

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KOFFI DODZI ASSIGNO

DIVERSIFICAÇÃO DE MATRIZ ENERGÉTICA COMO SOLUÇÃO À PENÚRIA DE  
ELETRICIDADE NA ÁFRICA SUBSAARIANA: O CASO DO TOGO

CURITIBA

2021

KOFFI DODZI ASSIGNO

DIVERSIFICAÇÃO DE MATRIZ ENERGÉTICA COMO SOLUÇÃO À PENÚRIA DE  
ELETRICIDADE NA ÁFRICA SUBSAARIANA: O CASO DO TOGO

Trabalho de Dissertação de Mestrado apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Marco Detzel.

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

A848d

Assigno, Koffi Dodzi

Diversificação da matriz energética como solução à penúria de  
eletricidade na África subsaariana: o caso do Togo [recurso eletrônico] / Koffi  
Dodzi Assigno. – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e  
Ambiental, 2021.

Orientador: Daniel Henrique Marco Detzel

1. Energia – Consumo – África. 2. Recursos energéticos. 3. Eletricidade. I.  
Universidade Federal do Paraná. II. Detzel, Daniel Henrique Marco. III.  
Título.

CDD: 339.4706681

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **KOFFI DODZI ASSIGNO** intitulada: **Diversificação da Matriz Energética Como Solução à Penúria de Eletricidade na África Subsaariana: o caso de Togo.**, sob orientação do Prof. Dr. DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 03 de Março de 2021.

Assinatura Eletrônica

08/03/2021 14:13:47.0

DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/03/2021 08:54:12.0

MAURICIO PEREIRA CANTÃO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ )

Assinatura Eletrônica

10/03/2021 16:28:15.0

ALEXANDRE KOLODYNISKIE GUETTER  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

09/03/2021 09:07:06.0

DEBORA CINTIA MARCILIO  
Avaliador Externo (INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O  
DESENVOLVIMENTO )

## AGRADECIMENTOS

Disponho meus sinceros agradecimentos:

- Primeiramente a Deus, pela oportunidade de estar aprendendo e evoluindo sempre.
- À **Universidade Federal do Paraná**, pelos conhecimentos adquiridos em Engenharia Civil.
- Ao **PPGERHA/UFPR** pelo espaço, cursos e pesquisas disponibilizados.
- Ao **Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq)** pelo apoio financeiro oferecido, sem o qual seria difícil prosseguir o estudo.
- À **Direction Générale de la Météorologie Nationale du Togo** pelo fornecimento dos dados requisitados para o desenvolvimento da pesquisa.
- Ao Professor, Dr. **Daniel Henrique Marco Detzel**, pela disposição e empenho em nos orientar durante estes dois semestres. Obrigado pela oportunidade de desenvolver este trabalho.
- Aos professores que me inspiraram a prosseguir por este caminho, dando-me base para a minha formação profissional.
- Aos meus pais e familiares, especialmente à minha mãe **Afi Cécile Amavi**, por ser um modelo de inspiração, pela confiança e pelas orações durante toda a minha trajetória aqui no Brasil.
- Aos Pe. **Irénée Komlan Dossou** e Pe. **Jean-Paul Komi Sikipé** pelos conselhos, pelas motivações e orações direcionadas à minha pessoa.
- Aos Amigos que diretamente ou indiretamente compactuaram com essa conquista e me auxiliaram durante a minha estadia aqui no Brasil.

“La valeur d’une idée ne se mesure qu’à ses conséquences pratiques.” William James

## RESUMO

O continente Africano se revela um dos mais ricos em recursos energéticos, porém a sua capacidade de exploração e de uso é mínima. A grande maioria dos países enfrenta crises energéticas. No caso do Togo, a singularidade da fonte energética acarretou a dependência do sistema elétrico de uma única fonte. Observa-se, portanto, um aproveitamento inadequado da variedade das fontes notadamente fotovoltaica, eólica, gás natural, nuclear, entre outros. O presente estudo propõe a diversificação de matriz energética como uma solução adequada e eficiente para mitigar a penúria de eletricidade e os problemas decorrentes, e almejar independência e autossuficiência energética. A preocupação de criar um sistema que garanta a segurança no fornecimento de energia, propicie tarifas baixas e que seja ambientalmente sustentável, bem como as características climáticas e hidrográficas, fizeram com que fossem adotadas fontes renováveis, tais como hidrelétrica, fotovoltaica e eólica. A fim de elaborar uma combinação ótima entre as três fontes de energia, foi elaborada uma abordagem baseada na Moderna Teoria de Portfólio de Markowitz, com o objetivo de encontrar a fronteira eficiente entre as fontes. Em seguida, foram elaboradas cartografias, a partir do *software* QGIS, que apresentam as regiões potencialmente propícias para as três fontes estudadas e que guiaram a coleta de dados das séries históricas de vazão, de velocidade de vento e de irradiação solar. Por fim, foi encontrada uma nova matriz otimizada, composta das três fontes anteriormente citadas e capaz de suprir a demanda nacional em eletricidade.

**Palavras-chave:** Fontes de energia renovável; Autossuficiência energética; Diversificação da matriz elétrica; Teoria de Portfólios.

## ABSTRACT

The African continent proves to be one of the richest in energy resources, but its capacity for exploration and use is minimal. The vast majority of countries face energy crises. In the case of Togo, the singularity of the energy source resulted in the dependence of the electrical system on a single source. Therefore, there is an inadequate use of the variety of sources notably photovoltaic, wind power, natural gas, nuclear, among others. The present study presents the diversification of the energy matrix as an adequate and efficient solution to mitigate the shortage of electricity and the resulting problems, and to aim for energy independence and self-sufficiency. The concern to create a system that guarantees the security of energy supply, that provides low fares and that is environmentally sustainable, and the climatic and hydrographic characteristics, led to the adoption of renewable sources such as hydroelectric, photovoltaic and wind power. In order to elaborate an optimal combination between the three energy sources addressed in this work, an approach based on Markowitz's Modern Portfolio Theory was adopted, with the objective of finding the efficient frontier between the sources. Additionally, some maps were made by using the QGIS software, which presents the regions with a high potential for the three studied sources and which guided the data collection of the historical series of flow, wind speed and solar irradiation. Finally, a new optimized matrix was found, composed of the three sources previously mentioned and capable of fulfilling the national demand for electricity.

**Keywords:** Renewable energy sources; Energy self-sufficiency; Diversification of the electrical matrix; Theory of Portfolios.

## RÉSUMÉ

Le continent africain s'avère être l'un des plus riches en ressources énergétiques, mais sa capacité d'exploration et d'utilisation est minime. La grande majorité des pays est confrontée à des crises énergétiques. Dans le cas du Togo, la singularité de la source d'énergie a entraîné la dépendance du système électrique vis-à-vis d'une seule source. Par conséquent, il existe une exploration inadéquate de la variété des ressources, notamment photovoltaïque, éolien, gaz naturel, nucléaire, entre autres. La présente étude propose la diversification de la matrice énergétique comme une solution adéquate et efficace pour atténuer la pénurie d'électricité et les problèmes qui en résultent, et viser l'indépendance énergétique et l'autosuffisance. Le souci de créer un système garantissant la sécurité de l'approvisionnement énergétique, des tarifs bas et respectueux de l'environnement, et les caractéristiques climatiques et hydrographiques, a induit à l'adoption des sources renouvelables telles que l'hydroélectricité, le photovoltaïque et l'éolien. Afin d'élaborer une combinaison optimale entre les trois sources d'énergie abordées dans ce travail, une approche basée sur la théorie du portefeuille moderne de Markowitz a été adoptée, dans le but de trouver la frontière efficace entre les sources. En suite, des cartographies ont été élaborées à l'aide du logiciel QGIS, qui présente les régions ayant un fort potentiel pour les trois sources étudiées et qui ont guidé la collecte de données sur les séries historiques de débits, de vitesse du vent et d'irradiation solaire. Enfin, une nouvelle matrice optimisée a été trouvée, composée des trois sources précédemment citées et capable de répondre à la demande nationale d'électricité.

**Mots-clés:** Sources d'énergie renouvelables; Autosuffisance énergétique; Diversification de la matrice électrique; Théorie des portefeuilles..

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PANORAMA DA CADEIA DE VALORES DA ELETRICIDADE ....	17
FIGURA 2 - MAPA DA POSIÇÃO GEOGRÁFICA DO TOGO EM RELAÇÃO AOS SEUS FORNECEDORES .....	18
FIGURA 3 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM 1990, 1999 E 2012 ....	19
FIGURA 4 - COMPARAÇÃO CONSUMO X PRODUÇÃO (1971-2013).....	19
FIGURA 5 - FORNECEDORES NO MERCADO TOGOLÊS.....	21
FIGURA 6 - CONSUMO DE ELETRICIDADE POR AGENTE ECONÔMICO ..	22
FIGURA 7 - ARRECADAÇÃO POR AGENTE ECONÔMICO .....	22
FIGURA 8 - REPARTIÇÃO DE NÚMERO DE CONTRATANTES POR AGENTE ECONÔMICO.....	23
FIGURA 9 - MAPA DAS REGIÕES ADMINISTRATIVAS E SEUS RESPECTIVOS CONSUMOS.....	24
FIGURA 10 - PRODUÇÃO MUNDIAL DE ELETRICIDADE EM 2014.....	26
FIGURA 11 - POTENCIAL TÉCNICO HIDRELÉTRICO REGIONAL EM TERMOS DE GERAÇÃO ANUAL E CAPACIDADE INSTALADA E O PERCENTUAL DE POTENCIAL TÉCNICO NÃO DESENVOLVIDO EM 2009	27
FIGURA 12 - PERFIL ESQUEMÁTICO DE USINA HIDRELÉTRICA.....	28
FIGURA 13 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE FOTOVOLTAICA ACUMULADA. ....	31
FIGURA 14 - CAPACIDADE INSTALADA EM 2013 POR TIPO DE MECANISMO .....	32
FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÕES DAS RADIAÇÕES SOLARES NA REGIÃO DAS SAVANAS TOGOLESAS .....	33
FIGURA 16 - EFEITO FOTOVOLTAICO EM UMA CÉLULA.....	34
FIGURA 17 - EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA EÓLICA INSTALADA NO MUNDO	35
FIGURA 18 - GRÁFICO DA DENSIDADE MÉDIA DE POTÊNCIA .....	37
FIGURA 19 - RISCOS DE UMA CARTEIRA .....	48
FIGURA 20 - FRONTEIRA EFICIENTE .....	49
FIGURA 21 - MAPA DA SITUAÇÃO GEOGRÁFICA DO TOGO.....	53
FIGURA 22 - MAPA DE RECURSOS HÍDRICOS DO TOGO .....	56
FIGURA 23 - IDENTIFICAÇÃO DE OUTLIERS NA SÉRIE HISTÓRICA DE MANGO.....	65

FIGURA 24 - IDENTIFICAÇÃO DE OUTLIERS NA SÉRIE HISTÓRICA DE DAPAONG .....	66
FIGURA 25 - CURVA DE POTÊNCIA DO AEROGERADOR ENERCON .....	67
FIGURA 26 - SIMILARIDADE ENTRE UMA MATRIZ ENERGÉTICA E UMA CARTEIRA DE ATIVOS .....	68
FIGURA 27 - PROCEDIMENTOS DE PESQUISA .....	69
FIGURA 28 - MAPA DE VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO A 10 m .....	77
FIGURA 29 - MAPA DE VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO A 10 m EM PONTOS .....	78
FIGURA 30 - MAPA DE RADIAÇÃO DIFUSA .....	79
FIGURA 31 - MAPA DE RADIAÇÃO DIRETA .....	80
FIGURA 32 - MAPA DE POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO TOGO .....	81
FIGURA 33 - SOBREPOSIÇÃO DOS MAPAS DE POTENCIAL FOTOVOLTAICO E VELOCIDADE DE VENTO EM PONTOS .....	82
FIGURA 34 - HISTOGRAMA DA SÉRIE DE ENERGIA DA UHE MONJOLINHO .....	84
FIGURA 35 - HISTOGRAMA DA SÉRIE DE ENERGIA DA EÓLICA DE MANGO .....	84
FIGURA 36 - HISTOGRAMA DA SÉRIE DE ENERGIA DA EÓLICA DE DAPAONG .....	85
FIGURA 37 - HISTOGRAMA DA SÉRIE DE ENERGIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO DE MANGO .....	86
FIGURA 38 - HISTOGRAMA DA SÉRIE DE ENERGIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO DE DAPAONG .....	86
FIGURA 39 - VARIAÇÃO DIÁRIA DO FATOR DE CAPACIDADE DE CADA FONTE AO LONGO DO TEMPO DE OBSERVAÇÃO .....	87
FIGURA 40 - VARIAÇÃO DIÁRIA DO FATOR DE CAPACIDADE DE CADA FONTE DE 2018-2019 .....	88
FIGURA 41 - RESTRIÇÕES NO SOLVER .....	89
FIGURA 42 - COMPOSIÇÃO DA "SUPER MATRIZ" .....	97
FIGURA 43 - VARIAÇÃO DO RISCO DA MATRIZ EM FUNÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DA HIDRELÉTRICA .....	102

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARATIVO DO CONSUMO .....	16
TABELA 2 - COMPONENTES DO PARQUE DE PRODUÇÃO .....	20
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS RIOS .....	55
TABELA 4 - TABELA RESUMO DO CONSUMO NACIONAL DE ELETRICIDADE (118 kWh).....	59
TABELA 5 - TABELA RESUMO DO CONSUMO NACIONAL DE ELETRICIDADE (535 kWh).....	59
TABELA 6 - DÉFICIT COM IMPORTAÇÃO .....	60
TABELA 7 - DÉFICIT SEM IMPORTAÇÃO.....	60
TABELA 8 - CONSUMO TOTAL DIÁRIO (535 kWh) .....	60
TABELA 9 - CONSUMO TOTAL DIÁRIO (118 kWh) .....	61
TABELA 10 - OS CENÁRIOS POSSÍVEIS .....	61
TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS DO PAINEL FOTOVOLTAICO.....	68
TABELA 12 - COMPONENTES DA MATRIZ DE FATOR DE CAPACIDADE ..	70
TABELA 13 - FATORES DE CAPACIDADE DAS FONTES.....	71
TABELA 14 - MATRIZ DE COVARIÂNCIA.....	71
TABELA 15 - PERFORMANCE DAS FONTES.....	72
TABELA 16 - TABELA DE OTIMIZAÇÃO DA MATRIZ DE FATOR DE CAPACIDADE.....	72
TABELA 17 - COMPONENTES DA MATRIZ FICTÍCIA .....	74
TABELA 18 - MATRIZ DE COVARIÂNCIA DAS USINAS.....	74
TABELA 19 - PERFORMANCE DAS USINAS .....	75
TABELA 20 - MATRIZ OTIMIZADA PARA O CASO I .....	90
TABELA 21 - MATRIZ OTIMIZADA PARA O CASO II.....	91
TABELA 22 - MATRIZ OTIMIZADA PARA O CASO III.....	92
TABELA 23 - MATRIZ OTIMIZADA PARA O CASO IV.....	93
TABELA 24 - MATRIZ OTIMIZADA PARA O CASO V.....	94
TABELA 25 - RESUMO DAS SIMULAÇÕES COM UMA ÚNICA USINA HIDRELÉTRICA DE 74 MW DE POTÊNCIA INSTALADA.....	95
TABELA 26 - RESUMO DAS SIMULAÇÕES COM POSSIBILIDADE DE EXPANDIR A USINA HIDRELÉTRICA .....	98
TABELA 27 - A "SUPER MATRIZ" OTIMIZADA .....	100
TABELA 28 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	101

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1	Justificativa .....	12
1.2	Objetivos... ..	13
1.3	Estrutura da dissertação.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	Setor Elétrico do Togo.....	15
2.1.1	Oferta e Cadeia de Valores da eletricidade.....	16
2.1.2	A evolução da oferta de eletricidade no Togo .....	18
2.1.3	O Parque de Produção.....	20
2.1.4	A Rede de Distribuição.....	21
2.1.5	Repartição geográfica da eletricidade .....	23
2.2	Os componentes das fontes de geração estudadas .....	25
2.2.1	Usina hidrelétrica.....	25
2.2.2	Usina solar fotovoltaica .....	30
2.2.3	Usina eólica.....	34
2.2.4	Cadeia de Valor e Fator de Capacidade .....	39
2.3	Método de diversificação de Matriz: Moderna Teoria de Portfólio de Markowitz.....	40
2.3.1	Conceito e História da teoria .....	40
2.3.2	Formulação matemática da moderna teoria de portfólio. ....	43
2.3.3	Fronteira Eficiente .....	47
3	METODOLOGIA.....	52
3.1	Caracterização da Área de estudo: o Togo .....	52
3.1.1	Localização e Inserção geográfica .....	52
3.1.2	Características Climáticas .....	53

3.1.3 Hidrografia e Recursos hídricos .....	54
3.1.4 População e Perfil do consumidor.....	57
3.2 Coleta dos dados .....	61
3.2.1 Coleta dos dados para a geração dos mapas .....	61
3.2.2 Coleta dos dados de séries históricas de vazão, velocidade de vento e irradiação solar.....	62
3.3 Tratamento dos dados.....	63
3.3.1 Dados de vazão .....	63
3.3.2 Dados de velocidade de vento .....	64
3.3.3 Dados de irradiação solar.....	67
3.4 A Moderna Teoria de portfólio de Markowitz .....	70
3.4.1 Aplicação da MTP considerando o Fator de Capacidade.....	70
3.4.2 Aplicação de conceitos baseados na MTP considerando uma matriz fictícia.....	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	76
4.1 Mapas das Fontes Eólica e Solar.....	76
4.2 As séries históricas de energias produzidas pelas fontes .....	83
4.3 Resultados da aplicação dos conceitos baseados na Moderna Teoria de Portfolio de Markowitz .....	88
4.3.1 Caso I: Considerando o Fator de capacidade .....	88
4.3.2 Caso II: Considerando uma matriz fictícia com uma única hidrelétrica para atender à demanda gerada pelo consumo da média regional.....	90
4.3.3 Caso III: Considerando uma matriz fictícia com uma única hidrelétrica para atender ao consumo da média nacional.....	91
4.3.4 Caso IV: Considerando uma matriz imaginária com possibilidade de expansão da usina hidrelétrica para atender à demanda gerada pelo consumo da média regional.....	92
4.3.5 Caso V: Considerando uma matriz fictícia com a possibilidade de expansão da usina hidrelétrica para atender ao consumo da média nacional.....	93

4.4	Análise de sensibilidade.....	101
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	103
5.1	Coleta dos dados.....	103
5.2	Séries históricas de energia gerada por cada fonte.....	103
5.3	Resultados da aplicação da Moderna Teoria de Portfólio de Markowitz .	103
5.4	Limitações enfrentadas no estudo e sugestões para futuras pesquisas .	104
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
	APÊNDICE A – CARTAS DE SOLICITAÇÃO DOS DADOS.....	110
	APÊNDICE B –GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VAZÕES DO RIO MONO E DOS RIOS SELECIONADOS.....	112
	APÊNDICE C – GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VAZÕES DO RIO MONO E DO RIO MONJOLINHO.....	113

## 1 INTRODUÇÃO

A energia desempenha um papel importante no desenvolvimento humano e econômico, favorecendo desta forma o bem-estar social. As sociedades modernas utilizam cada vez mais a energia na indústria, nos serviços, nas habitações e no transporte. Mesmo o petróleo sendo o insumo mais comercializado para a produção de energia, a eletricidade se revela indispensável nas economias contemporâneas caracterizadas pela onipresença das tecnologias da informação, da comunicação e do digital. Portanto, o fornecimento regular de eletricidade é uma condição necessária para o desenvolvimento socioeconômico de qualquer país ou região, por ela prorrogar as jornadas de trabalho, melhorar as condições de vida, entre outros. A eletricidade barata e confiável facilita o crescimento econômico que, por sua vez, pode reduzir pobreza, enquanto o alto custo da energia pode aumentar a diferença de desigualdade se, por exemplo, a população carente tem que escolher entre pagar por eletricidade ou outras necessidades concorrentes, como a compra de alimentos ou cuidados com a saúde. A eletricidade acessível e confiável é uma prioridade de desenvolvimento (MALALA e ADACHI, 2020). A eletricidade é essencial para enfrentar desafios de desenvolvimento, como pobreza, desigualdade e mudanças climáticas (BAZILIAN *et al.*, 2012).

No entanto de acordo com o último relatório do *Global Tracking Framework*, divulgado em abril de 2017, pelo Banco Mundial e pela Agência Internacional de Energia (REIS, 2017), o mundo tem um bilhão de pessoas que vivem sem eletricidade e, por consequência, suas capacidades de produção, de convívio social, de acesso às informações e tecnologias são limitadas. O relatório assinala que o acesso à eletricidade está mais lento em relação à expansão demográfica. Se essa tendência não for revertida, as projeções são de que, em 2030, 8% da população mundial não terá energia elétrica.

Muitas pessoas, especialmente na Ásia e na África, não têm acesso à eletricidade por várias razões capturadas no chamado trilema da energia. O trilema da energia surge da necessidade de equilibrar três objetivos concorrentes, mas igualmente essenciais. Priorizando um objetivo sobre os outros, pode-se levar a sistemas de energia dispendiosos e ineficientes. Tais objetivos são a diminuição do investimento inicial, a criação de sistemas de

energia ambientalmente sustentáveis e a garantia da segurança do fornecimento (MALALA e ADACHI, 2020).

Um dos objetivos concorrentes é diminuir o investimento inicial. A geração de eletricidade requer equipamentos caros e serviços auxiliares igualmente dispendiosos, como as redes de distribuição de energia. Os custos iniciais de investimento são mais altos se investir em fontes de energia renováveis. O segundo objetivo se refere à criação do sistema ambientalmente sustentável. A geração de eletricidade, principalmente a partir de fontes não-renováveis, é a principal emissora de gases de efeito estufa, que são considerados um catalisador significativo do aquecimento global e das mudanças climáticas. As mudanças climáticas têm várias consequências negativas, incluindo riscos à saúde humana e à segurança alimentar, e tornou-se uma preocupação que exige uma solução rápida. Reduzir a quantidade de gases efeitos estufa do setor elétrico é, portanto, uma prioridade. O terceiro objetivo é criar sistemas de energia que garantam a segurança no fornecimento. Em resumo, um trilema da energia surge no setor de energia ao considerar custos, confiabilidade, segurança e emissões de carbono (MALALA e ADACHI, 2020).

O continente Africano se revela um dos mais ricos em recursos energéticos, porém a sua capacidade de exploração e de uso é mínima. A grande maioria dos países enfrenta crises energéticas. Contudo, existem soluções principalmente voltadas a importantes investimentos em infraestruturas energéticas, melhoramento do acesso em grande escala à eletricidade e ao estímulo do comércio transfronteiriço. O aumento do desempenho de empresas públicas existentes e assistência aos países são também meios utilizados, a fim de se estabelecer trajetórias de crescimento para baixas emissões de carbono e consequentemente de gases efeitos estufa.

Entretanto, uma das preocupações considerada no presente trabalho são as limitações ambientais, fontes emissoras de gases efeitos estufa, ocupações de grandes áreas produtivas ou de cultivo, aquecimento global, entre outros. Para reduzir o uso de combustível fóssil e manter o suprimento adequado de energia, há uma necessidade de explorar novos paradigmas na operação de sistemas elétricos, visando a integração das diferentes fontes de energia renovável (ÁVILA, 2020).

A matriz energética é um conjunto de diversas fontes de geração de energia e se apresenta como uma ferramenta útil para entender as tendências de produção e consumo em um país ou uma região, e para avaliar as políticas energéticas de longo prazo.

## 1.1 Justificativa

A penúria energética na África subsaariana expressa-se por intermédio de desabastecimentos corriqueiros nos centros urbanos, provocando interrupções abruptas das atividades essenciais e até vitais, dificuldades de acesso, de transmissão e tarifas elevadas. Mesmo contendo importantes fontes potenciais para geração de energia, que na maioria das vezes são ainda inexploradas, o continente africano é marcado por fornecimento irregular de energia.

No caso togolês, a singularidade da fonte energética acarretou a dependência do sistema elétrico de uma única hidrelétrica, a de Nangbeto. Observa-se, portanto, o aproveitamento inadequado da variedade das fontes notadamente fotovoltaica, eólica, gás natural, nuclear, entre outras. Há também uma estagnação na expansão das redes alimentadoras, que não acompanharam a expansão demográfica e o crescimento do poder aquisitivo. A aplicação de um preço de venda inferior ao custo local de produção que por sua vez é superior ao preço da eletricidade importada é um grande desafio. Como solução, vem a proposta de uma reforma estrutural em toda a cadeia de valores da eletricidade, necessitando a participação do setor privado. Esta diversificação de investidores permitirá uma melhor leitura da rentabilidade sobre a cadeia de produção. Tal reestruturação desencadeia em medidas adequadas para a produção em grande escala e em melhores tarifas, a fim de aumentar o nível de acesso à eletricidade.

Na geração de eletricidade, a diversificação surge como a reação correta à incerteza subjacente dos preços dos combustíveis (crise do petróleo), impactos ambientais, disponibilidade de recursos e variações climáticas. A diversificação aumenta flexibilidade e protege a produção de energia contra interrupções bruscas e eventos adversos (COSTELLO<sup>1</sup>, 2007 apud GARCÍA *et al.*, 2020).

---

<sup>1</sup> Costello K., (2007) Diversity of generation Technologies: implications

Em algumas residências togolesas ainda utilizam fontes primárias de energia, como velas. Estima-se que dez velas produzem 1 kWh de energia para um custo de US\$ 1,00, ou seja, aproximadamente cinco vezes mais caro do que a eletricidade, vendida no Togo a US\$ 0,21 o kWh. Infelizmente a vela, mesmo sendo mais cara do que a eletricidade, não deixou de existir nas casas, devido à escassez da energia elétrica. Ao longo do tempo, a oferta de eletricidade varia exageradamente em função do clima e das necessidades energéticas dos países fornecedores. Por exemplo, os períodos eleitorais ou de eventos de grandes audiências nos países fornecedores implicam na redução espontânea da quantidade de eletricidade ofertada ao Togo (NTAGUNGIRA, 2015).

## 1.2 Objetivos

O motivo da elaboração desta dissertação de mestrado é encontrar soluções práticas e viáveis, para proporcionar a autonomia energética dos países africanos com foco principal na região subsaariana. A fim de diversificar e equilibrar a matriz energética, estudaram-se as alternativas de fontes de energia elétrica como barragens hidrelétricas, energia eólica, fotovoltaica, entre outros.

### OBJETIVO GERAL

Elaborar um planejamento para um sistema elétrico alimentado por várias fontes energéticas e complementares que possam proporcionar a autossuficiência e autonomia energética ao Togo.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (a) Apresentar o momento atual do setor elétrico togolês,
- (b) Identificar as fontes de geração de energia disponíveis e exploráveis,
- (c) Elaborar mapas destas fontes de geração e identificar as regiões com consideráveis potenciais.
- (d) Modelar um sistema, com estas fontes, capaz de suprir a demanda.

### 1.3 Estrutura da dissertação

A organização deste trabalho é estruturada em cinco capítulos, a seguir, resumidos.

Na introdução, em que foi discutida a importância da eletricidade e do seu fornecimento regular no desenvolvimento socioeconômico de um país, encontram-se a justificativa do presente trabalho e seus objetivos, tanto geral como específicos.

O Capítulo 2 (Fundamentação Teórica) é reservado à abordagem do Estudo de caso da sub-região da África subsaariana e particularmente do Togo. Este capítulo apresenta o setor elétrico togolês e suas características, a Matriz Energética, o Parque Gerador, Política de distribuição e tarifária, entre outras. Contempla, ainda, a apresentação de cada uma das fontes escolhidas para o estudo, e a Teoria Moderna de Portfólio de Markowitz.

O terceiro Capítulo apresenta a caracterização da área de estudo, as metodologias empregadas para solucionar o problema evidenciado no caso em estudo, o setor elétrico togolês.

No Capítulo 4, os resultados obtidos por meio da aplicação dos métodos são expostos e discutidos; e em seguida as conclusões e considerações finais, no capítulo 5.

Por último, são apresentados os apêndices, em que estão disponibilizadas as cartas enviadas aos órgãos para coleta de dados e gráficos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Embora o consumo global per capita de eletricidade tenha aumentado significativamente, o crescimento do consumo no continente africano não é muito expressivo. O consumo de eletricidade é amplamente limitado aos setores de alta exigência como da indústria e do comércio e, em menor grau, às famílias com renda elevada. A forma e a frequência com que surgem os problemas de acesso à energia elétrica justificam certamente a definição de uma política e estratégia energética, levando em consideração a forte correlação que existe entre o desenvolvimento de um país e a energia que este consome e, ao mesmo tempo, os limitados recursos financeiros dos países africanos.

Neste capítulo, serão apresentados, o setor elétrico do Togo e suas peculiaridades. Em seguida as principais fontes disponíveis e exploráveis na extensão territorial, o panorama mundial destas fontes, seus aspectos econômicos e princípios de funcionamento.

### 2.1 Setor Elétrico do Togo

Com uma população estimada em 8,6 milhões de habitantes, o Togo dispõe de um setor energético majoritariamente alimentado a 71% por biomassa, tais como lenhas, carvão, rejeitos vegetais, entre outros, e apresenta várias dificuldades em suprir as necessidades elétricas da população em grande escala. Os produtos petrolíferos representam 26% enquanto a eletricidade contempla apenas 3% das necessidades energéticas (NTAGUNGIRA, 2015). Com o intuito de comparar os consumos médio per capita no Togo em relação a alguns países da sub-região e além do continente, elaborou-se a TABELA 1 a seguir.

TABELA 1 - COMPARATIVO DO CONSUMO

País	Consumo médio per capita por ano (kWh)
Togo	118
Nigéria	149
Costa de Marfim	212
Gana	344
Média de África Subsaariana	535
França	7.292
Estados Unidos	13.246

FONTE: NTAGUNGIRA (2015) ADAPTADO

A produção de eletricidade provém essencialmente de centrais térmicas e da única usina hidrelétrica do país (Usina Binacional de Nangbeto, no rio Mono). O setor elétrico é gerenciado pelo Estado que não permitiu a entrada de investimentos privados nem tem investido muito no setor. Portanto, nos últimos vinte anos, as importações aumentaram e representam 74% dos 1.286 GWh fornecidos em 2013 (NTAGUNGIRA, 2015).

### 2.1.1 Oferta e Cadeia de Valores da eletricidade

Com um percentual de acesso à eletricidade de 27%, o setor elétrico é regido pelo poder público há mais de 35 anos. A cadeia de valores, composta pela produção, o transporte, a distribuição e a comercialização da eletricidade não é suficientemente fragmentada para almejar uma economia de escala, nem tão concorrente para atingir uma ótima eficiência. Estes fatores proporcionaram uma defasagem notória entre a produção, que cresceu 200%, e o consumo, que aumentou 900% no período de 1971 a 2013 (NTAGUNGIRA, 2015).

