



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

AVALIAÇÃO DOS RECURSOS RENOVÁVEIS DE ENERGIA

EM MOÇAMBIQUE BASEADA NO PROCESSO DE

ANÁLISE HIERÁRQUICA

Bento João Cassongo

Maputo

2024

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

AVALIAÇÃO DOS RECURSOS RENOVÁVEIS DE ENERGIA

EM MOÇAMBIQUE BASEADA NO PROCESSO DE

ANÁLISE HIERÁRQUICA

Bento João Cassongo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis da Universidade Eduardo Mondlane como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Doutor Eng.º Geraldo Nhumaio

Co-orientador: Prof. Doutor Sverker Molander

Maputo

2024

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

AVALIAÇÃO DOS RECURSOS RENOVÁVEIS DE ENERGIA EM MOÇAMBIQUE BASEADA NO PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA

Bento João Cassongo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis da Universidade Eduardo Mondlane como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis.

Aprovada em 16/12/2024 por:

Prof. Doutor Alberto Júlio Tsamba
(Presidente)

Prof. Doutor Valter Tito Manjate
(Arguente)

Prof. Doutor Eng.º Geraldo Nhumaio
(Orientador)

Declaração de Originalidade

Eu, Bento João Cassongo, declaro que esta dissertação nunca foi apresentada para a obtenção de qualquer grau ou num outro âmbito e que ele constitui o resultado do meu labor individual. Esta dissertação é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do grau de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis, da Universidade Eduardo Mondlane.

Bento João Cassongo

Abstract

Renewable energies have gained global prominence as sustainable alternatives to fossil fuels, contributing to the sustainable generation of electricity. However, the planning of these resources has become increasingly complex due to the multiple variables involved, requiring consistent methods to support decision-making. Accordingly, this study applies the Analytic Hierarchy Process (AHP) to evaluate four renewable energy sources in Mozambique: solar, biomass, hydro, and wind. Three main criteria (economic, social, and environmental) and eight subcriteria were considered, including installation cost, greenhouse gas emissions, and social acceptance. The results indicate that solar energy is the most promising alternative (30.6%), followed by wind (28.4%), hydro (23.3%), and biomass (17.7%). The individual analysis of the criteria revealed that solar energy leads in the economic dimension (40.7%), while wind stands out environmentally (47.8%) and biomass socially (37.0%). A sensitivity analysis confirmed the consistency of the model by exploring variations in the weights of the criteria. This study provides a solid basis for prioritising investments in renewable energy in Mozambique, contributing to sustainable energy planning.

Keywords: Analytic Hierarchy Process, Renewable Energy, Renewable Resources in Mozambique, Multicriteria Decision-Making, Energy Planning, Energy Sustainability.

Resumo

As energias renováveis têm ganhado destaque mundial como alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis, contribuindo para a geração sustentável de electricidade. No entanto, o planeamento destes recursos tornou-se mais complexo devido às múltiplas variáveis envolvidas, exigindo métodos consistentes para apoiar a tomada de decisão. Assim, este estudo aplica o Processo de Análise Hierárquica para avaliar quatro fontes de energia renovável em Moçambique: solar, biomassa, hídrica e eólica. Foram considerados três critérios principais (económico, social e ambiental) e oito subcritérios, como o custo de instalação, as emissões de gases com efeito de estufa e a aceitação social. Os resultados indicam que a energia solar é a alternativa mais promissora (30,6%), seguida pela eólica (28,4%), hídrica (23,3%) e biomassa (17,7%). A análise individual dos critérios revelou que a energia solar lidera sob o aspecto económico (40,7%), enquanto a eólica se destaca no ambiental (47,8%) e a biomassa no social (37,0%). Uma análise de sensibilidade confirmou a consistência do modelo ao explorar variações nos pesos dos critérios. Este estudo oferece uma base sólida para priorizar investimentos em energias renováveis em Moçambique, contribuindo para um planeamento energético sustentável.

Palavras-chave: Processo de Análise Hierárquica, Energias Renováveis, Recursos Renováveis em Moçambique, Tomada de Decisão Multicritério, Planeamento Energético, Sustentabilidade Energética.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida e pela saúde, que me permitiram trilhar esta caminhada desafiante.

Gostaria de expressar a minha sincera gratidão a todas as pessoas e instituições que tornaram possível a conclusão desta dissertação, nomeadamente:

- Aos meus orientadores, Professor Geraldo Nhumaio e Professor Sverker Molander, pelas valiosas orientações e apoio constante ao longo deste processo, os quais foram fundamentais para a elaboração deste trabalho.
- À minha família e aos amigos que estiveram ao meu lado durante todo o percurso académico. Quero agradecer pelo amor, encorajamento e paciência. As vossas palavras de estímulo foram o alicerce que me sustentou nos momentos mais exigentes.
- Aos participantes da pesquisa, que dedicaram o seu tempo e partilharam as suas visões, tornando possível a recolha de dados essenciais para este estudo.
- Aos profissionais e especialistas que gentilmente me auxiliaram com informações e orientações em áreas específicas relacionadas com este trabalho.
- À Universidade Eduardo Mondlane, por ter proporcionado o ambiente propício e os recursos necessários à realização desta investigação.

A todos aqueles que, directa ou indirectamente, contribuíram para este trabalho, deixo o meu mais sincero obrigado.

Índice

Abstract	i
Resumo	ii
Agradecimentos	iii
Lista de Tabelas	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Abreviações	x
1 Introdução	1
1.1 Contexto Energético	1
1.2 Formulação do Problema	3
1.3 Objectivos	3
1.3.1 Objectivo Geral	3
1.3.2 Objectivo Específico	3
1.4 Justificativa	3
1.5 Estrutura da Dissertação	4
2 Revisão de literatura	5
2.1 Desenvolvimento Sustentável	5
2.2 Recursos Renováveis em Moçambique	7
2.2.1 Energia Solar	8
2.2.2 Energia Eólica	10
2.2.3 Energia de Biomassa	11

2.2.4	Energia Hídrica	13
2.2.5	Energia Geotérmica	15
2.2.6	Impactos das Tecnologias de ER	17
3	Metodologia	19
3.1	O método AHP	19
3.2	AHP em Moçambique	24
3.2.1	Definição do Objectivo	24
3.2.2	Critérios e Subcritérios	24
3.2.3	Definição das Alternativas	26
3.2.4	Estruturação Hierárquica	27
3.2.5	Coleta de dados	27
4	Resultados e Discussão	32
4.1	Resultados	32
4.2	Discussão	40
5	Conclusões e Recomendações	44
5.1	Conclusões	44
5.2	Recomendações	45
	Referências	47
A	Questionário Aplicado	53
B	Resultados da comparação	63

Lista de Tabelas

2.1	Planos de desenvolvimento de geração de energia solar fotovoltaica [32].	9
2.2	Planos de desenvolvimento de geração de energia renovável de biomassa [32].	12
2.3	Potência Instalada de Energia Hídrica [4].	15
2.4	Planos de desenvolvimento de energia hidroelétrica (de construção ou estudo de viabilidade concluído [32])	15
2.5	Aspectos positivos e negativos das Tecnologias de Energias Renováveis	17
3.1	Desenvolvimento cronológico do AHP	20
3.2	Escala de Fundamental de Saaty	21
3.3	Índice Aleatório de Consistência (IA)	23
3.4	Definição de pontuação de importância e dados da literatura para subcritérios económicos , ambientais e social	28
4.1	Pesos prioritários dos subcritérios em relação aos critérios de decisão (Fonte: Dados da investigação).	34
4.2	Priorização das alternativas em relação ao critério económico (Fonte: Dados da Pesquisa).	36
4.3	Priorização das alternativas em relação ao critério ambiental (Fonte: Dados da investigação).	37
4.4	Priorização das alternativas em relação ao critério social (Fonte: Dados da investigação).	38
A.1	Tabela de escala de comparação	53
A.2	Definição de pontuação de importância e dados da literatura para subcritérios económicos, ambientais e sociais	57
B.1	Comparação pareada e peso de prioridade dos critérios	63

B.2	Comparação pareada entre os subcritérios Económicos e o peso de prioridade dos subcritérios	63
B.3	Comparação pareada entre os subcritérios Ambiental	63
B.4	Comparação pareada entre os subcritérios Social	64
B.5	Comparação pareada entre as alternativas para SC Custo de Investimento	64
B.6	Comparação pareada entre as alternativas para SC Vida Útil	64
B.7	Comparação pareada entre as alternativas para SC Potencial de Recurso	64
B.8	Comparação pareada entre as alternativas para SC Custo de Energia	64
B.9	Comparação pareada entre as alternativas (Tecnologias) tendo em conta o SC Emissão CO2	65
B.10	Comparação pareada entre as alternativas (Tecnologias) tendo em conta o SC Espaço Físico	65
B.11	Comparação pareada entre as alternativas (Tecnologias) tendo em conta o SC Geração de Emprego	65
B.12	Comparação pareada entre as alternativas (Tecnologias) tendo em conta o SC Aceitação Social	65

Lista de Figuras

2.1	Potencial de recursos renováveis em Moçambique[4]	7
2.2	Recurso solar em Moçambique [23].	8
2.3	Potencial Eólico de Moçambique [23].	10
2.4	Potencial de Biomassa em Moçambique [23]	12
2.5	Plano de desenvolvimento ao longo do rio Zambeze [32].	13
2.6	Potencial Hídrico de Moçambique [23]	14
2.7	Potencial geotérmico de Moçambique [23].	16
3.1	Esquema do Modelo AHP	20
3.2	Estruturação Hierárquica do Modelo AHP	27
4.1	Peso dos critérios (Fonte: Dados da investigação).	32
4.2	Peso dos subcritérios (Fonte: Dados da investigação).	33
4.3	Peso relativo aos subcritérios Ambientais (Fonte: Dados da Pesquisa).	33
4.4	Peso relativo aos subcritérios sociais (Fonte: Dados da investigação).	33
4.5	Pesos (%) de prioridade global dos subcritérios em relação ao objectivo (Fonte: Dados da investigação).	35
4.6	Pesos (%) de prioridade das alternativas em relação aos subcritérios (Fonte: Dados da Pesquisa).	36
4.7	Priorização das alternativas em relação ao critério económico (Fonte: Dados da Pesquisa).	37
4.8	Priorização das alternativas em relação ao critério ambiental (Fonte: Dados da investigação).	38
4.9	Priorização das alternativas em relação ao critério social (Fonte: Dados da investigação).	39

4.10	Priorização das alternativas em relação ao objectivo geral (Fonte: Dados da Pesquisa).	39
4.11	Cenário 1: “Económico” (33,3%), “Ambiental” (33,3%) e “Social” (33,3%)	42
4.12	Cenário 2: “Económico” (25%), “Ambiental” (50%) e “Social” (25%) . . .	42
4.13	Cenário 3: “Económico” (25%), “Ambiental” (25%) e “Social” (50%) . . .	42

Lista de Siglas e Símbolos

AHP	Analytic Hierarchy Process (Processo de Análise Hierárquica)
ALER	Associação Lusófona de Energias Renováveis
AMER	Associação Moçambicana de Energias Renováveis
CO ₂	Dióxido de Carbono
EDM	Electricidade de Moçambique
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program (Programa de Assistência à Gestão do Sector de Energia)
FUNAE	Fundo Nacional de Energia
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Sociedade Alemã para a Cooperação Internacional)
HCB	Hidroeléctrica de Cahora Bassa
INE	Instituto Nacional de Estatística
IRENA	International Renewable Energy Agency (Agência Internacional para as Energias Renováveis)
IJHD	International Journal on Hydropower and Dams (Jornal Internacional sobre Hidroeléctricas e Barragens)
IPP	Independent Power Producer (Produtor Independente de Energia)
JICA	Agência de Cooperação Internacional do Japão
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-hora
MIREME	Ministério dos Recursos Minerais e Energia

MWp	Megawatt-pico
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objectivos do Desenvolvimento Sustentável
SADC	Southern African Development Community (Comunidade de Desenvolvimento da África Austral)
SC	Subcritério
USAID	United States Agency for International Development (Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto Energético

O cenário energético global tem passado por uma série de mudanças e desafios nas últimas décadas. À medida que a procura de energia continua a crescer globalmente, a necessidade de fontes de energia renováveis e limpas tornou-se cada vez mais evidente. Ao mesmo tempo, a segurança energética, a redução das emissões de gases com efeito de estufa e a mitigação das alterações climáticas são preocupações fundamentais. Hoje, os combustíveis fósseis ainda são a principal fonte de energia utilizada no mundo, respondendo por mais de 78,5% da oferta total de energia [47]. Porém, tem-se verificado um aumento da produção e consumo de energias renováveis, como a solar, eólica e hídrica, sendo de esperar que continuem a ganhar maior quota de mercado nos próximos anos.

Em África, o cenário energético é caracterizado por desafios significativos na disponibilidade, no acesso e na sustentabilidade da energia em muitas partes do continente. De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), cerca de 600 milhões de pessoas na África subsaariana não têm acesso à electricidade, enquanto a procura de energia continua a crescer devido ao rápido crescimento populacional e económico [27]. A maioria dos países africanos depende de fontes de energia tradicionais, como lenha e carvão vegetal, para atender às suas necessidades energéticas básicas. A electricidade é frequentemente cara e pouco fiável, com interrupções frequentes na rede eléctrica e falta de investimento em infra-estruturas energéticas.

Uma transição para maior eficiência energética também está em curso, procurando maneiras

de maximizar o uso de energia e reduzir o desperdício. Isso inclui a adoção de tecnologias mais eficientes e a promoção de hábitos de consumo mais conscientes e sustentáveis [9].

Moçambique é um país rico em recursos energéticos, com uma variedade de fontes de energia disponíveis, incluindo hidroelétrica, gás natural, carvão, energia eólica e solar [4].

O país conta com uma capacidade significativa de geração hidroelétrica, graças à presença de vários rios importantes, como o Zambeze. Moçambique possui também potencial para desenvolver a energia eólica e solar, especialmente nas regiões Norte e Centro. Actualmente, conta apenas com uma capacidade instalada de 2780 MW, dos quais 79% são gerados por fontes hídricas, para uma população de mais de 30 milhões de habitantes [29]. A taxa de acesso à electricidade tem vindo a melhorar, situando-se actualmente nos 51,3 %, com uma disparidade considerável entre as zonas urbanas e rurais, sendo nestas últimas onde se verifica a menor incidência [5].

A maior parte da população sem acesso à energia eléctrica depende da biomassa como fonte de energia doméstica [23]. Este recurso, apesar de suprir as necessidades da maioria dos moçambicanos, exerce uma pressão sobre o meio ambiente, pois a exploração não sustentável a longo prazo implica a redução da capacidade florestal em absorver CO₂, mitigando o efeito de estufa e o aquecimento global, além da redução da biodiversidade, entre outros factores que prejudicariam as gerações futuras [56].

A segurança energética, a redução da volatilidade dos preços, o estímulo à inovação, a mitigação de impactos ambientais e a criação de empregos são algumas das razões pelas quais urge a diversificação do sector energético. Para abordar este problema, o governo moçambicano implementou políticas e estratégias destinadas a melhorar o acesso à energia e a fomentar o investimento no sector. Estas incluem a promoção de energias renováveis, a melhoria da infra-estrutura energética e a criação de um ambiente mais atractivo para o investimento privado [35]. Para ampliar a oferta, o governo aprovou o Plano Director de Infra-estruturas Eléctricas 2018-2043, apontando como solução de menor custo a integração de mais 20% de energias renováveis na matriz energética nacional [32].

