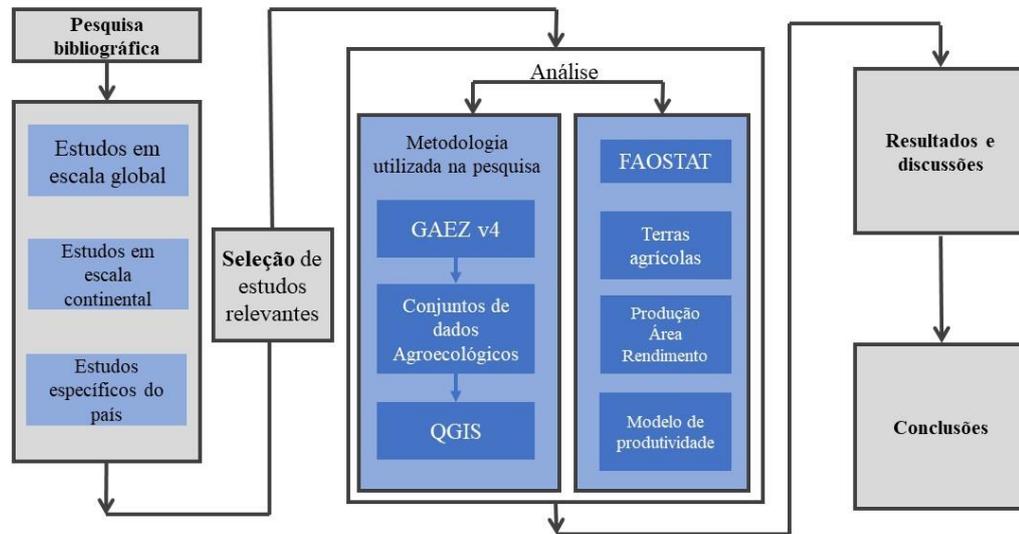
Para a abordagem nesta pesquisa, elaborou-se um fluxograma (Figura 4.1) para visualizar como foi alcançado e em que ordem os resultados foram obtidos de todas as etapas envolvidas. Primeiro avaliou-se as revisões bibliográficas existentes na temática bioenergia. Atenção em particular foi dada para aqueles estudos com informações sobre África. Estudos adicionais concentraram-se em Angola. Ao incluir estudos relacionados com Angola, tornou possível fazer comparações com estudos continentais e globais de maior escala.

A análise do estudo está dividida em 2 seções (Figura 4.1). Na primeira seção, considerada seção principal, foram analisados os procedimentos e as suposições usadas na pesquisa, usando o banco de dados de modelagem de Zonas Agroecológicas GAEZ (*Global Agro-Ecological Zones*) e o software QGIS (*Quantum GIS*) para avaliar terras para fins de cultivo da cana-de-açúcar para bioenergia em Angola. Várias etapas foram seguidas para obtenção de conjunto de dados agroecológicos considerados no estudo.

Na segunda seção da análise, foi utilizado o banco de dados da FAOSTAT para analisar os dados complementares que não foi possível obter na primeira seção da metodologia, devido às limitações e dados fora do contexto da pesquisa. Áreas com diferentes restrições foram sucessivamente eliminadas, a fim de obter um conjunto de terras disponíveis para a expansão sustentável da cana-de-açúcar. Áreas protegidas, áreas de cultivo indicadas por outras culturas, bem como áreas que se mostrariam biologicamente inadequadas para o cultivo da cana, tiveram que ser filtradas. Finalmente, na última análise, utilizou-se um modelo de produtividade agrícola, para estimar o potencial de produtividade da cana-de-açúcar, nas respectivas áreas de estudo em função da precipitação e temperatura.

A fim de detalhar e identificar os principais resultados obtidos na análise do estudo, considerações foram feitas na seção dos resultados e discussões. O foco e as considerações finais da pesquisa são destacados na conclusão.

Figura 4.1. Fluxograma da pesquisa de dissertação



Fonte: Autor

A seguir serão descritos brevemente todos os processos avaliados com o intuito de conhecer a abordagem metodológica na seção de análise desta pesquisa.

4.2 Uma Avaliação da Adequação de Terra

À medida que os números da população estão aumentando constantemente, também aumenta a demanda por alimentos e combustíveis. Essa demanda crescente pressiona a disponibilidade de terras, levando a pastagem e cultivo de terras menos adequadas a esses usos e que também são ecologicamente mais frágeis. Portanto, a fim de preservar a natureza e dos recursos terrestres e fornecer alimentos e combustíveis de forma sustentável, o planejamento do uso da terra torna-se crítico.

As avaliações de terra podem ser realizadas em termos físicos ou econômicos, com avaliações físicas avaliando a adequação de uma terra usando características físicas (biofísicas) como tipo de solo, precipitação e disponibilidade de água. Em termos próprios, muitas avaliações físicas da terra são, na verdade, realizadas em termos quantitativos, como a metodologia de zoneamento agroecológico, que é usada para definir a adequação, o potencial de produção e impactos ambientais de uma terra. Portanto, esse estudo é uma avaliação quantitativa, que envolve a filtragem de áreas protegidas, classes de cobertura do solo, bem como declividades. No entanto, o estudo também inclui alguns julgamentos qualitativos, distinguir as principais áreas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar com base em critérios propositalmente selecionados.

4.3 Visão geral da metodologia

Este estudo empregou as técnicas do GAEZ e GIS para avaliar terras para fins de cultivo da cana-de-açúcar para bioenergia. A pesquisa adotou uma abordagem evolutiva da metodologia, sendo que o procedimento metodológico foi continuamente desenvolvido e aperfeiçoado ao longo da pesquisa. A etapa inicial da metodologia foi a identificação de áreas aptas para o cultivo da cana-de-açúcar na área de estudo. Isso foi possível por meio do GAEZ para avaliação de potenciais ecológicos de culturas agrícolas, bem como para culturas específicas para produção de biocombustíveis e gramíneas perenes, GAEZ, foi desenvolvido pelo Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA) e a FAO (FAO and IIASA, 2021).

4.4 Ferramentas para avaliação

4.4.1 GAEZ

O portal de dados GAEZ é um aplicativo web interativo multilíngue projetado para fornecer acesso aberto à conjunto de dados agroecológicos, que relata o estado e as tendências da produção agrícola e a adequação das culturas em cenários climáticos passados, atuais e futuros em uma escala global em variedades de tipos de culturas. O desenvolvimento do portal GAEZ seguiu com um processo passo a passo com novas funcionalidades sendo disponibilizados, com foco em novos suporte a consulta, pesquisa, exibição e *downloads* dos arquivos de saída de camadas raster (FAO and IIASA, 2021).

Para esta pesquisa o portal GAEZ v4 (destacando a versão 4.0) foi usado para estimar o potencial de produção agrícola da cana-de-açúcar em Angola. O GAEZ v4, baseia-se em princípios de avaliação de terras bem estabelecidas para avaliar os recursos naturais e identificar opções adequadas de utilização de terras agrícolas. Ele identifica limitações de recursos e oportunidades com base nas características ecofisiológicas das plantas, requisitos edafoclimáticos das culturas e os usa para avaliar adequação e os potenciais de produção para tipos de culturas individuais sob condições específicas de insumos e manejo, classificando as áreas em diferentes níveis de aptidão em Muito adequado (*Very Suitable – VS*) à Não adequado (*Not Suitable – NS*), como ilustrado na Tabela 4.1. A aptidão total da terra e das áreas de cultivo é resumida com base na classificação de um Índice de Aptidão (*Suitability Index - SI*). O SI reflete a composição da aptidão espacial de um pixel de acordo com a definição das classes de aptidão e manejo (FAO and IIASA, 2021).

Os resultados são dados em categorias de uso da terra, impactos das mudanças climáticas sobre o potencial de produção de culturas e necessidades de água de irrigação para climas atuais e futuros. Para Angola, o potencial de produção da cana-de-açúcar foi estimado para o clima de referência (período 2011-2040).

Tabela 4.1. Classes de aptidão do GAEZ v4

Classes de aptidão do GAEZ			Rendimento máximo atingível (%)
Terra de primeira	VS	Muito adequada	80-100
Terra boa	S	Adequada	60-80
	MS	Moderadamente adequada	40-60
Terra pobre	ms	Marginalmente adequada	20-40
	vmS	Muito marginalmente adequada	5-20
	NS	Não adequada	< 5

Fonte: (FAO and IIASA, 2021)

4.4.1.1 Limitações do GAEZ v4

Degradação da terra em seus múltiplos aspectos, incluindo elementos cruciais como a degradação do solo (erosão do solo, contaminação, compactação, esgotamento de nutrientes e perda de biodiversidade), a degradação da vegetação e o declínio dos recursos hídricos em qualidade e quantidade não são levados em consideração ou são apenas parcialmente levados em consideração. Eles obviamente influenciam o rendimento e a capacidade de produção sustentável e seria desejável um tratamento mais aprofundado desses fatores.

As necessidades socioeconômicas das populações mais ricas e em rápido crescimento são a principal força motriz na alocação dos recursos da terra para vários tipos de usos, sendo a produção de alimentos o principal uso da terra. Para o planejamento racional do desenvolvimento agrícola sustentável, uma compreensão sistemática e espacialmente detalhada do uso da terra pelos agricultores e considerações e restrições socioeconômicas será crucial. Até o momento, o uso de informações socioeconômicas no GAEZ está limitado à especificação de modos e finalidades de produção agrícola, quantificação de níveis de insumos e manejo, inclusão de preços agrícolas e consideração de números e distribuição da população.

A agricultura abrange, por definição além do cultivo, uma ampla gama de outras atividades e usos da terra incluindo agrossilvicultura, pecuária e pesca interior. A avaliação do GAEZ v4 não abrange todos esses setores e se concentra principalmente no potencial de cultivo de culturas (para alimentos, forragem, fibra ou matéria-prima para biocombustíveis). No entanto, os resultados do modelo podem e têm sido usados como espinha dorsal agrônômica espacial para apoiar várias outras aplicações no planejamento do desenvolvimento agrícola, estudos de

cenários de impactos e adaptação às mudanças climáticas ou para avaliar opções e implantação de produção de bioenergia renovável.

A terra tem muitas funções importantes. Os resultados do GAEZ enfatizam a adequação da terra para a produção agrícola. A necessidade de planejar mais e melhores suprimentos de alimentos, com menos recursos e com menos impactos ambientais, terá que continuar com alta prioridade nas próximas décadas.

4.4.2 Sistemas de Informação Geográfica

Os GIS são estruturas tecnológicas que permitem a análise e manipulação de dados espaciais. Eles podem fornecer informações sobre relacionamentos e tendências entre características espaciais em uma área geográfica. O GIS é, portanto, definido como um “sistema baseado em computador para a captura, armazenamento, recuperação, análise e exibição de dados espaciais (Skidmore, 2002). Suas capacidades espaciais analíticas o tornam uma ferramenta conveniente para análise de adequação do solo, apresentando resultados na forma de mapas e relatórios que podem ser significativos para um usuário local. O GIS é útil para atender aos objetivos de uma avaliação de adequação da terra, como a construção de bancos de dados geográficos para a adequação da terra, bem como a seleção de novas áreas para o plantio de cultivos. Por essas razões, vários estudos de adequação da terra empregam o GIS como a principal ferramenta analítica e de processamento de dados (Boonyanuphap *et al.*, 2004).

Neste estudo, o software GIS utilizado foi o QGIS-Białowieża (versão 3.22.5). O QGIS é um software gratuito e de código aberto que permite aos usuários criar, editar, visualizar, analisar e publicar informações de mapas georreferenciados. O software QGIS foi usado para o recorte de camadas raster e vetoriais obtidos do GAEZ, para processar e exibir resultados de dados, como Mapas de Cobertura de Terra, Modelos Digitais de Elevação e cálculo de Áreas da nossa zona de interesse.

4.5 Fonte de dados

Todos os conjuntos de dados usados neste estudo estão disponíveis em formato digital e aberto ao público. É importante notar que dados precisos e de alta resolução para o continente africano são difíceis de obter. No entanto, como este estudo analisa a adequação em todo o território angolano, os mapas administrativos do país foram obtidos da base de dados GADM (www.gadm.org), de julho de 2015, na versão 2.5.

4.6 Avaliação da disponibilidade de terras

O potencial de produção da cana-de-açúcar foi estudado com base em quantidades de terras adequadas e disponíveis, com rendimentos esperados por hectare. Para avaliar a aptidão da cana-de-açúcar no território angolano, dois cenários de estudo foram propostos: avaliar a aptidão da cana-de-açúcar em condições de sequeiro e em condições de irrigação. O SI da cultura foi utilizado. O SI varia entre 0 e 100; SI = 0 representa condições inadequadas, enquanto SI = 100 representa condições muito adequadas para o cultivo da cana-de-açúcar. Assumimos que a área para a expansão da cana-de-açúcar em condições de sequeiro e irrigação, a ser adotada nos cenários de produção de bioenergia, seria apenas aquela com SI > 75 (muito adequado), ou seja, terra de primeira qualidade com alto potencial. As terras de Angola potencialmente adequadas para o cultivo da cana-de-açúcar de sequeiro seriam aquelas onde a precipitação é baixa ou quase inexistente, permitindo o cultivo agrícola sem a necessidade de distribuição de água irrigada ou controlada, assumindo alta produção de insumos sob condições climáticas locais. Por outro lado, as terras de Angola aptas à agricultura irrigada foram identificadas neste cenário. As terras potencialmente adequadas para a cana-de-açúcar de sequeiro e irrigada foram identificadas na modelagem feita pelo GAEZ e mostradas em imagens GIS. A área de terra do país foi, então, submetida a um conjunto de restrições sucessivas de sustentabilidade

4.7 Restrições

É fundamental que as áreas de expansão da cana-de-açúcar atendam à sustentabilidade e à legislação vigente, principalmente no que diz respeito às áreas designadas por lei para conservação ambiental. O GAEZ v4 respeita a terra marcada com status de proteção ou com reconhecido valor de biodiversidade. Assim, exclusões de áreas foram feitas para estimar as terras disponíveis para a produção de cana-de-açúcar em Angola. Muitas dessas exclusões podem estar relacionadas às condições do solo e clima. Avaliar a cobertura atual do solo foi essencial para uma gestão sustentável da terra, fornecendo informações para o planejamento, desenvolvimento e manejo do território angolano.

A primeira filtragem considerou a proteção da biodiversidade na produção de cana-de-açúcar, excluindo áreas protegidas. A segunda filtragem excluiu as áreas atualmente cultivadas com cana-de-açúcar e outras culturas temporárias e permanentes. Mesmo não sendo consideradas impróprias, as áreas com cana-de-açúcar foram excluídas nesta etapa do estudo, pois o objetivo é buscar novas fronteiras de expansão.

A terceira filtragem focou-se na topografia, com a necessidade de proteger o solo e reduzir o risco de erosão. Terrenos inclinados estão sujeitos a maiores taxas de escoamento de água e erosão do solo e, em geral, entende-se que quanto mais íngreme for o declive, maior será a restrição ao potencial de produtividade. As classificações de inclinação foram definidas para as oito classes de faixa de inclinação usadas no banco de dados de recursos terrestres: 0-0,5% muito plano, 0,5-2% plano, 2-5% levemente inclinado, 5-8% ondulado, 8-16% ondulado, 16-30% montanhoso, 30-45% íngreme e > 45% muito íngreme. A declividade desempenha um papel essencial, especialmente quando se considera o cultivo mecanizado (FAO and IIASA, 2021).

Finalmente, para a avaliação da aptidão de terras para o cultivo da cana-de-açúcar em Angola, sendo um país do trópico, com características edafoclimáticas ótimas de solos férteis e fisicamente adequados, com boa retenção de umidade para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, foram determinadas as características do solo no país que estão relacionadas à resposta da produtividade da cana-de-açúcar

4.8 Modelo de produtividade agrícola

O modelo proposto para estimar o potencial de produtividade da cana-de-açúcar com práticas agrícolas adequadas em diferentes condições climáticas foi o modelo apresentado pela IRENA (2019), aplicado em plantações de cana-de-açúcar da África Austral para prever a produtividade da cana-de-açúcar, considerando os efeitos do clima:

$$Y = 80,0 + 0,01DD - 0,1HD \quad (1)$$

Onde:

Y = Rendimento médio dos colmos da cana-de-açúcar [t/ha]

DD = *Degree Days* (Graus-Dias) para temperatura a base de 20 ° C [°C-dia]

HD = *Annual hydric deficiency* (Deficiência hídrica anual) para 100 cm de profundidade [mm]

Com base na avaliação da disponibilidade de terra e da produtividade, foi possível simular cenários para a produção de matéria-prima para o processamento da cana-de-açúcar. Para cada cenário, foi apresentada a produção de etanol e eletricidade, mostrando o potencial de oferta de energia para diferentes tecnologias.

4.9 Cenários para a produção de bioenergia da cana-de-açúcar

Para explorar o potencial de produção de bioenergia em Angola, quatro cenários alternativos foram simulados, que incorporam inovações tecnológicas por meio da modernização da biorrefinaria de cana-de-açúcar. A Tabela 4.2 faz um resumo dos cenários e tecnologias usadas para o processamento de cana-de-açúcar para produzir etanol e eletricidade. Grandes quantidades de eletricidade adicional podem ser geradas para venda à rede pública, usando o bagaço e a palha de cana como combustíveis para as caldeiras.

Tabela 4.2. Resumo das tecnologias e matéria-prima usada para processamento de cana-de-açúcar para bioenergia

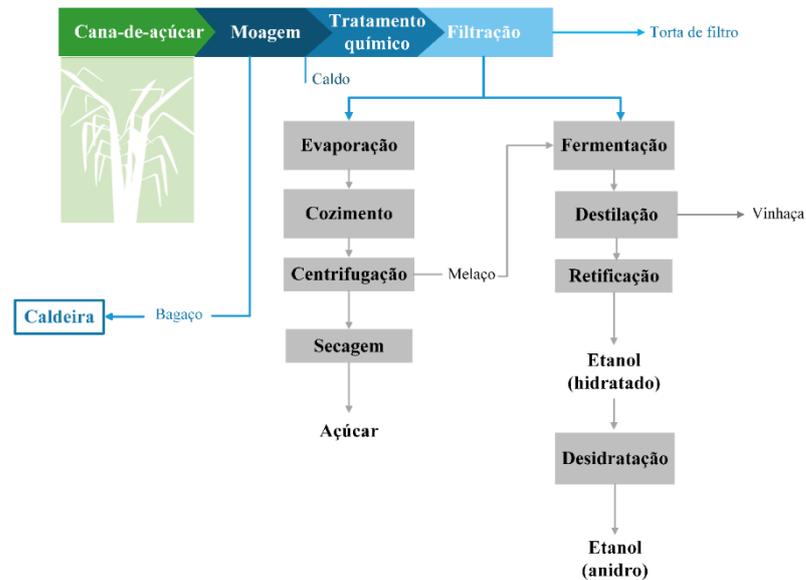
Cenário	Descrição
I	Biorrefinaria de tecnologia convencional para produção de açúcar e etanol 1G a partir do melaço sem excedente de eletricidade
II	Biorrefinaria de tecnologia convencional para produção de etanol 1G a partir do caldo direto e excedente de eletricidade
III	Biorrefinaria de tecnologia avançada para produção de etanol 1G2G e excedente de eletricidade (50% de palha) a partir de cana convencional
IV	Biorrefinaria integrado para a produção de etanol 1G2G, e excedente de eletricidade (50% de palha) a partir da cana-energia

Fonte: Autor

A seguir serão detalhados os processos e tecnologias utilizados em cada cenário considerado para a conversão de cana-de-açúcar em energia (etanol e eletricidade).

