UNIVERSIDADE
EDUARDO
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

CURSO DE MESTRADO EM GESTÃO DO RISCO DE DESASTRES E ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

POTENCIAL DE COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA: ANÁLISE DA BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR FACE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM MOÇAMBIQUE

Almanaque Alfredo Matavel

Maputo - 2026

UNIVERSIDADE
EDUARDO
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

CURSO DE MESTRADO EM GESTÃO DO RISCO DE DESASTRES E ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

POTENCIAL DE COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA: ANÁLISE DA BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR FACE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM MOÇAMBIQUE

Autor: Almanaque Alfredo Matavel

Supervisora: Doutora Doroteia Hipoldina dos Santos Isaías

Co-supervisor: Doutor Gilberto Mahumane

Maputo - 2026

Declaração de Originalidade

Declaro que esta dissertação nunca foi apresentada para a obtenção de qualquer grau ou num outro âmbito e que ela constitui o resultado do meu labor individual. Esta dissertação é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do grau de Mestrado, da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, Maio de 2026

O Autor

_____

(Almanaque Alfredo Matavel)

Agradecimentos

Endereço meus agradecimentos:

A Deus, pela vida que me concede e pela ocasião de concretizar este grande sonho;

À minha falecida mãe, Adace, e ao meu irmão, Auxílio, pelo suporte financeiro e afectivo ao longo de toda a minha trajectória académica e profissional;

Expresso o meu profundo agradecimento aos meus supervisores, Doutora Doroteia Hipoldina dos Santos Isaías e Doutor Gilberto Mahumane, pela paciência e dedicação na correcção dos erros, sugestões oferecidas durante a elaboração desta dissertação, bem como pelo encorajamento e confiança;

A todos os docentes que ministraram o curso de Mestrado em Gestão do Risco de Desastres e Adaptação às Mudanças Climáticas, pela disponibilidade demonstrada e conhecimento transmitido durante a formação;

Aos Engenheiros e Operadores (Joaquim, António, Malemia, José Bate, Sérgio e Davide Elias) das caldeiras e da central elétcrica da *Tongaat Hulett* Açucareira de Moçambique, S.A – Mafambisse, em especial ao Engenheiro Nelson Muchare, pelos dados facultados e pela experiência transmitida para concretização deste trabalho;

Aos meus amigos Azarias Milambo e António Mutacate, pelo apoio moral e financeiro oferecido nos momentos mais difíceis da minha trajectória académica e profissional.

Resumo

A presente pesquisa tem como finalidade analisar a viabilidade de geração de energia eléctrica a partir da utilização do bagaço de cana-de-açúcar, com enfoque no desempenho energético e exergético do processo de cogeração, visando contribuir para o aumento da oferta de energia sustentável e o reaproveitamento de resíduos agroindustriais em Moçambique. Para a sua concretização, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, complementada por uma abordagem qualitativa e por um estudo de caso na Tongaat Hulett - Açucareira de Moçambique, S.A, em Mafambisse, no âmbito de um estágio profissional de 90 dias. Foram realizadas visitas de campo para o levantamento de dados relativos ao processo de cogeração e às características técnicas do processo produtivo. A análise considerou a utilização do bagaço de cana-de-açucar como combustível para a produção combinada de energia térmica, mecânica e eléctrica. A unidade de cogeração da Açucareira de Mafambisse possui uma capacidade de 12 MW e processa cerca de 34.871 toneladas de cana por safra, com duração média de 140 dias. Os resultados indicaram um rendimento energético de 38,2% e um rendimento exergético de 28,9%, evidenciando o desempenho do sistema de cogeração e o potencial energético do bagaço de cana-de-açucar. Apesar desse potencial, a contribuição da biomassa para a matriz enerética nacional permanece reduzida, enquanto a capacidade instalada das centrais térmicas a bagaço é inferior ao potencial estimado para o país. Conclui-se que o aproveitamento do bagaço de cana-de-açucar apresenta potencial para contribuir para a diversificação da matriz energética moçambicana, promovendo simultaneamente o aproveitamento de resíduos agroindustriais e a geração sustentável de energia electrica.

Palavras-chaves: Biomassa; Bagaço de cana-de-açúcar; Cogeração; Rendimento energético; Rendimento exergético; Energia eléctrica.

Abstract

This study aims to assess the feasibility of electrical energy generation through the utilization of sugarcane bagasse, with particular emphasis on the energy and exergy performance of the cogeneration process. The study seeks to contribute to the expansion of sustainable energy generation and the reuse of agro-industrial residues in Mozambique. For this goal, research based on literature review was conducted, complemented by a qualitative research approach and a case study carried out at Tongaat Hulett – Açucareira de Moçambique, S.A., located in Mafambisse, within the framework of a 90-day professional internship. Field visits were undertaken to collect data on the cogeneration system, as well as on the technical characteristics and operational parameters of the production process.

The analysis considered the utilization of sugarcane bagasse as a fuel for the cogeneration of thermal, mechanical, then electrical energy. The cogeneration facility at Mafambisse Sugar Factory has an installed capacity of 12 MW and processes approximately 34,871 tonnes of sugarcane per crop season, with an average operating period of 140 days. The results obtained revealed an energy efficiency of 38.2% and an exergy efficiency of 28.9%, demonstrating the operational performance of the cogeneration system and highlighting the significant energy potential of sugarcane bagasse.

Despite this potential, the contribution of biomass to Mozambique's national energy mix remains relatively limited, while the installed capacity of bagasse-based thermal power generation facilities remains below the country's estimated potential. The research concludes that the energy recovery of sugarcane bagasse represents a viable opportunity for contributing to the diversification of Mozambique's energy mix, while simultaneously promoting the utilization of agro-industrial residues and the sustainable generation of electrical energy.

Keywords: Biomass; Sugarcane Bagasse; Cogeneration; Energy Efficiency; Exergy Efficiency; Electrical Energy.

Lista de abreviaturas

AFOLU:	Agricultura, floresta e uso da terra
ALER:	Associação Lusófona de Energias Renováveis
ARENE:	Autoridade Reguladora de Energia
EDM:	Eletricidade de Moçambique
EPE:	Empresa de Pesquisa Energética
FUNAE	Fundo de Energia
GEE:	Gases Causadores do Efeito Estufa
INE	Instituto Nacional de Estatística
IPCC:	Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (do inglês Intergovernmental Panel on Climate Change)
MC:	Mudanças Climáticas
ODS:	Objectivo de Desenvolvimento Sustentável
PEB:	Política e Estratégia de Biocombustíveis
PCI:	Poder Calorífico Inferior
PCS:	Poder Calorífico Superior
RSU:	Resíduos Sólidos Urbanos
UNEP:	Programa Ambiental das Nações Unidas (do inglês United Nations Environment Programme)
UNFCCC:	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
WMO:	Organização Meteorológica Mundial (do inglês World Meteorological Organization)

Símbolo Descrição

CO_2:	Dióxido de Carbono
CO_2eq:	Dióxido de Carbono equivalente
GW:	Gigawatt
KW:	Quilowatt
MW:	Megawatt
MWh:	Megawatt-hora

NO_2: Dióxido de nitrogénio

TWh: Terawatt-hora

SO_2: Dióxido de enxofre

Índice

Declaração de Originalidade iii
Agradecimentos iv
Resumo v
Abstract vi
Lista de abreviaturas vii
Símbolo Descrição vii
Índice de Figuras ix
Índice de Tabelas ix
Índice de Fórmulas x
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO 1
1. Introdução 1
1.1. Problematização 1
1.2. Justificativa 2
1.3. Objectivos 4
1.3.1. Objectivo Geral 4
1.3.2. Objectivos Especificos 4
CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
2. Revisão Bibliográfica 5
2.1. Mudanças Climáticas 5
2.1.1. Emissões de gases do efeito estufa a nível global 6
2.1.2. Emissões de GEE a nível regional e nacional 7
2.1.3. Legislação e políticas praticadas para aproveitamento dos recursos de biomassa em Moçambique 8
2.2. Energia proveniente da biomassa 9
2.3. Processos do aproveitamento da Biomassa 10
CAPÍTULO III: METODOLOGIA 16
3. Metodologia 16
3.1. Estimativa da quantidade de bagaço de cana-de-açúcar disponível em Moçambique 16

3.2. Quantificação do potencial de geração de electricidade a partir da queima do bagaço de cana residual, tomando como referência as tecnologias de cogeração usadas na Açucareira de Mafambisse 16
3.3. Avaliação da eficiência energética e exergética em sistemas de cogeração 17
3.4. Análise da contribuição actual da biomassa na Matriz Energética nacional 18
3.5. Identificação os impactos ambientais, sociais e económicos associados à produção de electricidade a partir de biomassa de cana-de-açúcar 18
3.6. Localização geográfica 19
CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO 20
4. Resultados e Discussão 20
4.1. Estimativa do potencial da biomassa de cana-de-açúcar disponível em Moçambique 20
4.2. Quantificação do potencial de geração de electricidade a partir da queima do bagaço de cana residual, tomando como referência as tecnologias de cogeração usadas na Açucareira de Mafambisse 21
CAPÍTULO V: CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES 39
5. Conclusões E Recomendações 39
5.1. Conclusões 39
5.2. Recomendações 40
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 41
7. ANEXOS 48
8. APÊNDICES 49

Índice de Figuras

Figura 2.1 : Emissão de GEE por sectores (IPCC, 2022) 6
Figura 2.2 : Tendências globais de emissão de GEE. (Our World Data, 2022) 7
Figura 2.3: Cíclo energético da Biomassa (https://www.isen.com.br/biomassa-e-geracao-de-energia/) 11
Figura 2.4: Esquema do ciclo de Rankine (SOUSA & SANCHEZ 2016) 13
Figura 2.5: Processos termodinâmicos considerados no ciclo Rankine 14
Figura 3.1 : Localização geográfica de Mafambisse 19
Figura 4.1 : Área de produção da açucareira de Mafambisse (Tongaat Hulett, 2024) 21
Figura 4.3 : Mesa de alimentação 23
Figura 4.4 : Evolução da produção de cana, açúcar e bagaço na safra de 1990 à 2020 24
Figura 4.5 : Carvão mineral usado na safra de 2009 à 2024 25

Figura 4.6 : Composição de caldeira (Tongaat Hulett, 2024) 27
Figura 4.7 : Central eléctrica de açucareira de Mafambisse 28
Figura 4.8 : Impactos de ciclone Idai (Tongaat Hulett) 29
Figura 4.9 : Produção de energia eléctrica na açucareira de Mafambisse 30
Figura 4.10 : Factores que influencia no rendimento da usina 31
Figura 4.11 : Matriz energética moçambicana (ARENE, 2024) 33
Figura 4.13 : Emissões provenientes da queima de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar para o período de 1990 à 2024 35
Figura 4.14 : Emissões provenientes da queima do carvão mineral para o período de 2009 à 2024 36
Figura 4.15 : a) Descarga de fluentes, b) Poluição de fontes hídricas 37
Figura 4.16 : a) Derrame de Açúcar, b) Derrame de Melaço 37

Índice de Tabelas

Tabela 1 : Características das caldeiras 25
Tabela 2 : Centrais de geração de energia elétrica 34

Índice de Fórmula

Fórmula 1 : variação da entalpia 14
Fórmula 2 : Rendimento energético 17
Fórmula 3 : Rendimento exegético 18

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1. Introdução

1.1. Problematização

A evolução da civilização e tecnologia está associada à utilização da energia pelo Homem. Este fenómeno pode ser observado desde os tempos remotos, quando o ser humano descobriu o fogo. Foi a partir desse momento que o Homem passou a utilizá-lo para confecionar alimentos e outros propósitos. Esta descoberta deu início à extração e aproveitamento de recursos naturais. Porém, a extracção desses recursos era realizada sem previsão do seu esgotamento e sem preocupação dos impactos que poderiam advir de sua execução (INNOCENTE, 2011).

Desde a primeira Revolução Industrial, o ser humano tem contribuído para um aumento acentuado de emissão de gases nocivos que intensificam o efeito estufa para atmosfera gerando o aquecimento global. Este facto resulta da utilização e consumo irracional dos combustíveis fosseis (petróleo, carvão, e gás natural), desflorestamento e destruição do ecossistema (CORNEJERO, 2006). De acordo com JOCHEM et al, (2005), a queima dos combustíveis fósseis é considerada como uma das maiores causas da poluição e do consequente aquecimento global provocado pelo efeito estufa. Por outro lado, MANUEL (2023) fundamenta que cerca de 80% da energia consumida em 2019, é proveniente da queima dos combustíveis fosseis (gás, carvão mineral e petróleo) que são considerados como principais causadores do aquecimento global.

As pesquisas revelam que as emissões globais de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6), ponderadas pela sua capacidade de aquecimento global, evoluíram em 70% de 1970 à 2004, passando de 28,7 gigas de toneladas equivalentes de dióxido de carbono ($GtCO_2eq$) para 49 $GtCO_2eq$ (IPCC, 2007). De 1990 à 2022 registou-se um aumento de 74% de emissões de gases de efeito estufa (GEE), passando de 1.44 para 2.5 trilhões de toneladas de CO2eq. Igualmente, em África registou-se aumento de 85% (95.55 a 180.05 biliões de toneladas de CO_2eq) e em Moçambique 41% (3.4 a 4.79 biliões de toneladas de CO2eq) (FRIEDLINGSTEIN et al, 2023).

África é um continente com abundância de recursos energéticos, com uma participação de 10% das reservas de petróleo na matriz global. Porém, apesar dessa riqueza, é o único continente que enfrenta extremas dificuldades em aproveitar devidamente os seus recursos para satisfazer a demanda energética. Portanto, esta fragilidade diminui a capacidade de oferecer energia fiável e sustentável, necessária para o desenvolvimento económico de África (AZEVEDO, 2023).

Moçambique tem enfrentado grandes desafios na distribuição da energia, principalmente nas zonas rurais, onde somente 6% da população tem acesso à electricidade (EEG, 2020). O estudo feito pelo Instituto Nacional de Estatística (INE, 2023), sustenta que apenas 36,9% da população tem acesso à rede eléctrica, portanto, a escassez de energia restringe o acesso das comunidades aos serviços sociais básicos (saneamento do meio, comunicação, abastecimento de água, iluminação publica, educação). Há uma relação intrínseca entre o desenvolvimento humano, o acesso e consumo de energia. Assim, países mais desenvolvidos são caracterizados por mais acesso e consumo de energia, enquanto os países em desenvolvimento, caracterizam-se pelo deficiente acesso de energia.

Na perspectiva de avaliar a utilização da biomassa da cana-de-açúcar na cogeração de energia eléctrica, surge a seguinte questão:

•Até que ponto a geração de bioelectricidade, através do bagaço, pode aumentar a oferta de energia sustentável em Moçambique?

1.2. Justificativa

A matriz energética global estabilizou-se, historicamente, em torno de fontes de energia fósseis, sendo a principal emissora de gases do efeito estufa (GEE) e causadora do aquecimento global (LOSEKANN; TAVARES, 2019). Neste contexto, um dos maiores desafios enfrentados pelo Homem é a preservação ambiental e a transição energética de fontes fósseis para fontes renováveis e limpas. Outra inquietação é como satisfazer as necessidades energéticas num padrão climático sustentável, uma vez que a geração, conversão e consumo de energia causam grandes efeitos sobre a natureza (JOCHEM et al, 2005). Porém, o consumo de energia deve ser responsável e racional, de modo que os seus efeitos sobre o meio ambiente não sejam agressivos.

De acordo com FIALHO et al, (2011) todas as indústrias geram resíduos durante o processo de produção. Na mesma linha de pensamento, (DA COSTA, 2016; MARCHIZELI, et al., 2003) afirmam que a maioria desses resíduos contém substâncias tóxicas que carecem de tratamento adequado, como forma de minimizar os seus danos sobre a natureza. Os resíduos industriais precisam de atenção diferenciada no que se refere à recolha, conservação, transporte e aplicação final, por constituírem uma ameaça à saúde pública. O tratamento desses resíduos é uma acção relacionada com a protecção do meio ambiente e desempenha um papel fundamental na diminuição de carga poluidora, podendo ser aproveitado apenas após a inviabilidade da diminuição de impureza na fonte, sendo necessário à adequação dos fluentes para reutilização ou

destinação final (AMARAL, 2019; OLIVEIRA, 1998). Portanto, é necessário pensar no meio ambiente porque é através dele que se realiza a extracção de recursos naturais essenciais para a vida.

No cumprimento das metas definidas no Acordo de Paris (CoP 21), tem-se verificado o esforço que os governantes de todo o mundo têm empreendido para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Contudo, para alcançar essas metas, prioriza-se a exploração de fontes de energias renováveis e limpas (AZEVEDO, 2023).

Neste contexto, o presente trabalho perspectiva contribuir para a promoção de políticas climáticas globais e no cumprimento dos Objectivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em particular:

- **ODS 03:** (Saúde e Bem-Estar) - reduzir o número de mortes e doenças por contaminação de água, ar e solo (saúde ambiental e segurança);
- **ODS 07:** (Energias Renováveis e Acessíveis) - aumentar a participação de energias renováveis na matriz energética global;
- **ODS 12:** (Consumo e Produção Responsáveis) - reduzir a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização;
- **ODS 13:** (Acção Climática) - Mitigar as mudanças climáticas através da captura de carbono e regeneração de habitats marinhos. (GUNO & AGATON, 2022).