A exploração e o desenvolvimento diversificado desses recursos, juntamente com a adoção de tecnologias inovadoras e soluções de energia limpa e renovável, podem ajudar a garantir um acesso mais amplo e sustentável à energia em Moçambique.

1.2 Formulação do Problema

Apesar do potencial energético renovável em Moçambique, persistem desafios quanto à definição de prioridades para o desenvolvimento sustentável do sector. A diversidade de fontes disponíveis exige um critério estruturado que permita comparar e hierarquizar os recursos de acordo com indicadores técnicos, ambientais e socio-económicos. Surge, então, a seguinte questão central:

“Quais recursos de energia renovável disponíveis em Moçambique apresentam maior prioridade estratégica para o desenvolvimento sustentável, considerando critérios económicos, sociais e ambientais?”

1.3 Objectivos

1.3.1 Objectivo Geral

O objectivo geral é avaliar e hierarquizar os recursos renováveis de energia disponíveis em Moçambique com base em critérios de sustentabilidade, utilizando o método de Análise Hierárquica (AHP).

1.3.2 Objectivo Específico

- Descrever os recursos renováveis disponíveis em Moçambique;
- Identificar os indicadores de sustentabilidade para cada recurso renovável;
- Comparar e priorizar os recursos de energias renováveis usando o método do Processo de Análise Hierárquica.

1.4 Justificativa

A energia é um factor essencial para o desenvolvimento e prosperidade de qualquer nação, devendo a sua geração e distribuição ser efectuada de modo a não prejudicar outros aspectos relacionados com o desenvolvimento sustentável. As energias renováveis são as melhores alternativas quando comparadas com os combustíveis fósseis. No entanto, o facto de uma fonte ser renovável não implica necessariamente que seja sustentável.

A biomassa (nomeadamente a madeira) é um importante recurso de energia renovável, mas o seu uso descontrolado tem levado à desflorestação. A exploração florestal para fins de combustíveis lenhosos contribui em 15% para o total da desflorestação no país [37]. A energia hídrica também constitui um óptimo recurso energético, mas algumas centrais hidroeléctricas inundam grandes áreas, destruindo florestas e outros ecossistemas importantes. Além disso, o transporte e acumulação de sedimentos encurtam a vida útil destas centrais [21].

Portanto, a busca de um equilíbrio no uso dos recursos renováveis torna-se fundamental para uma geração sustentável de energia.

1.5 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho é constituído por cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, incluindo a justificação, o problema de estudo, os objectivos e a estrutura da dissertação. O segundo capítulo, de enquadramento teórico, apresenta a revisão e análise da literatura disponível relativa ao desenvolvimento sustentável, aos recursos renováveis e às respectivas tecnologias. O terceiro capítulo introduz os aspectos metodológicos, isto é, os procedimentos usados para o desenvolvimento do estudo e o modelo AHP, bem como a sua aplicação ao estudo de caso em Moçambique. O quarto capítulo compreende a apresentação, análise e discussão dos resultados pelo método AHP. Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões, limitações e recomendações.

Capítulo 2

Revisão de literatura

2.1 Desenvolvimento Sustentável

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu na década de 1980 e desde então tem evoluído ao longo do tempo, inicialmente com o Relatório Brundtland (1987), também conhecido como "Nosso Futuro Comum". Este relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas definiu o conceito de desenvolvimento sustentável como "o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades"[60].

Alguns dos principais marcos do desenvolvimento sustentável seguiram a seguinte linha cronológica [19]: a Agenda 21 (1992), que se trata de um plano de acção global adoptado na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92), estabelecendo metas e estratégias para promover o desenvolvimento sustentável a nível local, nacional e global [62]; o Protocolo de Quioto (1997), tratado internacional que estabeleceu compromissos para a redução das emissões de gases de efeito estufa pelos países industrializados, com o objectivo de combater o aquecimento global [61]; os Objectivos de Desenvolvimento do Milénio (2000), um conjunto de oito metas globais estabelecidas pelas Nações Unidas para serem alcançadas até 2015 [59], que incluem a erradicação da pobreza, a redução da mortalidade infantil e a melhoria da qualidade da educação; e, mais recentemente, a Agenda 2030 (2015), um conjunto de 17 Objectivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que sucederam aos Objectivos de Desenvolvimento do Milénio, com metas mais abrangentes

e ambiciosas para alcançar um futuro sustentável para todos.

Os Objectivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) definem uma agenda para a sustentabilidade que abrange as dimensões ambiental, económica e social. Entre os 17 ODS, destacam-se três que impulsionam a transição para um modelo energético mais sustentável [43]:

- ODS 7 - Energia Limpa e Acessível: Visa garantir o acesso universal a uma energia fiável, sustentável e moderna, contribuindo para a inclusão social e para a melhoria da qualidade de vida.
- ODS 9 - Indústria, Inovação e Infra-estruturas: Foca-se na construção de infra-estruturas resilientes e no fomento da inovação, promovendo a industrialização inclusiva e sustentável que estimula o crescimento económico.
- ODS 13 - Acção Contra a Mudança Global do Clima: Propõe medidas urgentes para mitigar as alterações climáticas, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e promovendo a eficiência energética.

A abordagem tripla da sustentabilidade implica que, para um desenvolvimento verdadeiramente sustentável, as acções ambientais, económicas e sociais devem ser integradas. Na dimensão ambiental, é crucial reduzir os impactos sobre o meio ambiente por meio da diminuição das emissões de gases e do aumento da eficiência energética. Do ponto de vista social, garantir o acesso universal a fontes de energia limpas promove a equidade, ao mesmo tempo que assegura a melhoria da qualidade de vida das comunidades. Por fim, a dimensão económica destaca-se pelo incentivo à inovação, pela modernização das infra-estruturas e pela criação de oportunidades de crescimento que respeitem os limites ecológicos [56, 48].

A literatura recente tem evidenciado o papel fundamental das inovações tecnológicas na transição para fontes renováveis e na promoção de práticas sustentáveis. Avanços significativos têm sido registados na utilização de tecnologias limpas e na reestruturação dos sistemas energéticos, como salientado por Franco [19] e pela Agência Internacional de Energias Renováveis [31]. Estes estudos apontam que a transição energética baseada na exploração de recursos renováveis, tais como a energia solar, os recursos hídricos e a biomassa, é essencial para limitar o aquecimento global a 1,5 °C até 2050 [21].

2.2 Recursos Renováveis em Moçambique

Moçambique possui uma variedade de recursos renováveis, nomeadamente a bioenergia, energia hidroelétrica, energia geotérmica, energia solar, energia eólica e a energia das ondas. O Atlas das Energias Renováveis de Moçambique, publicado pelo FUNAE em 2014, indica um potencial total de 23.026 GW. A energia hídrica possui um potencial relevante de 19 GW, seguida da eólica com 5 GW, biomassa com 2 GW e geotermia com apenas 0,1 GW (Figura 2.1).

Estes dados demonstram que Moçambique possui um vasto potencial energético, principalmente nas áreas solar e hídrica, sugerindo a necessidade de políticas e investimentos que maximizem o aproveitamento sustentável destas fontes. Num contexto de transição energética global rumo a fontes limpas e sustentáveis, tal potencial representa uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento socio-económico de Moçambique, possibilitando a expansão do acesso à electricidade e a redução de emissões de carbono alinhada às tendências mundiais. O potencial hídrico é o mais aproveitado e corresponde a 79% do total actual de 2.780 MW de potência instalada em Moçambique. De destacar que, deste total, apenas 38% estão de facto disponíveis para consumo nacional, uma vez que parte se destina à exportação ou consumo próprio [3].

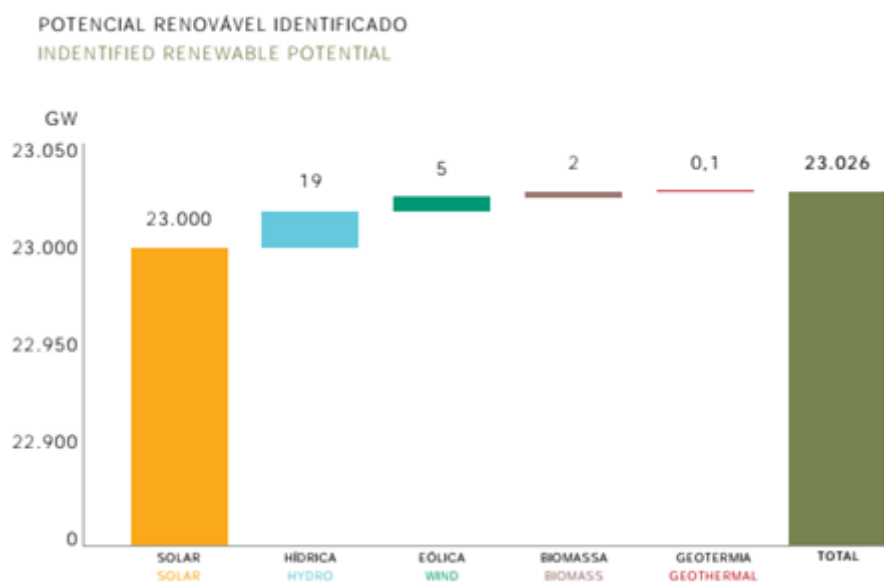


Figura 2.1: Potencial de recursos renováveis em Moçambique[4]

Actualmente, o mercado de painéis solares a nível nacional é dominado e fornecido a baixo custo pelo Fundo de Energia, sendo a população rural e de baixo rendimento os principais consumidores, por meio de projectos de mini-redes [4].

A electrificação com recurso a sistemas fotovoltaicos tem tido um impacto significativo em muitas regiões do mundo, especialmente em áreas rurais e isoladas, onde não há acesso à rede eléctrica convencional [52]. Esta tecnologia ajuda a melhorar a qualidade de vida das pessoas, fornecendo acesso a serviços como iluminação, carregamento de dispositivos móveis e refrigeração. No entanto, é apenas um aspecto de um desenvolvimento mais amplo e sustentável, que requer uma abordagem holística e participativa.

Segundo a FUNAE, a electrificação com recurso a sistemas fotovoltaicos constituiu a actividade de maior impacto e corresponde a 80% da carteira de projectos implementados pelo FUNAE no período de 1997 a 2019, abrangendo 251 vilas, 743 escolas, 661 centros de saúde e 74 edifícios de postos administrativos, contribuindo para o aumento da capacidade instalada em 3.825 kWp.

Apesar da abundância deste recurso, o alto custo de geração de electricidade a partir de energia solar dificulta a implantação em larga escala. A energia solar representa actualmente 1% da matriz energética no país [3].

Actualmente estão contemplados, através do Programa de Leilões de Energias Renováveis, vários projectos de centrais fotovoltaicas como se pode ver na Tabela 2.1, dos quais alguns já se encontram em operação e outros em fase de pré-qualificação, permitindo assim o investimento externo na matriz energética nacional [4].

Tabela 2.1: Planos de desenvolvimento de geração de energia solar fotovoltaica [32].

Planta	Capacidade Instalada	Início de Operação	Estado
Mocuba, Zambézia	40 MWp	2019	Em operação
Metoro, Cabo Delgado	40 MWp	2022	Em operação
Dondo, Sofala	30 MWp	—	Conceitual
Chimuara, Zambézia	30 MWp	—	Conceitual
Cuamba, Niassa	19 MWp	—	Em construção
Manje, Tete	40 MWp	—	Conceitual

2.2.2 Energia Eólica

Cerca de 3 a 5 % da Radiação solar que chega à terra é convertida em energia cinética que provoca o movimento da atmosfera por meio de diferenças de temperaturas, formando assim a base para a fonte de energia Eólica. Desse fluxo, somente uma fracção pode ser capturada como energia eólica a algumas dezenas de metros de altura [45].

Moçambique localiza-se na costa oriental de África, entre as Latitudes $10^{\circ} 20' S$ e $26^{\circ} 50' S$. A linha de costa tem uma extensão de cerca de 2.770Km de comprimento [25], favorecendo um potencial considerável para o desenvolvimento da capacidade de energia eólica.

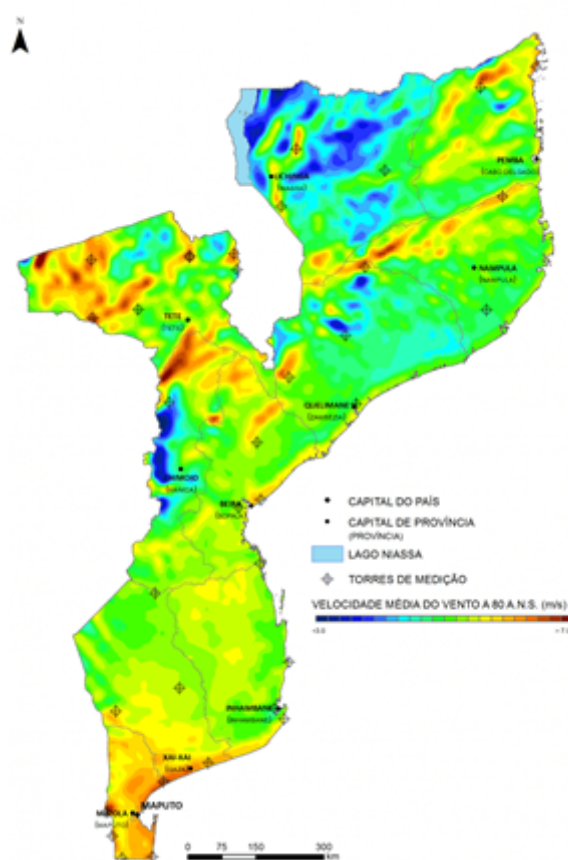


Figura 2.3: Potencial Eólico de Moçambique [23].

Segundo o Atlas do Potencial Eólico, Moçambique apresenta um regime de ventos de intensidade média-baixa com velocidades predominantemente entre os 4 e os 6 m/s a 80 metros acima do nível do solo (a.n.s.), com excepção da zona sul do país e das zonas altas no centro e norte do país, onde os ventos atingem valores mais elevados. As zonas de maior velocidade do vento concentram-se principalmente em faixa costeira do Norte e Centro, incluindo partes

das províncias de Nampula, Zambézia e Sofala, região Oeste, especialmente em áreas de Tete e Niassa. No extremo Sul, abrangendo partes da província de Maputo, onde já existem projectos eólicos em desenvolvimento (Figura 2.3). Nessas áreas, a velocidade do vento atinge valores superiores a 7 m/s , o que é adequado para parques eólicos de grande porte. Foram identificados 4,5 GW de capacidade total de potencial eólico [23].

Estudos de viabilidade técnica, financeira, ambiental e social correspondentes ao futuro parque eólico proposto para Inhambane estão a ser realizados, com uma campanha de medição de ventos. O projecto de implantação do parque eólico terá uma capacidade de 50 MWp [36].

2.2.3 Energia de Biomassa

Biomassa é o termo usado para todo o material orgânico originário de plantas, árvores e culturas e é essencialmente a colecta e armazenamento da energia do sol através da fotossíntese. Energia de biomassa, ou bioenergia, é a conversão de biomassa em formas úteis de energia, como calor, electricidade e combustíveis líquidos [34].

A biomassa é a principal fonte de energia primária na maior parte da região da SADC. A biomassa tradicional representou, até 2018, 44 % do consumo final de energia na região ao nível global; considerando o bagaço para caldeiras na indústria do açúcar, este número sobe para 57 % [57].