Cenário I (CI-1G): representa o modelo comum de produção de cana-de-açúcar, em que o açúcar é o principal produto, tendo o melaço como subproduto, e a cogeração de eletricidade visa à autossuficiência (sem excedente). O etanol é produzido por meio de uma destilaria anexa em um processo convencional a partir do melaço (Figura 4.2). Trata-se do passo inicial mais frequente e aconselhável para a introdução da produção de bioenergia em um país onde a cana já é cultivada e processada para a produção de açúcar

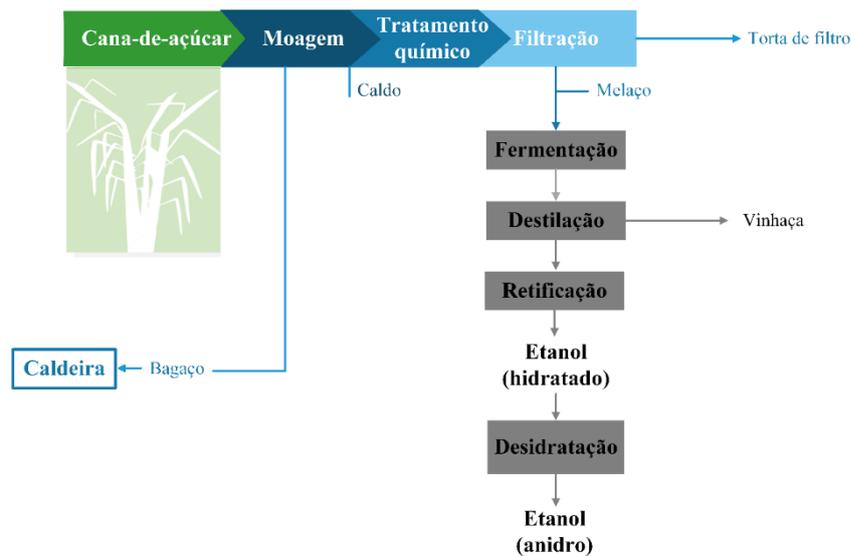
Figura 4.2. Diagrama de fluxo da produção de açúcar e bioenergia – CI-1G



Fonte: IRENA, 2019

Cenário II (CII-1G): A segunda configuração é uma biorrefinaria de etanol, processando a mesma quantidade de matéria-prima considerada no CI-1G, mas sem produção de açúcar, usando toda a cana para produzir etanol a partir do caldo direto com tecnologias convencionais e eletricidade excedente (sem uso da palha) como incremento dos combustíveis para as caldeiras (Figura 4.3).

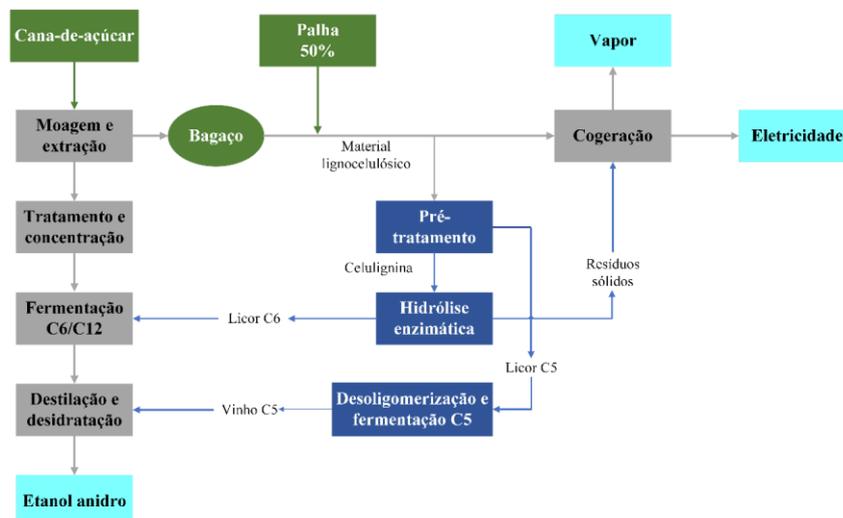
Figura 4.3. Diagrama de fluxo da produção de bioenergia – CII-1G



Fonte: Autor, adaptado de IRENA, 2019

Cenário III (CIII-1G2G): A terceira configuração representa a produção de etanol de segunda geração (2G) a partir da cana convencional. A usina de cana-de-açúcar, além de água e açúcares, é constituída de matérias lignocelulósicas que podem ser utilizadas como matéria-prima para a produção de etanol por processos de conversão bioquímica ou termoquímica. Trata-se de uma usina de produção de etanol 1G (78%) e 2G (22%) totalmente integrados, processando o caldo de cana, bagaço e palha, com uma central combinada de calor e eletricidade que utiliza parte do bagaço e os resíduos da hidrólise como combustível. Neste cenário, há uma redução na geração de eletricidade excedente em relação ao CII-1G, porque parte da palha e o bagaço são usados para incrementar a produção de etanol (Figura 4.4).

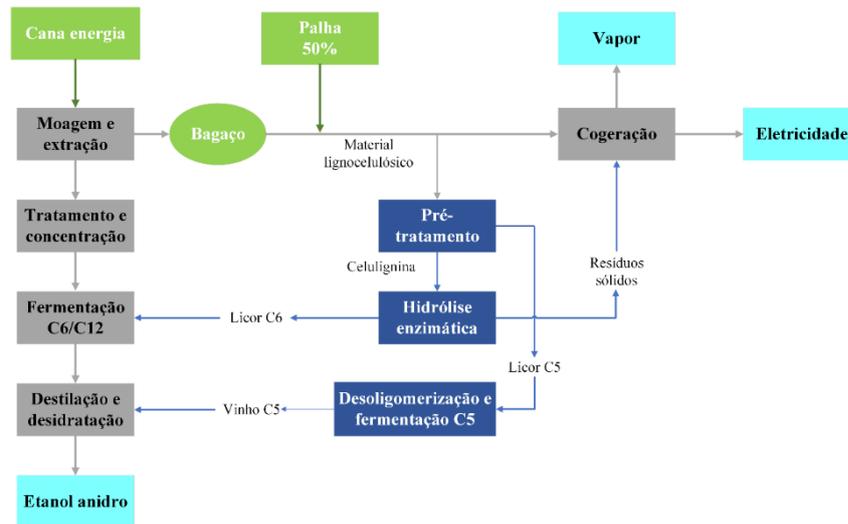
Figura 4.4. Diagrama de fluxo da produção de bioenergia – CIII-1G2G



Fonte: Autor, adaptado de IRENA, 2019

Cenário IV (CIV-1G2G): Novas variedades de cana-de-açúcar que apresentam mais fibra e maior rendimento energético estão bem alinhadas com o desenvolvimento de processos de conversão de matéria-prima lignocelulósica em etanol. No caso do processamento da cana-energia, assume-se que a matéria-prima tenha 20% menos açúcar e 92% mais fibra. Isso reduz a produção de etanol 1G (60%) e aumenta a produção de etanol 2G (40%) e de eletricidade por tonelada de cana processada (Cortez et al, 2010). Considerando que a cana-de-açúcar traz em si uma considerável quantidade de fibras nos colmos e que há um aumento na quantidade de palha deixada no campo após a colheita de cana não queimada, é interessante pensar em integrar duas plantas com tecnologias 1G e 2G no mesmo local, usando cana-energia. As plantas 1G e 2G serão totalmente integradas no processamento do caldo de cana, bagaço e palha, com uma central combinada de calor e energia que utiliza parte do bagaço e os resíduos da hidrólise como combustível (Figura 4.5).

Figura 4.5. Diagrama de fluxo da produção de bioenergia – CIV-1G2G



Fonte: Autor, adaptado de IRENA, 2019

Considerando os dados reais de biorrefinarias na África Austral, Leal *et al.*, (2016) e IRENA (2019) avaliaram os parâmetros para a produção de bioenergia (ou seja, eletricidade e etanol), além do açúcar, que foram simulados nos cenários deste estudo e estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Parâmetros de produtividade para processamento de cana convencional e cana-energia

Cenário	Açúcar (kg/tc)	Etanol (L/tc)	Uso da palha	Eletricidade excedente (kWh/tc)	Condições de vapor (bar/°C)	Consumo de vapor de processo (kg/tc)	Tipo de turbina vapor	Eficiência da caldeira
CI-1G	125	10,4	Não	Zero	22 / 300	530	BP	75
CII-1G	Zero	85,4	Não	185	22 / 300	530	CEST	75
CIII-1G2G	Zero	108,5	50%	68,5	65 / 480	500	CEST	87,7
CIV-1G2G	Zero	111,4	50%	112,2	65 / 480	350	CEST	87,7

Fonte: (M. Leal *et al.*, 2016; IRENA, 2019a)

Para avaliar os impactos da produção de etanol em biorrefinarias que processam cana-de-açúcar, os cenários de produção de etanol e eletricidade estudados na seção anterior foram comparados do ponto de vista ambiental

4.10 Análise ambiental

A avaliação das emissões de GEE evitadas depende das equivalências entre o combustível renovável (etanol e eletricidade) e os combustíveis fósseis substituídos. Para o consumo de energia e a emissão de GEE na produção de combustíveis derivados de petróleo em Angola, nesta pesquisa foram adotados dados internacionais consolidados, provenientes de um estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para avaliar os benefícios ambientais e econômicos de melhorias atuais e futuras em tecnologias agrícolas e industriais para a produção de etanol em biorrefinarias brasileiras (Watanabe *et al.*, 2016).

Esta pesquisa avaliou o impacto de diferentes políticas e tecnologias atuais e futuras de produção de etanol a nível mundial, considerando três configurações de destilarias autônomas: (1) uma destilaria básica de primeira geração (1G-Base); (2) uma destilaria moderna de primeira geração (1G-Otimizada); e (3) uma destilaria integrada de primeira e segunda geração (1G + 2G), em linha com os estudos sobre o potencial de produção de energia.

Os quatro cenários de uso de etanol foram comparados com a gasolina. O modelo de ACV de Watanabe *et al.*, (2016), estima que a emissão média da gasolina é de 86,4 gCO₂-eq/MJ, com base nas emissões diretas e indiretas da tecnologia média de produção observada no Brasil. A Tabela 4.4 destaca as emissões do etanol 1G-Base, 1G-otimizado e 1G + 2G integrado em relação à gasolina brasileira, considerando o Poder Calorífico Inferior (PCI) do etanol anidro e da gasolina, respectivamente iguais a 32,10 MJ/litro e 22,30 MJ/litro (Cortez et al, 2010).

Tabela 4.4. Fatores de Emissões de GEE

Cenários de Biorrefinarias	gCO ₂ -eq./MJ	gCO ₂ -eq./litro
Etanol 1G Base	21	468,3
Etanol 1G otimizado	15	334,5
1G+2G	13	289,9
Gasolina	86,4	2773,44

Fonte: (Watanabe *et al.*, 2016)

4.10.1 Impacto do uso de etanol como combustível em substituição da gasolina

Assumiu-se que o etanol anidro produzido em Angola será utilizado na gasolina consumida no país, em uma mistura obrigatória estabelecida pelo governo angolano de 10% de etanol e 90% de gasolina, em volume, com teores crescentes de etanol. Essa hipótese depende de políticas públicas e do acesso a tecnologias apropriadas, conforme a Lei de Produção de Cana-de-açúcar

para Biocombustíveis em Angola (Lei nº 06/10) (Nacional, 2010). Em todos os casos, o excedente entre a produção e o consumo foi considerado destinado à exportação.

Outro ponto que mereceu atenção é a questão do conteúdo energético, pois o etanol possui menos energia por litro em comparação à gasolina. Assim, o volume de etanol necessário para suprir a demanda de gasolina em Angola, que foi de 3 GL (Giga litros) em 2021, considerando o volume de etanol necessário para cada cenário, está apresentado na Tabela 4.5. A última coluna corresponde ao volume de combustível com energia equivalente a 3 GL de gasolina. Os seguintes cenários de uso de biocombustível foram considerados: a) E10, etanol anidro em mistura (em volume) de 10% e 90% de gasolina, como utilizado em diversos países há vários anos; b) E25, etanol anidro em mistura de 25% e 75% de gasolina, como utilizado desde os anos 80 no Brasil e em alguns outros países; c) E50, assumindo que metade da gasolina (em volume) seja substituída por etanol, mediante o uso de veículos com motores flexíveis (flex-fuel), que permitem ao usuário escolher, de acordo com sua conveniência, o combustível que irá utilizar, desde 100% de etanol hidratado até uma gasolina com 20% a 25% de etanol; e d) E100, assumindo a completa substituição de toda a gasolina por etanol hidratado, utilizando motores flexíveis ou dedicados a etanol, existentes em alguns países.

Tabela 4.5. Volume do etanol necessário para suprir a demanda do uso da gasolina (GL)

Cenários de uso	Etanol	Gasolina	Mistura
Gasolina	0,00	3,00	3,00
E10	0,31	2,79	3,09
E25	0,81	2,44	3,25
E50	1,77	1,77	3,54
E100	4,32	0,00	4,32

Fonte: Autor

4.10.2 Impacto do uso da eletricidade gerada via bagaço da cana-de-açúcar

O impacto do uso da eletricidade gerada pelo bagaço foi avaliado utilizando o cálculo da quantidade de CO₂ produzida pela geração de energia elétrica, por meio do fator de emissão de CO₂ (em kg/kWh), que indica a quantidade de CO₂ gerada durante a produção de um quilowatt-hora. O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) brasileiro publica periodicamente fatores de emissão para a matriz elétrica do Brasil. No entanto, o fator de emissão fornecido pelo MCTI não discrimina a fonte de energia, portanto, é representativo apenas para a matriz elétrica brasileira como um todo.

Para a estimativa de emissões de CO₂ na geração de energia hidroelétrica, foi considerado o fator de emissão de 86 gCO₂-eq./kWh, estimado por Miranda (2012), que considera estudos de ACV que englobam etapas de construção e geração da usina. Miranda (2012) analisou diferentes fatores de emissão de acordo com as principais fontes de combustível adotadas na matriz termoelétrica brasileira. Assim, utilizando óleo diesel como fonte principal, cujo fator de emissão é estimado em 829 gCO₂-eq./kWh, e gás natural, com 518 gCO₂-eq./kWh. Para as estimativas das emissões da geração termoelétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar, partiu-se do pressuposto de que toda a energia utilizada nessas usinas é gerada a partir da queima do bagaço, não havendo emissões por combustíveis fósseis. As emissões diretas de GEE estão associadas principalmente à liberação de CO₂ durante a queima do bagaço e à fermentação do caldo de cana, que também podem ser desconsideradas na quantificação dos GEE, uma vez que o carbono liberado é de origem fotossintética e será reabsorvido pela vegetação (cana-de-açúcar) durante o próximo cultivo (Miranda, 2012).

Por outro lado, Coelho Junior *et al.* (2019) estimaram que o fator de emissão para a geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana corresponde a 227 gCO₂-eq./kWh. Foram considerados os insumos de sementes, fertilizantes minerais e pesticidas. O conjunto de dados inclui todas as operações da máquina e infraestrutura, incluindo galpões correspondentes e 20% de colheita mecanizada. As operações da máquina abrangem o cultivo do solo, semeadura, fertilização, controle de ervas daninhas, controle de pragas e patógenos, e o transporte da colheita combinada do campo para a fazenda.

Este estudo selecionou as fontes mais representativas da matriz energética angolana (hidroelétrica, termoelétrica a base de óleo diesel e gás natural) a fim de realizar estudos comparativos entre as diferentes fontes de energia elétrica e os cenários propostos nesta pesquisa.

4.11 Avaliação econômica

Nas seções anteriores, estimou-se a produção de bioenergia que Angola poderia gerar em diferentes cenários a partir das terras aptas e disponíveis no país e avaliou-se a redução de GEE associada ao uso de bioenergia em substituição aos combustíveis fósseis. Na presente seção, desenvolve-se uma avaliação econômica para estimar a viabilidade e atratividade dessa atividade produtiva, considerando uma produção e processamento de 60 milhões de toneladas de cana por ano, o que representa cerca de 10% do potencial identificado na seção 4.9. Este

nível de processamento foi arbitrado considerando que Angola ainda está desenvolvendo sua agroindústria sucroalcooleira.

Nesse sentido, busca-se determinar o custo unitário de produção, que envolve os custos de capital ou investimento (Capital Expenditure, CAPEX) e outros custos operacionais, destacando-se o custo da cana-de-açúcar.

4.11.1 Investimento

O investimento necessário para a construção de uma Biorrefinaria pode ser baseado em sua capacidade de processamento. A equação (2) apresenta uma estimativa para o valor do investimento, empregando a capacidade e o custo de uma Biorrefinaria com componentes semelhantes. Ou seja, conhecido o custo de uma Biorrefinaria com uma dada capacidade, é possível estimar o custo de outra Biorrefinaria com capacidade diferente. O investimento inicial (custo de capital ou custos de construção da planta) pode ser ajustado de um período para outro pelo índice CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index). O valor de α para o tipo de equipamento e construção da Biorrefinaria de processamento é de 0,6 (Chemical Engineering, 2023).

$$Custo_2 = Custo_1 \left(\frac{Capacidade_2}{Capacidade_1} \right)^\alpha \left(\frac{CEPCI_{2022}}{CEPCI_{ano_{ref.}}} \right) \quad (2)$$

Considerou-se que as biorrefinarias devem processar anualmente 2 milhões de toneladas de cana, com uma operação anual correspondente a seis meses (4.380 horas por ano), atendendo à colheita da cana em seu período ótimo de maturação e às melhores condições logísticas. Assim, 30 biorrefinarias alcançam o processamento total de 60 milhões de toneladas de cana.