A fatura de eletricidade paga pelo consumidor togolês é apenas o último elo de uma extensa rede que conecta empresas de quatro funções distintas que são: produção, o transporte, a distribuição e a comercialização, ilustrada na FIGURA 1.

Enquanto na maioria dos países, essas funções são atribuídas a empresas distintas para obter mais eficácia, no Togo toda a cadeia está sob a

gestão do Estado. Assim a eletricidade consumida é produzida por três empresas registradas localmente: a CEB (Comunidade Elétrica do Benim) pertencente ao Estado beninense, a CEET (Companhia de Energia Elétrica do Togo) que pertence ao Estado togolês e a terceira sob contrato especial é a *ContourGlobal*, uma empresa norte americana instalada no Togo. O restante importado provém de empresas estrangeiras tais como a *Volta River Authority - VRA* (Gana), a *Compagnie Ivoirienne d'électricité - CIE* (Costa de Marfim), a *Transmission Company of Nigeria - TCN* (Nigéria) e a *Société Nigerienne d'Électricité - NIGELEC* (Níger). A CEB detém o monopólio do transporte e da compra da eletricidade no Togo e no Benim.

FIGURA 1 - PANORAMA DA CADEIA DE VALORES DA ELETRICIDADE



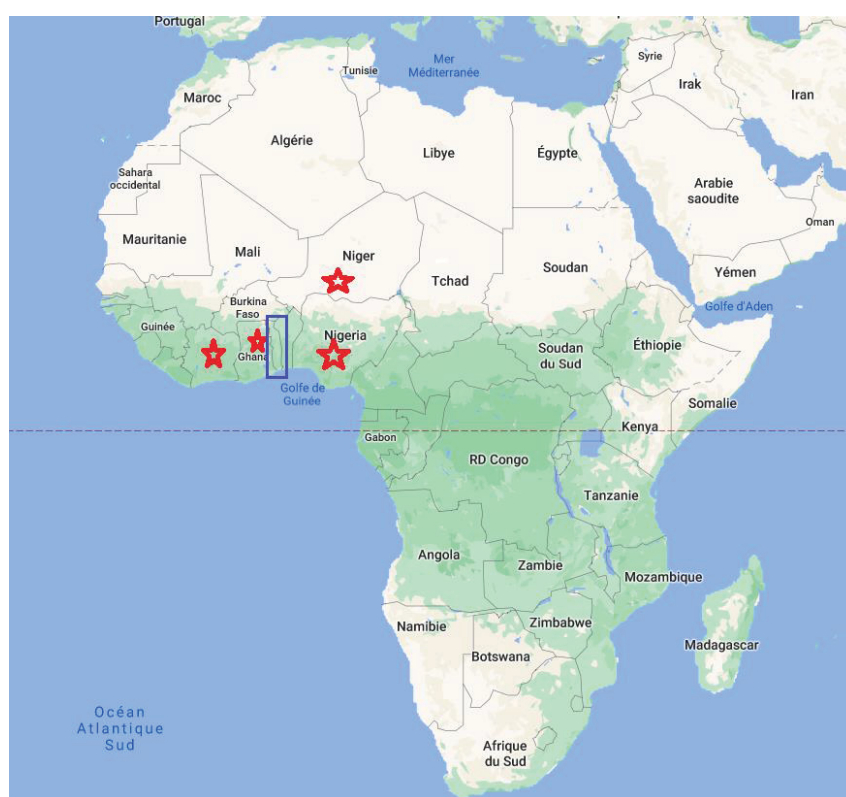
FONTE: NTAGUNGIRA (2015)

A venda da eletricidade é assumida principalmente pela CEB e CEET, que a produzem, transportam e fornecem, pois, o mercado ainda não é liberal para permitir aos varejistas ou consumidores escolherem seus próprios fornecedores.

Em comparação com outros países da região, a segmentação da cadeia entre diversas empresas competitivas revelou-se como uma solução idônea. Como exemplo da Nigéria que, por intermédio da reforma do setor em 2005, cessou o monopólio da empresa *National Electric Power Authority* que lá atuou. De 2005-2014, a companhia pública encarregada de fornecer a eletricidade, foi segmentada em seis sociedades de produção e onze de distribuição que foram leiloadas para investidores particulares. Medidas similares foram implementadas nos países como Gana, Costa de Marfim e Níger, que são fornecedores de eletricidade ao Togo (NTAGUNGIRA, 2015).

O mapa da FIGURA 2 indica a localização geográfica de Togo em relação aos países fornecedores de energia. Estes países estão marcados com uma estrela vermelha e o Togo está no quadro azul. Os fornecedores fazem parte dos mesmos blocos econômicos que o Togo, denominados União Econômica e Monetária do Oeste Africano (UEMOA) e Comunidade Econômica dos Estados da África Ocidental (CEDEAO).

FIGURA 2 - MAPA DA POSIÇÃO GEOGRÁFICA DO TOGO EM RELAÇÃO AOS SEUS FORNECEDORES



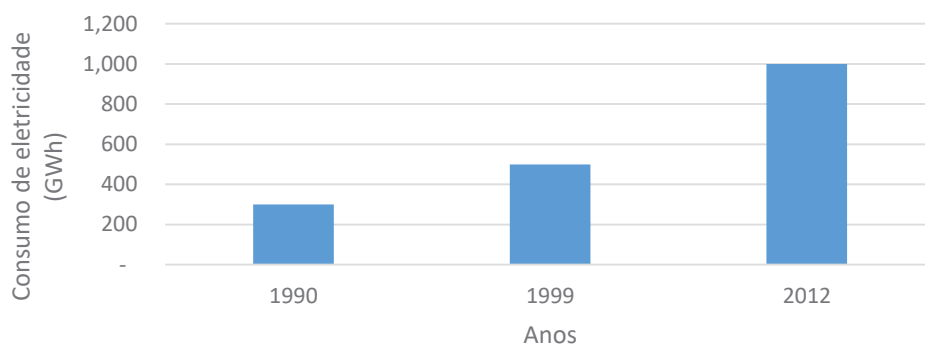
FONTE: GOOGLMAPS (2020).

### 2.1.2 A evolução da oferta de eletricidade no Togo

A oferta da eletricidade no Togo se iniciou com a construção de uma central hidrelétrica em 1926 com uma capacidade de 350 kVA. Em 1963, a criação da CEET permitiu atingir um consumo de 140 milhões de kWh em 1971. O parque de produção era composto unicamente deste gerador elétrico (grupo gerador) até 1968. Em 1987, foi construída a central de Nangbeto com uma capacidade de 65 MW. Entretanto a produção nacional seguiu um ritmo lento

diante da demanda local que, de forma rápida, progrediu. O consumo de energia elétrica passou dos 300 GWh em 1990 para 500 GWh em 1999 e para 1.000 GWh em 2012, como mostra na FIGURA 3.

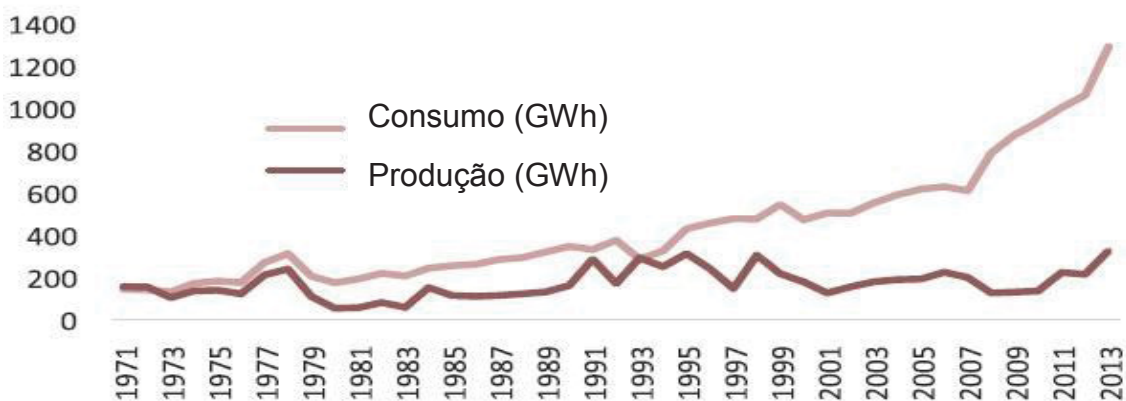
FIGURA 3 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM 1990, 1999 E 2012



FONTE: NTAGUNGIRA (2015) ADAPTADO

Desde 1995, o consumo de eletricidade progrediu em 5% por ano enquanto a produção regrediu de 6% ao ano. Para o período de 1971-2013, percebeu-se um crescimento médio anual de 2% da produção nacional, muito inferior ao consumo que aumentou de 5% (NTAGUNGIRA, 2015).

FIGURA 4 - COMPARAÇÃO CONSUMO X PRODUÇÃO (1971-2013)



FONTE: NTAGUNGIRA (2015)

### 2.1.3 O Parque de Produção

O parque de produção nacional é composto inicialmente da central hidrelétrica de Nangbeto inaugurada em 1987 com uma produção instável devido a fatores hidrológicos. Entre uma excelente estação chuvosa e uma estiagem, a produção pode variar de 65 MW médios a 10 MW médios. Entre 1990 e 2010, adquiriu-se progressivamente sete centrais térmicas cuja potência garantida é de 10 MW, no total. Em 2010, instalou-se uma central térmica de 100 MW de potência movida por 6 motores alimentados com gás natural, diesel e óleos pesados. A TABELA 2 apresenta as fontes e suas diferentes potências.

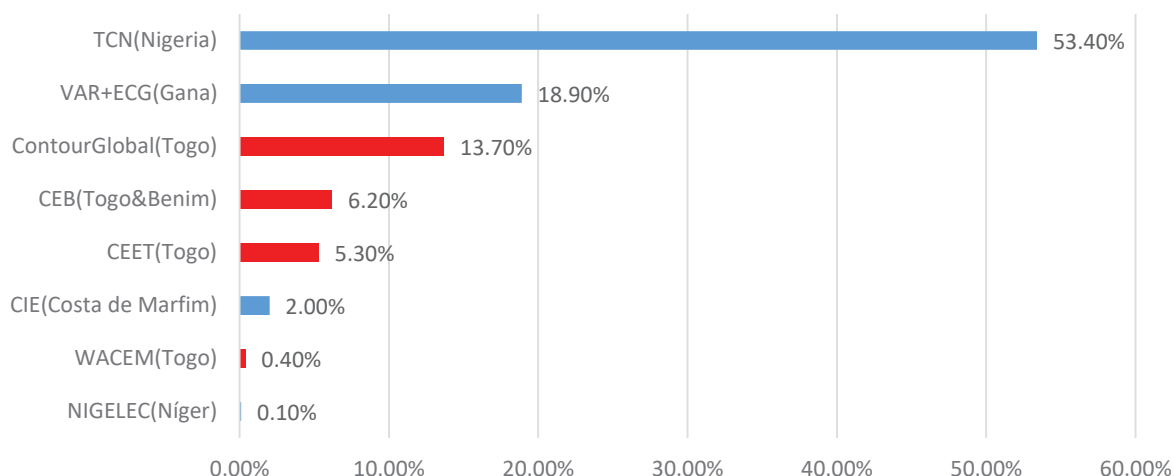
TABELA 2 - COMPONENTES DO PARQUE DE PRODUÇÃO

Parque de Produção em 2013 Potência (MW)			
Fontes	Instalada	Disponível	Garantida
Centrais CEET TOGO		128	100
Central térmica de Lomé A (Sulzer) Diesel	2 × 8	7	10
Central térmica de Lomé B (Site CTL) Diesel	1 × 14	14	
Central térmica de Kara, Diesel	16	4	
Central térmica de Sokodé, Diesel	4	1,5	
Central de Kpimé, Turbina	2 × 0,78	1,5	
Central térmica ContourGlobal, Motor	6 × 16,6	100	90
Fontes CEB (TOGO E BENIM)		407	372
Importação TCN (Nigéria)		200	200
Importação VRA (Gana) & CIE (Costa de Marfim)		102	102
Central térmica de Lomé TAGS	2 × 25	40	40
Central de Nangbeto (Hidrelétrica)	2 × 32,8	65	30
Subtotal da CEB dedicada ao Togo (47%)		191	175
Total proveniente de Centrais e CEB Togo		329	275

FONTES: NTAGUNGIRA, 2015 (ADAPTADO)

Como salientado anteriormente, a oferta de eletricidade no mercado togolês provém de estatais e da importação, que representou 74% do total consumido em 2013. A FIGURA 5 a seguir ilustra as participações de cada fornecedor no abastecimento do mercado.

FIGURA 5 - FORNECEDORES NO MERCADO TOGOLÊS



FONTE: NTAGUNGIRA, 2015 (ADAPTADO)

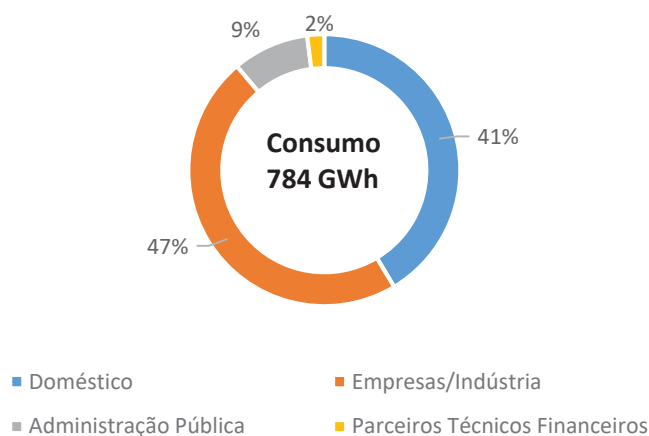
#### 2.1.4 A Rede de Distribuição

A rede de distribuição é gerenciada pela CEET que opera com uma malha de 4.000 km de média e baixa tensão. Com um nível de demanda discrepante do nível de oferta, surgiu um fenômeno chamado localmente de “teias de aranha”. Este fenômeno envolve populações que se conectam ilegalmente à rede ou se abastecem legalmente na linha do vizinho que passa a cobrar do contratante a energia consumida.

Quanto ao acesso à eletricidade, haviam 233.036 contratantes na CEET em 2013, sendo 83,1% destes residenciais. Do total de residências, estimado em 1,3 milhões, 17% seriam formalmente assinantes. Não obstante estima-se que a taxa de acesso foi de 28% em 2013, levando em consideração as conexões clandestinas. Ainda uma análise socioeconômica revela que a elevada taxa de adesão à rede, estimada em 120.000 FCFA (equivalente a US\$ 200,00), é inacessível às populações de baixa renda e rurais. Assim, pressupõe-se que por trás de cada residência assinante oficial, há pelo menos uma residência clandestina. Todavia esta taxa de adesão ajustada permanece inferior à média da região subsaariana que é de 35% e à média da região ocidental estimada em 40%. Como relatório da situação dos agentes econômicos, a FIGURA 6, FIGURA 7 e FIGURA 8, a seguir ilustram o consumo por agente econômico, a arrecadação, a repartição dos assinantes por agente econômico

(NTAGUNGIRA, 2015). As figuras apresentam os perfis e participações dos agentes econômicos no consumo da eletricidade.

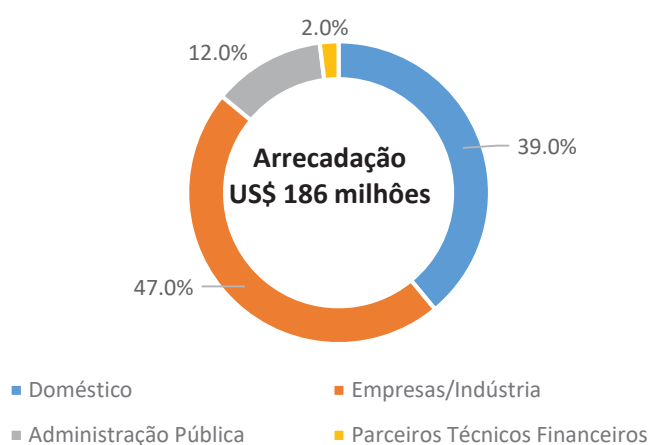
FIGURA 6 - CONSUMO DE ELETRICIDADE POR AGENTE ECONÔMICO



FONTE: NTAGUNGIRA, 2015 (ADAPTADO)

Em um total de 784 GWh de eletricidade consumida, a maior parte alimenta o setor industrial e empresarial, representando 47%, enquanto 41% representa a parcela do consumo doméstico. Os parceiros técnicos e financeiros, tais como sedes de organizações internacionais, representações diplomáticas, dentre outros, consomem 2% e os 9% restantes servem para atender às demandas da administração pública.

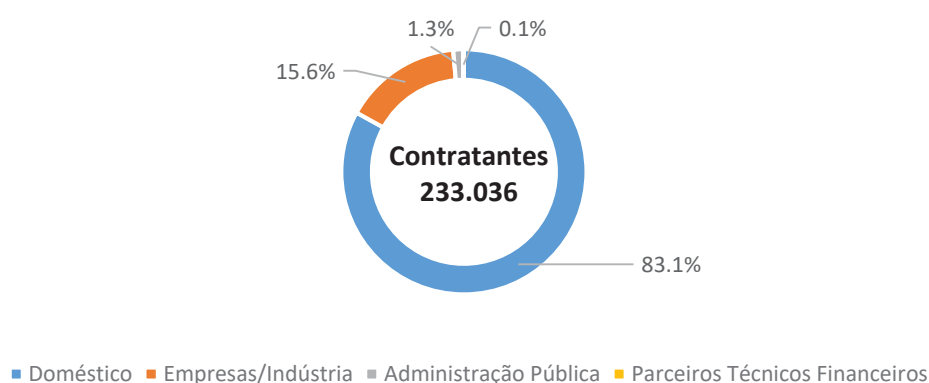
FIGURA 7 - ARRECADAÇÃO POR AGENTE ECONÔMICO



FONTE: NTAGUNGIRA, 2015 (ADAPTADO)

Deste consumo, advém uma arrecadação anual estimada em U\$ 186 milhões, sendo 47% desta quantia proveniente do setor empresarial e industrial, representando identicamente a porcentagem de consumo deste setor. O consumo doméstico contribui com 12% enquanto a administração pública paga 12%.

FIGURA 8 - REPARTIÇÃO DE NÚMERO DE CONTRATANTES POR AGENTE ECONÔMICO



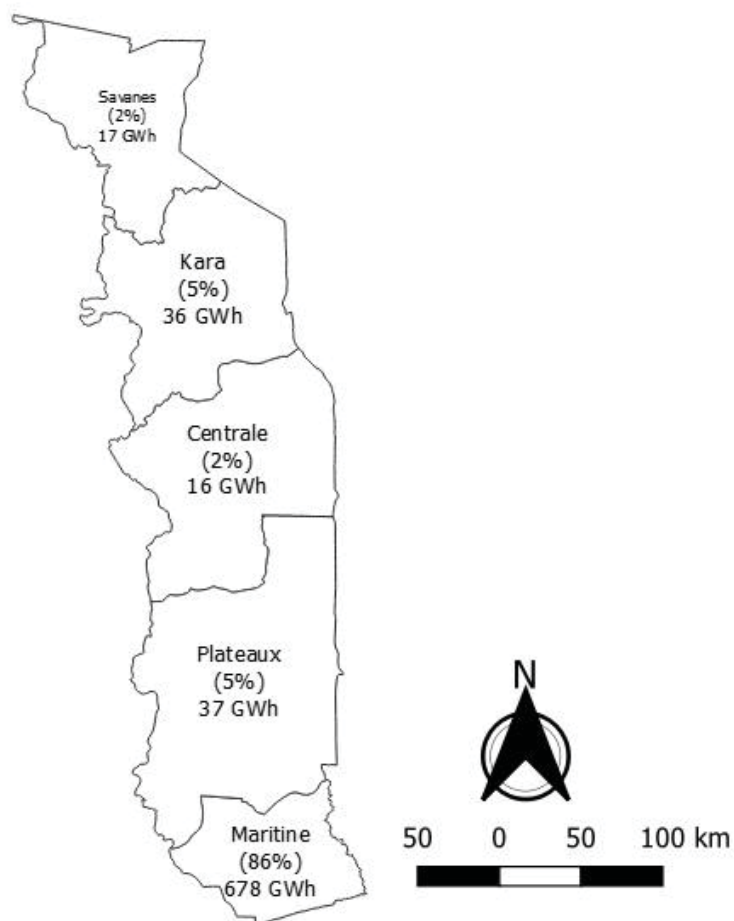
FONTE: NTAGUNGIRA, 2015 (ADAPTADO)

Quanto aos contratantes, o consumo doméstico supera todos os setores com 83,1% de consumidores, enquanto o setor que consome e paga mais, representa 15,6%.

#### 2.1.5 Repartição geográfica da eletricidade

Com um crescimento anual de 4,8%, a taxa de eletrificação das residências passou de 15% em 2000 para 28% em 2013. Esta taxa é de 50% em áreas urbanas e de 5% em zonas rurais. À medida que se avança para o interior do território, o consumo de energia diminui consideravelmente. Uma diminuição devida à implantação das indústrias e da grande parte da população em Lomé, a capital. Como ilustrado no mapa da FIGURA 9, a redução do consumo é proporcional ao distanciamento do litoral atlântico (NTAGUNGIRA, 2015).

FIGURA 9 - MAPA DAS REGIÕES ADMINISTRATIVAS E SEUS RESPECTIVOS CONSUMOS



FONTE: NTAGUNGIRA, 2015 (ADAPTADO)

As diferenças notórias no consumo entre as regiões administrativas são oriundas de fatores geográficos, demográficos e industriais. O consumo reflete tanto o estilo de vida rural ou urbano quanto o afastamento ou pela proximidade de zonas industriais. A região marítima que ocupa 10% da superfície total, concentra 42% da população e consome 86% da eletricidade do país, sendo o consumo per capita quase 12 vezes maior nesta região (NTAGUNGIRA, 2015).

A determinação da tarifa de eletricidade é rígida e não se adequa necessariamente à conjuntura econômica. A tarifa é fixada por decreto interministerial, sendo o último do dia 26 de novembro de 2010. Em média, as

revisões tarifárias ocorrem a cada 4 anos. O Estado, com o intuito de coibir a volatilidade do preço da eletricidade, oferece preços estáveis cobrindo um longo período. Toda vez que o órgão distribuidor estima que as receitas não cobrirão os gastos, este propõe uma revisão financeira da tarifa ao Ministério de Energia, que por sua vez solicita uma revisão técnica ao órgão regulador do setor elétrico. Quando a revisão tarifária não é aprovada, o Estado assume, implicitamente, a subvenção do lucro da companhia estatal distribuidora. Por exemplo em 2013, a tarifa foi de 122 FCFA (US\$ 0,20) enquanto o custo de produção era de 125 FCFA (US\$ 0,21) por kWh (NTAGUNGIRA, 2015).

Diante dos cenários apresentados, de desabastecimento, tarifas elevadas, dificuldade de acesso, de singularidade da fonte hidrelétrica, dentre outros, certas fontes foram selecionadas e estudadas, com o intuito de modelar um novo sistema elétrico que possa suprir as demandas dos consumidores togoleses.

## 2.2 Os componentes das fontes de geração estudadas

Neste capítulo, são expostas as fontes de geração de energia disponíveis e acessíveis, que sejam socialmente, ambientalmente e economicamente viáveis, e renováveis. Das fontes existentes no território togolês, três foram escolhidas para o presente estudo, sendo a hidrelétrica, a solar e a eólica. Os estudos característicos destas fontes são apresentados nos itens subsequentes.

### 2.2.1 Usina hidrelétrica

A geração hidrelétrica é uma tecnologia madura e economicamente competitiva. Esta fonte de geração se expandiu devido às preocupações com emissões de gases de efeito estufa, a principal causa do aquecimento global e todos os males decorrentes. Devido à sua capacidade de retenção ou armazenamento de grandes quantidades de água, as hidrelétricas são capazes de atender e maximizar o atendimento da demanda, em períodos de crises energéticas. Além do papel de fonte energética, a hidrelétrica propicia outros

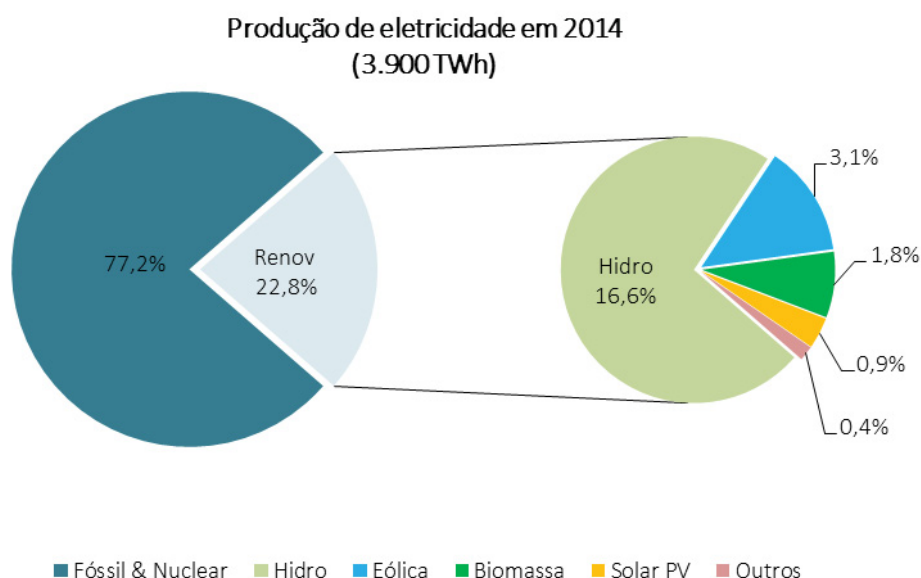
benefícios como o abastecimento de água, irrigação nos cultivos, controle de cheia, dentre outros (TOLMASQUIM, 2016).

### 2.2.1.1 Panorama mundial

A participação global da energia hidrelétrica tem aumentado em mais de 2%, em 2019, devido à inserção de 12,7 GW de produção (IEA, 2020).

As usinas hidrelétricas são importantes fontes de geração elétrica, foram responsáveis por uma produção de 3.900 TWh, em 2014, ou seja 16,6% da produção mundial de eletricidade, conforme ilustrado na FIGURA 10 (REN21<sup>2</sup>, 2015 apud TOLMASQUIM, 2016).

FIGURA 10 - PRODUÇÃO MUNDIAL DE ELETRICIDADE EM 2014



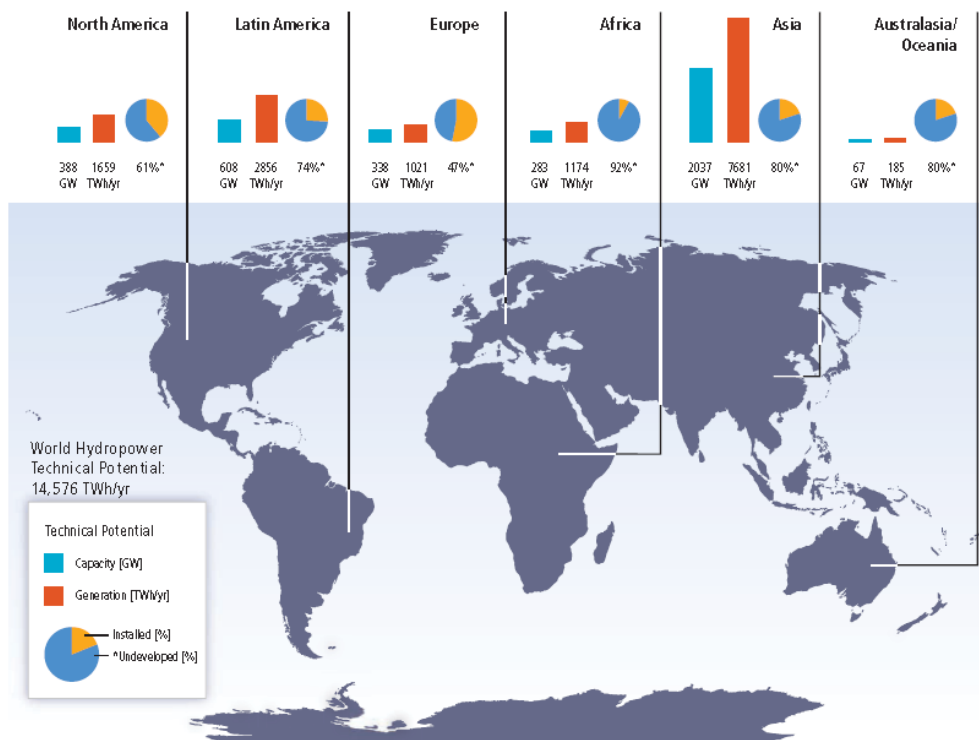
FONTE: EPE (2015) APUD TOLMASQUIM (2016)

A produção hidrelétrica, ainda no mesmo ano de 2014, se expandiu em 3,6%, ou seja, 37 GW. Este crescimento ocorreu, de forma notória, na Ásia e na América Latina, sendo os países líderes a China e o Brasil, em suas respectivas regiões. A expansão resultou em uma capacidade global instalada em torno de 1.055 GW (REN 21, 2015 apud TOLMASQUIM, 2016).

<sup>2</sup> REN21. Renewables 2015 - Global Status Report, 2015.

Para ilustrar o panorama geral do aproveitamento do potencial hidrelétrico, a FIGURA 11 foi elaborada e salienta o potencial hidrelétrico de cada uma das seis regiões do mundo em termos de geração anual e capacidade instalada. Ao observar este mapa, vale notar a expressiva diferença do cenário europeu, no qual restam apenas 47% do potencial teórico a ser aproveitado, enquanto na África somente 8% do potencial teórico foi explorado (Kumar et al<sup>3</sup>, 2011 apud TOLMASQUIM, 2016).