As tecnologias de biomassa actualmente usadas no mundo possuem dois problemas cruciais: o custo da biomassa e a eficiência energética da sua cadeia produtiva [12].

A biomassa constitui um importante recurso energético em Moçambique devido à sua economia baseada na agricultura. Cerca de 80 % da população de Moçambique vive em áreas rurais e depende da lenha para cozinhar e para aquecer água para uso doméstico, para o aquecimento das habitações e para a secagem de produtos alimentares. Mais de 90 % das famílias usa exclusivamente lenha para cozinhar, e menos de 10 % usa carvão vegetal [11]. O sector agropecuário produz biomassa na forma de restos de culturas e dejectos de animais, consistindo principalmente de casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e esterco animal. Existe um potencial superior a 2 GW de projectos de biomassa: 1.006 MW de biomassa florestal residual com algum potencial para incorporação de resíduos agroindustriais; 832 MW em açucareiras; 280 MW na indústria da pasta de papel. Os resíduos sólidos urbanos produzidos por uma grande população urbana não são actualmente aproveitados, mas também podem

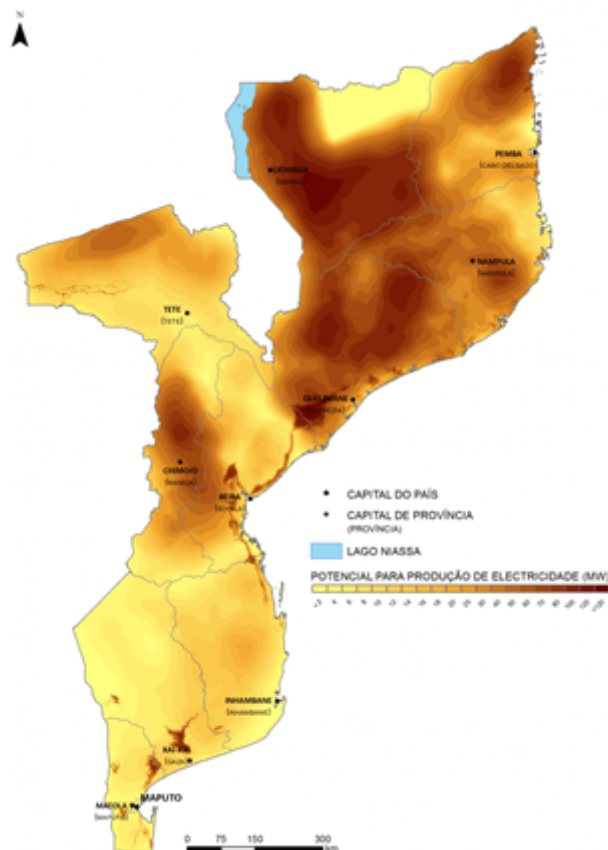


Figura 2.4: Potencial de Biomassa em Moçambique [23]

ser incinerados para produzir electricidade. Estima-se um potencial de aproximadamente 63 MW em RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) [23].

O potencial de geração de energia a partir de biomassa pode também aliviar a escassez de electricidade, através da integração na rede nacional. As áreas com maior potencial para electricidade a partir da biomassa concentram-se nas províncias de Nampula e Zambézia, devido às vastas áreas agrícolas e florestais; Tete e Niassa, ricas em recursos florestais e produção agro-pecuária, especialmente madeira e carvão vegetal; e Sofala e Manica, destacadas na produção de cana-de-açúcar e outras culturas energéticas para cogeração (Figura 2.4). Existem dois planos de desenvolvimento de projectos de geração de energia renovável de biomassa:

Tabela 2.2: Planos de desenvolvimento de geração de energia renovável de biomassa [32].

Planta	Capacidade Instalada	Início de Operação	Estado
Salamanga-(IPP)	30 MW	—	Conceptual
Moamba-(IPP)	30 MW	—	Conceptual

2.2.4 Energia Hídrica

O maior potencial hídrico em Moçambique existe na bacia hidrográfica do rio Zambeze, que é o 4º maior rio da África. A Bacia do Zambeze está localizada entre uma latitude de 8° a 20° Sul e uma longitude entre 16,5° a 36° Leste, drenando uma área de cerca de 1.385 milhões de km^2 . Abrange cerca de 25 % da área total dos seus 8 estados ribeirinhos, compreendendo Angola, Botswana, Malawi, Moçambique, Namíbia, Tanzânia, Zâmbia e Zimbábue. O rio Zambeze nasce no planalto da África Central, nas colinas de Kalene, no noroeste da Zâmbia, a 1.585 m acima do nível do mar, fluindo para o delta em Moçambique antes de desaguar no Oceano Índico [24].

A Barragem de Cahora-Bassa é o único local já desenvolvido no rio. Portanto, há muito potencial hídrico a ser desenvolvido, o que se traduz numa vantagem única para a província de Tete se tornar o centro industrial regional para a região da África Austral, agregando valor aos recursos locais [51]. Existem planos de desenvolvimento de projectos de geração de energia hidroeléctrica ao longo da bacia hidrográfica do rio Zambeze (Figura 2.5) [32].

As principais áreas para geração hidroeléctrica em Moçambique concentram-se ao longo de grandes bacias hidrográficas. O Rio Zambeze destaca-se com a barragem de Cahora Bassa (2.075 MW), enquanto os rios Licungo (Zambézia) e Lúrio (Nampula-Niassa) possuem grande potencial para novas centrais. Os rios Save e Revué (Sofala e Manica) são viáveis para projetos de média escala, e o Rio Limpopo (Sul) apresenta oportunidades para pequenos aproveitamentos hidroeléctricos (Figura 2.6).

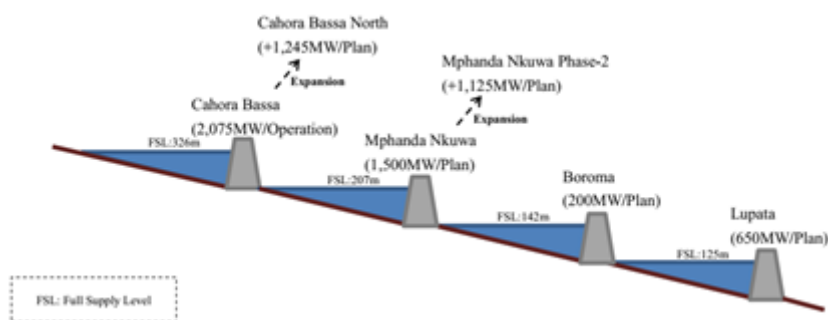


Figura 2.5: Plano de desenvolvimento ao longo do rio Zambeze [32].

Apesar do grande potencial hídrico instalado, perfazendo 79 % do total da matriz energética nacional (Tabela 2.3), apenas 614 MW dos 2189 MW de potência hídrica instalada são consumidos a nível nacional, e o remanescente sob a gestão da HCB é comercializado para o

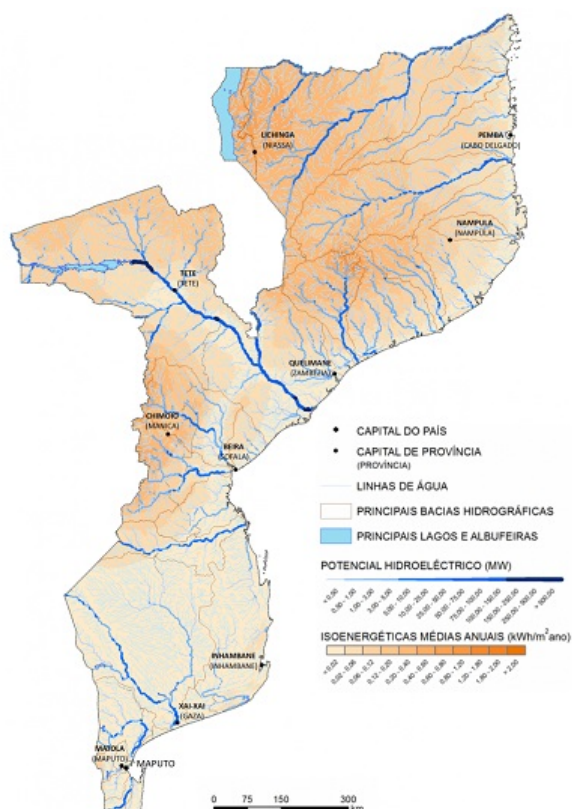


Figura 2.6: Potencial Hídrico de Moçambique [23]

exterior [4].

Projectos de expansão da capacidade instalada de energia hídrica estão em andamento (Tabela 2.4 e Figura 2.6), estes incluem a expansão da margem norte da Central de Cahora Bassa e o projecto Mphanda Nkuwa com capacidade de 1245 MW e 1500 MW, respectivamente [28].

Tabela 2.3: Potência Instalada de Energia Hídrica [4].

Centrais Hidroeléctricas	Potência Instalada (MW)
Cahora Bassa (Tete)	2075
Mavuzi (Manica)	52
Chicamba (Manica)	44
Corumana (Maputo)	16.6
Cuamba (Niassa)	1.09
Lichinga (Niassa)	0.73
Total	2189

Tabela 2.4: Planos de desenvolvimento de energia hidroeléctrica (de construção ou estudo de viabilidade concluído [32])

Planta	Localização	Capacidade Instalada	Início de Operação	Estado
Moamba Major	Maputo	15 MW	2020	Em construção
Mphanda Nkuwa	Tete	1500 MW	2026	Estudo de Viabilidade
Tsate	Manica	50 MW	2025	Estudo de Viabilidade
Cahora-Bassa Norte	Tete	1245 MW	2026	Estudo de Viabilidade
Lupata		650 MW		Estudo de Viabilidade
Boroma		200 MW		Estudo de Viabilidade

2.2.5 Energia Geotérmica

A energia geotérmica é, de forma geral, o calor que existe no interior da Terra, que com adequada tecnologia pode ser convertida em energia eléctrica [58].

Existem regiões onde a libertação deste calor é mais intensa, estas normalmente são coincidentes com zonas activas das fronteiras das placas tectónicas do globo [46].

Para explorar a energia geotérmica, é necessário perfurar a superfície terrestre até chegar às camadas mais profundas, onde a temperatura é elevada. A partir daí, é possível utilizar a água ou o vapor para movimentar turbinas e gerar electricidade. Existem sistemas de energia geotérmica de baixa entalpia ou dominados por água quente (50 – 150°C), e sistemas de alta entalpia ou dominados por vapor (150 – 300°C). Em sistemas de baixa entalpia, a água subterrânea quente é utilizada como fonte de calor. Em sistemas de alta entalpia, o vapor é o

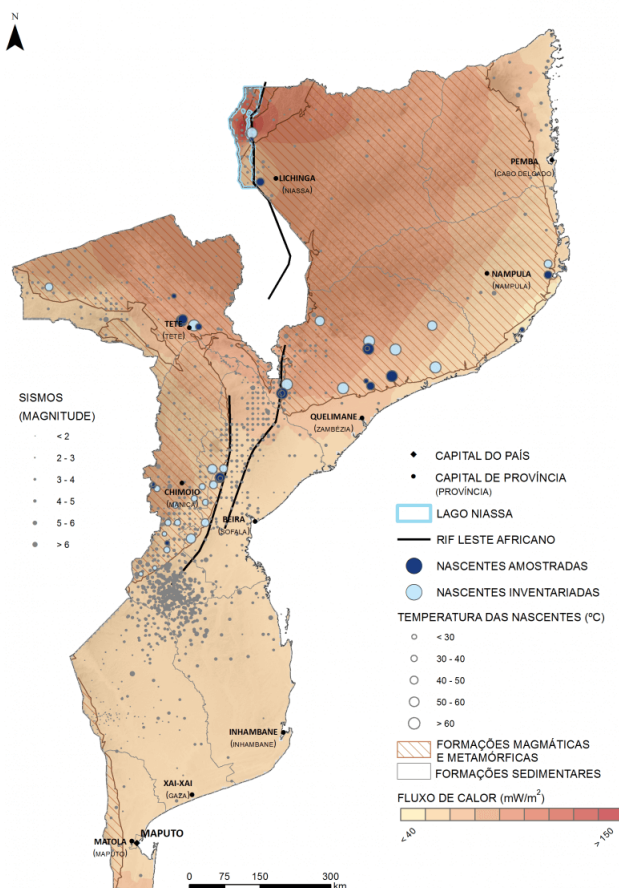


Figura 2.7: Potencial geotérmico de Moçambique [23].

fluido extraído que é usado para accionar turbinas para geração de electricidade [55].

No território nacional foram identificadas mais de 30 fontes termais, algumas na região centro e norte com temperatura superior a $60^{\circ}C$ (Figura 2.7), onde os valores do fluxo geotérmico variam de 70 a $170 mW/m^2$, áreas propícias para a geração de energia eléctrica (Figura 2.7) [35].

As fontes de média e baixa temperatura (baixa entalpia) são adequadas em diferentes tipos de aplicações na agricultura, na indústria e na utilização residencial [14]. Moçambique possui um potencial geotérmico de 147 MW. Os geotermómetros de 4 locais apresentam temperatura suficiente para produção de electricidade, acima dos $150^{\circ}C$, nomeadamente: Boroma ($164^{\circ}C$), Morrumbala ($153^{\circ}C$), Maganja da Costa e Namacurra ($155^{\circ}C$) [23].

2.2.6 Impactos das Tecnologias de ER

Tendo considerado o potencial da energia eólica, solar fotovoltaica, hídrica, biomassa e geotérmica para geração de electricidade, cabe também destacar algumas vantagens e desvantagens do uso desses recursos [18], [53], [22]:

Tabela 2.5: Aspectos positivos e negativos das Tecnologias de Energias Renováveis

Tecnologia	Aspectos positivos	Aspectos negativos
Solar	<ul style="list-style-type: none"> -Possibilidade de instalação em pequena e grande escala -Baixo custo de operação e manutenção -Possibilidade de instalação em zonas rurais 	<ul style="list-style-type: none"> -Fonte intermitente -Eficiência em função da variação climática -Elevado custo do painel solar -Necessita de área de instalação larga.
Hídrica	<ul style="list-style-type: none"> -Baixo custo de operação e manutenção -Longa vida útil -Eficiência elevada -Gera mais empregos durante o processo de construção 	<ul style="list-style-type: none"> -Elevado custo de investimento -Perda de habitat por inundação -Mudanças nos regimes de fluxo e inundação -Alteração do ciclo hidrológico a jusante.
Eólica	<ul style="list-style-type: none"> -Não produz resíduos -As turbinas eólicas não ocupam grandes extensões de terra. 	<ul style="list-style-type: none"> -Intermitência -Impacto na fauna -Alteração da paisagem pelas torres e turbinas.
Biomassa	<ul style="list-style-type: none"> -Redução de resíduos -Flexibilidade de combustíveis -Produção local 	<ul style="list-style-type: none"> -Perdas de habitat e desflorestamento -Emissões de poluentes -Baixa eficiência energética -Competição com a produção de alimentos -Dependência das condições climáticas
Geotérmica	<ul style="list-style-type: none"> -Elevada eficiência energética -Fornecimento de energia constante -Não causa grande impacto no solo 	<ul style="list-style-type: none"> -Limitações geográficas -Alto custo inicial -Alteração de áreas naturais -Liberação de substâncias químicas durante a perfuração.