Para analisar os investimentos, adotou-se uma taxa de desconto de 7% e 20 anos de vida útil da planta. A cana-energia, com um conteúdo elevado de fibra (exigindo maiores custos de capital na área de extração para as usinas), requer equipamentos mais pesados e um maior uso de energia durante a colheita e o processamento de um suco mais diluído em comparação à cana convencional, adotando-se um investimento de aproximadamente 15% mais elevado.

A planta de cogeração representa uma parte importante do investimento total de capital das biorrefinarias; por isso, os investimentos foram compartilhados entre etanol e eletricidade. Para o cálculo do investimento na Biorrefinaria, foram utilizados como referência dados na literatura, mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Dados de referência para estimativa de investimento em biorrefinarias

Planta de etanol	Custo ₁ (MUSD)	Capacidade ₁ (t/h)	Data referência	CEPCI Data ref.	Ref.
CI-1G	4,4	500	2016	541,6	(Leal <i>et al.</i> , 2016)
CII-1G	141,6	500	2016	541,6	(Leal <i>et al.</i> , 2016)
CIII-1G2G	660,8	500	2016	541,6	(Bonomi <i>et al.</i> , 2016)
CIV-1G2G	887,8	500	2016	541,6	(Bonomi <i>et al.</i> , 2016)

Cogeração	Custo ₁ (USD/kW)	Capacidade ₁ (MW)	Data referência	CEPCI Data ref.	Ref.
CI-1G	4097	50	2020	596,2	(EIA, 2020)
CIII-1G2G	5702,8	45	2019	607,5	(Bonomi, 2015; IRENA, 2019a)
CIV-1G2G	2680,6	45	2019	607,5	(Bonomi, 2015; IRENA, 2019a)

*CEPCI 2022: 816

4.11.2 Custos operacionais

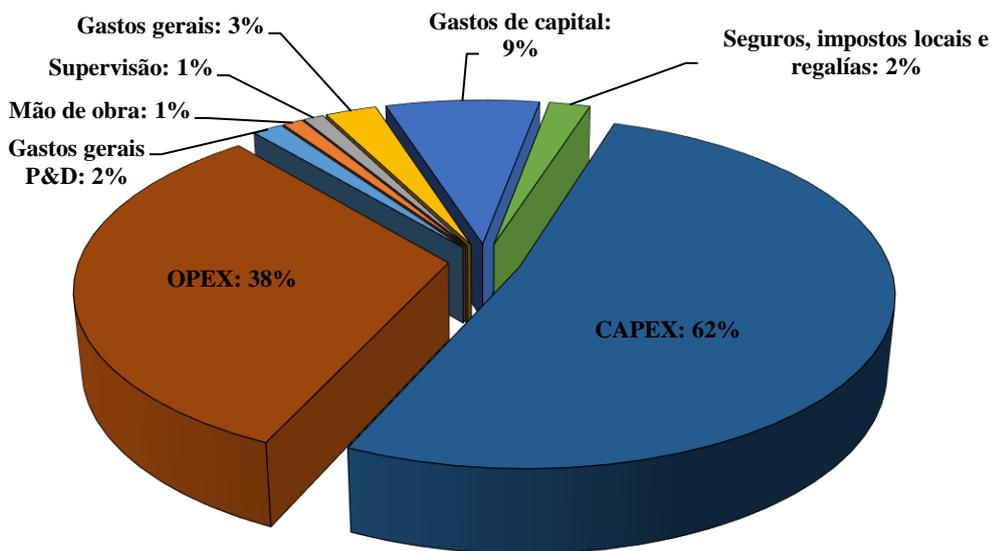
A Tabela 4.7 apresenta a metodologia utilizada por Batlle *et al.*, (2022) para estimar as categorias de custo operacional de uma Biorrefinaria de cana-de-açúcar. Em relação ao cálculo do custo operacional total, o valor da matéria-prima foi baseado no preço do mercado sul-africano para o ano de 2021. A estimativa do custo de mão de obra depende do custo total de investimento de toda a Biorrefinaria. Outros custos cobertos nos custos operacionais, como reparação e manutenção, são considerados uma porcentagem do custo de investimento. Por outro lado, o Gráfico 4.1 mostra a distribuição percentual fixa das despesas de produção em todos os cenários das biorrefinarias, embora haja variação em seus valores.

Tabela 4.7. Premissas de cálculo para estimativa anual do custo de produção da biorrefinarias

No	Custo	Cálculos utilizados
1	Insumo principal [USD/ton]	36,45*
2	Materiais diversos	1% do CAPEX
Variável		(1) + (2)
3	Manutenção	20% do CAPEX
4	Serviço Operativo (SO)	10% do CAPEX
5	Mão de obra	20% do SO
6	Supervisão	20% do SO
7	Gastos gerais	50% do SO
8	Gastos de capital	15% do CAPEX
9	Seguros, impostos locais e regalias	4% do CAPEX
Fixo		(3) +(4) +(5) +(6) +(7) +(8) +(9)
Direto de produção (DP)		(Variável)+(Fixo)
10	Gastos gerais P&D	5% de DP
Custos anuais operativos (CAO)		(DP)+(10)
Custo anual total industrial (USD/ano)		[CAPEX + CAO]

* www.oecd-ilibrary.orgFonte: Adaptado de Battle *et al.*, (2022)

Gráfico 4.1. Distribuição das despesas de produção nos cenários de biorrefinarias



Fonte: Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo anterior delineou a abordagem metodológica e a metodologia seguida para produzir resultados na avaliação da aptidão da terra para a cana-de-açúcar. Nesta seção, serão apresentados os resultados e discussões sobre os efeitos dos valores obtidos. Especificamente, serão destacadas as áreas adequadas e com potencial para o cultivo da cana-de-açúcar, assim como o potencial de produção da localidade. A avaliação nos apresenta uma indicação da distribuição por área da cobertura atual do território angolano, além dos tipos de vegetação que podem cobrir uma determinada área. Também são incluídos os tipos de cobertura do solo, como cidades, corpos d'água e áreas construídas (Figura 5.1 e Tabela 5.1). A Figura 5.2 e a Tabela 5.2 mostram as porcentagens das áreas protegidas filtradas, que somam aproximadamente 13,2 Mha, representando cerca de 11% do território angolano. (As porcentagens em todas as tabelas estão relacionadas com a área total do país.)

Tabela 5.1. Áreas de cobertura do solo de Angola

Cobertura da terra	Áreas em 1000 ha	%
Terra arborizada: > 75%	44.490	35,7
Arbusto ou cobertura herbácea: > 75%	14.540	11,7
Vegetação esparsa ou nua: > 75%	1.660	1,3
Terra de cultivo: 50-75%	10	0,008
Terra arborizada: 50-75%	31.740	25,5
Arbusto ou cobertura herbácea: 50-75%	25.220	20,2
Vegetação esparsa ou nua: 50-75%	690	0,55
Superfície artificial: > 50%	50	0,04
Outras	7.350	6,0

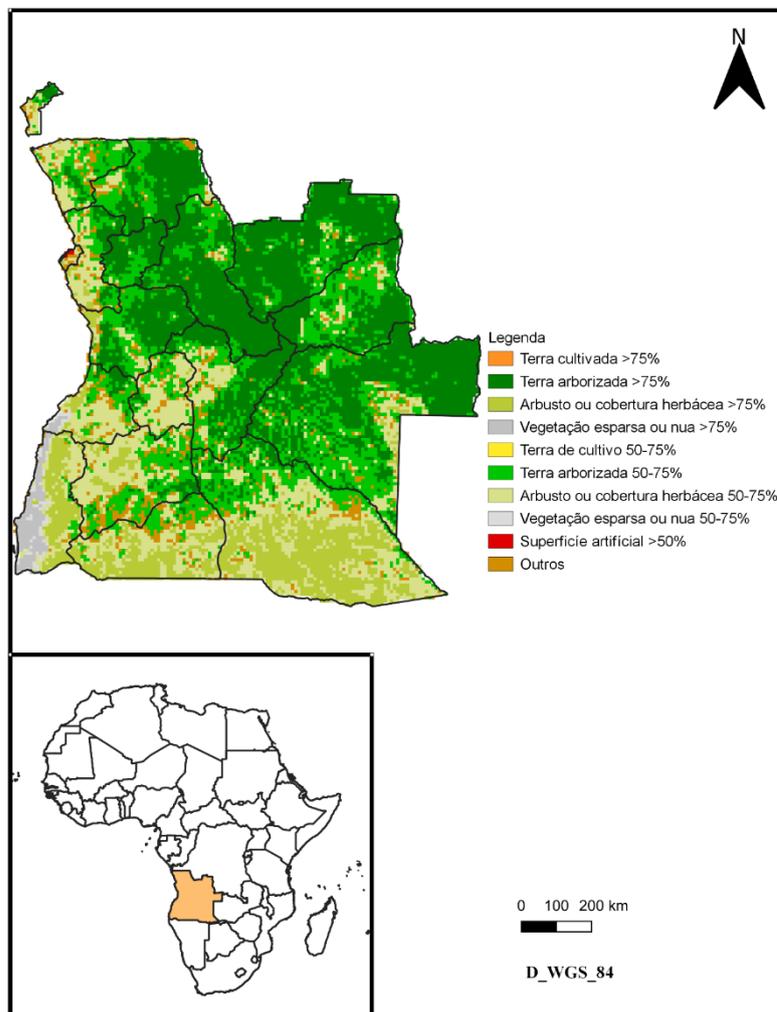
Fonte: Autor, com base nos resultados

Tabela 5.2. Áreas protegidas de Angola

Classes	Áreas em 1000 ha	%
Classes da IUCN	8 269	6,6
Marinha e ambiente	2	0,002
Biodiversidade	1 828	1,5
Lagos e zonas úmidas	2 697	2,2
Zona neutra	376	0,3
Água	64	0,05
Total	13 236	10,6

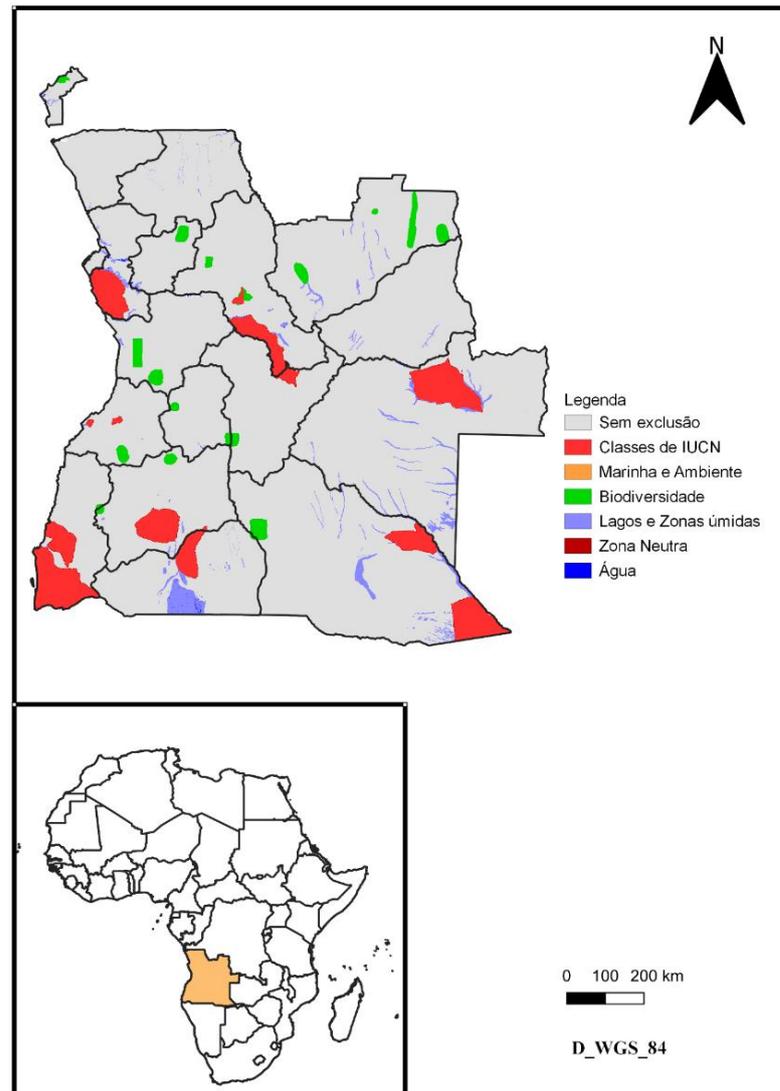
Fonte: Autor, com base nos resultados

Figura 5.1. Mapa de cobertura do solo de Angola



Fonte: Autor, com base no GAEZ v4, 2022

Figura 5.2. Áreas protegidas de Angola



Fonte: Autor, com base no GAEZ v4, 2022

A segunda triagem exclui a área atualmente cultivada com cana-de-açúcar e outras culturas temporárias. Isso garante que a produção adicional estimada de cana-de-açúcar não diminua o nível atual de produção agrícola do país. Os dados da área colhida foram retirados da plataforma FAOSTAT (2021), totalizando aproximadamente 3,7 Mha, o que representa quase 3% da área total do país (Tabela 5.2).

Tabela 5.3. Áreas cultivadas por outras culturas temporárias e a cana-de-açúcar

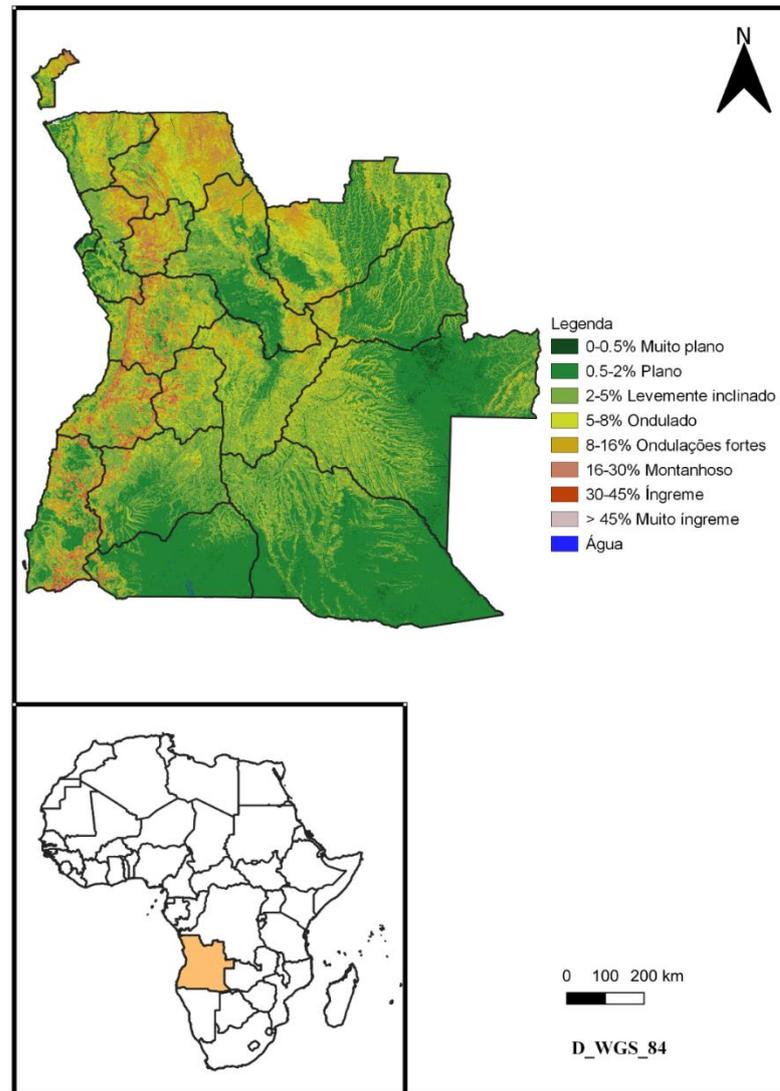
Uso da terra	Áreas em 1000 ha	%
Área de terra apta para agricultura	56.952	45,7
Área cultivada	5.215	4,2
Área de terra arável	4.900	3,9
Área de terra sob culturas temporárias	3.721	3,0
Área de terra sob culturas permanentes	315	0,3
Área de terra equipada para irrigação	86	0,07
Área plantada com cana-de-açúcar	20	0,02

Fonte: FAOSTAT, 2022

A área plantada com cana-de-açúcar em Angola é estimada em 20.000 ha, com uma produtividade de 951 kt/ano. As terras aptas para agricultura em Angola totalizam 57 Mha, o que representa 45,7% da área total do país, das quais apenas 14,3 Mha estão em atividade; essas áreas foram excluídas, representando quase 11,4% da área total do país (Tabela 5.3).

A declividade desempenha um papel essencial, especialmente quando se considera o cultivo mecanizado. Na análise do GAEZ v4, as inclinações do terreno acima de 16% são avaliadas como não muito adequadas para o cultivo da cana-de-açúcar, apresentando níveis de aptidão mais baixos: 50% de aptidão para uma declividade de 16-30% e 2% para uma declividade de 30-45%. Assim, um valor limite de inclinação de 16% ou mais foi considerado impróprio para o cultivo da cana-de-açúcar, resultando em um total de 37,74 Mha, que representa aproximadamente 30% da área total do país filtrada (Figura 5.3). Da área total do país (cerca de 125 Mha), aproximadamente 60 Mha (48%) sem restrições significativas estão disponíveis para a produção de culturas energéticas, resultado da diferença entre a área total e as áreas filtradas (com fortes restrições).