FIGURA 11 - POTENCIAL TÉCNICO HIDRELÉTRICO REGIONAL EM TERMOS DE GERAÇÃO ANUAL E CAPACIDADE INSTALADA E O PERCENTUAL DE POTENCIAL TÉCNICO NÃO DESENVOLVIDO EM 2009



FONTE: KUMAR ET AL. (2011) APUD TOLMASQUIM (2016)

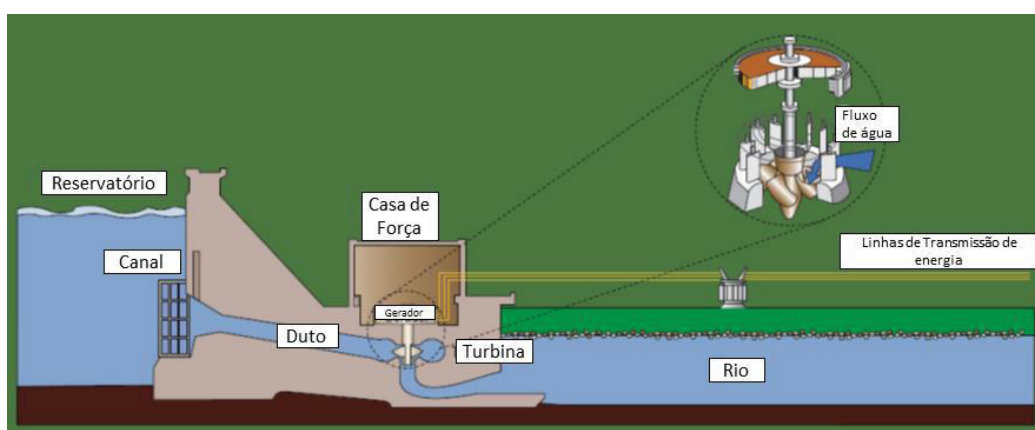
<sup>3</sup> KUMAR, A. et al. Hydropower. In: EDENHOFER, O., et al. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2011.

### 2.2.1.2 Tecnologia da conversão do recurso primário em energia elétrica

A energia hidráulica provém da transformação de energia potencial em energia elétrica. O desnível entre volumes de água a montante e a jusante, forma uma queda que representa um potencial energético que pode ser aproveitado pelas usinas hidrelétricas (TOLMASQUIM, 2016).

Uma usina hidrelétrica é composta, basicamente, de um paramento designado de barragem, de sistemas de captação e adução de água, de casa de força e de vertedouros. A FIGURA 12 apresenta um desenho esquemático de uma barragem hidrelétrica.

FIGURA 12 - PERFIL ESQUEMÁTICO DE USINA HIDRELÉTRICA



FONTE: ANEEL (2008) APUD TOLMASQUIM (2016)

Como descrito por Tolmasquim (2016), a barragem interrompe o curso normal do rio, formando um lago artificial denominado reservatório. A sua estrutura proporciona um desnível de água criando, desta forma, o potencial energético, além de realizar em alguns casos a regularização das vazões por meio do armazenamento de água. A usina hidrelétrica é munida de uma turbina que é a ferramenta realizadora da conversão da energia potencial hidráulica proveniente da queda d'água em potência mecânica de eixo, a ser utilizada pelo gerador para conversão em energia elétrica. Assim, a água captada é conduzida pelos dutos até a casa de força, na qual ela produz um torque constante nas pás do rotor da turbina e, por fim, escoar pelo tubo de sucção até a saída a jusante. A eficiência de uma hidrelétrica é função do rendimento das unidades geradoras, formadas pelas turbinas e geradores eletromecânicos. Usualmente este

rendimento varia entre 85% e 93%. Há três categorias de usinas hidrelétricas funcionais: usinas com reservatório de acumulação, usinas a fio d'água e usinas hidrelétricas reversíveis.

Em um mesmo rio, os dois primeiros grupos podem ser combinados em sistemas de cascata, com reservatórios de acumulação localizados na cabeceira dos rios (TOLMASQUIM, 2016).

### 2.2.1.3 Caracterização técnica e econômica

A produção de eletricidade em uma usina hidrelétrica está submetida a várias incertezas e variabilidades hidrológicas, devido aos regimes de vazões afluentes, que são incertos e apresentam variabilidade sazonal, com períodos tanto de enchentes quanto de estiagens. Para mitigar as incertezas e variações sazonais da produção hidrelétrica, devem ser exploradas, de forma individual ou em conjunto, as seguintes soluções: construção de reservatórios de acumulação; parque gerador para operação complementar (*back-up*); intercâmbio de energia elétrica entre as regiões do país (TOLMASQUIM, 2016).

A hidreletricidade necessita de investimento intensivo em capital, sendo cada projeto definido de acordo com as características do local onde se instalará o empreendimento e, como consequência, com soluções técnicas particulares. São necessários vários anos para sua construção, assim como um tempo usualmente longo para o desenvolvimento do projeto técnico, ou seja, o inventário, os estudos de viabilidade técnica e econômica dentre outros, e a obtenção das licenças ambientais. Usualmente, as parcelas mais significativas dos custos de investimento de um projeto hidrelétrico se referem aos custos associados às obras civis e ao fornecimento e montagem dos equipamentos eletromecânicos. Ainda mais, deve-se dar uma atenção especial aos custos das ações de mitigação de impactos socioambientais associados à implantação de uma barragem hidrelétrica, pois estes custos estão crescendo cada vez mais. Assim, de maneira geral, a descrição dos custos de investimentos é geralmente dividida em três parcelas principais: obras civis; equipamentos eletromecânicos e ações socioambientais. Os custos de produção de energia, por outro lado, são baixos, requerendo uma equipe pequena para sua operação e manutenção, sem

custos com matéria-prima para geração (MME/EPE<sup>4</sup>, 2007a, apud TOLMASQUIM, 2016).

### 2.2.2 Usina solar fotovoltaica

O mercado de energia elétrica vem sendo provisionado por usinas solares, nos últimos anos. Esta trajetória se divide em quatro fases, sendo a primeira, a utilização das células fotovoltaicas em estações espaciais, a segunda fase, consistiu na resposta à crise do petróleo na década de 1970, em que a energia fotovoltaica passou a atender uma parcela da demanda em eletricidade nas residências, já que esta tecnologia é economicamente viável, funcionando com um conjunto de baterias de armazenamento. A terceira fase foi a inserção da geração de energia em redes, a partir dos anos 90, com o pagamento de tarifas-prêmio ao fornecedor. E, por fim, a quarta fase geração centralizada devido à competitividade da fonte e a viabilidade econômica da inserção (REN21, 2015; BREYER; GERLACH, 2013<sup>5</sup>; apud TOLMASQUIM, 2016).

#### 2.2.2.1 Panorama mundial

Em 2019, de acordo com os relatórios da Agência Internacional de Energia (AIE, 2020), 115 GW de energia fotovoltaica foram instaladas, levando a contribuição global desta fonte para 627 GW. Os maiores contribuintes foram a China com 30,1 GW, a União Europeia com 16,0 GW e os Estados Unidos com 13,3 GW. O continente africano e o oriente médio contribuíram com 7%.

Desde 2014, muitos países europeus contribuíram para este crescimento por meio de políticas de incentivo tais como subsídios e programas regulatórios, que serão comentados mais adiante. Porém, a China vem assumindo a liderança em instalações e na produção fotovoltaica. Ainda no ano de 2014, cerca de US\$ 150 milhões, foram investidos e representam 55% dos investimentos destinados

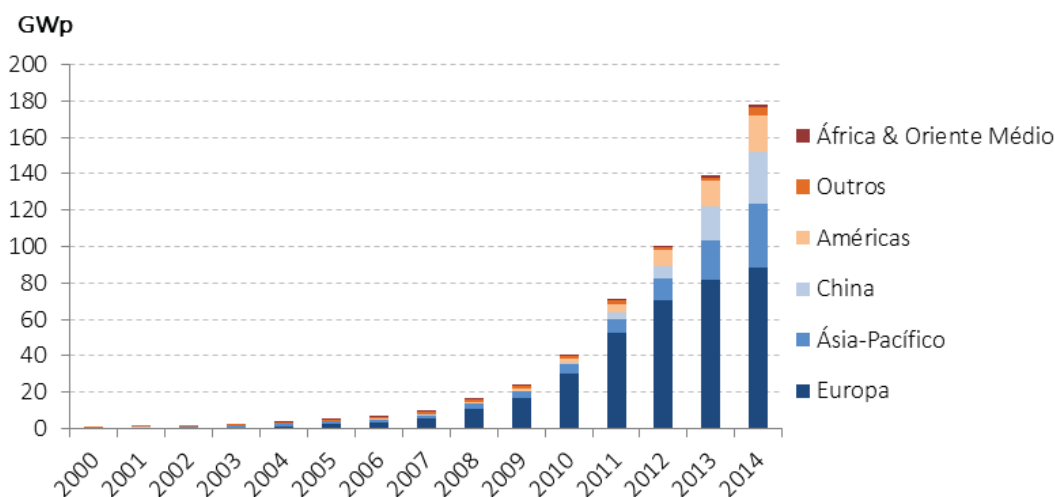
---

<sup>4</sup> MME/EPE. Plano Nacional de Energia 2030. Rio de Janeiro: EPE, 2007a. 408 p. Plano Nacional de Energia 2030 : Geração Hidrelétrica. Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília. 2007b.

<sup>5</sup> BREYER, C.; GERLACH, A. Global overview on grid-parity. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 21, n. 1, p. 121–136, 1 jan. 2013.

às energias renováveis (FIGURA 13) (PILLAI<sup>6</sup>, 2015; FRANKFURT SCHOOL-UNEP; BNEF<sup>7</sup>, 2015; REN21, 2015; apud TOLMASQUIM, 2016).

FIGURA 13 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE FOTOVOLTAICA ACUMULADA.



FONTE: (EPIA, 2014; IEA PVPS, 2015 apud TOLMASQUIM, 2016).

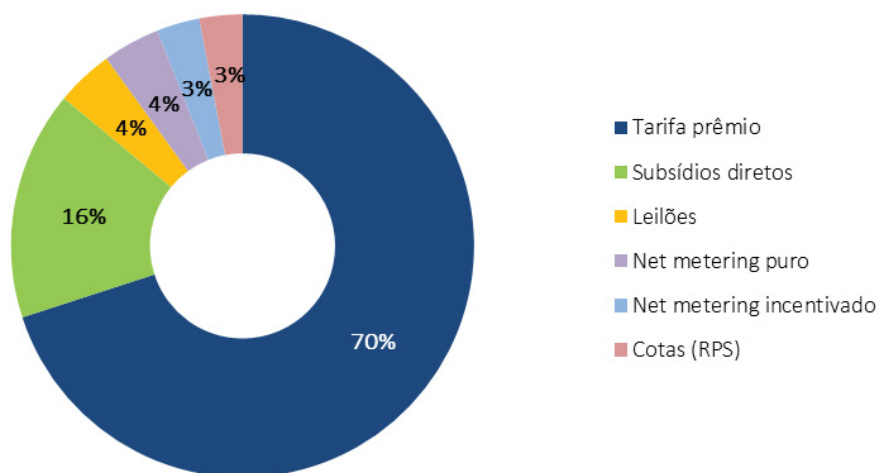
A inserção massiva das usinas solares não se deu apenas por meio de investimentos intensivos, mas também por implementação de programas regulatórios tais como tarifa-prêmio, leilões para projetos de grande porte (geração centralizada), subsídios diretos, *Net metering*, *leasing*, cotas, dentre outros. No final do ano de 2014, alguns projetos de grande porte entraram em fase de construção, notadamente na África do Sul, para uma capacidade de 300 MW, em Marrocos, de capacidade 72 MW (o complexo solar Noor Ouarzazate entrou em serviço em fevereiro de 2016), e de 50 MW na China (REN21, 2015; apud TOLMASQUIM 2016).

A FIGURA 14 representa a proporção de cada um dos modelos de negócio e esquema regulatório para a inserção de usinas fotovoltaicas, sendo 70% da capacidade instalada promovida pelo incentivo tarifa-prêmio que consiste na compra da energia produzida a uma tarifa superior à das distribuidoras, firmada em contrato de longo prazo.

<sup>6</sup> PILLAI, U. Drivers of cost reduction in solar photovoltaics. *Energy Economics*, v. 50, p. 286–293, jul. 2015.

<sup>7</sup> FRANKFURT SCHOOL-UNEP; BNEF. *Global trends in renewable energy investment 2015*, 2015.

FIGURA 14 - CAPACIDADE INSTALADA EM 2013 POR TIPO DE MECANISMO



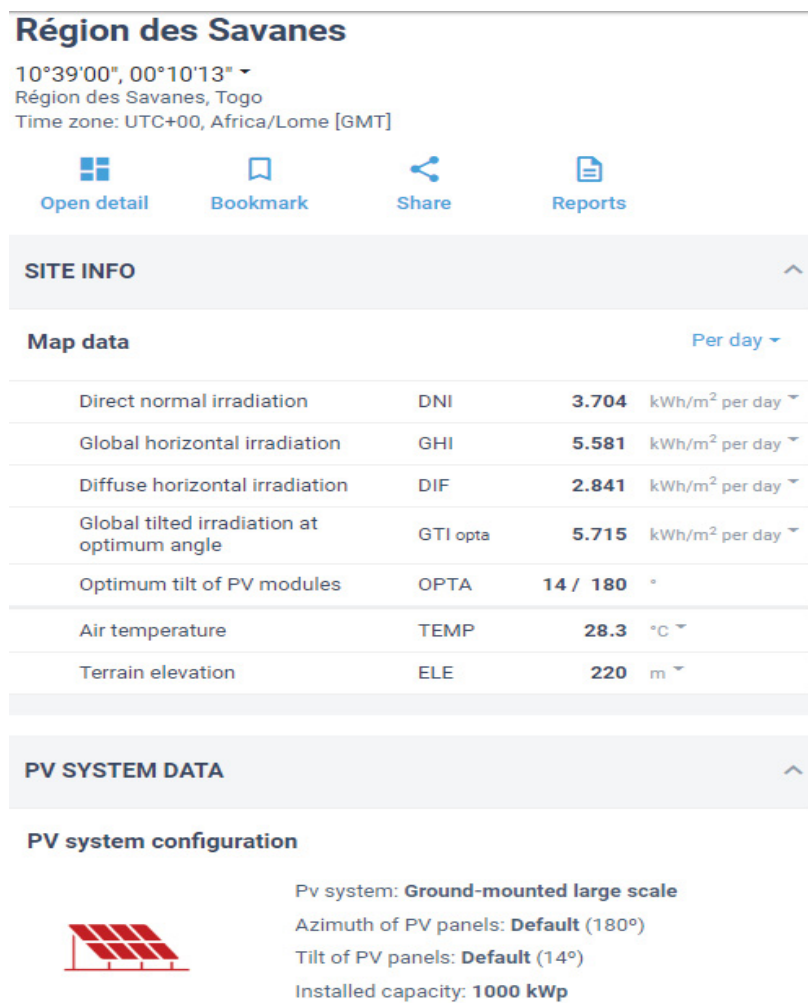
FONTE: (IEA PVPS, 2014 APUD TOLMASQUIM (2016))

#### 2.2.2.2 Panorama togolês

A república do Togo está situada no 6° 07' N e 1° 13' E, portanto, muito próximo à linha do equador. Esta condição favorece uma baixa variabilidade da radiação solar e elevados índices em quase todo o território nacional, o que confere ao país condições vantajosas para o aproveitamento do recurso solar, principalmente, nas regiões das savanas. As obras de construção da primeira central de geração elétrica iniciaram no dia 04 de Fevereiro de 2020. A Central denominada Moyamed Bin Zayed terá uma potência instalada de 50 MW médios e está sendo construída no município de Blitta a 270 km da capital Lomé.

A FIGURA 15 a seguir ilustra a distribuição de irradiação nas regiões das savanas e uma simulação de uma geração centralizada no município de Tandjouraré que recebe uma radiação global de 5,58 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÕES DAS RADIAÇÕES SOLARES NA REGIÃO DAS SAVANAS TOGOLESAS



FONTE: GLOBALSOLAR ATLAS, 2020

### 2.2.2.3 Tecnologia da conversão do recurso primário em energia elétrica

A geração de energia fotovoltaica decorre da incidência de irradiação solar em células fotovoltaicas. Há três tipos de irradiação sendo a irradiação global a soma da irradiação direta e da difusa. A irradiação global é a que serve para estudos energéticos fotovoltaicos. Ela é medida por intermédio da Irradiação Global Horizontal ( $H_{HOR}$ ), enquanto  $H_{DIF}$  é a irradiação difusa e  $H_{DIR}$  representa a irradiação direta (TOLMASQUIM, 2016).

Estas denominações guiarão a emissão de mapas de irradiação solar no decorrer deste estudo.

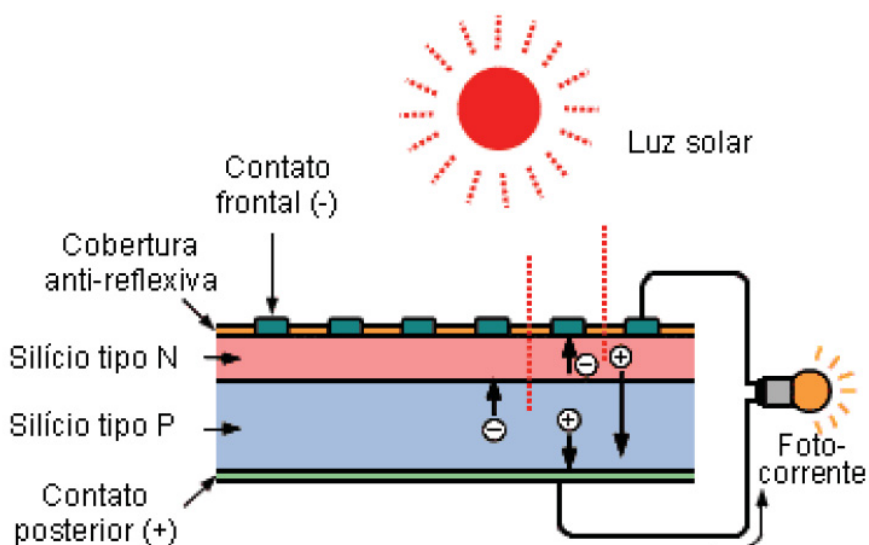
A energia solar fotovoltaica é resultante da conversão da irradiação do sol em energia elétrica através de um dispositivo fabricado com material

semicondutor. O semicondutor mais comum é o silício, pela sua abundância na crosta terrestre (TOLMASQUIM, 2016).

A célula fotovoltaica é composta de duas camadas de material semicondutor. Uma delas possui excesso de elétrons e é chamada de material N (negativo por compor elétrons em excesso) e a outra é caracterizada pela falta de elétrons, chamada de material P (positivo), sendo as duas separadas por uma barreira de potencial. Desta forma, há uma diferença de concentração elétrons que faz com que os elétrons da camada N migram para a camada P, gerando um campo elétrico. Estes fluxos migratórios ocorrem essencialmente pela presença da luz solar.

A FIGURA 16 apresenta um desenho esquemático do efeito fotovoltaico em uma célula.

FIGURA 16 - EFEITO FOTOVOLTAICO EM UMA CÉLULA.



FONTE: (ZILLES et al., 2012 apud TOLMASQUIM, 2016).

### 2.2.3 Usina eólica

A energia eólica, provocada pelo vento, é uma das fontes mais remotas utilizadas pelo ser humano. O seu uso para geração de eletricidade é recente. Os altos custos da energia elétrica e a crise do petróleo têm provocado os investimentos nesta fonte de geração de eletricidade (TOLMASQUIM, 2016).

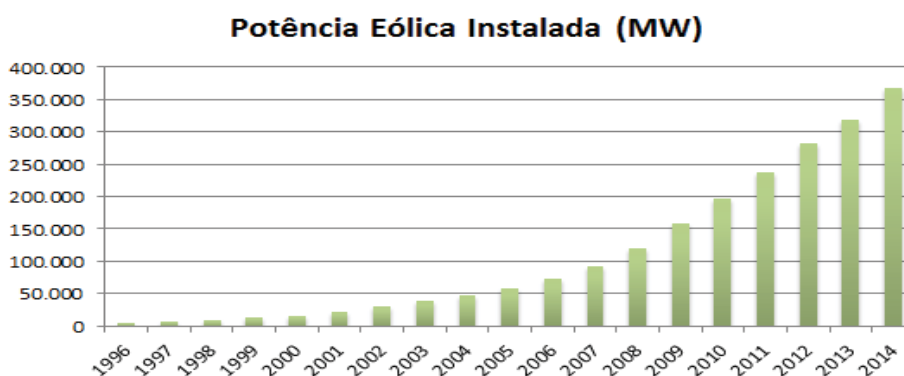
### 2.2.3.1 Panorama mundial

Para o ano de 2020, é esperado um aumento de 8% na produção de energia eólica, em relação à produção de 2019 resultando, desta forma, em 65 GW de inserção. As expectativas de crescimento dos empreendimentos *onshore* são de 11%, atingindo 60 GW em 2020. (IEA, 2020)

O aproveitamento do vento para fins elétricos tem sido feito por agrupamento de torres eólicas, ou seja, em parques. Existem dois tipos de parques: os instalados em região continental (*onshore*) e os instalados em oceanos (*offshore*). Os primeiros são mais comuns, pois menos custosos, porém geram mais impactos socioambientais se forem comparados aos offshore. Comparativamente às outras fontes de geração elétrica, a eólica contribuiu com apenas 3% na energia total gerada em 2014, sendo os países responsáveis para esta contribuição a China com uma participação de 31%, os Estados Unidos com 18% e a Alemanha com 10% (GWEC<sup>8</sup>, 2015 apud TOLMASQUIM, 2016).

A FIGURA 17, a seguir, apresenta a inserção exponencial das usinas eólicas na matriz mundial ao longo dos últimos anos.

FIGURA 17 - EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA EÓLICA INSTALADA NO MUNDO



FONTES: GWEC, 2015 APUD TOLMASQUIM (2016)

Este crescimento expressivo decorre de implementação de políticas e programas de promoção e inserção, principalmente a tarifa *feed-in*, que incentiva todos os tipos de empreendimentos relacionados ao mercado de energias

<sup>8</sup> GWEC. Global Wind Energy Outlook 2014. [s.l.] GWEC, 2014.

renováveis, e de mecanismos de apoio adotados pela União Europeia (COUTURE *et al*<sup>9</sup>, 2010; Saidur *et al*<sup>10</sup>, 2010 apud TOLMASQUIM, 2016).

### 2.2.3.2 Panorama togolês

O Togo não dispõe de nenhum empreendimento eólico em operação, mesmo havendo regiões de ótimas velocidades médias de ventos. Há muito potencial a explorar, pois em algumas das áreas costeiras registraram-se velocidades médias do vento entre 5 m/s e 6 m/s. O governo togolês iniciou um projeto para construir um parque eólico em 4.000 ha em um pântano próximo ao Rio Zio, no município de Zio. Porém, muitos destes empreendimentos enfrentam questões socioambientais por serem próximos de grandes áreas de concentração demográfica e em áreas de cultivo. O parque gerador se conectará à rede existente e fornecerá entre 5 a 7 por cento da eletricidade consumida no país (ATLAS OF AFRICA ENERGY RESSOURCES, 2017).

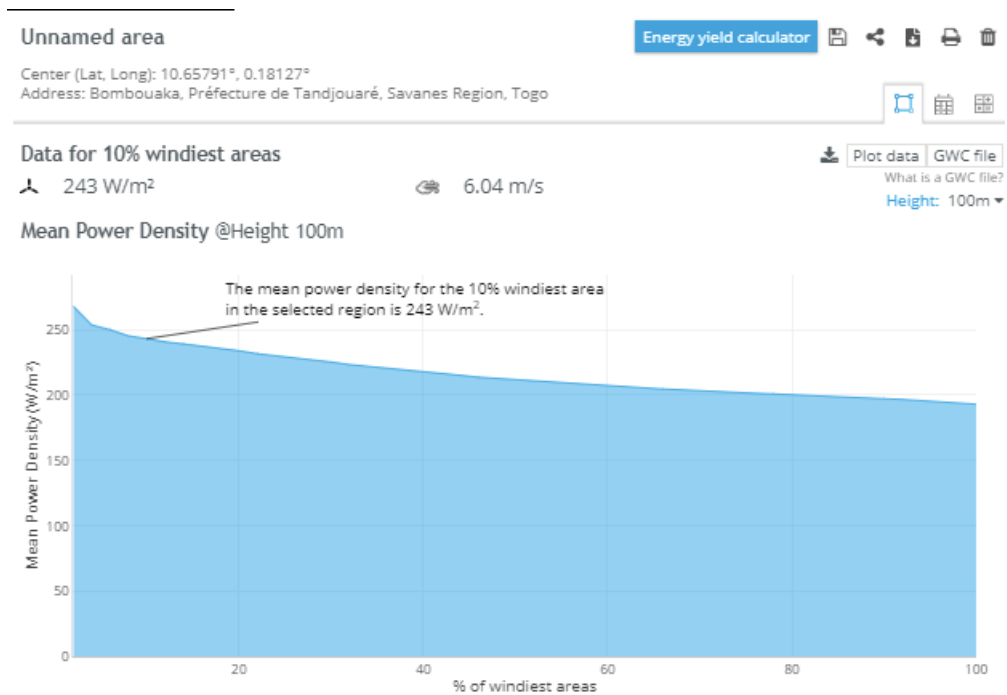
Um dos objetivos do presente trabalho é encontrar regiões de alto potencial eólico e simular instalações de parques eólicos a fim de atender à demanda por eletricidade do Togo. Por exemplo o município de Tandjouaré apresenta uma densidade média de potência de 243 W/m<sup>2</sup> com velocidade média de vento 6,04 m/s, a 100 m de altitude, como ilustrado na FIGURA 18 a seguir, retirada na plataforma de *Global Wind Atlas*.

---

<sup>9</sup> COUTURE, T. D. et al. Policymaker's Guide to Feed-in Tariff Policy Design. [s.l.] National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 1 jul. 2010.

<sup>10</sup> SAIDUR, R. et al. A review on global wind energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 7, p. 1744–1762, Setembro 2010.

FIGURA 18 - GRÁFICO DA DENSIDADE MÉDIA DE POTÊNCIA



FONTE: GLOBALWIND ATLAS, 2020

### 2.2.3.3 Tecnologia da conversão da conversão da energia eólica em eletricidade

O recurso primário de geração eólica é o vento. As torres são instaladas em locais de alto índice de vento e à alturas adequadas, geralmente entre 60 e 80 m. As velocidades de vento provocam o torque no eixo das turbinas eólicas situado nas nacelas. O torque é transformado na caixa de engrenagem que tem como função a obtenção da velocidade de trabalho do gerador que é a peça transformadora da energia mecânica em energia elétrica. As velocidades características para o rotor são: a velocidade de *cut-in* que representa a velocidade mínima a partir da qual há geração de eletricidade e a velocidade *cut-out* a partir da qual o freio do sistema rotor gerador é acionado, pois a partir desta velocidade o funcionamento do conjunto se torna inviável e pode haver danos significativos. Portanto, a produção de eletricidade ocorre neste intervalo de velocidades. Estas características variam de acordo com os fabricantes (TOLMASQUIM, 2016).

#### 2.2.3.4 Componentes de um parque eólico

Um parque eólico é um agrupamento de várias torres eólicas, instaladas sobre fundações em concreto armado, e interligadas entre si. Estas torres são estruturas vazadas que contém o transformador e são fabricadas em principalmente em aço galvanizado. As torres suportam, no topo, o conjunto nacela e rotor, que tem uma função idêntica à do conjunto turbina-gerador em barragens. Há ainda centros de controlos e estações de transformação, nos parques (ROBINSON et al<sup>11</sup>., 2011 apud TOLMASQUIM, 2016).

---

<sup>11</sup> ROBINSON, M. et al. Wind energy. Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability, p. 396, 2011.

#### 2.2.4 Cadeia de Valor e Fator de Capacidade

As três formas de geração de energia anteriormente apresentadas, foram escolhidas em função da disponibilidade e facilidade relativa de exploração e pela cadeia de valor dos empreendimentos requeridos por estas usinas. Portanto, os fatores de capacidade das três usinas foram estudados e apresentados nas seções de resultados. O fator de capacidade é a energia média gerada dividida pela potência instalada. No caso de uma usina fotovoltaica, por exemplo, as melhores localidades brasileiras, para instalação de parques solares, possibilitam um fator de capacidade em torno de 19% enquanto as usinas hidrelétricas brasileiras detêm um fator de capacidade de 56%. Na África este fator de capacidade é de 48%. Por fim, os valores globais para as usinas eólicas oscilam em torno de 28% (GWEC, 2014 apud TOLMASQUIM, 2016). A título de conhecimento, na África são investidos US\$ 40,8 bilhões por ano, para responder somente à falta de energia (EBERHARD *et al.*, 2016).

A estrutura da cadeia de valor está intimamente ligada à capacidade de um empreendimento gerar empregos, de providenciar mão de obra qualificada, de produzir conhecimento científico em um setor particular ou geral. No caso das usinas de geração de eletricidade, os desafios dos projetos de engenharia e obras civis, incluindo a construção de barragens, favorecem, em escala regional e até internacional, o compartilhamento e comercialização dos conhecimentos peculiares atrelados a estas obras. Os países que detêm uma tecnologia madura e conhecimentos inerentes à cadeia produtiva, inclusive nas áreas de projetos, notadamente de engenharia civil, podem inclusive exportar conhecimento. Assim os investimentos nestas obras permitirão aos países anfitriões capacitar a mão-de-obra, formar técnicos, elaborar P&Ds, dentre outros. Estes empreendimentos geram empregos nas fases de projetos, execução (obras civis) e manutenção, permitindo um crescimento notório nas regiões em que estão inseridos (TOLMASQUIM, 2016).

A cadeia de valor da indústria eólica compreende as seguintes atividades principais: materiais (para construção dos componentes), componentes e subcomponentes (tais como pás, torres, gerador, dentre outros), transporte de

equipamentos, montagem do aerogerador, fornecimento de serviços (logística e operações) e geração de energia.

A cadeia de valor da indústria fotovoltaica pode ser dividida, basicamente, em *upstream* e *downstream*. Estas duas cadeias proporcionam atividades complementares que acompanham as atividades principais, *Project Developer*, EPC (*Engineering, Procurement and Construction*), O&M, proprietário, agente integrador, instalador, manutenção, incluindo principalmente: financiamento, P&D, certificação, desenvolvimento de *softwares* (TOLMASQUIM, 2016).

No Togo, estes empreendimentos permitirão a formação e capacitação de técnicos locais, criação de empresas próximas aos parques e, conseqüentemente, a geração de empregos, baseando-se nos exemplos de Marrocos, Quênia e da África do Sul.

Diante deste cenário, a diversificação de uma matriz energética não seria apenas uma solução a uma demanda de energia, porém igualmente uma solução socioeconômica, já que proporcionaria uma vasta criação de empregos e conseqüentemente um “*boom*” econômico.

De dois pontos de vista, pode-se analisar a diversificação de matriz energética, tanto no financeiro quanto no estratégico. No ramo financeiro, a diversificação visa a diminuição do risco, ou seja, a volatilidade. Estrategicamente, a diversificação implica na inserção de novas tecnologias para crescer e alcançar maiores benefícios (COSTELLO, 2007 apud GARCÍA *et al.*, 2020). Baseado nesta observação, prossegue-se com a apresentação da teoria de Markowitz adotada para conduzir o presente trabalho.