Sendo assim, é importante ressaltar que as fontes da energia renovável e limpa ganham maior destaque por promoverem o desenvolvimento sustentável e reduzir emissões de gases poluentes que demasiadamente são lançados na atmosfera (CARVALHO, 2024).

KONDO (2007) e GRAUER KAWANO (2008), salientam que, diante de varias opções existentes de fontes renováveis, a biomassa atrai mais atenção por ser uma fonte de energia renovável com capacidade de reduzir a utilização de fontes fosseis e mitigar as mudanças climáticas.

Moçambique é rico em recursos renováveis e não renováveis, com condições favoráveis para atender as necessidades energéticas nacionais e abastecer alguns países da África austral (IRENA, 2012; Pereira, 2012). Com a descoberta de 20 biliões de toneladas de carvões mineral, e 277 trilhões de pés cúbicos de gás natural, biomassa, energia solar e eólica, relacionada aos abundantes recursos hídricos (18.000 MW), faz com que o país esteja numa posição muito privilegiada na região e no mundo (ARENE, 2024). Contudo, é necessário que esses recursos beneficiem a população e outros sectores da economia.

1.3. Objectivos

1.3.1. Objectivo Geral

- Avaliar o potencial de geração de energia eléctrica a partir da queima de bagaço de cana-de-açúcar, face às mudanças climáticas, a fim de promover o aumento da oferta de energia sustentável e reaproveitamento de resíduos em Moçambique.

1.3.2. Específicos

- ✓ Estimar a quantidade de bagaço de cana-de-açúcar disponível para fins de geração de energia eléctrica em Moçambique;
- ✓ Quantificar o potencial de geração de electricidade a partir da queima do bagaço de cana residual, tomando como referência as tecnologias de cogeração usadas na Açucareira de Mafambisse;
- ✓ Avaliar a eficiência energética e exergética em sistemas de cogeração baseado na biomassa de cana-de-açucar;
- ✓ Analisar a contribuição actual de bagaço na Matriz Energética nacional;
- ✓ Identificar os impactos ambientais, sociais e económicos associados à produção de electricidade a partir de bagaço de cana-de-açúcar.

CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo é dedicado à fundamentação teórica sobre as mudanças climáticas, bem como aos aspectos políticos e legislativos aplicados à bioenergia em Moçambique. São abordados, também, conceitos relacionados com energia, biomassa, análise exergética e descrição de usinas de cogeração energia eléctrica, dando ênfase aos sistemas que utilizam turbinas a vapor.

2.1. Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas (MC) e o aquecimento global que afectam o mundo causam impactos negativos nos ecossistemas, no ser humano e nos seus meios de subsistência. De acordo com o relatório do IPCC (2007), o Homem é o principal causador do aquecimento global, visto que as actuais emissões antropogénicas de GEE atingem os níveis mais elevados da série histórica.

Importa referir que cerca de três quartos das emissões antropogénicas de CO_2 para a atmosfera são provenientes da queima de combustíveis fósseis, sobretudo nos sectores de transporte e da indústria. A quarta parte restante deve-se, maioritariamente, às mudanças no uso do solo, à desflorestação e queimadas. Há elevada probabilidade de estes efeitos serem permanentes se as emissões continuarem em níveis elevados. Por conseguinte, é imperioso adoptar estratégias de mitigação e adaptação complementares às reduções (IPCC, 2007).

O Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi estabelecido conjuntamente pela Organização Meteorologica Mundial (WMO) e pelo Programa ambiental das Nações Unidas (UNEP), com a finalidade de avaliar e compilar informações sócio-económicas, técnicas e científicas fundamentais para a análise dos riscos climáticos antropogénicos (IPCC, 2000). Com base nessas informações, o IPCC criou quatro famílias de cenários de emissões (A1, A2, B1 e B2), com o propósito de analisar os impactos climáticos e ambientais das futuras emissões de GEE, bem como avaliar estratégias de mitigação e adaptação (HUBACK, 2016).

De acordo com IPCC (2014), no cenário mais optimista, prevê-se aumento da temperatura média global de 0.3°C à 1.7°C, diferentemente do pior cenário, que a temperatura da superfície terrestre poderá aumentar variando de 2.6°C à 4.8°C ao longo deste século até 2100. O acordo de Paris aprovado nos termos da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas

(UNFCCC) determinou um quadro global capaz de reduzir as emissões de CO_2 e constatou que o aquecimento global deveria ser limitado a 1.5°C (UNFCC, 2007).

2.1.1. Emissões de gases do efeito estufa a nível global

A nível global, o sistema energético constitui a maior fonte de emissões de CO_2. Em 2019, o sector de energia contribuiu com 34% das emissões globais, correspondendo a cerca de 20 GtCO2eq, seguido com a indústria, com 24% (14 GtCO2eq), pela Agricultura, Florestas e Usos da Terra (AFOLU) com 22% (13 GtCO2eq), pelos transportes com 15% (8,7 GtCO2eq) e pelos restantes sectores, nomeadamente edifícios, responsáveis por 6% (3,3 GtCO2eq), conforme ilustrado na Figura 2.1. O subsector de geração de electricidade e calor, de forma isolada, emitiu cerca de 14 tCO2-eq (IPCC, 2022).

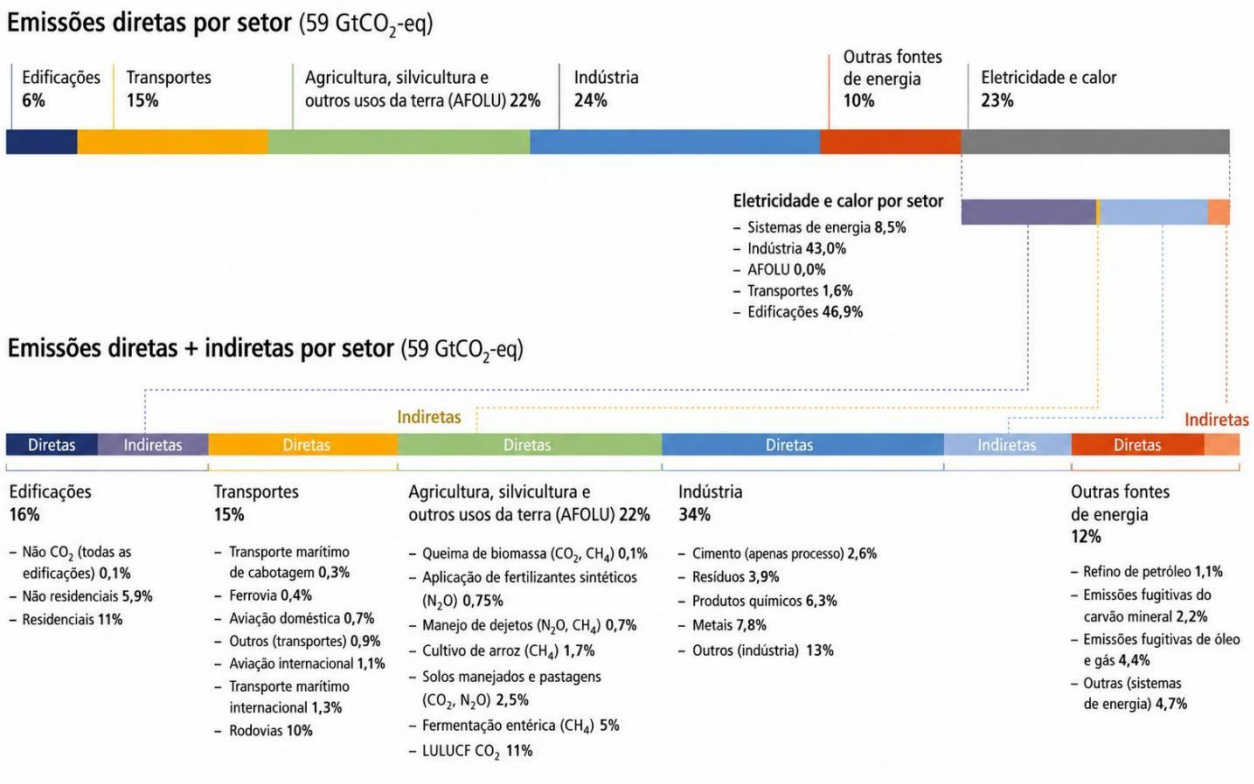


Figura 2.1: Emissão de GEE por sectores (IPCC, 2022)[1]

[1] A Figura 2.1 foi traduzida por Inteligencia Artificial (Chat gpt)

Os outros principais emissores são: agro-pecuária (12%); uso da terra e silvicultura (6,5%); industrias (5,6%); resíduos sólidos urbanos e águas residuais (3,2%). No geral, a emissões de gases do efeito estufa mostram uma tendência de aumento conforme a ilustração da Figura 2.2.

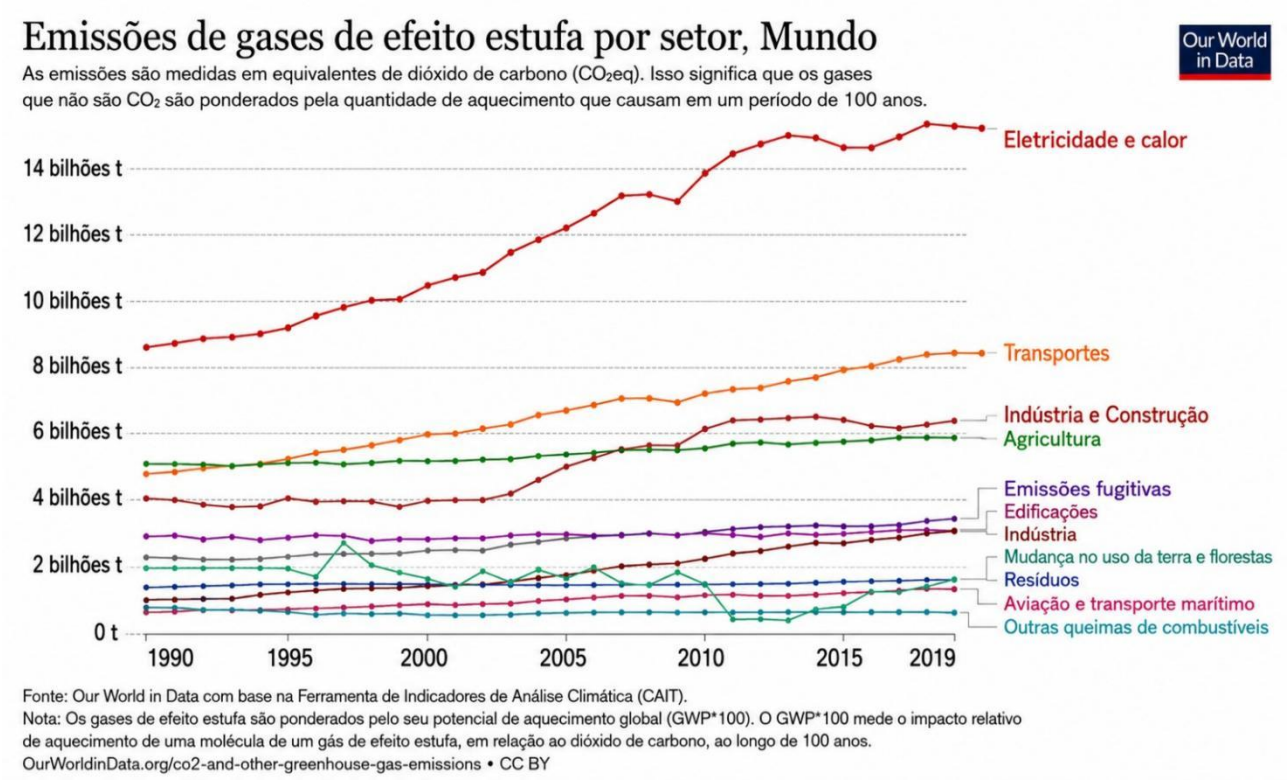


Figura 2.2: Tendências globais de emissão de GEE. (Our World Data, 2022)[2]

2.1.2. Emissões de GEE a nível regional e nacional

O Instituto Mundial de Recursos (WRI), por meio da plataforma, Climate Watch, (2022), afirma que, das emissões totais (1.386,6 Mton CO2eq) da África Subsaariana, a República Democrática do Congo é o maior emissor, contribuindo com 36,4%. Seguida pela África do Sul (33%), Nigéria (22,1%), Etiópia (9,2%), Camarões (9%), Tanzânia (8,6%), Sudão (7,6%), Angola (7%) e por último Moçambique com 6,6%.

No caso específico de Moçambique, as emissões médias anuais variam em torno de 90,5 Milhões de toneladas de CO2eq, correspondendo à 0,23% de emissões médias anuais globais, incluindo o sector AFOLU (40.180,5 Mton CO2eq) que é considerado como o maior emissor de GEE no país.

[2] A Figura 2.2 foi traduzida por Inteligencia Artificial (Chat gpt)

2.1.3. Legislação e políticas praticadas para aproveitamento dos recursos de biomassa em Moçambique

De acordo com (FORTES e RAIMUNDO) 2020, Moçambique é subscritor dos seguintes acordos sobre a gestão de recursos naturais:

- ✓ A Convenção das ONU sobre a Biodiversidade, ratificada pela resolução 2/94, de 24 de agosto;
- ✓ Protocolo de Kyoto de 1997, ratificado pela resolução nº10/2004, de 28 de julho;
- ✓ Agenda 21 aprovada na Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente e Desenvolvimento.

As leis de terra e ambiente em Moçambique, incluindo a gestão de biomassa, baseiam-se na:

- ✓ PEB[3]: resolução nº 22/2009 de 21 de maio (Moçambique, 2009a);
- ✓ Lei de Tterras: lei 19/97 de 1 de Outubro (Moçambique, 1997a);
- ✓ Leis de Florestas e Fauna Bravia: lei 10/99 de 7 de Julho e lei nº 12/2002 de 7 de Julho (Moçambique, 1999, 2002);
- ✓ Lei do Ambiente: lei 20/97, de 1 de Outubro (Moçambique, 1997b);
- ✓ Política da Energia: resolução nº 5/98 de 3 de Março (Moçambique, 1998);
- ✓ Política de Desenvolvimento de Energias novas e Renováveis: resolução nº 62/2009 de 14 de outubro (Moçambique, 2009b); e
- ✓ RBMCF[4], decreto 58/2011, de 11 de novembro (Moçambique, 2011b).

No artigo 24, a Lei estabelece que não é autorizada a exploração e a utilização espécies florestais raras e produtoras de madeira preciosa para fabricação de carvão vegetal ou lenha (FORTES e RAIMUNDO, 2020).

No artigo 15 da Lei de Florestas e Fauna Bravia, nº 12/2002, de 7 de julho, estabelece a exploração dos recursos com finalidades energéticas. O artigo determina, também, que é permitida à população local a extracção ou o consumo de recursos florestais, podendo apenas circular dentro da área que se encontra inserida.

[3] Política e Estratégia de Biocombustíveis

[4] Regulamento de biocombustíveis e suas misturas com os combustíveis fósseis

2.2. Energia proveniente da biomassa

A capacidade de realizar trabalho, seja por máquinas, pelo ser humano ou por fenómenos naturais, é designada por energia. A energia não pode ser observada. Contudo, as suas manifestações são claramente visíveis em todo o Universo. Neste contexto, a utilização do termo ‘*’energia*’’, depende do domínio em estudo. Por exemplo, em mecânica, corresponde à soma da energia potencial e cinética, enquanto em termodinâmica é entendida como somatório das formas microscópicas de um sistema energético (RIBEIRO, 2014).

Desde o princípio da humanidade, a energia é considerada factor essencial para o desenvolvimento tecnológico. A energia utilizada palas civilizações antigas para produzir trabalho era a força muscular humana e dos animais (cavalos, bois, burros, camelos, etc.), complementada pelo uso do fogo e a energia cinética dos cursos de água (INNOCENTE, 2011). Com a evolução da tecnologia, o ser humano passou a explorar de forma mais eficiente as diversas fontes de energias disponíveis na natureza.

Com avanços tecnológicos, a humanidade passou a armazenar e utilizar a energia para satisfazer as suas necessidades, mas com algumas limitações. Pois, nos anos 200 a.C., os cientistas de Alexandria só tinham conhecimento teórico de possíveis transformações de calor em movimento, tracção eléctrica e magnética (CARVALHO, 2014; VASCONCELOS et al. 2007).

No entanto, esses conhecimentos foram aplicados pela primeira vez na Inglaterra no início do século XVIII quando se inventou a primeira máquina (bomba térmica). Na sequência, nos meados do mesmo século foi criada máquina a vapor que utilizava carvão como combustível. Segundo alguns pesquisadores esse foi o primeiro modelo de conversão de combustíveis fósseis em energia. No século seguinte (XIX), foram inventadas máquinas (motores) a turbinas e combustão, posteriormente, gás natural e petróleo, passaram a ser utilizados como combustíveis. Graças a essas descobertas, que a humanidade passou a poupar a sua força física e dos animais na realização do trabalho. A exploração de combustíveis fósseis deu origem ao surgimento de electricidade no final do século XIX. A electricidade imprimiu novos rumos para evolução da sociedade humana.

