



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EZI ADJOINO INDI

PLANEJAMENTO ELETROENERGÉTICO DA GUINÉ-BISSAU

Agosto de 2024

Itajubá – MG - Brasil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EZI ADJOINO INDI

PLANEJAMENTO ELETROENERGÉTICO DE GUINÉ-BISSAU

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica como parte de requisitos para obtenção de título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Dr. Eduardo Crestana Guardia
Coorientador: Dr. Maurício Campos Passaro

Agosto de 2024
Itajubá – MG - Brasil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EZI ADJOINO INDI

PLANEJAMENTO ELETROENERGÉTICO DA GUINÉ-BISSAU

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica como parte de requisitos para obtenção de título de Mestre em ciências em Engenharia Elétrica

Comissão Examinadora:

Ruben Barros Godoy - UFMS

Roberto Akira Yamachita

Maurício Campos Passaro - Coorientador

Eduardo Crestana Guardia – Orientador

Agosto de 2024

Itajubá – MG - Brasil

A minha amada vovó Atmari Nanque. M’Pili obrigado por sua capacidade de semear, que Deus todo poderoso nos conceda a vida de longos anos, te amo e sempre, você é custódia da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Durante minha trajetória acadêmica, desde a graduação até o mestrado, tive o privilégio de participar em diversas bancas de defesa de TCCs (Trabalhos de Conclusões de Cursos), assim como de algumas dissertações do mestrado e teses de doutorado. Nessas ocasiões, sempre observei com atenção as seções de agradecimentos presentes nos trabalhos acadêmicos. Quando alcancei o nível de mestrado, notei que os agradecimentos se tornavam ainda mais detalhados e profundos.

Isso me levou a refletir: é realmente necessário dedicar tempo para agradecer? Minha resposta foi clara: sim, é não apenas necessário, mas uma obrigação de quem reconhece suas próprias limitações e a ajuda recebida. Com esse sentimento, sinto-me no dever de expressar minha gratidão aos seguintes apoiadores:

Em primeiro lugar, agradeço a Deus todo poderoso pela vida e pelas infinitas bênçãos.

Um agradecimento especial aos meus pais, pelos cuidados, carinhos, apoios e atenção. Sou muito grato a vocês pela educação, amor e incentivos no meu percurso acadêmico.

Aos meus exímios professores orientadores: Eduardo Crestana Guardia e Maurício Campos Passaro, pelos apoios, compreensão e carinhos. Não sei dizer se existe sorte, mas, sou privilegiado tendo vocês como guias neste trabalho de dissertação. Trabalhei numa liberdade absoluta, sempre me atendendo nos momentos em que outrora não esperava, a vocês a minha eterna gratidão.

Aos meus colegas na academia, Eduardo Marcel Resende e Francisco Costa Santos, pela amizade e apoios.

Agradeço ao Centro de Hidrogênio Verde – CH2V da UNIFEI, pelos apoios na compreensão dos assuntos concernentes ao tema de hidrogênio verde, um importante vetor energético que vem ganhando bastante força no meio acadêmico.

Um especial agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

A UNIFEI, pelo acolhimento, a coordenação de pós-graduação da Engenharia Elétrica pelos apoios. Aos colegas de pós-graduação e aqueles com quem partilho opiniões diárias.

“Pedi e se vos dará. Buscai e achareis. Batei e vos será aberto. Porque todo aquele que pede, recebe. Quem busca, acha. A quem bate, abrir-se-á.”

Mateus, 7.7-8

RESUMO

Acesso à eletricidade é vital para o desenvolvimento de qualquer país, estado ou região do ponto de vista econômico, industrial e social. Objetivo desta dissertação é realizar o planejamento eletroenergético da Guiné-Bissau a partir dos potenciais benefícios do projeto OMVG (Organização para Valorização do Rio Gâmbia), integrando o sistema de potência com o energético para a produção de hidrogênio verde, visando a ampliação de carga e a diminuição da dificuldade de acesso a eletricidade por parte da população. Planejamento eletroenergético é um portfólio de cada país que estuda o seu sistema energético no todo, incluindo sua matriz energética e elétrica. O sistema OMVG é composto por 17 subestações (barras), duas de geração e 15 de cargas mais uma barra adicional da usina fotovoltaica para P2G2P, totalizando assim 18 barras estudadas neste trabalho. Foram simulados três patamares de cargas para a rede da OMVG: pesada, média e leve, agrupadas em duas análises para a confiabilidade do sistema: Análise de contingência estática (regime permanente) e da dinâmica (domínio do tempo) que por sua vez, inserem dentro do critério de segurança N-1 que consiste na perda de um elemento da rede sem corte de carga e sem prejuízos aos outros equipamentos. Essas análises permitiram identificar situações críticas e não críticas nas linhas e barras da rede através de comportamento de tensões e frequências durante as contingências. A Guiné-Bissau possui 4 barras mais uma da usina fotovoltaica conectada na subestação de Bissau, totalizando 5 barras. Um dos problemas enfrentados pelo país é acesso à eletricidade. A OMVG lhe proporcionou condições, dando-lhe a geração externa e permitindo a criação de carga interna a partir de integração do seu sistema energético por meio de linhas de transmissão. O sistema de transmissão objetiva através de linhas escoar a energia gerada na usina e transportá-la até centros de distribuição para atender o consumidor final. Espera-se a partir da OMVG que a Guiné-Bissau consiga resolver o seu problema de acesso à eletricidade. No contexto de transição energética e na mitigação do efeito estufa, P2G2P (Energia para gás, para Energia), é importante na produção e armazenamento de hidrogênio verde para fins energéticos, as 6 ilhas destinadas para P2G2P receberão 90kg diário da produção de hidrogênio verde para o seu abastecimento, suprimindo assim uma região de grande polo de atração econômica e turística.

Palavras-chave: Guiné-Bissau. OMVG. Planejamento eletroenergético. Subestações de energia elétrica. P2G2P.

ABSTRACT

From an economic, industrial, and social perspective, access to electricity is crucial for the development of any country, state, or region. This dissertation aims to conduct an electro-energy planning for Guinea-Bissau by leveraging the potential benefits of the OMVG project, which aims to integrate the power system with the energy system for green hydrogen production. The goal is to expand the energy load and reduce the population's difficulty in accessing electricity. Electro-energy planning is a strategic portfolio for each country, which includes its entire energy system and electrical matrix. The OMVG system comprises of 17 substations (nodes), two generation points, 15 load points, and an additional node from a photovoltaic plant dedicated to the P2G2P (Power to Gas) process. The total number of nodes analyzed in this study is 18. Three load levels were simulated for the OMVG network: heavy, medium, and light. These load levels were grouped into two reliability assessments: a static contingency analysis (steady-state) and a dynamic analysis (time domain). These analyses adhere to the N-1 security criteria, which allows for the loss of one network element without load shedding or damage to other equipment. These evaluations identified critical and non-critical conditions in the network's lines and nodes by observing voltage and frequency behaviors during contingencies. These conditions were identified by observing voltage and frequency behaviors during contingencies. Guinea-Bissau possesses a total of five nodes, including one from a photovoltaic plant that is connected to the Bissau substation. The OMVG provided the country with external generation capacity, allowing the creation of internal load through the integration of its energy system via transmission lines. The transmission system aims to distribute the energy generated at the plant and transport it to distribution centers in order to meet the final consumer demand. It is anticipated that through the OMVG, Guinea-Bissau will be able to resolve its electricity access issues. P2G2P plays a critical role in the production and storage of green hydrogen for energy purposes. The six islands designated for P2G2P will receive 90 kilograms of daily green hydrogen production for their supply, thus serving a region of significant economic and tourist significance.

Keywords: Guinea-Bissau. OMVG. Electricity planning. Electricity substations. P2G2P.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama Esquemático do Sistema Elétrico de Potência	19
Figura 2: Integração das bacias hidrográficas aos quatro países da OMVG.....	33
Figura 3: Interface da usina hidrelétrica de Sambangalou	34
Figura 4: Usina hidrelétrica de Kaléta.....	34
Figura 5: Organograma da OMVG.....	36
Figura 6: Interfaces das quinze subestações e duas usinas da OMVG.....	38
Figura 7: Sistema de geração e transmissão da OMVG nos quatro países.....	40
Figura 8: Estudo da arte da metodologia adotada.....	41
Figura 9: Projeção da Torre no ATPDraw a partir da disposição de dados	47
Figura 10: Esquema de execução feita no Anatem.....	54
Figura 11: Componentes de P2G2P com a rede elétrica.	58
Figura 12: Diagrama elétrico da rede da OMVG	60
Figura 13: Mapa geográfico da Guiné-Bissau e suas regiões administrativas	61
Figura 14: Quadro Energético da Guiné-Bissau.....	62
Figura 15: Comparativo de uso das matrizes energéticas nos anos 2010 e 201	63
Figura 16: Formas de geração de energia elétrica na Guiné-Bissau.....	63
Figura 17: Estrutura Administrativa do setor energético da Guiné-Bissau	64
Figura 18: Crescimento populacional e projeção na Guiné-Bissau (2010-12 / 2030)....	65
Figura 19: Evolução esperada da demanda nacional (GWh/ano).....	66
Figura 20: Subestações de transmissão da Guiné-Bissau a partir da OMVG.	67
Figura 21: Sistema Interligado Regional da OMVG e conexão Guiné-Bissau	68
Figura 22: Ampliação da carga do sistema energético da Guiné-Bissau	70
Figura 23: Ilhas com marcas em vermelho destinadas para P2G2P.....	71
Figura 24: Localização de Antula no Mapa de Bissau.	73
Figura 25: Esquema de P2G2P completo	73
Figura 26: Esquema de abastecimento de energia elétrica com célula combustível.....	74
Figura 27: Esquema de funcionamento do eletrolisador PEM.....	76
Figura 28: Células combustível PEM, sua reação e seus eletrodos.....	79
Figura 29: Classe do armazenamento do hidrogênio tipo IV	81
Figura 30: Curto-circuito trifásico barras 130-140 (Saltinho e Bambadinca).....	89
Figura 31: Curto-circuito 3 ϕ barras 210-220 (Tambacounda e Sambangalou).....	90
Figura 32: Curto-circuito 3 ϕ barras 100-250 (Kaléta e Linsan).....	90
Figura 33: Carga Pesada com perda da geração de Sambangalou sem UFV.....	91
Figura 34: Carga Pesada com perda da geração de Sambangalou com UFV.....	92
Figura 35: Sistema de transmissão da Guiné-Bissau no projeto OMVG	95
Figura 36: Mapa de insolação e histograma da irradiação anual por regiões do país. ...	97
Figura 37: Valores médios dos ventos e rajadas a 10m do chão por região.....	97
Figura 38: Matriz elétrica na Guiné-Bissau com OMVG em operação	99
Figura 39: Diagrama unifilar do OMVG e contingências do Anatem	113
Figura 40: Regulador de tensão	114
Figura 41: Modelo de Estabilizador (PSS) adotado para o estudo da OMVG.....	115
Figura 42: Modelo de Regulador de velocidade.....	116
Figura 43: Curto-circuito 3 ϕ barras 140-150 (Bambadinca e Mansoa).....	121
Figura 44: Curto-circuito 3 ϕ barras 210-220 (Tambacounda e Sambangalou).....	122

Figura 45: Curto-circuito 3 ϕ barras 240-250 (Labé e Linsan).	122
Figura 46: Curto-circuito 3 ϕ barras 140-150 (Bambadinca e Mansoa).....	124
Figura 47: Curto-circuito 3 ϕ barras 130-140 (Saltinho e Bambadinca) com UFV	129
Figura 48: Curto-circuito 3 ϕ barras 130-140 (Saltinho e Bambadinca) com UFV	129
Figura 49: Curto-circuito 3 ϕ barras 140-150 (Bambadinca e Mansoa) com UFV	131
Figura 50: Curto-circuito 3 ϕ barras 210-220 (Tambacounda e Sambangalou) com UFV	131
Figura 51: Curto-circuito 3 ϕ barras 230-240 (Mali e Labé) com UFV.....	132
Figura 52: Curto-circuito 3 ϕ barras 140-150 (Bambadinca e Mansoa) com UFV.....	133
Figura 53: Curto-circuito 3 ϕ barras 140-150 (Bambadinca e Mansoa) com UFV.....	134
Figura 54: Carga Média com a perda da geração de Sambangalou sem UFV	134
Figura 55: Carga Leve com perda da geração de Sambangalou sem UFV	135
Figura 56: Carga Média com perda da geração de Sambangalou com UFT.....	136
Figura 57: Carga Leve com perda da geração de Sambangalou com UFT	136
Figura 58: Frequências das usinas para curto-circuito em carga pesada (Evento 15)..	137
Figura 59: Frequências das usinas para curto-circuito em carga Média (Evento 13)...	138
Figura 60: Frequências das usinas para curto-circuito em carga Leve (Evento 5).....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados das usinas.....	34
Tabela 2: Subestações de transmissão dos países membros da OMVG.....	38
Tabela 3: Dados populacionais das cidades de subestações da Guiné-Bissau	42
Tabela 4: Dados populacionais das cidades de subestações de Gâmbia	43
Tabela 5: Dados populacionais das cidades de subestações de République de Guinée .	43
Tabela 6: Dados populacionais das cidades de subestações do Senegal	43
Tabela 7: Dados de consumo anual per capita dos países membros da OMVG	44
Tabela 8: Carga pesada, média e leve em MVA.	44
Tabela 9: Comprimentos de linhas de transmissão da OMVG.	45
Tabela 10: Característica, estrutura metálica, circuito simples e dois cabos para-raios.	46
Tabela 11: Impedância em (Ω) e Susceptância em (S) das subestações da OMVG.	48
Tabela 12: Resumo em sistema percentual.	48
Tabela 13: Variáveis de estado e controle de cada barra da OMVG.....	51
Tabela 14: Continuação de variáveis de estado e de controle das barras da OMVG.....	51
Tabela 15: Quantidades de reatores utilizados para cada patamar de carga.....	52
Tabela 16: Variáveis de estados e controle do fluxo de potência de carga pesada	52
Tabela 17: Variáveis de estados e controle do fluxo de potência de carga média	53
Tabela 18: Variáveis de estados e controle do fluxo de potência de carga leve.....	53
Tabela 19: Geração Ativa e Reativa das duas usinas para cada carga.	55
Tabela 20: Número de geradores por patamar de carga	56
Tabela 21: Dimensionamento do reativo para despacho das Máquinas.....	56
Tabela 22: População da região de Bolama e consumo anual per capita.	57
Tabela 23: Característica do eletrolisador PEM.	75
Tabela 24: Resumo das características de célula PEM.....	80
Tabela 25: Contingências e nomes de cada subestação.....	84
Tabela 26: Contingências analisadas.....	87
Tabela 27: Critério de procedimento de rede do ONS	88
Tabela 28: Análise dos parâmetros da OMVG para os procedimentos de rede	88
Tabela 29: As contingências referentes à carga pesada.....	106
Tabela 30: As contingências referentes à carga média.....	107
Tabela 31: As contingências referentes à carga leve.....	108
Tabela 32: As contingências referentes à carga pesada com a UFV	109
Tabela 33: As contingências referentes à carga média com a UFV	110
Tabela 34: As contingências referentes à carga leve com a UFV	111
Tabela 35: Tensões em regime permanente considerando a rede completa.....	112
Tabela 36: Dados dos Geradores	114
Tabela 37: Ajustes de Regulador de tensão.....	115
Tabela 38: Ajustes de PSS.....	115
Tabela 39: Ajustes de Regulador de Velocidade.....	116
Tabela 40: Resultado da aplicação de curto-circuito para carga pesada.	118
Tabela 41: Resultado de aplicação de curto-circuito para carga média	119
Tabela 42: Resultado de aplicação de curto-circuito para carga leve.....	120
Tabela 43: Critério de procedimento de rede para carga leve.	123
Tabela 44: Curto-circuito 3ϕ para carga pesada com UFV.	125

Tabela 45: Curto-circuito 3 ϕ para carga média com UFV	126
Tabela 46: Curto-circuito 3 ϕ para à carga leve com UFV.....	127
Tabela 47: Critério de procedimento de rede para carga pesada com UFV	128
Tabela 48: Critério de procedimento de rede para à carga média com UFV	130
Tabela 49: Critério de procedimento de rede para à carga média com UFV	133

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Ampère (unidade de corrente elétrica)
ALER	Associação Lusófona de Energias Renováveis
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AHC	Algoritmo Heurístico Construtivo
CEDEAO	Comunidade Econômica dos Estados da África Ocidental
CCPE	Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão do Sistema
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CO ₂	Dióxido de carbono
EAGB	Eletricidade e Água da Guiné-Bissau
ECREE	Centro de Pesquisa para Energias Renováveis e Eficiência Energética
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ECOWAPP	Associação de Entidades Públicas e Privadas de Energia
GBoS	The Gambia Bureau of Statistics
INE	Instituto Nacional de Estatística (Guiné-Bissau)
INS	Institut National de la Statistique (République de Guinée)
km	Quilômetro
MEI	Ministério de Energias e Indústrias da Guiné-Bissau
MME	Ministério de Minas e Energias (Brasil)
MVA	Mega Volt Ampère
ONS	Operador Nacional do Sistema
OMVG	Organização Para Valorização do Rio Gâmbia
PAR	Plano de Ampliação de Reforço (ONS)
PEM	Eletrólito Membrana de Troca de Prótons
PET	Planejamento de Expansão de Transmissão de Longo Prazo
P2G2P	Energia para Gás para Energia
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
SIN	Sistema Nacional Interligado (Brasil)
SRI	Sistema Regional Interligado (OMVG)
V	Volt (unidade de tensão elétrica)

W Watt (unidade de potência ativa)

Ω Ohm (unidade de resistência elétrica e impedância)

3 ϕ Trifásico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO	19
1.3	JUSTIFICATIVA	20
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	PLANEJAMENTO ENERGÉTICO	23
2.2	PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO	25
2.3	POWER-TO-GAS-TO-POWER (P2G2P).....	28
2.4	INTEGRAÇÃO DE HIDROGÊNIO COM A REDE ELÉTRICA	31
2.5	ORGANIZAÇÃO PARA VALORIZAÇÃO DO RIO GÂMBIA – OMVG	32
2.5.1	Contexto histórico	32
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	DEMOGRAFIA DAS CIDADES DAS SUBESTAÇÕES DA OMVG	42
3.2	COMPRIMENTOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DA OMVG.....	45
3.3	ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA	49
3.4	SIMULAÇÃO NO ANAREDE.....	49
3.5	SIMULAÇÃO NO ANATEM	54
3.6	DIMENSIONAMENTO DA CARGA DA REGIÃO DE BOLAMA, UFV E P2G2P	57
4	ESTUDOS DE CASO	61
4.1	ESTUDO DE CASO 1: CONEXÃO DA GUINÉ-BISSAU NA OMVG	61
4.1.1	Caracterização do sistema energético da Guiné-Bissau.....	61
4.1.2	Importância do sistema OMVG para Guiné-Bissau	66
4.2	ESTUDO DE CASO 2: INTEGRAÇÃO DO HIDROGÊNIO EM BOLAMA	71
4.2.1	Instalações P2G2P	72
4.2.2	Produção de hidrogênio	74
4.2.3	Eletrolisador (PEM).....	75
4.2.4	Células de combustível com membrana de troca de prótons (PEM).....	77
4.2.5	Funcionamento de célula combustível PEM	78
4.2.6	Características de células combustível PEM.....	79
4.2.7	Armazenamento e transporte de hidrogênio verde	80
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82

5.1	ANÁLISE DA REDE ELÉTRICA.....	82
5.1.1	Critério de segurança N - 1.....	82
5.1.2	Análise da carga.....	83
5.1.3	Análise de contingência estática	84
5.1.4	Análise de contingência dinâmica (transitória).....	85
5.1.5	Frequências das duas usinas de gerações.....	92
5.2	RESULTADOS DO ESTUDO DO CASO 1: CONEXÃO NA OMVG	94
5.3	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 2: INTEGRAÇÃO DO HIDROGÊNIO.....	98
6	CONCLUSÕES.....	100
6.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	102
7	APÊNDICE	104
7.1	ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA ESTÁTICA.....	104
7.2	ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA DINÂMICA	113
7.3	ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO COM PERDA DE GERAÇÃO	134
7.4	ANÁLISE DA FREQUÊNCIA.....	137
8	REFERÊNCIAS.....	139
9	ANEXO	145

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é um bem comum para humanidade. Por isso, desde primórdios sempre mereceu a atenção do homem. Seu acesso é vital para o desenvolvimento de qualquer país, estado ou região do ponto de vista econômico, industrial e social, sendo indissociável das atividades diárias.

A energia elétrica é uma fonte de energia complexa de ponto de vista estratégico para garantir o suprimento. Isso se deve ao fato de que sua produção envolve diversas ferramentas do sistema de potência integradas na rede elétrica. O planejamento dessa energia visa não apenas assegurar o bom funcionamento operacional da rede, mas também garantir o equilíbrio da oferta e da demanda.