Figura 5.3. Mapa de declividade de Angola

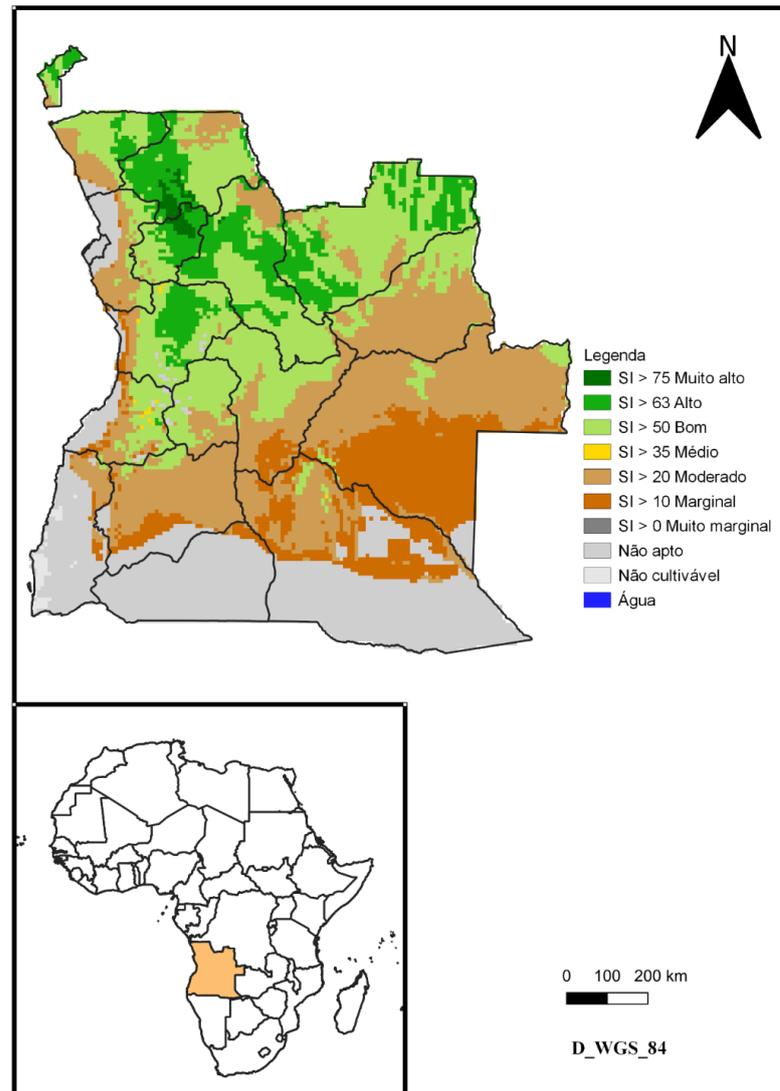


Fonte: Autor, com base no GAEZ v4

5.1 Aptidão da cana-de-açúcar em condições de Sequeiro

A aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar em condições de sequeiro varia substancialmente entre as regiões do país. As terras nobres e boas para a cana-de-açúcar de sequeiro estão amplamente concentradas nas zonas Norte e Leste do país, conforme mostrado na Figura 5.4. Ao considerar as terras cultivadas de sequeiro, os resultados do GAEZ v4 (Tabela 5.4) mostram que aproximadamente 0,6% do território angolano é classificado como terra de primeira qualidade, apresentando alto rendimento e potencial de produção. Além disso, 35% do território corresponde a terras boas, com rendimento médio para o cultivo da cana-de-açúcar, enquanto 42% da área do país é composta por terras pobres, com baixo rendimento no cultivo da cana-de-açúcar. As terras classificadas com o SI Bom e Muito Alto correspondem a 44,8 Mha.

Figura 5.4. Índice de aptidão da cana-de-açúcar em condições de Sequeiro



Fonte: Autor, com base no GAEZ v4

Tabela 5.4. Área de aptidão da cana-de-açúcar em condições de Sequeiro

Índice de aptidão	Áreas em 1000 ha	%
SI > 75 Muito alto	740	0,6
SI > 63 Alto	12.190	9,8
SI > 50 Bom	31.930	25,6
SI > 35 Médio	120	0,1
SI > 20 Moderado	36.670	29,0
SI > 10 Marginal	15.620	12,5
SI > 0 Muito marginal	0	0
Não adequado	27.960	22,0
Água	530	0,4

Fonte: Autor, com base nos resultados

5.2 Aptidão da cana-de-açúcar em condições de irrigação

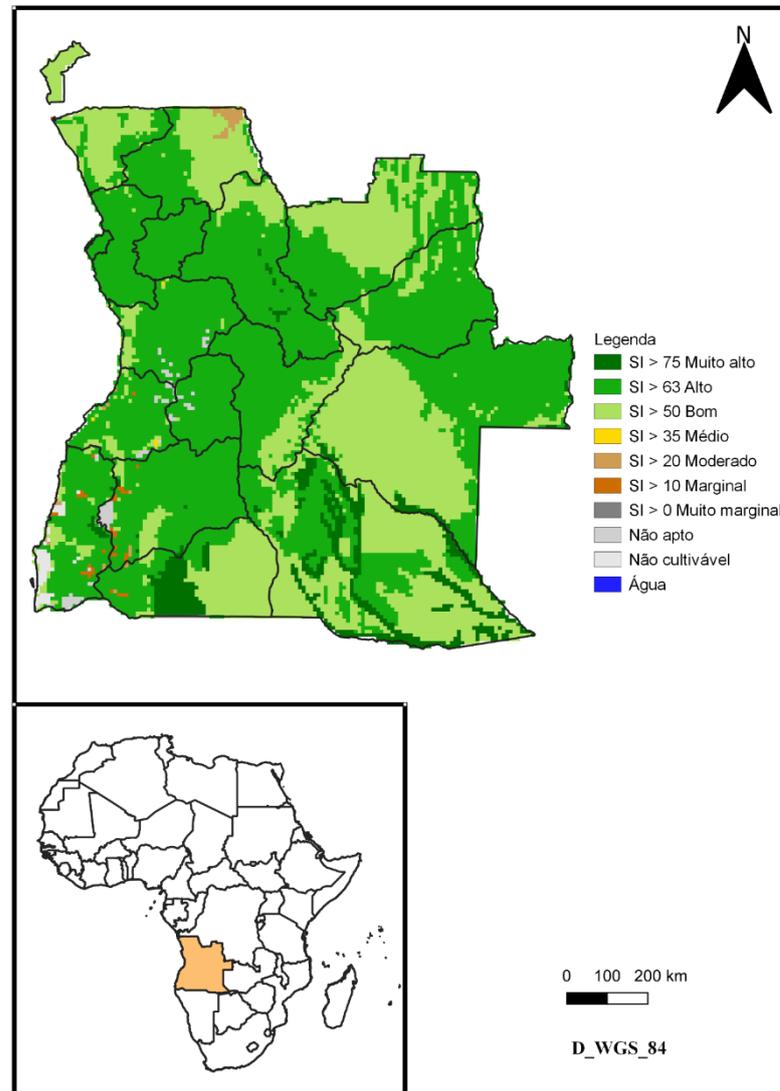
A Figura 5.5 mostra o perfil de aptidão da cana-de-açúcar nas terras irrigadas em todo o território angolano. Diferentemente das condições de sequeiro, nas condições de irrigação, a aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar mostra-se viável até mesmo para as zonas com baixos índices de precipitação, que, em condições de sequeiro, se mostraram inadequadas para esse cultivo. Essas terras poderiam ser utilizadas para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar para fins bioenergéticos. Dos resultados obtidos na avaliação de aptidão de terras do GAEZ v4, a área de cultivo irrigada para cana-de-açúcar é considerada muito adequada em comparação com as condições de sequeiro. Assim, foram identificadas aproximadamente 6,3 Mha (5%) de terras de primeira qualidade para o cultivo da cana-de-açúcar irrigada, 117 Mha (94%) de terras boas e 1,7 Mha (1%) de terras pobres, com baixo rendimento e potencial para o cultivo da cana-de-açúcar irrigada (Tabela 5.5). Por conseguinte, em relação às terras de sequeiro, a irrigação aumentou em 275% a área potencial para a cana-de-açúcar em Angola.

Tabela 5.5. Área de aptidão de cultura da cana-de-açúcar em condições de irrigação

Índice de aptidão	Áreas em 1000 ha	%
SI > 75 Muito alto	6.259	5,0
SI > 63 Alto	73.790	59,0
SI > 50 Bom	43.290	34,0
SI > 35 Médio	30	0,02
SI > 20 Moderado	470	0,4
SI > 10 Marginal	330	0,3
SI > 0 Muito marginal	0	0
Não adequado	910	0,7
Água	530	0,4

Fonte: Autor, com base nos resultados

Figura 5.5. Índice de aptidão de culturas da cana-de-açúcar em condições de irrigação



Fonte: Autor, com base no GAEZ v4, 2022

5.3 Condições de Sequeiro vs. Condições de Irrigação

Os valores apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.5 são interessantes e, por isso, necessitam de uma avaliação específica e muito detalhada. As terras para a expansão da cana-de-açúcar, em ambas as condições, seriam aquelas classificadas como de primeira qualidade e com alto potencial, ou seja, muito adequadas ($SI > 75$). Assim, aproximadamente 740.000 ha seriam destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar em condições de sequeiro; no entanto, essas terras não seriam viáveis devido às condições do terreno.

As áreas aptas em condições de sequeiro estão concentradas nas províncias do Uíge e Cuanza-Norte, que representam, na sua maioria, áreas não mecanizáveis (declividade acima de 16%), as quais foram excluídas na avaliação da disponibilidade de terras para o cultivo da cana-de-açúcar. Por outro lado, 6,3 Mha de terras aptas para o cultivo da cana-de-açúcar irrigada foram

identificadas em sete províncias do país, apresentando características e disponibilidade favoráveis para a introdução da bioenergia da cana-de-açúcar.

A área atualmente plantada com cana-de-açúcar em Angola representa apenas 0,3% do potencial estimado em condições de irrigação deste estudo. Ou seja, os 3,6 Mha identificados como adequados e disponíveis para o cultivo da cana-de-açúcar irrigada em Angola são 315 vezes maiores do que a área atualmente utilizada para esse cultivo.

5.4 Distribuição das terras de primeira qualidade e modelo de produção

Desconsiderando outros fatores, como logística e modelo de produção, sete províncias têm as melhores áreas potenciais (terras de qualidade superior) para a expansão da produção de cana-de-açúcar em condições de irrigação (Tabela 5.6). Particularmente, as províncias do Cuando Cubango e Cunene, no sul de Angola, apresentam 5,34 Mha muito adequadas, o que corresponde a 85% das melhores terras identificadas para a cana-de-açúcar neste país, representando 11,9% da área total dessas províncias e 4,3% da área nacional. Em conjunto, estas províncias têm cerca de 1,54 milhões de habitantes, menos de 5% da população angolana, que se dedicam, maioritariamente, a atividades rurais de subsistência, como a criação de gado, a produção de carvão vegetal e o cultivo de hortaliças (MINPE, 2021). Neste contexto, os projetos de cultivo e processamento da cana-de-açúcar, devidamente concebidos e implementados, podem promover de forma sustentável a economia regional. As regiões aptas para o cultivo da cana-de-açúcar irrigada mostraram-se compatíveis com os resultados obtidos por Ackbar (2007), Watson (2011) e as projeções do (MINEA, 2015).

Tabela 5.6. Distribuição de terras de primeira para o cultivo da cana-de-açúcar irrigada nas sete províncias

Província	Área em Mha ¹	%	SI>75 (1000 ha)	%
Cuando Cubango	18	14,4	3.866	3,1
Cunene	8	6,4	1.474	1,18
Huíla	7	5,6	76	0,06
Lunda Norte	9	7,4	34	0,03
Malanje	9	7,4	152	0,12
Moxico	20	16	539	0,43
Namibe	4	3,2	118	0,09
Total	85	53	6.259	5

Fonte: Autor, com base nos resultados

¹ Áreas restantes depois da exclusão das áreas protegidas

Com exceção de Cuando Cubango e Moxico, cada uma das províncias com áreas aptas possui uma grande base populacional (Statista, 2022d). A partir do mapa de declividade (Figura 5.3), observa-se que as áreas selecionadas como aptas para o cultivo da cana-de-açúcar estão situadas em faixas de declividade favoráveis, tanto para a implementação de sistemas de irrigação quanto para a introdução de colheita mecanizada: Cuando-Cubango (0,5-2% de declive), Cunene (0,5-2%), Huíla (2-5%), Lunda-Norte (2-5%), Malanje (2-5%), Moxico (0,5-2%) e Namibe (2-5%).

A fertilidade de um solo é determinada por suas propriedades físico-químicas, que são fundamentais para o uso e a produção ideal de culturas agrícolas. Batlle *et al.*, (2022), apresentaram os solos de referência aptos para o plantio da cana-de-açúcar: Latossolos, Aridissolos, Alfissolos e Argissolos. Nas províncias de Cuando Cubango, Cunene, Lunda-Norte, Moxico e Namibe, os solos com elevado potencial correspondem aos Aridissolos (Arenossolos), que, embora apresentem umidade limitada, tornam-se produtivos quando bem manejados e irrigados. Nas províncias da Huíla e Malanje, o solo de elevado potencial é, em sua maioria, composto por Latossolos, que são profundos, porosos, bem drenados e permeáveis, mesmo quando muito argilosos e de fácil preparo (Figura 5.6).

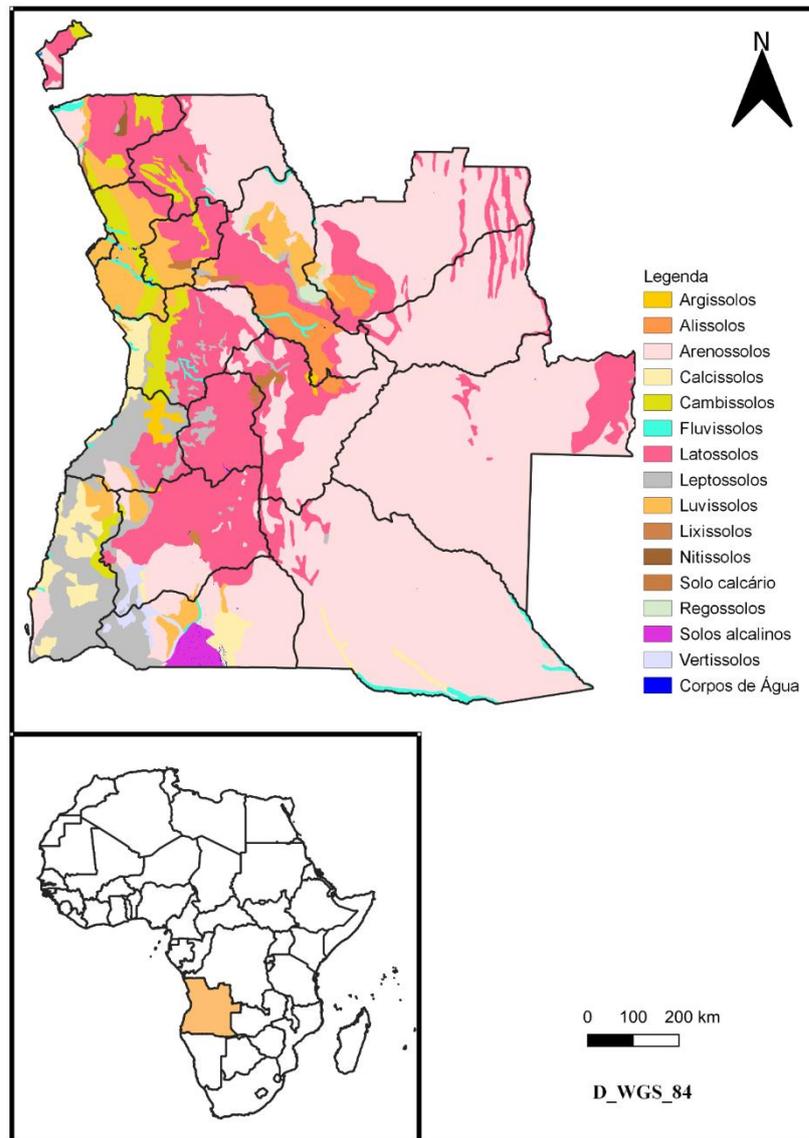
O modelo de produção apresentado na equação (1) foi prontamente aplicado, utilizando dados climáticos disponíveis. Informações sobre as condições térmicas ambientais, medidas em graus-dias, e a deficiência hídrica foram obtidas a partir da análise do estudo com base na plataforma GAEZ v4. A deficiência hídrica para as condições de irrigação foi assumida como igual a zero. A Tabela 5.7 resume os dados e as estimativas de rendimento modeladas para as províncias angolanas analisadas neste estudo.

Tabela 5.7. Dados e resultados de modelagem de produção da cana-de-açúcar irrigada

Província	Graus Dias (°C-dia)	Rendimento Estimado (t/ha)
Cuando Cubango	8.907	155,5
Cunene	8.917	146,8
Huíla	8.433	132,0
Lunda Norte	9.347	157,9
Malanje	7.589	155,9
Moxico	8.906	155,6
Namibe	8.579	133,5

Fonte: Autor, com base nos resultados

Figura 5.6. Tipos de solos no território angolano



Fonte: Autor, com base no GAEZ v4, 2022

Dos resultados apresentados na Tabela 5.7, as províncias de Cuando Cubango e Cunene se destacam por apresentarem uma produção de 601 a 216 Mt/ano. A produtividade da cana-de-açúcar para o ano de 2021 em todo o território angolano corresponde a 0,15% da produção estimada para a província de Cuando Cubango e 0,44% em relação à província de Cunene.

Embora a cana-de-açúcar transforme energia solar em biomassa através da fotossíntese, tornando-se mais eficiente e menos dependente de água do que a maioria das outras plantas, a disponibilidade de água é essencial para otimizar o rendimento da cana-de-açúcar. Angola possui uma rede hidrológica diversificada, com considerável disponibilidade hídrica, composta por 6.152 rios com uma extensão total de 154.035,44 km. Desses, 5,2%, ou seja, 8.059,35 km, estão localizados na província de Cuando Cubango, onde 16 rios são considerados os recursos

hídricos mais importantes da região. A província de Cunene possui uma extensão hídrica de aproximadamente 13.074,59 km, correspondente a 8,5% da extensão hídrica do país (INRH, 2020). Assim, é evidente que cada uma dessas áreas é coberta por uma vasta rede de rios.

5.5 Potencial de produção de bioenergia da cana-de-açúcar em Angola

Ao considerar políticas para promover a bioenergia sustentável a partir da cana-de-açúcar, os tomadores de decisão devem avaliar a quantidade de bioenergia que pode ser produzida e a que custo. Com base na análise da disponibilidade de terra e da produtividade, esta seção apresenta os resultados para a produção de matéria-prima destinada ao processamento da cana-de-açúcar. Para cada cenário, foram simuladas a produção de etanol e eletricidade, evidenciando o potencial de oferta de energia em diferentes tecnologias e custos nas sete províncias destacadas de Angola. Esses cenários representam os limites inferiores e superiores para a produção de bioenergia a partir da cana-de-açúcar, utilizando tecnologias atualmente disponíveis. Os dados da Tabela 4.3 foram empregados para simular a produção de bioenergia nos cenários considerados. Os principais resultados simulados estão resumidos nas tabelas abaixo.