2.3. Processos do aproveitamento da Biomassa

Segundo Burattini (2008), a biomassa é um recurso energético renovável oriundo da matéria orgânica vegetal ou animal, capaz de ser aproveitada como fonte de energia.

a) A biomassa floresta

A biomassa floresta (lenha e carvão vegetal) é o combustível doméstico mais recorrido pela população moçambicana para supri as suas necessidades energéticas familiares, principalmente nas zonas rurais. Presume-se que, do consumo global de energia disponível em Moçambique, a biomassa lenhosa participa com 80%. O inventário florestal estima cerca de 1,6 mil milhões de toneladas de combustível lenhoso, localizado nas províncias de Niassa e Zambézia (ALER, 2017).

b) Biogás: Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

O biogás é composto por uma mistura de hidrocarbonetos com 40% de CO_2 e 60% de gás metano (CH_4), estando em menores volumes de gás sulfídrico e nitrogénio. Outro tipo de biomassa salvo os de maior teor podem ser utilizadas para fabricação de biogás como: fezes humanos e animais. O poder calorífico do metano na formação do biogás, varia de 500 a 700 kcal/m^3, podendo atingir a 12.000 kcal/m^3 quando eliminado o gás carbónico da mistura (GRUBERT & OLIVEIRA, 2019). Estima-se o potencial de 63MW de RSU em Moçambique (ALER, 2017).

c) Biodiesel

Segundo FORTE e RAIMUNDOO (2020), biodiesel é a combinação de ésteres metílicos de ácidos graxos gerados por alcoólise de gordura animal ou óleos vegetais. Essas características fazem com que o biodiesel seja apropriado para aplicação em motores à *diesel.* Actualmente, as plantas e excremento são considerados ecologicamente e ambientalmente viáveis devido as suas vantagens energéticas. Neste contexto, é necessário analisar cada fonte energética segundo a sua produtividade, em tonelada de óleo por hectare par que se conheça o custo de produção e os impactos ambientais em cada litro (ANGARITA, 2008).

A restauração da biomassa acontece por meio do ciclo de carbono (Figura 2.3). A queima da biomassa ou dos seus derivados para a geração de energia nas indústrias, provoca a emissão de CO_2 na atmosfera. Por sua vez, as plantas, por meio da fotossíntese, absorvem e removem CO_2 da

atmosfera, mantendo-o de novo na matéria orgânica e liberando o O_2 para atmosfera. Assim, o balanço de emissões de CO2 é quase nulo ou zero (TOMAZ, et al, s.d).

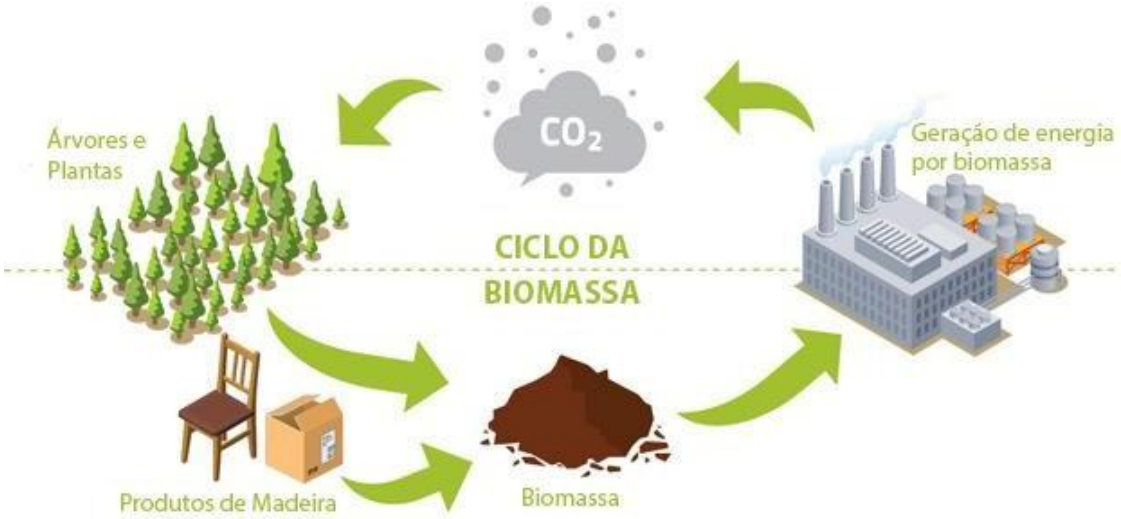


Figura 2.3: Cíclo energético da Biomassa (https://www.isen.com.br/biomassa-e-geracao-de-energia/)

A geração de energia a partir da biomassa tem um ciclo de carbono fechado, diferentemente dos combustíveis fósseis (TOMAZ, et al, s. d). A biomassa residual de cana-de-açúcar, é uma fonte de energia eléctrica que tem ganhado destaque nos últimos dias, por atenuar a dependência da utilização de combustíveis fósseis. Também, ajuda na redução de emissão de CO_2 na atmosfera. Além disso, as suas cinzas são menos nocivos ao meio ambiente e permitem uma incorporação ao sistema de energia de baixo custo, o qual é imune a variações dos preços dos combustíveis fosseis (MERCANTE 2020).

O bagaço é um material que resulta da moagem da cana-de-açúcar durante a extracção do caldo. Nesse contexto, quando utilizado como combustível em caldeiras, o bagaço é capaz de gerar bioelectricidade, contribuindo para a independência energética das indústrias sucroalcooleiras. Trata-se de um material composto por hemicelulose, celulose e lignina. (SILVA et al, 2023).

Cada tonelada de cana-de-açúcar processada gera cerca de 850 litros de caldo, cuja composição varia de 78 %-86 % de água, de 10 %-20 % de sacarose, de 0,1 %-2 % de açúcares redutores, 0,3%-0,5% de cinzas e 0,5%-1,0 % de compostos nitrogenados. De salientar, ainda, que o caldo contém água e sólidos solúveis, diferentemente da fibra, que é insolúvel em H_2O (KESSERLINGH, 2002). A mesma quantidade de cana anteriormente mencionada, após ser processada gera em média 250 kg de bagaço com 45 % a 55 % de humidade, 48 % de fibras e 2 %

de sólidos solúveis de pendendo do tipo de tecnologia utilizada na extracção (CORTEZ, et al. 1992).

Ainda, segundo o autor (ibid.), a planta é constituída por 0,05 %-0,15 % de graxas e ceras, 2 %-4 % de glicose, 3 %-5 % de sais, 2 %-4 % de frutose, 0,5 %-0,6 % de proteínas, 3 %-5 % de corantes e 0,001%-0,05%.

2.4. Cogeração

Oddone (2001) afirma que, a cogeração é um processo responsável pela transformação de uma única fonte de energia em duas ou mais formas de energia benéfica.

Os sistemas tradicionais funcionam com eficiência mais ou menos baixa, inferires que 40% do desempenho, portanto nota-se que cerca de 60% de energia do combustível é dissipada, em forma de calor. A figura 2.4 evidencia que, um sistema tradicional, em que a energia eléctrica abastecida pela estação de energia convenciona, precisa de 153 unidades de combustível para produzir 55 unidades de energia térmica e de 35 unidades de energia elétrica, ao passo que, o sistema de cogeração, precisa somente de 100 unidades do combustível para alcança níveis semelhantes de electricidade e calor (TAVARES, 2019).

Os sistemas de cogeração são classificados por regime *topping* e *bottoming*. No sistema de cogeração no regime *topping,* a energia disponibilizada pelo combustível é aproveitada primeiramente para a geração de energia electromecânica (altas temperaturas), e em seguida para o aproveitamento do calor útil. Quanto ao regime *bottoming,* a energia disponibilizada pelo combustível se dá primeiramente pelo aproveitamento de calor útil a elevadas temperaturas e em seguida para a geração de energia electromecânica (BARJA, 2006).

2.4.1. Ciclo de Rankine

Ciclo de *Rankine*, sugerido por W.J. Rankine e R. Clausius, consiste num protótipo termodinâmico composto por uma bomba de abastecimento de água, caldeira, condensador e turbina (KRUGER, 2018). A representação esquemática da Figura 2.4 mostra a composição do modelo.

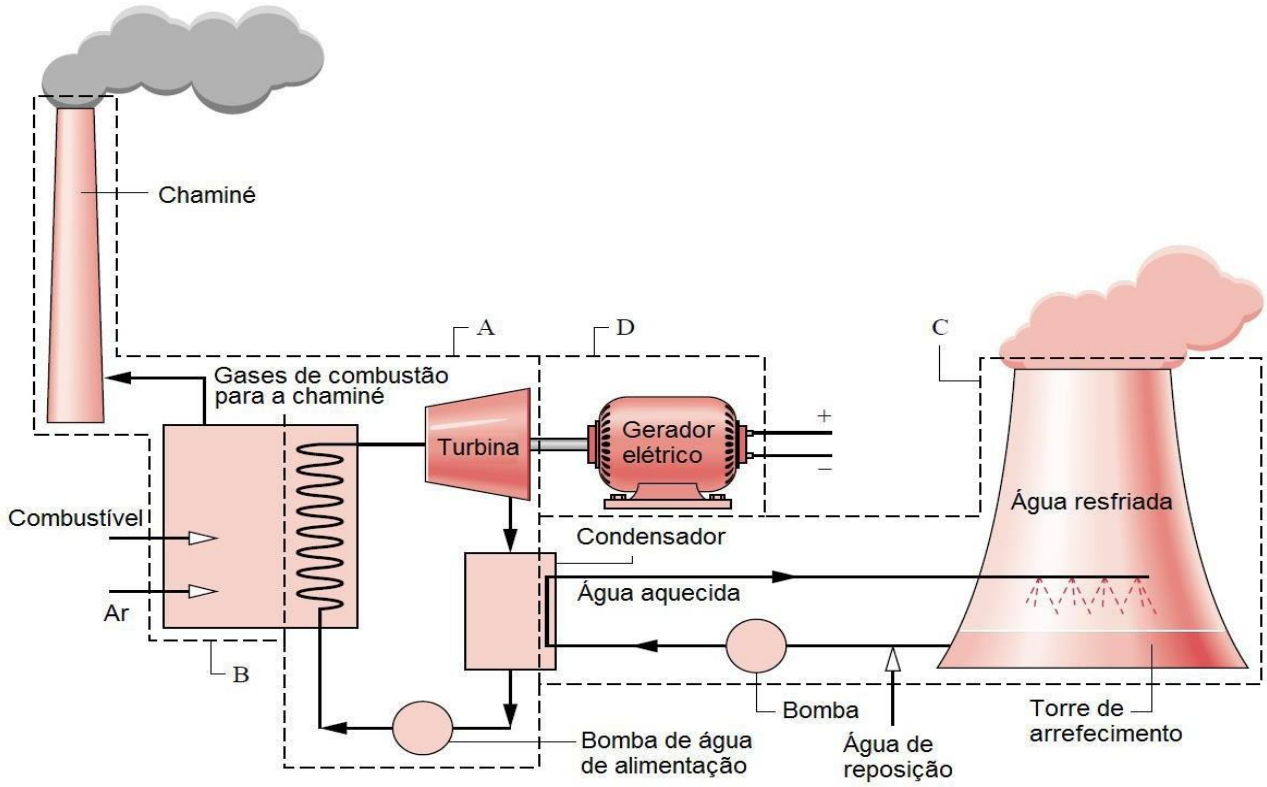


Figura 2.4: Esquema do ciclo de Rankine (SOUSA & SANCHEZ 2016)

O ciclo de *Rankine* consiste em quatro etapas, que alteram as propriedades do fluido do trabalho: bombeamento (compressão), aquecimento (caldeira), expansão (turbina) e condensação (resfriamento), formando um ciclo fechado (TAVARES, 2019).

- ✓ **Etapa 1-2:** Neste processo, o líquido de trabalho é bombeado (na forma adiabática reversível) de baixa pressão para alta pressão através de bomba de água;
- ✓ **Etapa 2-3:** O fluido submetido a alta pressão é aquecido na caldeira até produzir vapor superaquecido;
- ✓ **Etapa 3-4:** O vapor superaquecido produzido na caldeira é expandido através da turbina para realizar trabalho. Este processo ideal de refrigeração faz com que a temperatura e a pressão seja reduzida;
- ✓ **Etapa 4-1:** Posteriormente o vapor é resfriado idealmente no condensador a pressão constante até se tornar liquido saturado que por sua vez é retornado à bomba de alimentação e o ciclo repete novamente.

A figura abaixo (Figura 2.6) detalha os quatro processos termodinâmicos usados numa usina de cogeração (ciclo de *Rankine*).

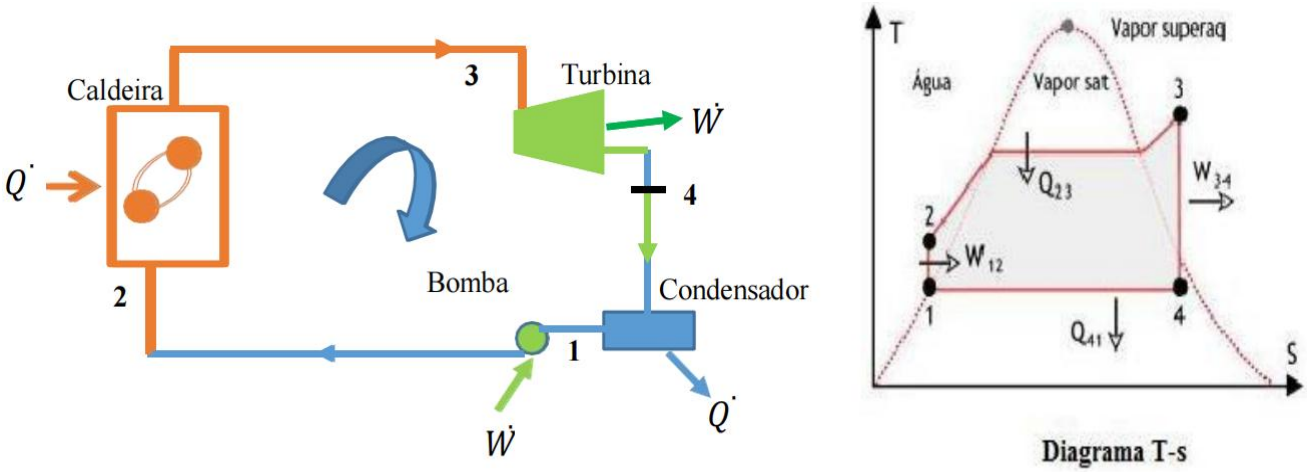


Figura 2.5: Processos termodinâmicos considerados no ciclo Rankine

Nos processos mencionados na Figura 2.5, o fluido bombeado na fase 1 é pressionado para fase 2. Considerando um ciclo ideal em que o processo é adiabático e reversível, desprezando as alterações de energia potencial e cinética produz-se energia (PANOSSO, 2003). De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, o trabalho transferido ao líquido (fluido) é a variação da entalpia entre as fases de alimentação (1) e descarga (2), conforme a Fórmula 1:

$W_b = h_2 - h_1$ *Fórmula 1: variação da entalpia*

Onde:

W_b: Trabalho necessário da bomba (kW);

h_i: Entalpia no ponto "i" (kJ/kg).

2.4.2. Eficiência energética e exergética

A eficiência energética pode ser estimada através da razão entre o rendimento de energia gerada e utilizada. Por outro lado, a eficiência energética significa usar menos energia para fornecer o mesmo serviço.

A eficiência energética é essencial para diminuição do consumo de energia, contribui para atingir um desenvolvimento mais sustentável (IEA, 2014). A mesma estimula os países de todo o mundo a reduzirem o consumo de energia e emissões de CO_2 ou terem uma utilização menos intensiva de energia.

SZARGUT et al. (1988) afirmam que a energia é o trabalho total obtido quando qualquer matéria é tirada do seu estado de referência para um estado de equilíbrio termodinâmico com componentes comuns ao redor.

Por meio de balanço energético, a Primeira Lei considera de maneira equivalente todos os tipos de energia, levando a conclusões incompletas sobre o rendimento do processo. Neste contexto, a energia geralmente é conservada num sistema ideal ou real. Diferentemente, da exergia que é conservada somente em processos ideais e não em processos reais; esse factor deve ser associado ao rendimento termodinâmico de processos. A análise energética tem falhado no reconhecimento de perdas ou utilização de efectivo de combustível e recursos. Por essa razão, o método exergético é o melhor parâmetro que avalia melhorias de sistemas e manejo eficiente dos recursos energéticos (SANTOS, 2007).

Por meio de balanços de entalpia, a 2ª Lei da termodinâmica descreve de forma detalhada o rendimento do sistema, na medida em que mostra as irreversibilidades por meio do cálculo da entalpia produzida no sistema em causa. A análise exergética é aplicação da 2ª Lei na avaliação de usinas. Este método, revela onde e como a exergia é aproveitada ou perdida e dá orientações para melhorias no rendimento e manejo dos recursos (KOTAS, 1995).

A eficiência exergética determina a parcela útil de energia relacionada a um sistema termodinâmico. Mostra ainda a distribuição da energia útil em qualquer estado de um processo de transformação de energia, à medida que a energia matem-se constante. O método revela altas irreversibilidades em sistemas de combustão, estrangulamento e mistura (TSATSARONIS & VALEIRO, 1989). Com este método as causas das irreversibilidades de um sistema termodinâmico são facilmente identificadas e quantificadas.