## 2.3 Método de diversificação de Matriz: Moderna Teoria de Portfólio de Markowitz

### 2.3.1 Conceito e História da teoria

Bruni *et al.* (1998) relatam que devido ao objetivo de maximizar retornos e correr menores riscos, Harry Markowitz desenvolveu a teoria de Portfólios durante seu doutorado na Universidade de Chicago na década de 50. Inicialmente concebida para aplicações em títulos financeiros, a moderna teoria de portfólios (Markowitz, 1952) baseou-se nas seguintes premissas:

1. Os investidores avaliaram portfólios apenas com base no valor esperado e na variância ou desvio padrão das taxas de retorno sobre o horizonte de um período;
2. Os investidores nunca estariam satisfeitos. Quando postos a escolher entre dois portfólios de mesmo risco, sempre escolheriam o de maior retorno;
3. Os investidores seriam avessos ao risco. Quando postos a escolher entre dois portfólios de mesmo retorno, sempre escolheriam o de menor risco;
4. Os ativos individuais seriam infinitamente divisíveis, significando que um investidor poderia comprar a fração de ação, se assim o desejasse;
5. Existiria uma taxa livre de risco, na qual um investidor poderia tanto emprestar, quanto tomar emprestado;
6. Custos de transações e impostos seriam irrelevantes;
7. Os investidores estariam de acordo quanto à distribuição de probabilidades das taxas de retorno dos ativos, o que assegura a existência de um único conjunto de carteiras eficientes.

Harry Markowitz propôs a Moderna Teoria do Portfólio em um estudo sobre seleção de uma carteira de ativos financeiros. Ele destacou várias estratégias que os investidores usam ao escolher seus investimentos e defendeu a estratégia que considera o retorno esperado, variação de uma carteira de ativos. Ele desenvolveu esta hipótese ilustrando graficamente o conceito de fronteira eficiente. Uma fronteira eficiente é um conjunto de portfólios ideais que fornecem o maior retorno esperado para um determinado nível de risco (MALALA e ADACHI, 2020). Este assunto será abordado nos próximos tópicos.

De acordo com Markowitz, o procedimento de seleção de uma carteira é simples e é constituído de duas etapas. A primeira etapa inicia-se com a observação e experiência do investidor e, em seguida, com percepções sobre o desempenho futuro dos ativos analisados e disponíveis para investimento. A segunda etapa trata das projeções futuras e termina com a escolha da carteira de ações. No processo decisório há preocupações com duas incertezas: o retorno e o risco. O retorno é o valor desejável ou esperado, enquanto o risco representa a variância ou desvio padrão indesejável em torno da média. Entretanto, o investidor sensato almejava minimizar a variância e maximizar o fator desejável. Defendendo a importância da diversificação, Markowitz (1952) foi ao encontro da corrente dominante da época liderada por Keynes que pregava a unificação da carteira.

Porém de forma sucinta, Markowitz demonstrou existir combinações eficientes a partir de medidas características, tais como a média, a variância e a correlação, dos ativos de uma carteira. Segundo Malala e Adachi (2020), uma carteira é ótima quando possibilita a maximização do retorno e a minimização do risco. Desde então, a Teoria do Portfólio Moderno se espalhou para outros setores incluindo o setor elétrico, que usa a teoria de três maneiras significativas:

1. Para otimizar os custos de geração de eletricidade (recursos);
2. Para maximizar os retornos da geração de eletricidade;
3. Para maximizar a quantidade de potencial produzido. O risco advém da variabilidade da energia gerada, que pode ser medida pelo desvio padrão ou pela variância.

### 2.3.2 Formulação matemática da moderna teoria de portfólio.

Como ressaltado anteriormente, o valor esperado ou retorno de uma carteira é a média dos ativos que compõem esta carteira. Portanto em uma carteira composta de vários ativos com proporção investida variada, o retorno esperado é a média ponderada dos retornos esperados para cada ativo individual. O risco desta carteira é função das variâncias individuais de cada ativo e mais uma parcela das covariâncias entre os ativos, calculadas dois a dois. Considerando uma carteira **C** composta por dois ativos A e B, a equação do retorno será da seguinte forma, para o Ativo A e Ativo B, respectivamente:

$$\mu_A = E(\widetilde{R}_A) = \overline{R}_A \quad (1)$$

$$\sigma_A = \sigma(\widetilde{R}_A) \quad (2)$$

$$\mu_B = E(\widetilde{R}_B) = \overline{R}_B \quad (3)$$

$$\sigma_B = \sigma(\widetilde{R}_B) \quad (4)$$

Onde:

$\widetilde{R}$ : é a variável aleatória do ativo

$\mu$ : é a média ou o valor esperado ou o retorno da variável aleatória do ativo

$\sigma$ : é o desvio padrão ou o risco da variável aleatória do ativo

Sendo  $w_i$  a proporção de cada ativo, onde o somatório  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  e  $0 \leq w_i \leq 1$ , o valor esperado ou retorno da carteira **C** é calculado da seguinte forma,

$$\mu_C = \widetilde{R}_C = w_1 \cdot \widetilde{R}_A + w_2 \cdot \widetilde{R}_B \quad (5)$$

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (6)$$

De acordo com as propriedades da esperança matemática, o retorno da carteira pode ser exprimido conforme a equação:

$$E[\widetilde{R}_C] = w_1 \cdot E[\widetilde{R}_A] + w_2 \cdot E[\widetilde{R}_B] \quad (7)$$

Enquanto o risco da carteira **C**, é calculado da seguinte forma:

$$\sigma[\widetilde{R}_C] = \sigma[w_1 \cdot \widetilde{R}_A + w_2 \cdot \widetilde{R}_B] \quad (8)$$

$$\sigma^2[\widetilde{R}_C] = \sigma^2[w_1 \cdot \widetilde{R}_A + w_2 \cdot \widetilde{R}_B] \quad (9)$$

$$\sigma^2[\widetilde{R}_C] = w_1^2 \cdot \sigma^2[\widetilde{R}_A] + w_2^2 \cdot \sigma^2[\widetilde{R}_B] + 2 \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot cov(\widetilde{R}_A, \widetilde{R}_B) \quad (10)$$

Em suma para uma carteira **C** de **n** ativos, as formulações resultam nas seguintes expressões:

- O retorno da carteira:

$$\mu_C = \sum_{i=1}^n \mu_i w_i \quad (11)$$

Ou matricialmente:

$$\mu_C = [\mu_1 \quad \mu_2 \cdots \quad \mu_n] \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

- O risco da carteira

$$\sigma^2[\tilde{R}_C] = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot \sigma(\tilde{R}_i))^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i \cdot w_j \cdot \text{cov}(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j) \quad (13)$$

Ou matricialmente:

$$\sigma^2[\tilde{R}_C] = [w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_n] \cdot \begin{bmatrix} \text{var}_1 & \text{cov}_{12} & \cdots & \text{cov}_{1n} \\ \text{cov}_{21} & \text{var}_2 & \cdots & \text{cov}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}_{n1} & \text{cov}_{n2} & \cdots & \text{var}_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

No caso particular em que os ativos são independentes, sendo que o grau de dependência entre ativos é expressido pela covariância, a covariância entre estes é nula. Portanto a teoria de portfólios segue a seguinte formulação:

$$\sigma^2[\tilde{R}_C] = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot \sigma(\tilde{R}_i))^2 \quad (15)$$

E se as proporções  $w$  forem iguais, o risco é calculado pela equação

$$\sigma^2[\tilde{R}_C] = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{n} \cdot \sigma(\tilde{R}_i) \right)^2 \quad (16)$$

Ou ainda,

$$\sigma^2[\tilde{R}_C] = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma(\tilde{R}_i))^2}{n} \quad (17)$$

O termo  $\sum_{i=1}^n \frac{(\sigma(\tilde{R}_i))^2}{n}$  representa a variância média de todos os ativos. Observa-se que o aumento do número de ativos reduz a variância da carteira e, portanto, o risco. Assim, com um número infinito de ativos o risco tende a zero.

Existe um outro caso particular, no qual os ativos podem ser dependentes, porém distribuídos uniformemente, ou seja, com  $w$  igual. Neste caso, a formulação do risco resulta em:

$$\sigma^2[\tilde{R}_C] = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma(\tilde{R}_i))^2}{n} + \frac{(n-1)}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot cov(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j) \quad (18)$$

Como explicado anteriormente, a expressão  $\sum_{i=1}^n \frac{(\sigma(\tilde{R}_i))^2}{n}$  representa a variância média dos ativos da carteira enquanto o termo  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot cov(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j)$  representa a média das covariâncias. Quando o número de ativos tende a infinito, a variância tende a zero. Desta forma o risco da carteira tende à média das covariâncias.

Objetivando reduzir o risco total de aplicações, a diversificação da carteira é aconselhada, ainda mais, o risco da carteira diminui consideravelmente em função da correlação existente entre os ativos nela incluídos, ou seja, quanto menor o nível das correlações, maiores as reduções obtidas (BRUNI *et al.*,

1998). Porém existe um limite a partir do qual não haverá mais um retorno maior, qualquer que seja o nível de risco; da mesma forma, dado um nível de retorno não haverá carteira com menor risco. Este limite denomina-se fronteira eficiente.

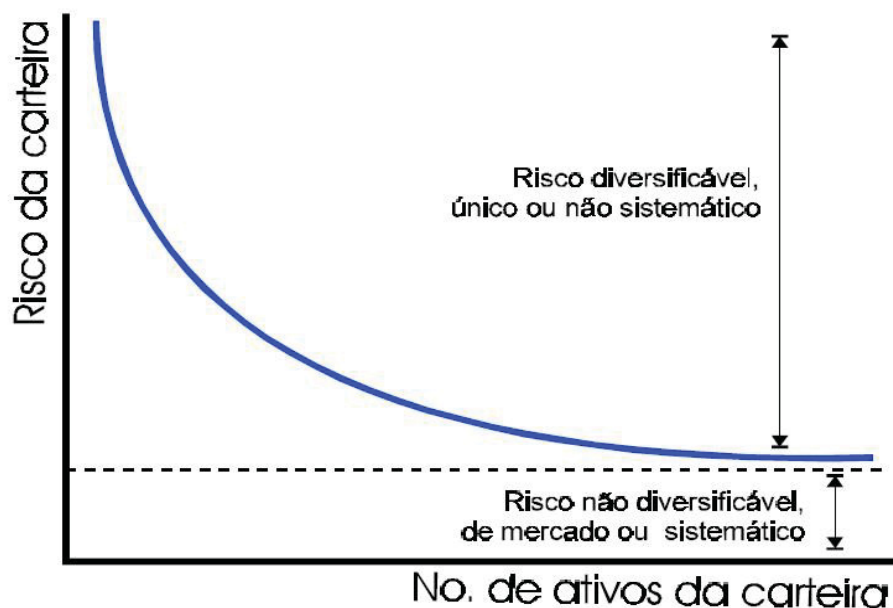
### 2.3.3 Fronteira Eficiente

O aumento do número de ativos da carteira reduz o risco. Contudo, há uma determinada quantidade de ativos a partir da qual o risco praticamente se estabiliza. O risco de mercado é o potencial de oscilação dos rendimentos de um ativo durante um período de tempo. É representado pelos desvios (volatilidade) em relação ao resultado esperado (ASSAF, 2001<sup>12</sup> apud SCHIROKY, 2007). As ações têm seu risco de mercado dividido entre risco diversificável e não diversificável. O risco diversificável corresponde aos fatores inerentes às companhias emissoras, tais como: desempenho do setor da companhia, novos produtos, preços internacionais, transparência na relação entre investidores, entre outros. O risco não diversificável corresponde às movimentações na taxa de juros, nível de crescimento econômico, entre outros. É um risco sistêmico decorrente de fatores externos (político, social, econômico, insegurança jurídica, o Estado). Este risco mínimo é não diversificável e é intrínseco ao mercado. As relações entre riscos estão ilustradas na FIGURA 19 a seguir.

---

<sup>12</sup> ASSAF NETO, Alexandre. Mercado Financeiro. São Paulo Editora Atlas, 4ª edição, 2001.

FIGURA 19 - RISCOS DE UMA CARTEIRA



FONTE: BRUNI ET AL., 1998

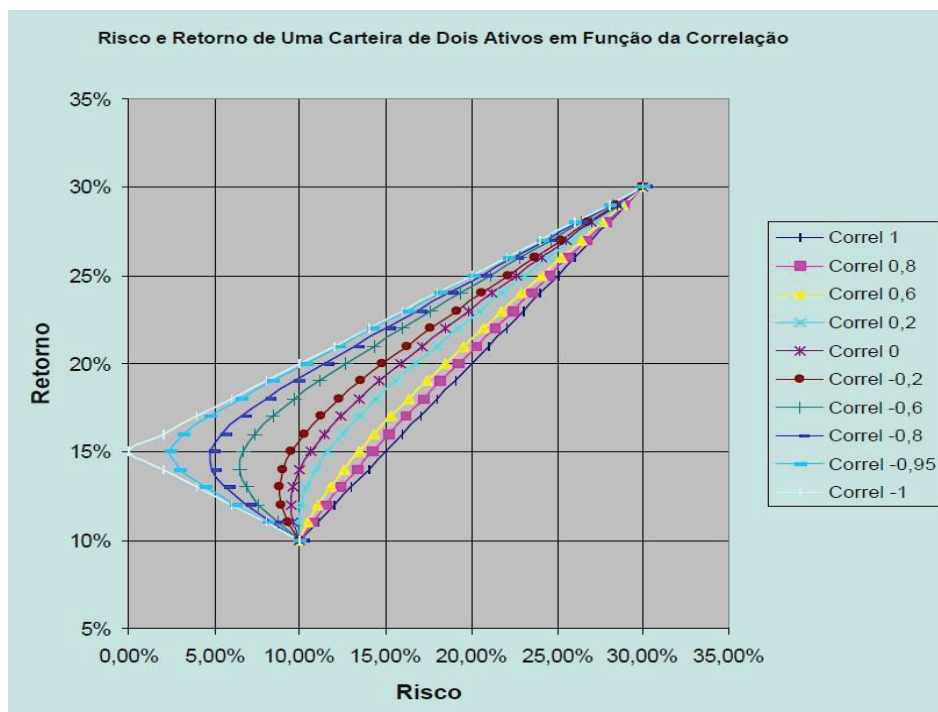
Ainda um parâmetro a ser levado em conta, é a correlação entre os ativos. Securato<sup>13</sup> (1997) apud Bruni *et al.* (1998), ressaltou a importância da consideração da correlação. Securato (1997) afirmou que, antes do trabalho pioneiro de Markowitz (1952), costumava-se associar a relação entre risco e retorno a uma reta, acreditando que estes seriam perfeitamente correlacionados.

*“Esse tipo de raciocínio do nosso investidor é bastante ‘intuitivo’. Tão intuitivo quanto afirmar que ‘um peso de dez quilos cai dez vezes mais depressa que o peso de um quilo’. Então, dizem, Galileu subiu no alto da torre de Pisa e soltou, junto, um peso de dez e um outro de um quilo, que caíram juntos ao solo. Bem, lá se foi a intuição. O Galileu das Finanças foi Markowitz, o qual provou que o raciocínio ‘intuitivo’ de nosso investidor estava errado. O gráfico correto da relação risco versus retorno não é, no caso geral, uma reta, mas, sim, uma hipérbole.” (SECURATO p.64).*

<sup>13</sup> SECURATO, J. R. *Decisões Financeiras em Condições de Risco*. São Paulo: Atlas, 1996.

Considerando esta relação hiperbólica enunciada por Markowitz, a variância da carteira depende da covariância entre os pares de ativos, a qual, por sua vez, depende da correlação entre os ativos. Assim, quando dois ou mais ativos pouco relacionados compõem uma carteira de investimentos consegue-se um risco menor que a média ponderada dos riscos individuais, conseguindo algumas vezes um risco menor que o do ativo de menor risco com um retorno maior que este ativo proporcionaria (GONÇALVES *et al.*, 2002). Este fenômeno pode ser explicado pelo gráfico de fronteira eficiente, apresentado na FIGURA 20.

FIGURA 20 - FRONTEIRA EFICIENTE



FONTES: GONÇALVES ET AL., 2002

Ao analisar os gráficos da FIGURA 20, a correlação varia em função do risco, e vice-versa. Observa-se que quanto menor a correlação entre dois ativos, menor é o risco da carteira. Quando a correlação entre dois ativos é 1, não há melhora significativa na composição da carteira. Já quando se tem uma correlação perfeitamente negativa (-1) pode-se afirmar que o risco se iguala a zero, mantendo um retorno esperado qualquer (GONÇALVES *et al.*, 2002).

No caso particular (hipotético, pois na vida real não existe risco nulo) no qual a correlação dos ativos da carteira é unitária e negativa, é possível obter o

ponto ótimo teórico de risco zero, com um determinado retorno (BRUNI *et al.*, 1998).

Existe um conjunto de pontos otimizados, na relação risco em função do retorno, que constitui a fronteira eficiente, sujeita às seguintes restrições:

- Dado um nível de risco, não existe carteira com maior retorno;
- Dado um nível de retorno, não existe carteira com menor risco.

A fronteira eficiente pode ser obtida por intermédio da maximização do retorno e, simultaneamente, a minimização do risco, o que equivale a maximizar a razão retorno/risco,  $\mu_C/\sigma^2[\tilde{R}_C]$ , (função objetivo ou coeficiente de variação).

$$\max\left(\frac{\mu_C}{\sigma^2[\tilde{R}_C]}\right) = \max\left(\frac{\sum_{i=1}^n \mu_i w_i}{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot \sigma(\tilde{R}_i))^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i \cdot w_j \cdot cov(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j)}\right) \quad (19)$$

Com o intuito de evitar novas entradas, a maximização estará sujeita à restrição de que o total do valor investido deva ser 1, ou seja, a somatória das proporções de cada ativo deve ser igual a 1,  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ , e ainda cada proporção deve ser superior ou igual a zero,  $0 \leq w_i \leq 1$  (BRUNI *et al.*, 2002).

O uso da Moderna Teoria de Portfólio (*Modern Portfolio Theory*) para planejar a geração de eletricidade permite promover investimentos em energia renovável, fontes cada vez mais desejáveis (MALALA e ADACHI, 2020).

Há numerosos estudos que aplicaram MPT no setor elétrico, tais como AWERBUCH e BERGER, 2003; ESCRIBANO FRANCÉS *et al.*, 2013; BHATTACHARYA e KOJIMA, 2012; ROQUES *et al.*, 2010; MALCOLM e ZENIOS, 1994; MARRERO *et al.*, 2015; CUCCHIELLA *et al.*, 2017.

No caso de Quênia, serviu a Moderna Teoria de Portfólio (MPT) do setor financeiro para enfrentar esse desafio, estabelecendo uma fronteira teórica eficiente para a geração de eletricidade no país. O estudo conclui que, embora o atual portfólio de geração de eletricidade no Quênia não seja o ideal, é possível mudar para um portfólio eficiente, com custos mais baixos, diversificado e

ambientalmente sustentável. Ainda o MPT aborda o trilema da energia e, portanto, pode ajudar no planejamento da geração de eletricidade nos países cujos setores de eletricidade ainda estão em desenvolvimento. O estudo se adiciona à literatura sobre a aplicabilidade do MPT no setor elétrico e propõe maneiras de o Quênia melhorar o seu portfólio de geração de eletricidade (MALALA e ADACHI, 2020)

### 3 METODOLOGIA

Na sequência será descrita a metodologia empregada na aplicação dos conceitos apresentados anteriormente quanto ao método da Moderna Teoria de Portfólio de Markowitz. Assim será apresentado um Estudo de Caso para o setor elétrico do Togo. Prossegue-se com a coleta dos dados das séries históricas de vazões dos rios, de velocidades de vento e de radiação e, em sequência, a avaliação da sazonalidade das séries e a obtenção das séries históricas de energia que poderiam ser geradas pelas respectivas fontes. Em seguida, serão aplicados conceitos baseados na MTP a estas séries históricas de energia e por fim, a delimitação de áreas com alto potencial eólico e alto potencial fotovoltaico para produzir estas gerações.

#### 3.1 Caracterização da Área de estudo: o Togo

##### 3.1.1 Localização e Inserção geográfica

A república do Togo é situada entre as latitudes 6° N e 11° N e entre as longitudes 0° e 1°40' L, na África Ocidental. O país se apresenta como um corredor que se estende em um comprimento de 650 km do Oceano Atlântico no Sul ao Burkina-Faso no Norte, e em uma largura variável de 150 km entre Gana ao Oeste e Benim ao Leste (apresentado no mapa 2). Esta configuração explica a grande diversidade climática, biológica, econômica e humana do país. O território possui uma extensão de 56.785 km<sup>2</sup> com uma população total de 8,6 milhões de habitantes em 2020, resultando em uma densidade populacional de 152 hab/km<sup>2</sup> (GIZ, 2017 e INSEED, 2020).

A capital política Lomé fica na região marítima cujas coordenadas geográficas são 6°07' N e 1°13' L. Como ilustrado anteriormente na FIGURA 9, o país é subdividido em cinco regiões administrativas apresentadas do sul ao norte: Região *Maritime* com 42% da população, Região des *Plateaux* com 12% da população, Região *Centrale* com 10%, Região de Kara e Região des *Savanes* com 36% da população (SOFRECO<sup>14</sup>, 2010 apud NTAGUNGIRA, 2015). A FIGURA 21 ilustra a localização e inserção geográfica do Togo.

---

<sup>14</sup> SOFRECO (2010), Réalisation de l'étude d'un plan stratégique du sous-secteur de l'énergie électrique au Togo, p 54 – 56.



umidade relativa média varia entre 60% e 80%. A velocidade média de vento é de 1,93 m/s e a duração média diária de insolação é de 6 horas e 37 minutos. A evapotranspiração média nacional é de 1.540 mm por ano.

A análise dos níveis e dos efeitos das variáveis climáticas em escala regional permite afirmar que a região das savanas é a que registra um volume de precipitação mais baixo, um número de dias de chuva reduzido, altas temperaturas, o grau higrométrico mais baixo e o intervalo de insolação mais longo. Estes fatores combinados, favorecem o aumento da taxa de dessecação nas regiões setentrionais (GIZ, 2017).

Os estudos de tendências climáticas no período de 1961 a 2012 apontaram um aumento de temperatura e a diminuição de pluviometria e do número de dias chuvosos e ainda a alteração dos regimes pluviométricos. No período de 1961 a 2012, o Togo registrou o aumento de 1 °C nas temperaturas médias. Os meses de fevereiro, março e abril são os mais quentes com temperaturas podendo exceder 35 °C. Quanto à tendência de chuvas, há uma diminuição da pluviometria anual em relação ao período de referência 1961 a 1985 e o período de 1986 a 2015 que é deficitário com reduções de precipitação entre 3 e 81 mm (TCN, 2015).

### 3.1.3 Hidrografia e Recursos hídricos

O sistema hidrográfico do Togo é composto principalmente de três bacias, às quais se somam algumas bacias fronteiriças ao leste do país. As principais são:

- i. A bacia de Volta no norte do Togo, drenada pelo rio Oti, conhecido também como rio Pendjari, e pelos seus principais afluentes (Sansargou, Koumongou e Kara), e o rio Mô. A bacia cobre uma área de 26.700 km<sup>2</sup>, sendo 47% do território nacional;
- ii. A bacia do rio Mono, no centro e no Sudeste do país, drenada pelo rio Mono e seus afluentes Anié, Amou e Ogou, drenando 37% do território togolês;
- iii. A bacia do Lago Togo, localizada no sul do país, irrigada pelos rios Zio e Haho, e abrangendo 14% da superfície togolesa.

A TABELA 3 apresenta as principais características dos rios Mono e Oti (Pendjari).

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS RIOS

Rio	Extensão (km)	Vazão média (m <sup>3</sup> /s)	Mínima (m/s)	Máxima (m/s)
Oti	520	354	0	3.040
Mono	467	54	0	560

FONTE: O AUTOR (2020)

Os recursos hídricos do Togo são constituídos das precipitações, águas superficiais que drenam as principais bacias e águas subterrâneas, estimadas entre 8 e 12 bilhões de m<sup>3</sup> de água em média por ano. As águas superficiais são repartidas nas três bacias supracitadas e as águas subterrâneas representam 9 bilhões de m<sup>3</sup>, para um consumo anual de 3,4 bilhões de m<sup>3</sup> (GIZ, 2017).

Com o intuito de apresentar melhor os recursos hídricos do país, a FIGURA 22 foi incorporada ao presente trabalho. As zonas 1, 2 e 4 são componentes da bacia do rio Oti, a zona 3 representa a bacia do rio Mono e a zona 5 cobre a área da bacia do Lago Togo.



### 3.1.4 População e Perfil do consumidor

A população togolesa, majoritariamente jovem sendo 44,4% com menos de 15 anos, é potencialmente ativa. Há a preponderância feminina com 51,1% da população nacional. Os togoleses de 65 anos ou mais representam apenas 4% da população total, sendo 39,5% homens e 60,5% mulheres. A proporção potencialmente ativa (15 a 64 anos) representa 54%. Majoritariamente rural, todavia, a população demonstra uma tendência crescente de se urbanizar com uma taxa de crescimento anual de 3,8% contra 1,58% para a população rural (INSEED, 2015).

O perfil do consumidor togolês foi traçado no final de dezembro de 2013 e registraram-se 233.036 agentes econômicos assinantes de eletricidade sendo 83,1% residenciais, estimados em 1,3 milhões de habitantes, e 15,6% industriais no ramo de produção e transformação. Foi destinado à administração pública 1,3% e o 0,1% restante aos parceiros técnicos e financeiros (Ntagungira, 2015).

Com o objetivo de suprir a demanda de eletricidade do Togo, cabe aqui iniciar a resolução do problema com o cálculo da demanda total da população, considerando os consumos anual médio per capita nacional e regional. De acordo com o relatório apresentado por Ntagungira, o consumo médio anual per capita no Togo é de 118 kWh enquanto a média da região subsaariana é estimada a 535 kWh.

Com estas informações, estimou-se o consumo total de eletricidade em 2020:

1. Com a média nacional, o consumo total em Togo é:  
 $\text{Consumo} = 118 * 8.608.444 = 1.015,80 \text{ GWh}$
2. Com a média regional, o consumo total na região subsaariana é:  
 $\text{Consumo} = 535 * 8.608.444 = 4.605,51 \text{ GWh}$

Ainda usando o estudo de Ntagungira (2015), foram levantados os dados do parque de geração e estimada a geração anual em GWh, para comparação com as demandas provenientes do mercado de eletricidade.

3. Produção anual de eletricidade com importação (Potência garantida × horas no ano)

$$\text{Produção} = 275 * 365 * 24 = 2.409 \text{ GWh/ano}$$

4. Produção anual de eletricidade sem importação (Potência garantida × horas no ano). A produção particular de eletricidade no Togo advém da Central térmica de Lomé A (*Sulzer*) com uma potência garantida de 10 MW mais a Central térmica da *ContourGlobal* de 90 MW. Conforme o acordo firmado entre Benim e Togo, 47% da produção conjunta é destinada ao Togo. Portanto, sem levar em conta a importação, o país fica com este percentual das produções da Central Hidrelétrica Binacional de Nangbeto de 30 MW e da Central térmica TAGs de Lomé de 40 MW. Estes dados estão apresentados na TABELA 2.

$$\text{Produção} = [(90 + 10) + (0,47 * (40 + 30))] * 365 * 24 = 1.164,20 \text{ GWh}$$

Com o objetivo de encontrar a demanda de energia a ser suprida, foram simulados 4 cenários com algumas condições de contorno. Investigou-se qual seria o consumo anual total de eletricidade:

- i. Se o consumo togolês anual per capita fosse de 118 kWh e o país importasse a eletricidade.
- ii. Se o consumo anual per capita fosse 118 kWh e o país não importasse a eletricidade.
- iii. Se o consumo anual per capita aumentasse para a média regional de 535 kWh e o país continuasse importando a eletricidade.
- iv. Se o consumo anual per capita aumentasse para a média regional de 535 kWh e o país parasse de importar a eletricidade.

Por meio da análise destes cenários, resultaram os déficits elencados na TABELA 10 a seguir e os consumos totais para cada investigação. O cenário mais crítico e, portanto, mais interessante para o desenvolvimento da presente pesquisa, é o quarto que investiga o consumo anual nacional sem o aporte externo, a fim de conceber uma matriz energética independente e autossuficiente.

A TABELA 4 apresenta a discretização do consumo de eletricidade por parte dos setores atendidos. O consumo cativo, efetuado pela população, representa 42% e totalizaria 1.015,80 GWh, se todos os togoleses tivessem acesso a eletricidade e consumissem 118 kWh. O Consumo total, levando em conta todos os setores econômicos e sociais, resultaria em 2.418,57 GWh.

TABELA 4 - TABELA RESUMO DO CONSUMO NACIONAL DE ELETRICIDADE (118 kWh)

Consumo Nacional incluindo (População, Empresas/Indústrias, Administração Pública, Parceiros técnicos) com a média nacional 118 kWh		
Consumidores	Consumo em GWh	Percentual
População	1.015,80	42%
Indústrias/Empresas	1.136,73	47%
Administração Pública	217,67	9%
Parceiros Técnicos	48,37	2%
<b>Total</b>	<b>2.418,57</b>	<b>100%</b>

FONTE: O AUTOR (2020)

O mesmo procedimento foi aplicado, porém com uma média regional (os países da África subsaariana) que é estimada a 535 kWh. O total de consumo observado é de 10.965,50 GWh, como apresentado na TABELA 5.

TABELA 5 - TABELA RESUMO DO CONSUMO NACIONAL DE ELETRICIDADE (535 kWh)

Consumo Nacional incluindo (População, Empresas/Indústrias, Administração Pública, Parceiros técnicos) com a média regional 535 kWh		
Consumidores	Consumo em GWh	Percentual
População	4.605,51	42%
Indústrias/Empresas	5.153,79	47%
Administração Pública	986,90	9%
Parceiros Técnicos	219,31	2%
<b>Total</b>	<b>10.965,50</b>	<b>100%</b>

FONTE: O AUTOR (2020)

Após a obtenção do consumo total e da produção de eletricidade com e sem a importação, foram calculados os déficits para cada um dos cenários. Os resultados estão apresentados na TABELA 6 e na TABELA 7.

TABELA 6 - DÉFICIT COM IMPORTAÇÃO

Déficit com Importação		
Consumo nacional (GWh)	Produção com importação (GWh)	Déficit (GWh)
2.418,57	2.409,00	9,57
Consumo regional (GWh)	Produção com importação (GWh)	Déficit (GWh)
10.965,50	2.409,00	8.556,50

FONTE: O AUTOR (2020)

Dos déficits obtidos, o mais crítico e, portanto, mais relevante para o presente estudo, é o decorrente da subtração do consumo total (aplicando a média regional) da produção sem importação, sendo estimado em 9.801,30 GWh, apresentado na TABELA 7.