A análise comparativa apresentada na tabela evidencia que cada fonte de energia renovável possui características distintas que impactam de maneira diferenciada nos aspectos sociais, ambientais, técnicos e económicos. Por exemplo, enquanto a energia hídrica apresenta elevada eficiência e baixa emissão de poluentes, pode provocar impactos ambientais relevantes devido à alteração de ecossistemas. A energia solar, por sua vez, apresenta elevado potencial no país e pode ser implantada em zonas isoladas, mas depende fortemente das condições

climáticas. A energia de biomassa, embora promissora em termos de uso de resíduos, pode competir com a produção agrícola e apresentar baixa eficiência. Estas diferenças ilustram a complexidade envolvida na selecção de fontes energéticas mais adequadas, tornando evidente a necessidade de uma abordagem estruturada de apoio à decisão que permita ponderar, de forma sistemática e transparente, os múltiplos critérios em jogo. Neste contexto, o método de Análise Hierárquica surge como uma ferramenta adequada para comparar e priorizar estas alternativas à luz de objectivos sustentáveis.

Abordagem Multicritério

A abordagem multicritério lida com problemas de tomada de decisão que envolvem a consideração de múltiplos critérios, atributos, pontos de vista, metas e objectivos. Estes problemas surgem naturalmente em várias áreas de actividade, no sector público, bem como nas escolhas feitas pelos indivíduos [15].

O sector energético tem demonstrado a utilidade do método multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*) de diversas formas. Ahmad e Tahar [1], bem como Al et al. [2], utilizaram o método AHP para a priorização de recursos renováveis na Malásia e na Arábia Saudita, respectivamente. Penãlvo [44] aplicou a abordagem AHP para seleccionar a melhor alternativa de geração de energia para a comunidade da Vila de Dekese, na República Democrática do Congo. Wang et al. [65] propuseram um modelo AHP para classificar quatro potenciais fontes de energia renovável no Vietname. O sector energético em Moçambique enfrenta desafios significativos na identificação e priorização de fontes de energia renováveis adequadas às suas necessidades. A adopção de métodos multicritério, como o Processo de Análise Hierárquica (AHP), tem-se mostrado eficaz em diversos contextos internacionais, ajudando a otimizar a tomada de decisões em relação à selecção de recursos energéticos. Diante desta evidência, surge a necessidade de conduzir uma pesquisa aplicando esta abordagem metodológica no país.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 O método AHP

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) é uma técnica de tomada de decisão multicritério que ajuda a lidar com a complexidade em decisões que envolvem múltiplos critérios e alternativas. Segundo [63], este método baseia-se no princípio de que, para tomar decisões, a experiência e o conhecimento das pessoas são, pelo menos, tão valiosos quanto os dados utilizados.

A principal característica do método AHP é o uso de comparações de pares, que são utilizadas tanto para estimar os pesos dos critérios, como para comparar as alternativas em relação aos vários critérios [33].

O AHP baseia-se na experiência adquirida pelo seu criador, T.L. Saaty, enquanto dirigia projectos de investigação na Agência de Controlo e Desarmamento de Armas dos Estados Unidos. Foi desenvolvido como uma reacção à constatação de que existe uma enorme falta de uma metodologia comum, de fácil compreensão e implementação, para possibilitar a tomada de decisões complexas [40].

Na análise hierárquica de processos, o processo decisório é dividido em etapas hierárquicas, onde as alternativas são comparadas e avaliadas em termos de critérios e subcritérios previamente definidos. Os principais passos envolvidos nesta metodologia são [50], [41] :

Tabela 3.1: Desenvolvimento cronológico do AHP

Década	Acontecimento
1970	Thomas Saaty começa a desenvolver a estrutura AHP como uma forma de ajudar indivíduos e organizações a tomar decisões complexas.
1980	Saaty publica uma série de artigos e livros sobre o AHP, incluindo "The Analytic Hierarchy Process"(1980) e "Decision Making for Leaders"(1985).
1990	O AHP ganha popularidade em áreas como engenharia, finanças e saúde, bem como na investigação académica.
2000	O AHP continua a ser utilizado numa variedade de contextos e aplicações, incluindo a gestão de projectos, avaliação de riscos e planeamento estratégico.
2010	Saaty e outros investigadores continuam a refinar e a expandir a estrutura AHP, e novas ferramentas de <i>software</i> e recursos em linha são criados para facilitar o seu uso.

Estruturação do problema de decisão numa hierarquia de níveis

Estruturar o problema de decisão numa hierarquia de níveis com o objectivo no nível superior, seguido pelos critérios, subcritérios e alternativas nos níveis inferiores.

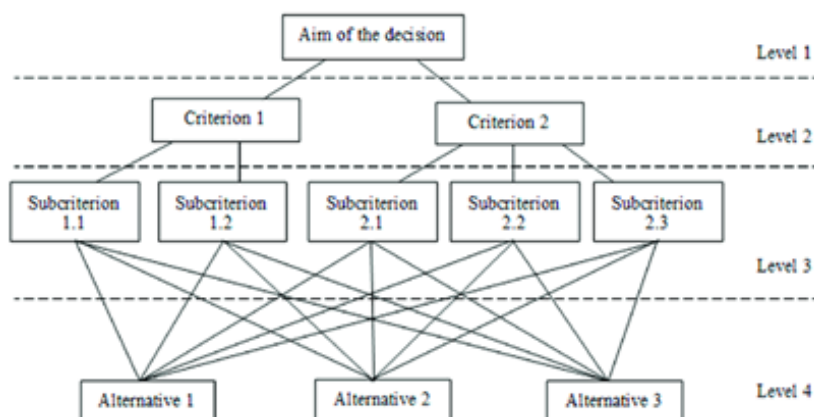


Figura 3.1: Esquema do Modelo AHP

Comparação par-a-par

A comparação paritária é efectuada entre critérios em relação ao objectivo, entre os subcritérios, e entre as alternativas em relação a cada critério e subcritério. A partir desta comparação, serão atribuídos os pesos relativos de cada critério e subcritério. Esta comparação par-a-par é feita segundo uma escala de julgamentos, sendo atribuídos valores numa escala numérica (Tabela 3.2) a vários julgamentos que dão origem à matriz quadrada. A escala fundamental originalmente proposta por Saaty para o Processo de Análise Hierárquica consiste nas pa-

lavras "igual", "moderada", "forte", "muito forte" e "extrema". Com base em investigações empíricas, Saaty propôs representar a intensidade destas palavras com proporções de 1, 3, 5, 7 e 9, respectivamente, sendo os inteiros pares 2, 4, 6 e 8 utilizados para julgamentos intermédios, como o 6 para o intervalo entre "forte" e "muito forte" (Tabela 3.2) [64].

Tabela 3.2: Escala de Fundamental de Saaty

Intensidade	Definição	Explicação
1	Importância Igual	Duas atividades contribuem igualmente para o mesmo objectivo
3	Fraca Importância de uma sobre a outra	A experiência e o Julgamento favorecem levemente uma atividade sobre a outra.
5	Importância Forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em detrimento de outra
7	Importância muito forte ou demonstrada	Uma atividade é fortemente favorecida em relação a outra; seu domínio demonstrado na prática
9	Extrema importância	A evidência que favorece uma atividade em detrimento de outra é da mais alta ordem de afirmação possível
2,4,6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Quando é necessária uma condição de compromisso
1/1, 1/2, ..., 1/7, 1/8, 1/9	Recíprocos	Se a atividade i tem um dos números não nulos acima atribuídos a ela quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparado com i.

Os resultados das comparações apresentam-se da seguinte forma matricial:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Com as condições: a) $a_{ij} = \alpha$ b) $a_{ji} = \frac{1}{\alpha}$ e $a_{ii} = 1$. Onde a_{ij} é a comparação paritária entre

os critério i e j e α é o valor da intensidade de importância.

Obtenção do vector prioritário

Segue-se a obtenção do vector prioritário de A , que é o vector dos pesos dos critérios definidos, o qual pode ser obtido de duas formas alternativas:

1. Método do vector próprio

Se as entradas de A são razões entre pesos, então o vector de pesos é o vector próprio de A associado ao valor próprio λ_{max} . Saaty propôs estender este resultado para todas as matrizes de comparação de pares, substituindo pelo valor próprio máximo λ_{max} de A [50]. Ou seja, o vector \mathbf{w} pode ser obtido de qualquer matriz de comparação de pares A como a solução do seguinte sistema de equações [7]:

$$\begin{cases} (A - I\lambda_{max})\mathbf{w} & = 0 \\ \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{1} & = 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

Onde $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$.

A primeira equação é composta por uma expressão que utiliza a matriz A , a matriz identidade I , e o maior valor próprio de A , representado por λ_{max} . A equação é definida pela igualdade a zero da expressão $(A - I\lambda_{max})\mathbf{w}$, onde \mathbf{w} é um vector.

A segunda equação é uma equação de restrição, que define que o vector \mathbf{w} deve ser normalizado, ou seja, a sua soma de componentes deve ser igual a 1. Esta equação é representada pela igualdade do produto escalar do vector \mathbf{w} com um vector coluna de uns (representado por $\mathbf{1}$) com o valor numérico 1.

2. Método da média geométrica

Neste método, cada componente de \mathbf{w} é obtido como a média geométrica dos elementos na respectiva linha da matriz de julgamentos A , dividida por um termo de normalização de modo que os componentes de \mathbf{w} somem 1. [13]:

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (3.3)$$

Verificação da consistência

Como a comparação de pares pode ser muito subjectiva, o Processo de Análise Hierárquica utiliza uma verificação de consistência das comparações. Para cada matriz de comparação, calculam-se: o valor próprio máximo λ_{max} , o índice de consistência (IC) e a razão de consistência (RC).

Os IC e RC são calculados ([49]), respectivamente.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.4)$$

Onde λ_{max} é o valor próprio máximo da matriz de comparação, e n é a ordem da matriz de comparação.

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (3.5)$$

Onde, IA é o índice aleatório de consistência (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Índice Aleatório de Consistência (IA)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatório de consistência	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

A avaliação final da consistência do julgamento faz-se ao comparar o valor de RC da seguinte forma [10]:

- a) $RC \leq 0,1$: consiste num julgamento coerente, premissa básica do método em relação à análise de coerência que Saaty propõe inicialmente para julgar uma avaliação como satisfatória.
- b) $0,1 < RC \leq 0,2$: consiste num julgamento questionável, sugerindo que o especialista reveja os seus julgamentos da respectiva etapa, analisando a matriz construída e procure melhorar algumas comparações que tenham sido inconsistentes, não sendo obrigatória a alteração dos julgamentos.
- c) $RC > 0,2$: consiste num julgamento incoerente, indicando que as comparações paritárias daquela etapa geraram um alto índice de inconsistência e o especialista é obrigado a refazer os seus julgamentos.

Valoração Global

Analisar as matrizes para estabelecer as prioridades locais e globais, comparar as alternativas e seleccionar a melhor opção [54]. Os pesos prioritários determinados no passo III para os critérios, subcritérios e alternativas são denominados prioridades locais. As prioridades finais são conhecidas como prioridade global e são obtidas multiplicando a prioridade local de um nó pela prioridade local dos seus ascendentes [38]:

$$G_{W_i} = L_{W_i} \cdot \prod_{j=1}^n P_j \quad (3.6)$$

onde:

G_{W_i} - Prioridade global para os critérios de avaliação i

L_{W_i} - Prioridade local para critérios de avaliação i

P_j - Prioridade local para parente j

3.2 AHP em Moçambique

3.2.1 Definição do Objectivo

Para o modelo definido, o objectivo principal é comparar os recursos renováveis, priorizando as melhores alternativas de acordo com os critérios e subcritérios definidos.

3.2.2 Critérios e Subcritérios

No presente estudo, o modelo multicritério apresentado para avaliar o recurso renovável específico para a geração de electricidade é o método AHP. Os critérios e subcritérios identificados são tais que uma avaliação de um determinado recurso renovável é fornecida a um decisor. Os três critérios identificados são: Económicos, Sociais e Ambientais, bem como os respectivos subcritérios.

SC 1.1: Custo de Instalação

Este parâmetro avalia o custo total de instalação de uma determinada tecnologia ou projecto, incluindo não apenas os custos directos associados à aquisição e instalação do equipamento,

mas também os custos indirectos relacionados à engenharia, projecto, construção civil, logística, instalação, treinamento e outros custos associados. Os dados do custo total de instalação foram obtidos do banco de dados IRENA [30].

SC 1.2.: Custo de Energia

O custo nivelado de energia (LCOE) é uma medida comumente usada para avaliar o custo total de uma fonte de energia ao longo da sua vida útil, levando em consideração todos os custos envolvidos na sua geração e distribuição, bem como a quantidade de energia gerada ao longo do tempo. Este parâmetro leva em conta diversos factores, como os custos de investimento, financiamento, operação, manutenção e desmontagem do projecto, bem como a eficiência da tecnologia utilizada e a taxa de retorno do investimento. Um preço de geração mais baixo de uma tecnologia ER é reflectido em um peso maior. O custo da energia é um índice quantitativo. Os dados de custo de energia de cada tecnologia foram obtidos do banco de dados IRENA [30].

SC 1.3.: Vida Útil

Esse parâmetro refere-se ao período em que uma tecnologia pode produzir energia renovável sem a necessidade de substituições significativas [66].

SC 1.4.: Potencial de Recurso

O potencial de recurso refere-se à capacidade de um determinado recurso natural ser captado e utilizado para gerar energia renovável. Os dados do potencial foram adquiridos em [3].

SC 2.1.: Emissão de CO₂

Este parâmetro diz respeito ao impacto da Tecnologia de Energia Renovável no meio ambiente. As emissões de CO₂ do ciclo de vida das tecnologias de energia renovável não são zero, pois há emissões associadas à fabricação, transporte e descarte do equipamento. Entretanto, essas emissões são geralmente muito mais baixas do que aquelas associadas às tecnologias de geração de energia baseadas em combustíveis fósseis. O impacto no nível de emissão é um parâmetro quantitativo e os dados foram obtidos em [42].

SC 2.2.: Espaço Físico

O espaço físico ou uso do solo reflecte a ocupação necessária do terreno para a instalação da central, que difere conforme a tecnologia de ER para uma determinada capacidade instalada. Os requisitos de terreno para centrais de cada tecnologia de ER dependem da intensidade da disponibilidade e eficiência dos recursos. Uma comparação da necessidade de terreno das alternativas de ER é mostrada em [20].

SC 3.1.: Geração de Emprego

Potencial de oportunidades de emprego a serem criadas pelo projecto de energia. Refere-se à quantidade de empregos que podem ser gerados por cada megawatt (MW) de potência instalada. Esta grandeza não possui uma unidade de tempo porque não está relacionada com um período específico. Em vez disso, ela refere-se à quantidade de empregos que podem ser gerados numa base contínua, enquanto a central estiver em operação [1].

SC 3.2.: Aceitação Social

Este parâmetro indica qualitativamente o nível de satisfação antecipado do público e as suas opiniões em relação a cada tecnologia de ER. A aceitação social envolve a compreensão e o apoio do público em relação às tecnologias e projectos de energia renovável, bem como a sua disposição para participar em iniciativas que promovam a adopção destas tecnologias [16] [8].

3.2.3 Definição das Alternativas

As alternativas na perspectiva de geração sustentável de energia renovável a considerar serão: Solar, Biomassa, Eólica e Hídrica. Embora a energia solar e a energia da biomassa possam também ser usadas para muitos outros fins, como o aquecimento, cozimento, transporte, etc., no presente trabalho serão avaliadas sob a perspectiva de geração de electricidade.