CAPÍTULO III: METODOLOGIA

3. Metodologia

Esta secção descreve os procedimentos considerados para alcançar os objectivos propostos. Igualmente, apresenta variáveis usadas no trabalho, suas unidades de medidas e a origem dos dados. Para a realização desta pesquisa, fez-se uma revisão da literatura baseada em jornais científicos, livros, relatórios técnicos e outros documentos relevante. Paralelamente, utilizou-se uma abordagem qualitativa, a fim de obter informações concretas e uma melhor compreensão sobre matéria em estudo.

Para sustentar a componente empírica, foram realizadas visitas de campo à *Tongaat Hulett* - Açucareira de Moçambique S.A, Mafambisse, no âmbito de um estágio profissional de 90 dias.

3.1. Estimativa da quantidade de bagaço de cana-de-açúcar disponível em Moçambique

Para a estimação da quantidade de bagaço de cana-de-açúcar disponível em Moçambique, objectivo específico 1 da pesquisa, procedeu-se à consulta de literatura científica, relatórios técnicos, documentos institucionais e dados estatísticos provenientes de entidades ligadas ao sector açucareiro e energético do país. Esta abordagem permitiu identificar as principais fontes de biomassa, quantificar a sua disponibilidade e analisar o seu potencial para a produção de energia.

3.2. Quantificação do potencial de geração de electricidade a partir da queima do bagaço de cana residual, tomando como referência as tecnologias de cogeração usadas na Açucareira de Mafambisse

Para alcançar o segundo objectivo, relacionado com a quantificação do potencial de geração de electricidade a partir da queima do bagaço de cana residual, tomando como referência as tecnologias de cogeração usadas na Açucareira de Mafambisse, fez-se entrevistas, levantamento bibliográfico, observação directa na empresa, que permitiu fazer leitura de fenómenos, e registo de dados técnicos da usina.

As entrevistas permitiram uma maior interacção com os actores envolvidos (técnicos, engenheiros, gestores, operadores e líderes comunitários), contribuindo para a fiabilidade e profundidade da análise do problema.

3.3. Avaliação da eficiência energética e exergética em sistemas de cogeração

Para o cumprimento do objectivo 3, que consiste em avaliar a eficiência energética e exergética em sistemas de cogeração, aplicou-se o método termodinâmico proposto por (DANTAS, 2010). Inicialmente, procedeu-se à análise energética com base na primeira lei da termodinâmica, permitindo quantificar os fluxos de energia no sistema através da fórmula 2. Em seguida, realizou-se a análise exergética, fundamentada na segunda lei da termodinâmica (fórmula 3), com o propósito de comparar os indicadores de desempenho e identificar as irreversibilidades associadas ao processo de conversão. As informações ora obtidas foram cruzadas com o dimensionamento efectuado a partir dos dados operacionais fornecidos pela Açucareira de Mafambisse, com vista a legitimar as hipóteses formuladas na pesquisa.

a) O rendimento energético é determinado pela expressão: $\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_B \times PCI_B}$ *Fórmula2: Rendimento energético*

Onde:

$\dot{m}_B = 15\ t/h$: Vazão mássica de bagaço da cana;

$PCI = 7539\ kJ/kg$: poder calorífico inferior do combustível;

$\dot{W}_U = 12MW$: Potê*ncia eléctrica gerada* (*capacidade instalada*);

Rendimento energético do conjunto:

$$\eta = \frac{12000kj/kg}{15000kg \times \frac{1}{360s} \times 7539kj/kg}$$

$\eta = 0{,}3820$

$\eta = 38{,}2\%$

b) Rendimento exegético

O rendimento exegético é determinado pela expressão: $\chi = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_B \times \chi_B^Q}$ *Fórmula 3: Rendimento exegético*

$\chi_B^Q = 9935kj/kg$: exergia química específica do bagaço da cana (50% de umidade)

$$\eta = \frac{12000kj/kg}{15000kg \times \frac{1}{360s} \times 9935kj/kg}$$

$\eta = 0{,}289$

$\eta = 28{,}9\%$

3.4. Análise da contribuição actual da biomassa na Matriz Energética nacional

No que se refere ao quarto objectivo, recorreu-se à consulta bibliográfica e o levantamento de dados juntos a Electricidade de Moçambique-Delegação da Beira, entidade responsável pelo fornecimento e gestão de energia na região. Com os dados obtidos sobre os tipos de energia predominantes e a participação relativa de cada fonte, permitiu avaliar o peso efectivo da biomassa na matriz energética e inferir o seu potencial contributo.

3.5. Identificação os impactos ambientais, sociais e económicos associados à produção de electricidade a partir de biomassa de cana-de-açúcar

A fim de identificar os impactos económicos, sociais e ambientais associados à produção de electricidade a partir de biomassa de cana-de-açúcar (objectivo 5), utilizaram-se três técnicas principais: revisão bibliográfica, observação directa e entrevistas aos diversos actores envolvidos. A triangulação dos dados possibilitou avaliar com rigor se o processo apresenta impactos mínimos e reversíveis sobre o meio ambiente, se existem limitações tecnológicas que condicionam o desempenho ambiental do sistema de cogeração, ou, ainda, se as emissões e resíduos associados ao processo podem acarretar impactos significativos. A presente abordagem permitiu formular uma análise crítica e fundamentada sobre a sustentabilidade da produção de energia a partir da biomassa no contexto estudado.

3.6. Localização geográfica

Moçambique está situado na costa oriental da África Austral, entre as coordenadas 10º27’ e 26º52’ de latitude Sul e 0º12’ e 40º51’ de longitude Este. É banhado pelo Oceano Índico entre, Africa do sul e Tanzânia. Faz fronteira com Zâmbia, Tanzânia, Eswatini, Zimbabwé (GARCIA et al, 2009). O país ocupa uma área de 799 380 km2. Segundo o Censo de 2017, a população é de 31.794.791 habitantes, onde 15.370.727 (40%) são homens e 16.424064 (51,7%) são mulheres. (INE, 2023).

O Posto Administrativo de Mafambisse, localiza-se na zona centro do país, na província de Sofala, distrito de Dondo, na Estrada Nacional no 6, ao longo do corredor da Beira, com uma superfície de 789 km² (Figura 3.1). O Posto Administrativo de Mafambisse apresenta uma população de cerca de 73.599 habitantes, sendo 36.266 Homens e 37.333 Mulheres. Dista à 50 km da cidade da Beira, capital da província.

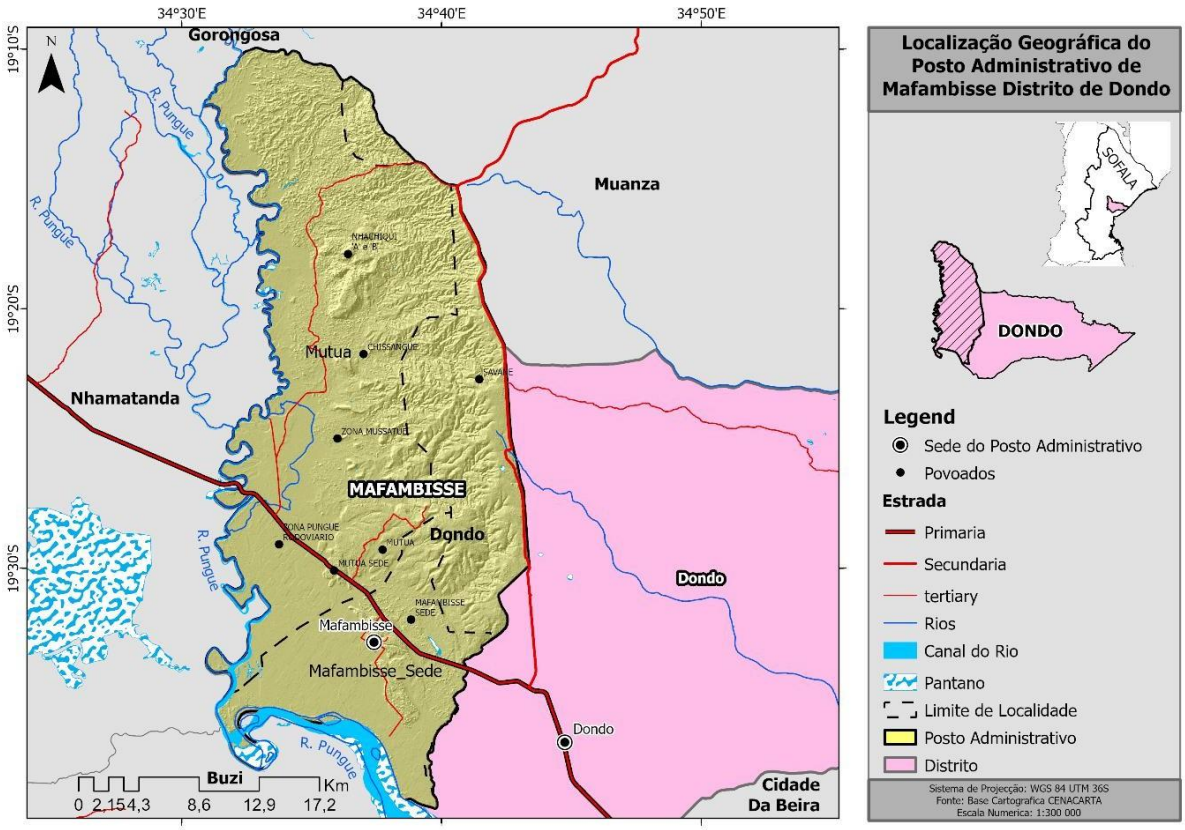


Figura 3.1: Localização geográfica de Mafambisse

CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4. Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir das metodologias adoptadas ao longo da pesquisa. Inicialmente, descreve-se a quantificação do potencial de geração de electricidade a partir da queima do bagaço de cana residual, baseando-se na tecnologia de cogeração usada na Açucareira de Mafambisse. Em seguida, analisam-se os indicadores de desempenho energético e exergético do sistema de cogeração, bem como o contributo da biomassa para a matriz energética local. Por fim, discutem-se os impactos ambientais, sociais e económicos associados à utilização da biomassa de cana-de-açúcar como fonte energética.

A abordagem integrada permite não apenas avaliar o potencial técnico do bagaço para geração de electricidade, mas também compreender as implicações mais amplas da sua adopção no contexto de Moçambique, contribuindo para uma análise crítica e fundamentada sobre a viabilidade da biomassa como recurso energético sustentável.

4.1. Estimativa da quantidade de bagaço de cana-de-açúcar disponível em Moçambique

Segundo o Atlas de Energias Renováveis (2014), Moçambique contém um elevado potencial para a exploração da bioenergia, estimado em mais de 2 GW. O país dispõe de diversos recursos de biomassa e resíduos sólidos urbanos (RSU) que podem ser utilizados para a geração de electricidade. Entre os principais recursos destacam-se a biomassa florestal, com um potencial aproximado de 1 GW; os resíduos da indústria açucareira, cujo potencial se situa em torno de 0,8 GW; os resíduos da indústria da pasta e papel, com um potencial de cerca de 280 MW; e os projectos de incineração de RSU, que podem atingir 63 MW (ALER, 2017). Neste contexto, a utilização do bagaço de cana-de-açúcar apresenta-se como uma alternativa estratégica, particularmente devido à existência de uma indústria açucareira estabelecida no país e ao seu potencial para sistemas de cogeração.

De acordo com a Green Energy (2014); LER (2017) e IEA (2024), foram identificados 128 MW em projectos considerados viáveis a curto prazo, envolvendo: Explorações florestais em Lichinga; Resíduos do palmar e da indústria do arroz em Quelimane; As quatro açucareiras actualmente em operação no país; O novo aterro sanitário de Maputo.

Os autores sustentam que, o potencial de biomassa é particularmente elevado nas regiões Centro e Norte, com destaque para as províncias da Zambézia, Sofala e Niassa, onde se concentra a maior disponibilidade de resíduos agrícolas e florestais, incluindo o bagaço de cana-de-açúcar.

4.2. Quantificação do potencial de geração de electricidade a partir da queima do bagaço de cana residual, tomando como referência as tecnologias de cogeração usadas na Açucareira de Mafambisse

4.2.1. Área de cultivo, produção da cana-de-açúcar e bagaço

A área de cultivo da cana-de-açúcar da açucareira estende-se numa área de 10.607, 6 hectares (ha), onde 7. 916,6 ha estão em Mafambisse; 2.289 ha em Lamego Sul e 402 ha em Lamego Norte. A Figura 4.1 detalha a distribuição de campos de produção da *Tongaat Hulett* na farma Mafambisse.

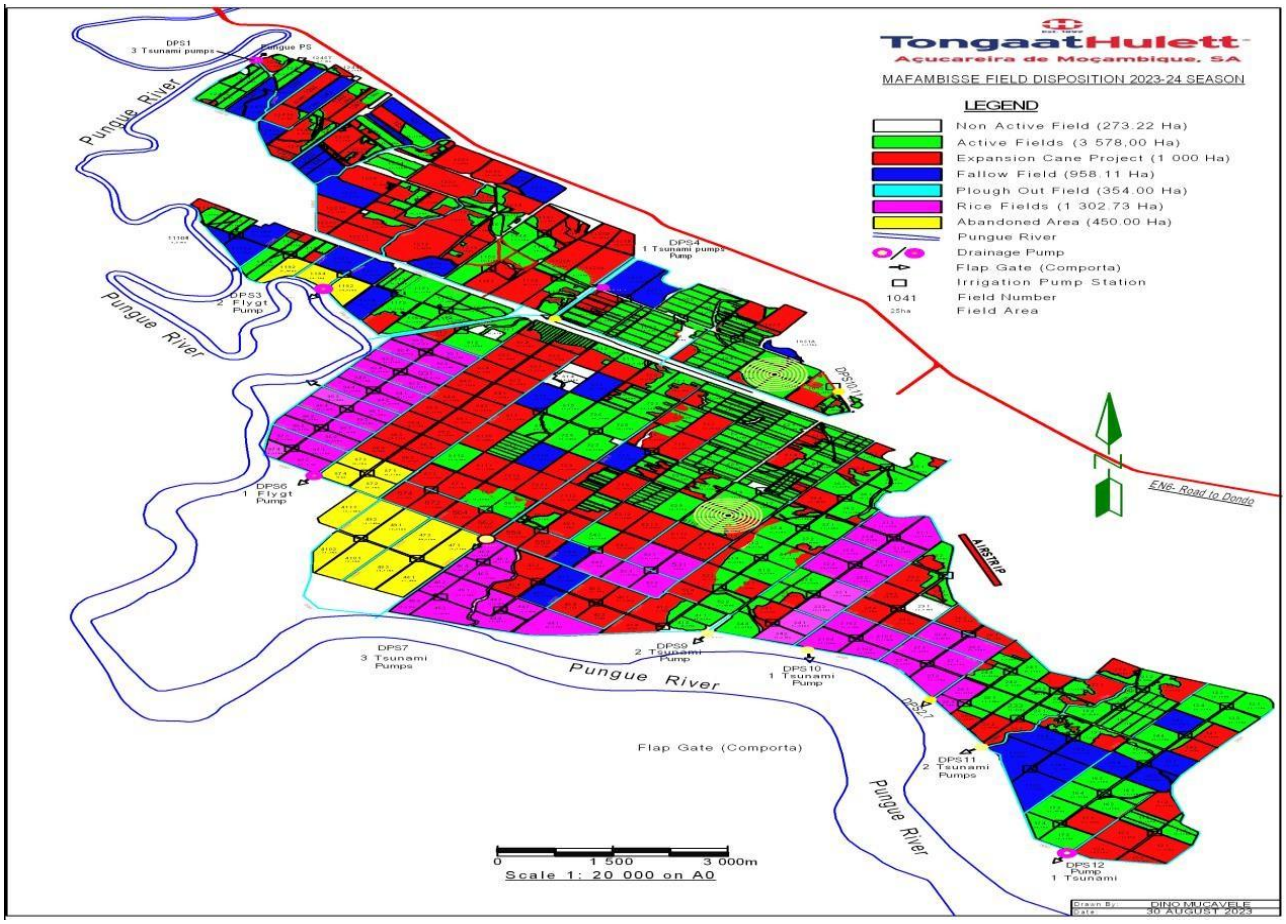


Figura 4.1: Área de produção da açucareira de Mafambisse (Tongaat Hulett, 2024)

A Figura 4.2 apresenta a distribuição das áreas de produção existentes em Mafambisse. Do total de 7.916 hectares disponíveis, verifica-se que:

- ✓ 273,22 ha, correspondem a campos não activos;
- ✓ 3.578 ha, constituem os campos activos;
- ✓ 1.000 ha, estão afectos ao projecto de expansão da cana-de-açúcar;
- ✓ 958,11 ha, referem-se aos campos de repouso;
- ✓ 1.302,11 ha, são destinados ao cultivo de arroz;
- ✓ 450 ha, correspondem à área abandonada.

Esta distribuição evidencia a predominância das áreas activas e de expansão da cana, reforçando o potencial produtivo da região e permitindo uma análise clara da ocupação do solo.