Tabela 5.8. Resultado da produção da bioenergia do CI-1G

Província	Açúcar (Mt/ano)	Etanol (BL/ano)
Cuando Cubango	75	6,25
Cunene	27	2,25
Huíla	1	0,10
Lunda Norte	1	0,06
Malanje	3	0,25
Moxico	10	0,87
Namibe	2	0,16
Total	120	9,95

Fonte: Autor, com base nos resultados

Tabela 5.9. Resultado da produção da bioenergia do CII-1G

Província	Etanol (ML/ano)	Eletricidade (GWh/ano)
Cuando Cubango	51,3	111
Cunene	18,5	40
Huíla	0,9	2
Lunda Norte	0,5	1
Malanje	2,0	4
Moxico	7,2	16
Namibe	1,3	3
Total	81,7	177

Fonte: Autor, com base nos resultados

Tabela 5.10. Resultado da produção da bioenergia do CIII-1G2G

Província	Etanol (ML/ano)	Eletricidade (GWh/ano)
Cuando Cubango	65,2	41,2
Cunene	23,5	14,8
Huíla	1,1	0,7
Lunda Norte	0,6	0,4
Malanje	2,6	1,6
Moxico	9,1	5,7
Namibe	1,7	1,1
Total	103,8	65,5

Fonte: Autor, com base nos resultados

Tabela 5.11. Resultado da produção da bioenergia do CIV-1G2G

Província	Etanol (ML/ano)	Eletricidade (GWh/ano)
Cuando Cubango	67,0	67,5
Cunene	24,1	24,3
Huíla	1,1,	1,1
Lunda Norte	0,6	0,6
Malanje	2,6	2,7
Moxico	9,3	9,4
Namibe	1,8	1,8
Total	106,5	107,3

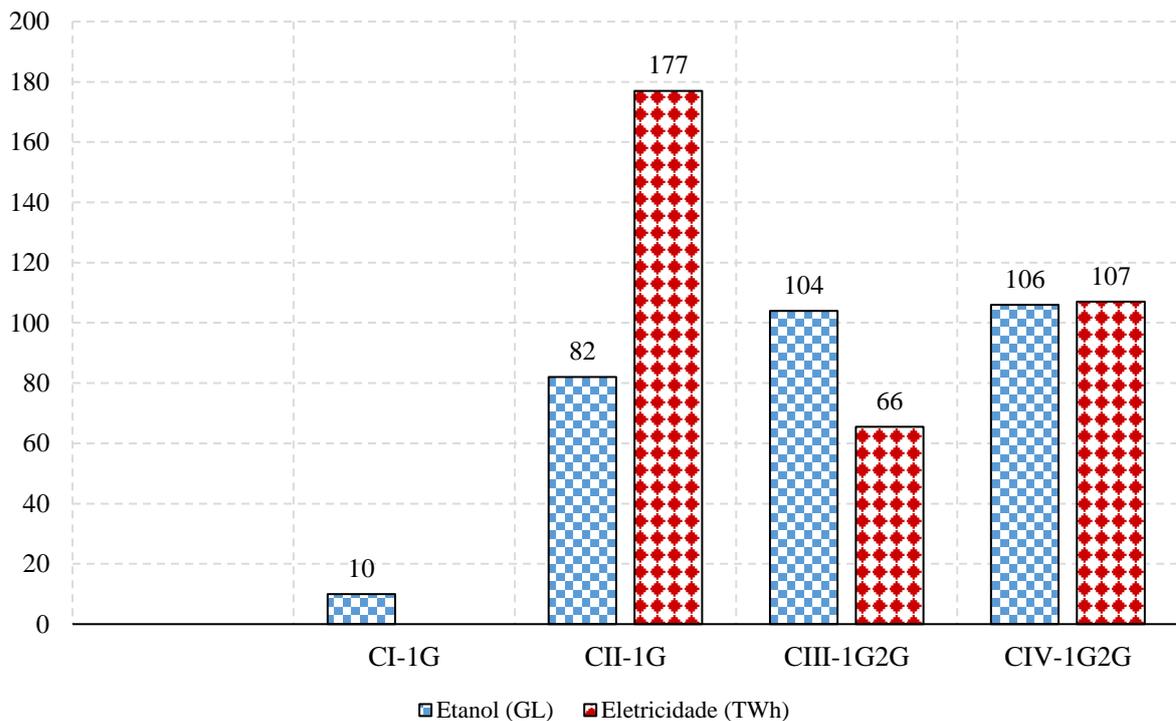
Fonte: Autor, com base nos resultados

5.5.1 Análise comparativa dos cenários

Os resultados obtidos nos cenários simulados servem como base para uma análise comparativa do cenário mais adequado a ser aplicado no território angolano. Os quatro cenários foram avaliados em relação à produção de etanol e eletricidade. O cenário CI-1G, em comparação aos demais, apresenta a menor produtividade de bioenergia, com aproximadamente 10 bilhões de litros (BL) de etanol e sem excedente de eletricidade (Gráfico 5.1). A produção de etanol no CI-1G representa apenas 12% da produção do cenário CII-1G, uma vez que toda a matéria-prima é processada exclusivamente para a produção de etanol, sem conversão em açúcar.

Por outro lado, o cenário CIV-1G2G, embora apresente um equilíbrio na produção de etanol e eletricidade, se destaca como o mais promissor, com perspectivas favoráveis para a produção anual de 106,5 gígalitros (GL) de etanol. Além disso, para a cana convencional, o etanol de segunda geração (2G) sempre será um produto complementar. Em comparação com os 103,8 GL produzidos no CIII-1G2G, observa-se um aumento de 2,7% na produção de etanol no cenário da cana-energia (CIV-1G2G). Esse incremento se deve principalmente à quantidade de material lignocelulósico utilizada na produção de etanol 2G, que, além de maximizar a produção de etanol, reduz a geração de eletricidade em relação ao CII-1G.

Gráfico 5.1. Produção anual de bioenergia por cada cenário



Fonte: Autor, com base nos resultados

Os cenários CI-1G e CIV-1G2G destacam-se por apresentarem os limites inferior e superior na produção de etanol, que poderia ser utilizada para atender à demanda de gasolina no país. Em 2021, a demanda de gasolina em Angola foi estimada em 3 bilhões de litros (BL) (Statista, 2022c; EIA, 2023), uma necessidade que poderia ser atendida por aproximadamente 30% da produção anual de etanol do CI-1G e por 3% do CIV-1G2G. Além disso, o etanol pode contribuir para a redução das importações, uma vez que cerca de 72% da gasolina consumida em Angola é importada..

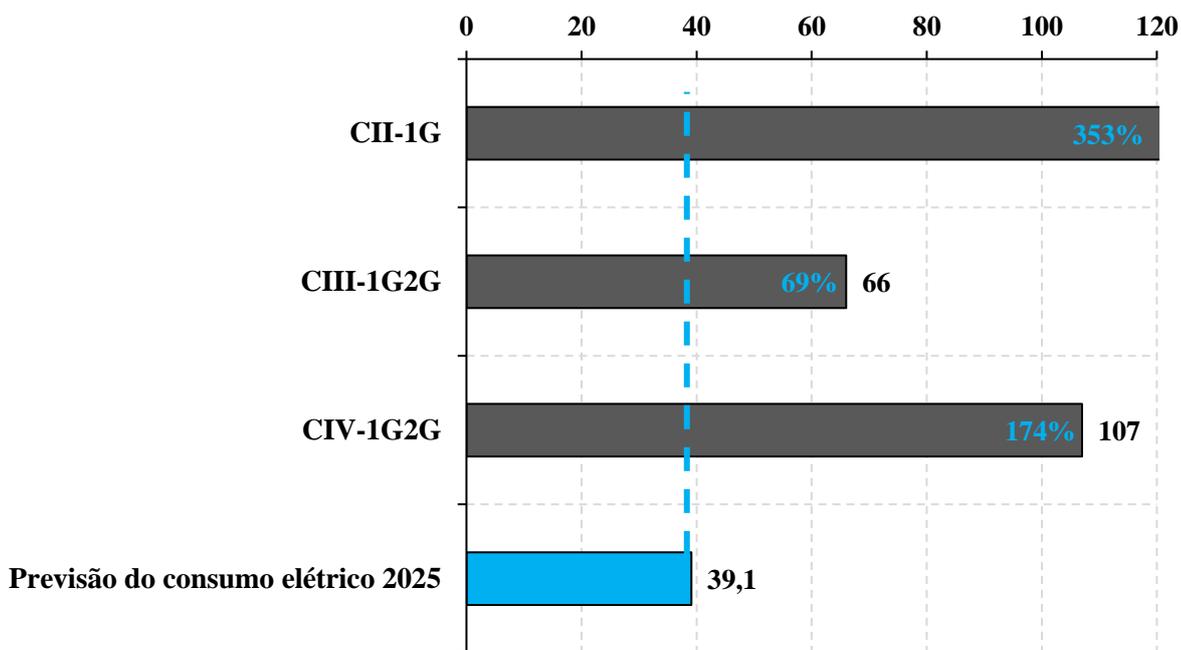
A produção de eletricidade é um destaque no cenário CII-1G, onde se alcançam valores máximos de 177 terawatts-hora (TWh) de eletricidade anual, 60% a mais do que o CIV-1G2G (Gráfico 5.1). Essa eficiência energética decorre do aproveitamento total da matéria-prima da cana para a produção de etanol e eletricidade excedente, sem a produção de açúcar. Com essa abordagem, Angola poderia se tornar totalmente autossuficiente em energia elétrica. Em 2021, o país gerou 16 TWh de eletricidade (EIA, 2022), o que representa 9% da produção do CII-1G, 24% do CIII-1G2G e 15% do CIV-1G2G. Nos cenários analisados, as províncias de Cuando Cubango e Cunene seriam as maiores produtoras de bioenergia, fornecendo aproximadamente 57% e 27%, respectivamente, de toda a bioenergia do país.

As usinas de açúcar podem desempenhar um papel fundamental na redução da atual lacuna de energia elétrica em Angola, onde apenas 46% da população tem acesso a essa fonte de energia. O consumo projetado de eletricidade deverá atingir 39,1 terawatts-hora (TWh) em 2025, com considerável influência do setor residencial (37%) e contribuições significativas dos serviços (28%) e da indústria (25%) (Gestoenergy, 2023). Assim, Angola experimentará um crescimento acentuado no consumo de eletricidade, o que implicará maior acesso a serviços básicos de energia para a população. Esse aumento na demanda pode ser atendido por soluções descentralizadas de fontes renováveis, como as usinas de bioenergia, que beneficiariam populações rurais e dispersas pelo país.

O cultivo da cana-de-açúcar em todas as áreas aptas fornece quantidades significativas de eletricidade em relação ao consumo projetado para 2025 (Gráfico 5.3):

- **CII-1G:** Ao aplicar a tecnologia de conversão convencional à cana-de-açúcar, este cenário representa um excedente de 353% em relação ao consumo de eletricidade previsto para 2025 em Angola;
- **CIII-1G2G:** Com a tecnologia de conversão avançada aplicada à cana-de-açúcar convencional, seria possível fornecer cerca de 66 TWh de eletricidade, o que ampliaria em aproximadamente 69% a projeção de consumo para aquele ano;
- **CIV-1G2G:** Ao aplicar a tecnologia de conversão avançada para cana-energia, cerca de 107 TWh por ano seriam fornecidos, resultando em um acréscimo de 174% na projeção do consumo para 2025, uma vez que mais material lignocelulósico seria utilizado na produção de etanol 2G.

Gráfico 5.2. Potencial de produção de energia elétrica da cana-de-açúcar em Angola (TWh)



Fonte: Autor, com base nos resultados

No entanto, a atualização do sistema energético de uma região exige uma análise das emissões de carbono mitigadas em comparação com as emissões geradas pelas fontes atuais de geração de energia.

5.6 Análise das emissões de GEE

5.6.1 Avaliação das emissões de GEE nos cenários de biorrefinarias

Os resultados das emissões de GEE para uso de bioenergia para as quatro rotas de etanol e gasolina, foram apresentados nas tabelas e gráficos abaixo.

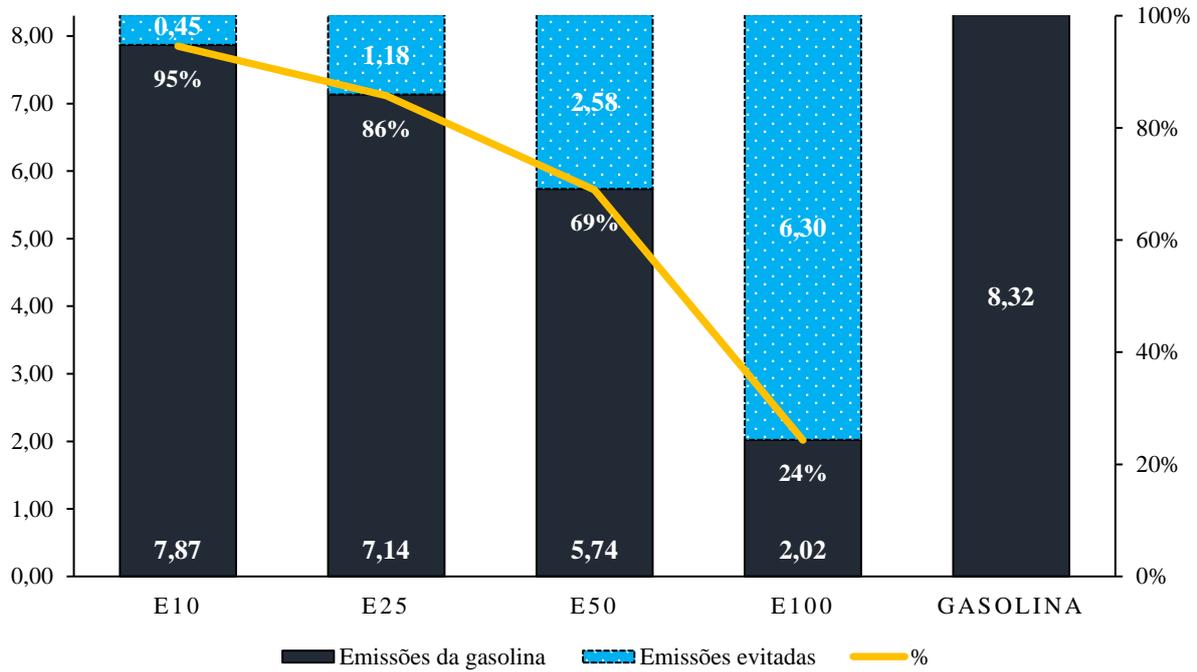
Tabela 5.12. Redução de emissões de GEE do etanol 1G-Base, em relação a gasolina

Uso do etanol 1G-Base	Emissões anuais (MtCO₂-eq.)	Emissões anuais evitadas (MtCO₂-eq.)
E10	7,87	0,45
E25	7,14	1,18
E50	5,74	2,58
E100	2,02	6,30
Gasolina	8,32	0,0

Fonte: Autor, com base nos resultados

Os resultados mostram que o consumo de gasolina em Angola em 2021 emitiu aproximadamente 8,32 MtCO₂-eq., valor que se comparado com as emissões do sector energético do inventario do país, representa cerca de 44% das emissões do setor de transporte em 2018. Com os resultados obtidos nos cenários de uso de etanol como combustível comparado com a gasolina, verificamos as vantagens comparativas do combustível proveniente da cana-de-açúcar, o que é consideravelmente menos do que o verificado na gasolina (Gráfico 5.4). A redução de emissões de GEE do etanol 1G-Base, nos seus respectivos cenários (E10, E25, E50 e E100) levam uma mitigação das emissões em 5%, 14%, 31% e 76% (em relação à gasolina).

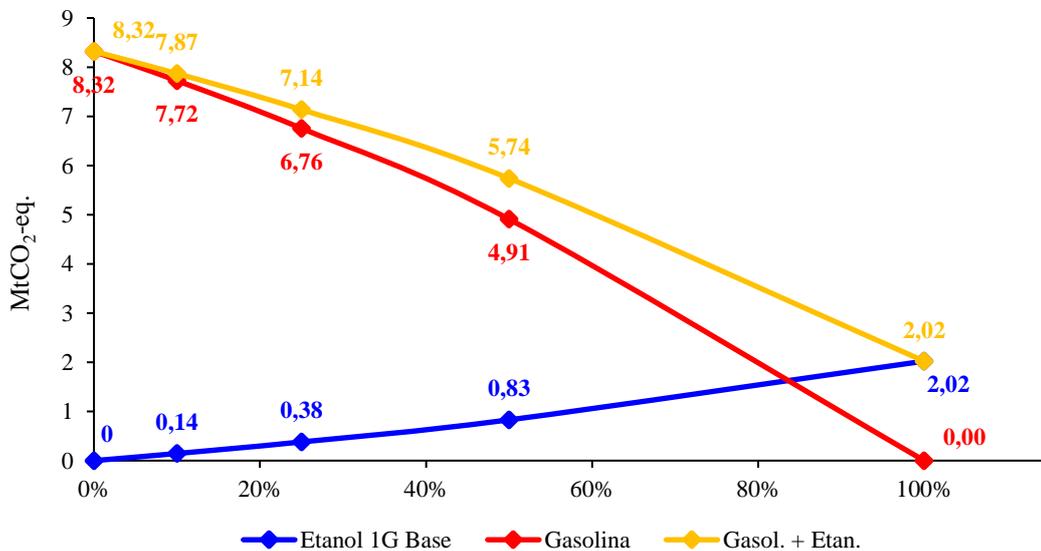
Gráfico 5.3. Redução de emissões de GEE (MtCO₂-eq.) do etanol 1G-Base, em relação a gasolina



Fonte: Autor, com base nos resultados

Como indicado no Gráfico 5.5, ao comparar as emissões da gasolina com a mistura de gasolina e etanol, observa-se uma redução significativa das emissões geradas pela gasolina à medida que se adicionam quantidades percentuais de etanol 1G-Base, mitigando as emissões em uma taxa de aproximadamente 1,7% a 24%. Ou seja, ao considerar a substituição da gasolina por etanol 1G-Base, seriam produzidas até 24% das emissões da gasolina.