3.2.4 Estruturação Hierárquica

Considerando os pontos anteriores, o modelo hierárquico a considerar será da forma:

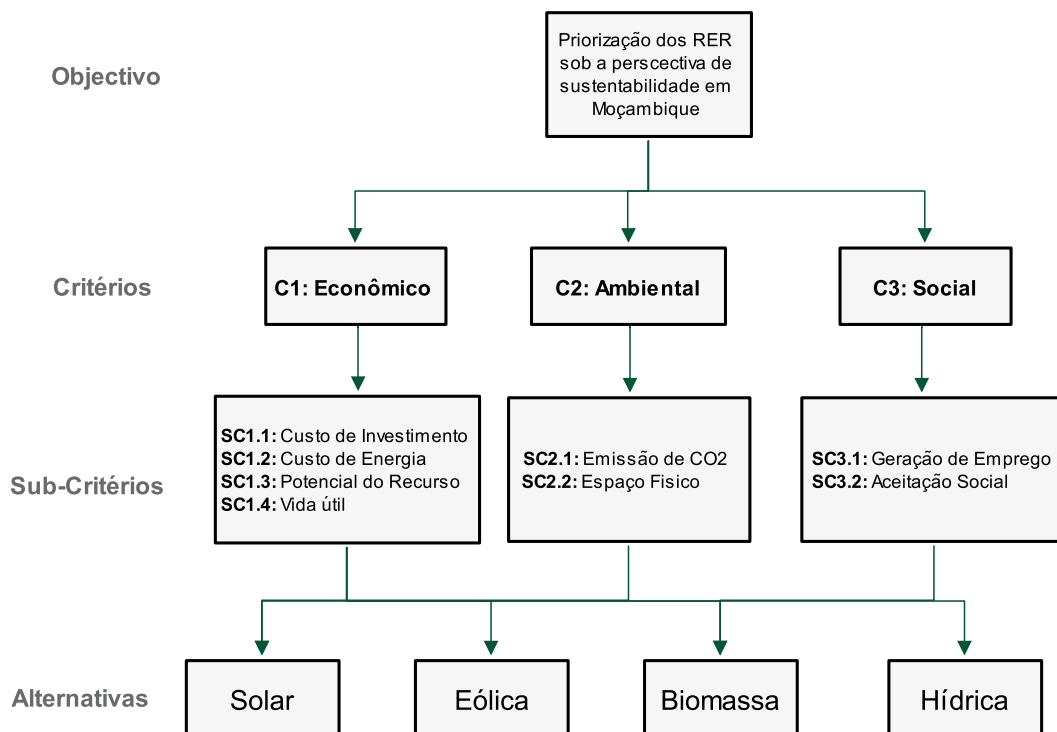


Figura 3.2: Estruturação Hierárquica do Modelo AHP

3.2.5 Coleta de dados

Para a coleta de dados ou julgamentos de valor, uma série de especialistas de diferentes disciplinas e profissões ligadas as Energias Renováveis foram convidadas a participar da avaliação por meio de um questionário que consiste em 2 grupos de questões onde foram feitas comparações pareadas dos critérios, subcritérios e alternativas definidas, totalizando 59 comparações de pares (Apêndice A). Na parte I do questionário consistiu em 11 comparações de pares (3 para os critérios principais e 8 comparações de pares para os 8 subcritérios), em relação ao objectivo geral. A parte II do questionário faz-se a comparação entre as fontes de energia renovável no que diz respeito aos subcritérios de desenvolvimento sustentável, consistido em 48 comparações (6 comparações para cada subcritério).

Tabela 3.4: Definição de pontuação de importância e dados da literatura para subcritérios económicos, ambientais e social

(C)	Subcritério (SC)	Alternativas	Dados	Definição de Importância	Referências	
C1	SC 1.1.	Biomassa	2353			
	Custo de Instalação (USD/KW)	Solar (PV)	857	Maior Custo de Instalação indica menor pontuação de importância (menor sustentabilidade)	[30]	
		Eólica	1325			
		Hídrica	2135			
		Biomassa	2353			
	SC 1.2.	Biomassa	0.067			
	Custo de Energia (USD/KWh)	Solar (PV)	0.048	Maior Custo de Energia indica menor pontuação de importância (menor sustentabilidade)	[30]	
		Eólica	0.033			
		Hídrica	0.048			
	SC 1.3.	Biomassa	40			
	Vida Útil (Anos)	Solar (PV)	25	Maior tempo de Vida Útil indica maior pontuação de importância (maior sustentabilidade)	[66]	
		Eólica	25			
Hídrica		40				
SC 1.4.	Biomassa	2				
Potencial de Recurso (GW)	Solar (PV)	23000	Maior potencial de recursos indica maior pontuação de importância (maior sustentabilidade)	[3]		
	Eólica	5				
	Hídrica	19				
C2	SC 2.1.	Biomassa	52	Maior valor de emissão		
	Emissão de CO2 (gCO ₂ e/KWh)	Solar (PV)	43	indica menor pontuação de importância (menor sustentabilidade)	[42]	
		Eólica	13			
		Hídrica	21			
		Biomassa	52			
	SC 2.2.	Biomassa	500			
	Espaço Físico (m ² /MWh)	Solar (PV)	10	Maior área necessária indica menor pontuação de importância (menor sustentabilidade)	[20]	
		Eólica	1			
		Hídrica	10			
	C3	SC 3.1.	Biomassa	72		
		Geração de Emprego (Emprego/MW)	Solar (PV)	10	Maior Geração de Emprego indica maior pontuação de importância (maior sustentabilidade)	[1]
			Eólica	11		
Hídrica			5			
Biomassa			72			
SC 3.2.		Biomassa	59		[16]	
Aceitação Social (%)		Solar (PV)	80	Maior Aceitação Social indica maior pontuação de importância (maior sustentabilidade)	[8]	
		Eólica	71		[67]	
		Hídrica	80			

Os dados quantitativos apresentados na Subseção 3.2.5 são usados como guia no processo de comparação pareada. O questionário é elaborado de forma que cada especialista irá expressar seus próprios julgamentos para serem reinterpretados como uma comparação de pares. Como a avaliação será feita por um grupo de especialistas, deve se ter em conta e sintetizar as suas opiniões, ou seja, agregá-las. Portanto, a partir de suas matrizes de comparação de pares deve-se fazer uma média das diferentes opiniões, a média do grupo das pontuações em cada comparação de pares é calculada para refletir a opinião do grupo como um todo. Então, se $A_1 = (a_{ij}^1)_{n \times n}, A_2 = (a_{ij}^2)_{n \times n}, \dots, A_m = (a_{ij}^m)_{n \times n}$ são as matrizes de comparação, e eventualmente deseja-se obter um vector de prioridade de grupo representativo $w^G = (w_1^G, w_2^G, w_n^G)^T$. Existem dois métodos para derivar um vector w^G de um conjunto de matrizes de comparação pareadas $A_1 = (a_{ij}^1)_{n \times n}, A_2 = (a_{ij}^2)_{n \times n}, \dots, A_m = (a_{ij}^m)_{n \times n}$ [17] :

Agregação de julgamentos individuais (AJI)

As matrizes A_1, \dots, A_m podem ser agregadas em uma única matriz de comparação pareada, $A^G = a_{ij}^G$ e então o vector de prioridade será calculado a partir de A^G pelo esquema seguinte:

$$A_1, \dots, A_m \xrightarrow{\text{AJI}} A^G \longrightarrow w^G$$

Onde as entradas da matriz de grupo A^G são obtidas usando a seguinte fórmula paramétrica:

$$a_{ij}^G = \prod_{h=1}^m a_{ij}^{(h)\lambda_h} \quad (3.7)$$

com $\lambda_h > 0, \lambda_1 + \dots + \lambda_m = 1$. Onde λ_h é proporcional à importância do h-ésimo especialista. Quando $\lambda_h = \frac{1}{m}, \forall h$, então todos os tomadores de decisão (especialistas) têm a mesma importância.

Agregação de prioridades individuais (API)

Os vectores de prioridade w_1, \dots, w_m podem ser derivados do conjunto original das matrizes A_1, \dots, A_m . Estes vectores são então agregados em w^G . Neste caso, a agregação ocorre após a derivação dos vectores prioritários.

$$A_1, \dots, A_m \longrightarrow w_1, \dots, w_m \xrightarrow{\text{API}} w^G$$

A obtenção do vector de prioridade através da agregação de prioridades individuais (API) é dada pela média geométrica ponderada [26]:

$$w_i^G = \prod_{h=1}^m w_i^{(h)\lambda_i} \quad (3.8)$$

Para a obtenção dos juízos necessários ao processo AHP, foi constituída uma amostra de quinze (15) decisores com experiência relevante no sector energético moçambicano. Estes participantes foram seleccionados de forma intencional, considerando critérios como:

- Experiência comprovada em energias renováveis (mínimo de 5 anos),
- Actuação em áreas distintas (planeamento energético, políticas públicas, engenharia eléctrica, projectos de energias renováveis),
- Conhecimento técnico e/ou estratégico para avaliar critérios de sustentabilidade aplicados ao contexto moçambicano.

A diversidade dos especialistas visou garantir a integração de perspectivas técnicas, económicas, ambientais e sociais. A participação activa dos especialistas foi voluntária e os dados foram recolhidos através de questionário estruturado dividido em duas partes:

1. Comparação par-a-par dos critérios principais e dos subcritérios (totalizando 11 comparações),
2. Comparação entre as alternativas de fontes de energia para cada subcritério (totalizando 48 comparações).

Para aumentar a fiabilidade dos resultados, foi realizada uma verificação de consistência das matrizes individuais, conforme os parâmetros de Saaty, aceitando-se apenas respostas com índice de consistência $RC \leq 0,10$. A média dos julgamentos foi calculada por agregação

geométrica (Equação 3.7), conforme a abordagem tradicional no AHP quando se utiliza mais de um decisor.

A metodologia adoptada permite tratar a complexidade da avaliação de recursos renováveis em Moçambique, apoiando uma tomada de decisão informada e sustentável.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Resultados

Critérios

Em relação aos critérios, que constituem o segundo nível hierárquico, o modelo de avaliação definido inicialmente demonstra que, para a matriz de comparação efectuada (Figura 4.1), o critério económico é o mais importante, com um peso de prioridade relativa na selecção dos recursos de 49,5%. Segue-se o critério ambiental, com um peso de 25,9%, e, por último, o critério social, com 24,6%. A inconsistência na comparação de pares para os critérios foi medida em torno de $RC < 0,10$, o que se encontra dentro dos limites estabelecidos.



Figura 4.1: Peso dos critérios (Fonte: Dados da investigação).

Estes resultados reflectem que, no contexto de Moçambique, as questões económicas, como a redução de custos e a eficiência financeira, são primordiais devido aos desafios económicos enfrentados pelo país. O critério ambiental, ainda que em segunda posição, sugere uma preocupação considerável com a sustentabilidade ambiental.

Subcritérios

Tomando em consideração o critério económico, o subcritério “Potencial de Recurso” é o mais importante da categoria, com um peso de 37,3%, seguido do subcritério “Custo de Investimento”, com 28,6%. Já o “Custo de Energia” e a “Vida Útil” apresentam, respectivamente, 21,9% e 12,2% (Figura 4.2).



Figura 4.2: Peso dos subcritérios (Fonte: Dados da investigação).

No critério ambiental, o subcritério “Espaço Físico” é o mais importante com 52,4%, seguido do subcritério “Emissão de CO2” com 47,6% (Figura 4.3).



Figura 4.3: Peso relativo aos subcritérios Ambientais (Fonte: Dados da Pesquisa).

Quanto ao critério social, o subcritério “Geração de Emprego” é o mais importante com 63,1%, seguido do subcritério “Aceitação Social” com 36,9% (Figura 4.4).



Figura 4.4: Peso relativo aos subcritérios sociais (Fonte: Dados da investigação).

Os resultados na Tabela 4.1 mostram os oito subcritérios categorizados em três critérios principais para a avaliação das quatro alternativas de energias renováveis para geração de electricidade.

Tabela 4.1: Pesos prioritários dos subcritérios em relação aos critérios de decisão (Fonte: Dados da investigação).

Económico	Ambiental	Social
0,495	0,259	0,246
<hr/>		
$SC_{11} = 0,286$		
$SC_{12} = 0,221$	$SC_{21} = 0,524$	$SC_{31} = 0,631$
$SC_{13} = 0,370$	$SC_{21} = 0,476$	$SC_{32} = 0,369$
$SC_{14} = 0,123$		

A Figura 4.5 ilustra os pesos de prioridade global dos subcritérios em relação ao objectivo geral da estrutura de decisão. Estes resultados são obtidos calculando o produto entre o peso local de cada subcritério e o seu respectivo peso local em relação ao critério (Tabela 4.1). Os resultados demonstram que o subcritério “Potencial de Recurso”, inserido no critério económico, apresenta, de forma expressiva, a maior importância, com um peso global de 18,3%. Tal justifica-se pelo facto de o país possuir um vasto potencial de recursos para a geração de energias renováveis, o que permite que este subcritério assuma um peso preponderante na estrutura de decisão. O subcritério “Geração de Emprego”, no âmbito do critério social, regista o segundo maior peso global, de 15,5%, em relação ao objectivo geral. O subcritério “Custo de Investimento” é o terceiro mais importante, com um peso de 14,2%.

Os resultados da Figura 4.6 foram sintetizados das comparações feitas entre as alternativas de Energias Renováveis, tendo em conta cada subcritério (Apêndice B). Em relação ao peso das alternativas, a energia solar mostrou-se prioritária nos subcritérios “Potencial de Recurso”, “Custo de Investimento” e “Aceitação Social”, com 55,4 %, 48,1 % e 39,2 %, respectivamente. A eólica encontra-se melhor posicionada nos subcritérios “Espaço Físico” e “Emissão de CO₂”, com um peso de 49,3 % e 48,6 %, respectivamente. A biomassa está melhor posi-

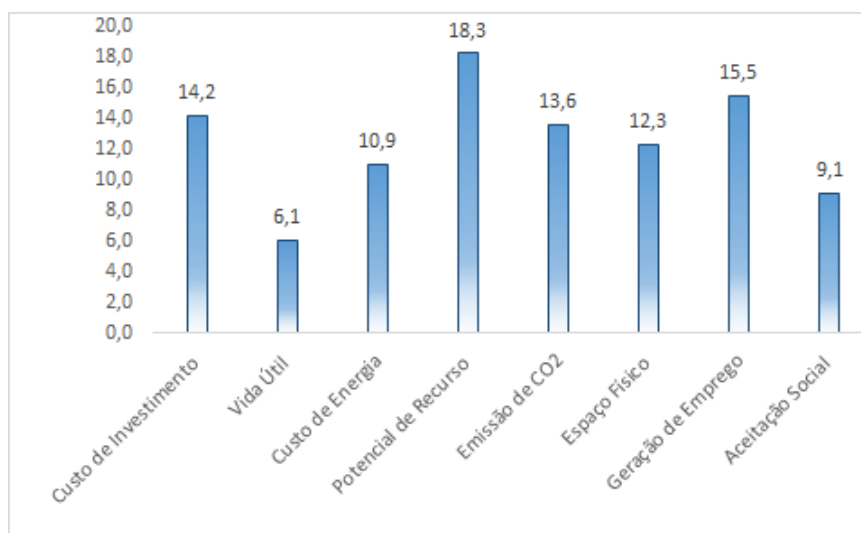


Figura 4.5: Pesos (%) de prioridade global dos subcritérios em relação ao objectivo (Fonte: Dados da investigação).

cionada no subcritério “Geração de Emprego”, com 53,5 %, enquanto a hídrica é prioritária no subcritério “Vida Útil”, com um peso de 38,1 %.