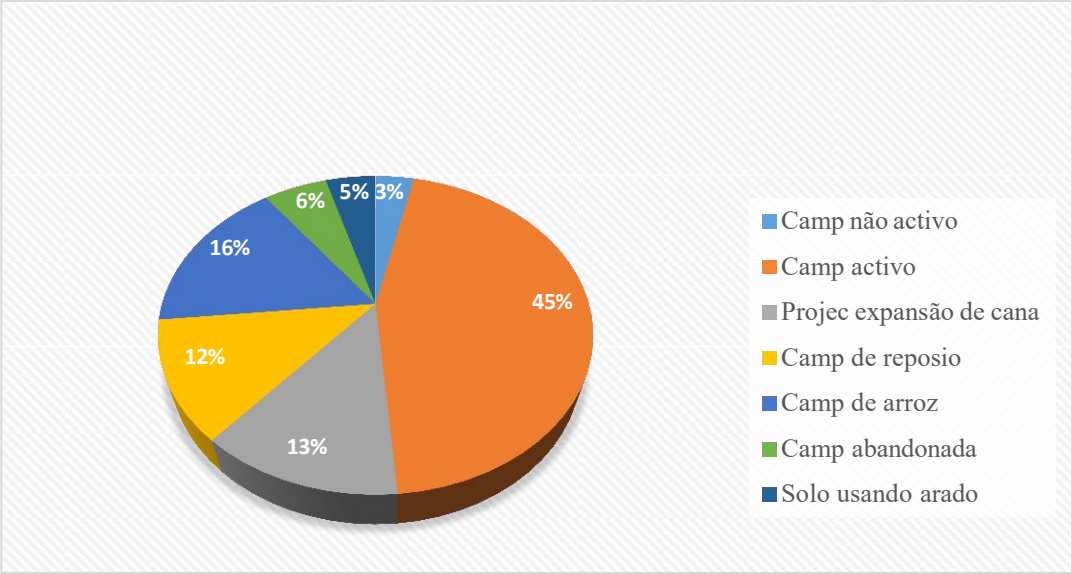


Figura 4.2: Distribuição da área de produção (Tongaat Hulett, 2024)

A colheita da cana é sazonal, acompanhando o ciclo produtivo da cultura. O ciclo de vida da cana é aproximadamente anual (12 meses), podendo, contudo, atingir a maturação em 10 meses, dependendo das condições climáticas, tais como precipitação, radiação solar e temperatura. Durante o processo da colheita, a palha é frequentemente queimada. Esta prática tem como finalidade afugentar ou eliminar animais peçonhentos[5], garantindo maior segurança aos trabalhadores e facilitando a circulação dos cortadores de cana no campo.

[5] Animais venenosos

Toda cana levada do campo pelos camiões é pesada através da balança rodoviária, logo à entrada, de forma a aferir o seu peso bruto e a tara[6]. No mesmo momento retira-se amostras da cana que são enviadas ao laboratório para analisar os índices de brix, teor de fibra e pol, que são determinantes do rendimento global e pagamento da matéria-prima. O descarregamento da cana dos camiões para mesa alimentadora é mecanizado, sendo realizado através de gruas e guindastes, conforme a ilustração da Figura 4.3. Durante o descarregamento, a cana é transportada pela esteira de araste horizontal e oblíqua para facas primária (42 facas) e secundária (80 facas) para ser despedaçada, e por fim é desfibrada no desfibrador (160 martelos) para facilitar a extracção do caldo nos tornos da moenda. Por meio de esteira de borracha a cana desfibrada (apêndice 5) é enviada para extracção do caldo, onde passa pelo electroíman a fim de eliminar todo tipo de metal contido.



Figura 4.3: Mesa de alimentação

A extracção do caldo é feita por 6 moinhos, sendo um eléctrico com a potência de accionamento (motor) de 630 kW, com rotação entre 410 rpm - 1200 rpm, e os restantes 5 movidos por turbinas

[6] Peso do caminhão que é subtraído do peso bruto para se obter o peso líquido

a vapor produzido nas caldeiras. Os moinhos movidos pelo vapor têm potência de acionamento, sendo a das turbinas variável entre 375 kW e 1100 kW e operação de accionamento de 3570 rpm - 9500 rpm (vide apêndice 7). O primeiro moinho foi programado para extrair 72% à 73% do caldo puro e os outros extraem cerca de 24%. A partir do segundo moinho faz-se embebição (0,3 m3 em cada tonelada de cana) para melhor aproveitamento da sacarose. O último moinho exprime o bagaço de modo que a sacarose final seja de 1,7% e o teor de humidade não seja inferior que 50%. O caldo extraído é enviado para o processo onde é produzido açúcar e bagaço é transportado para caldeiras onde é produzido o vapor.

Por safra (média de 140 dias) a usina tem a capacidade de processar 34.871 toneladas de cana, 3.628,6 toneladas de açúcar, gerando cerca 10.461,3 toneladas de bagaço. A moenda horária é de 170 toneladas de cana. A Figura 4.4 faz a descrição da produção de cana-de-açúcar, bagaço e açúcar no intervalo de 1990 à 2020. Observa-se que a produção tende a baixar devido ao impacto das mudanças climáticas que se fazem sentir nos últimos anos (Figura 4.8).

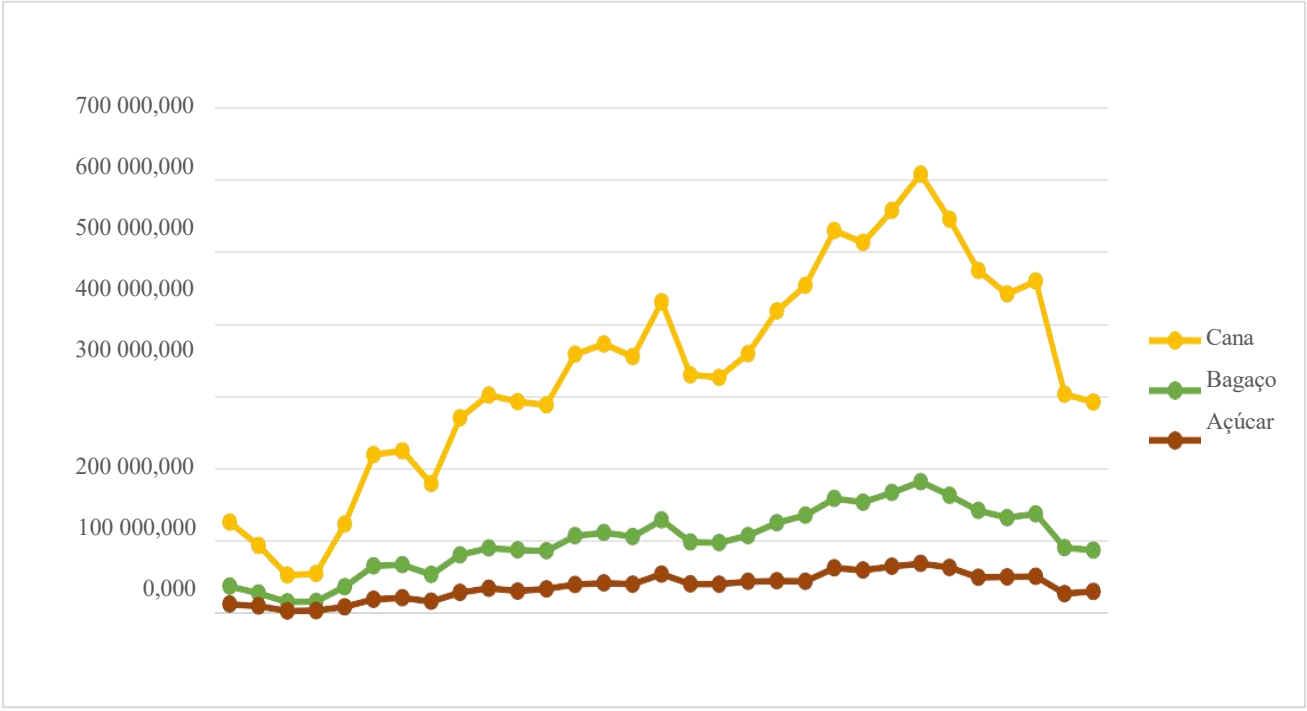


Figura 4.4: Evolução da produção de cana, açúcar e bagaço na safra de 1990 à 2020

Adicionalmente, constata-se que a produção baixou muito no início da década 90 devido à guerra civil, também conhecida como a Guerra dos Dezasseis Anos. O'LAUGHLI e IBRAIMO (2013) fundamentam que, após a independência, a fabricação de açúcar baixou de forma radical nos anos 1980 durante a guerra, principalmente nas zonas sul e centro de Moçambique. Os mesmos autores

sustentam que a guerra e as suas consequências reflectiram outros processos de declínio económico durante as décadas de 1980 e 1990.

A fábrica atingiu o seu pico em 2014, ano em que processou 608.228 toneladas de cana, 69.287 toneladas de açúcar e 194.759,70 toneladas de bagaço. entretanto, por conta do ciclone Idai em 2019, a produção diminuiu drasticamente.

A Figura 4.5 mostra a quantidade de carvão mineral usada na industria nas safras de 2009 à 2024. Constata-se que, em 2009, a usina usou mais o carvão mineral em detrimento do bagaço para gerar energia eléctrica e processar açúcar, devido a défice do bagaço.

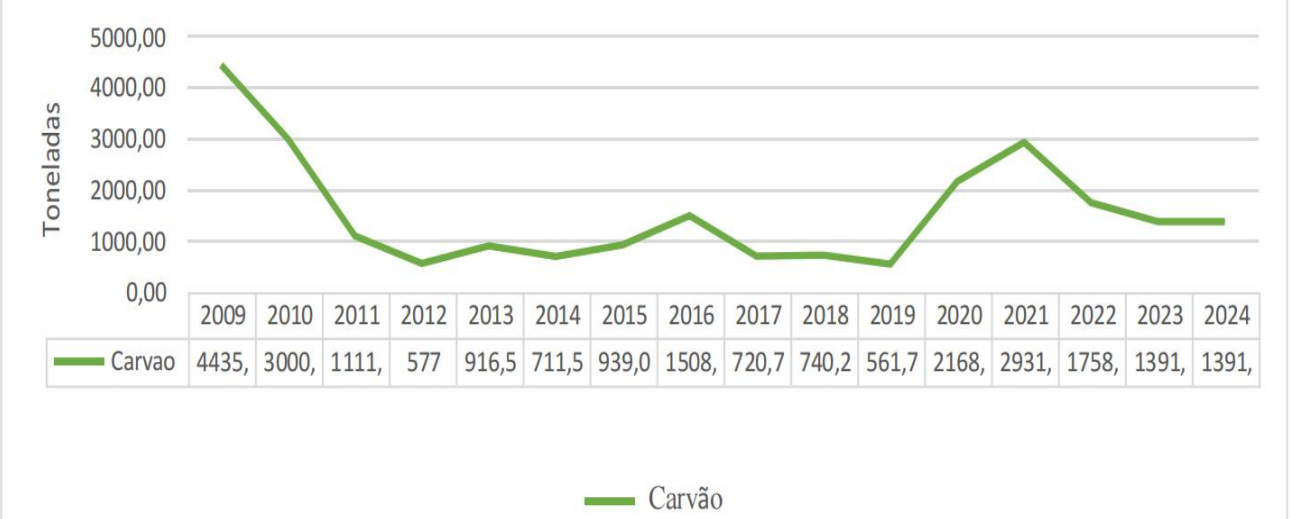


Figura 4.5: Carvão mineral usado na safra de 2009 à 2024

4.2.2. Produção do vapor nas caldeiras

A tabela 1 mostra as capacidades das três caldeiras aquatubulares[7] utilizadas na usina para produção do vapor.

Tabela 1: Características das caldeiras

Volume	36 tonelada/hora
Carga operacional admissível	33 tonelada/hora
Pressão de design	33,2 bar
Pressão de saída	30 bar

[7] Numa caldeira aquatubular, o fluido aquecida circula dentro de tubo, circundado por gases de combustão.

Temperatura do gás da chaminé	158°C
Temperatura da água de alimentação	105 °C
Consumo de bagaço	15 tonelada/hora
Consumo de carvão	2 à 4 tonelada/hora
Relação combustível/vapor	2.2
Temperatura de saída	385°C à 420°C

Logo após a extracção do caldo na moenda, o bagaço é transportado através de esteiras metálicas até à caldeira, onde é utilizado como combustível. Por sua vez, o excedente desse material é encaminhado e armazenado no pátio de bagaço (apêndice 2 e 3), garantindo a continuidade do processo produtivo. Durante a combustão do bagaço na fornalha, o sistema de ventilação desempenha um papel fundamental, isto é: o ventilador de ar induzido é responsável pela remoção dos gases residuais da combustão, conduzindo-os através de tubos apropriados. Esses gases, ainda a elevada temperatura, promovem o aquecimento do ar admitido pelo ventilador de ar forçado, o qual é posteriormente introduzido na fornalha. Esse reaproveitamento térmico contribui para a melhoria da eficiência do processo de combustão, assegurando uma queima mais estável e energeticamente eficiente.

Durante o processo de alimentação da caldeira, a água deve ser primeiramente tratada. Esta água tratada, antes de mais, passa pelo desareador onde é elevada a sua temperatura para 30ºC para 107ºC. Além disso, neste equipamento são removidos gases não condensáveis (CO_2 e O_2) através do processo mecânico e químico para evitar corrosão do equipamento. De seguida, o economizador aproveita o calor residual dos gases (ar induzido) para pré-aquecer a água de alimentação das caldeiras até cerca de 140ºC. Este sistema reduz de forma satisfatória o tempo e consumo de combustível durante a produção do vapor. O vapor gerado é acumulado no ebulidor onde o processo de filtragem do vapor saturado ocorre por via de radiadores primários e secundários (Figura 4.6). Na sequência o mesmo vapor é superaquecido até atingir 385°C à 420°C e pressão que varia de 25 bar à 31 bar. Por fim, o vapor superaquecido produzido nas caldeiras é destinado à 3 turbinas da central eléctrica, 5 turbinas de moinhos e processo[8].

[8] A secção de processo de açucareira de Mafambisse envolve a purificação ou clarificação do caldo, evaporação, cristalização, centrifugação, secagem, peneiramento e controle de qualidade.

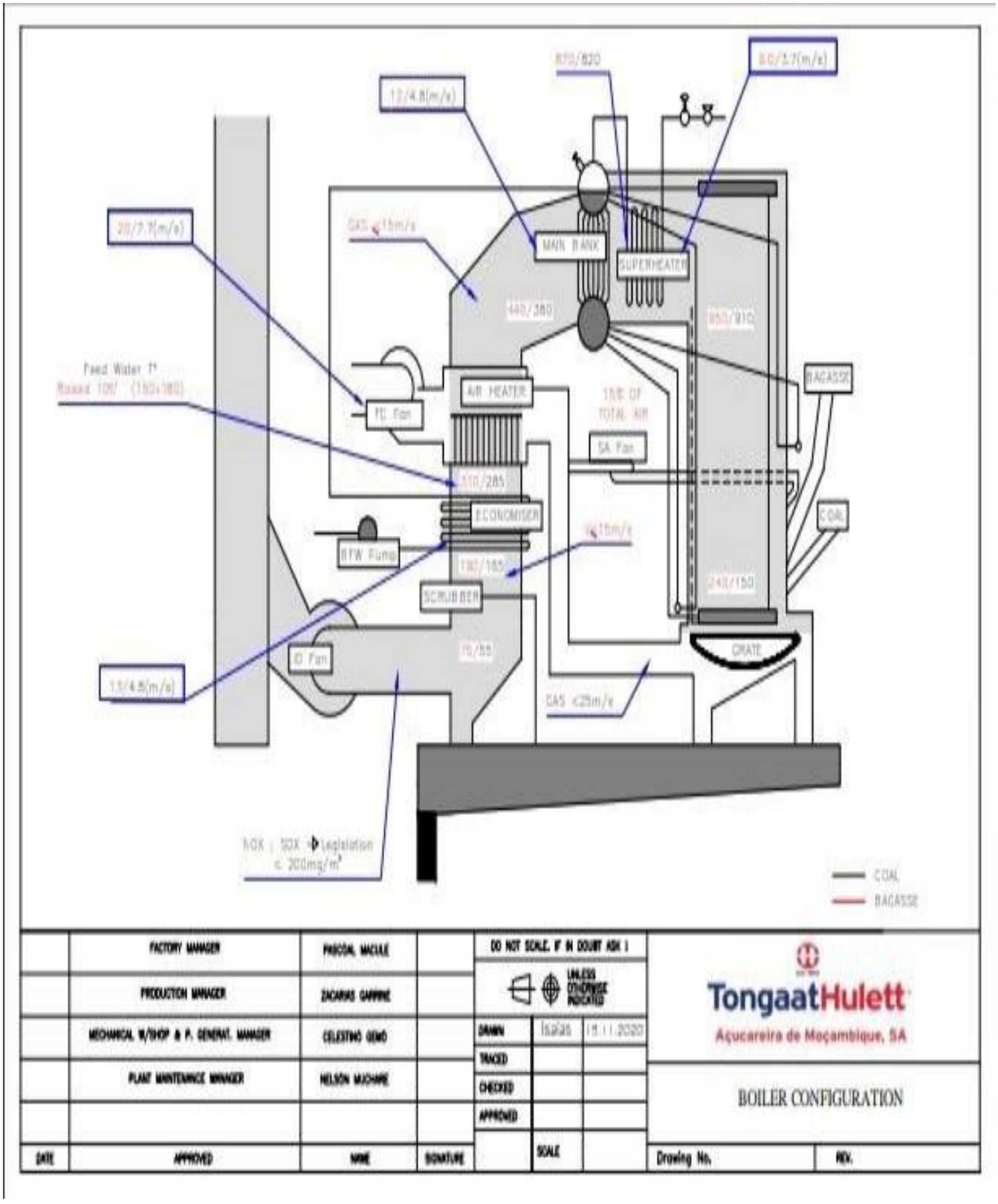


Figura 4.6: Composição de caldeira (Tongaat Hulett, 2024)[9]

[9] A Figura mais nítida, com legenda mais visivel encontra-se no anexo 2

4.2.3. Produção de energia eléctrica a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar

A central termoeléctrica da açucareira é composta por vários sistemas:

- ✓ Três turbinas com rotação de 8000 rpm, sendo duas de condensação 6 e uma de contrapressão 7;
- ✓ Três geradores com capacidade de produzir 12 MW, sendo GIII de 6 MW e GII, GI de 3MW cada. Ambos têm rotação de 1500 rpm;
- ✓ Três redutores de velocidade que reduzem a rotação da turbina (rotação de entrada) de 8000 rpm para ser igual à rotação do gerador (rotação de saída) de 1500 rpm;
- ✓ Três motores de excitação de 90 V e 370 A;
- ✓ Dois condensadores.