Gráfico 5.4. Comparação entre as emissões do etanol 1G-Base, gasolina e mistura



Fonte: Autor, com base nos resultados

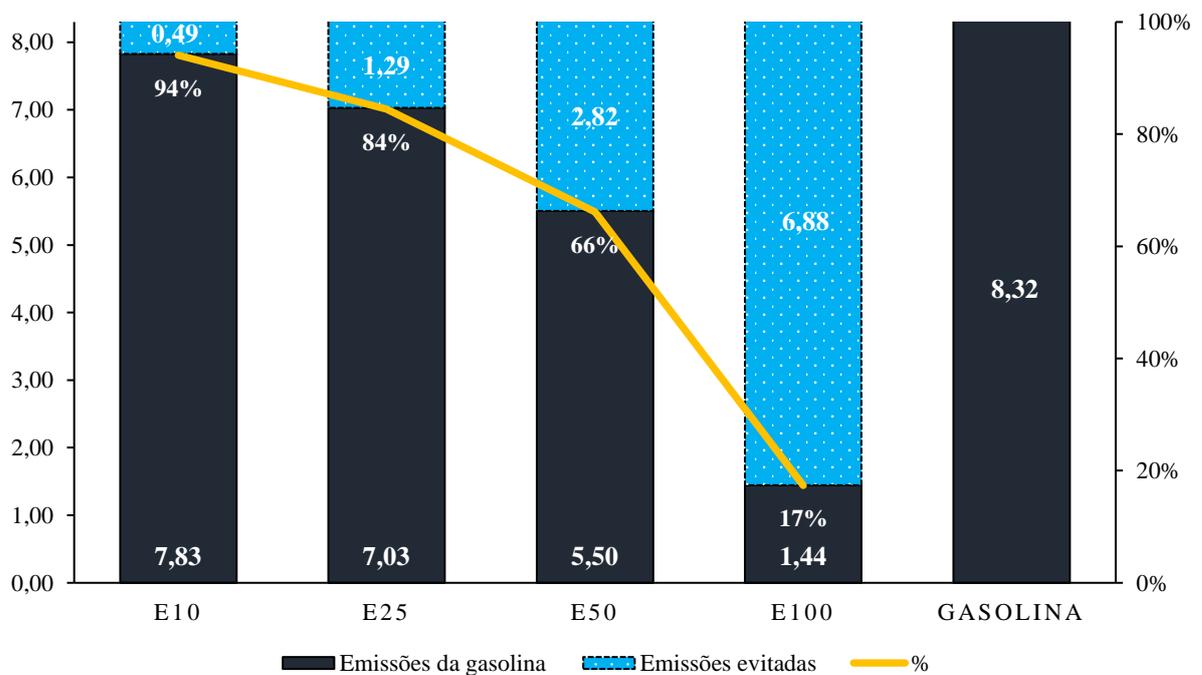
À medida que um sistema autônomo de destilaria moderna implementa melhores tecnologias na produção de etanol de primeira geração (1G-Otimizado), observa-se uma mitigação dos GEE em comparação ao etanol 1G-Base e à gasolina (Tabela 4). Nos cenários de uso do etanol E10, E25 e E50, as reduções são de 9%, 21%, 43% e 83%, respectivamente (Gráfico 5.6).

Tabela 5.13. Redução de emissões de GEE do etanol 1G-otimizado, em relação a gasolina

Uso do etanol 1G-Otimizado	Emissões anuais (MtCO ₂ -eq.)	Emissões anuais evitadas (MtCO ₂ -eq.)
E10	7,83	0,49
E25	7,03	1,29
E50	5,50	2,82
E100	1,44	6,88
Gasolina	8,32	0,0

Fonte: Autor, com base nos resultados

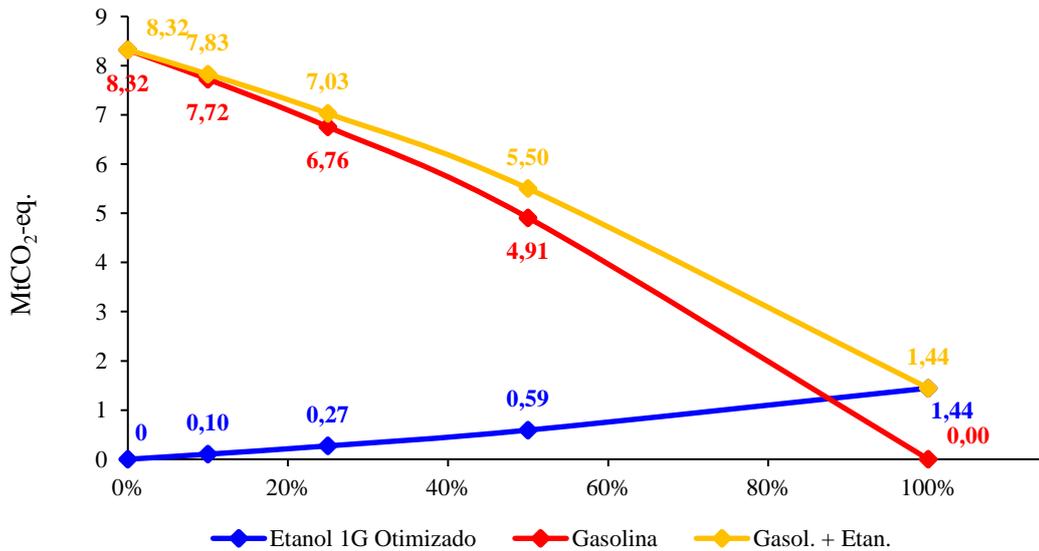
Gráfico 5.5. Redução de emissões de GEE (MtCO₂-eq.) do etanol 1G-otimizado, em relação a gasolina



Fonte: Autor, com base nos resultados

Há uma redução das emissões da gasolina à medida que quantidades de etanol otimizado são adicionadas à mistura, atingindo limites de redução que variam de 1,2% a 17,4%. Ou seja, até 1,44 MtCO₂-eq/ano seriam emitidos em substituição à gasolina (Gráfico 5.6).

Gráfico 5.6. Comparação entre as emissões do etanol 1G Otimizado, gasolina e mistura



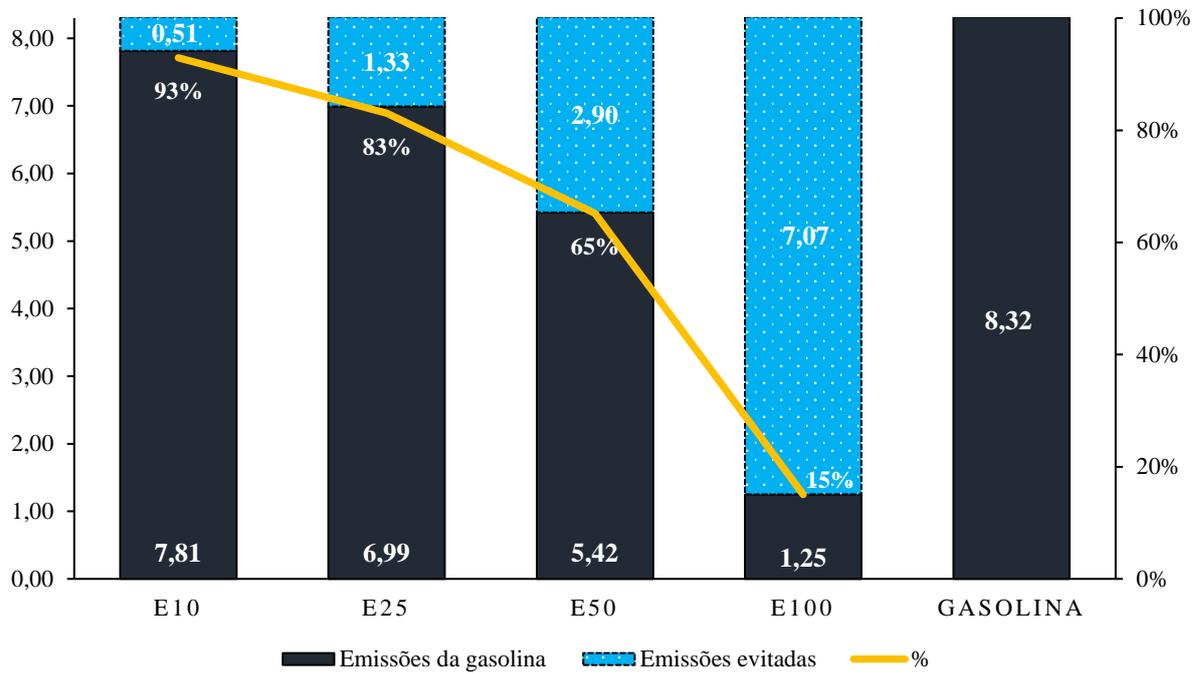
Fonte: Autor, com base nos resultados

Há uma redução das emissões da gasolina à medida que quantidades de etanol otimizado são adicionadas à mistura, atingindo limites de redução que variam de 1,2% a 17,4%. Ou seja, até 1,44 MtCO₂-eq por ano poderiam ser emitidos em substituição à gasolina (Gráfico 5.6).

Tabela 5.14. Redução de emissões de GEE do etanol 1G + 2G, em relação a gasolina

Uso do etanol 1G+2G	Emissões anuais (MtCO ₂ -eq.)	Emissões anuais evitadas (MtCO ₂ -eq.)
E10	7,81	0,51
E25	6,99	1,33
E50	5,42	2,90
E100	1,25	7,07
Gasolina	8,32	0,0

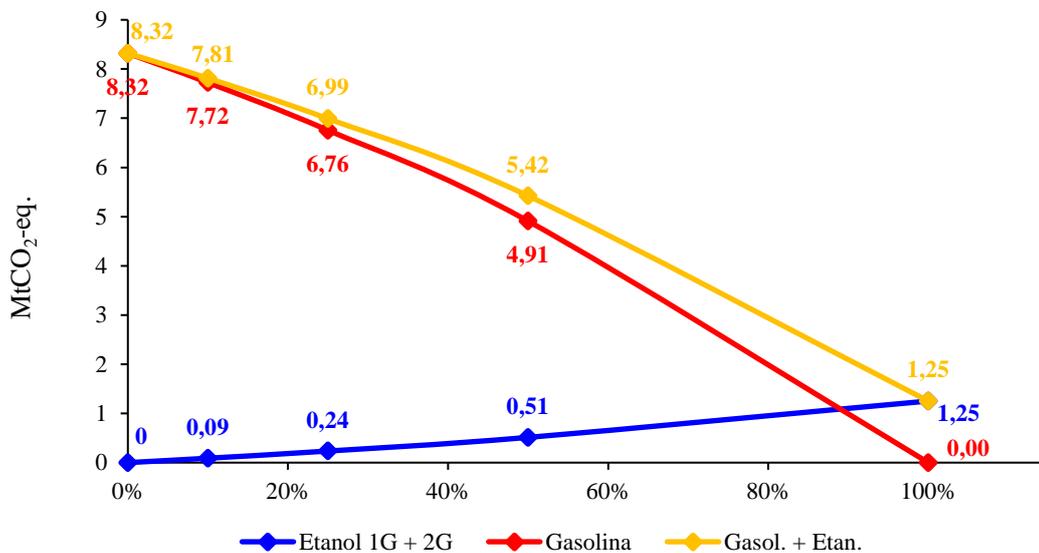
Fonte: Autor, com base nos resultados

Gráfico 5.7. Redução de emissões de GEE (MtCO₂-eq.) do etanol 1G + 2G, em relação a gasolina

Fonte: Autor, com base nos resultados

As emissões produzidas pela gasolina, em comparação com as do etanol celulósico 1G e 2G, apresentam níveis de redução elevados quando comparadas com as misturas gasolina + 1G Base e gasolina + 1G Otimizado. A mistura gasolina + etanol 1G e 2G atinge limites de redução no intervalo de 1,1% a 15% das emissões produzidas pela gasolina (Gráfico 5.9).

Gráfico 5.8. Comparação entre as emissões do etanol 1G + 2G, gasolina e mistura



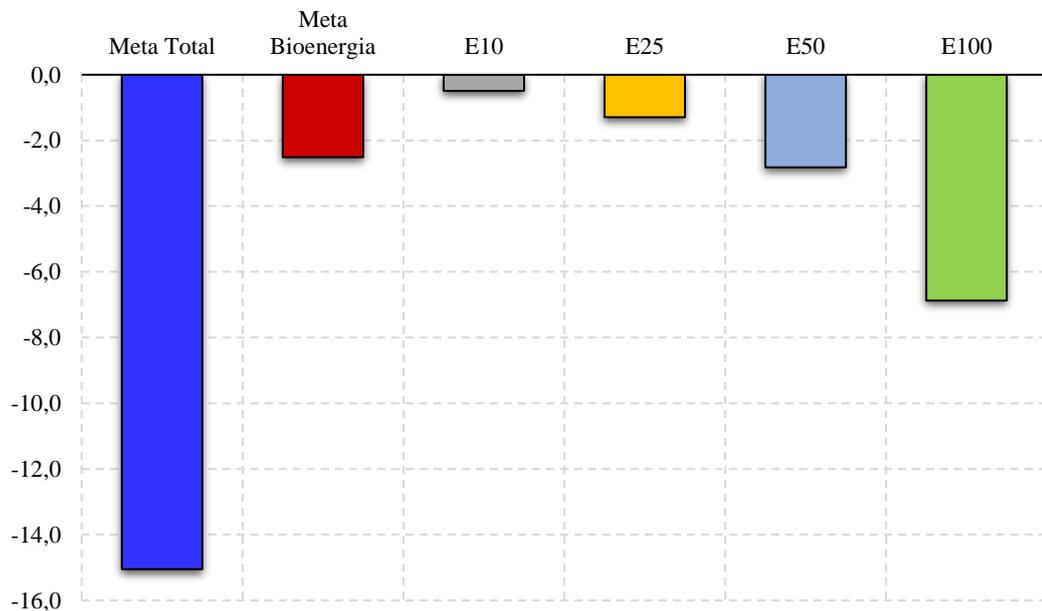
Fonte: Autor, com base nos resultados

Em 2018, o setor energético do país foi responsável por emitir 18,82 MtCO₂-eq., quantidade que poderia ser mitigada pelo uso do etanol como combustível ou como parte de uma mistura, se diferentes cenários de uso do etanol fossem aplicados. Em média, a mitigação ocorreria em 3% em relação à quantidade total emitida pelo setor energético ao utilizar E10, o que significaria aproximadamente 0,5 MtCO₂-eq. evitados. Para E25, a redução seria de 1,3 MtCO₂-eq. (7%); para E50, de 2,8 MtCO₂-eq. (15%); e, considerando E100, de 6,9 MtCO₂-eq. (37%).

Na 21ª Conferência do Clima de Paris (COP21), em 2015, Angola definiu o objetivo de reduzir em 15% suas emissões até 2025, de forma incondicional. Além disso, espera-se que, através de um cenário de mitigação condicional, o país possa reduzir 10% adicionais abaixo dos níveis de emissão até 2025. Para alcançar esse objetivo, várias medidas foram identificadas e analisadas, sendo a bioenergia uma delas. Para as contribuições incondicionais, as usinas de bioenergia apresentam um potencial de redução de 2.102 ktCO₂-eq, correspondente a 13,34% da contribuição necessária para atingir a meta angolana, e 7,9% para as contribuições condicionais (MCTA, 2021).

O setor bioenergético do país poderá ter uma participação ativa na meta de reduzir incondicionalmente as emissões até 2025. Em relação à meta total a ser alcançada, a bioenergia poderá contribuir com aproximadamente 17% dessa redução, segundo dados do MCTA. Por outro lado, como indicado no Gráfico 5.9, os cenários de uso do etanol projetados neste estudo podem contribuir para a redução das emissões de GEE, com destaque para o cenário E100, que apresenta uma participação de 46%, seguido por E50 (19%), E25 (9%) e E10 (3%).

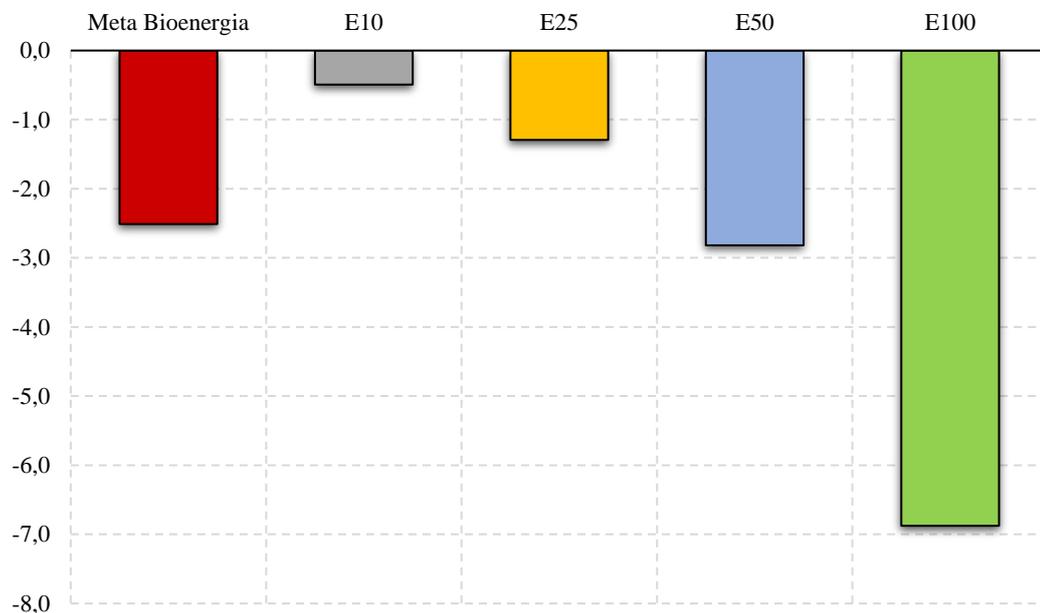
Gráfico 5.9. Metas de redução de MtCO₂-eq. 2025



Fonte: Autor, com base nos resultados

Em relação às projeções do MCTA para a redução de emissões no setor energético angolano, a bioenergia terá uma participação de aproximadamente 13%. Quanto à meta a ser alcançada pela bioenergia, os resultados deste estudo mostram que, se aplicados, o uso do etanol E10 pode contribuir com 20% e o E25 com 51% para atingi-la. No entanto, os cenários E50 e E100 são bastante otimistas, pois apresentam rendimentos acima da meta projetada para a bioenergia, resultando em um crescimento de mais 12% e 174% em relação ao cenário bioenergético (Gráfico 5.11) e essencialmente por imporem mudanças na frota de veículos do país.