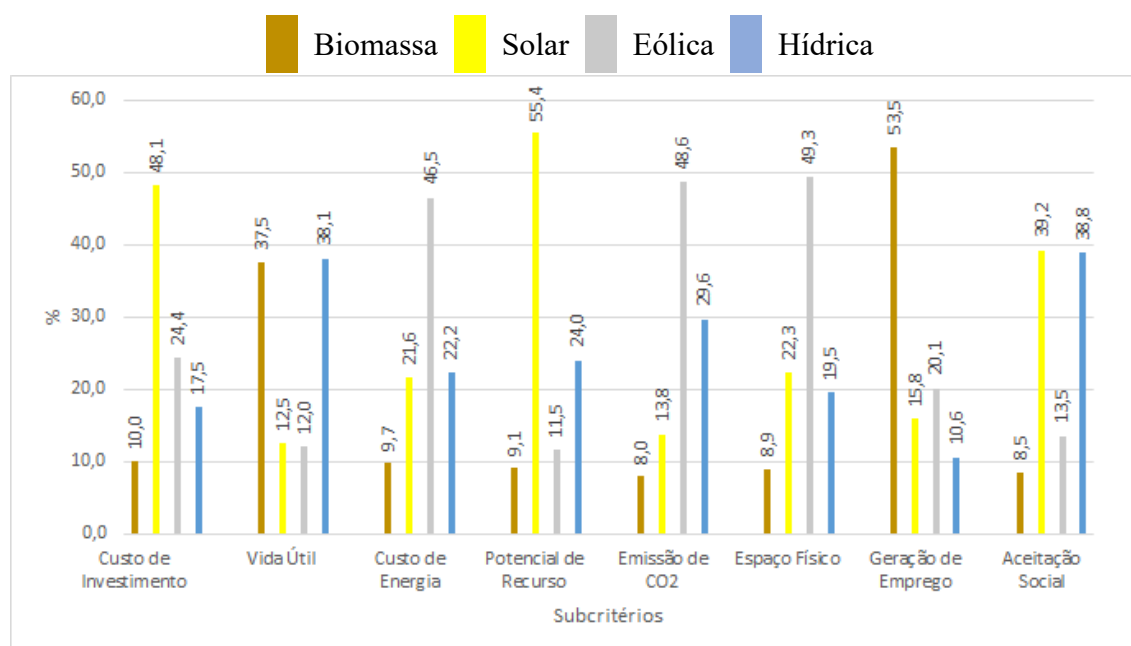


Figura 4.6: Pesos (%) de prioridade das alternativas em relação aos subcritérios (Fonte: Dados da Pesquisa).

Priorização das Alternativas em Relação ao Critério Económico

A Figura 4.7 ilustra os pesos das alternativas de energia no critério económico. Esses resultados foram obtidos pelo produto entre a matriz das alternativas de energia relativas a cada subcritério económico e a matriz dos pesos dos subcritérios (Tabela 4.2). Nesse critério, a energia solar posiciona-se em primeiro lugar com 40,7%, seguida pela energia hídrica com 23,5%.

Tabela 4.2: Priorização das alternativas em relação ao critério económico (Fonte: Dados da Pesquisa).

$$\begin{pmatrix} \text{Alternativas} \\ \text{Biomassa} \\ \text{Solar} \\ \text{Eólica} \\ \text{Hídrica} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cst. I.} & \text{Cst. E.} & \text{P. Rec.} & \text{V. Útil} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{i\text{Eco}} \\ 0,286 \\ 0,221 \\ 0,370 \\ 0,123 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,130 \\ 0,407 \\ 0,229 \\ 0,235 \end{pmatrix}$$

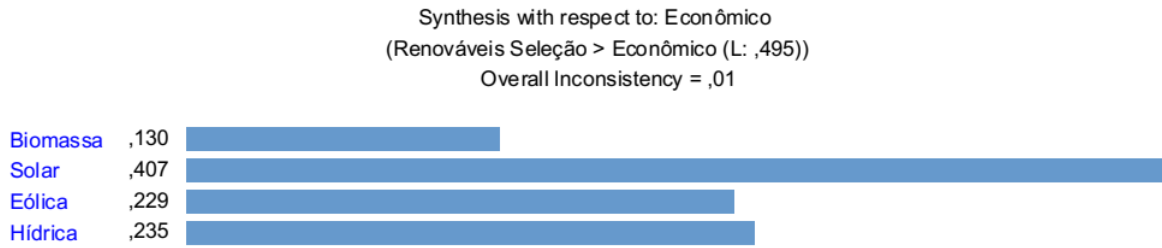


Figura 4.7: Priorização das alternativas em relação ao critério económico (Fonte: Dados da Pesquisa).

Priorização das alternativas em relação ao critério ambiental

A Figura 4.8 ilustra os pesos das alternativas de energia no critério ambiental, obtidos pelo produto entre as matrizes das alternativas de energia relativas a cada subcritério ambiental e a matriz dos pesos dos subcritérios (Tabela 4.3). Neste critério, a energia eólica posiciona-se em primeiro lugar com 48,9%, seguida pela energia solar com 24,8%.

Tabela 4.3: Priorização das alternativas em relação ao critério ambiental (Fonte: Dados da investigação).

$$\begin{pmatrix} \text{Alternativas} \\ \text{Biomassa} \\ \text{Solar} \\ \text{Eólica} \\ \text{Hídrica} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{E. CO}_2 & \text{E. Fís.} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{i_{\text{Amb}}} \\ (0,524) \\ (0,476) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,084 \\ 0,178 \\ 0,489 \\ 0,248 \end{pmatrix}$$

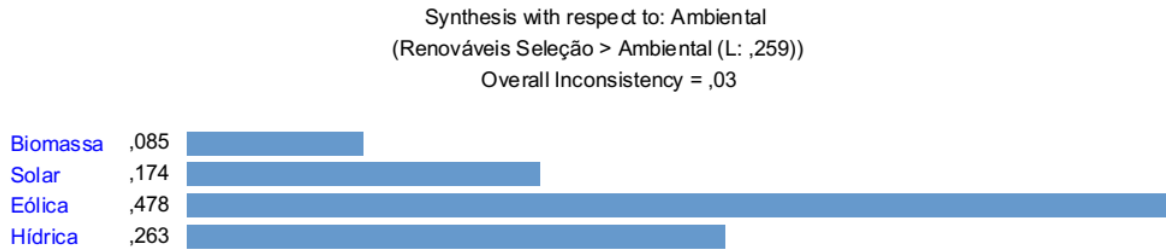


Figura 4.8: Priorização das alternativas em relação ao critério ambiental (Fonte: Dados da investigação).

Priorização das alternativas em relação ao critério social

A Figura 4.9 ilustra os pesos das alternativas de energia no critério social, obtidos pelo produto entre a matriz das alternativas de energia relativas a cada subcritério social e a matriz dos pesos dos subcritérios (Tabela 4.4). Neste critério, a biomassa posiciona-se em primeiro lugar com 36,9%, seguida pela energia solar com 24,5%.

Tabela 4.4: Priorização das alternativas em relação ao critério social (Fonte: Dados da investigação).

$$\begin{pmatrix} \text{Alternativas} \\ \text{Biomassa} \\ \text{Solar} \\ \text{Eólica} \\ \text{Hídrica} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{G. Emp.} & \text{A. Soc.} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{i\text{Soc}} \\ (0,631) \\ (0,369) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,369 \\ 0,245 \\ 0,177 \\ 0,210 \end{pmatrix}$$

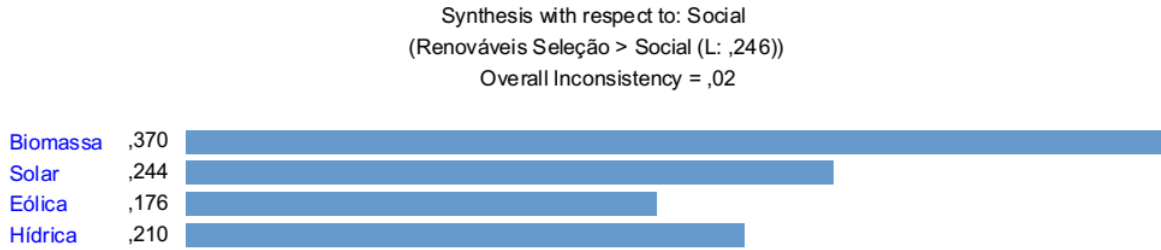


Figura 4.9: Priorização das alternativas em relação ao critério social (Fonte: Dados da investigação).

Priorização Global das Alternativas em Relação ao Objectivo

Os resultados globais agregados dos julgamentos foram obtidos como o produto entre a matriz resultante dos pesos das alternativas de energia relativas a cada critério (composta na primeira coluna pelo peso das alternativas relativas ao critério económico, segunda coluna ao critério ambiental e terceira coluna ao critério social) e a matriz dos pesos dos critérios.

$$\begin{pmatrix} \text{Biomassa} \\ \text{Solar} \\ \text{Eólica} \\ \text{Hídrica} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,130 & 0,084 & 0,369 \\ 0,406 & 0,178 & 0,245 \\ 0,230 & 0,489 & 0,177 \\ 0,235 & 0,248 & 0,210 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,495 \\ 0,259 \\ 0,246 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,177 \\ 0,307 \\ 0,284 \\ 0,232 \end{pmatrix}$$

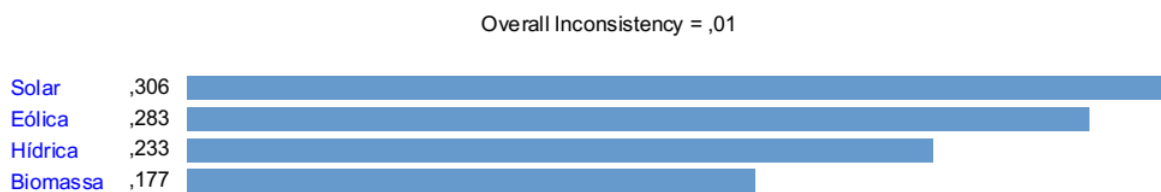


Figura 4.10: Priorização das alternativas em relação ao objectivo geral (Fonte: Dados da Pesquisa).

Os resultados mostram que a Energia solar foi identificada como a melhor alternativa na classificação geral, com 30,6 % do peso, devido à alta disponibilidade de recurso e competitividade económica, seguida pela energia eólica (28,4%), hídrica (23,2%) e biomassa (17,7%). Relativamente a cada critério, a solar foi melhor no critério económico (40,7 %). A Energia eólica destacou-se no critério ambiental, alcançando 47,8 %, devido às menores

emissões de GEE. A biomassa foi a melhor alternativa no critério social, com 37 %, por sua alta aceitação em comunidades rurais e potencial de geração de emprego. A energia hídrica, apesar de amplamente utilizada, apresentou limitações associadas a impactos ambientais e mudanças climáticas.

4.2 Discussão

Os resultados obtidos neste estudo mostram-se em linha com a literatura no que se refere ao uso de métodos de decisão multicritério para a avaliação de fontes de energia renovável, em particular o Processo de Análise Hierárquica (AHP). Tal como reportado por diversos autores, o AHP revela-se uma abordagem ideal para a estruturação e priorização de alternativas energéticas, especialmente quando há necessidade de ponderar múltiplos critérios técnicos, económicos, ambientais e sociais.

Verifica-se uma sobreposição significativa dos critérios adoptados nos diferentes estudos analisados, sendo os domínios económico, social, ambiental e técnico os mais frequentes, o que sustenta os achados de investigações anteriores que sublinham a centralidade destes factores no planeamento energético sustentável. Todavia, é importante sublinhar que a quantidade exacta de critérios e a inclusão de dimensões como risco ou político variam consoante o contexto e os objectivos da investigação. No presente trabalho, a análise em Moçambique restringiu-se aos domínios económico, social e ambiental, o que está em consonância com outros estudos realizados em países em desenvolvimento, onde a limitação de recursos e a urgência de soluções práticas frequentemente condicionam a amplitude da avaliação.

A análise comparativa dos resultados permite observar que a prioridade atribuída aos diferentes critérios é fortemente dependente do contexto geográfico, do perfil institucional e do painel de especialistas consultados. Este comportamento é consistente com a literatura, que aponta para uma considerável variação na importância dos critérios entre diferentes regiões e países. Por exemplo, enquanto o critério económico se mostrou prioritário em Moçambique, na Malásia [1] e na Arábia Saudita [2], a Colômbia [6] deu maior relevo aos critérios técnico, e o estudo da RDC [44] destacou o critério político. Esta heterogeneidade reforça a necessidade de adaptação das metodologias às realidades locais. No que respeita às alternativas energéticas, os dados obtidos evidenciam que as fontes solar fotovoltaica, eólica e biomassa são recorrentes entre as opções avaliadas na maioria dos estudos, com a energia hídrica (ou

pequenas centrais hidroeléctricas) e resíduos sólidos incluídos em contextos específicos. De forma agregada, a energia solar fotovoltaica tende a emergir como a alternativa mais favorável na classificação geral, tendência igualmente documentada na literatura recente. No entanto, a posição relativa das demais fontes varia significativamente, reflectindo não só os pesos atribuídos aos critérios mas também as características regionais e as preferências do painel de avaliadores.

Apesar das variações nos contextos de aplicação e nas prioridades estabelecidas, observa-se que a energia solar fotovoltaica tende a emergir como a alternativa mais favorável na classificação geral, tanto em Moçambique como na Colômbia [6], Malásia [1], Arábia Saudita [2] e no Vietname [65]. Contudo, uma análise criteriosa dos resultados mostra que, para determinados domínios, outras fontes podem revelar-se mais adequadas, como a biomassa no domínio social e a eólica no domínio ambiental, por exemplo. Em síntese, os resultados obtidos neste trabalho reforçam a utilidade do AHP como ferramenta de apoio à decisão, mas também evidenciam que o sucesso do seu uso depende de uma aplicação sensível ao contexto e devidamente fundamentada na realidade local.

Apesar da consistência metodológica dos resultados, importa referir algumas limitações inerentes à abordagem adoptada. Em primeiro lugar, o método AHP, embora eficaz na estruturação e hierarquização de decisões multicritério, depende fortemente do juízo subjectivo dos especialistas envolvidos na comparação dos pares, o que pode introduzir alguma variabilidade nos pesos atribuídos. Em segundo lugar, a selecção dos critérios restringiu-se às dimensões económica, ambiental e social, excluindo, por exemplo, o critério técnico ou político, que em alguns contextos poderiam revelar-se igualmente relevantes. Ademais, a análise não incorporou variações temporais nem factores de incerteza que poderiam influenciar a viabilidade futura das alternativas. Assim, sugere-se que futuras investigações adoptem abordagens complementares que integrem análises probabilísticas, modelos *fuzzy* ou métodos participativos mais amplos, de modo a reforçar a solidez das conclusões e ampliar a aplicabilidade dos resultados ao planeamento energético sustentável em contextos similares.

Análise de Sensibilidade

Segundo Moraes [39], em qualquer modelo de decisão é importante examinar quão sensível é a alternativa escolhida caso as variáveis envolvidas no modelo de decisão sejam alteradas.

No presente modelo, a análise de sensibilidade será aplicada para verificar a variação das prioridades das alternativas em relação às variações dos pesos dos critérios. O software ExpertChoice auxiliará neste processo.