TABELA 7 - DÉFICIT SEM IMPORTAÇÃO

Déficit sem importação		
Consumo nacional (GWh)	Produção sem importação (GWh)	Déficit (GWh)
2.418,57	1.164,20	1.254,37
Consumo regional (GWh)	Produção sem importação (GWh)	Déficit (GWh)
10.965,50	1.164,20	9.801,30

FONTE: O AUTOR (2020)

Com o intuito de comparar as gerações diárias de energia com os consumos diários, os resultados anuais obtidos em GWh foram convertidos em consumos e déficits diários, em kWh. Estes estão apresentados na TABELA 8 e na TABELA 9.

TABELA 8 - CONSUMO TOTAL DIÁRIO (535 kWh)

Consumo total diário	1.251.769,406	kWh
Déficit diário	1.118.869,863	kWh

FONTE: O AUTOR (2020)

Aplicando um consumo médio per capita anual de 535 kWh, o consumo total diário sem importação resulta em 1.251.769,406 kW, a demanda para a qual este presente trabalho procura atender.

TABELA 9 - CONSUMO TOTAL DIÁRIO (118 kWh)

Consumo total	276.092,6288	kWh
Déficit diário	143.192,9224	kWh

FONTE: O AUTOR (2020)

A TABELA 10 é o resumo dos resultados de déficits obtidos após a simulação dos cenários propostos previamente.

TABELA 10 - OS CENÁRIOS POSSÍVEIS

Cenários de Déficits em GWh		
Produção	Sem importação	Com importação
Consumo		
Nacional	1.254,37	9,57
Regional	9.801,3	8.556,5

FONTE: O AUTOR (2020)

Nos itens a seguir, serão apresentadas e detalhadas as razões e finalidades do cálculo do consumo nacional de eletricidade, dado imprescindível para o esboço da matriz energética.

Devido à escassez de recursos hídricos, caracterizada por rios de pequenas vazões e alturas de quedas, as fontes de energia renovável disponíveis e exploráveis são a eólica e fotovoltaica. Portanto na sequência do presente trabalho, estas fontes serão estudadas e identificadas sobre toda a extensão do território togolês, a fim de detectar as áreas com potencial elevado de geração de energia.

## 3.2 Coleta dos dados

### 3.2.1 Coleta dos dados para a geração dos mapas

Com o intuito de elaborar um sistema elétrico eficiente, propôs-se a confecção de mapas para a identificação de regiões com alto potencial eólico e fotovoltaico. Assim, com a detecção destas regiões, os mapas são úteis para subsidiar a construção de parques eólicos, fotovoltaicos ou híbridos (mistos). Os dados para este fim foram coletados nos sites da *DIVA-GIS*, da *Global Solar Atlas* e da *Global Wind Atlas*. Estes sites disponibilizaram os arquivos de extensão *Geotiff* em formato *raster* que foram exportados para o software QGIS. Os *shapefiles* no formato de vetor foram obtidos no site *DIVA-GIS* que permitiu a obtenção do mapa do Togo com as regiões administrativas (FIGURA 9).

### 3.2.2 Coleta dos dados de séries históricas de vazão, velocidade de vento e irradiação solar

Os dados foram solicitados à Direção Geral da Meteorologia Nacional do Togo por intermédio de uma carta apresentada no APÊNDICE A. No referido documento, foram solicitadas séries históricas diárias de 1989 a 2019, resultando em um total de 11.320 dados para cada série, de vazão, de velocidade média de vento e de irradiação solar sobre toda a extensão territorial. Porém, o foco foi dado precisamente nas regiões de elevado potencial. Assim os dados relevantes foram os provenientes da região setentrional do Togo, principalmente nas cidades de Mango e Dapaong. Os dados de vazão solicitados são do rio Mono já que é o principal alimentador da barragem de Nangbeto.

Os dados levantados para o projeto visam possibilitar a determinação da geração de energia elétrica por parte das usinas eólicas, solares e centrais hidrelétricas. Essencialmente, são requeridos três conjuntos de dados: velocidade do vento e curvas de potência de aerogeradores, para usinas eólicas e séries históricas de vazão e potência instalada da usina hidrelétrica, e a radiação global e a potência do painel para a usina fotovoltaica.

Nos próximos itens são descritas as formas de obtenção das séries históricas de energia gerada, base para a aplicação da metodologia de seleção dos portfólios. Trata-se da conversão das séries de velocidade de vento (m/s), de irradiação solar ( $J/m^2$ ) e de vazões médias ( $m^3/s$ ) em energia (MWh ou MW médio, dependendo da escala temporal considerada). As usinas Eólicas, Fotovoltaica e Central hidrelétrica são consideradas separadamente, sendo que

para todas foram coletados dados em escala diária. Ao receber os dados das séries, procedeu-se à identificação dos erros e falhas possíveis tais como erros de digitação, falhas de preenchimento, dentre outros, que poderiam existir nas séries históricas.

### 3.3 Tratamento dos dados

#### 3.3.1 Dados de vazão

Ao passar os dados de vazões médias referentes ao Rio Mono, percebeu-se que havia muitas falhas de preenchimento. No total de 30 anos de dados solicitados, que resultariam em aproximadamente 11.320 de dados, apenas 1.085 foram coletados pelos agentes no posto de coleta. Portanto, as séries apresentaram 90,42% de dados ausentes.

Diante esta situação, surgiu a ideia de comparar o comportamento das vazões do rio Mono ao longo dos 30 anos com um rio brasileiro que possa ter o perfil hidrológico semelhante. Esta comparação foi realizada por meio da determinação de coeficientes de correlação de Pearson entre as séries do Rio Mono e de alguns rios brasileiros que alimentam usinas hidrelétricas cuja potência instalada varia entre 65 e 75 MW médios, já que a Usina de Nangbeto detém uma potência de 65 MW médios. Para tanto, foram identificadas as usinas de Monjolinho, Sobragi, Traira II, Rondon II, Santa Clara (MG), Itiquira I, Caçu e Foz do Rio Claro. Ao final da avaliação, foi selecionada Usina Hidrelétrica de Monjolinho que tem as condições e características mais similares à Usina de Nangbeto. Há que se mencionar que Monjolinho é uma usina a fio d'água, enquanto a usina de Nangbeto é de regularização. Esta condição apenas alterou algumas considerações no cálculo das energias geradas pela usina. A análise da correlação entre as vazões dos rios alimentadores destas Usinas e do Rio Mono estão ilustradas por meio dos gráficos apresentados nos APÊNDICE B e APÊNDICE C.

A potência de uma usina hidrelétrica pode ser obtida por:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta}{1000} \quad (20)$$

Onde:

P = Potência elétrica do gerada [MW]

$\rho$  = massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>]

g = aceleração da gravidade local [m/s<sup>2</sup>]

Q = Vazão turbinada [m<sup>3</sup>/s]

H = Queda líquida (diferença entre os níveis de montante e jusante, descontadas as perdas de carga no circuito de geração) [m.c.a.]

$\eta$  = rendimento do conjunto turbina-gerador

Como características técnicas, a usina hidrelétrica de Monjolinho possui uma queda líquida de 59,3 m, equipada com duas turbinas tipo Francis cujo rendimento estimado é de 92%.

### 3.3.2 Dados de velocidade de vento

Uma vez recebidos os dados de velocidade média de vento, procedeu-se à comparação destes com o mapa de velocidades (disponível na plataforma *Global Wind Atlas*), a fim de avaliar a representatividade e a veracidade dos dados. Esta análise preliminar revelou-se positiva e os dados eram convincentes e ainda mais velocidades médias das regiões coincidiram com as velocidades médias fornecidas pela *Global Atlas*, site de georreferenciamento no qual foram obtidos os dados para a emissão dos mapas. Ainda nessa fase preliminar de análises, observou-se a presença de *outliers* na série histórica. Esses dados foram identificados por meio do método de Z-score Modificado (IGLEWICZ e HOAGLIN, 1993), definido pelas equações:

$$Z_i = \frac{0,6745(Y_i - \tilde{\mu})}{MAD} \quad (21)$$

$$MAD = \text{mediana}\{|Y_i - \tilde{\mu}|\}$$

Sendo

$Y_i$ : os elementos das séries,

$\tilde{\mu}$ : a mediana da amostra,

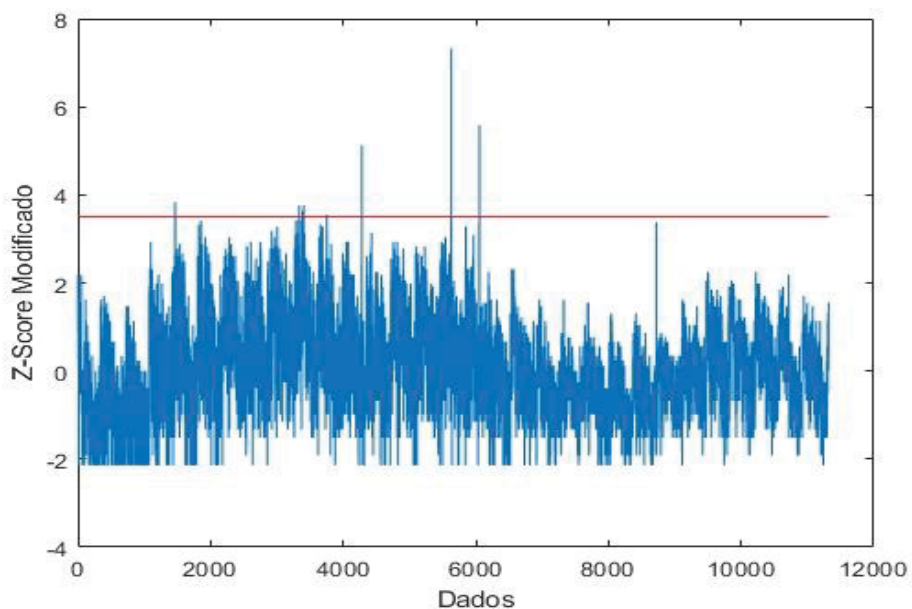
$Z_i$ : o Z-score modificado,

$MAD$ : desvio absoluto da mediana.

Os elementos das séries são identificados como *outliers* caso os valores de  $Z_i$ , em módulo, sejam maiores do que 3,5 (IGLEWICZ e HOAGLIN, 1993).

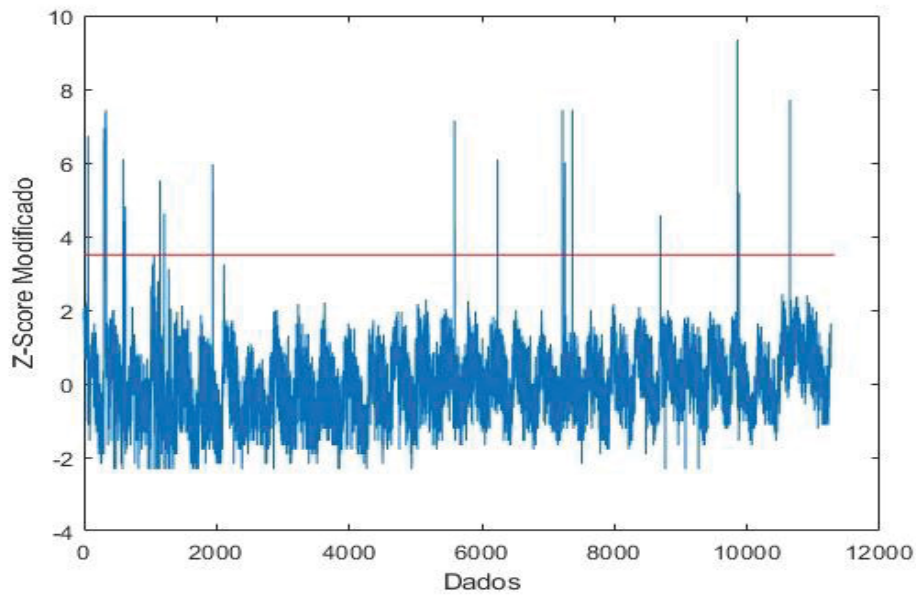
As FIGURA 23 e FIGURA 24 ilustram os resultados obtidos, após a aplicação do *Z-Scores* nas séries históricas. Os *outliers* identificados foram corrigidos por extrapolação linear. A aplicação do método permitiu a identificação e a remoção de 8 dados discrepantes na série de Mango (FIGURA 23) e de 45 na série de Dapaong (FIGURA 24).

FIGURA 23 - IDENTIFICAÇÃO DE OUTLIERS NA SÉRIE HISTÓRICA DE MANGO



FONTE: O AUTOR (2020)

FIGURA 24 - IDENTIFICAÇÃO DE OUTLIERS NA SÉRIE HISTÓRICA DE DAPAONG



FONTE: O AUTOR (2020)

Os dados de velocidade de vento foram coletados a uma altura de 10 m do solo, portanto foi preciso realizar a extrapolação destes dados para a altura do rotor do aerogerador. Para isso, utilizou-se a relação (22), descrita em TIZGUI *et al.* (2017).

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^n \quad (22)$$

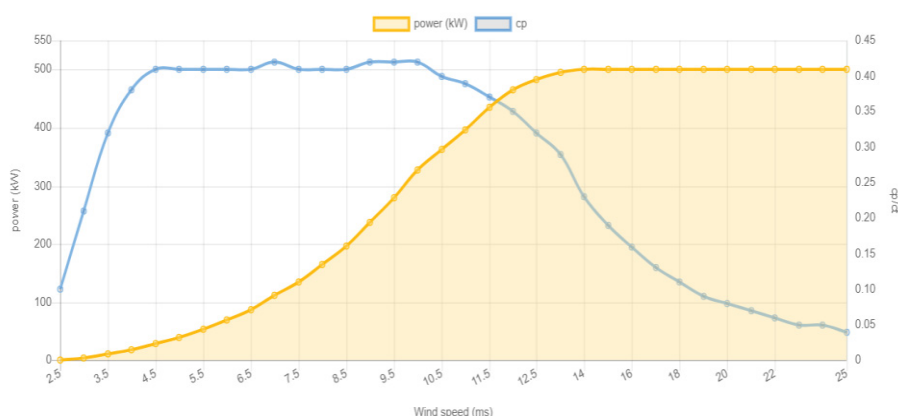
Onde:

$V_1$  e  $V_2$ : velocidades encontradas nas alturas  $h_1$  e  $h_2$  respectivamente, e  $n$ : um coeficiente que varia conforme a estabilidade da atmosfera.

Para condições de estabilidade neutra, ou seja, quando o gradiente vertical de temperatura (ou taxa de variação adiabática) varia na proporção aproximada de 1 °C/100 m, e em terrenos planos,  $n$  é aproximadamente 1/7, ou 0,143 (TIZGUI *et al.*, 2017). Essa foi a consideração adotada neste trabalho.

Para a determinação do aerogerador a ser considerado na obtenção das séries de energia eólica, foi feita uma análise no perfil das velocidades de vento dos locais em estudo. Devido às velocidades relativamente baixas em grande parte do tempo, selecionou-se o aerogerador Enercon E-40/50.4, caracterizado por uma potência de 500 kW, uma velocidade *cut-in* de 2,5 m/s e *cut-out* de 25 m/s. O modelo apresenta um rotor de 40,3 m de diâmetro com três pás e cobre uma superfície de 1.275 m<sup>2</sup>. O modelo permite torres de 42, 48 ou 65 m de altura. A menor velocidade de *cut-in* permitiu que possa ser obtida uma série plena de energia eólica por meio da sua curva de potência apresentada na FIGURA 25. Sendo a velocidade de *cut-in* o fator decisivo para a escolha deste modelo de aerogerador.

FIGURA 25 - CURVA DE POTÊNCIA DO AEROGERADOR ENERCON



FONTE: ENERCON (2020)

A série de energia eólica foi obtida a partir das velocidades extrapoladas e a curva de potência, sendo a energia a ordenada y associada à velocidade x por meio da função  $y = f(x)$  da curva de potência.

### 3.3.3 Dados de irradiação solar

Devido à instalação recente dos equipamentos de medição de irradiação solar no território togolês, foi possível obter apenas dados de irradiação a partir do ano de 2018. Estes dados vieram em unidade de irradiância (J/m<sup>2</sup>) o que permitiu o cálculo direto das séries de energia fotovoltaica aplicando apenas a superfície de um painel fotovoltaico comercial.

Para o estudo foi escolhido o **Painel Solar Fotovoltaico 330 W** (OSDA Solar Co., modelo OSDA330-36-P) devido à sua eficiência de 16,97% e a sua potência de 330 Wp. Este painel apresenta as características mostradas na TABELA 11.

TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS DO PAINEL FOTOVOLTAICO

Potência do Painel	330 Wp
Tolerância	$\pm 3$ W
Temperatura Nominal da Célula (TNOC/NOCT)	$45 \pm 2$ °C
Dimensões do painel	1960 x 992 x 40 mm
Número de Células e Tipo	72 (6x12), Silício Policristalino

FONTE: NEOSOLAR Adaptado (2020)

Ao fazer uma analogia entre a uma carteira de alocação de ativos e uma matriz energética, convém exprimir que se pode aplicar a Moderna Teoria de Portfolio de Markowitz para a obtenção de uma matriz energética, já que esta teoria serve para diversificar e otimizar carteiras de ativos. As FIGURA 26 e FIGURA 27 trazem um desenho esquemático desta analogia.

FIGURA 26 - SIMILARIDADE ENTRE UMA MATRIZ ENERGÉTICA E UMA CARTEIRA DE ATIVOS

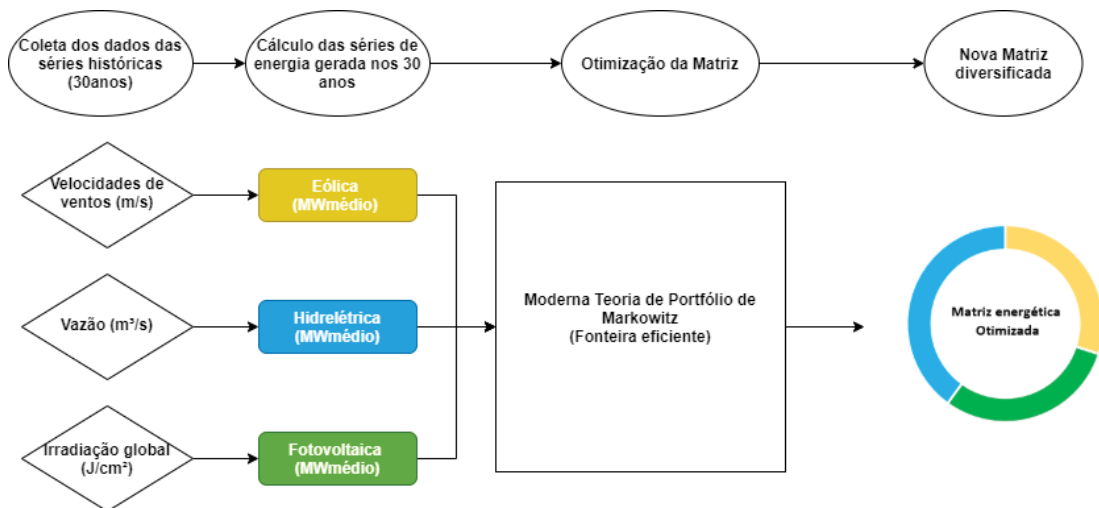


FONTE: O AUTOR (2020)

Por meio desta FIGURA 26 esquemática, pode-se associar a matriz energética a uma carteira de ativos, consequentemente os ativos representam as fontes e os rendimentos equivalem às energias geradas por estas fontes ao longo do tempo. Por fim os riscos representam a volatilidade ou a variabilidade das gerações.

A próxima FIGURA 27 apresenta um roteiro simplificado da aplicação do prosseguimento deste estudo.

FIGURA 27 - PROCEDIMENTOS DE PESQUISA



FONTE: O AUTOR (2020)

### 3.4 A Moderna Teoria de portfólio de Markowitz

A aplicação da teoria de portfólio, seguiu os procedimentos descritos na Fundamentação Teórica. Com intuito de evitar a influência da escala nos cálculos, a MTP foi aplicada duas vezes, primeiramente considerando o fator de capacidade das usinas e, na segunda aplicação, foi em uma matriz simulada, composta de usinas eólicas, fotovoltaicas e hidrelétricas.

#### 3.4.1 Aplicação da MTP considerando o Fator de Capacidade

Neste primeiro cenário, foram considerados os fatores de capacidade, permitidos pelas condições e disponibilidades dos recursos no Togo, de cada uma das fontes. Para o desenvolvimento das operações foram seguidas as seguintes etapas:

1. A etapa 1 consistiu na identificação dos ativos da carteira, ou seja, as fontes da matriz energética. A matriz é composta por cinco fontes, sendo uma usina hidrelétrica, duas torres eólicas e dois painéis fotovoltaicos. Estas fontes são designadas, das seguintes formas, a Eólica de Mango como EoMango, a Eólica de Dapaong como EoDapaong, a solar de Mango como SoMango e a solar de Dapaong como SoDapaong, como representadas na TABELA 12.

TABELA 12 - COMPONENTES DA MATRIZ DE FATOR DE CAPACIDADE

Fontes	Potência (MW)	Componentes
Monjolinho	74	Usina Hidrelétrica
EoMango	0,5	Uma torre eólica
EoDapaong	0,5	Uma torre eólica
SoMango	0,00033	Um painel fotovoltaico
SoDapaong	0,00033	Um painel fotovoltaico

FONTE: O AUTOR (2020)

2. Na segunda etapa, coube calcular as energias diárias geradas por cada uma destas fontes durante os últimos 31 anos. Estas energias diárias representam os rendimentos dos respectivos ativos.

3. Posteriormente, na etapa 3, foram calculados os fatores de capacidade de cada uma das fontes, usando a média da razão entre as energias diárias geradas por cada uma das fontes e suas respectivas potências, tal como apresentados na TABELA 13.

TABELA 13 - FATORES DE CAPACIDADE DAS FONTES

Fontes	Monjolinho	EoMango	EoDapaong	SoMango	SoDapaong
Fator de Capacidade	0,56	0,009	0,036	0,22	0,23

FONTE: O AUTOR (2020)

4. A matriz de covariância foi elaborada, na quarta etapa, por meio das variâncias das séries históricas de vazão, velocidade de vento e irradiação, calculadas pela Fórmula 14, e permitindo a identificação do grau de dependência entre os ativos. A matriz está ilustrada, na
5. TABELA 14.

TABELA 14 - MATRIZ DE COVARIÂNCIA

	Monjolinho	EoMango	EoDapaong	SoMango	SoDapaong
Monjolinho	0,085	-0,00035	0,0008	0,0020	0,0030
EoMango	-0,00035	2,149E-05	1,6E-05	-3,8E-06	1,0E-05
EoDapaong	0,0008	1,6E-05	0,003375572	5,1E-05	0,00015
SoMango	0,0020	-3,8E-06	5,1E-05	0,001813209	0,0016
SoDapaong	0,0030	1,0E-05	0,00015	0,0016	0,001882754

FONTE: O AUTOR (2020)

6. Na quinta etapa, foram calculados a esperança e o risco, como descritos na Fundamentação Teórica, na sequência, a função objetivo ou dispersão de cada ativo (fonte). Os resultados estão apresentados na TABELA 15. Estes resultados foram classificados com o intuito de encontrar-se o ativo com o melhor rendimento e o menor risco.

TABELA 15 - PERFORMANCE DAS FONTES

Fontes	Esperança (E)	Classificação	Risco (DP)	Classificação	E/DP	Classificação
Monjolinho	0,56	1	0,32	1	173%	3
EoMango	0,00	5	0,03	5	0%	5
EoDapaong	0,01	4	0,06	2	15%	4
SoMango	0,22	3	0,04	4	526%	2
SoDapaong	0,24	2	0,04	3	558%	1

FONTE: O AUTOR (2020)

7. Por fim, foram atribuídos pesos iguais para cada uma das fontes de tal forma que a soma destes seja igual a 1, como prescrita no método da MTP. A TABELA 16, ilustra a disposição dos ativos antes da otimização da matriz.

TABELA 16 - TABELA DE OTIMIZAÇÃO DA MATRIZ DE FATOR DE CAPACIDADE

Otimização	
Fontes	Pesos
Monjolinho	0,2
EoMango	0,2
EoDapaong	0,2
SoMango	0,2
SoDapaong	0,2
Soma	1
$\mu_c$	
$\sigma^2[\tilde{R}_c]$	
$(\mu_c/\sigma^2[\tilde{R}_c])$	

FONTE: O AUTOR (2020)

Sendo:  $\mu_c$  a esperança da carteira ou a matriz, calculado pela Fórmula 12,  $\sigma^2[\tilde{R}_c]$  o risco da carteira (Fórmula 14) e  $(\mu_c/\sigma^2[\tilde{R}_c])$ , a função a maximizar, por meio do Solver do MS Excel, representada pela Fórmula 19.

Os resultados desta otimização serão apresentados na seção de resultados e discussões.

Após várias análises de sensibilidade da matriz energética composta por uma única usina hidrelétrica de Monjolinho, duas torres eólicas e dois painéis

solares, a expansão em grande escala da matriz revelou-se como a única solução para suprir a demanda de eletricidade do Togo. Ou seja, não basta inserir novas fontes, mas é preciso ainda prever as construções de parques centralizados.

Assim, foi elaborada uma segunda simulação baseada na Moderna Teoria de Portfólio de Markowitz, para uma matriz fictícia que possa atender às demandas ou indagações desta pesquisa. Ressalta-se que o dimensionamento de parques eólicos ou solares não faz parte do escopo do presente trabalho, portanto os métodos para determinação dessa matriz fictícia foram utilizados de forma simplificada.

### 3.4.2 Aplicação de conceitos baseados na MTP considerando uma matriz fictícia

Com o intuito de suprir a falta de eletricidade, uma nova matriz energética foi concebida, por meio de variação das escalas das usinas ou fontes componentes da matriz. Assim reiterou-se a aplicação da MTP, a fim de otimizar esta nova matriz energética.

A fim de encontrar uma matriz que possa atender a demanda em eletricidade, procedeu-se pelo caminho inverso, ou seja, fixando a demanda como o limiar a ser atingindo e variando os pesos das fontes ou ativos para que a carteira conseguisse ter um retorno ou esperança diária superior ou igual à demanda. Portanto, expandir a matriz resulta em um somatório dos pesos das fontes superior a 1.

Para início de análise, foi concebida uma matriz energética composta pelas mesmas cinco fontes, porém, em maior escala para a eólica e a solar. Manteve-se a usina hidrelétrica na mesma capacidade de produção, o parque eólico de Mango foi ampliado de uma torre para 500 torres Enercon E-40/5.40, mesma consideração para o parque de Dapaong. As usinas fotovoltaicas por sua vez, foram ampliadas cada uma com 5000 painéis fotovoltaicos OSDA330-36-P.

Em seguida, os mesmos procedimentos do item anterior foram implementados, com a única diferença de que as fontes desta nova matriz são parques e usinas em grande escala.

1. A etapa 1 consistiu na identificação dos ativos da carteira, ou seja,

as fontes da matriz energética. A matriz é composta por cinco fontes, sendo uma usina hidrelétrica, dois parques eólicos e duas usinas fotovoltaicas. Estas fontes apresentadas na TABELA 17.

TABELA 17 - COMPONENTES DA MATRIZ FICTÍCIA

Fontes	Potência (MW)	Componentes
Monjolinho	74	Usina Hidrelétrica
EoMango	250	500 torres eólicas
EoDapaong	250	500 torres eólicas
SoMango	1,65	5000 painéis fotovoltaicos
SoDapaong	1,65	5000 painéis fotovoltaicos

FONTE: O AUTOR (2020)

2. Na segunda etapa, coube calcular as energias diárias geradas por cada uma destas fontes durante os últimos 31 anos. Estas energias diárias representam os rendimentos dos respectivos ativos respectivos.
3. Posteriormente, na etapa 3, foram calculados os fatores de capacidade de cada uma das fontes, que são iguais aos calculados no item anterior.
4. A matriz de covariância foi elaborada, na quarta etapa, permitindo a identificação do grau de dependência entre os ativos, ilustrada na
5. TABELA 18.

TABELA 18 - MATRIZ DE COVARIÂNCIA DAS USINAS

	Monjolinho	EoMango	EoDapaong	SoMango	SoDapaong
Monjolinho	468.041.645,25	-262.326,77	5.824.528,55	19.014,81	27.714,39
EoMango	-262.326,77	1.343.124,50	39.993,23	-62,17	169,75
EoDapaong	5.824.528,55	39.993,23	210.973.223,44	840,48	2.405,10
SoMango	19.014,81	-62,17	840,48	4.936,46	172,45
SoDapaong	27.714,39	169,75	2.405,10	172,45	5.125,80

FONTE: O AUTOR (2020)

6. Na quinta etapa, foram calculados a esperança e o risco, como descritos na Fundamentação Teórica, na sequência, a função

objetivo ou dispersão de cada ativo (fonte). Os resultados estão apresentados na TABELA 19. Estes resultados foram classificados com o intuito de encontrarmos o ativo com o melhor rendimento e o menor risco.

TABELA 19 - PERFORMANCE DAS USINAS

Fontes	Esperança (E)	Classificação	Risco (DP)	Classificação	E/DP	Classificação
Monjolinho	41.203,96	1	23.796,21	1	173%	3
EoMango	2.359,36	3	6.865,52	3	34%	5
EoDapaong	8.980,00	2	15.908,31	2	56%	4
SoMango	359,64	5	70,26	5	512%	2
SoDapaong	385,03	4	71,59	4	538%	1

FONTE: O AUTOR (2020)

7. Por fim, foram atribuídos pesos iguais para cada uma das fontes, de tal forma que a soma destes seja igual a 1, e elaborada uma tabela de otimização, como descrito no item anterior.