A geração de energia elétrica, geralmente ocorre em locais distantes das metrópoles e raramente nos centros de consumo. Seu aproveitamento, exige um esforço conjunto para transportá-la até os consumidores finais, passando por uma cadeia de linhas de transmissão e subtransmissão, elevando e abaixando o perfil de tensão, por meio do sistema de distribuição até a comercialização final. Essa operação é chamada de sistema elétrico de potência, sendo um elo crucial entre a carga e o consumidor final [1].

A matriz de energia pode ser definida como conjunto de recursos energéticos e suas respectivas utilizações em um determinado país. Sua exploração, demanda estudos, estratégias e planos que podem ser agrupados em curto, médio e longo prazos, visando o seu aproveitamento em prol do consumidor final. Ela poder ser dividida em matriz elétrica e matriz energética.

De acordo com a EPE [2], matriz energética é o conjunto de todos os recursos de oferta de uma nação, destinados a “movimentar os carros, cozinhar comida no fogão e gerar eletricidade”. A matriz elétrica por sua vez, é composta polos recursos de oferta destinados exclusivamente à geração de eletricidade.

As fontes primárias como gás natural, carvão, petróleo e seus derivados são responsáveis pela maioria das emissões de gases de efeito estufa e pelo aquecimento global. Em termos de consumo, essas fontes representam a maior parte da matriz energética mundial [2].

Portanto, há um esforço conjunto no sentido de mitigar essas práticas de emissão de CO₂, promovendo a participação de mais fontes de energia renováveis na rede elétrica,

como hidráulica, solar, eólica, biomassa e hidrogênio verde, esse último considerado um vetor energético [3].

A operação da rede elétrica é constante e pode ser analisada em diferentes cenários de carga: pesada, média e leve. O crescimento da carga exige o aumento da capacidade de geração de energia, o que, por sua vez, demanda o fortalecimento do sistema de transmissão. Por isso, planejar o sistema de transmissão é essencial para a expansão da rede elétrica.

Devido à complexidade do sistema de transmissão, são estabelecidos mecanismos probabilísticos para determinar sua confiabilidade e sua segurança, assegurando a operação contínua e o abastecimento seguro de carga. Dentre esses mecanismos, destaca-se o critério de análise de falhas e confiabilidade chamado N - 1 [4].

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho, é realizar o planejamento eletroenergético da Guiné-Bissau, a partir dos potenciais benefícios do projeto OMVG, integrando a análise do sistema de potência com a análise do sistema energético para a produção de hidrogênio verde, visando à ampliação da carga e à diminuição da dificuldade de acesso à eletricidade por parte da população nas seis ilhas da região de Bolama, na zona insular da Guiné-Bissau.

1.1.2 Objetivos específicos

Pavimentar as bases para expansão da demanda e oferta da energia elétrica a partir do planejamento de expansão de linhas de transmissão da OMVG e definir pontos estratégicos para integração da rede elétrica nacional, permitindo a incorporação das fontes renováveis ao sistema de transmissão. Analisar as características elétricas do sistema de transmissão da OMVG frente à integração energética de uma usina fotovoltaica e um eletrolisador para produção de hidrogênio verde. Analisar o ciclo de conversão P2G2P utilizando célula combustível e transporte de cilindros de hidrogênio para a região insular.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Planejamento eletroenergético estuda o sistema energético de uma nação na sua totalidade, incluindo suas matrizes energética e elétrica, conciliando-as no gerenciamento de oferta e da demanda energética. Ele engloba tanto o sistema energético promovendo o uso racional de energia, quanto o sistema de potência.

Um sistema elétrico de potência (SEP), é a coleção de equipamentos de instalações elétricas cuja função primordial é gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica. Ou seja, um SEP é dividido em três principais sistemas: sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O seu objetivo visa abastecer a carga aos consumidores de forma ininterrupta e confiável atendendo aos padrões estabelecidos por diferentes níveis de tensão.

O sistema de geração é encarregado da conversão da fonte primária de energia para energia secundária (eletricidade). Essa fonte poder ser: hidráulica, eólica, solar, térmica ou biomassa. No caso da hidráulica, a geração geralmente de grandes volumes de energia ocorre de forma centralizada em usinas distantes de centros metropolitanos.

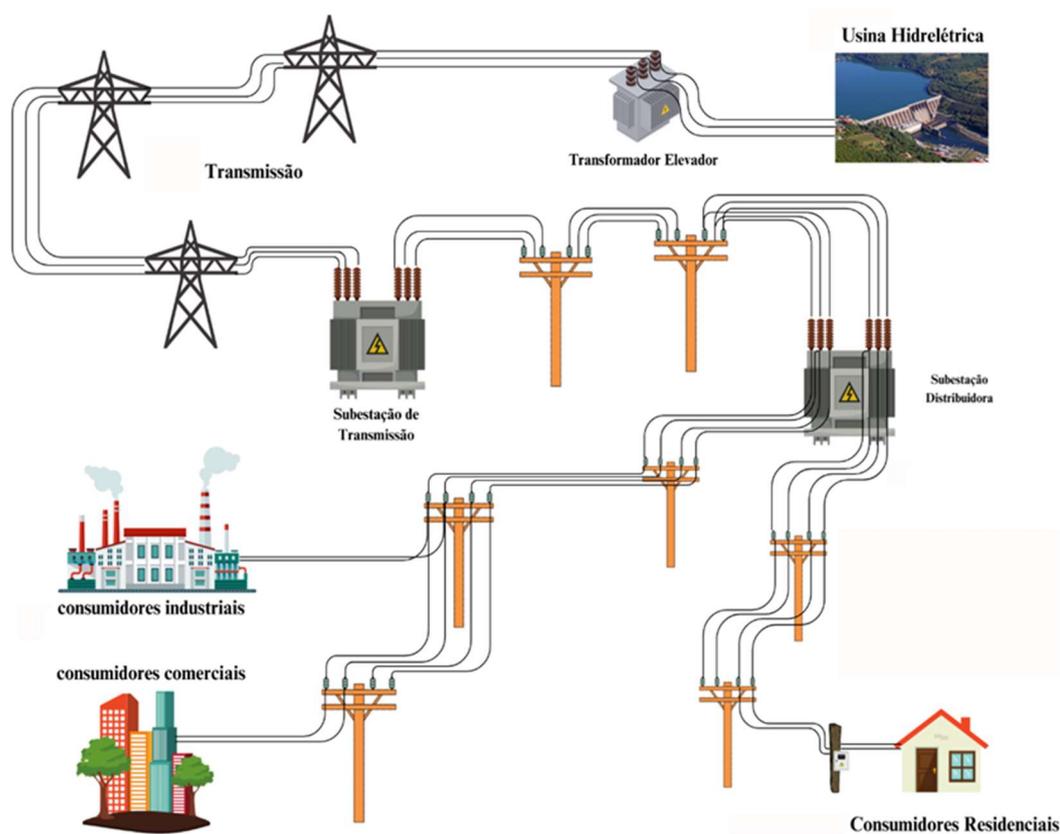


Figura 1: Diagrama Esquemático do Sistema Elétrico de Potência

Fonte: elaboração do autor

Sistemas de transmissão refere-se ao grupo de operadores cuja responsabilidade é trazer a energia produzida nas usinas até centros de consumo (carga), e, isso acontece por meio de linhas de transmissão.

O sistema de distribuição de energia, congrega grupo de subtransmissão e distribuição que atendem consumidores primários (média tensão) e secundários (baixa tensão), conforme o nível de tensão estabelecido pela concessionária de energia elétrica.

Na Figura 1 observa-se um diagrama elétrico simplificado que ilustra uma rede elétrica até aos consumidores finais. Nota-se que o sistema elétrico de potência opera de forma interligada. Por incorporar muitos componentes, ele está susceptível a mudanças, independentemente do período de operação, seja durante a carga pesada, média ou leve.

Portanto, o planejamento do sistema é essencial, devendo-se considerar sua segurança, incluindo estudos contínuos e testes para que ele lide com configurações diversificadas e enfrente os desafios emergentes em casos de perturbações.

O interesse pelo planejamento energético vem mudando de paradigmas nas últimas décadas. O modelo de planejamento que antes se concentrava apenas nas questões de fontes energéticas e econômicas (planejamento tradicional) não é mais o mesmo no contexto atual. Isso ocorre porque surgiram novas configurações de sistemas de redes de energia para o atendimento da demanda, sem ignorar as questões ambientais, que agora têm forte participação das fontes renováveis. Estas últimas, além de suas múltiplas vantagens, contribuem para a redução de efeito estufa.

1.3 JUSTIFICATIVA

A Guiné-Bissau enfrenta grandes desafios em todas as áreas de energia, desde o uso primário até a transformação secundária. Além disso, não há um planejamento energético consistente que ajude o governo nas tomadas de decisões para as políticas energéticas [5].

É evidente que o país possui uma matriz energética e elétrica muito promissora, mas que não é explorada o suficiente para permitir a diversificação. A pouca energia de que dispõe está concentrada principalmente na capital, Bissau, e nos centros das cidades regionais, sendo intermitente, e sujeita a perdas constantes [6].

Como um país com mais de 2 milhões de habitantes e com as condições climáticas favoráveis para a geração de energia, a Guiné-Bissau poderia reduzir o problema de

acesso à eletricidade para toda a população [7]. No entanto, o país é altamente dependente de combustíveis fósseis, aliás, e a geração de energia ocorre principalmente por meio de usinas termelétricas a diesel.

Ainda que esta forma de geração de energia tenha algumas vantagens, é fundamental diversificar e combiná-la com outras formas de energia para contribuir com o mix energético como um todo. É neste contexto que o Planejamento eletroenergético se insere. Ele visa fortalecer o sistema de energia, ampliá-lo por meio de linhas de transmissão e utilizar essa perspectiva para criar novas formas de oferta energética, projetando o sistema elétrico bissau-guineense para horizontes temporais mais longos.

O projeto OMVG pode contribuir para criar essas condições visando o equilíbrio entre a carga e a geração, componentes essenciais para a estabilidade do sistema de geração de uma rede elétrica. Como resultado disso, o país pode conciliar a oferta e a demanda de eletricidade para sua população.

Apesar deste projeto não ser exclusivamente para a Guiné-Bissau, pois aglutina outros países, ele pode fornecer sim, bases para o planejador do sistema energético bissau-guineense explorar os pontos estratégicos, e com isso, realizar um planejamento eletroenergético sólido e adaptado às suas realidades.

Falando do problema de acesso à eletricidade e da geração predominantemente termelétrica a diesel, esta dissertação pretende incorporar elementos do Planejamento Integrado de Recursos Energéticos (PIR), abordando questões ambientais, sociais e econômicas.

Embora, o PIR não seja o foco principal desta dissertação, pois é um tema muito extenso, busca-se, trazer seus elementos para demonstrar a importância de gerenciar os recursos de oferta de forma a atender à demanda sem ignorar certos parâmetros, como a elevada irradiação solar, a existência de sistemas isolados e o desenvolvimento da tecnologia de sistemas de hidrogênio.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em seis capítulos, incluindo este capítulo que aborda a introdução, os objetivos, a contextualização e a justificativa.

O capítulo 2 aborda o referencial teórico que embasa o tema de planejamento energético, planejamento de transmissão, fundamentos de P2G2P, integração do hidrogênio verde com a rede elétrica e, por fim, um histórico da OMVG.

O capítulo 3: trata da metodologia empregada para a realização desta dissertação, abordando procedimentos para a obtenção dos dados das subestações, os cálculos de cargas, as ferramentas utilizadas para a análise de fluxo de potência, a nomenclatura de cada subestação, as variáveis de estados e de controle, os questionários aplicados que estão anexados à dissertação e os procedimentos de coleta de dados de P2G2P.

O capítulo 4: aborda os dois estudos de casos, sendo que, o estudo de caso 1 trata da parte continental da Guiné-Bissau ligado ao OMVG, situação geográfica e caracterização do seu sistema energético. O estudo de caso 2, trata especificamente de P2G2P descrevendo seus componentes relacionados à produção de hidrogênio verde para a região de Bolama.

O capítulo 5: apresenta os resultados e discussões desta dissertação, destacando a análise da rede elétrica, a análise de contingência (estática e dinâmica), os resultados esperados da OMVG para a Guiné-Bissau, bem como os resultados do P2G2P para a região de Bolama.

O capítulo 6: resume as conclusões da dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo traz importantes trabalhos que trazem definições e conceitos que são abordados na dissertação, servindo de embasamentos para a compreensão dos assuntos no tema do planejamento energético, da transmissão e para a aplicação do hidrogênio verde.

2.1 PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

A crise mundial do petróleo na década de 70, juntamente com a crescente dependência desse recurso fóssil e de seus derivados nos mercados domésticos e internacionais para a produção de energia e outras atividades humanas, despertou o interesse mundial na exploração de novas fontes de energia e na necessidade de um planejamento energético abrangente [8],[9],[10].

O planejamento é uma parte importante do setor elétrico pois busca responder e criar mecanismos para integrar a oferta e a demanda através da diversificação de fontes de energia, garantindo a segurança da rede, protegendo o meio ambiente, atendendo às expectativas de crescimento contínuo da população local e global, além da necessidade de expansão da carga [9],[11].

O planejamento energético é multifacetado, abrangendo vários elementos, entre os quais as incertezas. Não funciona com um único recurso de oferta; sua importância reside na visão holística do sistema energético como um todo, considerando o suprimento contínuo de carga e a redução de impactos ambientais e socioeconômicos. A falta de um planejamento realista e adequado pode originar consequências negativas para o consumidor [12].

Salienta-se, que, embora existam questões globais relacionadas ao planejamento energético, como a crise mencionada, ele difere conforme a realidade de cada país, pois, envolve diversos aspectos e situações atípicas.

Foi nesse sentido que Da Silva e Guimarães [13], enfatizaram que, “o planejamento do sistema elétrico de um país requer a gestão eficiente de um portfólio diversificado de fontes de energia. As peculiaridades de cada nação determinam a composição desse portfólio, e não há uma solução padronizada otimizada que atenda a todas as necessidades. O portfólio é único para as condições nacionais específicas”.

O uso do termo ‘Portfólio’ pelos autores refere-se às diversas fontes de energia de uma nação utilizadas para atender as necessidades locais de eletricidade. Em outras palavras, no contexto de planejamento energético, o termo é utilizado para descrever diferentes fontes de energia disponíveis e os recursos naturais existentes.

Além disso, o planejamento energético requer a regulação dessas fontes de energia que integram a rede elétrica, visando o equilíbrio entre geração e carga. A não observância desse portfólio, pode gerar consequências negativas tanto para o consumidor quanto para as concessionárias. Ademais, o planejamento energético deve ser tratado com atenção e sempre ser considerado prioritário quando se fala na expansão do setor elétrico, evitando consequências futuras de crises [14], [15].

Igualmente é uma ferramenta crucial no setor, fornecendo uma visão da política energética e auxiliando o poder público, neste caso o governo, na tomada de decisões que envolvem múltiplos interesses.

É neste contexto que Bajay [15], afirma que, os papéis do planejamento energético são: “possibilitar a elaboração de metas quantitativas realistas para as políticas energéticas do governo e balizar o comportamento do mercado de energia e a atuação de seus agentes, como produtores, transportadores, distribuidores, comercializadores e outros”.

É o poder público que deve assegurar um planejamento energético realista com regras bem definidas, evitando o conflito de interesses que envolve diversos agentes do setor. Isso requer regulamentações claras do mercado de energia, seja no ambiente livre ou regulado, sendo este último, assegurado por leilões, com o intuito de incentivar concorrências e atender de maneira mais abrangente à demanda de sua população.

De forma enfática, Vila [16] argumentou que: “o planejamento energético é essencial para orientar políticas públicas e diretrizes para os setores públicos e privados relacionados à oferta e consumo de energia. Isso, inclui regulamentação governamental para gerenciar a eficiência, a qualidade e os impactos ambientais”.

O planejamento energético contemporâneo não segue mais o paradigma tradicional centrado na oferta e nos recursos econômicos. Em vez disso, está fundamentado nas seguintes premissas: considerações ambientais (sustentabilidade), que significa a necessidade de gerar energia e consumi-la sem causar danos ao meio ambiente.

Demandas sociais, que significa que: o atendimento das necessidades energéticas da sociedade é imperativo. Neste sentido, a estatística populacional desempenha um papel crucial na projeção da demanda energética.

Outras premissas, são as questões econômicas, que assumem uma relevância incontestável, especialmente, quando considerarmos a vasta diversidade na distribuição de renda da população. Nesse contexto, cabe ao Estado a responsabilidade de implementar mecanismos que atenuem os impactos decorrentes dessa disparidade, assegurando um acesso equitativo à energia elétrica [10].

Essas premissas mencionadas fazem partes do chamado Planejamento Integrado de Recursos Energéticos (PIR) que, segundo Jannuzzi et al e Udaeta et al [10],[17] “ é uma abordagem voltada para possibilitar que o planejamento energético atenda aos interesses dos atores envolvidos e às necessidades da sociedade com um todo, combinando os recursos da oferta e da demanda sem esquecer aspectos ambientais”.

2.2 PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO

O planejamento do sistema de transmissão, começa com projeções de cenários de crescimentos da demanda e a necessidade de suprimento de carga aos consumidores, por meio da ampliação da rede elétrica através de recursos de oferta e seu fortalecimento [18].

O objetivo do sistema de transmissão é transportar grandes blocos de potência geradas em locais distantes até os centros de cargas, observando requisitos de confiabilidade operacional e fornecendo os serviços previamente contratados. Portanto, deve ser planejado de forma cuidadosa para atender à demanda crescente ao longo do tempo, sempre considerando os limites operacionais e financeiros [19].

O período anterior e a própria década 70, marcaram uma mudança no setor energético em relação ao planejamento. O planejamento de transmissão que se baseava na hidrologia era bem simples, e os planejadores não enfrentavam tantas dificuldades [20]. Hoje, mais do que nunca, há uma mudança significativa no planejamento de transmissão, devido à participação das novas fontes de energia, designadas como “renováveis”. Vale salientar que a energia hidráulica também é renovável, porém, não se enquadra nesse grupo como a solar, eólica e biomassa. Essas fontes são intermitentes, demandam elevado fluxo de potência nas linhas de transmissão e trazem maior complexidade para a operação do sistema [20].

O SEP é uma rede complexa que inclui vários elementos como: geradores, cargas, transformadores, barramentos, disjuntores, para-raios, relés, entre outros elementos. O planejamento, a operação e o controle dessa rede enfrentam vários desafios. O sistema de transmissão é um componente do SEP, desempenha um papel importante no que concerne à carga, todavia, não é isento dessa complexidade [21].

Dito isso, os planejadores e operadores do sistema de transmissão enfrentam uma tarefa mais complexa, lidar com novos formatos na topologia da rede elétrica provenientes de fontes renováveis sem comprometer a carga. Dada essa complexidade, existem, alguns métodos e ferramentas computacionais que auxiliam na projeção e na implantação do sistema de transmissão, tornando-o mais robusto e flexível [20].

É o caso do método do Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC), que, por exemplo, inicia-se com um caso existente e projeta a demanda futura usando um indicador de desempenho ou sensibilidade. Um exemplo disso é que, para realizar a expansão do sistema, os circuitos candidatos para a topologia da rede são adicionados de forma sequencial [22].

Gallego e Romero [23] aplicaram o modelo DC associado ao algoritmo genético (AG) para analisar o problema de planejamento multiestágio e coordenado com vista à expansão do sistema de transmissão.

Outros modelos aplicados são baseados em riscos e investimentos considerando múltiplos cenários futuros. Esses modelos visam resolver o problema de expansão do sistema de transmissão. Como resultado, facilitam ao planejador apontar o financiamento necessário para as linhas de transmissão dentro de um nível de risco permitido. Caso contrário, eles informam o risco associado a um determinado financiamento[24].

Por fim, algumas técnicas que desenvolvem métodos e soluções baseados em recursos computacionais para a integração da rede elétrica, realizando análise em regime permanente e avaliando a estabilidade transitória e dinâmica, como fazem os programas de simulação Anarede e Anatem, respectivamente [25],[26].

O planejamento do sistema de transmissão que considera a necessidade de aumentar o atendimento da demanda da sociedade por meio de malhas de transmissão e cenários de crescimento de consumo causados por questões econômicas, incerteza e crescimento da população, é conhecido como planejamento de expansão de transmissão cujo objetivo é encontrar o plano de expansão ideal do sistema elétrico [27].

De acordo com os horizontes temporais, o planejamento de expansão de transmissão pode ser de: curto, médio ou longo prazos. Os planos ou os estudos de curto prazo são determinantes e fundamentais, pois indicam as obras importantes a serem realizadas de maneira inadiáveis, criando condições para o atendimento do mercado. O seu horizonte temporal é de 5 anos [28].