Para a Análise de Sensibilidade, considerar-se-ão os seguintes cenários para os critérios:

1. Cenário 1: “Económico” (33,3%), “Ambiental” (33,3%) e “Social” (33,3%)
2. Cenário 2: “Económico” (25%), “Ambiental” (50%) e “Social” (25%)
3. Cenário 3: “Económico” (25%), “Ambiental” (25%) e “Social” (50%)

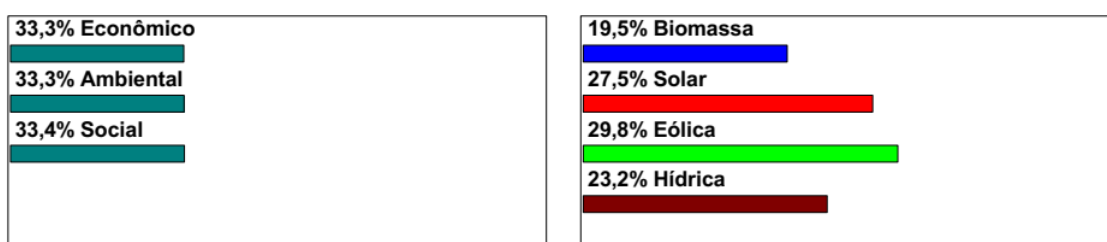


Figura 4.11: Cenário 1: “Económico” (33,3%), “Ambiental” (33,3%) e “Social” (33,3%)

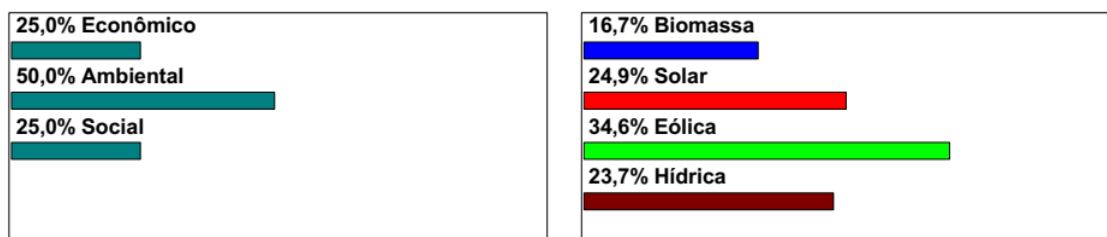


Figura 4.12: Cenário 2: “Económico” (25%), “Ambiental” (50%) e “Social” (25%)

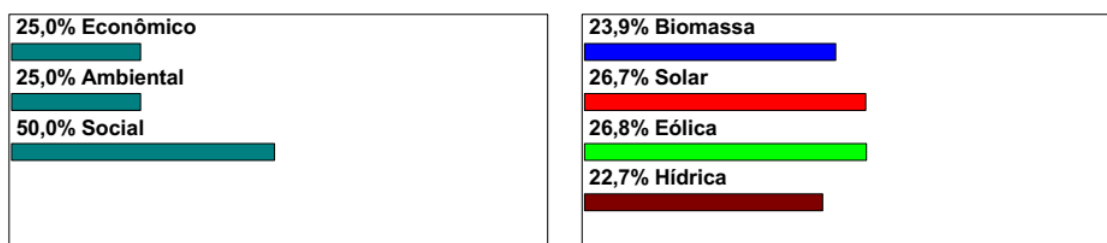


Figura 4.13: Cenário 3: “Económico” (25%), “Ambiental” (25%) e “Social” (50%)

Considerando o cenário de igual peso ($\approx 33,3\%$ para cada critério), os resultados (Figura 4.11) mostram que a energia eólica possui a maior pontuação (29,8%) em relação às

outras alternativas. A energia solar Fotovoltaica tem a segunda maior pontuação (27,5%), e as demais alternativas permanecem na mesma ordem em comparação com o cenário padrão.

A mesma posição das tecnologias é obtida ao incrementar o peso de 50% em um critério e 25% nos outros dois critérios para o cenário 2 (Figura 4.13). E no último cenário (Figura 4.12) tem-se a posição 3 e 4 a variar e manutenção da posição 1 e 2 com a eólica ligeiramente em vantagem, mostrando assim que as prioridades podem variar de acordo com os pesos atribuídos aos critérios.

Capítulo 5

Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusões

A priorização das diferentes fontes de energia constitui um desafio recorrente em diversos países. A abordagem adequada para lidar com essa problemática não consiste simplesmente em eleger uma única fonte de energia a ser priorizada, mas sim em buscar um equilíbrio na diversificação da matriz energética, considerando as diversas opções disponíveis e as suas implicações em termos de sustentabilidade, segurança energética e viabilidade económica.

Neste estudo, foi proposta uma abordagem de tomada de decisão multicritério, baseada no Processo de Hierarquia Analítica (AHP), para avaliar quatro fontes renováveis de geração de energia, nomeadamente: energia solar fotovoltaica, energia hídrica, energia eólica e biomassa. O AHP é uma técnica que permite a análise e comparação de diferentes alternativas, considerando múltiplos critérios organizados em níveis hierárquicos de importância. Foram considerados três critérios principais, nomeadamente o económico, o social e o ambiental, bem como oito subcritérios: custo de instalação, custo da energia, disponibilidade de recursos e vida útil, no âmbito do critério económico; emissão de gases com efeito de estufa e espaço físico, no âmbito do critério ambiental; geração de emprego e aceitação social, no âmbito do critério social.

Os resultados indicam que a melhor alternativa energética é a energia solar, com um peso de 30,6%, seguida da energia eólica (28,4%), da hídrica (23,3%) e, por fim, da biomassa (17,7%). A avaliação incluiu também a análise das alternativas mais favoráveis segundo cada um dos três critérios. No critério económico, a energia solar destacou-se (40,7%); no critério

ambiental, a energia eólica foi a mais valorizada (47,8%); e no critério social, a biomassa revelou-se a mais relevante (37,0%).

A análise de sensibilidade foi aplicada com o objectivo de verificar a estabilidade das prioridades das alternativas perante variações nos pesos atribuídos aos critérios. Os resultados demonstraram que pequenas alterações nos pesos podem modificar as classificações relativas, embora as alternativas mais destacadas tendam a manter as suas posições dominantes.

O estudo evidenciou a utilidade do AHP para orientar decisões estratégicas em matéria de planeamento energético, contemplando aspectos económicos, sociais e ambientais. A abordagem demonstrou que soluções sustentáveis requerem o equilíbrio entre múltiplos critérios e a adaptação às condições locais. O desenvolvimento harmonioso das diversas fontes poderá reforçar a resiliência energética do país e contribuir para o cumprimento dos Objectivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

5.2 Recomendações

As tecnologias de energias são frequentemente projectadas com base em dados e cenários padrão. No entanto, as condições locais, como o clima, a cultura, o contexto social, económico e político, podem influenciar de forma significativa os resultados e a eficácia dessas tecnologias. Por conseguinte, recomenda-se que futuras pesquisas explorem modelos adaptados à realidade de comunidades específicas, aplicando metodologias multicritério, como o AHP, a escalas mais locais, de modo a reflectir com maior precisão as necessidades e potencialidades de cada região.

Sugere-se, igualmente, a inclusão de novos critérios e subcritérios que possam ser obtidos directamente em campo, por exemplo, por via de entrevistas ou consultas públicas. Este procedimento poderá ampliar o alcance participativo do processo de decisão, reforçando o carácter contextualizado da análise.

Recomenda-se ainda o fortalecimento das políticas públicas nacionais, através da inclusão de mecanismos de participação comunitária obrigatórios, especialmente nos processos de planificação e licenciamento de projectos de energias renováveis. Do mesmo modo, é urgente a criação de um quadro legal que favoreça a geração distribuída de base comunitária, com incentivos fiscais, linhas de financiamento acessíveis e regulamentação específica para a mi-

crogeração. A inclusão activa das comunidades locais poderá aumentar a aceitação social, reduzir conflitos e promover a sustentabilidade dos projectos a longo prazo.

Referências bibliográficas

- [1] Ahmad, S. and Tahar, R. M. (2014). Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process : A case of Malaysia. *Renewable Energy*, 63:458–466.
- [2] Al, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D., and Al-haddad, K. (2016). A multi-criteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16:137–150.
- [3] ALER (2017). *Renewables in Mozambique – National Status Report*. ALER.
- [4] ALER and AMER (2021). Renováveis em moçambique.
- [5] ALER and AMER (2023). Resumo: Renováveis em moçambique 2023.
- [6] Algarín, C. R., Llanos, A. P., and Castro, A. O. (2017). International journal of energy economics and policy an analytic hierarchy process based approach for evaluating renewable energy sources. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7:38–47.
- [7] Brunelli, M. (2015). *Introduction to the Analytic Hierarchy Process*. SpringerBriefs in Operations Research.
- [8] Burton, J. and Hubacek, K. (2007). Is small beautiful? A multicriteria assessment of small-scale energy technology applications in local governments. *Energy Policy*, 35(12):6402–6412.
- [9] Campos, F. M., Araújo, D. N., Toledo, O. M., do Espírito Santo Fernandes, L., and Borba, A. T. A. (2022). Tecnologias e aplicações de sistemas de armazenamento de energia para suporte à integração de fontes renováveis no brasil. *IX Congresso Brasileiro de Energia Solar*.

- [10] Celestino, N. M., Calili, R. F., and Louzada, D. R. (2018). Método ahp para avaliação e escolha de fontes de geração para a segurança da expansão de energia-análise do caso do nordeste brasileiro. *Conference: 50° Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.
- [11] Chenje, M. (2000). Estado do ambiente na bacia do zambeze 2000.
- [12] Cortez, L. A. B., Lora, E. E. S., and Gómes, E. O. (2008). *BIOMASSA para energia*. Editora da Unicamp.
- [13] Crawford, G. and Williams, C. (1985). A note on the analysis of subjective judgment matrices. *Journal of Mathematical Psychology*, 29(4):387–405.
- [14] Cunha, B. G., Souza, E. C. D., Lariane, T., Tito, H., Da, J. J., and Nascimento, S. (2018). Eficiências e efetividades de sistemas geotérmicos para geração de energia: Uma revisão. *CONAPESC*.
- [15] Dias, L. C., Freire, F., and Geldermann, J. (2019). *New Perspectives in Multiple Criteria Decision Making*. Springer Nature Switzerland AG.
- [16] Edenhofer, O., Madruga, R. P., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., and von Stechow, C. (2011). Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change.
- [17] Forman, E. and Peniwati, K. (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 108(1):165–169.
- [18] Fortes, A. G., Mutenda, F. M., and Raimundo, B. (2020). Energias Renováveis em Moçambique: disponibilidade, geração, uso e tendências futuras. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, 23(1):6.
- [19] Franco, J. A. B. and Battistele, R. A. G. (2022). Objetivos de desenvolvimento sustentável no contexto da pandemia de covid: Uma análise sob a Ótica da teoria das capacidades dinâmicas.
- [20] Fritsche, U. R., Berndes, B., Cowie, A. L., Dale, V. H., Kline, K. L., and ... (2017). Sustainable energy options and implications for land use.

- [21] Goldemberg, J. (2010). *Energy, Environment and Development*. Cromwell Press Group, 2 edition.
- [22] Gonçalves, P., Sampaio, V., Orestes, M., and González, A. (2017). Photovoltaic solar energy : Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74:590–601.
- [23] Gueifão, C. (2000). *Renewable Energy Atlas of Mozambique*. Gesto-Energia, S.A., 1 edition.
- [24] Gupta, A. (2008). *Large Rivers: Geomorphology and Management*. Wiley, 1 edition.
- [25] Hogueane, A. M. (2007). Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique - Diagnosis of Mozambique Coastal Zone Antonio. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 7(1):69–82.
- [26] Hummel, J. M., Bridges, J. F., and IJzerman, M. J. (2014). Group decision making with the analytic hierarchy process in benefit-risk assessment: A tutorial. *Patient*, 7(2):129–140.
- [27] IEA (2019). Africa Energy Outlook 2019 - Overview. *World Energy Outlook Special Report*.
- [28] IJHD (2015). Hydropower status report 2015.
- [29] INE (2019). IV Recenseamento Geral da População e Habitação, 2017 Resultados Definitivos – Moçambique. *Instituto Nacional de Estatística, Maputo-Moçambique*.
- [30] IRENA (2020). Renewable power generation costs in 2020.
- [31] IRENA (2021). Perspectiva da transição energética mundial.
- [32] JICA (2018). *Integrated Master Plan: Mozambique Power System Development Final Report*. JERA Co.
- [33] Løken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(7):1584–1595.
- [34] Luís, C., Chichango, F., Jr, P. M., and Macanguisse, J. (2021). The potential of renewable energy in mozambique: An overview. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 11.

- [35] ME (2011). Estratégia de desenvolvimento de energias novas e renováveis (edendr) para o período de 2011 - 2025.
- [36] MIREME (2020). Programa nacional de energia para todos (leilões de energias renováveis).
- [37] MITADER (2018). *Desflorestamento em Moçambique (2003 - 2016)*. MITADER.
- [38] Mohamed, S. F. P., Baharom, F., Deraman, A., Terengganu, K., Tarawneh, O., and Yusof, Y. (2022). Software process assessment and certification: application of the analytic hierarchy process for priority determination. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 14.
- [39] Moraes, E. and Santaliestra, R. (2008). Modelo de Decisão com Múltiplos Critérios para Escolha de Software de Código Aberto e Software de Código Fechado. *Revista Organizações em Contexto*, 4(7):59–83.
- [40] Navneet Bhushan, K. R. (2004). *Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process*. Decision Engineering. Springer, 1 edition.
- [41] Ngo, L. (2012). Approximation method of analytic hierarchy process (ahp) as developed by dr t.l. saaty and others.
- [42] Nicholson, S. and Heath, G. (2021). Life cycle emissions factors for electricity generation technologies.
- [43] ONU (2015). Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable.
- [44] Peñalvo-I, E., C, F. J., and Morcillo, A. I. (2017). A methodology for analysing sustainability in energy scenarios. *Sustainability*, 9(9):1590.
- [45] Pinto, M. d. O. (2014). *Fundamentos de energia eólica*. LTC.
- [46] Ponte, C. B. (2019). Aproveitamentos geotérmicos nos açores.
- [47] REN21 (2022). Renewables 2022 global status report.
- [48] Ribeiro, R. A. (2012). Sustainable development: an ecological economics perspective. *Estudos Avançados*, 26(74):65–92.

- [49] Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGRAW-HILL.
- [50] Saaty, T. L. (2012). *76-Models , Methods , Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process Second Edition*, volume 175. International Series in Operations Research and Management Science.
- [51] Sebitosi, A. B. and da Graça, A. (2009). Cahora Bassa and Tete Province (Mozambique): A great potential for an industrial hub in Southern Africa. *Energy Policy*, 37(5):2027–2032.
- [52] Serpa, M. P. N. (2001). Comunidades caiçaras e seus impactos.
- [53] Silva, A. L. R. (2019). Caderno temático 3: matriz energética e aprimoramento da sistematização de inserção ambiental no planejamento da expansão do sistema elétrico – Projeto Sinapse.
- [54] Silva, D. M. R. (2007). Aplicação do Método AHP para Avaliação de Projetos Industriais. *Dissertação Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio*.
- [55] Singhal, B. B. S. and Gupta, R. P. (2010). *Hydraulic Properties of Rocks*. Springer, 2 edition.
- [56] Siteo, A. A., Remane, I., Ribeiro, N., Facão, M. P., Mate, R., Nhamirre, J., Walker, S., Murray, L., and Melo, J. (2016). Identificação e análise dos agentes e causas directas e indirectas de desmatamento e degradação florestal em moçambique.
- [57] Stiles, G. and Murove, C. (2018). Das energias renováveis e eficiência energética na 2018.
- [58] Tabak, J. (2009). *Solar and Geothermal Energy (Energy and the Environment)*. Facts On File, Inc.
- [59] UN (2015). The Millennium Development Goals Report. *United Nations*.
- [60] UNCED (1987). The brundtland report: 'our common future'.
- [61] UNFCCC (1997). United nations framework on climate change kyoto protocol.