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação das metodologias expostas nos capítulos anteriores. Inicia-se pela elaboração dos mapas que serviram como guia para a identificação de áreas de elevado potencial fotovoltaico e eólico, e conseqüentemente a coleta dos dados necessários para a aplicação da moderna teoria de portfólio. Após a apresentação dos mapas, serão apresentados e comentados os resultados obtidos por intermédio das duas aplicações da MTP.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

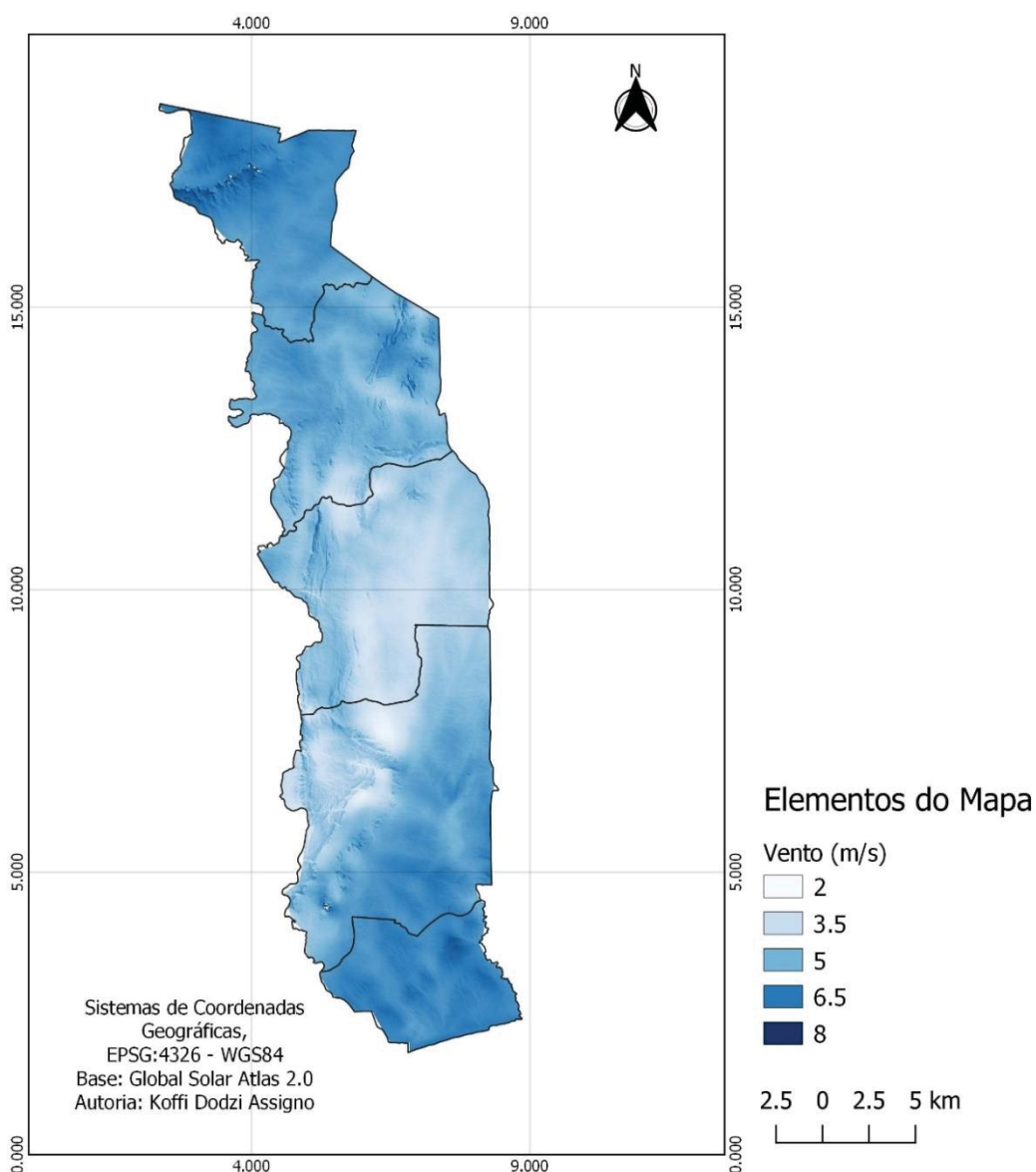
No presente capítulo, serão apresentados os resultados obtidos por meio das metodologias desenvolvidas no decorrer da pesquisa: mapas, o cálculo dos consumos e déficits de eletricidade, a aplicação da Moderna Teoria de Portfolio de Markowitz e, por fim, discussões a respeito de cada resultado.

### 4.1 Mapas das Fontes Eólica e Solar

À exceção do mapa de Radiação Direta, o restante dos mapas foi apresentado com gradiente de cor ilustrando as áreas de alto potencial com tons intensos e tons mais claros nas áreas menos favoráveis.

A FIGURA 28 mostra a distribuição da velocidade média do vento em m/s, medida com os equipamentos instalados a uma altura de 10 m do solo, sobre a extensão territorial do Togo.

FIGURA 28 - MAPA DE VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO A 10 m

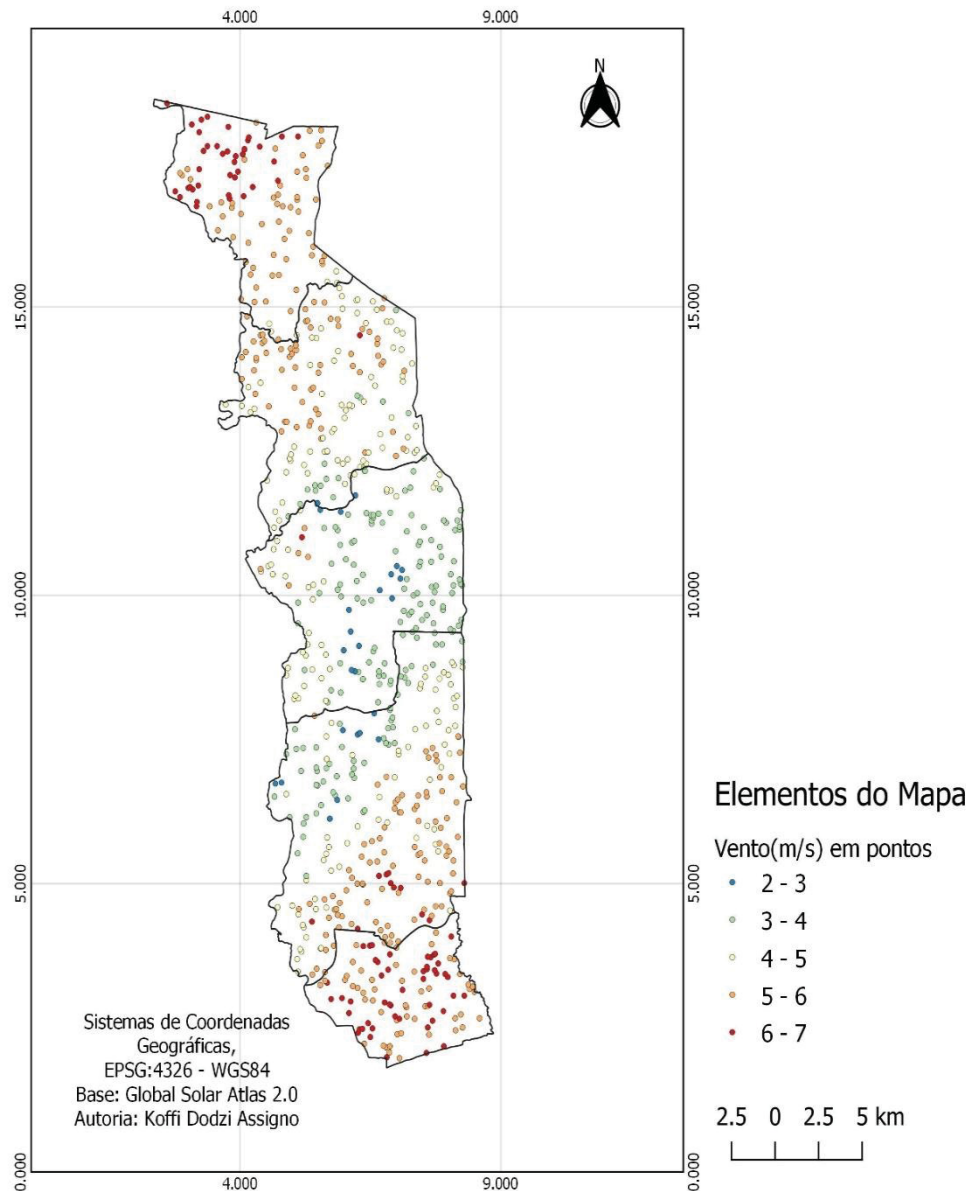


FONTE: O AUTOR (2020)

Referente ao mapa de velocidades médias do vento, as regiões de alto potencial se situam no Norte, regiões das savanas e precisamente no município de Tandjouaré, além da região de Kara no município de Kozah. Na região marítima, há áreas de elevadas velocidades nos municípios de Yoto e Zio. As regiões menos propícias são áreas cobertas pela cordilheira do Atakora, situadas na Zona de transição climática que registra diariamente chuvas orográficas. A frequente ocorrência de ventos de elevadas velocidades nas regiões sul e norte é devida aos fatores topográficos (planícies), vegetação e insolação elevada.

Com o intuito de sobrepor os mapas de potencial eólico e potencial fotovoltaico, a fim de encontrar possíveis regiões de instalações híbridas, o mapa de velocidade de vento foi reemitido em pontos (FIGURA 29). Assim, pode-se evitar quaisquer conflitos de cores após a sobreposição. O referido mapa está ilustrado na FIGURA 29.

FIGURA 29 - MAPA DE VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO A 10 m EM PONTOS



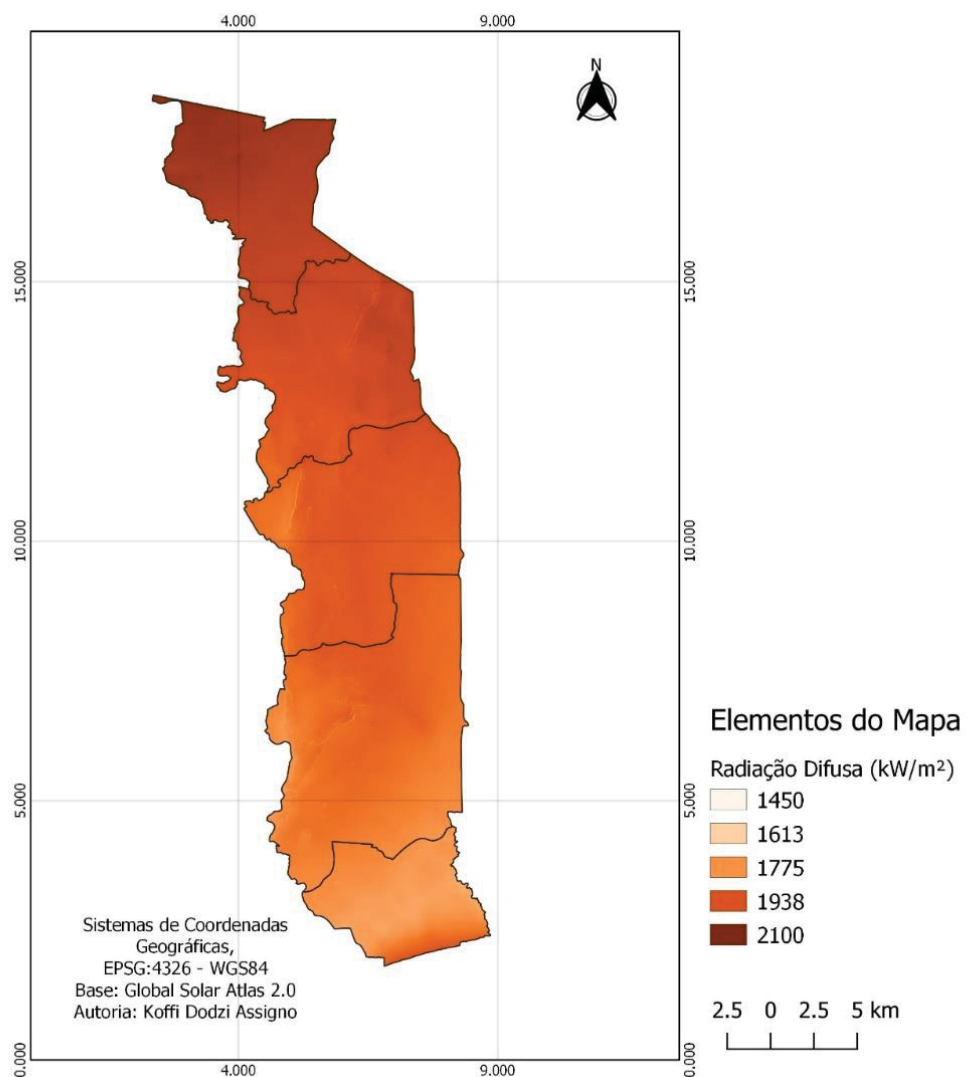
FONTE: O AUTOR (2020)

Como comentado na Fundamentação Teórica para a energia fotovoltaica, existem três tipos de irradiação: a Global Horizontal, a Difusa

horizontal e a Direta Normal. As figuras subsequentes ilustram respectivamente o mapa da irradiação Difusa Horizontal e o mapa da irradiação Normal. Para o aproveitamento fotovoltaico, foi emitido o mapa de potencial fotovoltaico, em detrimento do mapa de radiação Global Horizontal.

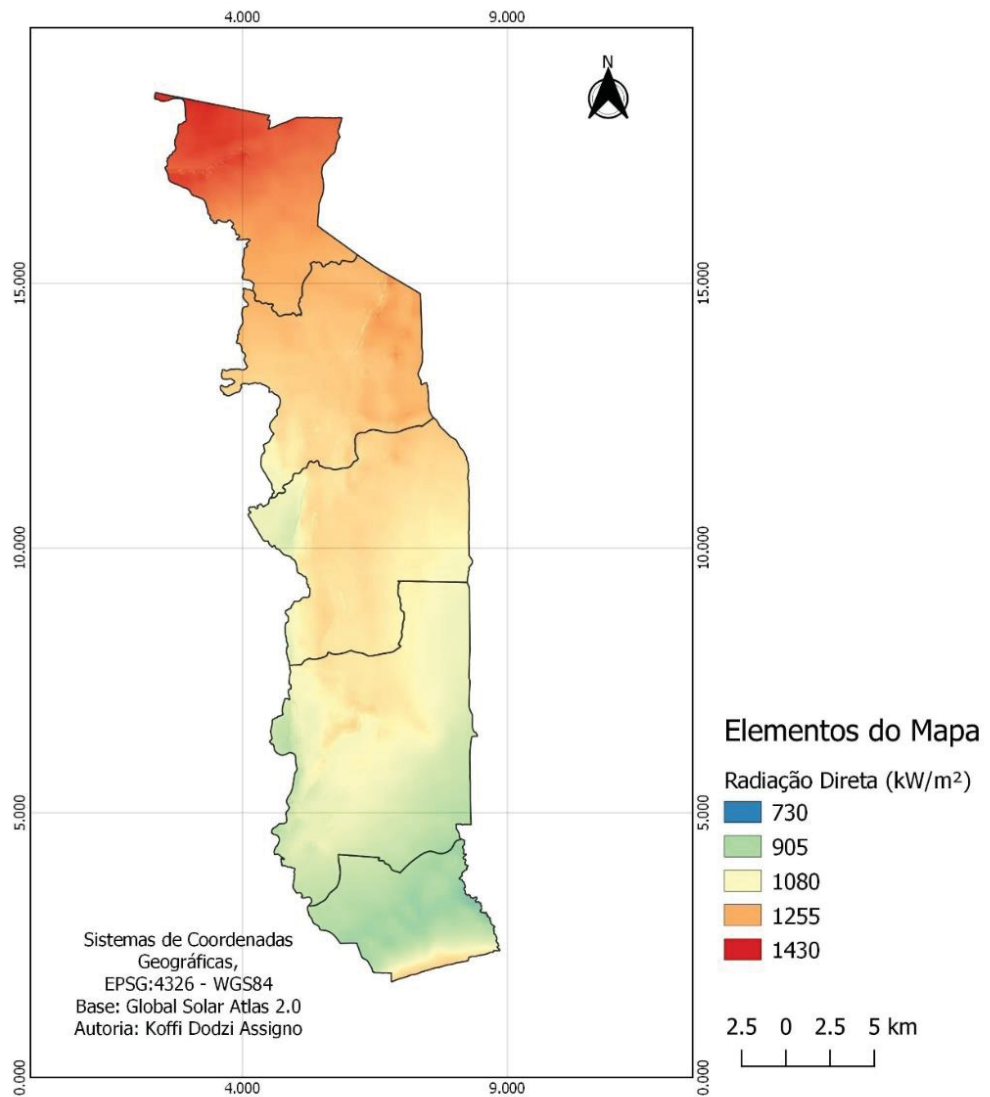
A FIGURA 30 ilustra a distribuição da irradiação difusa no território togolês, enquanto a FIGURA 31 exibe a irradiação direta em uma rampa de cor espectral.

FIGURA 30 - MAPA DE RADIAÇÃO DIFUSA



FONTE: O AUTOR (2020)

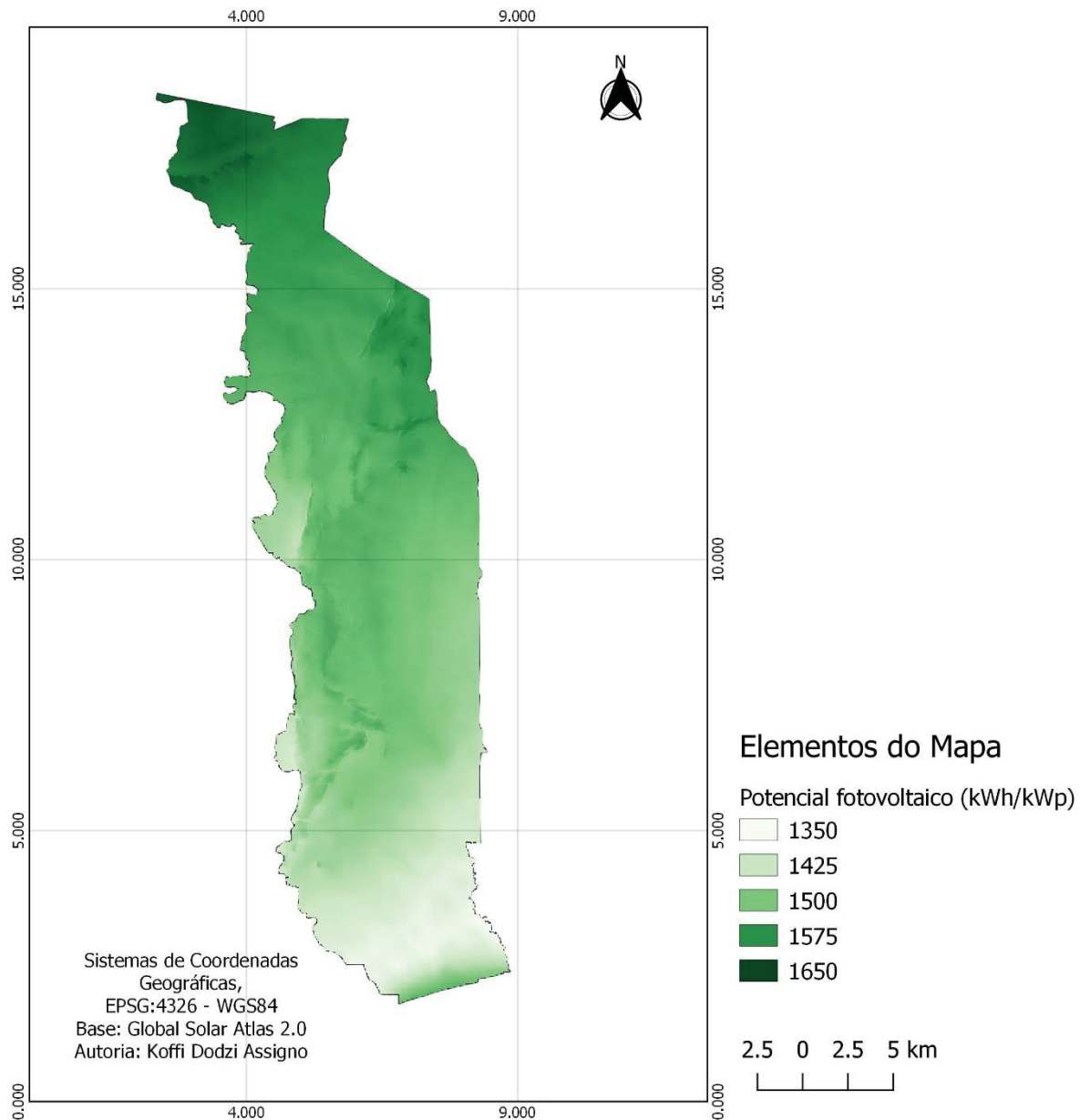
FIGURA 31 - MAPA DE RADIAÇÃO DIRETA



FONTE: O AUTOR (2020)

A FIGURA 32 mostra o mapa do potencial fotovoltaico do Togo, destacando as áreas de potencial elevado proporcionalmente à densidade da cor.

FIGURA 32 - MAPA DE POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO TOGO



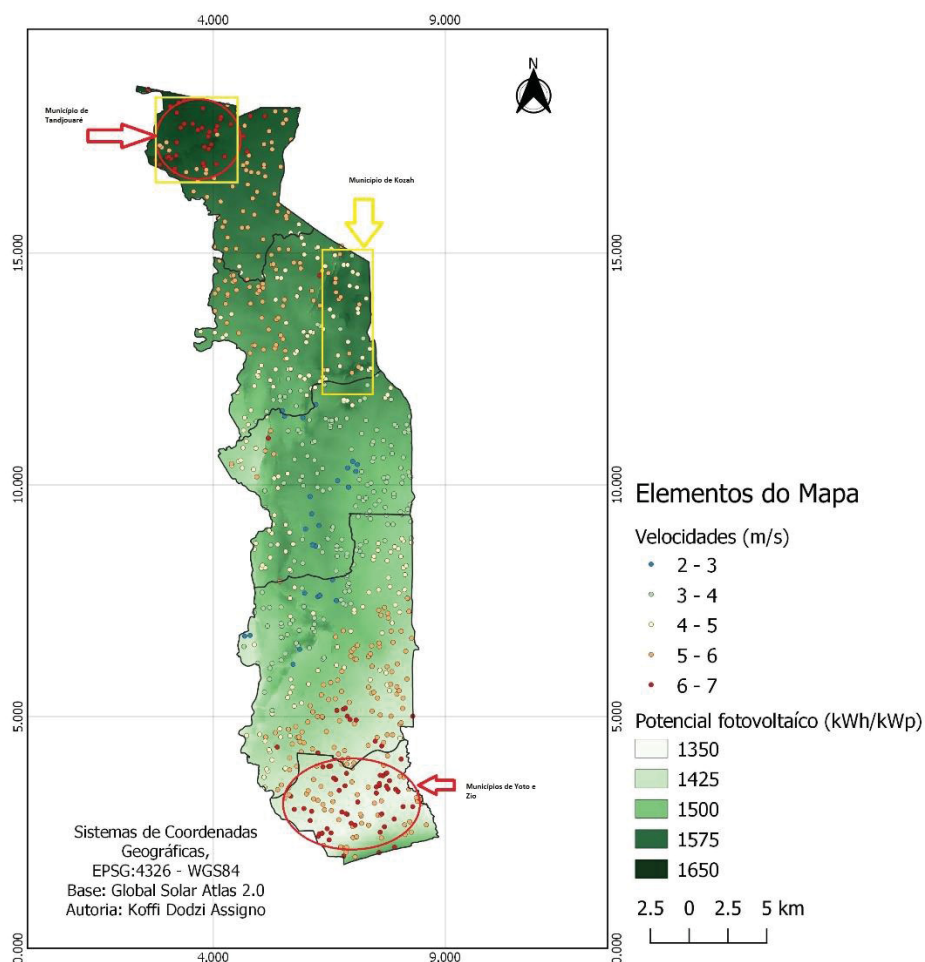
FONTE: O AUTOR (2020)

As regiões com mais incidência de raios solares tanto difusos quanto diretos, são as regiões das savanas pouco povoadas e caracterizadas por um clima tropical sudanês de longa estação seca que se estende de outubro a maio e é marcada pelo Harmattan, bem como por forte insolação com temperaturas às vezes chegando a 45 °C. A curta estação chuvosa, marcada pela Monção, vai de maio a setembro. Estas características favorecem a instalação de parques fotovoltaicos já que os impactos socioambientais seriam reduzidos. A região detém na sua maior parte um potencial variando de 1575 a 1650 kWh/kWp.

A região central é de forte atividade agropecuária, portanto a inserção de centrais geradoras encontraria dificuldades. A outra região propícia é a região marítima porem muito povoado e com grandes atividades econômicas. O aproveitamento solar nesta região pode ser feito por instalações individuais nas residências. Os mapas apresentados indicam as melhores áreas para este tipo de aproveitamento.

Como um dos resultados deste trabalho, a FIGURA 33 exibe a sobreposição dos mapas de potencial fotovoltaico e de vento; Com o intuito de identificar regiões propícias à instalação parques híbridos e aproveitar melhor as superfícies e os investimentos.

FIGURA 33 - SOBREPOSIÇÃO DOS MAPAS DE POTENCIAL FOTOVOLTAICO E VELOCIDADE DE VENTO EM PONTOS



FONTE: O AUTOR (2020)

A combinação dos dois mapas revela as áreas de maior potencial de usinas híbridas tais como os municípios de Tandjouaré na região das Savanas

e os municípios de Yoto e Zio, e particularmente o município de Kozah para o potencial fotovoltaico.

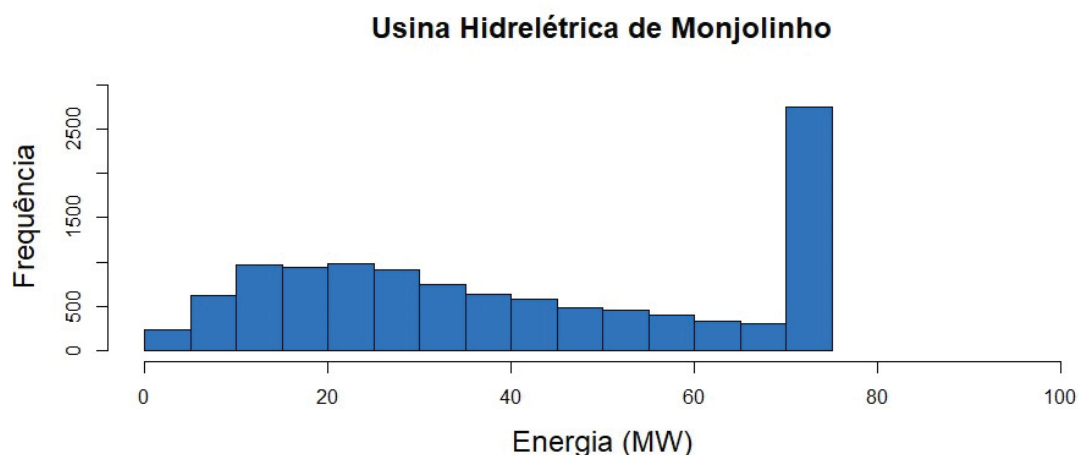
Observou-se, ainda, que as áreas de maior potencial eólico coincidem com as de alto potencial fotovoltaico, o que favorece instalações híbridas e obter melhores aproveitamentos das superfícies. As vantagens de empreendimentos híbridos, são principalmente o aproveitamento espacial, conseqüentemente a redução de impactos socioambientais. As áreas identificadas são de baixa densidade demográfica, portanto de pouca atividade econômica. O clima seco e ausência de empregos provocam a migração da população (êxodo rural) para as regiões sul e marítima do país. As instalações de qualquer tipo, tanto híbridas quanto separadas, nestas regiões, podem gerar empregos nas obras civis, na manutenção dos equipamentos. Há mão de obra disposta a ser treinada, possibilidade de formação de técnicos, dentre outros.

Esta configuração é explicável por intermédio da diferença de pressão atmosférica. O ar mais frio, portanto, mais denso e com maior pressão, se desloca para regiões de ar mais quente (devido às radiações solares) que é mais leve e com menor pressão. Essas alternâncias provocam altas velocidades de vento, com maior frequência.

#### 4.2 As séries históricas de energias produzidas pelas fontes

A coleta dos dados de vazão, de velocidade de vento e de irradiação solar, permitiu o cálculo das séries históricas de cada uma das fontes. Estas energias diárias, que representam os rendimentos de cada ativo, são dados de entrada na aplicação da Moderna Teoria de Portfólio. Estas séries estão ilustradas em formato de histogramas na FIGURA 34, FIGURA 35, FIGURA 36, FIGURA 37 e FIGURA 38. Estes histogramas exprimem a distribuição das energias geradas ao longo do período de observação.

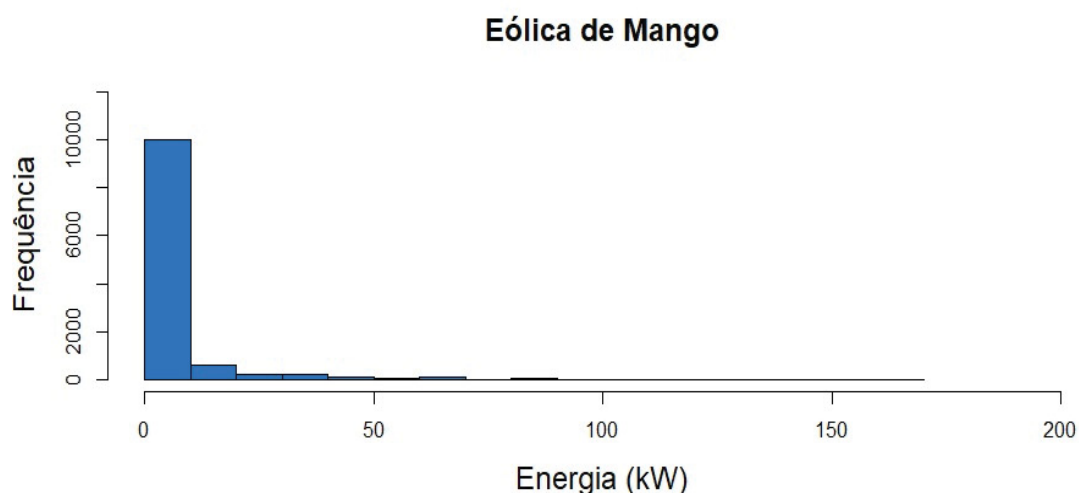
FIGURA 34 - HISTOGRAMA DA SÉRIE DE ENERGIA DA UHE MONJOLINHO



FONTE: O AUTOR (2020)

O histograma ilustrado pela FIGURA 34, apresenta uma distribuição bimodal com a aparecimento de picos nas classes de 10-15 MW, 20-25 MW, e 70-75 MW. Lembra-se que a UHE de Monjolinho opera a fio de água, com a potência instalada de 74 MW. O aparecimento de um pico próximo à classe de 80 MW evidencia que em muitas ocorrências a produção de energia atingiu a capacidade máxima instalada. Ou seja, o fator de capacidade se igualou a 1.