A Figura 4.7 ilustra a Central eléctrica, onde o painel de controle eléctrico distribui, gerencia e monitora a energia eléctrica gerada e importada de forma segura e eficiente. Do lado direito são apresentadas as três turbinas.



Figura 4.7: Central eléctrica de açucareira de Mafambisse

No caso da usina da Tongaat Hulett em Mafambisse, a produção de energia eléctrica é tradicional, baseando-se no princípio de Rankine. O vapor gerado nas caldeiras sob pressão constante, através das turbinas é expandido, produzindo trabalho mecânico que acciona geradores eléctricos que são responsáveis pela geração de electricidade. Uma parte do vapor saturado ou de escape restante das turbinas depois de produzir electricidade, aproveita-se sob forma de energia térmica no processo de produção de açúcar e o remanescente é condensado e devolvido na caldeira para ser reutilizado.

A capacidade instalada é de 12 MW, mas actualmente a usina opera com duas turbinas GIII (6MW) e GII (3MW). As duas turbinas têm a capacidade de produzir em média cerca 141 MWh por dia e 15.362 MWh numa safra dependendo da disponibilidade do combustível (bagaço). Uma parte de energia usada na fábrica é fornecida pela Electricidade de Moçambique (EDM). A energia fornecida pela EDM é sincronizada para equilibrar as duas fontes de energia.

No período da safra a energia gerada é usada para alimentar a fábrica, sector administrativo, irrigação dos campos de arroz e cana-de-açúcar (Bloco 9, Lezirias e Púngué) e alguns bairros de Mafambisse.

A Figura 4.8, ilustra os danos (destruição de infraestruturas, interrupção de actividades e perda de culturas agrícolas) causados pelo ciclone Idai em 2019.



Figura 4.8: Impactos de ciclone Idai (Tongaat Hulett)

A Figura 4.9, reflecte a evolução de energia eléctrica gerada, importada, exportada e consumida pela fábrica no período de 2010 à 2024. No entanto, é possível notar que desde 2019, a produção de energia tende a diminuir por conta da frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos e Covid 19. Por exemplo, o ciclone Idai em 2019 destruiu a cobertura do centro de formação profissional, inundou os campos de produção e a área de operação da fábrica (Figura 4.8). Os dados revelam ainda que a maior quantidade de energia usada durante a safra é produzida localmente e a quantidade reduzida é fornecida pela EDM para garantir o funcionamento da fábrica mesmo na escassez do combustível e outras situações críticas.

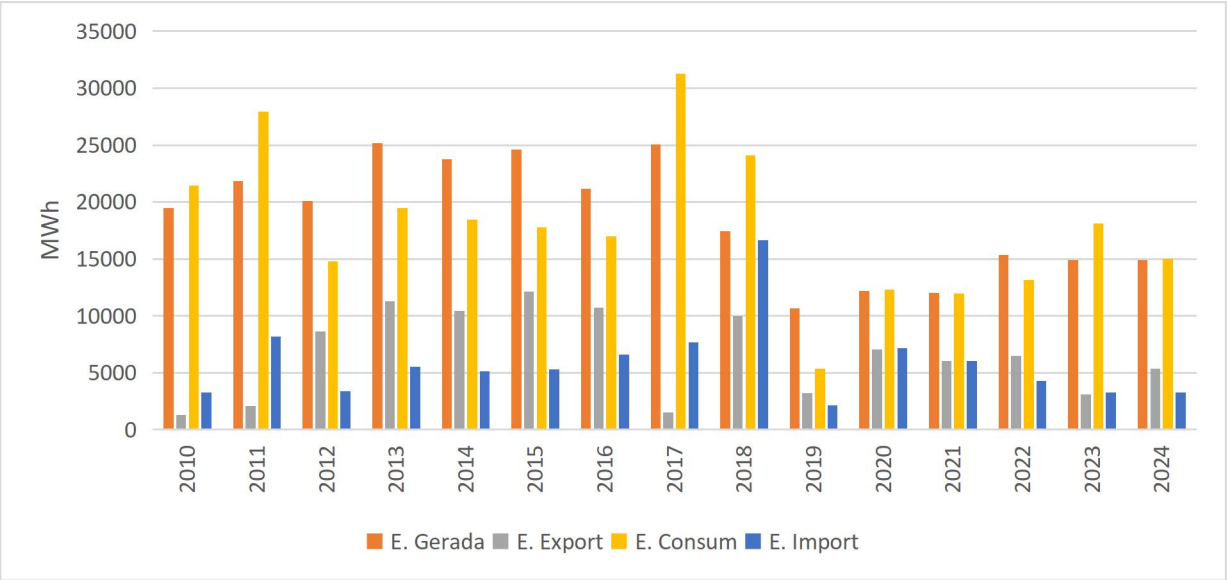


Figura 4.9: Produção de energia eléctrica na açucareira de Mafambisse

Durante o trabalho do campo constatou-se que uma (1) tonelada de cana moída gera entre 250 - 300 kg de bagaço e 104,05 kg de açúcar como subproduto. A queima de 6,5 toneladas de bagaço gera 1 MWh de energia eléctrica.

4.3. Avaliação da eficiência energética e exergética em sistemas de cogeração

4.3.1. Rendimento energético

De acordo com a fórmulas 2, o rendimento energético do conjunto foi de 38,2% e o rendimento exegético foi de 28,9% (fórmulas 3). Apesar de os rendimentos obtidos apresentarem valores baixos, estão dentro do padrão do rendimento térmico duma turbina a vapor. As usinas termoeléctricas têm a capacidade de operar com rendimento em torno de 42% à 44% e em ciclos de operação combinado com ciclo Rankine (turbinas a vapor) e ciclo de Brayton (turbinas a gás) a eficiência varia de 55% à 58%, podendo alcançar eficiência na ordem de 63% (KONDO, 2007).

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o sistema de cogeração apresenta valores didtintos de rendimento energético e exergético. Esta diferença não deve ser interpretada como uma relação de superioridade ou de inferioridade entre os dois rendimentos, uma vez que estes parâmetros se baseam em conceitos termodinâmicos distintos. O rendimento energético, fundamentada na Primeira Lei da Termodinâmica, avalia a relação entre a energia útil obtida e a energia fornecida ao sistema, permitindo quantificar o aproveitamento global da energia. Por sua

vez, o rendimento exergético, baseado na Segunda lei da Termodinâmica, avalia a capacidade do sistema converter a exergia fornecida em exergia útil, tendo em consideração a qualidade da energia e as irreversibilidades associadas aos processos termodinâmicos (DINCER, 2020). Desta feita, a análise energética permite identificar a quantidade de energia aproveitada no processo, enquanto a analise exergética possibilita identificar a degradação da qualidade de energia e as principais perdas associadas às irreversibilidades do sistema. Deste modo, a utilização conjunta das duas analises proporciona uma avaliação mais abrangente do desempenho termodinâmico da usina de cogeração. KONDO (2007) afirma que a alta eficiência da usina, reduz a quantidade de calor desperdiçado para o meio ambiente.

Comparando os resultados desta dissertação com os resultados obtidos por FLAUSINIO (2015), constata-se que não existem diferenças significativas. Neste caso, os rendimentos energéticos e exergético encontrados pelo autor são: $\eta = 37\%$ e $\chi = 27{,}5\%$, respectivamente. O autor sustenta que, o baixo rendimento é justificado pelas características tecnológicas da usina que operam com equipamentos de baixas pressões de vapor e temperaturas.

O baixo rendimento da usina em estudo é influenciado directa ou indirectamente pelos factores mencionados a seguir (Figura 4.10):



Figura 4.10: Factores que influencia no rendimento da usina

- ✓ O desgaste de alguns equipamentos é um dos factores que influencia negativamente na eficiência da usina (perdas de calor e de pressão);
- ✓ Desgaste de isolamento térmico na tubulação que transportam vapor superaquecido. O isolamento térmico tem a função de reduzir a dissipação de calor em dois ambientes de temperaturas diferentes;

- ✓ Vazamentos do vapor ou falhas nos sistemas de alimentação do fluido na caldeira causado pela corrosão;
- ✓ O entupimento de tubos, também pode diminuir a eficiência da caldeira.

Uma usina termoeléctrica, sem isolamento adequado possui grande perda de temperatura na serpentina, por exemplo num percurso de 13 metros sem devido isolamento, perde-se aproximadamente 40ºC. No entanto, a espessura ideal do isolamento pode reduzir cerca de 60% da perda do calor na tubulação (BRETTAS, 2019).

4.4. Contribuição da biomassa de cana-de-açúcar na Matriz Energética

Desde as gerações passadas, a humanidade sempre se esforçou em melhorar o processo de geração e abastecimento de energia num período de tempo possível para usufruto da população por meio da matriz energética. A matriz energética é tida como conjunto de fontes energéticas, utilizadas para suprir as necessidades energéticas de uma sociedade, tais como carvão mineral, gás, natural, energia eólica, solar, hídrica, biomassa, petróleo, entre outras (CAMPELO & ROLIM, 2024).

A matriz energética moçambicana difere-se da matriz mundial por apresentar composição relativamente diversificada e predominantemente limpa. Mais da metade (65%) da energia produzida no país é proveniente das fontes renováveis (Figura. 4.11), com destaque a hidroeléctrica que representa aproximadamente 61% de electricidade gerada no território nacional (ARENE, 2024).

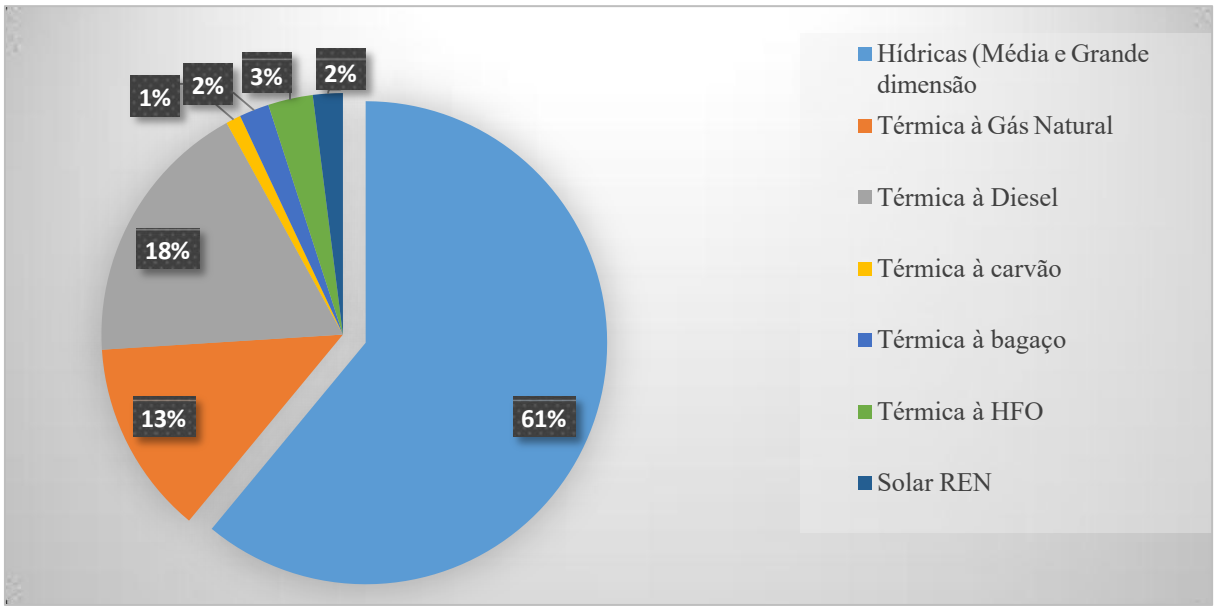


Figura 4.11: Matriz energética moçambicana (ARENE, 2024)

Apesar de avanços em fontes renováveis, a biomassa proveniente do bagaço (2%) e a energia solar (2%) apresentam uma participação ainda reduzida na matriz energética nacional (Figura 4.11). Portanto, torna-se preocupante constatar que a biomassa participa com apenas 2% na matriz energética, quando o país dispõe de um potencial superior a 2GW de projectos de biomassa. Verifica-se que a capacidade instalada das centrais térmicas a bagaço, estimada em 74.85MW, é significativamente inferior ao potencial energético disponível em Moçambique, estimado em cerca de 2 GW. O maior potencial de biomassa concentra-se na província da Zambézia, seguida das províncias de Niassa e Sofala (LER, 2017; GE, 2014; FORTES & RAIMUNDO, 2020; IEA, 2024).

Esta realidade reflecte um desequilíbrio na diversificação da matriz energética nacional. Portanto, para mitigar este problema, torna-se necessária a implementação de políticas de incentivo, a expansão de novas tecnologias renováveis, seleção de matéria prima de alta densidade energética e participação activa de todos sectores envolvidos (CARVALHO, 2024).

A Tabela 2, apresenta a capacidade instalada das centrais eléctricas disponíveis em Moçambique. De acordo com a mesma, é possível notar que a central Hidroeléctrica ligadas a Rede Eléctrica Nacional é a mais destacada. Portanto, segundo KONDO (2007), enfatiza-se a necessidade de se balancear a matriz, com pelo menos 30% de geração térmica para 70% de geração hídrica, sendo as centrais termoeléctricas usada como medida de segurança, para serem usadas quando as hidroelétricas não estiverem em condições de suprir a demanda do mercado.

Conforme evidenciado pela tabela 2, a capacidade instalada de energia no pais é de 3.623,35 MW. Em termos globais, o país em 2024 produziu 10.113.786 MW de energia, sendo 4.919.002 MW no I semestre e 5.194.684 MW no II semestre (ARENE, 2024).

Tabela 2: Centrais de geração de energia elétrica

Tipo de Central	Capacidade Instalada (MW)
Hidroeléctrica ligadas a REN	2.192.3
Hidroeléctrica não ligadas a REN	1,4
Térmica à Gás Natural	453,6
Térmica à Diesel	662
Térmica à carvão	36
Térmica à bagaço	74,85
Térmica a HFO (Heavy Fuel Oil)	120
Solar não ligadas a REN	3.2
Solar ligadas a REN	80
Total	**3.623.35**

De acordo com USSIVANE (2020), concernente energia eléctrica gerada pela hidroeléctrica de Cahora Bassa, cerca de 75,9% é exportada para outros países, conforme detalhado na Figura 4.12. Portanto, este dado mostra que apenas 24,1% da energia gerada é consumida localmente.

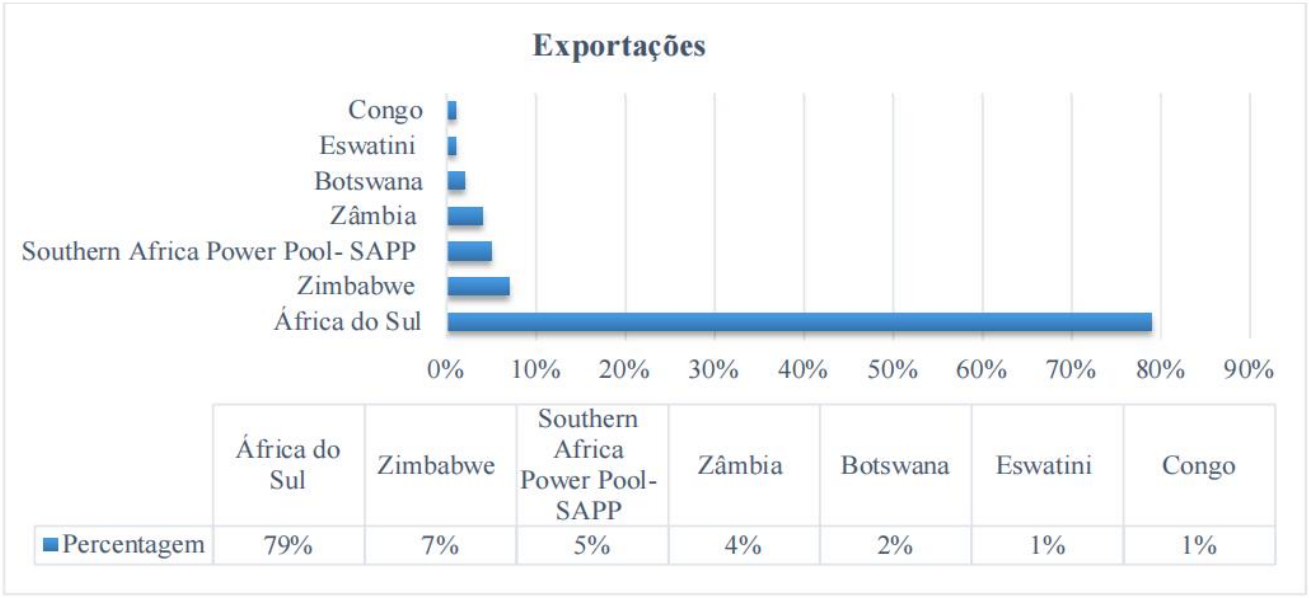


Figura 4.12: Exportação de energia (ARENE, 2024)

4.5. Impactos ambientais e socioeconómicos do uso da biomassa de cana-de-açúcar como fonte de energia

Os impactos ambientais causados pelas emissões de gases na atmosfera são evidentes e podem ser observados em alguns exames laboratoriais, quanto a olho nu, assim como na qualidade de vida da população. As Figuras 4.13 e 4.14 traduzem a correlação existente entre emissões emitidas na atmosfera e a energia produzida, visto que quanto maior for a produção de energia eléctrica, maior será a emissão de gases.