Planejamento de expansão de médio prazo, analisa alguns elementos associados ao sistema de transmissão, como a análise dos empreendimentos a serem alocados, condições do suprimento do mercado consumidor, os cálculos de custos marginais, os prazos para implementação dos empreendimentos de transmissão e a capacidade financeira. Ele abrange um horizonte de 10 anos, porém, a periodicidade é anual, considerado um plano indicativo de expansão do setor elétrico [29].

O Planejamento de Expansão da Transmissão de longo prazo (PET), adota uma abordagem holística sobre o sistema energético. De acordo com Hemmati et al [30], “define, onde, quando e quantas novas linhas e subestações devem ser instaladas na rede elétrica para garantir o nível adequado de fornecimento de energia aos clientes”.

O PET reúne uma variedade de parâmetros interconectados, como crescimento da demanda energética que é influenciado por melhorias nas condições econômicas, tendências ou mudanças no mercado, questões ambientais, e, por fim, as incertezas futuras que podem ser internas e externas [20], [30].

A título do exemplo das incertezas, a disponibilidade de novos equipamentos para empreendimentos de transmissão é considerada uma incerteza interna, enquanto a questão da disponibilidade de recursos de oferta é considerada uma incerteza externa.

A Guiné-Bissau precisa muito de um plano de expansão de transmissão para interconectar e ampliar sua rede, de modo a atender à demanda de sua população, pois apenas 20% da população tem acesso à energia elétrica. No entanto, isso requer por um esforço enorme na criação de condições para os empreendimentos de transmissão.

O planejamento de expansão de transmissão é tão complexo que precisa ser exercida de forma coordenada, para tornar o sistema robusto o suficiente e evitar futuras limitações de capacidade física da rede elétrica e econômica do setor. Aliás, um exemplo de modelo de PET já implementado, é a realidade brasileira, que pode servir de referência para Guiné-Bissau.

Três entidades do setor elétrico brasileiro trabalham nos temas de pesquisa, operação e regulação, coordenando os estudos de planejamento, sendo: a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), na área de estudos e propostas para a previsão de cargas e necessidades de empreendimentos de transmissão.

O ONS (Operador Nacional do Sistema) por meio do plano de Ampliações e Reforços (PAR), composto pelos agentes transmissores, geradores, distribuidores e consumidores livres. Os estudos realizados pela EPE indicam necessidade de implementação de novas linhas de transmissão, subestações, instalação ou reforma dos equipamentos, seguindo os procedimentos de rede do ONS.

O MME (Ministério de Minas e Energia), através da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), outorga as empresas por meio de leilões, a responsabilidade pela execução das obras [31].

Com essa operação coordenada entre essas entidades é possível garantir a efetividade e disponibilidade de oferta de energia a carga, como também se assegura critérios de segurança e confiabilidade da própria rede.

2.3 POWER-TO-GAS-TO-POWER (P2G2P)

A transição energética está baseada na busca por suprimento de fontes limpas e na redução de emissões de gases de efeito estufa. Hidrogênio verde produzido a partir dessas fontes é um potencial candidato para a descarbonização da economia global, inclusive nos cumprimentos das metas internacionais firmadas pelo Acordo de Paris, que prevê a limitação da elevação da temperatura média global em 1,5°C [32],[33].

O Hidrogênio é um elemento químico muito abundante na natureza. Em termos energéticos, é uma fonte secundária produzida a partir de fontes limpas, que justifica o tema “hidrogênio verde”. Dada sua importância no combate às mudanças climáticas tem atraído a atenção de muitos países [34].

No que concerne à demanda por eletricidade, aumentar a produção de hidrogênio é uma condição necessária para equilibrar e diversificar o setor elétrico atendendo à necessidade de suprimento de carga em função do aumento progressivo da população [35].

Não obstante, os estudos indicam que o uso em larga escala do hidrogênio e seus derivados como fonte de energia ainda é incipiente. No entanto, preveem que, até 2050,

o hidrogênio verde baseado na eletrólise (aquosa) deverá atingir quantidades significativas, desenvolvendo eletrolisadores com capacidade de produção de até 5 TW. A expectativa é que o aumento passe de zero em 2021 para uma faixa de 22 a 327 milhões de toneladas. Essa meta ambiciosa depende em larga escala de decisões políticas sobre descarbonização e transição energética [36].

Por outro lado, a IRENA [37], ao realçar o papel de hidrogênio, afirma que, “ele e seus derivados representarão cerca de 12% de consumo energético até final de 2050, e que serão úteis na descarbonização de setores que demandam mais energia como o aço, produtos químicos, fretes, transportes pesados e aviação”. Da mesma forma, enfatiza que, o hidrogênio será um meio importantíssimo para o armazenamento de fontes intermitentes (renováveis) por um longo período equilibrando assim a demanda energética.

O fato é que essas perspectivas convergentes demonstram o quão importante é o hidrogênio no contexto atual da transição energética e na busca por fontes de suprimentos limpas. Ele é entendido como um vetor energético porque depende de outras fontes de energia como solar e eólica para ser produzido, e é insumo industrial para outras aplicações, por exemplo, na síntese de amônia [3],[38].

A título de exemplos de aplicações como insumo industrial e energético: hidrogênio é utilizado na indústria de refino de petróleo para diminuir a cadeia bruta de carbono de petróleo, assim como na redução do teor de enxofre no óleo diesel [39]. Também é aplicado no processo “Power-to-liquid” para síntese de ácido fórmico e amônia (NH_3) a partir de gás de síntese de combustão [40],[41]. Além disso, é utilizado em veículos elétricos por meio de células a combustível [42].

Ele também é aplicado em turbinas a gás, com opções como motores de combustão interna de hidrogênio e células combustível de ácido fosfórico alimentadas por hidrogênio [43]. Outro uso, é como meio de armazenamento de energia combinando eletrólise e células a combustível para converter a eletricidade na rede elétrica [44].

Esses exemplos ilustram, que o hidrogênio segue vários caminhos e oferece muitas opções. Neste estudo, pretende-se abordar a última opção dentre as diferentes aplicações de hidrogênio verde, ou seja, o hidrogênio como meio de armazenamento de energias renováveis, utilizando o processo de conversão e reconversão eletroquímica para produção e consumo do hidrogênio no ciclo “P2G2P”.

Para realçar o conceito P2G2P, Katla et al [45], afirmam que “a integração de sistemas de geração de hidrogênio com sistemas de geração de eletricidade pode ser considerada adicionalmente, o que leva a criação de Power-to-H₂-to-Power”.

Além disso, a energia excedente gerada pelas usinas eólicas e solares fotovoltaicas on grid pode ser usada para produzir hidrogênio, que é armazenado em tanques, para ser utilizado na produção de eletricidade[46].

Segundo Boretti [44], “o armazenamento de hidrogênio (HES) é o método mais econômico para armazenar energia de sistemas de geração por um longo período de tempo”.

Devido às intermitências das fontes solares e eólicas, esse sistema é essencial para o seu armazenamento. Mas, reconhece-se que adquirir seus componentes é difícil, pois são caros no mercado devido à falta de oferta. Esse sistema de armazenamento, projetado para produzir hidrogênio e injetá-lo na rede, consiste em um eletrolisador, um tanque de armazenamento de hidrogênio e uma pilha de células a combustível a hidrogênio.

Ao longo dos últimos anos, as células a combustível e os eletrolisadores se tornaram mais eficientes e estabilizados. No entanto, eles ainda precisam de melhorias contínuas em termos de eficiência, custos e durabilidade [44].

Segundo Boretti [44], “as três principais tecnologias de eletrolisadores disponíveis são: a tecnologia alcalina, que é mais barata, porém menos eficiente; a da PEM que é mais cara, mas, mais eficiente; a tecnologia de óxido sólido, que pode ser mais eficiente, porém também é cara”.

De fato, este será um dos desafios para os fabricantes desses componentes: trabalhar para aumentar a oferta num preço competitivo, permitindo assim uma aquisição mais acessível. Isso é especialmente importante, pois é notória e incontestável a importância do hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, no contexto de mitigação de gases de efeito estufa e da transição energética.

Schmeling et al [47], ao realçar o mercado de energia alemão, afirmaram que o P2G2P é uma tecnologia muito promissora para o armazenamento de energias renováveis, em comparação com a forma tradicional baseada em baterias, que armazenam energia por um curtíssimo prazo. O objetivo deles foi avaliar as vantagens econômicas e ecológicas que essa tecnologia pode trazer no mercado e às emissões de CO₂.

Um estudo realizado para demonstrar a viabilidade do P2G2P em comparação com a forma tradicional de armazenamento e suas implicações nas emissões de CO₂, foi salientado em Cruz-Soto et al. [48]. O estudo mostra que usar hidrogênio em células a combustível para gerar eletricidade e atender a comunidade local, substituindo geradores a diesel, pode reduzir as emissões de CO₂ em 27%. No entanto, é vital que os custos das células a combustível caiam 50% para que o hidrogênio se torne ainda mais competitivo.

O fato é que essa tecnologia é considerada um meio potencial de armazenamento de energia, e muitos estudos sobre diferentes aplicações de hidrogênio são dedicados a ela [38]. Certamente, o P2G2P se tornará uma opção mais competitiva para backup de energia renováveis, uma vez que as baterias, devido à sua limitação de armazenar energia por um curto prazo, não apresentam essa viabilidade, e os geradores a diesel, devido às emissões de CO₂, não podem ser opções sustentáveis a longo prazo.

2.4 INTEGRAÇÃO DE HIDROGÊNIO COM A REDE ELÉTRICA

Na análise do planejamento eletroenergético da Guiné-Bissau que abrange o sistema energético e elétrico, partiu-se de várias premissas, começando pelo sistema OMVG, que é o sistema elétrico (de potência), destacando dois aspectos, geração e transmissão, com intuito de obter as condições necessárias para o estudo do sistema energético, que trata da produção do hidrogênio verde.

Embora, na configuração do estudo de sistema de energia, o energético venha antes do elétrico, nesse trabalho, a ordem foi invertida, pois o sistema energético depende do estudo do sistema elétrico de potência, especialmente do planejamento de transmissão, para ser materializado.

Após a integração da rede elétrica da OMVG, será analisado o potencial benefício esperado para a Guiné-Bissau. A segunda premissa considera elementos como os recursos de oferta (fontes energéticas) e o gerenciamento da demanda. Na análise do P2G2P, o objetivo é levar hidrogênio verde, que será produzido a partir de fontes renováveis, para a região de Bolama, utilizando a rede OMVG como base.

Esta análise multifacetada apresentada nesta dissertação é um trabalho seminal para a Guiné-Bissau, realizado no âmbito do “planejamento eletroenergético”. A conciliação entre o sistema elétrico proposto e o sistema energético, onde será produzido

hidrogênio verde, permitirá levar essa energia até a rede isolada de Bolama para o abastecimento da população local.

Portanto, esse trabalho demonstra que é possível conciliar esta análise diversificada, alcançando um único objetivo: atender à demanda elétrica da população da Guiné-Bissau.

2.5 ORGANIZAÇÃO PARA VALORIZAÇÃO DO RIO GÂMBIA – OMVG

2.5.1 Contexto histórico

A função principal de um sistema elétrico de potência é prover a demanda de eletricidade aos consumidores, sejam eles grandes ou pequenos portes, sempre nos padrões de qualidades almejados. A sua operação é sequencial e se destaca em: ativos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A OMVG faz o papel de geração e transmissão de energia elétrica para os quatro países integrantes.

É uma organização sub-regional fundada no ano de 1964. No início integrava apenas dois países, Gâmbia e Senegal. No ano de 1976 foi criada a primeira comissão de coordenação para o aproveitamento do rio Gâmbia. Já no ano de 1978 no Senegal mais concretamente na região de Kaolack a organização recebeu o nome de “OMVG”. No ano de 1981 a République de Guinée integrou a organização e finalmente no ano de 1983 a Guiné-Bissau por sua vez ingressou na organização [49], [50].

OMVG foi fundada com caráter de exploração conjunta das bacias hidrográficas do rio Gâmbia que tem sua nascente na République de Guinée. Esse rio partilha a água com rios Kayanga e Geba que ficam na République de Guinée e Kayanga, que por sua vez partilha água do rio Koliba (Corubal) na Guiné-Bissau. Afluência desse rio ocorre na República de Gâmbia que por sua vez partilha a água com o rio Sambangalou na região de Kédougou no Senegal, e assim se completa o ciclo de interligação hidrográfica das bacias da OMVG [49], [51].

A OMVG tem como principal objetivo facilitar o intercâmbio de comércio da energia e melhorar a qualidade do fornecimento de eletricidade nos países membros, suprindo-os com energia limpa a um custo competitivo, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico regional.

Depois da integração das bacias hidrográficas, os quatro países decidiram reservar as usinas de Kaléta e de Sambangalou, que ficam na République de Guinée e no Senegal, respectivamente, como partes exclusivas do projeto, ou seja, a OMVG é responsável por gerenciar esses dois empreendimentos hidrelétricos [51].

Na Figura 2 são ilustradas as bacias hidrográficas e o mapa da integração dos quatro países. Na Figura 3 e na Figura 4 observam-se as imagens das duas usinas hidrelétricas e a Figura 5, podem ser observadas as estruturas completas da OMVG.

Na Tabela 1, estão resumidos os dados das usinas, de modo que somando-se as potências individuais, os dois empreendimentos terão capacidade de fornecer 368 MW. O projeto já finalizou em partes, isto é, a parte da construção das usinas, ficando apenas a parte do sistema de transmissão a ser implementado.



Figura 2: Integração das bacias hidrográficas aos quatro países da OMVG

Fonte: Nassambis [52]



Figura 3: Interface da usina hidrelétrica de Sambangalou

Fonte: Ecowapp [50].



Figura 4: Usina hidrelétrica de Kaléta

Fonte: Ecowapp [50].

Tabela 1: Dados das usinas

Parâmetros	Usina Kaléta	Usina Sambangalou	OMVG
Potência instalada	240 MW	128 MW	368 MW
Área do reservatório	91 km ²	181 km ²	272 km ²
Energia estimada	946 GWh/ano	402 GWh/ano	1.348 GWh/ano
Volume	1,3 bilhões m ³	3,8 bilhões m ³	5,1 bilhões m ³
Largura	40 m	-	-
Profundidade	700 m	-	-

Fonte: OMVG Energy Project [51].

A falta de informações sobre a largura e profundidade do reservatório da usina de Sambangalou, é a causa do não preenchimento desses espaços.

Como uma organização sub-regional que envolve quatro países de culturas, circunstâncias políticas e econômicas distintas. Necessita se estruturar como forma de alinhar suas ações para melhor aproveitamento dos recursos em benefício da população dos quatro países membros.

No fluxograma apresentado na Figura 5, o alto comissário é o órgão executivo dos programas relativos a OMVG, entretanto, cada um dos setores tem sua própria missão. A conferência dos chefes de Estados e dos Governos é o órgão deliberativo das políticas da organização, e o alto comissariado como executor. A sede desta organização fica na República do Senegal.

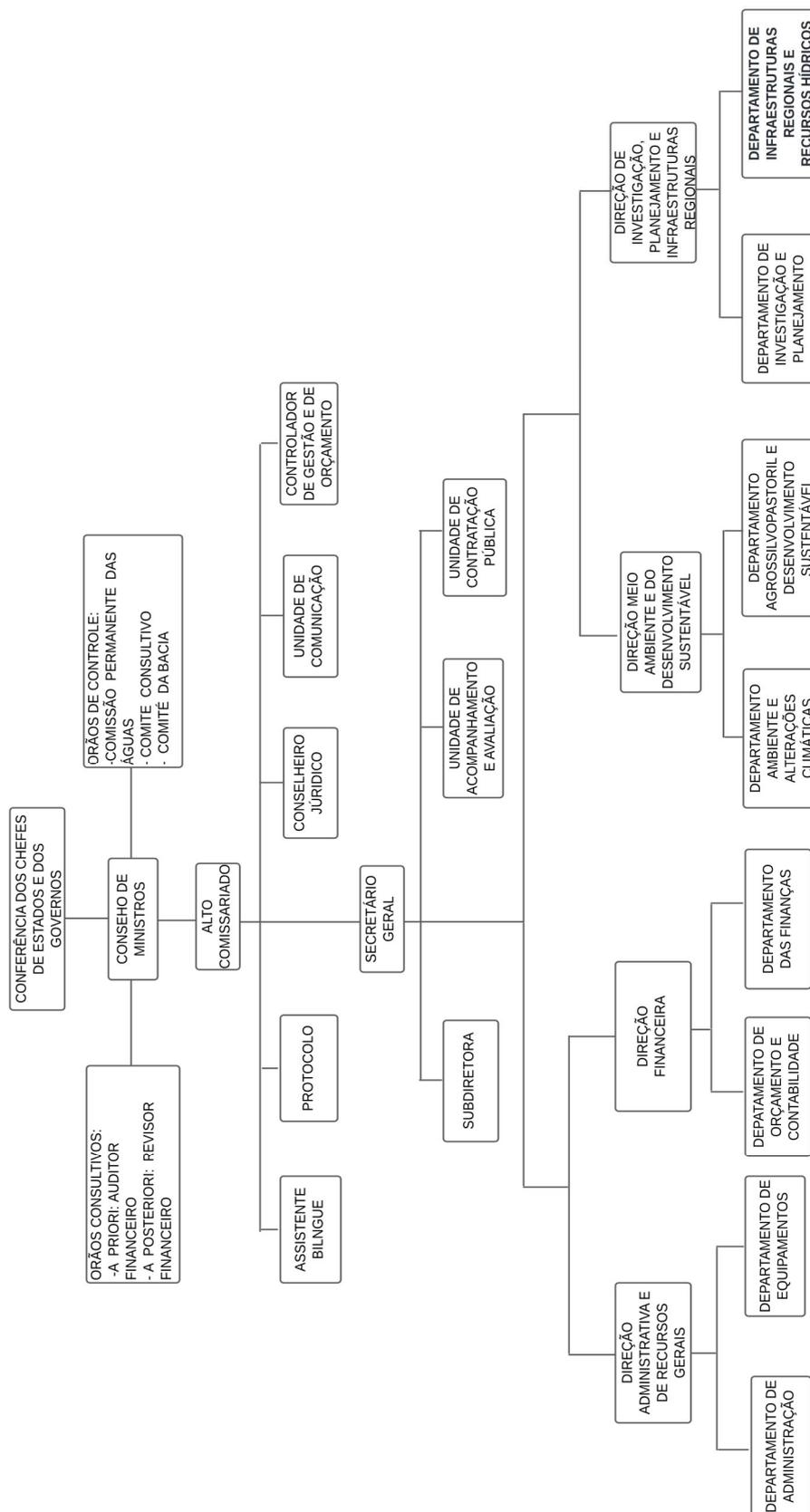


Figura 5: Organograma da OMVG

Fonte: elaboração do autor adaptado da OMVG [49]

A OMVG tem anuência de cada um dos Estados membros para atuar na jurisdição reservada a si, entretanto, ainda que seja assim, sempre procura respeitar as leis de cada país ao agir. Exemplo típico dessa atuação diz respeito sobre os estudos de viabilidade realizados com vistas à verificação das condições adequadas para a construção das duas usinas situadas no Senegal (Sambangalou) e na République de Guinée (Kaléta).

Para ilustrar, outro exemplo da observância de legislação dos países membros será apresentado. É do conhecimento que a castanha de caju é uma *commoditie* predominante na África ocidental, especialmente no bloco da CEDEAO (Comunidade Econômica dos Estados da África Ocidental). Em muitas propriedades rurais, os proprietários cultivam cajueiros, e a OMVG, ao agir em função de sua missão, observa a lei de propriedade privada de cada Estado.

Na Guiné-Bissau, o quadro jurídico que define a propriedade privada, é a lei da terra n°5/99 de 23 de abril de 1998. No Senegal é definida pelo artigo 15°, assim como da lei fundiária n°64-46 de 17 de junho de 1964. Na Gâmbia a lei que rege a propriedade, datada de 1996 e revisada em 2001 atua em consonância com a lei das terras do Estado de 1990. Na République de Guinée, o código de terras privadas e estatais define as regras fundiárias das propriedades privadas e públicas [51].

Atualmente, este método está sendo observado para construir as linhas de transmissão que passarão por cada nação, pois o espaço por onde passam essas linhas de transmissão são propriedades privadas. A OMVG prevê quinze subestações e duas usinas para a construção de linhas de transmissão em todos os Estados membros.

As linhas de transmissão são compostas por lotes ou postos de transformação, e cada um desses postos pertence a um determinado país membro, formando assim o SIR (Sistema Interligado Regional). A figura 6 mostra as subestações de transmissão da OMVG e os países a que cada uma pertence.

Para deixar mais explícito o contido no mapa, as subestações de cada país são apresentadas na Tabela 2.