FIGURA 35 - HISTOGRAMA DA SÉRIE DE ENERGIA DA EÓLICA DE MANGO

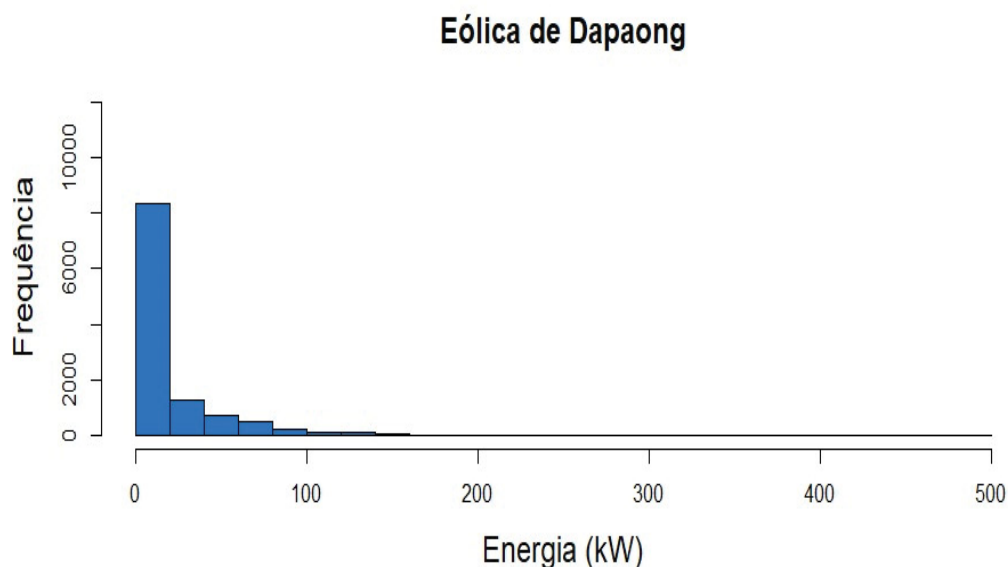


FONTE: O AUTOR (2020)

A FIGURA 35 apresenta histograma da Eólica de Mango, que se revela assimétrico à esquerda, ilustrando a maior concentração de ocorrência na classe de 0 a 20 kW. Estes resultados são relativamente baixos para uma eólica de potência estimada a 500 kW.

A distribuição se repete na geração de energia da eólica de Dapaong, porém, com valores superiores aos gerados pela eólica de Mango. A FIGURA 36 ilustra uma maior ocorrência nas classes de 0 a 50 kW. Mesmo assim, estas energias geradas estão bem inferiores à capacidade de geração do aerogerador Enercon E - 40/500.

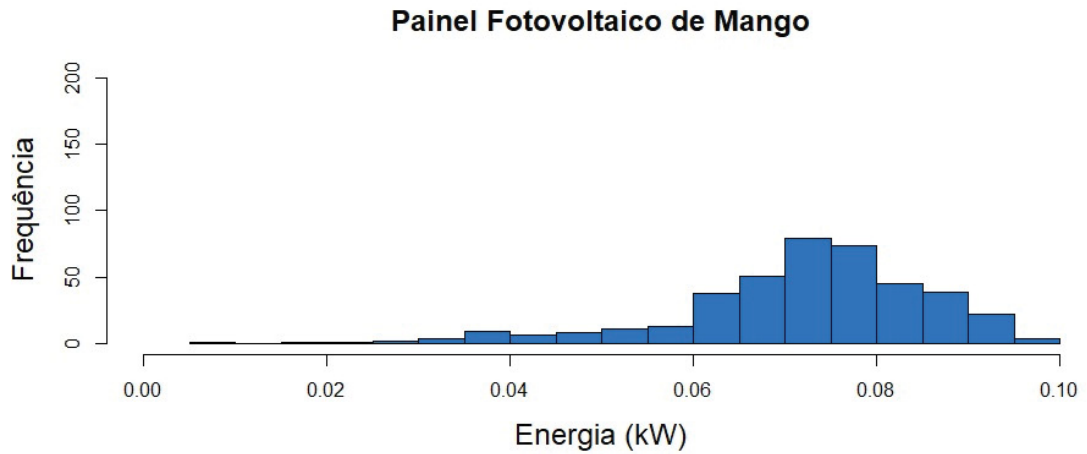
FIGURA 36 - HISTOGRAMA DA SÉRIE DE ENERGIA DA EÓLICA DE DAPAONG



FONTE: O AUTOR (2020)

Quanto à produção de energia fotovoltaica, os mesmos procedimentos foram adotados, com o intuito de encontrar as regiões de maior concentração de ocorrências e identificar as tendências.

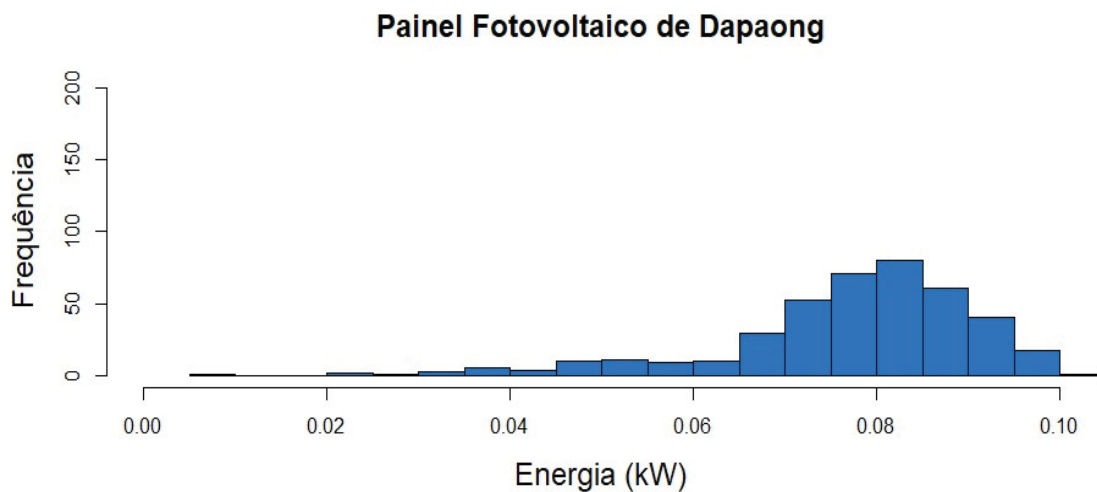
FIGURA 37 - HISTOGRAMA DA SÉRIE DE ENERGIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO DE MANGO



FONTE: O AUTOR (2020)

A FIGURA 37 ilustra uma distribuição assimétrica de geração de energia, representada por um histograma cujas maiores concentrações ocorrem nas classes superiores a 60 W, com um pico em 70 W. A mesma distribuição é exprimida pela série histórica do painel fotovoltaico de Dapaong (FIGURA 38), e com valores expressivamente elevados a partir da classe de 70 W e um pico de ocorrência de energia em 80 W.

FIGURA 38 - HISTOGRAMA DA SÉRIE DE ENERGIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO DE DAPAONG

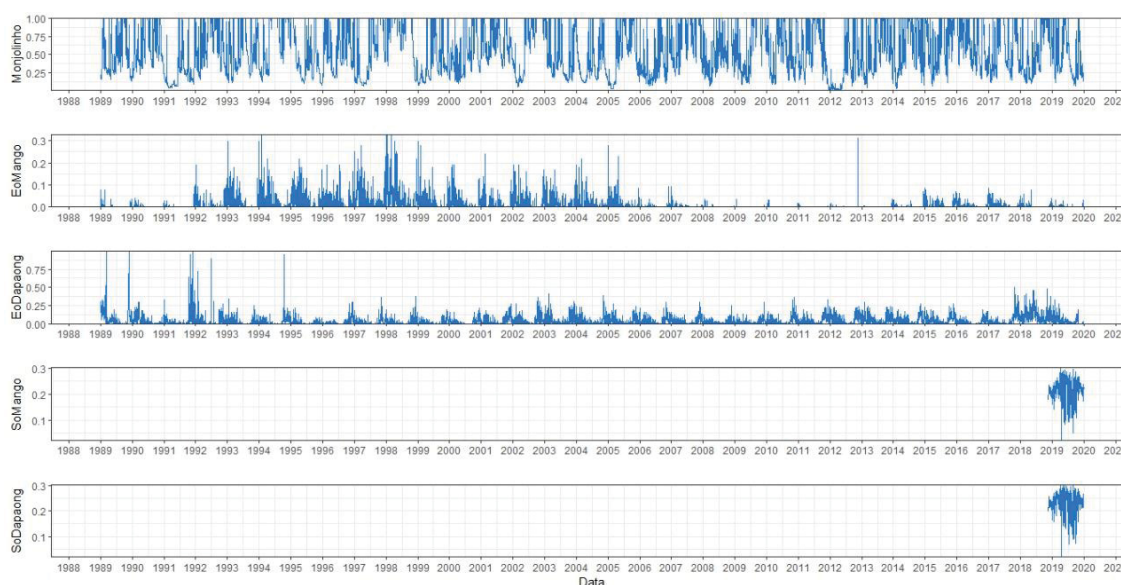


FONTE: O AUTOR (2020)

Por mais que os resultados obtidos sejam relativamente inferiores aos esperados (no caso da energia eólica), os histogramas permitiram identificar as classes de geração máxima de energia e a superioridade do posto de Dapaong tanto na produção de energia fotovoltaica quanto na produção eólica. Esta diferença nas gerações pode ser explicada pelas características climáticas das duas cidades.

Com o intuito de observar as tendências e analisar a correlação espaço-temporal das séries históricas, os fatores de capacidade das fontes foram ilustrados de duas maneiras. A primeira (FIGURA 39) mostra a série completa para todas as séries e a segunda (FIGURA 40) exhibe somente o período em comum entre elas.

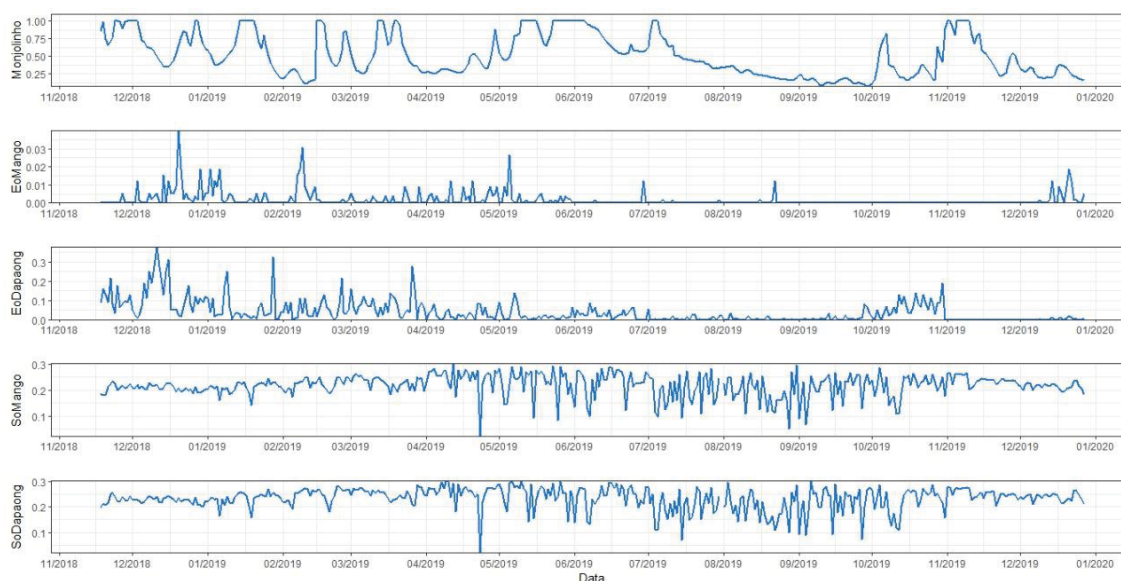
FIGURA 39 - VARIAÇÃO DIÁRIA DO FATOR DE CAPACIDADE DE CADA FONTE AO LONGO DO TEMPO DE OBSERVAÇÃO



FONTE: O AUTOR (2020)

Na FIGURA 39 se pode perceber um comportamento sazonal bem definido nas séries de energia eólica, principalmente em Dapaong. Por sua vez, na FIGURA 40 é possível notar um comportamento interessante entre as séries de geração solar e eólica. Isso porque no ponto em que as séries de geração solar se tornam bastante variáveis (a partir de 05/2019), as séries de geração eólica ficam praticamente zeradas. Espera-se que a MTP permita levar em consideração esta interação para a composição da carteira de ativos.

FIGURA 40 - VARIAÇÃO DIÁRIA DO FATOR DE CAPACIDADE DE CADA FONTE DE 2018-2019.



FONTE: O AUTOR (2020)

### 4.3 Resultados da aplicação dos conceitos baseados na Moderna Teoria de Portfolio de Markowitz

Após a execução dos procedimentos descritos nos itens anteriores, procedeu-se à obtenção dos resultados tais como a fronteira eficiente, na qual a carteira oferece a combinação perfeita de cada um dos seus ativos e, consequentemente, maximiza a função objetivo, diminuindo simultaneamente o risco da carteira. A otimização foi efetuada por intermédio da função *Solver* do *MS Excel*, aplicando algumas restrições e condições de contorno.

#### 4.3.1 Caso I: Considerando o Fator de capacidade

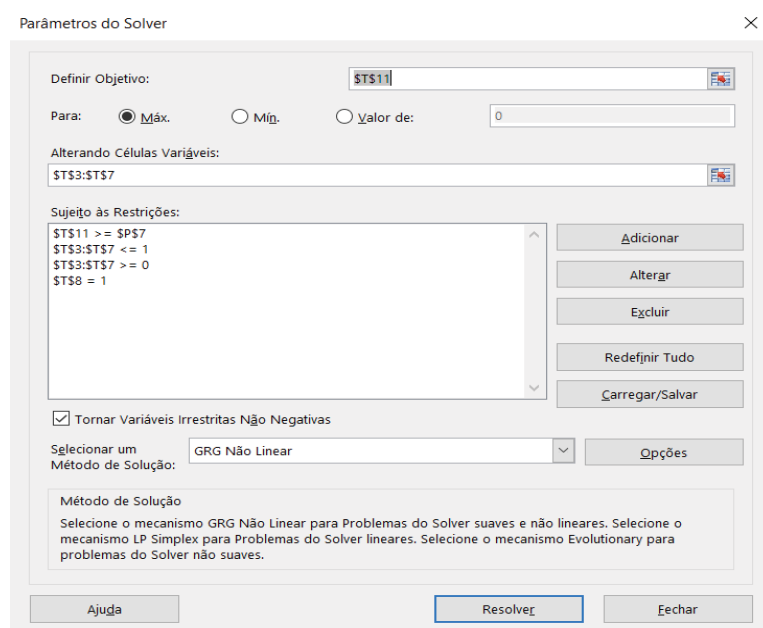
Para o Caso I, as condições implementadas são:

- i. Maximizar a função objetivo, exprimida pela razão entre o retorno e o risco (ou coeficiente de variação, equação 19), de tal forma que a carteira tenha mais retorno e menos risco que o ativo individual mais rentável do conjunto.

- ii. Os pesos devem ser positivos.
- iii. Nenhum dos pesos pode ultrapassar 1.
- iv. A soma dos pesos deve ser igual a 1.

A FIGURA 41 abaixo ilustra a implementação destas condições na função *Solver*.

FIGURA 41 - RESTRIÇÕES NO SOLVER



FONTE: O AUTOR (2020)

Após a solução, obteve-se uma carteira otimizada na qual a usina hidrelétrica de Monjolinho teria uma participação de 2%, a Eólica de Mango 5%, o painel solar de Dapaong com a maior participação sendo de 61%, o solar de Mango cobrindo 32%, enquanto a Eólica de Dapaong não participa (TABELA 20).

TABELA 20 - MATRIZ OTIMIZADA PARA O CASO I

Otimização	
Fontes	Pesos
Monjolinho	2%
EoMango	5%
EoDapaong	0%
SoMango	32%
SoDapaong	61%
Soma	100%
E[C]	0,23
DP[C]	0,04
E[C]/DP[C]	570%

FONTES: O AUTOR (2020)

Com esta combinação, a matriz conseguiu um fator de capacidade médio de 0,23 e uma otimização estimada a 570%, ou seja, mais rentável que o ativo de melhor rendimento da carteira que é o SoDapaong.

4.3.2 Caso II: Considerando uma matriz fictícia com uma única hidrelétrica para atender à demanda gerada pelo consumo da média regional.

(Cenário 4, sem expansão da hidrelétrica)

A fim de atender à demanda por eletricidade, informada anteriormente, pensou-se na expansão da matriz energética, porém, mantendo a única fonte hidrelétrica. Desta forma, algumas considerações foram feitas ao executar o *Solver*. Visando a maximização do retorno, representando a geração de energia neste caso, e com o suprimento da demanda, as restrições impostas foram:

- i. O retorno da carteira deve ser superior ou igual ao consumo total (demanda),
- ii. Os pesos devem ser positivos, e
- iii. A usina hidrelétrica não deve ultrapassar a sua capacidade de produção, ou seja, seu peso é inferior ou igual a 1.

Neste caso específico, no qual a demanda diária total de eletricidade é estimada em 1.251.760 kW a matriz energética se apresenta conforme ilustrada na TABELA 21.

TABELA 21 - MATRIZ OTIMIZADA PARA O CASO II

Otimização	
Fontes	Pesos
Monjolinho	100%
EoMango	3.695%
EoDapaong	84%
SoMango	147.388%
SoDapaong	152.147%
Soma	303.413%
E[C]	1.251.769,41
DP[C]	161.138,67
E[C]/DP[C]	777%

FONTES: O AUTOR (2020)

É de se esperar o aumento dos pesos, pois, o objetivo desta operação é de expandir a matriz, ou seja, fazer com que esta possa ultrapassar as suas capacidades, atender à demanda e, concomitantemente, apresentar uma ótima combinação, o que é perceptível pelos 777% da função objetivo e o retorno de 1.251.770 kW.

4.3.3 Caso III: Considerando uma matriz fictícia com uma única hidrelétrica para atender ao consumo da média nacional.

(Cenário 2, sem expansão da hidrelétrica)

Um procedimento idêntico ao anterior foi implementado, para este caso, porém, a demanda a ser atendida é menor devido ao baixo valor do consumo per capita nacional. Portanto a única condição alterada foi a de suprir a demanda em eletricidade. As demais restrições foram mantidas.

Neste cenário específico, no qual a demanda diária total de eletricidade é estimada em 276.093 kW a matriz energética se apresenta conforme ilustrada na TABELA 22.

TABELA 22 - MATRIZ OTIMIZADA PARA O CASO III

Otimização	
Fontes	Pesos
Monjolinho	37%
EoMango	801%
EoDapaong	18%
SoMango	31.764%
SoDapaong	32.767%
Soma	65.387%
E[C]	276.092,63
DP[C]	35.387,40
E[C]/DP[C]	780%

FONTE: O AUTOR (2020)

Ao analisar a TABELA 22, percebe-se que houve uma expansão da matriz, que consegue atender à demanda e ao mesmo tempo apresenta-se otimizada a 780%.

4.3.4 Caso IV: Considerando uma matriz imaginária com possibilidade de expansão da usina hidrelétrica para atender à demanda gerada pelo consumo da média regional.

(Cenário 4, com expansão da hidrelétrica)

Os mesmos procedimentos foram executados como descritos no item 4.2.2., apenas diferindo no peso da hidrelétrica na composição da matriz. Neste caso, esta demanda é de 1.251.770 kW. Os resultados estão ilustrados na TABELA 23.

TABELA 23 - MATRIZ OTIMIZADA PARA O CASO IV

Otimização	
Fontes	Pesos
Monjolinho	167%
EoMango	3.631%
EoDapaong	80%
SoMango	144.016%
SoDapaong	148.562%
Soma	296.455%
E[C]	1.251.769,40
DP[C]	160.442,06
E[C]/DP[C]	780%

FONTE: O AUTOR (2020)

Com a liberdade de expandir a participação da hidrelétrica, esta fonte teve a sua participação aumentada para 167% e permitindo à matriz uma otimização de 780%.

4.3.5 Caso V: Considerando uma matriz fictícia com a possibilidade de expansão da usina hidrelétrica para atender ao consumo da média nacional. (Cenário 2, com a expansão da hidrelétrica)

Os mesmos procedimentos foram executados como descritos no item 4.2.3., apenas diferindo no peso da hidrelétrica na composição da matriz. Neste caso, esta demanda é de 276.093 kW. Os resultados estão ilustrados na TABELA 24.

TABELA 24 - MATRIZ OTIMIZADA PARA O CASO V

Otimização	
Fontes	Pesos
Monjolinho	100%
EoMango	1.610%
EoDapaong	35%
SoMango	69.365%
SoDapaong	54.422%
Soma	125.531%
E[C]	541.314,40
DP[C]	70.147,43
E[C]/DP[C]	772%

FONTES: O AUTOR (2020)

Mesmo com a liberdade de expandir a participação da hidrelétrica, a participação desta fonte não ultrapassou os 100%. Mesmo assim permitiu à matriz uma otimização de 772%.

Outros cenários foram simulados, a fim de encontrar a melhor matriz possível para o caso do Togo. Após as simulações, foram obtidas (06) seis matrizes otimizadas como respostas a cada uma das indagações feitas nos cenários. Os resultados destas simulações estão recapitulados na TABELA 25 e na TABELA 26 a seguir.

TABELA 25 - RESUMO DAS SIMULAÇÕES COM UMA ÚNICA USINA HIDRELÉTRICA DE 74 MW DE POTÊNCIA INSTALADA

UMA ÚNICA USINA HIDRELÉTRICA DE 74 MW DE POTÊNCIA INSTALADA							
	Fontes	Pesos	Produção diária (kW)	Otimizada (kW)	Equipamentos		
0% DE PARTICIPAÇÃO DA HIDRELÉTRICA	Monjolinho	0%	41.203,96	0,00	0		
	EoMango	3.791%	2.359,36	89.435,24	18.953		
	EoDapaong	89%	8.980,00	8.001,77	446		
	SoMango	152.388%	359,64	548.049,20	7.619.418		
	SoDapaong	157.464%	385,03	606.283,20	7.873.205		
	Soma	313.732%					
	E[C]	1.251.769,41					
	DP[C]	164.690,08					
	E[C]/DP[C]	760%					
		Fontes	Pesos	Produção diária (kW)	Otimizada (kW)	Equipamentos	
100% DE PARTICIPAÇÃO DA HIDRELÉTRICA	Monjolinho	100%	41.203,96	41.203,96	1		
	EoMango	3.695%	2.359,36	87.178,99	18.475		
	EoDapaong	84%	8.980,00	7.510,82	418		
	SoMango	147.388%	359,64	530.064,15	7.369.376		
	SoDapaong	152.147%	385,03	585.811,48	7.607.359		
	Soma	303.413%					
	E[C]	1.251.769,41					
	DP[C]	161.138,67					
	E[C]/DP[C]	777%					
		Fontes	Pesos	Produção diária (kW)	Otimizada (kW)	Equipamentos	
0% DE PARTICIPAÇÃO DA HIDRELÉTRICA	Monjolinho	0%	41.203,96	0,00	0		
	EoMango	836%	2.359,36	19.726,00	4.180		
	EoDapaong	20%	8.980,00	1.764,89	98		
	SoMango	33.611%	359,64	120.878,75	1.680.553		
	SoDapaong	34.731%	385,03	133.723,00	1.736.529		
	Soma	69.197%					
	E[C]	276.092,63					
		Fontes	Pesos	Produção diária (kW)	Otimizada (kW)	Equipamentos	

CONSUMO MÉDIA PER  
CAPITA REGIONAL DE 535  
kWh RESULTANDO EM UMA  
DEMANDA DIÁRIA TOTAL DE  
1251769,41 KW

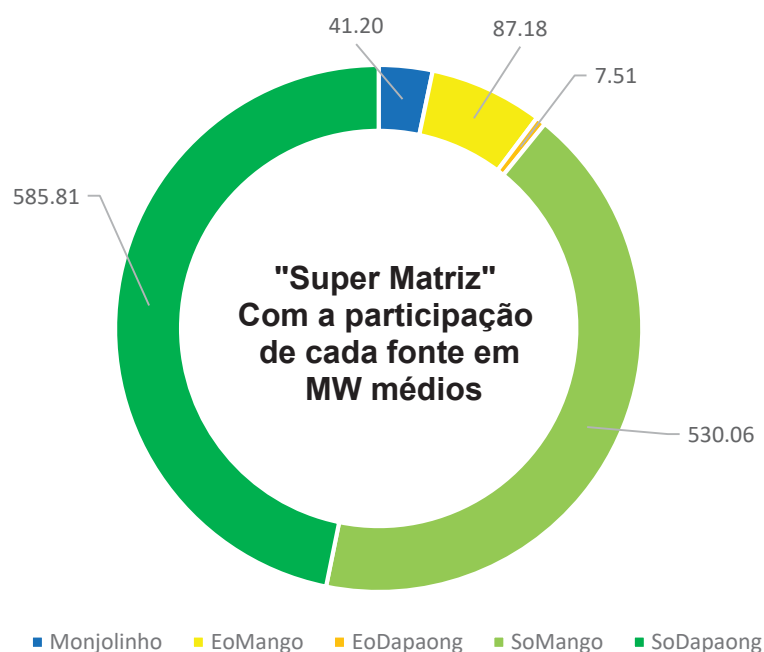
CONSUMO MÉDIA PER  
CAPITA NACIONAL DE 118  
kWh RESULTANDO EM UMA  
DEMANDA DIÁRIA TOTAL DE  
276092,63 KW

	DP[C]		36.324,36	
	E[C]/DP[C]		760%	
100% DE PARTICIPAÇÃO DA HIDRELÉTRICA	Fontes	Pesos		Equipamentos
	Monjolinho	100%	41.203,96	41.203,96
	EoMango	740%	2.359,36	17.469,79
	EoDapaong	14%	8.980,00	1.273,93
	SoMango	28.610%	359,64	102.893,70
	SoDapaong	29.414%	385,03	113.251,25
	Soma	58.879%		
	E[C]		276.092,63	
	DP[C]		38.056,10	
	E[C]/DP[C]		725%	

FONTE: O AUTOR (2020)

Caso os tomadores de decisão queiram manter uma única fonte hidrelétrica com a potência instalada de 74 MW, e alcançar o patamar regional de consumo, será preciso a inserção de 87,18 MW médios de potência eólica do parque de Mango, 7,51 MW médios do parque eólico de Dapaong, e 530,06 MW médios da usina solar de Mango e 585,81 MW médios da usina fotovoltaica de Dapaong. Esta matriz, denominada de “Super Matriz”, está ilustrada na FIGURA 42.

FIGURA 42 - COMPOSIÇÃO DA "SUPER MATRIZ"



FONTE: O AUTOR (2020)

TABELA 26 - RESUMO DAS SIMULAÇÕES COM POSSIBILIDADE DE EXPANDIR A USINA HIDRELÉTRICA

POSSIBILIDADE DE EXPANDIR A USINA HIDRELÉTRICA						
Fontes	Pesos	Produção diária (kW)	Otimizada (kW)	Equipamentos		
CONSUMO MÉDIA PER CAPITA NACIONAL DE 118 KW/h RESULTANDO EM UMA DEMANDA DIÁRIA TOTAL DE 276092.63 KW	Monjolinho	106%	41.203,96	43.760,36	1	
	EoMango	2.302%	2.359,36	54.309,97	11.509	
	EoDapaong	50%	8.980,00	4.467,61	249	
	SoMango	91.454%	359,64	328.906,47	4.572.721	
	SoDapaong	94.132%	385,03	362.437,13	4.706.615	
	Soma	188.045%				
	E[C]	793.881,54				
	DP[C]	101.753,71				
	E[C]/DP[C]	780%				
	Fontes	Pesos	Produção diária (kW)	Otimizada (kW)	Equipamentos	
CONSUMO MÉDIA PER CAPITA REGIONAL DE 535 KW/h RESULTANDO EM UMA DEMANDA DIÁRIA TOTAL DE 1251769.41 KW	Monjolinho	167%	41.203,96	68.987,33	2	
	EoMango	3.631%	2.359,36	85.657,66	18.153	
	EoDapaong	80%	8.980,00	7.179,77	400	
	SoMango	144.015%	359,64	517.936,97	7.200.774	
	SoDapaong	148.562%	385,03	572.007,67	7.428.102	
	Soma	296.455%				
	E[C]	1.251.769,41				
	DP[C]	160.442,06				
	E[C]/DP[C]	780%				

FONTE: O AUTOR (2020)

Estas tabelas permitem analisar as fontes não apenas por meio de equipamentos ou componentes, mas também sob a ótica de energia gerada em MW médios, ou seja, independentemente dos modelos ou das marcas dos equipamentos, o mais importante é atingir estas produções energéticas respectivas em cada usina.

Portanto, a matriz energética capaz de levar o Togo ao patamar de consumo médio de eletricidade da sub-região, caso houver interesse em expandir a geração hidrelétrica, será composta de duas (02) usinas hidrelétricas do Tipo Monjolinho com potência instalada de 74 MW, totalizando 148 MW, duas usinas eólicas, sendo uma em Mango capaz de gerar diariamente 85,66 MW médios e a segunda em Dapaong, composta por 400 torres, e por fim duas usinas fotovoltaicas dispostas da seguinte forma, uma em Mango com capacidade de geração de 515,94 MW médios e a outra em Dapaong com 572,00 MW médios.

Porém, caso decidirem manter o atual consumo nacional e expandir a geração hidrelétrica, será necessária uma geração de 43,76 MW médios de hidreletricidade, 54,31 MW médios do parque eólico de Mango, 249 torres eólicas para o parque de Dapaong, 328,91 MW médios do parque solar de Mango e 362,44 MW médios da usina solar de Dapaong.

Na hipótese de manter o atual consumo e a única fonte hidrelétrica, será preciso a inserção de uma usina fotovoltaica em Mango de 102,90 MW médios, uma segunda em Dapaong de 113,25 MW médios, e duas usinas eólicas, sendo uma em Mango de 17,47 MW médios e uma outra em Dapaong capaz de gerar 1,27 MW médios.

Após as análises dos cenários, a matriz retida como ideal para a resolução da problemática desta pesquisa é a destacada na TABELA 25, composta por uma fonte hidrelétrica de geração de energia com a potência instalada de 74 MW, e para alcançar o patamar regional de consumo, será preciso a inserção de 87,18 MW médios de energia eólica do parque de Mango, 7,51 MW médios do parque eólico de Dapaong, e 530,06 MW médios da usina solar de Mango e 585,81 MW médios da usina fotovoltaica de Dapaong.

Esta “super matriz” foi submetida à otimização como prescrita pela MTP e resultou na combinação ilustrada na TABELA 27.