Gráfico 5.10. Metas de redução de MtCO₂-eq. no setor energético 2025



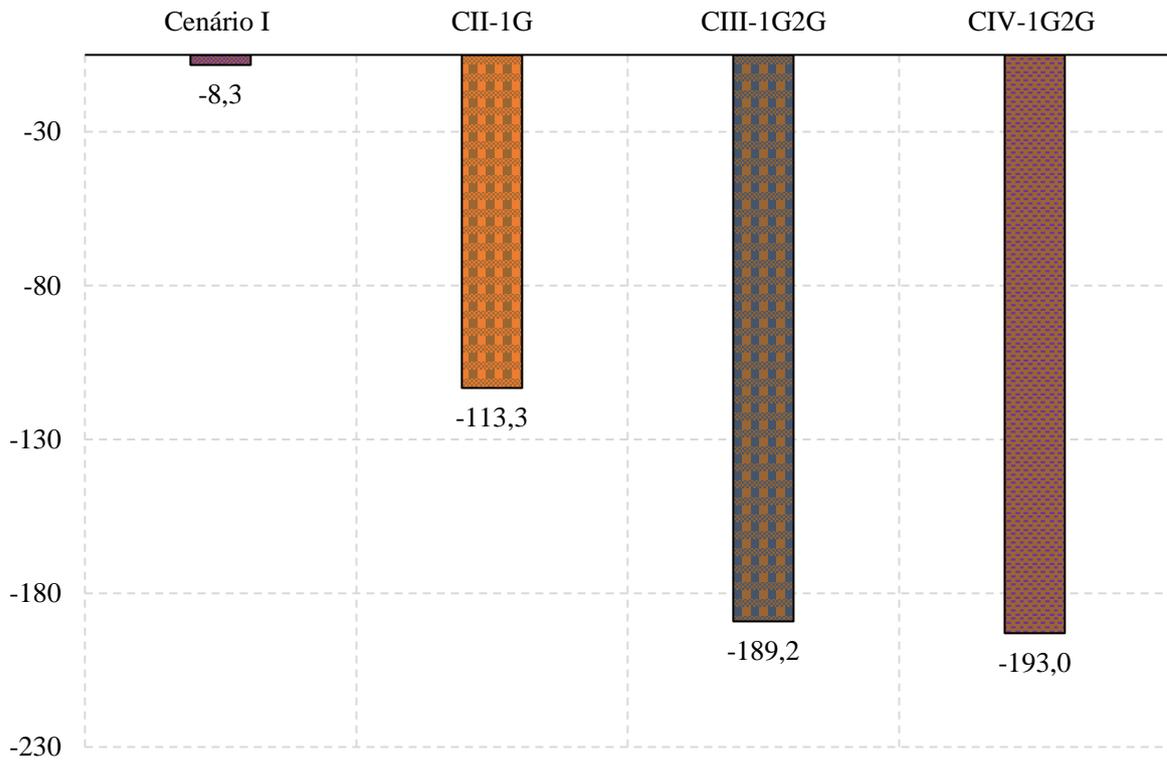
Fonte: Autor, com base nos resultados

Os excedentes da produção de etanol em cada cenário também merecem ser avaliados sob a perspectiva ambiental. Neste caso, como o excesso é destinado à exportação e na ausência de informações sobre o destino real, assumiu-se uma redução de 10% no fator de emissão associado à produção do etanol, visto que as emissões não seriam exatamente precisas devido às incertezas relacionadas ao destino final deste combustível. Para calcular as emissões evitadas pela produção de etanol excedente em cada cenário, a quantidade de etanol foi transformada em gasolina, ou seja, a quantidade de gasolina que substitui o volume de etanol excedente que seria utilizado em cada cenário.

Os valores obtidos do volume de gasolina, assim como a quantidade de etanol de cada cenário, foram então multiplicados pelo fator de emissão dos respectivos combustíveis descrito na Tabela 4.4. Os resultados das emissões evitadas pelo uso do etanol em comparação com a gasolina, obtidos a partir dos cálculos da diferença entre as emissões produzidas pela gasolina e pelo etanol,

estão apresentados no Gráfico 5.12. O etanol excedente de 77,68 GL produzido no CII-1G, que seria exportado, contribuiria para a mitigação de GEE a nível mundial com 113,3 MtCO₂-eq. Por outro lado, cerca de 193 MtCO₂-eq. seriam evitados a partir do excedente do etanol produzido no CIV-1G2G.

Gráfico 5.11. Emissões evitadas pelo excedente de etanol em cada cenário, MtCO₂-eq.



Fonte: Autor, com base nos resultados

5.6.2 Avaliação das emissões de GEE da eletricidade gerada pelo bagaço

Segundo Administração de Informação de Energia dos EUA (EIA, 2021), Angola consome principalmente hidroeletricidade e fontes derivadas de combustíveis fósseis (principalmente óleo diesel) para atender às suas necessidades domésticas de geração de eletricidade. Em 2021, Angola gerou 16,4 TWh de eletricidade, especialmente a partir de fontes hídricas e fósseis, como ilustrado na Tabela 5.15.

Os cálculos das emissões de GEE da matriz elétrica angolana foram realizados considerando o fator de emissão de cada tecnologia, e os resultados estão apresentados na Tabela 5.15. Como a geração de energia elétrica em todos os cenários de estudo para eletricidade derivada do bagaço de cana-de-açúcar foi superior à geração de eletricidade no país em 2021, considerou-se apenas a demanda suprida por um dos cenários para analisar o impacto ambiental, substituindo a geração de eletricidade derivada de combustíveis fósseis (diesel e gás natural) pela queima do bagaço na

geração de eletricidade. Dessa forma, os resultados encontrados foram reunidos na Tabela 5.15, juntamente com a geração de eletricidade de cada tecnologia para o ano de 2021 em Angola.

Tabela 5.15. Fatores de emissão de GEE das tecnologias de geração de eletricidade e a geração de eletricidade de cada tecnologia

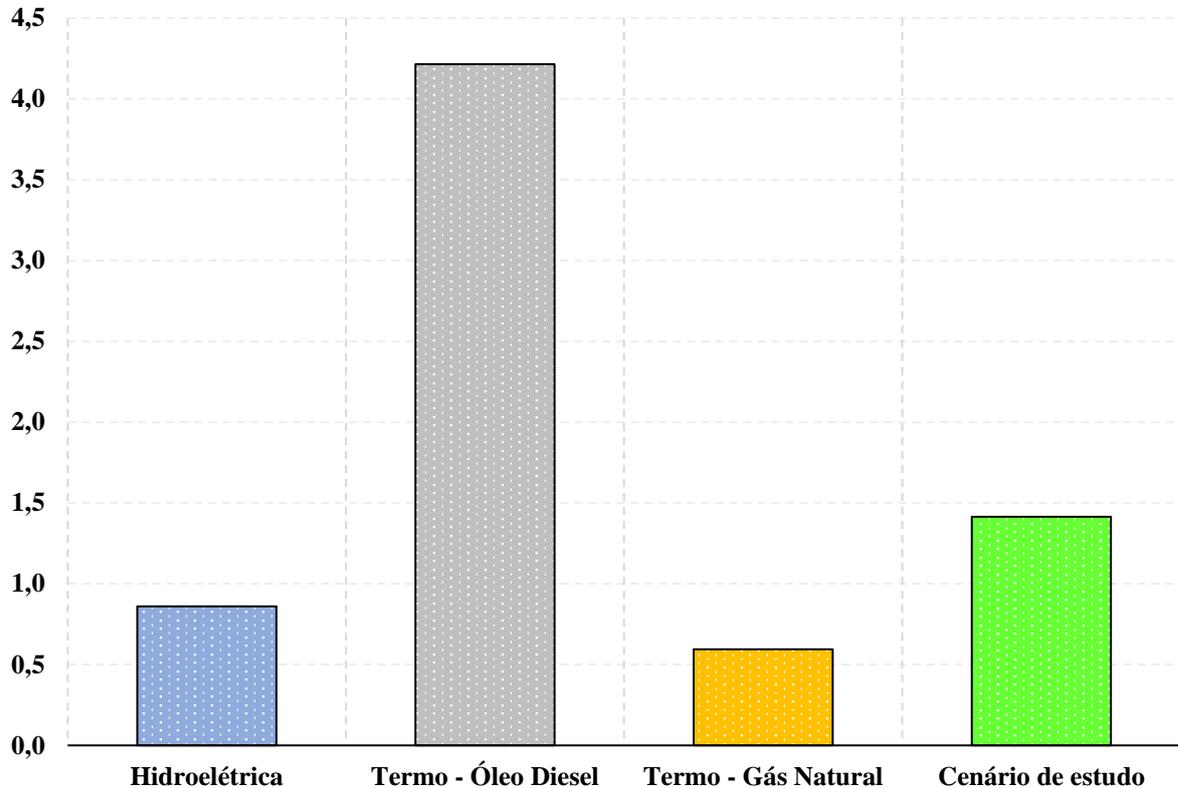
Tecnologia de geração	Fator de emissão (gCO₂-eq./kWh)	Geração de eletricidade (GWh/ano)	Emissão anual (tCO₂-eq./ano)	Participação nas emissões
Hidroelétrica	86	10.004	860.344	15%
Termo - Óleo Diesel	829	5.084	4.214.636	74%
Termo - Gás Natural	518	1.148	594.664	10%
Outras Renováveis	----	164	----	----
Total		16.400	5.669.644,0	
Cenário de estudo	227	6.232	1.414.664	25%

Fonte: Autor, com base nos resultados

Os resultados mostraram que a energia hidroelétrica tem a menor participação nas emissões geradas pela eletricidade no país, representando apenas 15%. Os combustíveis fósseis, por outro lado, são responsáveis por 84% das emissões totais. As termoelétricas a diesel emitem aproximadamente 4,2 MtCO₂-eq./ano, enquanto o gás natural contribui com cerca de 5,9 ktCO₂-eq./ano.

O Gráfico 5.13 ilustra a quantidade de GEE evitados quando parte da eletricidade gerada em uma usina termoelétrica a combustíveis fósseis é substituída pela eletricidade produzida a partir do bagaço de cana-de-açúcar. Considerando que a eletricidade proveniente do bagaço substitui a gerada pelas termoelétricas a diesel e a gás natural em Angola, aproximadamente 3,4 MtCO₂-eq./ano seriam evitadas, o que representa 71% das emissões geradas pelos combustíveis fósseis.

Com a introdução das usinas que produzem eletricidade a partir do bagaço de cana-de-açúcar, o setor elétrico angolano deixaria de gerar 5,6 MtCO₂-eq./ano, passando a produzir apenas 2,2 MtCO₂-eq./ano. Isso significa que aproximadamente 39% das emissões seriam evitadas.

Gráfico 5.12. Emissão gerada por cada fonte de energia elétrica (MtCO₂-eq./ano)

Fonte: Autor, com base nos resultados

O bagaço da cana-de-açúcar pode ajudar Angola a superar a crise energética, atendendo às novas demandas de eletricidade por meio de recursos renováveis e gerando eletricidade com baixo impacto nas emissões de GEE.

Os argumentos apresentados até aqui indicam claramente que a mitigação dos GEE varia de acordo com as tecnologias aplicadas tanto na produção de etanol quanto na produção de eletricidade. O etanol e a eletricidade produzidos com alta tecnologia apresentam emissões relativamente menores em comparação às tecnologias menos desenvolvidas, embora exijam custos mais elevados na sua implantação.

5.7 Resultados de Custos e Investimentos

A estimativa de investimentos para todos os cenários de biorrefinarias foi calculada e apresentada na Tabela 5.16, incluindo as projeções para o investimento total e o investimento por unidade de bioenergia produzida, corrigido pelo índice CEPCI. Com base na metodologia de avaliação econômica, que se fundamentou nos critérios apresentados na Tabela 4.7, os resultados referentes aos gastos estão apresentados a seguir.

Tabela 5.16. Investimentos anuais requeridos para os cenários de biorrefinarias

Cenário	Invest. Etanol (MUSD)	Invest. Eletricidade (MUSD)	Invest. Total (MUSD)
CI-1G	0,39	0	0,39
CII-1G	12,5	21,5	34,0
CIII-1G2G cana conv.	58,7	20,5	79,2
CIV-1G2G cana energ.	78,8	20,5	99,3

Fonte: Autor, com base nos resultados

A viabilidade da produção de etanol no CI-1G depende do custo de oportunidade do melaço. O preço do melaço e a quantidade destinada à exportação tornaram-no um coproduto valioso no mercado internacional. Portanto, desviar o melaço para a produção de etanol só é viável se os preços internos forem atrativos para as usinas de cana-de-açúcar. Além disso, o preço do etanol deve ser suficientemente inferior ao da gasolina para não impactar os consumidores de combustíveis (ou seja, gasolina misturada). Alternativamente, políticas governamentais adequadas, como mandatos de mistura, podem reduzir o custo de oportunidade do melaço e garantir uma quota de mercado para o etanol no conjunto nacional de combustíveis.

Quanto ao melaço, que é o principal subproduto das usinas de açúcar, ele contém cerca de 55% de açúcares redutores em peso e é capaz de produzir aproximadamente 350 litros de etanol por tonelada, segundo o Balanço Energético Brasileiro (EPE, 2023). Com o preço do melaço em 183 US\$ por tonelada, um valor de referência para o mercado sul-africano em 2023, e o preço da gasolina em Angola, que é de 0,362 US\$ por litro (https://pt.globalpetrolprices.com/Angola/gasoline_prices/) em dezembro de 2023, a viabilidade econômica do etanol de melaço pode estar ao nosso alcance. Assumindo um rendimento de 350 litros de etanol por tonelada de melaço e um preço do melaço de 183 US\$ por tonelada, o custo da matéria-prima para a produção de etanol seria de 0,522 US\$ por litro (Tabela 4). A diferença entre os preços da gasolina e do etanol, que é de 0,160 US\$ por litro, representa a lacuna econômica necessária para cobrir os custos de processamento do melaço, da produção de etanol e da distribuição do biocombustível, garantindo margens de lucro para produtores e distribuidores.

A disponibilidade de bagaço e palha para a geração de eletricidade varia dependendo se a matéria-prima da cana-de-açúcar é direcionada principalmente para a produção de açúcar ou para a produção de etanol. A Tabela 5.17 apresenta os custos da eletricidade para os cenários analisados.

A inclusão de uma instalação de conversão de segunda geração (2G) eleva os custos de eletricidade de aproximadamente 0,066 US\$ por kWh para cerca de 0,171 US\$ por kWh, devido à necessidade de amortizar os custos adicionais de equipamento de capital. No entanto, a transição da cana-de-açúcar convencional para a cana-energia reduz os custos novamente para 0,104 US\$ por kWh, graças aos menores custos de matéria-prima proporcionados por rendimentos mais elevados.

Tabela 5.17. Custo unitário de produção da cana-de-açúcar em bioenergia

Cenário	Matéria-prima	Custo final de conversão	
		Etanol (USD/L)	Eletricidade (USD/kWh)
CI-1G	Melaço	0,522	0,000
CII-1G	Caldo direto	0,511	0,066
CIII-1G2G cana conv.	Cana + 50% palha	0,645	0,171
CIV-1G2G cana energ.	Cana + 50% palha	0,731	0,104

Fonte: Autor, com base nos resultados

6 CONCLUSÕES

Este estudo foi desenvolvido utilizando um banco de dados de modelagem de zonas agroecológicas, considerando as recomendações de institutos internacionais dedicados à preservação ambiental e à sustentabilidade na produção de biocombustíveis. Os resultados da avaliação da aptidão da terra para o cultivo de cana-de-açúcar em Angola indicam que existe um potencial substancial para expandir a produção de bioenergia proveniente da cana-de-açúcar. O crescimento da produção agrícola em Angola pode ser acompanhado pela ampliação da produção de biocombustíveis a partir da cana-de-açúcar, contribuindo para a mitigação do CO₂ tanto no setor elétrico quanto no uso para transporte, ajudando assim o país a diversificar sua matriz energética.

Assim, identificou-se cerca de 6,3 milhões de hectares (Mha) de terras aptas para o cultivo de cana-de-açúcar irrigada, distribuídas em sete províncias do país, todas com características e disponibilidade favoráveis para a introdução da bioenergia proveniente da cana-de-açúcar. Essas terras estão localizadas em faixas de declividade abaixo de 16%, com as províncias de Cuando Cubango e Cunene apresentando uma produtividade estimada entre 601 e 216 toneladas por hectare (Mt/ano) de cana-de-açúcar.

Foram simulados quatro cenários para a produção de bioenergia. O CIV-1G2G apresenta uma produção anual de etanol de 104 bilhões de litros, um valor impressionante. Para se ter uma ideia da magnitude dessa produção, ela é suficiente para atender 35 vezes a demanda de gasolina de Angola em 2021. Em outras palavras, com apenas uma pequena fração da produção do CIV-1G2G, cerca de 3%, seria possível suprir toda a demanda de gasolina do país. Esse dado ressalta o potencial do etanol produzido no CIV-1G2G para atender às demandas globais de combustíveis.

O CII-1G, por sua vez, registra uma produção anual de eletricidade de aproximadamente 177 TWh. Para contextualizar, essa quantidade de eletricidade seria suficiente para atender até 11 vezes a demanda de Angola em 2021. Ou seja, apenas uma pequena fração da eletricidade gerada pelo CII-1G seria necessária para suprir a demanda total do país, evidenciando o potencial excedente de produção. Isso reforça a capacidade de exportação de eletricidade ou a oportunidade de desenvolvimento de infraestrutura energética para melhor aproveitar esse volume de produção. O CII-1G representa um excedente de 353% em relação ao consumo de eletricidade previsto em Angola para o ano de 2025.

Os cenários de uso do etanol como combustível, ou como parte de uma mistura, simulados neste estudo indicam uma redução de até 37% na quantidade total de GEE emitida pelo setor energético angolano em 2018. Por outro lado, as usinas que produzem eletricidade a partir do bagaço da cana-

de-açúcar poderão ajudar o setor elétrico angolano a mitigar aproximadamente 39% das emissões geradas pelas termoelétricas a combustíveis fósseis, o que representa cerca de 2,2 MtCO₂-eq./ano.

Os resultados obtidos neste estudo servem como base para explorar o potencial que Angola apresenta na produção de biocombustíveis a partir das terras disponíveis. Devido à vasta quantidade de áreas cultiváveis no território angolano, a expansão do cultivo de cana-de-açúcar para fins bioenergéticos pode ser realizada dentro dos limites das áreas reservadas para a agricultura, visto que apenas 25% dessas terras está atualmente em uso agrícola.

Embora reconheçamos que muitas questões ainda precisam ser abordadas, esta pesquisa contribui para uma visão geral do potencial que Angola apresenta, utilizando mapas georreferenciados, bancos de dados e camadas vetoriais para identificar áreas de expansão dos biocombustíveis. Essa abordagem permite classificar e quantificar espacialmente as zonas potenciais para a implementação da bioenergia da cana-de-açúcar em Angola. Esperamos que esta análise e seus produtos derivados sirvam como uma ferramenta útil para o planejamento nacional e adequado do país.