Figura 6: Interfaces das quinze subestações e duas usinas da OMVG

Fonte: OMVG Energy Project [53]

Tabela 2: Subestações de transmissão dos países membros da OMVG

Gâmbia	Subestações	Brikama
		Soma
Guiné-Bissau	Subestações	Bambadinca
		Bissau
		Mansoa
		Saltinho
République de Guinée	Subestações	Boké
		Kaléta
		Labé
		Linsan
		Mali
Senegal	Subestações	Kaolack
		Sambangalou
		Tambaounda
		Tanaf

Fonte: elaboração do autor

O comprimento total das linhas de transmissão que a Organização para Valoração do Rio Gâmbia deve administrar no Sistema Interligado Regional (SIR) é 1680,88 km. Essas linhas são divididas em vários lotes para construção nos quatro países, a maioria das quais será construída pelas empresas Vinci-Cegelec e Kec.

Benefícios esperados do projeto OMVG para os quatro países.

- Exploração das bacias hidrográficas do rio Gâmbia, Kayanga/Geba e Corubal para a produção de eletricidade em prol dos quatro países membros.
- A partir das duas usinas hidrelétricas, criam-se condições para a construção de linhas de transmissão integrando o SIR ao mercado de energia.
- Sendo uma energia proveniente de fonte renovável, a construção do sistema de transmissão impulsionará a integração de outras fontes renováveis, contribuindo para o fortalecimento do ciclo de transição energética.
- O projeto reduzirá o uso em excesso do diesel para a geração de energia através de termelétricas, e conseqüentemente a redução das emissões de CO₂.
- Com esses dois empreendimentos de grande envergadura e com lote de 1680,88 km do sistema de transmissão, benefício resultante disso, será a criação do emprego regional para os quatro países.
- É esperado o relançamento ao mais alto nível da economia dos quatro países, pois a energia elétrica é um agente importante no contexto do desenvolvimento econômico de qualquer país.
- Com o projeto, espera-se melhorar cada vez mais os Índices de Desenvolvimento Humano (IDH) e o bem-estar da população local, pois, o consumo de energia elétrica tem relação com o desenvolvimento econômico. Os IDH dos quatro países de acordo com o relatório de PNUD [54], são respectivamente: 0,511 para o Senegal, 0,500 para a Gâmbia, 0,483 para a Guiné-Bissau e 0,465 para a République de Guinée.
- Com a OMVG em funcionamento, espera-se atender às recomendações e metas da política energética estabelecidas pelo ECREE (Centro de Pesquisa para Energias Renováveis e Eficiência Energética da CEDEAO), cujo papel é auxiliar países membros em suas políticas energéticas relacionadas às fontes de energia renovável e à eficiência energética.

A Figura 7 apresenta o sistema interligado de energia da OMVG para quatro países.

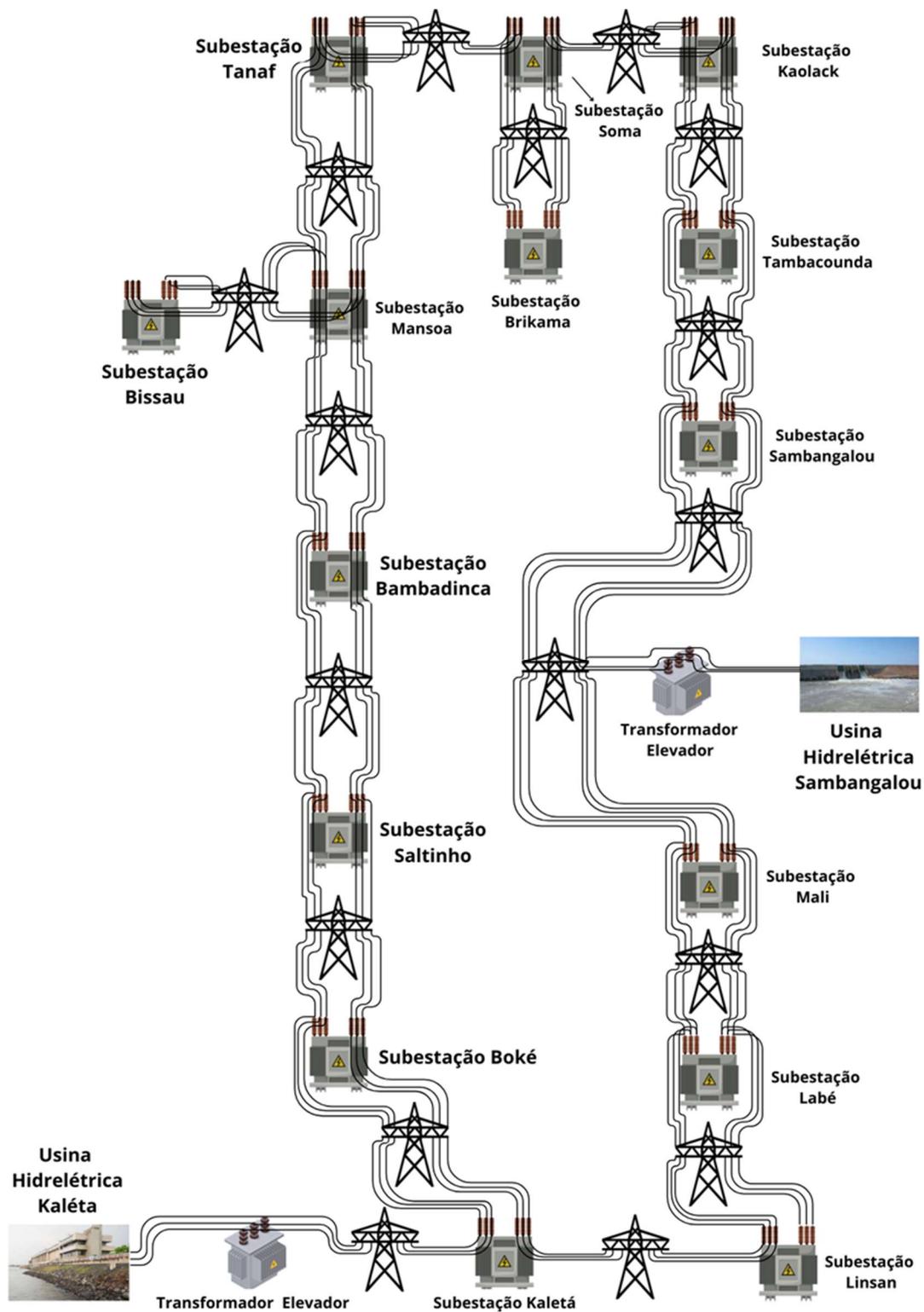


Figura 7: Sistema de geração e transmissão da OMVG nos quatro países

Fonte: elaboração do autor

3 METODOLOGIA

Toda a metodologia que sustenta esta dissertação é apresentada neste capítulo. A pesquisa empregada foi quali-quantitativa, pois não apenas trabalhou com dados, mas também buscou compreender os conceitos discutidos por meio da literatura. Assim, antes de entrar em detalhes, o fluxograma da Figura 8 mostra o esquema da metodologia e como cada fase foi executada.

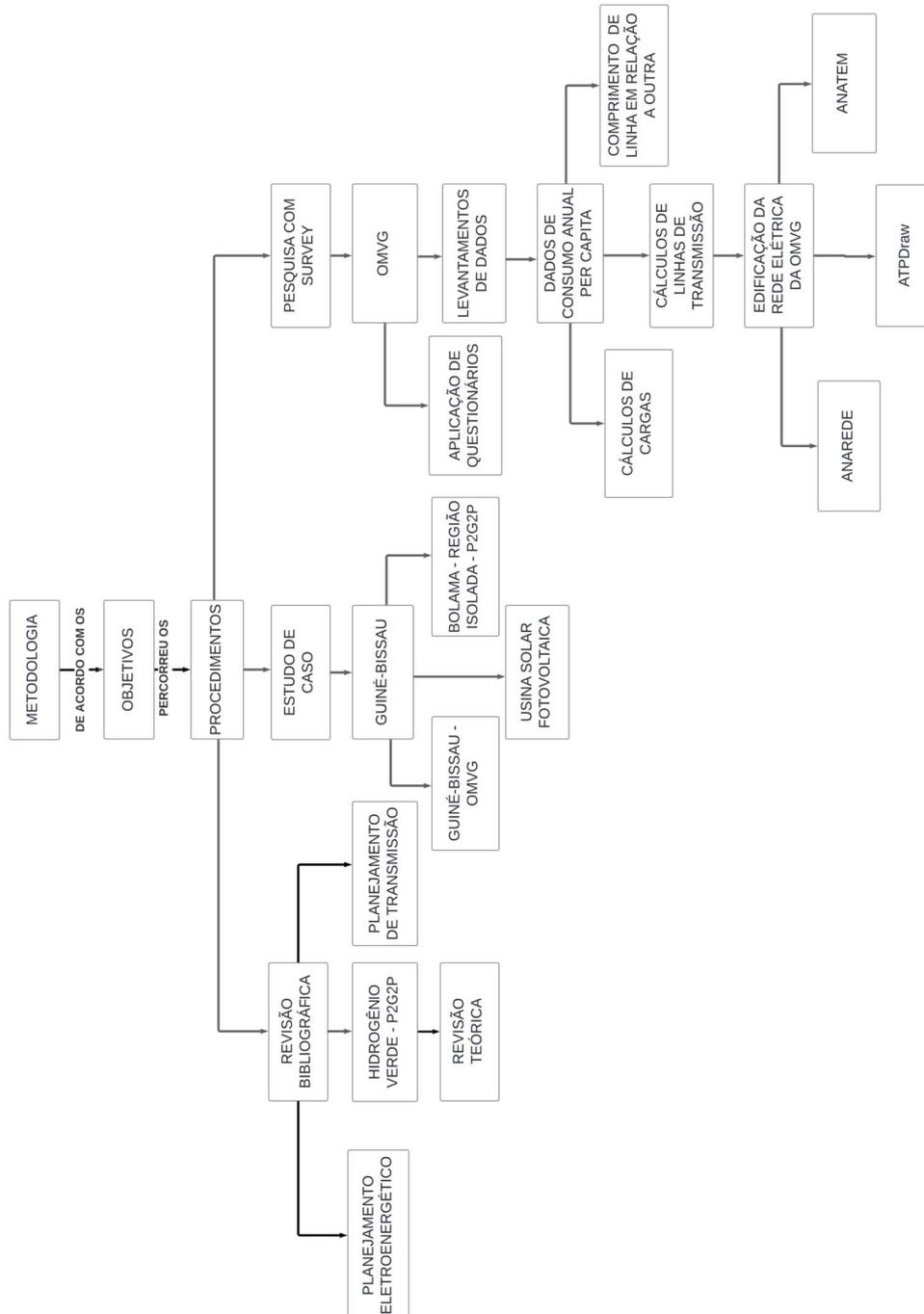


Figura 8: Estudo da arte da metodologia adotada

Fonte: elaboração do autor

Como demonstrado no fluxograma, através dos objetivos definidos, procurou-se entender o assunto do planejamento energético, escolhendo-se matérias como: dissertações, teses e artigos que embasam o tema. O mesmo princípio foi empregado no planejamento de transmissão de energia elétrica.

Por último, o hidrogênio verde, especificamente o ciclo P2G2P, foi estudado por meio de artigos, pois, dada a novidade no mercado, a melhor forma de compreendê-lo foi por meio de levantamento de pesquisas em trabalhos acadêmicos.

A segunda técnica utilizada nessas etapas foi a coleta de dados e informações sobre a OMVG. Isso ocorreu devido à dificuldade de obter algumas informações diretamente por meios eletrônicos sobre a Guiné-Bissau e OMVG. Tal fato, levou à necessidade de aplicar alguns questionários para melhorar a compreensão dos dois temas. Os questionários foram aplicados aos profissionais do MEIRN da Guiné-Bissau e podem ser consultados no anexo desta dissertação.

Certamente, nem todas essas perguntas tiveram respostas; algumas foram respondidas, enquanto outras não. O estudo de caso ‘Guiné-Bissau’ constitui a terceira etapa que encerra a metodologia. Essa etapa foi dividida em dois casos: o primeiro envolve a parte continental da Guiné-Bissau, iniciando com a implementação do sistema OMVG em suas quatro subestações. O segundo também se refere à Guiné-Bissau, mas abrange sua zona insular, especificamente a região de Bolama.

3.1 DEMOGRAFIA DAS CIDADES DAS SUBESTAÇÕES DA OMVG

Para estimar a necessidade energética da Guiné-Bissau foram desenvolvidos modelos a partir dos dados demográficos. A Tabela 3, apresenta dados da população das quatro cidades das subestações da Guiné-Bissau.

Tabela 3: Dados populacionais das cidades de subestações da Guiné-Bissau

Subestações	habitantes
Bambadinca	32.255
Bissau	1.449.230
Mansoa	47.000
Saltinho	19.336

Fonte: INE [55].

A seguir, os dados populacionais de locais das subestações de Gâmbia são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Dados populacionais das cidades de subestações de Gâmbia

Subestações	habitantes
Brikama	699.704
Soma	11.100

Fonte: GBos [56]

Na Tabela 5, são apresentados dados populacionais da République de Guinée para suas cinco cidades por onde passam cada subestação.

Tabela 5: Dados populacionais das cidades de subestações de République de Guinée

Subestações	habitantes
Boké	61.449
Kaléta	1000
Labé	99.717
Linsan	10.369
Mali	240.000

Fonte: INS [57]

Finalmente, a Tabela 6, apresenta os dados populacionais das quatro subestações do Senegal.

Tabela 6: Dados populacionais das cidades de subestações do Senegal

Subestações	habitantes
Kaolack	795.906
Sambangalou	925
Tambacounda	651.018
Tanaf	2829

Fonte: ANSD [58]

Com os dados demográficos das localidades das 15 subestações, aplicam-se as informações referentes aos dados de consumos per capita dos quatro países, como mostrado na Tabela 7, para se determinar o consumo anual dessas regiões e cidades.

Para que sejam realizadas simulações elétricas para entender o comportamento das linhas de transmissão do OMVG envolvendo o atendimento dessas regiões, foram determinados três perfis de carga para essas subestações. Foi adotado um fator de potência de 0,92 (referência ao valor vigente no Brasil) para a padronização de cálculos de cargas.

Tabela 7: Dados de consumo anual per capita dos países membros da OMVG

Países	Consumo per capita [kWh/ano.hab]
Gâmbia	931
Guiné-Bissau	677
République de Guinée	1.282
Senegal	2.505

Fonte: Ritchie et al [59]

As cargas foram divididas em: pesada, média e leve, e estão apresentadas na Tabela 8 na forma da potência aparente. No entanto, devido a implementação do sistema teste da OMVG no Anarede, também são necessários dados das cargas reativas.

Considera-se que o fator de potência indique a qualidade e a eficiência do uso de energia elétrica. Adotando o fator de potência de referência do Brasil, os cálculos das potências reativas estão demonstrados no anexo para eventuais consultas.

Tabela 8: Carga pesada, média e leve em MVA.

Subestações	Carga pesada MVA	Carga média MVA	Carga leve MVA
Bambadinca	2,1656	1,6242	1,3535
Bissau	32,4637	24,3478	20,2899
Mansoa	3,1585	2,3689	1,9741
Saltinho	1,2994	0,9745	0,8121
Brikama	64,664	48,498	40,415
Soma	1,0258	0,7694	0,64115
Boké	7,8197	5,8648	4,8874
Kaléta	0,1272	0,0954	0,0795
Labé	12,6897	9,5173	7,9311
Linsan	1,3195	0,9896	0,8247
Mali	30,542	22,9065	19,0888
Kaolack	65,97	49,4775	41,2313
Tambacounda	53,9606	40,4705	33,7254
Sambangalou	0,2304	0,1728	0,144
Tanaf	0,7034	0,5275	0,4396
Carga total	278,1395	208,6047	173,8376

Fonte: elaboração própria

Nos cálculos realizados para os três patamares de carga, utilizados para verificar a estabilidade do sistema em função da variação de consumo em diferentes períodos do

dia, foi aplicado o seguinte procedimento: para o patamar da carga pesada, utilizou-se um fator multiplicativo de 80% da carga total calculada, 60% para a média, e 50% para a carga leve. Esse procedimento deixou o sistema mais estável, uma vez que a carga total calculada estava quase igual à capacidade total de geração das duas usinas.

3.2 COMPRIMENTOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DA OMVG

Esta etapa consiste na aquisição das informações concernentes a distância em quilômetros de uma subestação em relação a outra. A reunião destas informações, permitiu o cálculo dos parâmetros de linhas e conseqüentemente a edificação do sistema em formato de rede elétrica interligada. A Tabela 9 apresenta os comprimentos das linhas entre as subestações.

Tabela 9: Comprimentos de linhas de transmissão da OMVG.

Linhas	Comprimentos [km]
Kaléta - Boké	128,84
Boké - Saltinho	98,04
Saltinho - Bambadinca	55,20
Bambadinca - Mansoa	53,79
Mansoa - Bissau	35,23
Mansoa - Tanaf	72,75
Tanaf - Soma	91,68
Soma - Brikama	143,03
Brikama - Kaolack	116,85
Kaolack - Tambacounda	257,88
Tambacounda - Sambangalou	244,09
Sambangalou - Mali	59,54
Mali - Labé	88,61
Labé - Linsan	119,97
Linsan - Kaléta	115,38

Fonte: elaboração do autor, adaptado de OMVG [53]

Após a definição das características das linhas de transmissão, contidas na Tabela 10, iniciou-se a busca do catálogo utilizado para modelagem e cálculo dos parâmetros das linhas de transmissão. No entanto, como catálogo disponibilizado pela OMVG está incompleto, pois não incluía elementos como para-raios, altura da flexa, diâmetro e outros componentes associados às linhas de transmissão, alguns dados foram adotados.

Tabela 10: Característica, estrutura metálica, circuito simples e dois cabos para-raios

Dimensões de parâmetros	Valores
h_1	25,0 m
h_2	4,40 m
L_1	6,50 m
L_2	4,10 m
Separador 18 polegadas	45,72 cm
Ângulo	45°

Fonte: Da Silva [62]

Considerando que a tensão de linha é 225kV, optou-se por utilizar um modelo equivalente brasileiro, baseando em uma rede elétrica com tensão aproximada de 230 kV. Após esse procedimento, deu-se início ao processo de modelagem da linha utilizando o software ATP.

Foram adotados condutores de 636 MCM do modelo Grosbeak, do tipo CAA (Alumínio com Alma de Aço). Utilizou-se o modelo LCC no ATPDraw para parâmetros concentrados. Vale destacar que ATP (Alternative Transients Program), é derivado do programa Eletromagnetic Transients Programa (EMTP), e o ATPDraw é a interface gráfica utilizada no ambiente Windows [60], [61].

Este programa usado para a modelagem de Transitórios Eletromagnéticos, igualmente é aplicado para modelagem de sistemas elétricos de potência, permitindo uma maior compreensão das redes elétricas. A interface do Windows, que é o ATPDraw, é aplicada na modelagem de parâmetros como: elementos concentrados, elementos RL acoplado, PI equivalentes polifásicos, transformadores e muito mais.

A Tabela 11, resume as informações lançadas no ATPDraw para a modelagem de linha de transmissão baseado no catálogo. Em que, h_1 representa a altura da torre em metros, h_2 representa distância entre dois para-raios, L_1 representa largura entre as fases: A, B e C e L_2 representa distância entre as fase e para-raios.

Foram adotados quatro condutores por fase para a modelagem das linhas e atribuiu-se circuito simples para todas as subestações. Utilizou-se o modelo PI equivalente da linha de transmissão. Por se tratar de um estudo de fluxo de potência, trabalhou-se apenas com a sequência positiva, considerando que a sequência zero seria utilizada em estudos de curto circuito, o que não foi o foco deste trabalho.

A resistência em DC foi corrigida pela temperatura de operação a 70°. Assim, pela Figura 9, segue a disposição dos condutores e dois cabos para-raios no formato da torre modelados no ATPDraw.