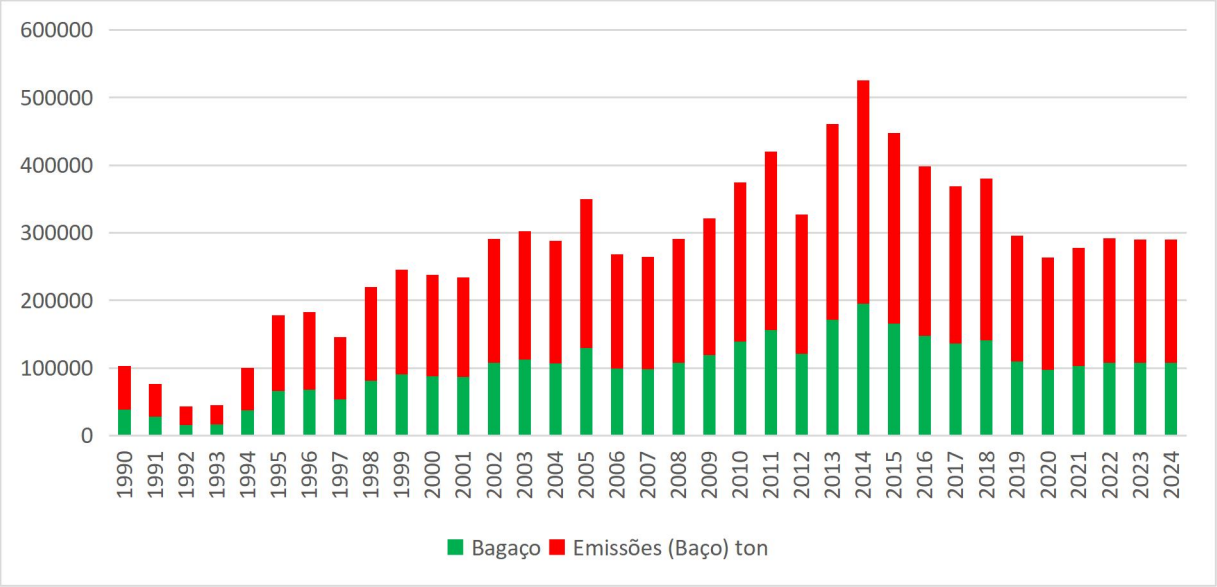
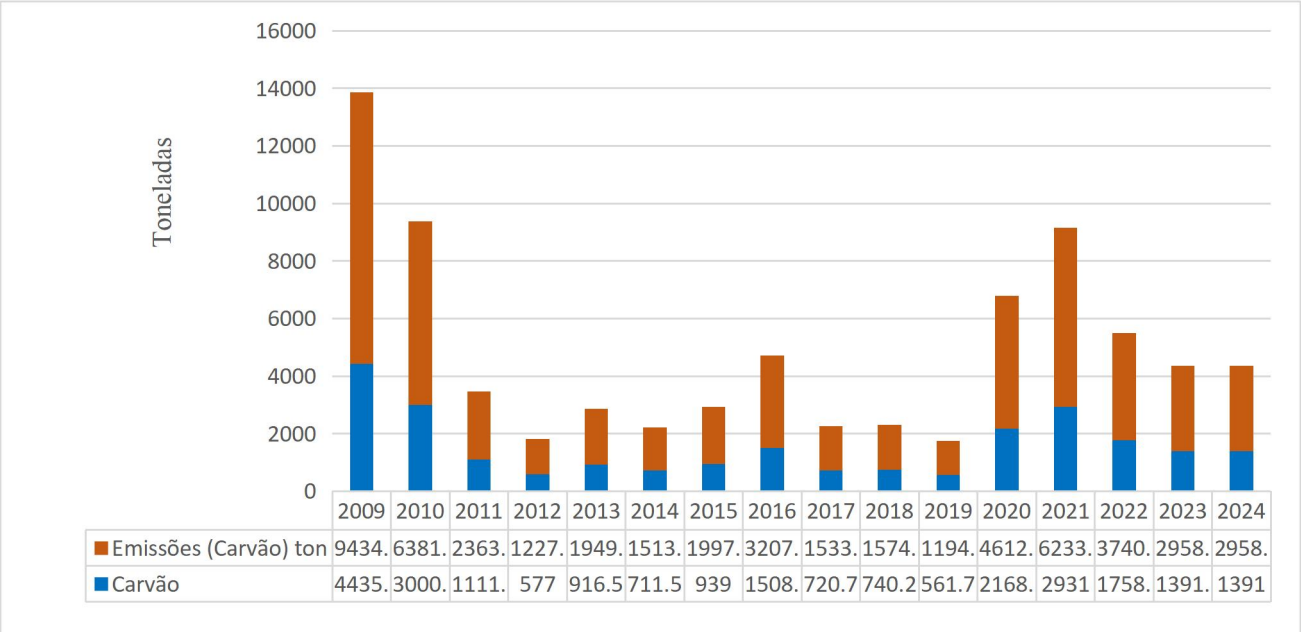


Figura 4.13: Emissões provenientes da queima de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar para o período de 1990 à 2024



	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Emissões (Carvão) ton	9434.	6381.	2363.	1227.	1949.	1513.	1997.	3207.	1533.	1574.	1194.	4612.	6233.	3740.	2958.	2958.
Carvão	4435.	3000.	1111.	577	916.5	711.5	939	1508.	720.7	740.2	561.7	2168.	2931	1758.	1391.	1391

Figura 4.14: Emissões provenientes da queima do carvão mineral para o período de 2009 à 2024

É de salientar que as emissões apresentadas nas Figuras 4.13 e 4.14 resultam apenas da queima de combustível (bagaço de cana-de-açúcar e carvão mineral) na fornalha. Porém, importa sublinhar que não foram consideradas emissões resultantes da queima da palha e do processamento do açúcar.

JÚNIOR (2017) destaca que na queima de biomassa de cana-de-açúcar numa usina de cogeração, o CO_2 libertado é previamente sequestrado da atmosfera durante o crescimento da cana, por meio do processo de fotossíntese. Desse modo, o balanço líquido das emissões é considerado nulo, permitindo à usina obter créditos de carbono.

Neste contexto, a queima de biomassa para geração de electricidade na açucareira de Mafambisse reduziu significativamente as emissões resultantes da queima do carvão mineral no período de 2011 à 2019 (Figura 4.14). Na mesma série histórica observa-se que os picos (2009 e 2021) estão relacionados com a redução da disponibilidade do bagaço.

Entretanto, a queima de carvão mineral emite gases como dióxido de enxofre (SO_2), óxido de nitrogénio (NO_2) e dióxido de carbono (CO_2). O dióxido de carbono (CO_2) libertado na atmosfera contribui para o efeito estufa e o aquecimento global. O dióxido de enxofre (SO_2) e o óxido de nitrogénio (NO_2) causam chuva ácida e poluição do ar (GONÇALVES e MENDONÇA, 2007). Além disso, também libertam partículas finas observadas na fumaça (SO_2) e a humidade que juntos formam as partículas ácidas, grandes causadores dos impactos tanto ambientais (danificação de tintas nas paredes, metais) quanto à saúde do homem (doenças respiratórias, problemas de bronquites crónicas e disfunção no sistema imunológico) (TORREZANI & OLIVEIRA, 2013).

Os responsáveis pelas indústrias não devem se preocupar apenas com emissão de gases na atmosfera, mas também com os resíduos líquidos produzidos nas usinas que directa ou indirectamente interagem e afectam o meio ambiente. Os resíduos líquidos do processo produtivo provenientes da água descartada no laboratório, água de remoção de cinzas, água de lavagem de equipamentos, água dos condensadores são lançados para as valas que tem contacto directo com rio Púngué (Figura 4.15).



Figura 4.15: a) Descarga de fluentes, b) Poluição de fontes hídricas

FIALHO et al (2019) afirmam que, os resíduos líquidos podem percolar e alcançar o lençol freático provocando a contaminação das águas subterrâneas ao atingirem o extremo de absorção do solo e alcançarem as águas superficiais. Portanto, a população ao ingerir a mesma água acaba sendo contaminada pelas partículas químicas consumidas na água. A espuma branca visível na Figura 4.15. b) é evidência de efluentes lançados de forma imprópria ao meio ambiente. Em vista disso, os efluentes lançados ao rio sem o tratamento adequado, contem substâncias tóxicas que comprometem a sobrevivência de diversos animais aquáticos (DA COSTA, 2016).

Segue na Figura 4.16 as imagens que comprovam o derramamento de melaço e açúcar na açucareira de Mafambisse.



Figura 4.16: a) Derrame de Açúcar, b) Derrame de Melaço

Ao colocar os resíduos em contacto com a natureza sem devido tratamento, a empresa pode incorrer em infracção ambiental, com impactos negativos sobre a vida humana, animal e vegetal (FIALHO et al, 2019). A acção da empresa entra em desacato com a Lei ambiental (Lei 20/97 de um de Outubro) no seu artigo 9 (proibição da poluição) que estabelece que: *Não é permitida no território nacional a produção, deposição no solo e subsolo, o lançamento para água ou para atmosfera de quaisquer substâncias tóxicas e poluidoras, assim como a prática de actividades que acelere a degradação do meio ambiente*. Os resíduos líquidos do processo industrial da cana-de-açúcar tratados, a palha, a cinza do bagaço e fuligem[10] eliminada nas caldeiras são adubos orgânicos quando incorporados no solo (BORRERO, 2003). Adubo orgânico é adubo de alta qualidade com a capacidade de melhorar a fertilidade do solo e promove a sustentabilidade agrícola; é também o melhor método de prevenção ambiental (DOS SANTOS et al, 2017).

Comparando o uso de carvão mineral e biomassa proveniente de bagaço de cana-de-açúcar, pode-se constatar que o bagaço oferece diversas vantagens. Trata-se de uma fonte renovável de baixo custo de aquisição, visto que requer investimentos reduzidos e tecnologias simplificadas. Além disso, gera empregos, uma vez que necessita de mão-de-obra intensiva para produção e apresenta versatilidade, podendo ser usada na forma líquida, gasosa ou sólida (AMARAL, 2019). Outra importante vantagem é que o bagaço não emite SO_2 para atmosfera; contribui menos para o efeito estufa, contribui para a redução de emissões tóxicas causadas pela queima de combustíveis fósseis, torna as usinas autossuficientes e as suas cinzas prejudicam menos à natureza. Ainda mais, o bagaço pode ser aproveitado de outras formas a saber: cinza na construção civil para produção do cimento, produção de briques e papel (SILVA et al, 2023).

As imagens da Figuras 4.16, mostram a quantidade de melaço e açúcar que é desperdiçada no processo produtivo. Fora do prejuízo económico, é atentado à saúde dos trabalhadores e contamina o solo. O melaço e açúcar atraem milhares de insectos (moscas, formigas, abelhas, etc.) e estes prejudicam os criadores locais, pois as moscas sugam o sangue dos animais, deixando-os anémicos, consequentemente comprometem a produção dos mesmos. (SCHULTZ, 2009).

[10] Fuligem é uma substância preta, proveniente da decomposição de matérias de combustíveis

CAPÍTULO V: CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5. Conclusões E Recomendações

O presente capítulo faz menção às principais conclusões obtidas ao longo da pesquisa assim como as recomendações decorrentes dos resultados obtidos. As conclusões são reflectidas à luz dos objectivos propostos. Neste caso, a pesquisa avalia o potencial de geração de energia eléctrica a partir da queima de biomassa de cana-de-açúcar, face às mudanças climáticas, a fim de promover o aumento da oferta de energia sustentável e reaproveitamento de resíduos em Moçambique.

5.1. Conclusões

A partir do estudo, foi possível inferir que, embora a geração de bioenergia moderna em Moçambique ainda esteja na fase embrionária, a biomassa de cana-de-açúcar pode contribuir de forma significativa para a redução da dependência de combustíveis fósseis, para o fortalecimento da segurança energética e proporcionar autossuficiência energética às usinas. Neste sentido, esta fonte apresenta-se como uma alternativa promissora e estratégica para integração na matriz energética sustentável e limpa em Moçambique. Devido à sua versatilidade, pode ser utilizada para reduzir a dependência de combustíveis fósseis em sectores como a indústria pesada e os transportes, podendo igualmente fortalecer a segurança energética no país.

No entanto, para atingir níveis satisfatórios de aproveitamento desta fonte, é indispensável o investimento de tecnologias de produção sustentável de bioenergia e pesquisas voltadas à realidade do país. Por outro lado, a adopção destas tecnologias pode impulsionar a inovação e estimular o crescimento económico, desta forma, o país fortaleceria a sua segurança energética.

Verificou-se, nesta pesquisa que, actualmente a usina de cogeração da Açucareira de Mafambisse tem a capacidade de produzir, em média, cerca 141MWh por dia e 15.362 MWh numa safra, dependendo da disponibilidade do combustível (bagaço).

No que concerne ao rendimento exergético, concluiu-se que o rendimento exegético (28,9%) da usina é inferior ao rendimento energético (38,2%). Este baixo rendimento expressa perdas de energia e relações irreversíveis. Apesar das perdas identificadas, a quantidade de energia gerada é razoável, permitindo alimentar toda a fábrica e cerca de 1 000 residências da *Tongaat Hulett*

Açucareira de Moçambique S.A Mafambisse, aliviando a pressão sobre a Rede Eléctrica durante o período da safra.

Quanto à avaliação da matriz energética e da capacidade instalada, constatou-se que Moçambique tem-se dedicado à diversificação, com o aumento gradual das fontes renováveis como a solar, biomassa e eólica. Apesar dos avanços neste domínio, a biomassa proveniente do bagaço apresenta uma participação ainda reduzida (2 %) na matriz energética nacional, quando o país dispõe de um potencial superior a 2 GW.

Relativamente aos impactos ambientais, o sector industrial não se deve preocupar apenas com a emissão de gases na atmosfera, mas também com os resíduos líquidos produzidos nas usinas que directa ou indirectamente interagem e afectam o meio ambiente. No entanto, os efluentes do processo industrial de cana-de-açúcar, devem ser tratados antes de serem depositados no ambiente e, se possível, serem reaproveitados na forma de fertilizantes. Porém, para proteger a natureza e promover políticas que acelerem a transição de energia sustentável é crucial o compromisso colectivo e a determinação de empresas, governos e outras entidades responsáveis.

5.2. Recomendações

Para futuras pesquisas, recomenda-se que:

Seja feita a Análise de Ciclo de Vida, considerando toda a cadeia envolvida na preparação da matéria-prima do processo e para desativação máxima dos resíduos (emissão de gases e resíduos sólidos) que degradam ao meio ambiente.

Seja feita a análise de outras aplicações do bagaço da cana-de-açúcar mais rentáveis, visto que a maior parte das indústrias o utilizam apenas no processo de cogeração de energia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO Clito, MOUTINHO Tiago, GUIMARÃES Carlos, MOUTINHO Trigo, Cogeração: benefícios em que condições? Portugal, 2020.

ANGARITA, Edgar Eduardo Yanez, *Avaliação do impacto energético e ambiental da cogeração no balanço energético e no ciclo de vida do biodiesel de óleo de palma africana*, Itajubá, 2008.

AMARAL Daniela Higgin, *Potencial de uso da biomassa florestal na geração de energia térmica e elétrica pela indústria do estado do Rio de Janeiro*, Minas Gerais – Brasil, 2019.

ARENE, Boletim Estatístico do Mercado Energético, Julho de 2024. Disponível em: https://arene.org.mz/wpcontent/uploads/2024/11/Boletim-Estatistico-Trimestral-do-Subsector- de-Electricidade.pdf. Acesso em: 17 de Junho de 2025.

Associação Lusófona de Energias Renováveis (ALER), *Energias Renováveis em Moçambique – Relatório Nacional do Ponto de Situação*, 2ª Edição, October 2017. Disponível em: https://www.aler-renovaveis.org/contents/lerpublication/aler_2017_oct_relatorio-nacional- ponto-situacao-renovaveis-em-mocambique.pdf. Acesso em: 17 de Setembro de 2025.

AZEVEDO diamantino Pedro, *A nova matriz energética mundial e a perspectiva para a indústria petrolífera*, Angola, 2023.

BARJA, G. J. A. *A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico*. Universidade de Brasília.