Para a elaboração de recomendações inovadoras para trabalhos futuros, é essencial considerar as lacunas e as oportunidades de aprimoramento que não foram exploradas neste estudo. Com base no resumo e nas conclusões apresentadas, sugerem-se as seguintes direções de pesquisa para trabalhos futuros:

1. Expansão do Escopo para Outras Culturas Energéticas

- Diversificação de Culturas: Avaliar o potencial de outras culturas energéticas além da cana-de-açúcar, como palma, sorgo, algas e outras culturas oleaginosas. Esse estudo poderia identificar opções que possam complementar ou diversificar a matriz bioenergética de Angola, aumentando a resiliência do setor.
- Estudo Comparativo de Eficiência Energética: Realizar estudos comparativos de eficiência energética entre diferentes culturas bioenergéticas. Essa análise deve considerar não apenas a produção de biocombustíveis, mas também o impacto ambiental e social de cada cultura, permitindo uma escolha mais informada e sustentável.

2. Sistemas Energéticos Integrados

- Desenvolvimento de Sistemas de Bioenergia Híbridos: Investigar a viabilidade de sistemas híbridos que combinam a produção de bioenergia com outras fontes renováveis, como solar e eólica. Essa pesquisa pode focar em maximizar a eficiência energética e a resiliência do sistema, permitindo uma integração mais eficiente de diversas fontes de energia e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.
- Valorização de subprodutos: Explorar técnicas inovadoras para a valorização de subprodutos da cana-de-açúcar, como o bagaço e a vinhaça, transformando-os em biogás, biofertilizantes, promovendo uma economia circular

3. Políticas Públicas e Planejamento Energético

- I. - Desenvolvimento de Políticas Inovadoras: Identificar políticas públicas que incentivem o uso de biocombustíveis no setor de transportes e energia, e que promovam a inovação tecnológica e a pesquisa científica no campo da bioenergia.
- Modelagem de Impactos de Políticas: Utilizar modelagem computacional para prever o impacto de diferentes políticas públicas sobre a expansão da produção de biocombustíveis e a mitigação das emissões de GEE.

4. Análise de Ciclo de Vida (LCA) Avançada

- LCA avançada: Realizar uma análise de ciclo de vida (LCA) mais detalhada que considere todo o ciclo produtivo, desde a produção agrícola até o uso final da bioenergia, incorporando indicadores de sustentabilidade ambiental, econômica e social.
- Cenários de Mudança Climática: Incluir cenários de mudança climática na LCA para avaliar como as alterações climáticas podem afetar a sustentabilidade e a viabilidade econômica dos biocombustíveis.

Essas recomendações focam em melhorar a eficiência, sustentabilidade e viabilidade econômica da produção de bioenergia em Angola, além de introduzir novas tecnologias e abordagens inovadoras que podem expandir as fronteiras do conhecimento ao campo da bioenergia.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ackbar, L. S. (2007) ‘A Land Suitability Assessment for Sugarcane Cultivation in Angola - Bioenergy Implications’, (December).

Amigun, B., Kaviti, J. and Stafford, W. (2011) ‘Biofuels and sustainability in Africa’, 15, pp. 1360–1372. doi: 10.1016/j.rser.2010.10.015.

Batidzirai, B. and Johnson, F. (2017) ‘Energy security, agroindustrial development, and international trade : The case of sugarcane in Southern Africa’, *Socioeconomic and Environmental Impacts of Biofuels: Evidence from Developing Nations*, pp. 254–277.

Battle, E. A. O. *et al.* (2022a) ‘Brazilian integrated oilpalm-sugarcane biorefinery: An energetic, exergetic, economic, and environmental (4E) assessment’, *Energy Conversion and Management*, 268(June). doi: 10.1016/j.enconman.2022.116066.

Battle, E. A. O. *et al.* (2022b) ‘Brazilian integrated oilpalm-sugarcane biorefinery: An energetic, exergetic, economic, and environmental (4E) assessment’, *Energy Conversion and Management*, 268, p. 116066. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.116066.

Van Den Berg, J. and Rademakers, L. (2007) *Biofuels ‘superpower’ Angola soon to be self-sufficient in food production - FAO, Biopact*. Available at: <https://global.mongabay.com/news/bioenergy/2007/01/biofuels-superpower-angola-soon-to-be.html> (Accessed: 18 February 2022).

Biocom (2022) *Biocom Angola*. Available at: <https://www.biocom-angola.com/pt-br/pagina-inicial> (Accessed: 17 August 2022).

BIOCOM (2021) *Biocom em Números / Biocom Angola*. Available at: <https://www.biocom-angola.com/pt-br/a-empresa/biocom-em-numeros> (Accessed: 5 December 2021).

BNDES (2008) *Sugarcane Based-Bioethanol*.

Bonomi (2015) ‘Biochemical and thermochemical routes integrated in a sugarcane biorefinery’, (April).

Bonomi, A. *et al.* (2016) ‘Techno-economic and Environmental Assessment of Second Generation Ethanol : Short and Long Term Prospects’, 50(2011), pp. 439–444. doi: 10.3303/CET1650074.

Bookworldfact (2020) ‘People & society’, (August), p. 2020. Available at: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/eritrea/>.

Boonyanuphap, J. *et al.* (2004) ‘GIS-based land suitability assessment for Musa (ABB group) plantation.’, *Journal of Applied Horticulture*, 06(01), pp. 3–10. doi: 10.37855/jah.2004.v06i01.01.

BP (2021) ‘Statistical Review of World Energy’.

BP (2022) ‘bp Statistical Review of World Energy’.

Carvalho, D. J. (2015) ‘Geração de Bioeletricidade em Usina Sucroalcooleira Utilizando Bagaço, Palha de Cana e Sorgo Biomassa’, p. 154.

Cativa (2018) ‘Modelling the potential bioenergy production from agro-forestry crops and residues in angola’, *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*, 2018(26thEUBCE), pp. 21–24.

CGEE (2017) *Second-generation sugarcane bioenergy & biochemicals*.

Chemical Engineering, C. (2023) ‘Interoperability’, (June).

Chia, S. R. *et al.* (2022) ‘Renewable diesel as fossil fuel substitution in Malaysia: A review’, *Fuel*, 314, p. 123137. doi: 10.1016/J.FUEL.2022.123137.

CIA (2022) *Angola - The World Factbook*. Available at: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/angola/#geography> (Accessed: 18 February 2022).

Coelho Junior, L. M. *et al.* (2019) ‘Carbon footprint of the generation of bioelectricity from sugarcane bagasse in a sugar and ethanol industry’, *International Journal of Global Warming*, 17(3), p. 235. doi: 10.1504/ijgw.2019.10020020.

Coelho, S. T. (2004) ‘Improving its Use and Moving to Modern Energy Use . In : Renewables 2004 - International Conference for Renewab ... Traditional Biomass Energy : Improving its Use and Moving to Modern Energy Use 1 Authors : University of São Paulo , Brasil Editing : Secre’, (January 2004).

Cortez *et al.* (2019) *Sugarcane Bioenergy for Sustainable Development*.

Cortez et al, L. A. . (2010) *Bioetanol de cana-de-açúcar P&D PARA PRODUTIVIDADE E SUSTENTABILIDADE, Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability*.

doi: 10.5151/blucheroa-sugarcane-sugarcanebioethanol_6.

Demirbas, A. and Demirbas, I. (2007) ‘Importance of rural bioenergy for developing countries’, *Energy Conversion and Management*, 48(8), pp. 2386–2398. doi: 10.1016/j.enconman.2007.03.005.

EIA (2019) ‘Country analysis executive summary: Angola’, *U.S. Energy Information Administration, Independent Statistic & Analysis*, (May 2018), p. 9. Available at: www.eia.gov/international/analysis/country/MEX.

EIA (2020) ‘Capital Costs and Performance Characteristics for Utility Scale Power Generating Technologies’, *U.S. Energy Information Administration*, (February). Available at: https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capital_cost_AEO2020.pdf.

EIA (2022) *International - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Available at: <https://www.eia.gov/international/analysis/country/AGO> (Accessed: 2 March 2022).

EIA (2023) *International - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Available at: <https://www.eia.gov/international/overview/country/AGO> (Accessed: 25 February 2023).

EIA, U. . E. I. A. (2021) ‘Country Analysis Executive Summary : Angola Sector organization’, (May 2018), pp. 1–11.

enea (2013) ‘DOMESTIC BIOGAS DEVELOPMENT IN DEVELOPING COUNTRIES’, 33(0), pp. 1–25.

EPE (2023) ‘Balanço energético nacional’.

ESMAP (2022) *Angola | Tracking SDG 7, Tracking SDG 7*. Available at: <https://trackingsdg7.esmap.org/country/angola> (Accessed: 25 February 2022).

FAO/WFP (2006) *Crop and Food Supply Assessment Mission to Angola, Global Shadows: Africa in the Neoliberal World Order*.

FAO (2021) *FAOSTAT*. Available at: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL> (Accessed: 20 November 2021).

FAO and IIASA (2021) *Global Agro Ecological Zones version 4 (GAEZ v4), Dataset*.

Fischer, G. *et al.* (2013) ‘Climate , Land , Energy & Water Strategies’, (April).

- Di Fraia, S. *et al.* (2020) ‘Energy potential of residual biomass from agro-industry in a Mediterranean region of southern Italy (Campania)’, *Journal of Cleaner Production*, 277, p. 124085. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.124085.
- Gestoenergy (2023) *DEMAND FORECAST / Angola Energy 2025, Angola energy 2025*. Available at: <https://angolaenergia2025.gestoenergy.com/en/conteudo/demand-forecast> (Accessed: 5 February 2023).
- Goldemberg, J. and Teixeira Coelho, S. (2004) ‘Renewable energy—traditional biomass vs. modern biomass’, *Energy Policy*, 32(6), pp. 711–714. doi: 10.1016/S0301-4215(02)00340-3.
- Horta Nogueira, L. A. (2018) ‘Why promote sugarcane bioenergy production and use in Latin America, the Caribbean and Southern Africa?’, *Sugarcane Bioenergy for Sustainable Development*, pp. 135–140. doi: 10.4324/9780429457920-12.
- Içöz, Erkan *et al.* (2009) ‘Research on ethanol production and use from sugar beet in Turkey’, *Biomass and Bioenergy*, 33(1), pp. 1–7. doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2008.05.005.
- IEA, IRENA, UNSD, World Bank, W. (2021) ‘The energy progress report SDG7: The energy progress report’, *IEA, IRENA, UNSD, WB, WHO (2021), Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2021, Washington DC*, p. 176. Available at: www.worldbank.org.
- IEA (2022) *Bioenergy - Fuels & Technologies - IEA*. Available at: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/bioenergy> (Accessed: 10 March 2022).
- INRH (2020) ‘Mapa Hidrográfico de Angola e Hierarquização dos Rios’, (42).
- IRENA (2019a) *Sugarcane bioenergy in southern Africa: Economic potential for sustainable scale-up*. Available at: www.irena.org.
- IRENA (2019b) *SUGARCANE BIOENERGY IN SOUTHERN AFRICA Economic potential for sustainable scale-up*.
- IRENA (2020) ‘Scaling Up Renewable Energy Deployment in Africa Detailed Overview of Irena’S Engagement and Impact’, (January), pp. 1–82. Available at: www.irena.org.
- Jonker, J. G. G. *et al.* (2015) ‘Outlook for ethanol production costs in Brazil up to 2030, for different biomass crops and industrial technologies’, *Applied Energy*, 147, pp. 593–610. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.090.

Kazemi Shariat Panahi, H. *et al.* (2022) ‘Bioethanol production from food wastes rich in carbohydrates’, *Current Opinion in Food Science*, 43, pp. 71–81. doi: 10.1016/J.COFS.2021.11.001.

Kumar, P. *et al.* (2019) ‘Biorefinery Polyutilization Systems: Production of Green Transportation Fuels From Biomass’, *Polygeneration with Polystorage: For Chemical and Energy Hubs*, pp. 373–407. doi: 10.1016/B978-0-12-813306-4.00012-4.

Laplane, M. F. (2015) *Sustainability of sugarcane bioenergy*, *Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)*. Available at: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/245180/245180.pdf> <https://hdl.handle.net/20.500.12380/245180> <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.003> <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.08.001> <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12>.

Leal, M. *et al.* (2016) ‘Feasibility Assessment of Converting Sugar Mills to Bioenergy Production in Africa’, pp. 1–10. doi: 10.3390/agriculture6030045.

Leal, M. R. L. V. *et al.* (2016) ‘Feasibility assessment of converting sugar mills to bioenergy production in Africa’, *Agriculture (Switzerland)*, 6(3), pp. 1–10. doi: 10.3390/agriculture6030045.

Lucena, J. and Silva, L. (2021) ‘USE OF SUGARCANE BIOMASS IN BRAZIL’, 9644, pp. 213–224.

Maia, A. C. C. and Gomes, C. F. S. (2012) ‘POSSÍVEL USO DA BIOMASSA COMO ALTERNATIVA PARA O FORNECIMENTO DE ENERGIA DO BRASIL’, *Nuevos sistemas de comunicación e información*, pp. 2013–2015.

MCTA (2021) ‘NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION OF ANGOLA Republic of Angola’, (May).

Melo, N. R. (2020) ‘ETANOL 2G : PROCESSO PRODUTIVO E SEU’.

MINEA (2015) ‘Atlas e Estratégia para as Energias Renováveis’.

MINEA (2016) ‘Angola Energia 2025’, *Ministério da Energia e Águas » Contéudo » Geração*, p. 13. Available at: <http://www.angolaenergia2025.com/pt-pt/conteudo/geracao-0>.

MINPE (2021) ‘Situação da Insegurança Alimentar e Nutricional Aguda Nas Províncias de Cunene, Huila e Namibe Luanda, Agosto de 2021’.

- Miranda, M. M. de (2012) ‘Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida’, *Dissertação*, p. 164. Available at: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-22012013-112737/>.
- Muth, C. J. *et al.* (2021) ‘Globally and locally applicable technologies to accelerate electrification’, *Electrification*, pp. 25–55. doi: 10.1016/B978-0-12-822143-3.00005-6.
- Nacional, A. (2010) ‘Diário da República_Biocombustíveis’.
- Nogueira, L. A. H., Capaz, R. S. and Lora, E. S. (2021) ‘Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes’, *Revista Brasileira de Energia*, 27(3). doi: 10.47168/rbe.v27i3.640.
- Nunes, L. J. R., Causer, T. P. and Ciolkosz, D. (2020) ‘Biomass for energy: A review on supply chain management models’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, p. 109658. doi: 10.1016/J.RSER.2019.109658.
- Oladunni, O. J., Mpofu, K. and Olanrewaju, O. A. (2022) ‘Greenhouse gas emissions and its driving forces in the transport sector of South Africa’, *Energy Reports*, 8, pp. 2052–2061. doi: 10.1016/J.EGYR.2022.01.123.
- Olatunde *et al.* (2020) ‘Bioenergy technologies adoption in Africa : A review of past and current status’, 264. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121683.
- Perea-Moreno, M. A., Samerón-Manzano, E. and Perea-Moreno, A. J. (2019) ‘Biomass as renewable energy: Worldwide research trends’, *Sustainability (Switzerland)*, 11(3). doi: 10.3390/su11030863.
- Petroangola (2021) ‘58 - Relatório do Sector Energético Angola 2021.pdf’.
- Pilloni, M. and Hamed, T. A. (2021) ‘Small-Size Biogas Technology Applications for Rural Areas in the Context of Developing Countries’, *IntechOpen*.
- Popp, J. *et al.* (2021) ‘Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand’, *New Biotechnology*, 60, pp. 76–84. doi: 10.1016/J.NBT.2020.10.004.
- REN21 (2020) *Renewables 2020 Global Status Report, Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Available at: <http://www.ren21.net/resources/publications/>.
- Road Transport Agency, C. B. (2021) *Angola: Country Profile Report*.

Rosillo-Calle, F. *et al.* (2007) *The Biomass Assessment Handbook*.

Santos, F. A. *et al.* (2012) 'POTENCIAL DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO DE ETANOL', 35(5), pp. 1004–1010.

Schoneveld, G. C. (2010) *Potential land use competition from first-generation biofuel expansion in developing countries*.

Sharma, S. *et al.* (2020) 'Sustainable environmental management and related biofuel technologies', *Journal of Environmental Management*, 273, p. 111096. doi: 10.1016/J.JENVMAN.2020.111096.

Singh, D. *et al.* (2020) 'A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel', *Fuel*, 262, p. 116553. doi: 10.1016/J.FUEL.2019.116553.

Skidmore, A. (2002) 'Environmental modelling with GIS', p. 488.

Souza, . *et al.* (2016) 'Potential of sugarcane in modern energy development in Southern Africa', *Frontiers in Energy Research*, 4(DEC), pp. 1–11. doi: 10.3389/fenrg.2016.00039.

Souza, G. M. *et al.* (2015) *Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps*.

Statista (2022a) • *Fuel ethanol production in major countries 2021* | Statista. Available at: <https://www.statista.com/statistics/281606/ethanol-production-in-selected-countries/> (Accessed: 30 March 2022).

Statista (2022b) • *OECD: oil demand share by sector 2019* | Statista. Available at: <https://www.statista.com/statistics/307194/top-oil-consuming-sectors-worldwide/> (Accessed: 9 February 2022).

Statista (2022c) *Angola: gasoline output and demand 2016-2020* | Statista. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1267502/gasoline-output-and-demand-in-angola/> (Accessed: 31 January 2023).

Statista (2022d) *Angola: population by province 2022* | Statista. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1201772/population-of-angola-by-province/> (Accessed: 27 September 2022).

SUCRE (2019) 'SUGARCANE STRAW'.

Thomas, N. (2003) 'Energy', *Field Guide to Appropriate Technology*, pp. 157–275. doi:

10.1016/B978-012335185-2/50046-2.

UNDP (2015) 'Rapid Assessment and Gap Analysis - Angola'.

Watanabe, M. D. B. *et al.* (2016) 'Hybrid Input-Output Life Cycle Assessment of First- and Second-Generation Ethanol Production Technologies in Brazil', *Journal of Industrial Ecology*, 20(4), pp. 764–774. doi: 10.1111/jiec.12325.

Watson, Helen K (2011) 'Potential to expand sustainable bioenergy from sugarcane in southern Africa', *Energy Policy*, 39(10), pp. 5746–5750. doi: 10.1016/j.enpol.2010.07.035.

Watson, Helen K. (2011) 'Potential to expand sustainable bioenergy from sugarcane in southern Africa', *Energy Policy*, pp. 5746–5750. doi: 10.1016/j.enpol.2010.07.035.

WBA (2020) 'GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2020 World Bioenergy Association', *World Bioenergy Association*, pp. 3; 23; 49. Available at: https://worldbioenergy.org/uploads/201210_WBA_GBS_2020.pdf.

WHO (2021) *Household air pollution and health*. Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health> (Accessed: 3 December 2021).

World Bank (2021) 'Angola Agriculture Support Policy Review Realigning Agriculture Support Policies and Programs'.