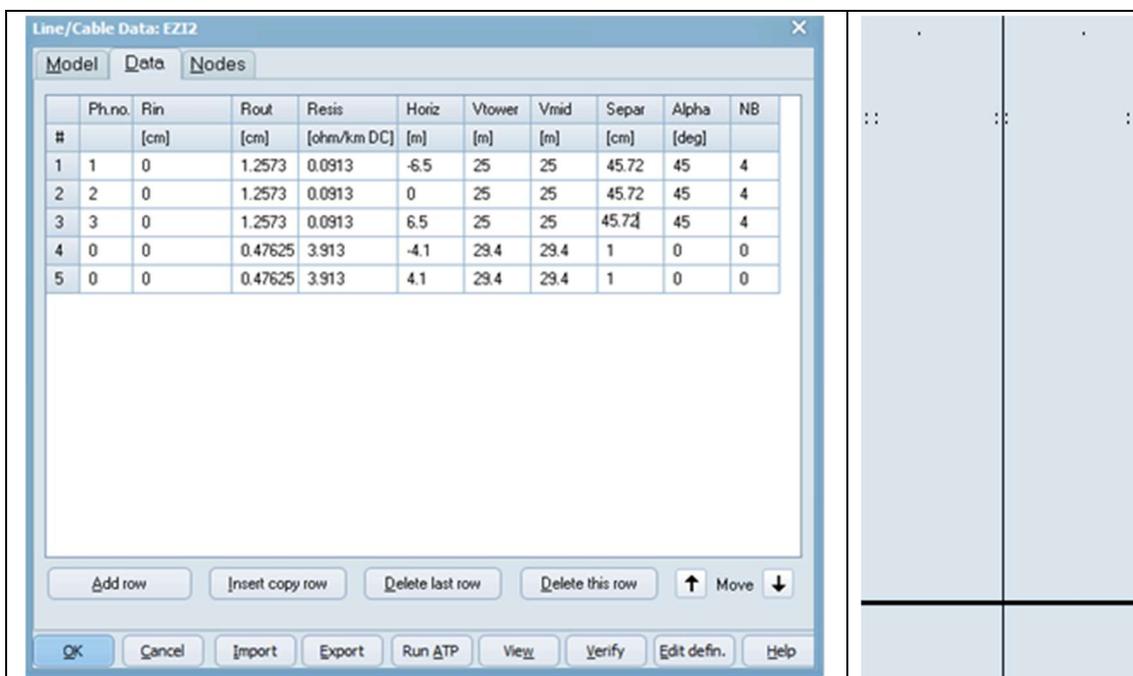


Figura 9: Projeção da Torre no ATPDraw a partir da disposição de dados

Fonte: elaboração do autor

Nesta modelagem, os resultados encontrados para parâmetros concentrados foram:

$$\text{Resistência (R)} = 0,0237213 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\text{Reatância (XL)} = 0,2832320 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\text{Susceptância (B)} = 5,85300 \times 10^{-6}$$

Com esses resultados obtidos do ATPDraw, realizou-se a multiplicação com parâmetros de comprimentos das linhas de transmissão apresentados na Tabela 10. O resultado desta operação é apresentado na Tabela 11.

Os procedimentos detalhados dos cálculos podem ser encontrados no anexo desta dissertação, e a Tabela 12 resume os resultados obtidos.

Tabela 11: Impedância em (Ω) e Susceptância em (S) das subestações da OMVG.

Linha de transmissão	Impedâncias em [Ω]	Susceptâncias [s]
Kaléta - Boké	3,056252292 + j36,49161088	0,000754101
Boké - Saltinho	2,325636252 + j27,76806528	0,000573828
Saltinho - Bambadinca	1,30941576 + j15,63440640	0,000323086
Bambadinca - Mansoa	1,275968727 + j15,23504928	0,000314833
Mansoa - Bissau	0,835701399 + j9,97826336	0,000206202
Mansoa - Tanaf	1,725724575 + j20,60512800	0,000425806
Tanaf - Soma	2,174768784 + j25,96670976	0,000536603
Soma - Brikama	3,392857539 + j40,51067296	0,000837155
Soma - Kaolack	3,609195795 + j43,09374880	0,000890534
Kaolack - Tambacounda	6,117248844 + j73,03986816	0,001509372
Tambacounda - Sambangalou	5,790132117 + j69,13409888	0,001428659
Sambangalou - Mali	1,412366202 + j16,86363328	0,000348488
Mali - Labé	2,101944393 + j25,09718752	0,000518634
Labé - Linsan	2,845844361 + j33,97934304	0,000702184
Linsan - Kaléta	2,736963594 + j32,67930816	0,000675319

Fonte: elaboração do autor

Tabela 12: Resumo em sistema percentual.

Linhas de Transmissão	Impedâncias em [%]	Shunt [MVar]
Kaléta – Boké	0,5777415+ j6,898225	39,8919429
Boké – Saltinho	0,4396288+ j5,249161	30,3555012
Saltinho – Bambadinca	0,2475266+ j2,955464	17,0912494
Bambadinca – Mansoa	0,2412039+ j2,879971	16,6546657
Mansoa – Bissau	0,1579776 + j1,88625	10,9080430
Mansoa – Tanaf	0,3262239+ j3,895109	22,5251374
Tanaf – Soma	0,4111094+ j4,908640	28,3862987
Soma – Brikama	0,6413719+ j7,657972	44,2854995
Soma – Kaolack	0,6822676+ j8,146266	47,1092486
Kaolack - Tambacounda	1,1563797 + j13,8072	79,8457788
Tambacounda – Sambangalou	1,0945429+ j13,06883	75,5760611
Sambangalou – Mali	0,2669879+ j3,187832	18,4350152
Mali – Labé	0,3973430+ j4,744269	27,4357386
Labé – Linsan	0,5379668+ j6,423316	37,1455336
Linsan – Kaléta	0,5173844+ j6,177563	35,7243751

Fonte: elaboração do autor

O objetivo de todo esse procedimento é construir o sistema utilizando o software Anarede. Como ele trabalha com valores em sistema percentual, foi necessário realizar a conversão das impedâncias de grandezas reais para esse sistema. Para isso, foram adotados como base a tensão de linha da rede, de 230 kV, e a potência aparente, de 100 MVA. A corrente base também foi calculada a partir desses valores.

Terminada a análise de todas as etapas anteriores, iniciou-se a fase do estudo de fluxo de potência com vista a implementação do sistema teste, analisando-o sob perspectivas das três cargas já mencionadas.

3.3 ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA

Igualmente conhecida como fluxo de carga ou em inglês “Load-flow” consiste na definição e caracterização do estado operativo de uma rede elétrica, isto inclui previsões das tensões e ângulos de todos os nós, fluxo de potência ativa e reativa nos ramos do sistema e por fim, determinação das potências geradas assim como consumidas. O estudo do fluxo de potência é feito em regime permanente ou estacionário, analisando a rede elétrica sob ponto de vista das contingências [63].

A análise de contingência equivale à perda de um componente em um sistema elétrico. Isso pode ser uma linha de transmissão, um transformador ou qualquer outro componente relacionado ao sistema. Esta análise pode ser realizada tanto de forma dinâmica quanto estática. O Anarede é usado para realizar a análise estática, enquanto o Anatem é usado para realizar a análise dinâmica no domínio do tempo.

3.4 SIMULAÇÃO NO ANAREDE

O Anarede é um programa computacional utilizado para realização do estudo de fluxo de potência em regime permanente. De acordo com CEPTEL [64], “Anarede é na verdade, um conjunto de aplicações computacionais para análise de sistemas elétricos de potência”. Ele inclui além de fluxo de potência, ferramentas como:

- Equivalentes de rede;
- Análises de contingências;
- Análise de sensibilidade de tensão;
- Análise de sensibilidade de fluxo;

- Fluxo de potência continuado;
- Análise de corredores de recomposição;
- Cálculo automático de margem de transmissão;
- Avaliação de segurança estática.

Para o sistema OMVG, a análise feita via Anarede consiste no seguinte: definições dos parâmetros do sistema, especificações de barras, impedâncias de linhas, as cargas em cada barramento, e os reatores usados em algumas barras do sistema.

O sistema teste da OMVG é composto por 17 barras, dois transformadores, duas barras de gerações e 15 de cargas. De acordo com classificações do Anarede, as barras são especificadas e classificadas pela seguinte ordem numérica:

- Tipo 0: barras PQ (barras de cargas);
- Tipo 1: barras PV (barras de geração);
- Tipo 2: barras $V\theta$ (barras de referências ou Slack)

A numeração das barras de OMVG varia de: 10; 20; 100; 120; 130; 140; 150; 160; 170; 180; 190; 200; 210; 220; 230; 240 e 250. Para a doção de barra slack também chamada de Swing ou de referência ou ainda, barra de fechamento do balanço do sistema, foram estabelecidos dois critérios de acordo com a regra de fluxo de potência:

- Critério 1: a barra deve estar próxima de consumo;
- Critério 2: a barra deve possuir maior potência de geração para atender critério do sistema.

Arbitrando as duas barras de geração, isto é, Kaléta e Sambangalou, verifica que todas estão próximos de consumo, portanto critério 1 atendido. Já no critério 2, a barra 10 (Kaléta) possui maior potência de geração e assim ela foi definida como barra Slack.

Após a definição, iniciou as especificações de variáveis de controle e de estados, incluindo a nomenclatura de cada barra do sistema.

Vaiáveis de estados ou dependentes: são vaiáveis cuja especificações se desconhecem nas barras do sistema e a solução deles passa por cálculos de Load flow. Eles podem ser: magnitudes de tensão em barras de cargas, ângulos e gerações de potência reativa.

Variáveis de controle ou independentes: são especificadas e definidas no sistema. Exemplos, magnitudes de tensões em barras de gerações, injeções de potências reativas em barras de gerações e de cargas e Taps dos transformadores [64].

Seguem as especificações de variáveis correspondentes a cada barra na Tabela 13.

Tabela 13: Variáveis de estado e controle de cada barra da OMVG.

Barra 10 – Kaléta, barra V θ Variável de controle: V_{10} Variáveis de estados: P_{G10} e Q_{G10}	Barra 160 – Bissau, barra PQ Variável de estados: V_{160} e θ_{160} Variáveis de controle: não possui
Barra 20 – Sambangalou, barra PV Variável de controle: P_{20} e V_{20} Variáveis de estados: Q_{20} e θ_{20}	Barra 170 – Tanaf, barra PQ Variável de estados: V_{170} e θ_{170} Variáveis de controle: não possui
Barra 100 – Kaléta, barra PQ Variável de estados: V_{100} e θ_{100} Variáveis de controle: não possui	Barra 180 – Soma, barra PQ Variável de estados: V_{180} e θ_{180} Variáveis de controle: não possui
Barra 120 – Boké, barra PQ Variável de estados: V_{120} e θ_{120} Variáveis de controle: não possui	Barra 190 – Brikama barra PQ Variável de estados: V_{190} e θ_{190} Variáveis de controle: não possui
Barra 130 – Saltinho, barra PQ Variável de estados: V_{130} e θ_{130} Variáveis de controle: não possui	Barra 200 – Kaolack, barra PQ Variável de estados: V_{200} e θ_{200} Variáveis de controle: não possui
Barra 140 – Bambadinca, barra PQ Variável de estados: V_{140} e θ_{140} Variáveis de controle: não possui	Barra 210 – Tambacounda, barra PQ Variável de estados: V_{210} e θ_{210} Variáveis de controle: não possui
Barra 150 – Mansoa, barra PQ Variável de estados: V_{150} e θ_{150} Variáveis de controle: não possui	Barra 220 – Sambangalou, barra PQ Variável de estados: V_{220} e θ_{220} Variáveis de controle: não possui

Fonte: elaboração do autor

A Tabela 14 apresenta as últimas variáveis de estados e de controle referentes as barras 230 – 250.

Tabela 14: Continuação de variáveis de estado e de controle das barras da OMVG.

Barra 230 – Mali, barra PQ Variável de estados: V_{230} e θ_{230} Variáveis de controle: não possui	Barra 250 – Linsan, barra PQ Variável de estados: V_{250} e θ_{250} Variáveis de controle: não possui
Barra 240 – Labé, barra PQ Variável de estados: V_{240} e θ_{240} Variáveis de controle: não possui	

Fonte: elaboração do autor

Portanto, o sistema OMVG, possui 34 variáveis de estados e 3 de controle. Para os três patamares de cargas foram adotados certos números de reatores nas barras apresentadas na Tabela 15, lembrando, a função dos reatores é para baixar o perfil de tensão, pois havia uma elevação de tensão nesses barramentos superando até 1,05 pu que é o valor máximo definido pelo programa Anarede.

Tabela 15: Quantidades de reatores utilizados para cada patamar de carga.

Carga Pesada	Carga Média	Carga Leve
Barra 150 – 6	Barra 150 – 6	Barra 150 – 7
Barra 190 – 4	Barra 190 – 3	Barra 190 – 4
Barra 200 – 6	Barra 200 – 5	Barra 200 – 7
Barra 210 – 8	Barra 210 – 5	Barra 210 – 9
Barra 250 – 8	Barra 250 – 8	Barra 250 – 10

Fonte: elaboração do autor

O método de convergência aplicado no Anarede para analisar este sistema é o método iterativo Newton – Raphson. Obtendo a convergência desse método na simulação do fluxo de potência, dispensa-se a necessidade de arranjos de equações de cálculos de fluxo de potência.

As variáveis de estados encontrados com a convergência da simulação no estudo de Load Flow para as três cargas (pesada, média e leve) são apresentadas nas tabelas Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18 que seguem.

Tabela 16: Variáveis de estados e controle do fluxo de potência de carga pesada

$\dot{V}_{20} = V_{20} \angle \theta_{20} = 1 \angle - 3,2^\circ$	$\dot{V}_{180} = V_{180} \angle \theta_{180} = 0,996 \angle - 18,3^\circ$
$\dot{V}_{100} = V_{100} \angle \theta_{20} = 1,008 \angle - 2^\circ$	$\dot{V}_{190} = V_{190} \angle \theta_{190} = 0,965 \angle - 20,9^\circ$
$\dot{V}_{120} = V_{120} \angle \theta_{20} = 1,015 \angle - 7,1^\circ$	$\dot{V}_{200} = V_{200} \angle \theta_{200} = 0,983 \angle - 18,2^\circ$
$\dot{V}_{130} = V_{130} \angle \theta_{130} = 1,01 \angle - 10,7^\circ$	$\dot{V}_{210} = V_{210} \angle \theta_{210} = 0,990 \angle - 13,2^\circ$
$\dot{V}_{140} = V_{140} \angle \theta_{140} = 1,003 \angle - 12,7^\circ$	$\dot{V}_{220} = V_{220} \angle \theta_{220} = 1,009 \angle - 4,8^\circ$
$\dot{V}_{150} = V_{150} \angle \theta_{150} = 0,991 \angle - 14,6^\circ$	$\dot{V}_{230} = V_{230} \angle \theta_{230} = 1,012 \angle - 4,9^\circ$
$\dot{V}_{160} = V_{160} \angle \theta_{160} = 0,990 \angle - 14,9^\circ$	$\dot{V}_{240} = V_{140} \angle \theta_{240} = 1,012 \angle - 4,4^\circ$
$\dot{V}_{170} = V_{170} \angle \theta_{170} = 0,995 \angle - 16,6^\circ$	$\dot{V}_{250} = V_{150} \angle \theta_{250} = 0,96 \angle - 3,1^\circ$

Fonte: elaboração do autor

Na Tabela 17 são apresentados os valores encontrados para a carga média.

Tabela 17: Variáveis de estados e controle do fluxo de potência de carga média

$\dot{V}_{20} = V_{20} \angle \theta_{20} = 1 \angle -1,3^\circ$	$\dot{V}_{180} = V_{180} \angle \theta_{180} = 1,006 \angle -11,9^\circ$
$\dot{V}_{100} = V_{100} \angle \theta_{20} = 1,011 \angle -1,1^\circ$	$\dot{V}_{190} = V_{190} \angle \theta_{190} = 0,974 \angle -13,8^\circ$
$\dot{V}_{120} = V_{120} \angle \theta_{20} = 1,028 \angle -4,7^\circ$	$\dot{V}_{200} = V_{200} \angle \theta_{200} = 0,984 \angle -11,5^\circ$
$\dot{V}_{130} = V_{130} \angle \theta_{130} = 1,027 \angle -7,1^\circ$	$\dot{V}_{210} = V_{210} \angle \theta_{210} = 0,977 \angle -7,1^\circ$
$\dot{V}_{140} = V_{140} \angle \theta_{140} = 1,020 \angle -8,4^\circ$	$\dot{V}_{220} = V_{220} \angle \theta_{220} = 1,008 \angle -0,2^\circ$
$\dot{V}_{150} = V_{150} \angle \theta_{150} = 1,009 \angle -9,6^\circ$	$\dot{V}_{230} = V_{230} \angle \theta_{230} = 1,013 \angle -0,8^\circ$
$\dot{V}_{160} = V_{160} \angle \theta_{160} = 1,007 \angle -9,9^\circ$	$\dot{V}_{240} = V_{140} \angle \theta_{240} = 1,015 \angle -1,1^\circ$
$\dot{V}_{170} = V_{170} \angle \theta_{170} = 1,011 \angle -10,9^\circ$	$\dot{V}_{250} = V_{150} \angle \theta_{250} = 0,999 \angle -1^\circ$

Fonte: elaboração do autor

A Tabela 18 apresenta os resultados de load flow encontrados na convergência no método para a carga leve.

Tabela 18: Variáveis de estados e controle do fluxo de potência de carga leve

$\dot{V}_{20} = V_{20} \angle \theta_{20} = 1 \angle -3,6^\circ$	$\dot{V}_{180} = V_{180} \angle \theta_{180} = 1,010 \angle -8,7^\circ$
$\dot{V}_{100} = V_{100} \angle \theta_{20} = 1,025 \angle -0,6^\circ$	$\dot{V}_{190} = V_{190} \angle \theta_{190} = 0,982 \angle -10,3^\circ$
$\dot{V}_{120} = V_{120} \angle \theta_{20} = 1,041 \angle -3,3^\circ$	$\dot{V}_{200} = V_{200} \angle \theta_{200} = 0,982 \angle -8,1^\circ$
$\dot{V}_{130} = V_{130} \angle \theta_{130} = 1,037 \angle -5,1^\circ$	$\dot{V}_{210} = V_{210} \angle \theta_{210} = 0,973 \angle -4^\circ$
$\dot{V}_{140} = V_{140} \angle \theta_{140} = 1,028 \angle -6,1^\circ$	$\dot{V}_{220} = V_{220} \angle \theta_{220} = 1,009 \angle 2,1^\circ$
$\dot{V}_{150} = V_{150} \angle \theta_{150} = 1,015 \angle -7,1^\circ$	$\dot{V}_{230} = V_{230} \angle \theta_{230} = 1,015 \angle 1,3^\circ$
$\dot{V}_{160} = V_{160} \angle \theta_{160} = 1,014 \angle -7,3^\circ$	$\dot{V}_{240} = V_{140} \angle \theta_{240} = 1,017 \angle 0,6^\circ$
$\dot{V}_{170} = V_{170} \angle \theta_{170} = 1,017 \angle -8^\circ$	$\dot{V}_{250} = V_{150} \angle \theta_{250} = 1,001 \angle 0,1^\circ$

Fonte: elaboração do autor

Terminada a modelagem e simulação do sistema teste da OMVG com o Anarede, iniciou-se o estudo de sua estabilidade utilizando o programa computacional “Anatem e o Plot para a plotagem dos gráficos”.

3.5 SIMULAÇÃO NO ANATEM

A utilização do programa Anatem foi baseada em seu manual elaborado pelo CEPTEL, bem como no submódulo 18.2, da autoria da ONS, que trata da relação dos sistemas e modelos computacionais. Além disso, utilizou-se o submódulo 23.2, especificamente a seção 8, também, de autoria do ONS, que aborda diretrizes e critérios para estudos elétricos. Ambos os submódulos fazem parte do chamado “Procedimento da Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS”.

De acordo com ONS [65] “O Anatem é um modelo de simulações de transitório eletromecânicos, voltado para operação e planejamento de sistemas elétricos de potência.

Nesta dissertação, uso do Anatem, inclui a seleção dos seguintes elementos: máquinas síncronas de polos salientes, reguladores de tensão, sinais estabilizadores ou amortecedores, controladores CDU e reguladores de velocidade.

Os modelos adotados para esses itens são: Modelo MD02 para Geradores; Modelo MD09 para reguladores de tensão; Modelo MD01 para regulador de velocidade e Modelo MD01 para estabilizador ou amortecedor.

O estudo como o Anatem parte do caso existente, de ‘Load Flow’ e, a partir daí, realiza operações voltadas à estabilidade do sistema perante um distúrbio. Após a conclusão do estudo de fluxo de potência com Anarede, o caso foi salvo, sempre seguindo a ordem de patamares de cargas. Em seguida, foi realizado o estudo de transitórios eletromecânicos, como pode ser observado na Figura 10, que indica a rotina adotada.

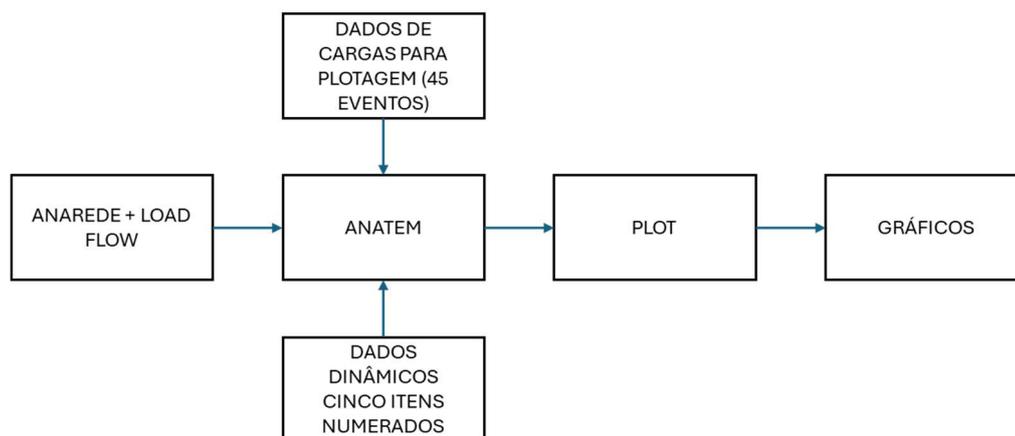


Figura 10: Esquema de execução feita no Anatem

Fonte: elaboração do autor

Como existem 15 barras de carga, cada uma com três patamares diferentes, (pesada, média e leve), foram simulados 45 eventos no total, uma vez que cada patamar de carga corresponde a 15 eventos. A simulação tem como objetivo verificar se, diante da aplicação de um curto-circuito trifásico em uma barra, o sistema conseguirá alcançar o ponto de equilíbrio, mantendo a operação normal das tensões, frequências e demais dispositivos do sistema, ou se perderia totalmente o funcionamento. Esses estudos, tanto de ponto de vista de regime estacionário quanto dinâmico, serão apresentados nos resultados desta dissertação.