TABELA 27 - A "SUPER MATRIZ" OTIMIZADA

Otimização	
Fontes	Pesos
Monjolinho	31%
EoMango	17%
EoDapaong	17%
SoMango	18%
SoDapaong	18%
Soma	100%
E[C]	224.817,14
DP[C]	28.273,09
E[C]/DP[C]	795%

FONTES: O AUTOR (2020)

Com a finalidade de atender à demanda nacional de eletricidade, esta “super matriz” foi concebida a partir de inserção de parques eólicos e solares. Em seguida a nova matriz energética passou por uma otimização por meio da moderna teoria de portfólio de Markowitz. Uma vez definida, esta matriz pode servir como plano diretor para o dimensionamento e instalações de centrais de geração de energia eólica e ou fotovoltaica.

Brevemente, a simulação iniciou-se com uma matriz fictícia composta por uma hidrelétrica, 500 torres eólicos e 5000 painéis fotovoltaicos em cada um dos parques de Mango e de Dapaong. Logo em seguida procedeu-se à indagação de saber qual seria o tamanho das fontes, em unidades, desta matriz para atender às demandas de eletricidade, a resposta a esta pergunta está destacada em azul na coluna “Equipamentos” da TABELA 25. Após encontrar a nova matriz energética denominada de “super matriz” capaz de atender às demandas, procedeu-se à sua otimização por meio da moderna teoria de portfólio.

#### 4.4 Análise de sensibilidade

A fim de determinar a influência e a importância da usina hidrelétrica na matriz e, conseqüentemente, a correlação desta com as demais fontes, foi realizada uma análise de sensibilidade à matriz energética. Os procedimentos foram iguais aos expostos anteriormente, ou seja, a otimização da matriz é realizada por meio da função *Solver* do *Excel*. As condições implementadas são: maximização da função objetivo de tal forma que a carteira tenha mais retorno e menos risco que o ativo mais rentável do conjunto, os pesos devem ser positivos, a soma dos pesos deve ser igual a 1. A sensibilidade se dá em relação à usina hidrelétrica, portanto, apenas o peso de usina de Monjolinho foi variado de intervalo de 0,1 até 1, como exprimido na TABELA 28.

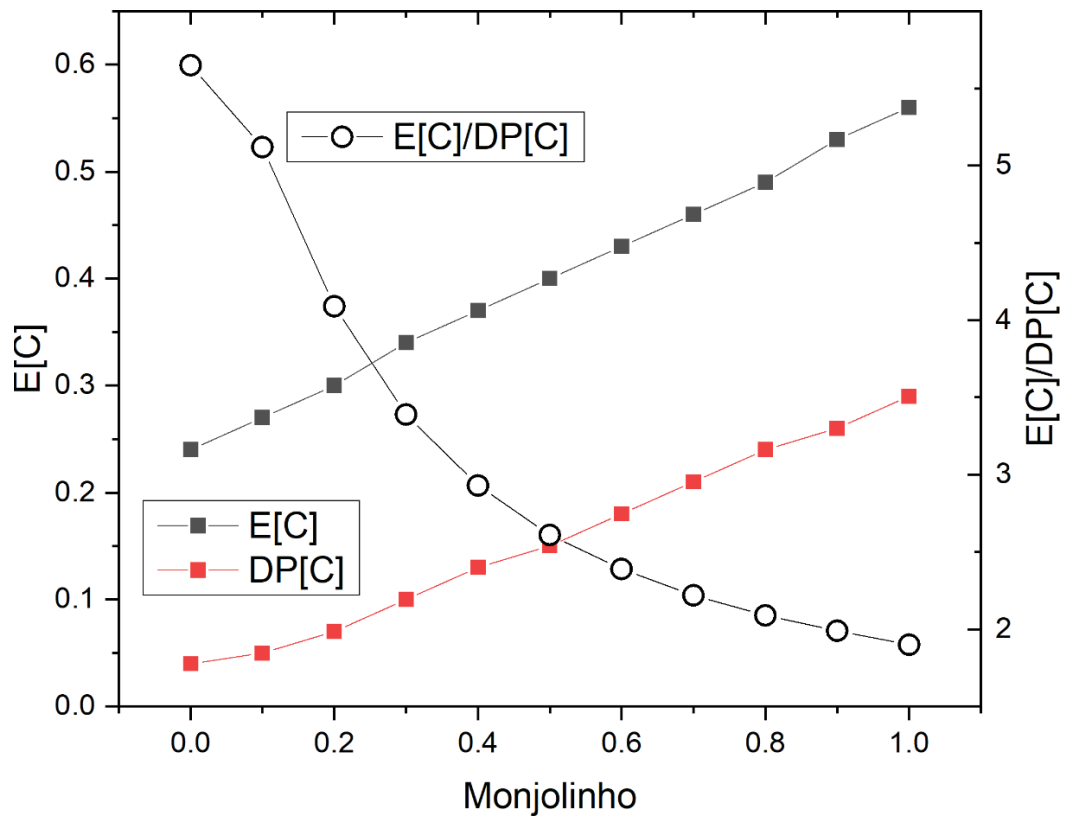
TABELA 28 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Fontes	Pesos	Pesos	Pesos	Pesos	Pesos	Pesos	Pesos	Pesos	Pesos	Pesos	Pesos
Monjolinho	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
EoMango	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
EoDapaong	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SoMango	31%	36%	24%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SoDapaong	69%	54%	56%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
Soma	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
E[C]	0,24	0,27	0,30	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,56
DP[C]	0,04	0,05	0,07	0,10	0,13	0,15	0,18	0,21	0,24	0,26	0,29
E[C]/DP[C]	565%	512%	409%	339%	293%	261%	239%	222%	209%	199%	190%

FONTE: O AUTOR (2020)

Ao observar os resultados da análise, conclui-se que a cada vez que se aumenta o peso ou a inserção da hidrelétrica, maior o risco se torna e o retorno também aumenta e a razão E[C]/DP[C] diminui. Esta observação é relatada pela FIGURA 43. E por meio desta análise de sensibilidade, há de notar a correlação espacial entre as fontes, principalmente a hidrelétrica e as usinas solares. Enquanto a participação da hidrelétrica aumenta, obviamente em períodos chuvosos, a contribuição fotovoltaica se reduz.

FIGURA 43 - VARIAÇÃO DO RISCO DA MATRIZ EM FUNÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DA HIDRELÉTRICA



FONTE: O AUTOR (2020)

Uma informação importante a reter por meio deste gráfico é a importância da diversificação de uma matriz por meio de inserção de outras fontes a fim de reduzir o risco. Percebeu-se que ao prevalecer apenas uma hidrelétrica, o risco da carteira aumenta linearmente.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

### 5.1 Coleta dos dados

Os dados coletados foram do período de 1989 a 2019 e são de vazão, de velocidade de vento e de irradiação solar. Estes foram convertidos em unidades de energia para fim de implementação na matriz energética do Togo. Devido à disponibilidade das suas matérias primas, três fontes foram escolhidas para compor a nova matriz energética: a fotovoltaica, a eólica e a hidrelétrica. É importante ressaltar que a usina hidrelétrica brasileira de Monjolinho foi considerada no problema, pois os dados hidrológicos da usina de Nangbeto não possuíam qualidade suficiente para seu uso.

### 5.2 Séries históricas de energia gerada por cada fonte

Os dados convertidos em energia resultaram em séries históricas de energia gerada por cada uma destas fontes. Desta forma, obtiveram-se séries históricas de energia eólica por 31 anos, séries históricas de energia fotovoltaica a partir de 2018 e série histórica de hidrelétrica a partir de 1989 até 2019.

### 5.3 Resultados da aplicação da Moderna Teoria de Portfólio de Markowitz

Como preconizado por Harry Markowitz, a otimização de uma carteira passa por sua diversificação. Portanto foram considerados 5 ativos, a partir destas três fontes: uma hidrelétrica (Monjolinho), dois parques eólicos e duas usinas solares em Mango e Dapaong. Os resultados obtidos por meio da moderna teoria de portfólio foram os esperados, a partir do momento em que foi encontrada a “super matriz”. A priori, a teoria de Markowitz serve quando há uma matriz ou carteira de alocação de ativos existente. Portanto, houve de se criar uma matriz energética com supostas fontes constituídas pelos equipamentos apresentados no decorrer o trabalho, e simular diversos cenários para que esta matriz fictícia atenda às condições impostas pelo setor elétrico do Togo. Foram obtidas seis matrizes após todas as simulações. A matriz com a ótima combinação, levando em conta o cenário mais crítico da situação atual do setor

elétrico do Togo é a “super matriz” cuja alocação das fontes está ilustrada na FIGURA 42. A moderna teoria de portfólio de Markowitz se revelou bastante versátil e pode ser indicada para estudos de previsão de matriz energética futura. Esta teoria pode ser combinada com outros métodos que podem prever crescimentos populacionais e conseqüentemente o consumo futuro de energia, gerações futuras de energia por diversas fontes. Portanto, com estas informações, há possibilidade de simular matrizes que podem atender estas demandas futuras de eletricidade.

#### 5.4 Limitações enfrentadas no estudo e sugestões para futuras pesquisas

Foram diversos desafios, durante o desenvolvimento desta pesquisa. A obtenção de dados foi de extrema dificuldade já que não há nenhuma plataforma que disponibiliza estes dados, para o acesso geral. As solicitações foram feitas a distância, já que o estudo foi desenvolvido no Brasil e o campo de pesquisa é no Togo. Das solicitações reiteradas dos dados e o tratamento destes ao chegarem, várias foram as objeções. Mesmo desta forma, os dados de vazão não foram considerados devido a falhas e ocorrências de longos períodos de anos sem nenhum dado coletado. Uma segunda limitação mais notória é a inexistência de instalações das outras fontes estudadas, no Togo, durante a realização do trabalho, tanto centrais fotovoltaicas quanto parques eólicos. Portanto, não havia nenhum exemplo de trabalho, nem referências bibliográficas suficientes, nem estudos elaborados a respeito.

Devido às condições de coleta dos dados de velocidades de vento, as energias geradas pelas torres, para compor a séries históricas, foram baixíssimas. Foram duas tentativas de cálculo de energia eólica. A primeira com um modelo Vestas que não operou, pois, a sua velocidade de *cut-in* é maior que a velocidade média coletada no posto de Mango. Portanto, foi na segunda tentativa, com o modelo Enercon que foi possível realizar o cálculo das séries históricas de geração de energia eólica. Por mais, as baixíssimas gerações de energia eólica nas regiões escolhidas podem decorrem das condições de medição das velocidades de vento, já que os postos de medições são situados em áreas urbanas, a 10 m do solo, portanto influenciados pela rugosidade entorno. Deixa-se, aqui, uma sugestão para os próximos estudos. Para a

obtenção dos dados reais e íntegros, haverá de instalar os postos de coletas em locais e alturas adequados, para uma coleta contínua e sem interrupções de dados.

Os resultados obtidos, por meio, desta pesquisa são apenas oriundos de uma análise entre as fontes hidrelétrica, fotovoltaica e eólica. Ao obter soluções com propostas de instalações de milhares de torres eólicas e painéis fotovoltaicos, pensou-se em outras fontes de elevados fatores de capacidade. Isto porque estas soluções encontradas podem enfrentar limitações econômicas, espaciais, ambientais, dentre outras. Lembra-se que os estudos de viabilidade econômica, social e ambiental, fogem do escopo desta pesquisa. Portanto, outros estudos podem ser desenvolvidos procurando a inserção de outras fontes com fatores de capacidade elevados, tais como a termoelétrica, a nuclear, a biomassa, as instalações de eólicas *offshore*, instalações residenciais de painéis fotovoltaicos conectadas às redes ou não, dentre outras.

Vale ressaltar aqui que, para aplicar este estudo ao caso do Togo, é preciso ainda multiplicar a participação da hidrelétrica por 47%, já que o acordo firmado entre Togo e Benim concede apenas este percentual de energia gerada ao Togo.

A fim de suprir esta demanda crescente de eletricidade, é necessário ampliar a matriz energética do Togo de qualquer forma. O governo togolês demonstra esforços notórios em direção à autonomia energética do país, através de financiamento de diversos programas e projetos no setor elétrico. Há, em curso, um o projeto da construção de uma nova usina de hidrelétrica binacional entre Togo e Benim, com uma potência instalada de 147 MW e uma Central fotovoltaica de Blitta com uma capacidade de 50 MW. A inserção destas fontes amenizará, enormemente, os males produzidos pela a ausência de eletricidade.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATLAS OF AFRICA ENERGY RESOURCES, Programa Ambiental das Nações Unidas e Banco Africano de Desenvolvimento/ o Consorcio de Infraestrutura para África, publicado em 2017. Acesso em: 02 Out. 2018.

ÁVILA, L. M. R. **Planejamento Integrado De Um Sistema Hidro-Termo-Eólico**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba (2020) Acesso em: 31 Maio 2020.

AWERBUCH, S., BERGER, M., **Applying portfolio theory to EU electricity planning and Policy – Making**, in IAEA/EET Working Paper No. 03, EET, 2003. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/APPLYING-PORTFOLIO-THEORY-TO-EU-ELECTRICITY-AND-Awerbuch-Berger/0ca88df704e4f08ebb458bcf8c4cc418f3eaa634>>. Acesso em: 08 Maio 2020.

BAZILIAN, M., NUSSBAUMER, P., ROGNER, H.-H., BREW-HAMMOND, A., FOSTER, V., PACHAURI, S., ET AL., Energy access scenarios to 2030 for the power sector in sub-Saharan Africa, **Utilities Policy**, v. 20(1), pp. 1-6, 2012.

BHATTACHARYA, A., KOJIMA, S., **Power sector investment risk and renewable energy: A Japanese case study using portfolio risk optimization method**, **Energy Policy**, v. 40, pp. 69-80, 2012.

BRUNI, A. L.; FUENTES, J.; FAMÁ, R. **A Moderna Teoria de Portfólios e a Contribuição dos Mercados Latinos na Otimização da Relação Risco Versus Retorno de Carteiras Internacionais: Evidências Empíricas Recentes** (1996-1997). III Semead. FEA/USP. São Paulo: 1998.

CUCCHIELLA, F., GASTALDI, M., TROSINI, M., **Investments and cleaner energy production: A portfolio analysis in the Italian electricity market**, **Journal of Cleaner Production**, v. 142(1), pp. 121-132, 2017.

EBERHARD, A., GRATWICK, K., MORELLA, E., ANTMANN, P., Independent Power Projects in Sub-Saharan Africa: Lessons from Five Key Countries, 2016. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/23970/9781464808005.pdf?sequence=2>>. Acesso em: 27 Maio 2020.

ESCRIBANO FRANCÉS, G., MARÍN-QUEMADA, J.M., SAN MARTÍN GONZÁLEZ, E., **RES and risk: Renewable energy's contribution to energy security. A portfolio-based approach**, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, pp. 549-559, 2013.

GARCÍA C. M. M., OLAYA Y., BOTERO S., **Investment in renewable energy considering game theory and wind-hydro diversification**, **Energy Strategy Reviews**, v. 28(100447), 2020.

GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. **Plan National d'Adaption aux Changements Climatiques du Togo**, (2017). Disponível em: <<https://www4.unfccc.int/sites/NAPC/Documents%20NAP/Togo%20NAP.pdf>>. Acesso em: 03 Maio 2020.

GONÇALVES Jr, CLEBER; PAMPLONA, EDSON DE O.; MONTEVECHI, JOSÉ A. **Seleção de Carteiras Através do Modelo de Markowitz para Pequenos Investidores (Com o Uso de Planilhas Eletrônicas)**. IX Simpep outubro de 2002. Bauru, SP.

GWP – Global Water Partnership (West Africa) / WMO - World Meteorological Organization. **Évaluation des besoins de renforcement des capacités-Togo: Préparation de projets de gestion intégrée des inondations pour le Bénin, Burkina Faso, Cote d'Ivoire, Ghana, Mali, Togo et le Bassin, de la Volta en Afrique de l'Ouest**. Elaborado por ETSE, G. K. (Novembro 2016).

HICKEY, E.A., LON CARLSON, J., LOOMIS, D., **Issues in the determination of the optimal portfolio of electricity supply option**, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421509009434> Acesso em: 09 Maio 2020.

IGLEWICZ, B.; HOAGLIN, D., "**Volume 16: How to Detect and Handle Outliers**". The ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques, Edward F. Mykytka, Ph.D., Editor. 1993. Disponível em <<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35h.htm>> . Acesso em 23 de Novembro de 2020.

INSEED – Institut National de la Statistique et des Études Économiques et Démographiques. Productions Démographiques. Disponível em :<<http://www.stat-togo.org/thematiques/statistiques-demographiques/32-thematiques/statistiques-demographiques/etat-structure/79-perspectives-demo>>. Acesso em: 03 Maio 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY HYDROPOWER REPORTS, 2020. Disponível em <<https://www.iea.org/reports/hydropower>> Acesso em 28 de Janeiro de 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA-PVPS), 2020. Strategic PV Analysis and Outreach Disponível em <[https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA\\_PVPS\\_Snapshot\\_2020.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf)> Acesso em 28 de Janeiro de 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - RENEWABLES REPORTS, 2020. Disponível em <<https://www.iea.org/reports/renewables-2020/wind>> Acesso em 28 de Janeiro de 2021.

MALALA N.O., ADACHI T., **Portfolio optimization of electricity generating resources in Kenya**, *The Electricity Journal*, v. 33(4), 106733, 2020.

MALCOLM, S.A., ZENIOS, S.A., **Robust optimization for power systems capacity expansion under uncertainty**, *Journal of the Operational Research Society*, v. 45(9), pp. 1040-1049, 1994.

MARKOWITZ, H. **Portfolio selection**. *The Journal of Finance*, 7(1), 77-91., 1952.

MARRERO, G.A., PUCH, L.A., RAMOS-REAL, F.J., **Mean-variance portfolio methods for energy policy risk management**, *International Review of Economics & Finance*, v. 40, pp. 246-264, 2015.

NTAGUNGIRA, C. **Problématiques de l'accès à l'électricité au Togo**. Note 3 (Relatório ao BAD – Banque Africaine de Développement). Abidjan, Costa de Marfim, 2015. Disponível em: <[https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Knowledge/Afrique\\_d\\_e\\_l\\_ouest\\_Policy\\_Note\\_03\\_-\\_septembre\\_2015.pdf](https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Knowledge/Afrique_d_e_l_ouest_Policy_Note_03_-_septembre_2015.pdf)>. Acesso em: 31 Maio 2020.

PNUD – Programme des Nations Unies pour le Développement. (Outubro, 2015). Acesso em: 03 Maio 2020.

REIS, P. **Mundo tem um bilhão de pessoas sem acesso à eletricidade**. Abril 2017. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/mundo-bilhao-pessoas-sem-acesso-eletricidade/>>. Acesso em: 02 Out. 2018.

ROQUES, F., HIROUX, C., SAGUAN, M., **Optimal wind power deployment in Europe – a portfolio approach**, *Energy Policy*, v. 38(7), pp. 3245-3256, 2010.

SCHIROKY, M. M. **Seleção de Carteira através do Modelo de Markowitz**. Trabalho de conclusão do curso de Especialização – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Administração, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/103194/000590336.pdf?seq=1>>. Acesso em: 30 Maio 2020.

TCN – Troisième Communication Nationale Sur les Changements Climatiques. UN Framework Convention on Climate Change / PNUD – Programme des Nations Unies pour le Développement. (Outubro, 2015). Disponível em: <<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/tgonc3.pdf>>. Acesso em: 03 Maio 2020.

TOLMASQUIM, T.M. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: 2016.

TIZGUI, I.; BOUZAHIR, H., EL GUEZAR, F., BENAID, B. **Wind Speed Extrapolation and Wind Power Assessment at Different Heights**, 2017. 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies. Agadir, Marrocos, 2017. Disponível em:

[file:///C:/Users/mpcan/Downloads/ICEIT2017\\_Program.pdf](file:///C:/Users/mpcan/Downloads/ICEIT2017_Program.pdf). Acesso em 24 de Janeiro de 2021.

## APÊNDICE A – CARTAS DE SOLICITAÇÃO DOS DADOS

Fait à Curitiba, le 21/04/2020

Dr. Ernest Amoussou

Enseignant-Chercheur à l'Université de Parakou au Bénin Membre actif du Laboratoire Pierre Pagney : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE)/ Département de Géographie / Université d'AbomeyCalavi (Bénin) En Postdoctoral à l'HydroSciences de l'Université de Montpellier 2 et au Centre de Recherche de Climatologie (CRC) de Dijon, Université de Bourgogne.

**Objet : Demande des informations à propos des données pluviométriques et débits dans le bassin du fleuve Mono.**

Je suis Ingénieur Civil et actuellement je poursuis mes études de Master en Génie de Ressources Hydriques et Environnementales, sous la direction du Professeur Daniel Detzel, à l'Université Fédérale du Paraná. Comme projet de mémoire, j'étudie **la diversification de la matrice énergétique des pays d'Afrique subsaharienne avec d'autres sources complémentaires d'énergie, à part les hydroélectriques comme solution à la pénurie d'énergie dont souffre notre région**. Cette matrice sera composée de sources interliées, permettant ainsi un relai et une compensation entre ces dernières.

Néanmoins, je suis à la recherche des données météorologiques, hydrologiques et sédimentologiques. Durant mes recherches, j'ai eu à lire votre article : « **Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)** ». Vous aviez pu obtenir ces données de 1988-2010.

Alors j'aimerais savoir si vous pouvez partager avec moi ces bases de données ou du moins m'indiquer une adresse sur laquelle je peux les obtenir.

Veuillez agréer, l'expression de mes félicitations et salutations les plus sincères.

ASSIGNO Koffi Dodzi.



**Date: 06 Juin 2020**

**À la Direction Générale de la Météorologie Nationale**

**De: Koffi Dodzi ASSIGNO**

**Objet: Demande des informations à propos des données pluviométriques et débits dans le bassin du fleuve Mono.**

Messieurs,

Je suis Ingénieur Civil et actuellement je poursuis mes études de Master en Génie de Ressources Hydriques et Environnementales, sous la direction du Professeur Daniel Detzel, à l'Université Fédérale du Paraná. Comme projet de mémoire, j'étudie **la diversification de la matrice énergétique des pays d'Afrique subsaharienne avec d'autres sources complémentaires d'énergie, à part les hydroélectriques comme solution à la pénurie d'énergie dont souffre notre région**. Cette matrice sera composée de sources interreliées, permettant ainsi un relai et une compensation entre ces dernières.

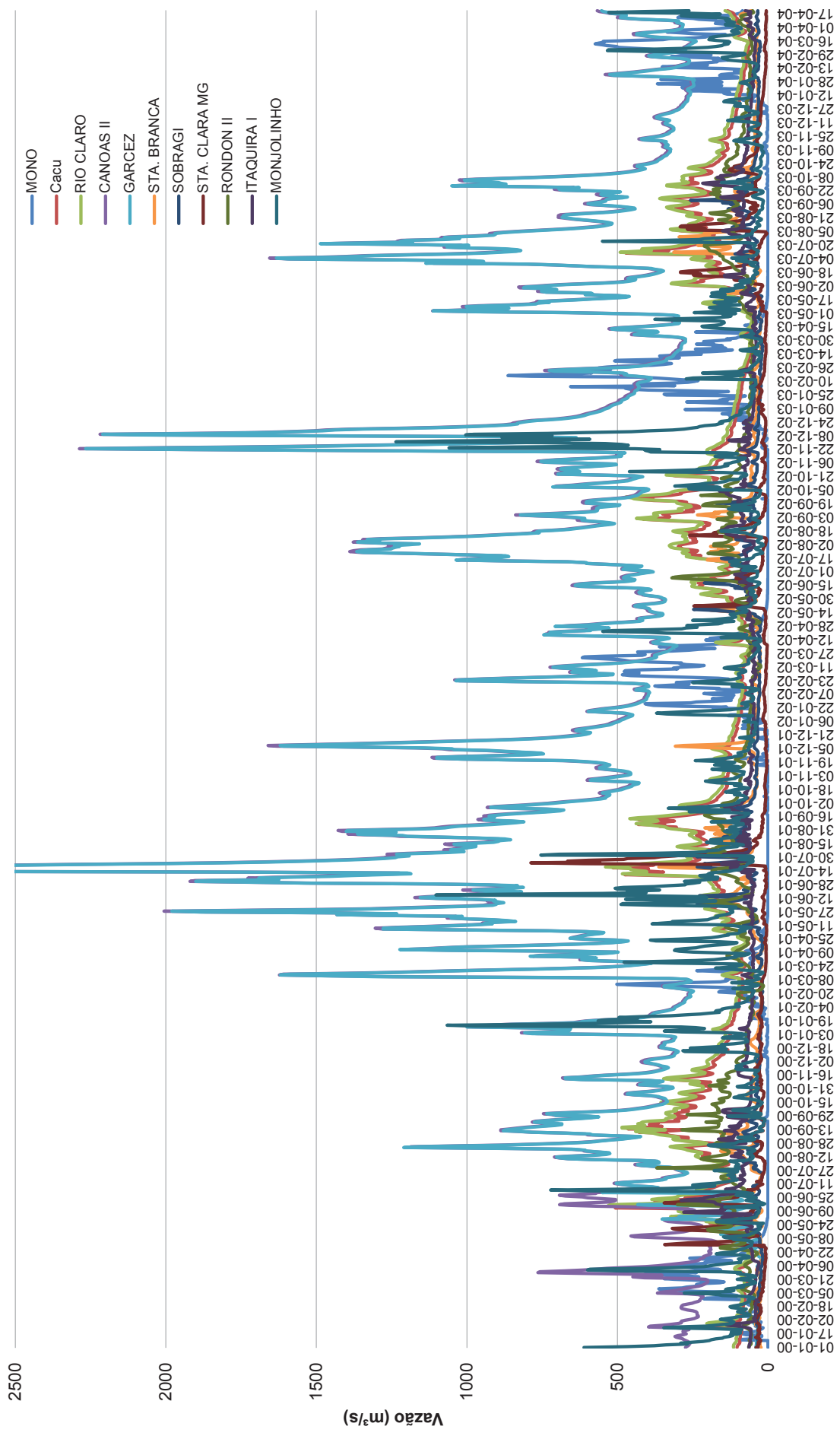
Néanmoins, je suis à la recherche des données météorologiques, hydrologiques et sédimentologiques. Durant mes recherches, j'ai eu à lire un article intitulé « **Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)** », écrit par le **Dr. Ernest AMOUSSOU**. Dans cet article, il a pu obtenir et explorer ces données de 1988-2010.

J'aimerais vous demander si vous pouvez partager avec moi ces bases de données ou du moins m'indiquer les adresses sur lesquelles je peux les obtenir.

Veuillez agréer, l'expression de mes félicitations et salutations les plus sincères.

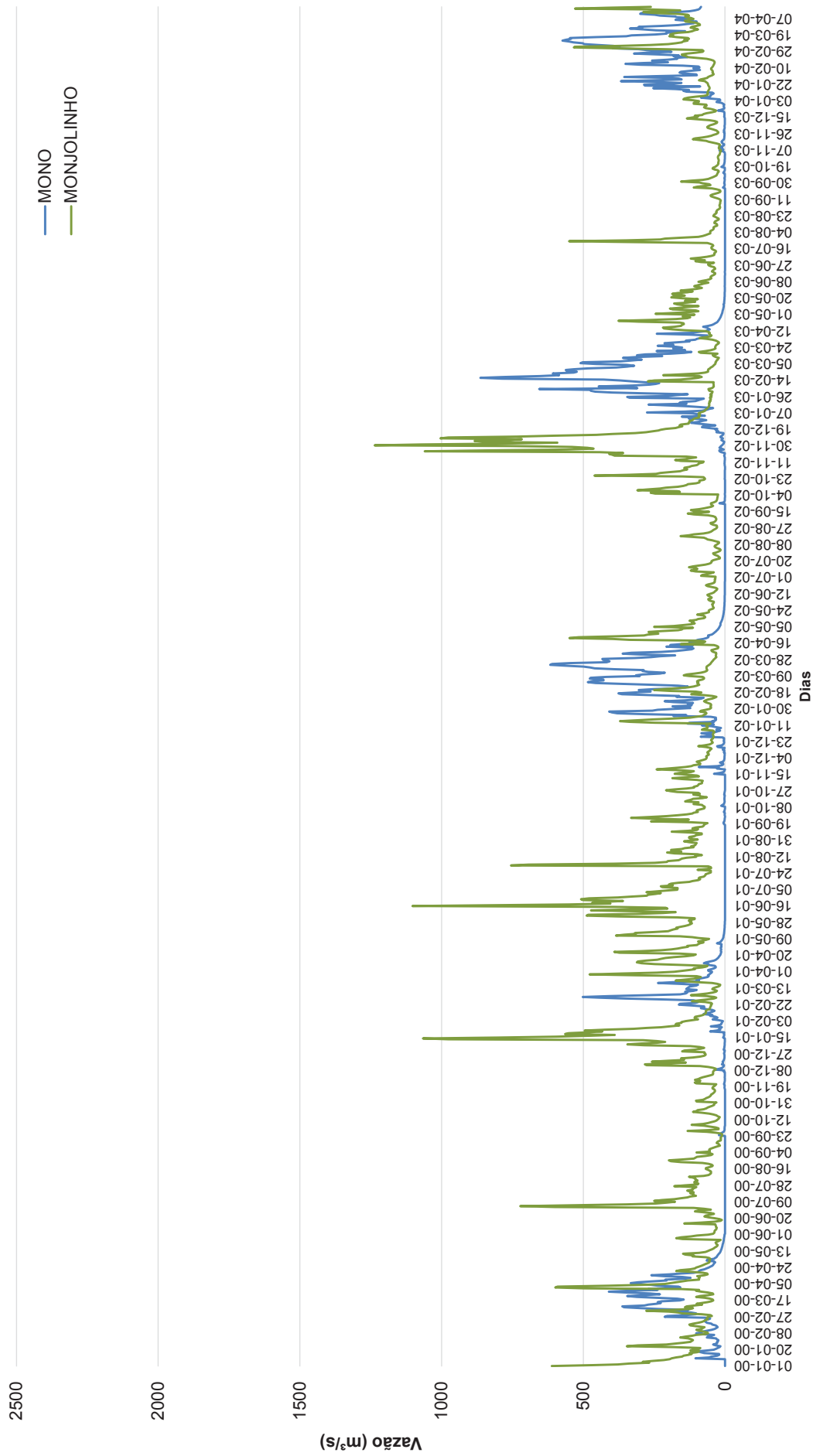
**Koffi Dodzi ASSIGNO**  
**Ingénieur Civil/Master PPGERHA-UFPR.**

APÊNDICE B – GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VAZÕES DO RIO MONO E DOS RIOS SELECIONADOS



FONTE: O AUTOR (2020)

APÊNDICE C – GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VAZÕES DO RIO MONO E DO RIO MONJOLINHO



FONTE: O AUTOR (2020)