Brasília, p. 157. 2006.

BORRERO, M. A. V; J. T. V. PEREIRA; E. E. MIRANDA. *An environmental management method for sugar cane alcohol production in Brazi*l. Biomassa & Energy, 2003.

BRAND, M. A. *Energia da Biomassa Florestal*. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p. ISBN: 978-85-7193-244-9.

BRETTAS Arthur Correa, *Análise da influência da perda de calor na tubulação da caldeira à turbina de um ciclo a vapor simples*, Ouro preto – MG, 2019.

CARVALHO Caroline Gabrielle Silva, *Mudança da matriz energética: perspectivas para o Brasil*, Uberlândia, 21 de Novembro de 2024.

CARVALHO Joaquim Francisco, *Energia e sociedade,* Estudos avançados 28 (82), São Paulo/SP, Brasil. 2014.

CAMPELO Gabriel Pimenta Carneiro, ROLIM Milton Matos, *Matriz Energética e Impactos Ambientais*, Pernambuco, 2023.

CORTEZ Luis, MAGALHÕES Paulo, HAPPI Júlio, *Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização*. Revista Brasileira de Energia, vol. 2, no 2, 1992.

DA COSTA Catrick Amaral, *Gestão de efluentes industriais no processo de obtenção de substrato agrícola: estudo de caso*, Belém-Pa, 2016.

DINCER Irahim e ABú-RAYASH Azzam, *Sustentailidade energética*, 2020.

DOS SANTOS Crislane Ramos, DA ROCHA Eliane Vieira, POMUCHENQ Felipe Junior Mauricio, DE LIMA Karolliny Zanon, ALBANI Rayane, DA ROCHA Renária Ramos, *Tecnologia social: Produção de adubos orgânicos na agricultura*, Viçosa, março de 2017.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Matriz energética e elétrica*. 2020. Disponível em: http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica. Acesso em 23/09/2024.

FARGHALI, M., OSMAN, A. I., CHEN, Z., ABDELHALEEM, A., IHARA, I., MOHAMED, I.M. A, Yap, P. S, & Rooney, D. W. *Consequências sociais, ambientais e econômicas da integração de energias renováveis no setor elétrico: uma revisão*. In Environmental Chemistry Letters, Vol. 21. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10311-023-01587-1. Acesso em 13/07/2024.

FORTES António Gonçalves & RAIMUNDO Baltazar, *Bioenergia em Moçambique: tecnologias de produção, uso e aspetos sustentáveis*, RDSD v.6 n.1, 2020, 60-77pp.

FRIEDLINGSTEIN, P, JONES, M, ANDREW, R, HAUCK, J, LANDSCHÜTZER, P, Le QUÉRÉ, C, LUIJKX, I. T. PETERS, G. P, EVANS, W, FALK, FEELY, R. A, FENG, L, FORD, D. J., GASSER, T., MAYOT, N., MCGUIRE, P. C., MCKINLEY, G. A., MEYER, G, ZHENG,

B. Global CarbonBudget 2023. Disponível em: https://doi.org/10.5194/essd- 2023-409. Acesso em 29/11/2024.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional: síntese 2023*. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico 681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf#page=12.00>. Acesso em: 20 Maio de 2024.

Estratégia de Conservação e Uso Sustentável da Energia Da Biomassa Para o período 2014-2025, Maputo, Setembro de 2013. Disponivel em: https://www.kufunda.net/publicdocs/15486701812015%2010%2008%20ECUSEB%20%20Estrategia%20de%20Conservacao%20e%20Uso%20Sustentavel%20da%20Energia%20de%20Biomassa%202.pdf. Acesso em: 08 de agosto de 2025.

FIALHO Marcelito Lopes. CARNEIRO Ana Paula Custódio, REIS Karina Pregnolato, CAMPOS Orlando Narvaes, FRANCO Márcia Villar, *O impacto da vinhaça produzida pela cana-de-açúcar na produção de etanol – poluição ambiental*, Edição 17, Guarujá Março de 2019

FLAUSINIO Bruna de Fátima Pedrosa Guedes, *Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de minas gerais*, Belo Horizonte, Dezembro, 2015.

Gesto-Energia (GE) Atlas das Energias Renováveis de Moçambique - *Recursos e projectos para produção de electricidade*, 2a Edição, 2014. Disponívelem:https://gestoenergy.com/wp-content/uploads/2018/04/MOZAMBIQUE RENEWABLE- ENERGY-ATLAS.pdf. Acesso em: 20 Março de 2025.

GONÇALVES Teresinha Maria, MENDONÇA Francisco de Assis, *Impactos, riscos e vulnerabilidade socioambientais da produção do carvão em criciúma/sc (Brasil),* Editora UFPR Curitiba, 2007.

GARCIA, Flávio Roberto Mello, BANDEIRA, Romana Rombe, LISE Fernanda, *Influências ambientais na qualidade de vida em Moçambique*, Revista ACOALF: Acolhendo a alfabetização nos países de língua portuguesa, São Paulo, 2009.

GRUBERT Suzana Silva & OLIVEIRA, Vanessa Ávalo, *Evolução das energias renováveis e perspectivas para o futuro utilizando a biomassa,* v. 6, n. 8, Jul.-Dez./2019, Mato Grosso do Sul.

Guno, C. S., & Agaton, C. B. (2022). *Socio-Economic and Environmental Analyses of Solar Irrigation Systems for Sustainable Agricultural Production*. Sustainability (Switzerland), 14(11). https://doi.org/10.3390/su14116834

HUBACK Vanessa Barroso da Silva, CASTRO Nivalde José, DANTAS Guilherme de Azevedo, SILVA Patrícia Pereira, ROSENTAL Rubens, MAGALHÃES Maria Alice. *Mudanças climáticas e os impactos sobre o setor de energia elétrica: Uma revisão da bibliografia*, Gramado – RS, 26 a 28 de setembro de 2016.

INNOCENTE Andréia Franco, *Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar - estudo de caso*, Botucatu – SP, Março – 2011.

International Energy Agencya (IEA), *Africa Energy Outlook*, World Energy Outlook Special Report 2022

International Energy Agency (IEA), *Análise da Política Energética,* Moçambique 2024.

IPCC, 2013 - Working Group I - *Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers*. October 2013, Switzerland.

IPCC, 2007 - Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, R.K. Pachauri and A. Reisinger (eds), Geneva: IPCC. Disponivel em: https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/029.htm#storya1.

IPCC, 2000 – Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report on Emissions Scenarios Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 570.

IPCC (2014b). Summary for policymakers. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova,

B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral

Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate ChangeI (pp. 1-32). Cambridge & New York: Cambridge University. https://www.ipcc.ch /report /ar5/wg2/.

IPCC, Contribuição do Grupo de Trabalho III ao Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Terry Barker, Igor Bashmakov, Lenny Bernstein, Jean Bogner, Peter Bosch, Rutu Dave, Ogunlade Davidson, Brian Fisher, Michael Grubb, Sujata Gupta, Kirsten Halsnaes, Bertjan Heij, Suzana Kahn Ribeiro, Shigeki Kobayashi, Mark Levine, Daniel Martino, Omar Masera Cerutti, Bert Metz, Leo Meyer, Gert-Jan Nabuurs, Adil Najam, Nebojsa Nakicenovic, Hans Holger Rogner, Joyashree Roy, Jayant Sathaye, Robert Schock, Priyaradshi Shukla, Ralph Sims, Pete Smith, Rob Swart, Dennis Tirpak, Diana Urge-Vorsatz, Zhou Dad, 2007.

JOCHEM Eberhard, UMBACH Frank, MAIHOLDJ Örg Husar E Günther, OLIVEIRA Adilson, CONT Fernando Navajas E Walter, Energia: da crise aos conflitos? Cadernos Adenauer, ANO VI, Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 2005.

JUNIOR Carlos Ferreira, Silva Samela, Antunes, CRIBB Sandra Lúcia e FERREIRA Wellington Alves, *Fontes de energias renováveis: Geração de energia eléctrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar*, Unisuam, 2017. http//www.revistaea.org/artigo.php?jdartigo=2720.

KESSERLINGH Sônia Maria, *Minimização e reuso de águas em indústrias sucroalcooleiras*, São Paulo. 2002.

KRUGER Taline Suellen, Ciclo Rankine, 2018. Disponivel em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/62195/1/Ciclo%20Rankine.pdf. Acesso em: 17 de Novembro de 2025.

MANUEL Josimar José Cafina, *Emissões de co2, consumo de combustíveis fósseis e crescimento económico: Uma abordagem ARDL para os países do G20 (1990-2019)*, Coimbra, Junho de 2023.

MERCANTE André Luiz Petrini, *Geração de bioeletricidade, através do bagaço e da palha da cana-de-açúcar*, Araras, 2020.

KONDO Natália Natsumi, *Determinação de índices de desempenho de usinas termelétricas*, São Paulo 2007.

O'LAUGHLIN Bridget e IBRAIMO Yasfir, *A Expansão da Produção de Açúcar e o Bem-Estar dos Trabalhadores Agrícolas e Comunidades Rurais em Xinavane e Magude*, Maputo, 2013.

RIBEIRO Daniel, *Energia, Revista de ciência elementar, rce.casadasciencias*, Porto, 2014.

SCHULTZ, Nivaldo. *Efeito Residual da Adubação em Cana Planta e Adubação Nitrogenada em Cana de Primeira Soca com Aplicação de Vinhaça*. Seropédica, RJ, fevereiro de 2009. Disponível em: http://www.ia.ufrrj.br/cpacs/arquivos/teses_dissert/123_(Me_-_2009)_Nivaldo_Schultz.pdf. Acesso em: 13 de Gosto de 2025.

SANTOS Moisés Teles, *Anélise exergética dos sistemas termicos em um processo de produção de celulose e papel*, São Paulo, 2007.

SILVA Rendryckson Barbosa, MANTESE Marco Antônio, FLORIAN Fabiana, *O bagaço da cana-de-açucar na geração de energia*, Brazil, 1/2023. Disponível em: https://doi.org/10.47820/recima21.v4i1.4526. Acesso em: 13 de Maio de 2025.

SOUSA Paulo Roberto Gomes, SANCHEZ Caio Glauco, *Análise energética e exergértica de um ciclo térmico com aplicação de ciclo Rankine regenerativo*, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

TANURE Tarik Marques do Prado, CARVALHO Micaele Martins e MAGALHÃES Aline Souza. *Os impactos das mudanças climáticas sobre a geração de energia hidrelétrica e seus efeitos para a economia brasileira entre 2020 e 2050*. Brasil 2018.

TAVARES, Milena da Silva, *Análise energética de um sistema de cogeração aplicado à um laticínio de médio porte*, Ouro Preto – MG, 2019.

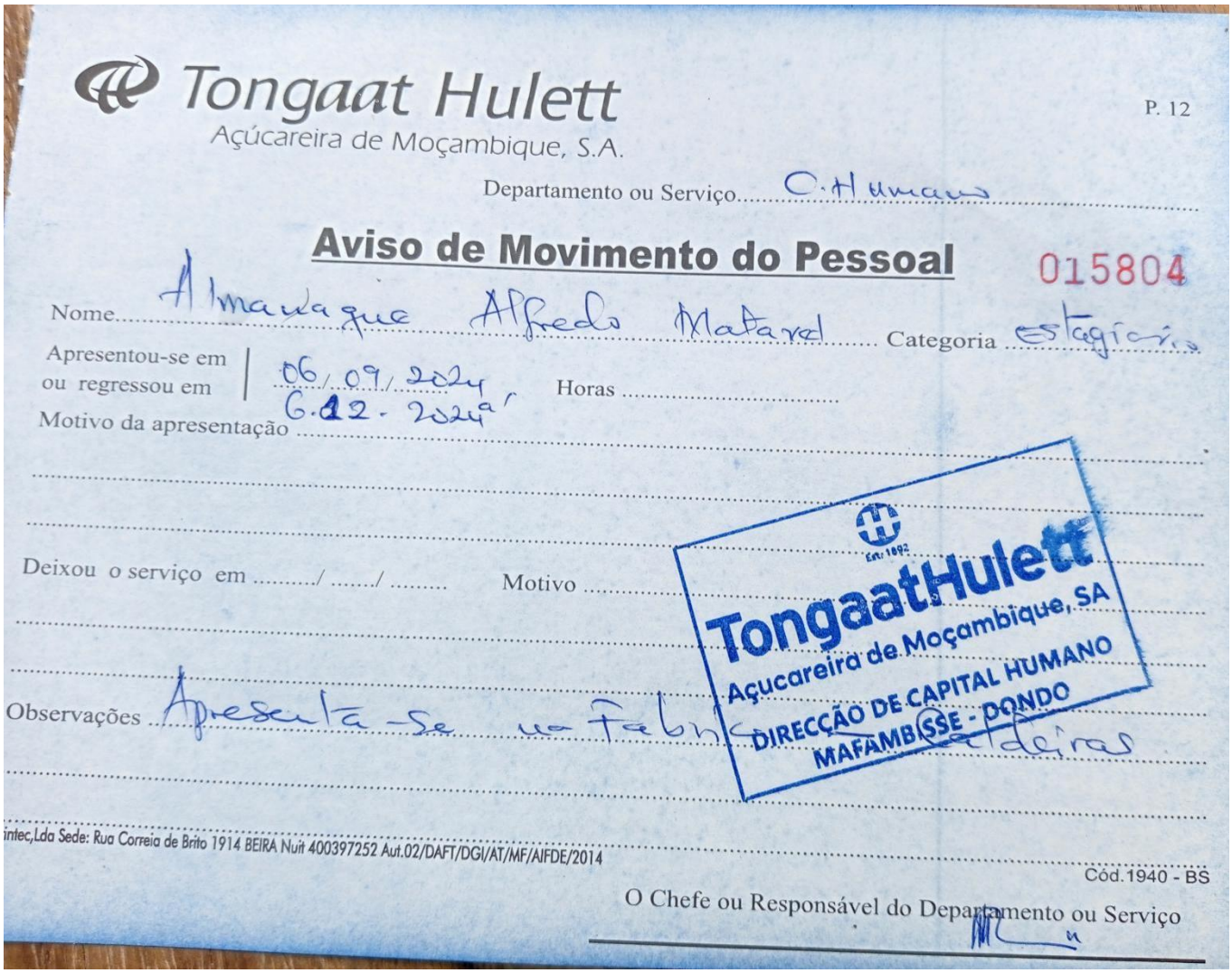
TOMAZ Washington Luiz, GORDONO Fernanda Serotini, SILVA Franciane Piaui, CASTRO Marcos Daniel Gomes, ESPERIDIÃO Márcia, *Cogeração de energia a partir do bagaço da cana-deaçúcar: estudo de caso múltiplo no setor sucroalcoleiro*, Paraná (s.d.).

TORREZANI Nelissa Camargo e OLIVEIRA Edson Fontes, *Problemas ambientais decorrentes da exploração do carvão mineral e a aplicação da ecotoxicologia aquática como ferramenta de biomonitoramento*. Oecologia Australis, Dezembro 2013.

USSIVANE Sozinho Domingos, *Planeamento das usinas termoeléctricas em Moçambique*, Acarape-CE, 2020.

VASCONCELOS, G. C. de et al. *Energia lignocelulosica da biomassa: uma perspectiva sustentável*. Resumos do II Congresso Brasileiro de Agroecologia. Revista Brasileira Agroecologia, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 1017-1020, 2007.

7. ANEXOS



Tongaat Hulett
Açúcareira de Moçambique, S.A.

P. 12

Departamento ou Serviço C. Humanos

Aviso de Movimento do Pessoal 015804

Nome Almanaque Alfredo Mafaral Categoria estagiário

Apresentou-se em ou regressou em 06/09/2024 Horas

Motivo da apresentação 6-12-2024

Deixou o serviço em ...../...../..... Motivo

Observações Apresenta-se na fábrica

Tongaat Hulett Açucareira de Moçambique, SA DIRECÇÃO DE CAPITAL HUMANO MAFAMBISSE - DONDO

intec,Lda Sede: Rua Correia de Brito 1914 BEIRA Nuit 400397252 Aut.02/DAFT/DGI/AT/MF/AIFDE/2014

Cód.1940 - BS

O Chefe ou Responsável do Departamento ou Serviço

8. APÊNDICES



1: Açucareira de Mafambisse



2: Páteo de bagaço



3: Transportador de Bagaço



4: Fornalha



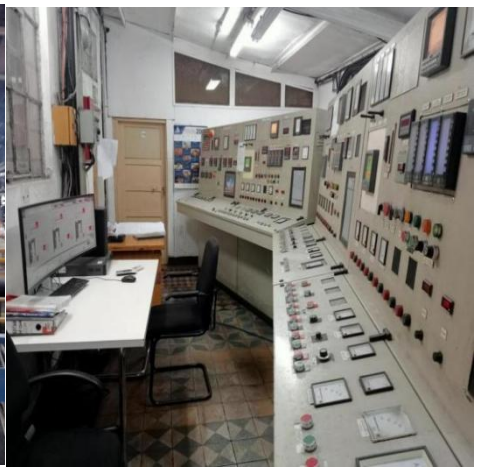
5: Transportador de Fibra de cana-de-açúcar



6: Chaminé



7: Moinhos



8: Painel Controle de caldeiras





9: Autor: Engenheiro e Operadores responsáveis pela cogeração de electricidade na Açucareira de Mafambisse