Para as duas usinas, foram utilizados seis grupos de geradores: três grupos de geradores de 80 MW para Kaléta e três grupos de geradores de 45 MW para a usina de Sambangalou. Cada patamar de carga tem um número específico de geradores, justamente, em função do valor de sua potência ativa. Esses cálculos estão detalhados no anexo desta dissertação, e os resultados podem ser consultados na Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21.

Tabela 19: Geração Ativa e Reativa das duas usinas para cada carga.

Carga Pesada	
Geração Ativa [MW]	Geração Reativa [Mvar]
Usina Kaléta	
165,3	-33,6
Usina Sambangalou	
128	-38,6
Carga Média	
Geração Ativa [MW]	Geração Reativa [Mvar]
Usina Kaléta	
91,13	-48,4
Usina Sambangalou	
128	-37,7
Carga Leve	
Geração Ativa [MW]	Geração Reativa [Mvar]
Usina Kaléta	
54,5	-25,4
Usina Sambangalou	
128	-38,8

Fonte: elaboração do autor

A Tabela 20 apresenta os números de geradores para cada patamar de carga.

Tabela 20: Número de geradores por patamar de carga

Usinas	Pesada	Média	Leve	Capacidade MW
Kaléta	3	2	1	3 x 80
Sambangalou	3	3	3	3 x 45

Fonte: elaboração do autor

A usina de Sambangalou permaneceu com três máquinas para todas as cargas, pois sua potência não varia, mantendo-se em 128 MW, uma vez que se trata de uma barra PV. Já na usina de Kaléta, houve mudanças devido às potências apresentadas na Tabela 19. Se, por exemplo, tem-se 54,5 MW na carga leve e o limite de potência para cada grupo de geração é 80 MW, logicamente, não é possível despachar dois geradores na carga leve.

A Tabela 21 apresenta o dimensionamento completo para o despacho das máquinas.

Tabela 21: Dimensionamento do reativo para despacho das Máquinas.

Carga Pesada	
Geração Reativa Máxima [Mvar]	Geração Reativa Mínima [Mvar]
Usina Kaléta	
102,24	-102,24
Usina Sambangalou	
57,51	-57,51
Carga Média	
Geração Reativa Máxima [Mvar]	Geração Reativa Mínima [Mvar]
Usina Kaléta	
68,16	-68,16
Usina Sambangalou	
57,51	-57,51
Carga Leve	
Geração Reativa Máxima [Mvar]	Geração Reativa Mínima [Mvar]
Usina Kaléta	
34,08	-34,08
Usina Sambangalou	
57,51	-57,51

Fonte: elaboração do autor

Há uma interdependência entre as três tabelas. A Tabela 21 depende das quantidades de geradores apresentadas na Tabela 20 para realizar a multiplicação do dimensionamento do reativo definido no Anarede, com geração máxima e mínima. A Tabela 20, por sua vez, depende da Tabela 19 para definir quantidades de geradores, completando assim o ciclo do dimensionamento do reativo das simulações no Anatem.

3.6 DIMENSIONAMENTO DA CARGA DA REGIÃO DE BOLAMA, UFV E P2G2P

Nesta seção, é realizado o dimensionamento da carga da região de Bolama, onde se encontram as seis ilhas destinadas para a aplicação de P2G2P. Após, a estimativa, iniciou-se o processo de dimensionamento da usina fotovoltaica atrelada a essa carga.

O sistema OMVG é composto por 17 barras, porém, com o dimensionamento da usina solar fotovoltaica atrelada ao P2G2P para a produção do hidrogênio verde, o sistema passa a contar com 18 barras, essa décima oitava é conectada à subestação de Bissau, e denominada de barra 165 tal como feita com outras barras.

Para o seu dimensionamento, foram percorridos os seguintes procedimentos: Primeiro, estimativa da carga da população da região de Bolama, seguindo os procedimentos adotados na estimativa de cargas das cidades que fazem partes da OMVG.

Baseando nessa carga e com os dados de Atlas Solar Global sobre a Guiné-Bissau, dimensionou-se a usina solar fotovoltaica. Para isso, escolheu o tipo de usina, sendo “Ground-mounted large scale”, que significa, (grande escala montada no solo). A razão desta escolha, deve-se ao cálculo do rendimento energético compatível com o sistema residencial pretendido para abastecimento de P2G2P nas seis ilhas de Bolama [66].

A Tabela 22, apresenta em resumo os dados energéticos e da população da região de Bolama.

Tabela 22: População da região de Bolama e consumo anual per capita.

Habitantes - Bolama	Energia GWh/ano	Capacidade (MW)
32.424	21,951	2,505

Fonte: elaboração do autor

Com base na energia anual a ser consumida em Bolama (21.951 GWh/ano) e no rendimento energético médio de uma usina fotovoltaica de 1,663 GWh/MWp.ano na região, a capacidade instalada da usina solar fotovoltaica sem P2G2P é de 13,20 MWp.

Nesta configuração a UFV supriria energia diretamente para a região de Bolama, considerando haver área necessária para a construção da UFV nas ilhas. Vale ressaltar que a energia produzida é intermitente e que não há sistema de armazenamento.

Adicionando a esta usina solar um sistema de conversão para ter o ciclo P2G2P, para estimar a carga do eletrolisador e da nova central fotovoltaica ligada à rede OMVG na barra 165, tem-se:

Considera-se que o rendimento do processo de conversão do sistema P2G2P com origem na central fotovoltaica, passando por um sistema de armazenamento de hidrogénio, seguido da célula de combustível e da rede eléctrica é de 40% (η). A Figura 11, apresenta o ciclo deste processo.



Figura 11: Componentes de P2G2P com a rede eléctrica.

Fonte: elaboração do autor

Adota-se como premissa que a potência do eletrolisador seja de 300 kW, a potência da célula de combustível seja de 50 kW [67] e a potência de cada módulo fotovoltaico seja de 330 W.

Desta forma, considerando a eficiência de conversão do ciclo na Equação (1), tem-se que:

$$E_{PV \text{ produzida}} = \frac{E_{Bolama}}{\eta \text{ ciclo}} \quad (1)$$

$$E_{PV \text{ produzida}} = \frac{21,95}{0,4} = 54,88 \left[\frac{GWh}{ano} \right]$$

Desta forma, tem-se que a energia solar fotovoltaica de entrada no eletrolisador passa a ser de 54,9 GWh/ano. Para a mesma relação de conversão de 1,663 GWh/MWp.ano, tem-se uma UFV com capacidade de 33 MWp. Considerando a HSP de Bolama igual a 5 h, tem-se que

O resultado da carga do eletrolisador dividido pela potência de saída do sistema energético escolhido, é igual à nova capacidade instalada da usina solar fotovoltaica com

P2G2P na rede elétrica. Para aplicação na simulação, esse valor será levado para a barra 165 no Anarede.

Para determinar a área mínima necessária para a instalação da usina solar fotovoltaica para produção do hidrogênio verde, tem-se pela Equação (2) e Equação (3) que:

$$No.painéis = \frac{P_{UFV}}{P_{módulo}} \quad (2)$$

$$No.painéis = \frac{33.000 \text{ kWp}}{0,33 \text{ kW}} = 100.000 \text{ painéis}$$

Logo, a área, fica:

$$Área_{UFV} = No.painéis \cdot \frac{2 \text{ m}^2}{Painel} = 200.000 \text{ [m}^2\text{]} \quad (3)$$

$$Medida \text{ lateral} = \sqrt{200.000} = 447 \text{ [m]}$$

Partindo deste dimensionamento da UFV, apresenta-se o sistema da rede da OMVG com a conexão da usina no diagrama elétrico com as subestações na Figura 12.

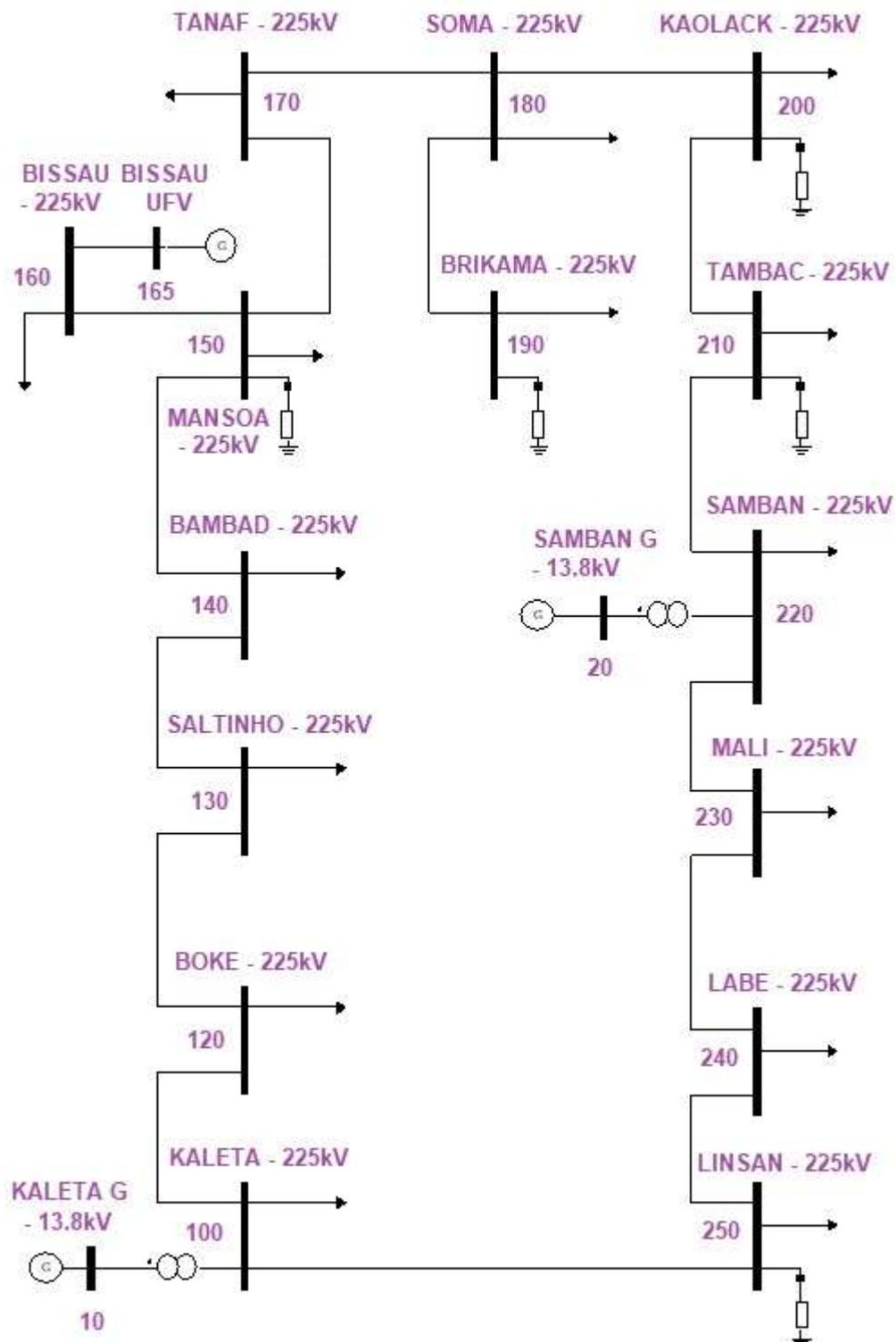


Figura 12: Diagrama elétrico da rede da OMVG

4 ESTUDOS DE CASO

4.1 ESTUDO DE CASO 1: CONEXÃO DA GUINÉ-BISSAU NA OMVG

A Guiné-Bissau é um Estado unitário, localizado na costa ocidental do continente africano, ela faz fronteira ao Norte com a República do Senegal, ao Sul e Leste com a République de Guinée, é banhada ao oeste pelo oceano atlântico. Tem uma superfície de 36.125 km², da qual 27.700 km² forma a superfície emersa (terrestre). Ela é composta por 8 regiões administrativas e um setor autônomo (Bissau) que também é a capital do país. Essas regiões são: Bafatá, Biombo, Bolama, Cacheu, Gabú, Oio, Quinara e Tombali (Figura 13). Cada uma dessas regiões é composta por diferentes setores, totalizando assim, 36 setores de que o país dispõe [68].

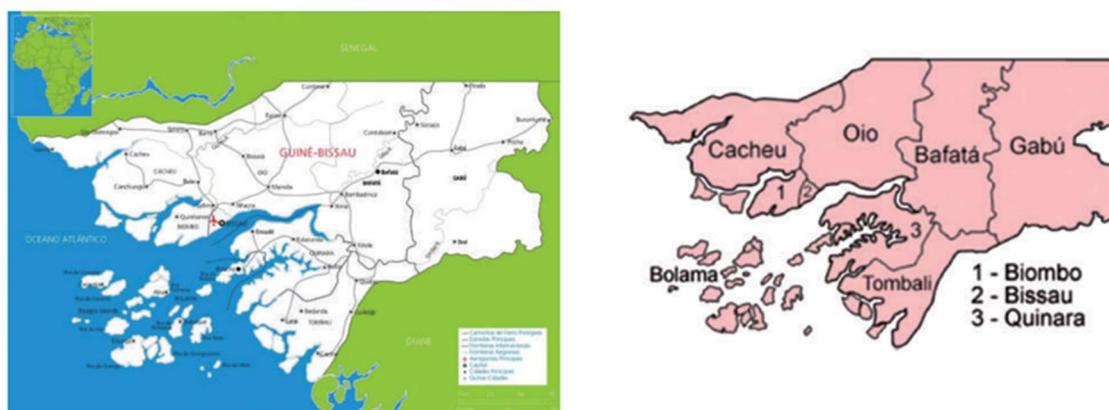


Figura 13: Mapa geográfico da Guiné-Bissau e suas regiões administrativas

Fonte: Aicep, Inc, (apud Aler [68]).

4.1.1 Caracterização do sistema energético da Guiné-Bissau

O sistema energético da Guiné-Bissau é caracterizado por alta dependência de combustíveis fósseis. A transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica são realizadas por uma única empresa pública do país (EAGB), essa empresa só cobre a cidade de Bissau, as oito regiões administrativas são abastecidas por produtores autônomos [68], [69].

A mesma empresa fazia o papel da geração de energia no passado, porém, atualmente esse papel é feito pela empresa turca “Karpower” [70].

A maioria desses produtores está limitada aos centros urbanos das regiões, e muitas outras partes do país ficam sem energia. Vale destacar que eles geram energia

usando geradores a diesel e mini geração distribuída híbrida, como é o caso de minigerações Bambadinca, Bubaque e Bolama [71].

Apesar de tudo, o país possui uma matriz energética e elétrica bastante diversificada, porém, nem todo esse potencial é explorado para a geração de energia elétrica. A Figura 14, mostra o quadro exemplificativo da matriz energética e elétrica do país.

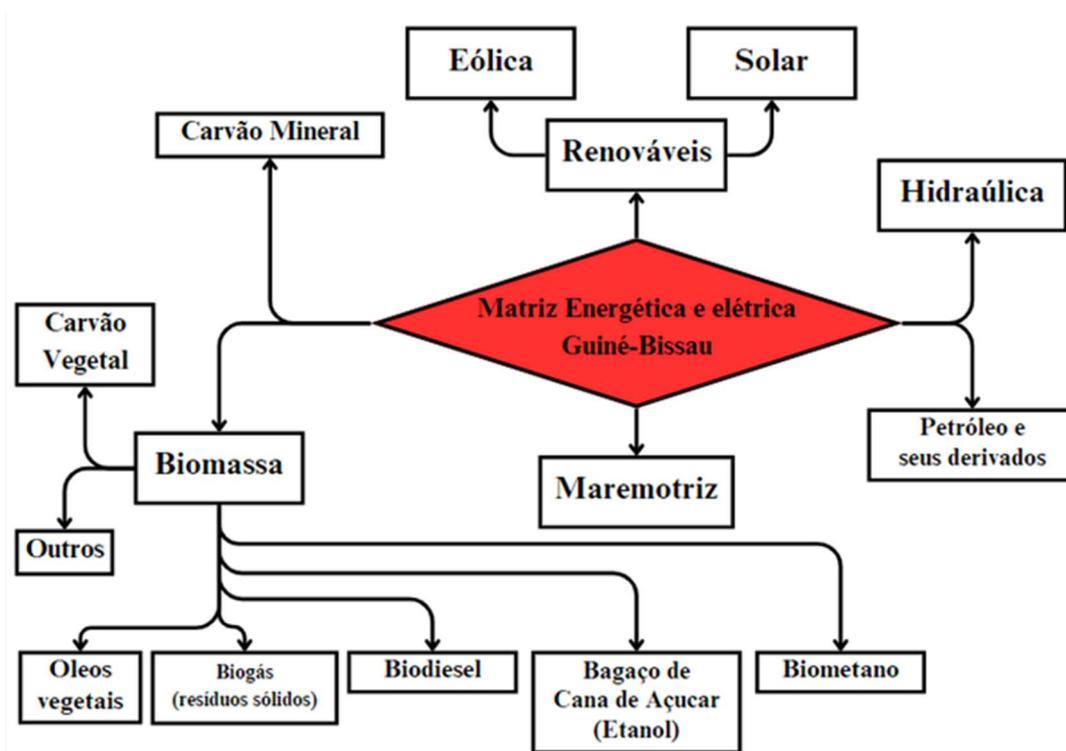


Figura 14: Quadro Energético da Guiné-Bissau

Fonte: elaboração do autor

As únicas fontes de energia usadas nesta matriz energética são o petróleo e seus derivados (diesel), a biomassa, principalmente o carvão vegetal. Esse carvão é muito utilizado pela população guineense tanto nos centros urbanos quanto no interior. É usado na cozinha de alimentos, na iluminação em algumas zonas do país durante a noite porque não há energia elétrica disponível, por fim, a energia solar que é um pouco usada [72].

A Figura 15 e a Figura 16 demonstram o percentual do consumo e a aplicação das fontes primárias na geração de energia elétrica. Elas corroboram com as afirmações feitas nos parágrafos anteriores.



Figura 15: Comparativo de uso das matrizes energéticas nos anos 2010 e 2012

Fonte: Aler [68]

A Figura 16, apresenta o percentual e a forma de geração de energia elétrica.

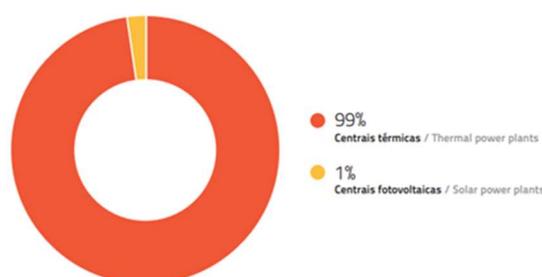


Figura 16: Formas de geração de energia elétrica na Guiné-Bissau.

Fonte: Aler [68].

A legislação e regulamentação do setor energético da Guiné-Bissau, são regidas pelos decretos lei nº2 e 3/2007 [73]. Ali é estabelecido órgão máximo do setor que é Ministério de energia, indústria e recursos Naturais (MEIRN) que tem atribuições de assinar e emitir contratos, regulando o setor, ele tem diferentes setores que lhe auxilia na elaboração de políticas energéticas, é o caso da Direção Geral de Energia (DGE). Porém, depende bastante de outras instâncias governamentais para tomar melhores decisões com vista a melhoria do setor energético bissau-guineense [68].

A Figura 17 apresenta as estruturas do setor energético da Guiné-Bissau indicando a responsabilidade de cada uma das entidades envolvidas.

É o Governo da Guiné-Bissau através de conselho dos ministros que toma decisão sobre o rumo de políticas energéticas e o Ministério da Energia Industria e Recursos Naturais com suas entidades executam.

O planejamento energético de qualquer país, requer primeiramente estudos sobre os potenciais recursos (fontes energéticas) de que ele dispõe visando atender as necessidades energéticas atuais e futuras sobre o consumo.