- [62] Unidas, N. (1992). *Agenda 21 - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento*. Nações Unidas.
- [63] Vargas, L. G. (1990). An overview of the analytic hierarchy process and its applications. *European Journal of Operational Research*, 48(1):2–8.
- [64] Vargas, R. V. (2010). Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process - AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio. *PMI Global Congress 2010 - North America*, 32(3):1–22.
- [65] Wang, C. N., Kao, J. C., Wang, Y. H., Nguyen, V. T., Nguyen, V. T., and Husain, S. T. (2021). A multicriteria decision-making model for the selection of suitable renewable energy sources. *Mathematics*, 9.
- [66] Wei, M., Patadia, S., and Kammen, D. M. (2010). Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy*, 38(2):919–931.
- [67] Wüstenhagen, R., Wolsink, M., and Bürer, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, 35(5):2683–2691.

Apêndice A

Questionário Aplicado

Prezado(a) participante, Por favor, compare (entre A e B) cada um dos critérios, subcritérios e as alternativas apresentadas, atribuindo pesos segundo o grau de importância de um sobre o outro usando a escala de comparação Tabela A.1.

Tabela A.1: Tabela de escala de comparação

Escala/Intensidade	Definição
1	Igual importância
3	Importância moderada de uma sobre a outra
5	Importância forte de uma sobre a outra
7	Importância muito forte de uma sobre a outra
9	Importância extrema
2,4,6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes

Instrução

Se na comparação dos critérios A e B considerar que o critério A tem mais importância em relação ao critério B, então irá atribuir um peso de relevância ao critério de maior importância segundo a escala apresentada na tabela acima (Tabela A.1).

A	-	-	B
X	7		Y

Importância muito forte (7) de X sobre Y

A	-	-	B
X		5	Y

Importância forte (5) de Y sobre X

A	-	-	B
X	1		Y

Igual importância (1) entre Y e X

Parte I

1. Compare os Critérios A e B, atribuindo grau de importância (Tabela A.1) de um critério em relação ao outro no contexto de avaliação dos recursos renováveis para geração sustentável de energia em Moçambique.

C1:			
A	-	-	B
Económico			Ambiental
Económico			Social
Social			Ambiental

2. Entre os Subcritérios A e B, qual é mais importante/favorável na avaliação da sustentabilidade nas Energias Renováveis em Moçambique tendo em conta cada Critério (C)?

SC1: Económico			
A	-	-	B
Custo de Investimento			Vida útil
Custo de Investimento			Potencial de Recurso
Custo de Investimento			Custo da Energia
Vida útil			Potencial de Recurso
Vida útil			Custo da Energia
Potencial de Recurso			Custo da Energia

SC2: Ambiental			
A	-	-	B
Emissão CO2			Espaço Físico

SC3: Social			
A	-	-	B
Geração de Emprego			Aceitação Social

Parte II

Tabela A.2: Definição de pontuação de importância e dados da literatura para subcritérios económicos, ambientais e sociais

(C)	Subcritério (SC)	Alternativas	Dados	Definição de Importância	Referências	
C1	SC 1.1.	Biomassa	2353			
	Custo de Instalação (KW/USD)	Solar (PV)	857	Maior Custo de Instalação indica menor pontuação de importância (menor sustentabilidade)	[30]	
		Eólica	1325			
		Hídrica	2135			
		Biomassa	2353			
	SC 1.2.	Biomassa	0.067			
	Custo de Energia (USD/KWh)	Solar (PV)	0.048	Maior Custo de Energia indica menor pontuação de importância (menor sustentabilidade)	[30]	
		Eólica	0.033			
		Hídrica	0.048			
	SC 1.3.	Biomassa	40			
	Vida Útil (Anos)	Solar (PV)	25	Maior tempo de Vida Útil indica maior pontuação de importância (maior sustentabilidade)	[66]	
		Eólica	25			
Hídrica		40				
SC 1.4.	Biomassa	2				
Potencial de Recurso (GW)	Solar (PV)	23000	Maior potencial de recursos indica maior pontuação de importância (maior sustentabilidade)	[3]		
	Eólica	5				
	Hídrica	19				
C2	SC 2.1.	Biomassa	52	Maior valor de emissão		
	Emissão de CO ₂ (gCO ₂ e/KWh)	Solar (PV)	43	indica menor pontuação de importância	[42]	
		Eólica	13	de importância		
		Hídrica	21	(menor sustentabilidade)		
		Biomassa	52			
	SC 2.2.	Biomassa	500			
	Espaço Físico (m ² /MWh)	Solar (PV)	10	Maior área necessária indica menor pontuação de importância (menor sustentabilidade)	[20]	
		Eólica	1			
		Hídrica	10			
	C3	SC 3.1.	Biomassa	72		
		Geração de Emprego (Emprego/MW)	Solar (PV)	10	Maior Geração de Emprego indica maior pontuação de importância (maior sustentabilidade)	[1]
			Eólica	11		
Hídrica			5			
SC 3.2.		Biomassa	59		[16]	
		Aceitação Social (%)	Solar (PV)	80	Maior Aceitação Social indica maior pontuação de importância (maior sustentabilidade)	[8]
			Eólica	71		[67]
			Hídrica	80		

3. Compare as alternativas A e B de Energias renováveis, tomando em conta cada Subcritério (SC), atribuindo a uma delas o peso de importância (preferência) no contexto de geração sustentável de Energias Renováveis em Moçambique. Os dados acima de cada tabela de comparação podem ser usados no auxílio das comparações.

Subcritério (SC)	Alternativas de Energias Renováveis				Referências
	Solar	Hídrica	Biomassa	Eólica	
SC 1.1. Custo de Instalação (USD/KW)	857	2135	2353	1325	(IRENA, 2020)

SC 1.1: Custo de Investimento			
A	-	-	B
Biomassa			Solar
Biomassa			Eólica
Biomassa			Hídrica
Solar			Eólica
Solar			Hídrica
Hídrica			Eólica

Subcritério (SC)	Alternativas de Energias Renováveis				Referências
	Solar	Hídrica	Biomassa	Eólica	
SC 1.2. Custo de Energia	0.048	0.048	0.067	0.033	(IRENA, 2020)

SC 1.2: Custo de Energia				
A	-	-	B	
Biomassa			Solar	
Biomassa			Eólica	
Biomassa			Hídrica	
Solar			Eólica	
Solar			Hídrica	
Hídrica			Eólica	

Subcritério (SC)	Alternativas de Energias Renováveis				Referências
	Solar	Hídrica	Biomassa	Eólica	
SC 1.3. Vida Útil (Anos)	25	40	40	25	(Wei et al. 2010)

SC 1.3: Vida Útil				
A	-	-	B	
Biomassa			Solar	
Biomassa			Eólica	
Biomassa			Hídrica	
Solar			Eólica	
Solar			Hídrica	
Hídrica			Eólica	

Subcritério (SC)	Alternativas de Energias Renováveis				Referências
	Solar	Hídrica	Biomassa	Eólica	
SC 1.4. Potencial de Recurso (GW)	23000	19	2	5	(ALER, 2017)

SC 1.4: Potencial de Recurso			
A	-	-	B
Biomassa			Solar
Biomassa			Eólica
Biomassa			Hídrica
Solar			Eólica
Solar			Hídrica
Hídrica			Eólica

Subcritério (SC)	Alternativas de Energias Renováveis				Referências
	Solar	Hídrica	Biomassa	Eólica	
SC 2.1. Emissão de CO₂ (gCO₂e/kWh)	43	21	52	13	(Nicholson and Heath 2021)

SC 2.1: Emissão de CO ₂			
A	-	-	B
Biomassa			Solar
Biomassa			Eólica
Biomassa			Hídrica
Solar			Eólica
Solar			Hídrica
Hídrica			Eólica

Subcritério (SC)	Alternativas de Energias Renováveis				Referências
	Solar	Hídrica	Biomassa	Eólica	
SC 2.2. Espaço Físico (m^2/mWh)	10	10	500	1	(Fritsche et al. 2017)

SC 2.2: Espaço Físico				
A	-	-	B	
Biomassa			Solar	
Biomassa			Eólica	
Biomassa			Hídrica	
Solar			Eólica	
Solar			Hídrica	
Hídrica			Eólica	

Subcritério (SC)	Alternativas de Energias Renováveis				Referências
	Solar	Hídrica	Biomassa	Eólica	
SC 3.1. Geração de Emprego (Emprego/MW)	10	5	72	11	(Ahmad and Tahar 2014)

SC 3.1: Geração de Emprego				
A	-	-	B	
Biomassa			Solar	
Biomassa			Eólica	
Biomassa			Hídrica	
Solar			Eólica	
Solar			Hídrica	
Hídrica			Eólica	

Subcritério (SC)	Alternativas de Energias Renováveis				Referências
	Solar	Hídrica	Biomassa	Eólica	
SC 3.2. Aceitação Social (%)	80	80	59	71	(Edenhofer et al. 2011)

SC 3.2: Aceitação Social			
A	-	-	B
Biomassa			Solar
Biomassa			Eólica
Biomassa			Hídrica
Solar			Eólica
Solar			Hídrica
Hídrica			Eólica

Apêndice B

Resultados da comparação

Tabela B.1: Comparação pareada e peso de prioridade dos critérios

Critérios	Económico	Ambiental	Social	M. Geo	Peso	Peso %
Económico	1,00	2,06	1,87	1,568	0,495	49,5
Ambiental	0,48	1,00	1,13	0,819	0,259	25,9
Social	0,54	0,88	1,00	0,778	0,246	24,6

Tabela B.2: Comparação pareada entre os subcritérios Económicos e o peso de prioridade dos subcritérios

SC Económico	Custo I	Vida ú	Pot. R	Custo E	M. Geo	Peso	Peso %
Custo de Invest.	1,00	2,48	0,76	1,25	1,24	0,286	28,6
Vida útil	0,40	1,00	0,36	0,55	0,53	0,123	12,3
Pot. de Recur.	1,31	2,75	1,00	1,83	1,60	0,370	37,0
Custo de Energia	0,80	1,83	0,58	1,00	0,96	0,221	22,1

Tabela B.3: Comparação pareada entre os subcritérios Ambiental

SC Ambiental	Emis. CO2	Espaço Fís.	M. Geo	Peso	Peso (%)
Emissão CO2	1,00	1,10	1,049	0,524	52,4
Espaço Fís.	0,91	1,00	0,953	0,476	47,6

Tabela B.4: Comparação pareada entre os subcritérios Social

SC Social	Ger. de Emprego	Aceit. Social	M. Geo	Peso	Peso (%)
Ger. de emprego	1,00	1,71	1,307	0,631	63,1
Aceit. Social	0,59	1,00	0,765	0,369	36,9

Tabela B.5: Comparação pareada entre as alternativas para SC Custo de Investimento

Alternativas	Biomassa	Solar	Eólica	Hídrica	Méd. G	Peso	Peso %
Biomassa	1,00	0,22	0,43	0,51	0,47	0,10	10,04
Solar	4,49	1,00	2,26	2,53	2,25	0,48	48,11
Eólica	2,34	0,44	1,00	1,63	1,14	0,24	24,36
Hídrica	1,95	0,40	0,58	1,00	0,82	0,17	17,49

Tabela B.6: Comparação pareada entre as alternativas para SC Vida Útil

Alternativas	Biomassa	Solar	Eólica	Hídrica	Méd. G	Peso	Peso %
Biomassa	1,00	3,12	3,11	0,95	1,75	0,375	37,5
Solar	0,32	1,00	1,05	0,34	0,58	0,125	12,5
Eólica	0,32	0,95	1,00	0,31	0,56	0,120	12,0
Hídrica	1,05	2,95	3,18	1,00	1,77	0,381	38,1

Tabela B.7: Comparação pareada entre as alternativas para SC Potencial de Recurso

Alternativas	Biomassa	Solar	Eólica	Hídrica	Méd. G	Peso	Peso %
Biomassa	1,00	0,22	0,64	0,34	0,47	0,091	9,1
Solar	4,45	1,00	4,62	3,27	2,86	0,554	55,4
Eólica	1,53	0,22	1,00	0,38	0,60	0,115	11,5
Hídrica	2,95	0,31	2,62	1,00	1,24	0,240	24,0

Tabela B.8: Comparação pareada entre as alternativas para SC Custo de Energia

Alternativas	Biomassa	Solar	Eólica	Hídrica	Méd. G	Peso	Peso %
Biomassa	1,00	0,38	0,29	0,38	0,45	0,097	9,7
Solar	2,62	1,00	0,38	1,00	1,00	0,216	21,6
Eólica	3,50	2,60	1,00	2,37	2,15	0,465	46,5
Hídrica	2,66	1,00	0,42	1,00	1,03	0,222	22,2

Tabela B.9: Comparação pareada entre as alternativas (Tecnologias) tendo em conta o SC Emissão CO2

Alternativas	Biomassa	Solar	Eólica	Hídrica	M. Geo.	Peso	Peso %
Biomassa	1,00	0,44	0,19	0,31	0,40	0,08	8,00
Solar	2,27	1,00	0,27	0,36	0,69	0,14	13,77
Eólica	5,15	3,67	1,00	1,85	2,43	0,49	48,62
Hídrica	3,24	2,75	0,54	1,00	1,48	0,30	29,61

Tabela B.10: Comparação pareada entre as alternativas (Tecnologias) tendo em conta o SC Espaço Físico

Alternativas	Biomassa	Solar	Eólica	Hídrica	M. Geo.	Peso	Peso %
Biomassa	1,00	0,28	0,28	0,39	0,42	0,087	8,7
Solar	3,54	1,00	0,33	0,90	1,01	0,211	21,1
Eólica	3,58	3,05	1,00	2,86	2,36	0,493	49,3
Hídrica	2,59	1,11	0,35	1,00	1,00	0,209	20,9

Tabela B.11: Comparação pareada entre as alternativas (Tecnologias) tendo em conta o SC Geração de Emprego

Alternativas	Biomassa	Solar	Eólica	Hídrica	Méd. G	Peso	Peso %
Biomassa	1,00	3,00	2,00	4,00	2,213	0,463	46,3
Solar	0,33	1,00	0,50	3,00	0,841	0,176	17,6
Eólica	0,50	2,00	1,00	3,00	1,316	0,275	27,5
Hídrica	0,25	0,33	0,33	1,00	0,408	0,085	8,5

Tabela B.12: Comparação pareada entre as alternativas (Tecnologias) tendo em conta o SC Aceitação Social

Alternativas	Biomassa	Solar	Eólica	Hídrica	Méd. G	Peso	Peso %
Biomassa	1,00	0,28	0,46	0,24	0,42	0,085	8,5
Solar	3,61	1,00	3,35	1,12	1,92	0,392	39,2
Eólica	2,19	0,30	1,00	0,29	0,66	0,135	13,5
Hídrica	4,20	0,90	3,44	1,00	1,90	0,388	38,8