A partir disso, define-se horizontes de longos anos, e ao mesmo tempo, são estabelecidos planos curtos, médios e concretos sustentando a meta de longo prazo como forma de prevenir e antecipar as possíveis incertezas relacionadas ao horizonte do planejamento.

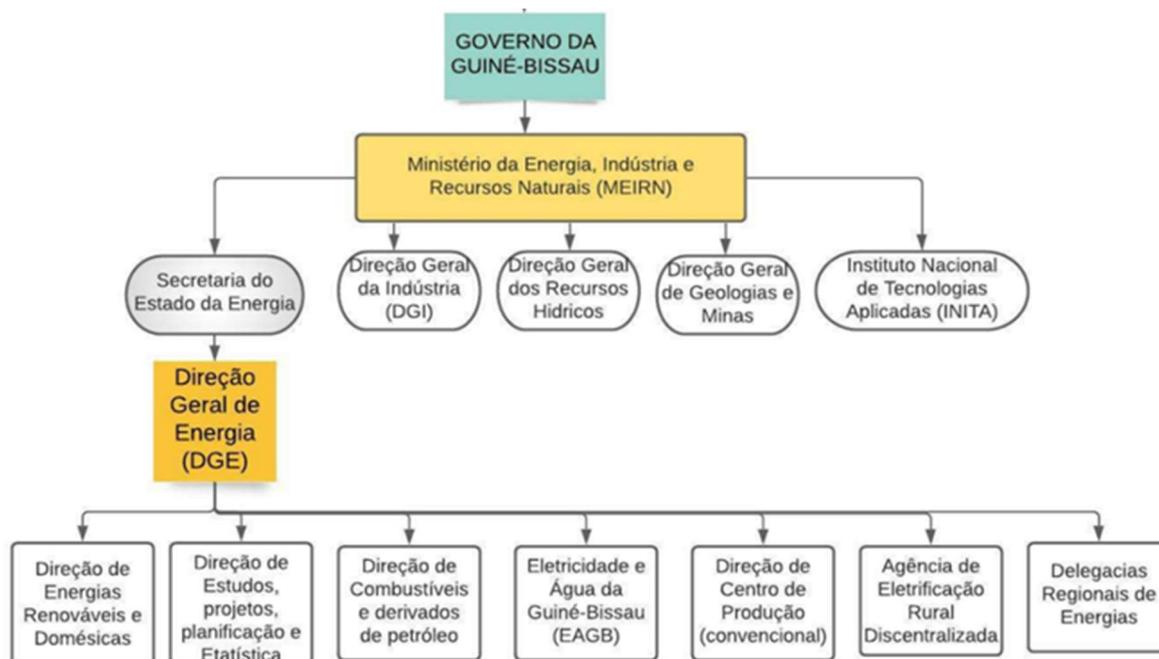


Figura 17: Estrutura Administrativa do setor energético da Guiné-Bissau

Fonte: Indi [5]

Vislumbrando todo esse quadro, a Guiné-Bissau apresenta uma matriz energética capaz de contribuir no seu mix energético, entretanto, faltam condições propícias para sua exploração e como consequência disso, ela apresenta problema de disponibilidade de carga como também de acesso à energia elétrica para toda a sua população.

Carece de infraestruturas energéticas consistentes, apar disso, o pouco da energia de que dispõe na capital (Bissau) é caracterizada por altas perdas técnicas e comerciais salientadas em Resende [6]. Além disso, o formato da energia que tem é operado de forma isolado, não existindo rede de transmissão interligada.

Apesar de tudo, elaborou alguns planos e metas convergentes para esse quesito no sentido de ampliar sua carga para atender a demanda, é o exemplo de:

1º “Plano de investimento para energia sustentável da Guiné-Bissau período 2015 - 2030”. Neste plano, definiu a meta de acesso a energia para toda a população até 2030 [72].

2º Plano, é intitulado “Plano de Ação Nacional no setor das Energias Renováveis (PANNER) da Guiné-Bissau período 2015-20230”. O Plano é elaborado no âmbito da implementação da política para as energias renováveis da CEDEAO [74].

3º Plano, “Plano diretor de energia” que clarifica o histórico do setor e consumo de energia elétrica, é tido como macro no setor energético [69].

4º Plano, “Projet d’electrification de quatorze localites proches des postes 225 kV Bambadinca, Saltinho et Mansoa” [75]. Esse último plano é oriundo do plano macrorregional (OMVG).

Essas metas são importantes de ponto de vista de planejamento energético, no entanto, é preciso um conjunto de ações de curto e médio prazo visando sua sustentabilidade e o MEIRN, precisa de fato pensar nesta questão.

O planejamento energético de uma nação deve considerar alguns elementos fundamentais: projeção da carga em relação à população e disponibilidade de recursos de oferta para atender à demanda. Em outras palavras, gerenciamento da oferta ao lado da demanda, ou seja, é preciso ter fontes de energia disponíveis e usar essas fontes para atender o consumo de energia.

Assim, as figuras abaixo mostram o quadro do crescimento contínuo da população da Guiné-Bissau e da demanda energética estimada até 2030. Salienta-se que de acordo com the World Bank, [76], a Guiné-Bissau possui 2.105,566 milhões de habitantes em 2022. Ou seja, essas informações de previsões e estimativas, são resumidas nos gráficos indicados na Figura 18 e Figura 19 e tendo como horizontes da projeção para 2030.

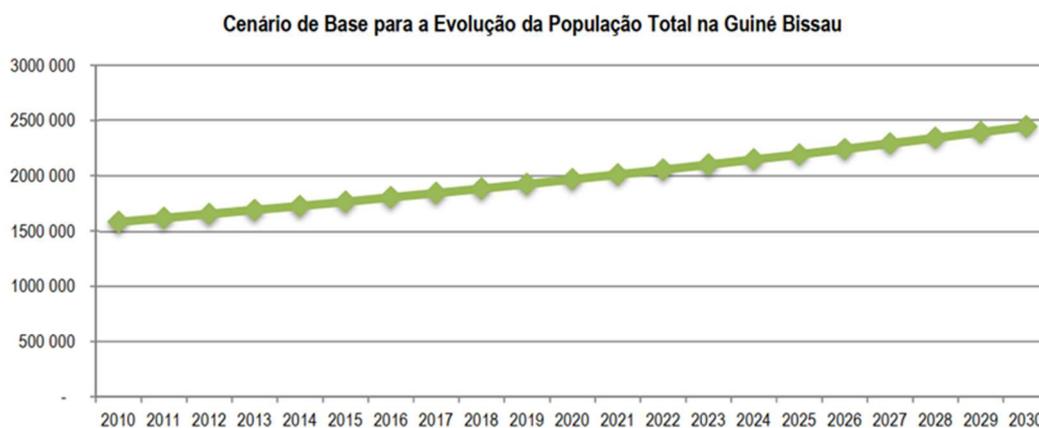


Figura 18: Crescimento populacional e projeção na Guiné-Bissau (2010-12 / 2030)

Fonte: INE e MEIRN [55], [72].

A Figura 19 apresenta a evolução da população da Guiné-Bissau para a mesma horizonte e estimativa de consumo ou a procura por eletricidade.

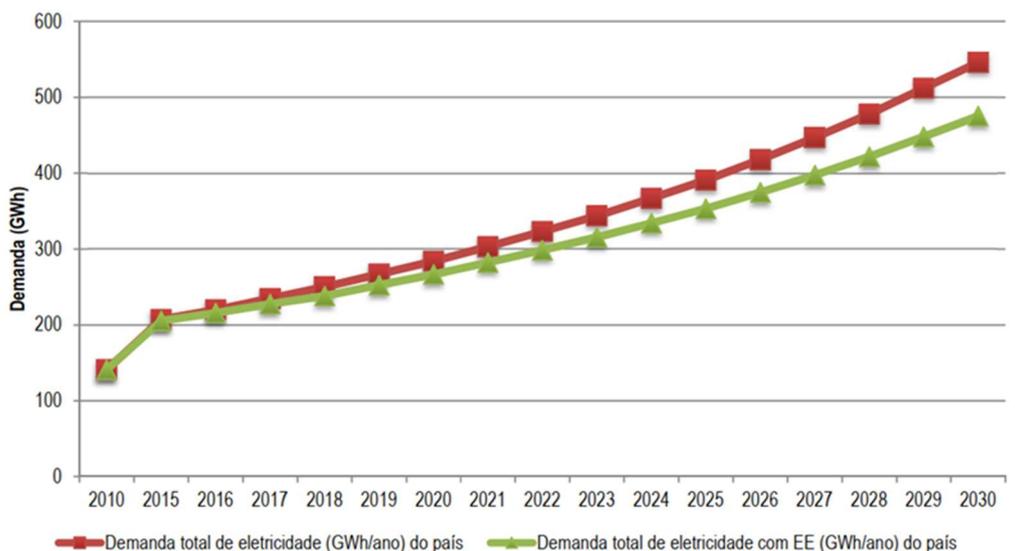


Figura 19: Evolução esperada da demanda nacional (GWh/ano).

Fonte: MEIRN [74].

Esse quadro, indica a necessidade de estabelecer planos e medidas com caráter de urgência visando o atendimento de carga.

4.1.2 Importância do sistema OMVG para Guiné-Bissau

Por tudo o exposto na caracterização do sistema elétrico e na projeção de sua população, urge mais do que a nunca a necessidade de aumentar sua carga interligando suas regiões energeticamente permitindo a ampliação do consumo da população de maneira a atender em grosso modo a demanda por eletricidade.

Certamente, isso, reflete uma infraestruturação do setor energético por meio da construção de linhas de transmissão. No âmbito do projeto regional (OMVG), o sistema possui quatro subestações distribuídas para todo o território, dispostas da seguinte forma, como apresentado na Figura 20, em formato de mapa de transmissão.



Figura 20: Subestações de transmissão da Guiné-Bissau a partir da OMVG.

Fonte: elaboração do autor

Como contido no mapa, cada subestação cobre uma determinada zona do país. A subestação de Saltinho vai cobrir as regiões de: Tombali e Quinara (Sul do país), a de Bambadinca vai abastecer a carga para as regiões de Bafatá e Gabú (Leste), de Mansoa fica a cargo de alimentar a região de Oio (Norte) e por fim, a subestação de Bissau que vai cobrir Bissau e seus arredores e as regiões de Biombo e Cacheu (Norte).

A disposição dessas subestações, já interligadas em rede de transmissão, é apresentada na Figura 21. Embora essa figura seja semelhante à apresentada na 8, há uma pequena diferença: a última inclui a presença da usina fotovoltaica, ou seja, o sistema solar fotovoltaico conectado à subestação de Bissau. Essa conexão é feita por meio da barra 165, que visa conectar o eletrolisador para a produção de hidrogênio verde. Esta barra será destacada no estudo de caso 2.

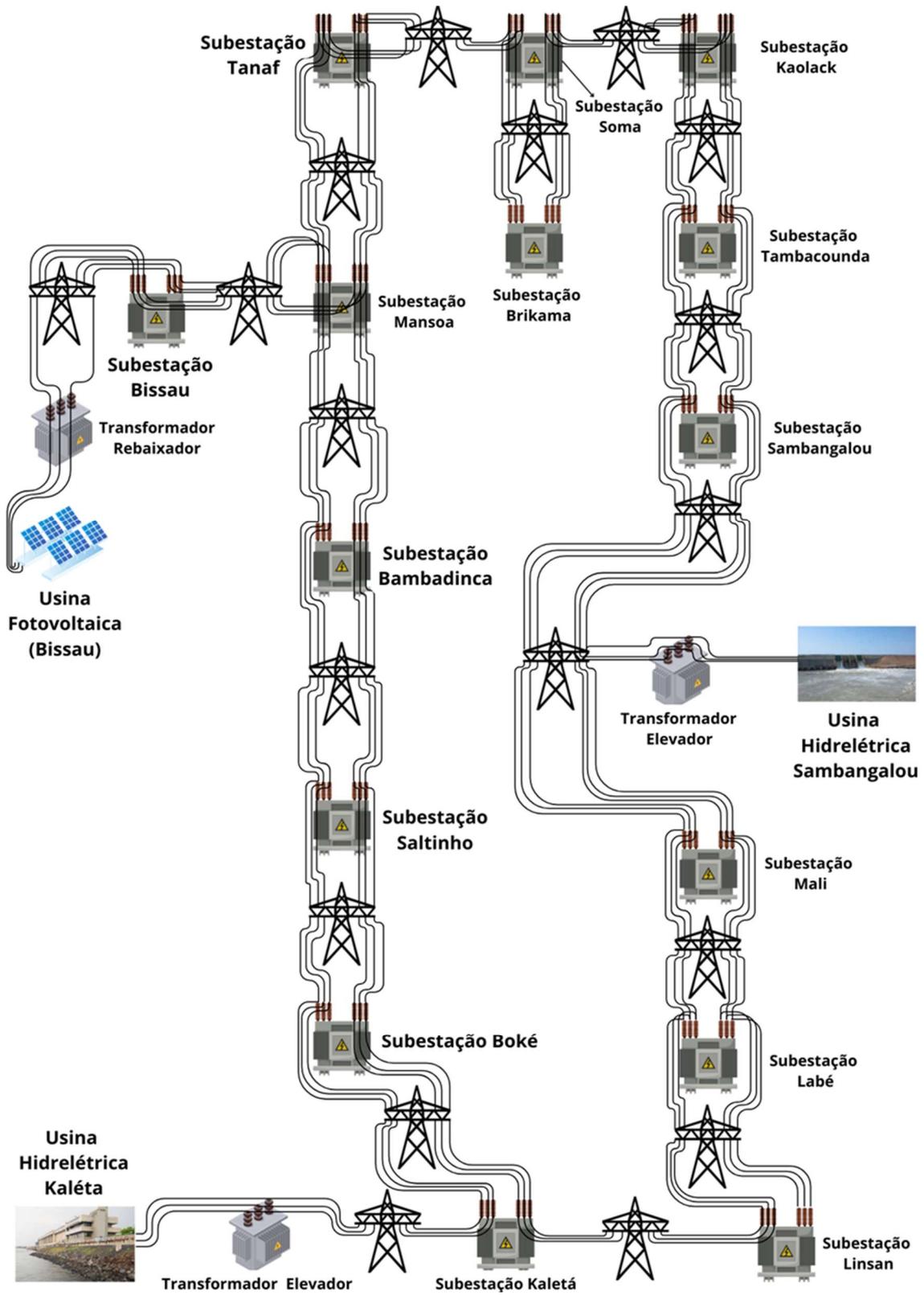


Figura 21: Sistema Interligado Regional da OMVG e conexão Guiné-Bissau

Fonte: elaboração do autor

A responsabilidade de operar a malha de transmissão fica a cargo da organização para valorização do rio Gâmbia (OMVG). Entretanto, cabe a cada um dos Estados membros a responsabilidade de rebater esta malha para o sistema de subtransmissão, e depois, para o sistema de distribuição energia elétrica para toda sua população.

A tensão básica de rede de transmissão é 225 kV, sendo transformada para 30 kV para rede de distribuição [75]. Pela metodologia de coleta de dados, na entrevista realizada no âmbito do projeto OMVG para a Guiné-Bissau, o país tem dois projetos destinados à infraestruturação do sistema de distribuição de energia elétrica.

O primeiro é designado de “PRAE”, Projeto Regional de Acesso a Eletricidade, é financiado pelo Banco Mundial. O segundo projeto é financiado pelo Banco Oeste Africano para Desenvolvimento (BOAD), igualmente designado de “Projet d’électrification de quatorze localites proches des postes 225 kV Bambadinca, Saltinho et mansoa” [52], [75].

A implementação destes projetos de fato, permitirá a conexão da rede elétrica próximo do consumidor impulsionando assim o consumo por eletricidade no país de forma significativa, e isso terá avanços em muitos aspetos em termos do desenvolvimento.

Ora, dada a extensão territorial e a composição de cada uma das suas regiões por diferentes setores que no total são 36 para todo território Nacional como mencionado no início do estudo deste caso, essas cargas são insuficientes para atender toda a demanda que com certeza não deve ser só da população, mas também industrial. Não restam dúvidas que a Guiné-Bissau é um país com processo da industrialização incipiente e que é preciso o seu arranque.

Igualmente, nesta nova era da urbanização, as pessoas tendem a consumir mais energia, realizar mais lazer, fazer mais tempo de jornadas de trabalho, usar recorrentemente alguns eletrodomésticos como gás de cozinhas, televisão, microondas e mais. Nesse sentido, é salutar ao Estado a busca por mecanismos de aumento de carga para corresponder a essa demanda.

Portanto, devido toda esta necessidade, sugere-se que ela transforme Saltinho e Cussilinta como pequenas centrais hidrelétricas, cujos estudos foram realizados nos anos de 1980 faltando apenas a construção. Com a construção dessas usinas como barras de gerações, e o país continuando com o fornecimento contínuo da energia da OMVG de

que ele tem o direito, de fato, isso multiplicará mais a carga, e a tenderá com certeza todo o território nacional de modo cabal [69].

A Figura 22 mostra o esquemático para o ampliado de carga para todo o território Nacional tendo Saltinho e Cussilinta com barras de gerações de energia elétrica.

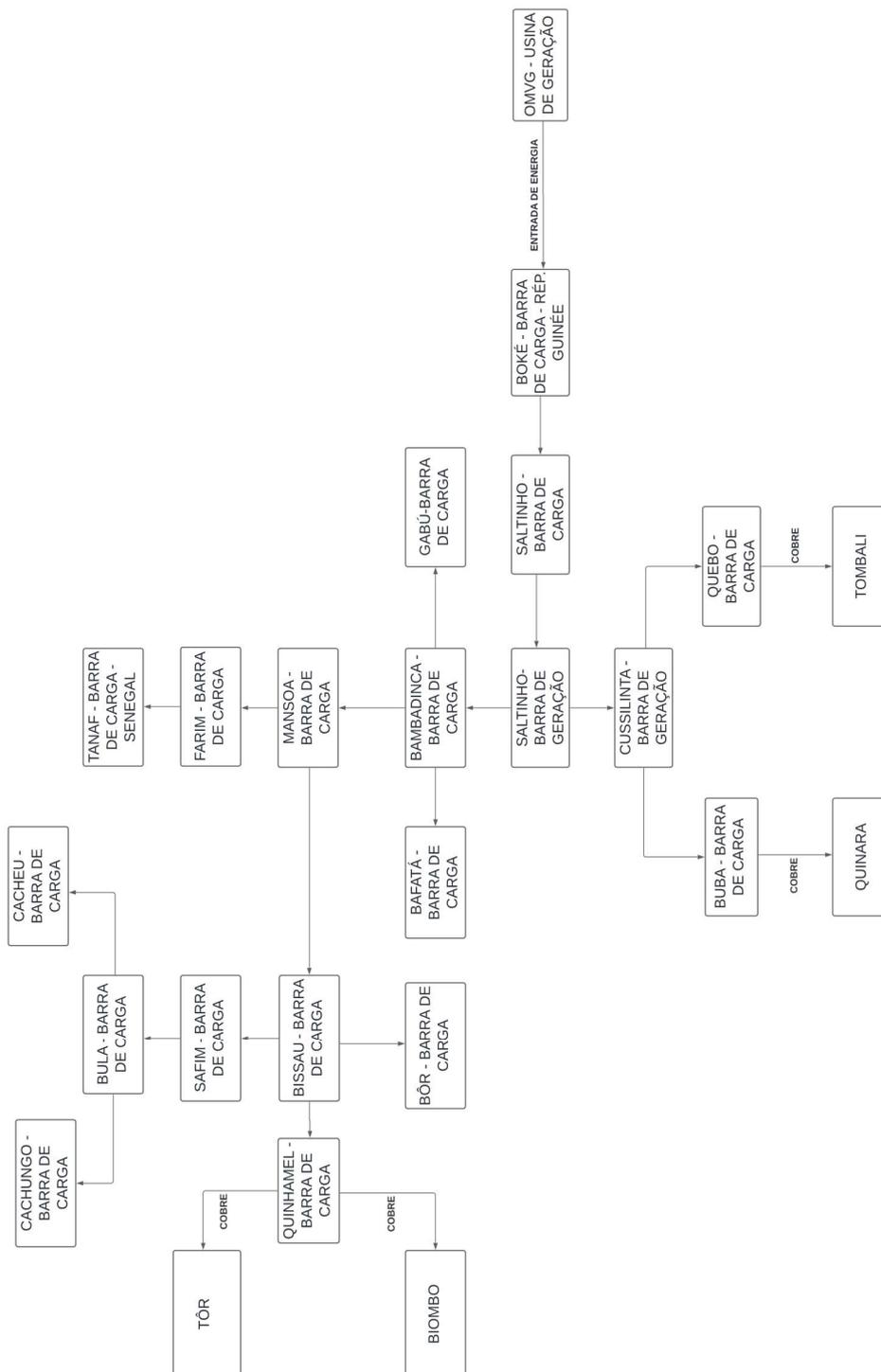


Figura 22: Ampliação da carga do sistema energético da Guiné-Bissau

Fonte: elaboração do autor

Conforme exposto na figura 23, Saltinho continuará como barra de carga da OMVG, recebendo a energia vinda de Boké e, ao mesmo tempo, funcionando como barra de geração, juntamente com Cussilinta, que é a usina a jusante de Saltinho. Ambas as usinas, ao gerarem energia aumentam a capacidade de carga, permitindo que o país por meio do MEIRN, possa instalar outras subestações de cargas às já existentes.

As subestações de Gabú e Bafatá somam-se à subestação de Bambadinca para atender todo o leste do país. Mansoa e Farim cobririam todo Oio, Bula ligaria as subestações de Canchungo e subestação do setor de Cacheu para atender toda a região de Cacheu. A subestação de Quinhamel alimentaria Bijimita, tôr, e secção de Biombo. A subestação de Bissau cobriria seus arredores e ligando à subestação de Safim e Bôr. A usina de Cussilinta abasteceria toda a região de Quinara e Tombali através das subestações de Buba e Quebo, assegurando que toda a parte continental do país fosse contemplada com energia elétrica.

4.2 ESTUDO DE CASO 2: INTEGRAÇÃO DO HIDROGÊNIO EM BOLAMA

Neste estudo do caso 2, como enfatizado na metodologia, igualmente refere-se a Guiné-Bissau, porém especificamente a região de Bolama que é uma parte insular do país e por esta razão não está interligada na rede da OMVG. Ela é composta por mais de 88 ilhas e ilhéus, dentre essas, poucas são habitadas [55], [77]. A intenção é levar P2G2P como proposta do estudo para abastecimento de seis ilhas que são: Bolama, Bubaque, Ilha de Formosa, João Viera, Ilha de Orango e Rubane.

Existem muitas ilhas na região de maiores ou menores extensões com diferentes densidades demográficas, no entanto, para este estudo foram escolhidas seis delas. A Figura 23 que segue apresenta essas ilhas.



Figura 23: Ilhas com marcas em vermelho destinadas para P2G2P

Fonte: Pedro Narra [78]

4.2.1 Instalações P2G2P

As instalações P2G2P são compostas por: eletrolisador, células combustíveis, e tanques de armazenamento de hidrogênio. Essas instalações podem ser autônomas, alimentadas apenas por energia produzida por fonte solar ou eólica, ou a combinação de ambas, assim como podem trabalhar com a rede elétrica, diferem a depender do tipo de eletrolisador a ser utilizado [38].

As instalações P2G2P começaram com a Figura 21 apresentada no estudo do caso 1. A usina fotovoltaica conectada na subestação de Bissau é que vai ser destinada para a produção de gás hidrogênio e esse, vai ser armazenado nos cilindros para depois ser transportado via barco para as ilhas mencionadas, o processo de produção será feita 24h por 24h.

Como a usina é conectada à rede elétrica, assim que o período inicial de insolação, considerado na produção de hidrogênio, terminar, a operação continuará, uma vez que, a intenção é fornecer a eletricidade de forma contínua para essas ilhas. O eletrolisador não será interrompido, pois está conectado à energia da rede. A geração de eletricidade nas ilhas a partir do gás hidrogênio será realizada por meio de célula a combustível cuja potência foi dimensionada na metodologia.

Dentro da cidade de Bissau, o local destinado a instalação da usina solar fotovoltaica é Antula que tem polo de insolação bastante elevada. A área destinada para a instalação de painéis fotovoltaicos é de 200.000 m², sendo equivalente a uma área quadrada de lado 447 m. A usina será conectada só a partir da subestação de distribuição utilizando inversores para transformar a corrente contínua em alternada e retificadores transformando a corrente alternada em contínua para o sistema solar e depois para o eletrolisador.

Na Figura 24, é apresentado o mapa de Bissau com a localização de Antula onde será instalada a usina solar fotovoltaica.

A instalação da usina fotovoltaica acontecerá em Bissau concretamente em Antula indicada em vermelho. Portanto, o sistema de transmissão destinado a barra de Bissau será transformado para o nível de consumo residencial com vista à produção de hidrogênio. Esquema para operação de P2G2P partindo de Bissau até Bolama é apresentado na Figura 25.



Figura 24: Localização de Antula no Mapa de Bissau.

Fonte: elaboração do autor

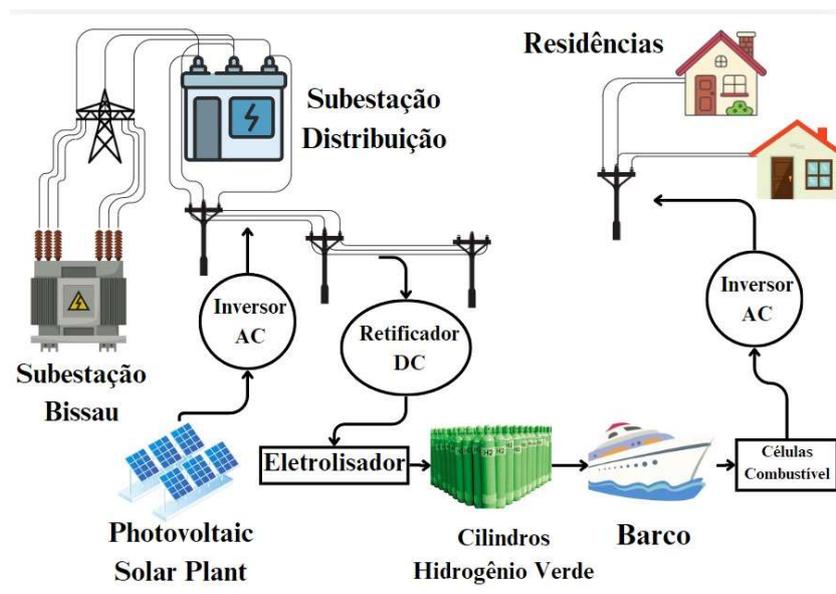


Figura 25: Esquema de P2G2P completo

Fonte: elaboração do autor

Lembrando que não existe rede em Bolama, ou seja, é uma rede ilhada e a opção é o uso de célula a combustível injetando eletricidade diretamente nas residências. Este processo de célula a combustível é mostrado na Figura 26.

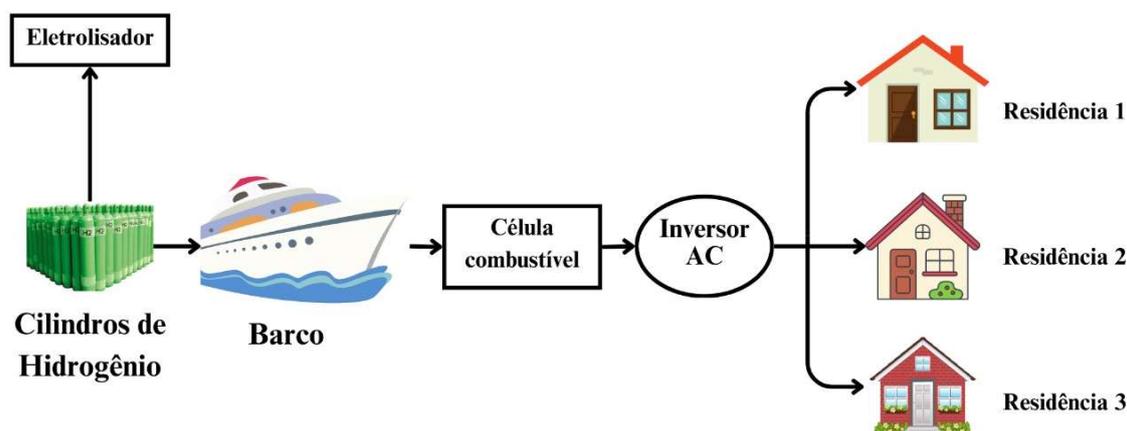


Figura 26: Esquema de abastecimento de energia elétrica com célula combustível

Fonte: elaboração do autor

Dentre os componentes P2G2P, destaca-se o eletrolisador. Ele é um equipamento importante no contexto de eletrólise aquosa, e fundamental para a produção de hidrogênio verde cuja função é dissociar a molécula da água em gás hidrogênio e oxigênio por meio de uma fonte energética. Para a produção de hidrogênio via energia elétrica, foi proposto o eletrolisador PEM visando compatibilizar com a célula a combustível de membrana de troca de prótons (PEM).

4.2.2 Produção de hidrogênio

O processo de produção de hidrogênio pode ser feito por vários métodos e o hidrogênio pode ser nomeclado de diferentes tipos, dentre eles: azul (através de gaseificação do carvão e no gás natural), vermelho (por meio de combustíveis fósseis, tradicionais) e por último, verde (produzido através de energias renováveis) [79].

Hidrogênio tem diferentes aplicações e diferentes uso como destacado no seu referencial. Porém, o processo onde se produz esse gás químico puramente renovável é através da eletrólise aquosa por meio de eletrolisador que é um equipamento que utiliza a energia elétrica vinda de fonte renovável através de corrente contínua para dissociar a molécula da água (H_2O) em oxigênio e hidrogênio através de uma reação química chamada eletroquímica [48],[80].

Usar energia elétrica para quebrar a molécula de água, não só gasta a água como também a própria energia. Por isso, entende-se que a usina solar projetada para esse efeito precisa de auxílio para realizar esse trabalho com mais eficácia e a rede elétrica da qual a subestação de Bissau se conecta é uma fonte renovável, o que facilita a operação de 24h sobre 24h do eletrolisador para a produção do hidrogênio que deve estar livre de CO_2 .

Como já destacado, eletrólise aquosa é uma reação em se realiza a decomposição das moléculas de oxigênio e gás hidrogênio. A aplicação desse método já dura a muitos anos, desde século XIX e XX [81], [82]. E nesta fase de transição energética vem ganhando cada vez mais a força, visto que as emissões de CO₂ e seus efeitos catastróficos, conclamam o mundo para uma busca de fontes renováveis.

4.2.3 Eletrolisador (PEM)

Por contextualização histórica, a primeira PEM da água, foi idealizada por Grubb na General Co no princípio dos anos 50. Porém, o desenvolvimento desta tecnologia foi a partir dos 1966, o intuito visou a tentativa de quebrar as inconveniências impostas pela eletrólise alcalina de água na então época [83].

O uso de eletrolisador PEM, na produção de hidrogênio, insere na perspectiva de combustível sustentável que não emite CO₂, aliás, o hidrogênio é produzido por meio de fontes renováveis, isto é, solar e eólica, pensando na preservação ambiental, pois são fontes energéticas sustentáveis [84].

A Tabela 23 e a Figura 27 apresentam respectivamente a característica do eletrolisador e o esquema de seus eletrodos.

Tabela 23: Característica do eletrolisador PEM.

Estado de tecnologia	Maduro
Transporte de carga	H^+
Máxima operação de temperatura	80 (90) °C
Eletrólito	Polímero de ácido PFSA sólido
Faixa de pressão teórica	0,1–3,5 MPa
Densidade de corrente	0,6 – 3 A/cm ²
Tensão cíclica do eletrolisador	1,7– 2,4 V
Possibilidade de alimentação cíclica	Bom
Vida útil do eletrolisador	10.000 – 50.000h
Eficiência do eletrolisador	62 – 90%
Pureza do hidrogênio	99,999%

Fonte: Kotowicz et al [38].

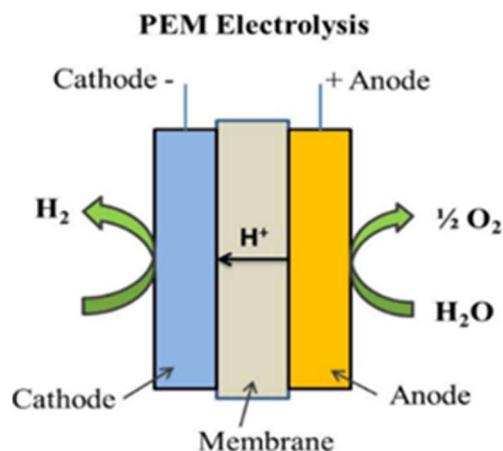


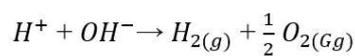
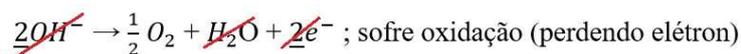
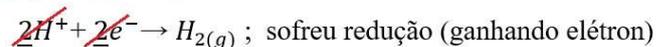
Figura 27: Esquema de funcionamento do eletrolisador PEM.

Fonte: Kumar et al, [83]

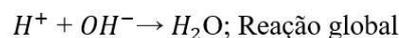
A seguir é apresentada a reação eletroquímica de eletrólise aquosa. Vale destacar que existem dois tipos de eletrólise: a ígnea, onde é uma reação de fusão de compostos iônicos, requerendo as altas temperaturas para dissociar os compostos no estado sólido para líquido. E eletrólise aquosa é feita exclusivamente por meio de água, porém demanda muita energia para a sua dissociação.

Este último, é o que se aplica sobre a produção de hidrogênio verde. Entretanto, existem diferentes tipos de eletrólise aquosa como, eletrólise da água Alcalina (AEL), a eletrólise de membrana de troca de prótons (PEM) definida acima. Eletrólise de água por Óxido sólidos (SOE) e por último, eletrólise da água por membrana de troca aniônica (AEM) [79].

A seguir, segue o processo estequiométrico da eletrólise aquosa:



ou



Explicando a Figura 27 com a reação de eletrólise apresentada, tem-se: o eletrolisador tem dois eletrodos, cátodo polo negativo (-) e o anodo polo positivo (+). Com auxílio da energia elétrica através do gerador e o catalisador que vai separar o barramento dos eletrodos, a molécula da água se dissocia formando assim, H^+ e hidroxila (OH^-) como apresentados na reação da dissociação da água.

Os íons de H^+ fluem do ânodo para o catodo como indicado na Figura 27 e junto dos elétrons, eles formam o gás hidrogênio ($H_{2(g)}$). A Hidroxila (OH^-), por sua vez, quando reage no ânodo, eles perdem seus elétrons, formando assim, o oxigênio e a água.

Portanto, através dos elétrons de hidroxilas separados, a fonte energética usada, que neste estudo de caso 2 é solar, vai bombear esses elétrons para o cátodo e novas moléculas de água serão formadas, e assim o ciclo se repete continuamente até quando esgotar totalmente a água ou energia usada para processo de dissociação, por isso se diz que a sua produção demanda muita energia.

4.2.4 Células de combustível com membrana de troca de prótons (PEM)

A tecnologia de células combustível tem grande importância no contexto de transição energética, pelo fato das células a combustível serem opções viáveis para substituição dos geradores de combustíveis fósseis no que tange ao fornecimento de energias a localidades distantes de metrópoles, e onde é difícil acesso à energia elétrica, devido a não penetração da rede elétrica pública [85].

Existem diversos tipos de células a combustível no processo de eletrólise acoplado ao eletrolisador, dentre elas tem-se: células a combustível alcalinas (AFC) que usam como base hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NOH) como eletrólitos. Células a combustível de carbonato fundido (MCFC) que é uma combinação de carbonatos alcalinos e células a combustível de oxido de sólido (SOFC), utilizam como eletrólito óxido de metal não poroso. Células a combustível de ácido fosfórico (PAFC), têm como eletrólito ácido fosfórico concentrado. E por fim, células a combustível de membrana de troca de prótons (PEM ou PEMFC) [48], [82], [86].

A função de célula a combustível, é converter a energia eletroquímica do gás hidrogênio diretamente em eletricidade [38],[48], [86]. Nesta dissertação apenas, a última célula é preterida em detrimento de outras devido sua eficiência na conversão de eletricidade.

De acordo com Kumar et al [83], “a tecnologia do eletrolisador PEM e da célula combustível PEM se assemelham, e uma das vantagens da membrana de troca de prótons, é a alta condutividade de prótons ($0,1 \pm 0,02 \text{ S cm}^{-1}$), menor permeabilidade a gases, menor espessura, assim como a operação de alta pressão, a baixa emissão de CO_2 , e alta eficiência”.

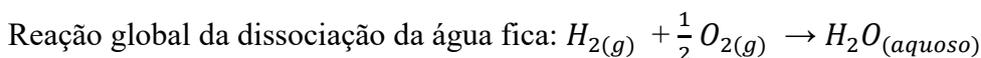
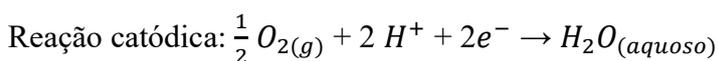
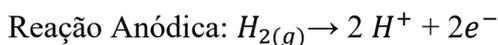
4.2.5 Funcionamento de célula combustível PEM

O seu princípio de funcionamento para a produção de eletricidade se assemelha com o do eletrolisador, aliás, a reação e a figura 28, assim como a interpretação apresentadas no eletrolisador são válidas para a célula a combustível PEM, porém, existem uma pequena diferença. Como já definida, é uma tecnologia que realiza o processo inverso do eletrolisador, ele converte o combustível químico já armazenado em eletricidade.

Ela pode ser aplicada gerando eletricidade para uma indústria, residência ou para motor de um carro. Em termos do princípio de funcionamento, baseando na dissociação da água, o gás hidrogênio sofre oxidação doando assim seus elétrons, e o gás oxigênio sofre redução ganhando elétrons.

Pela ligação covalente (compartilhamento de elétrons de um metal e ametal ou entre ametais), oxigênio faz dupla ligação com seus átomos, ora, pelo catalisador no eletrodo, ele quebra essa dupla ligação, transformando assim em duas moléculas simples. A molécula de H^+ fluem para o cátodo e com elétrons, transformando em molécula de (O_2) e essa por sua vez vai reagir de novo no H^+ , transformando logo em água.

Portanto, é assim o princípio de funcionamento de célula a combustível para a produção de energia. Pega o gás armazenado e converte ele em eletricidade e tendo como produto final energia elétrica e água. Evidenciando essa reação tem-se:



Salienta-se que esse procedimento já foi feito quando se tratou do eletrolisador, e é válido para célula PEM, porém, ainda que esses dois componentes de P2G2P sejam quase idênticos, é notória uma pequena diferença no funcionamento como explicado acima. A ilustração dessa reação é mostrada na Figura 28.

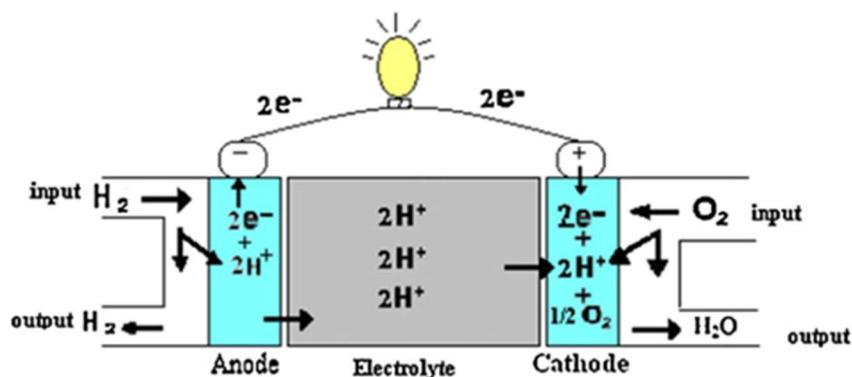


Figura 28: Células combustível PEM, sua reação e seus eletrodos

Fonte: Mekhilef et al [85]

Dentre as diversas vantagens de célula PEM, uma delas é a substituição de motor de combustão interna que emitem CO_2 . Para esta dissertação, a escolha de célula de membrana de troca de prótons, deve-se a necessidade de abastecer uma área considerável para utentes de energia elétrica nas localidades escolhidas para a região de Bolama.

A PEM escolhida foi de 50 kW, essa célula tem a capacidade de ser aplicada para fins de transportes, como também energético, ela é de alta eficiência e densidade maior de potência para abastecer as residências, alinhando-se com o formato comercial a que se pretende compatibilizar com o eletrolisador escolhido [87].

4.2.6 Características de células combustível PEM

A célula PEM pode operar com temperatura operacional variáveis podendo ser abaixo de 60 a 120°C. É leve e muito rápido na inicialização do processo, também possuem uma vida útil longa em comparação com outras células, e, é barato em termos de fabrico em detrimento de outras espécies. A sua eficiência ronda na faixa de 40 a 50%, podendo ir até 60%, igualmente, possuem menor custo de manutenção, pelo fato de possuir peças móveis nas pilhas de geração de energia [85].

Em suma, a Tabela 24 apresenta as informações adicionais sobre suas características.

Tabela 24: Resumo das características de célula PEM.

Modelo	Célula combustível de membrana de polímero de eletrólito
Eletrólito	Membrana de polímero sólido
Temperatura de operação	50 – 120° C
Portador de carga	Íons de Hidrogênio
Combustível	Hidrogênio
Catalisador	Platina
Eficiência	40 – 60%
Potência	1 W – 1000 kW
Uso	Transporte, UPS, dispositivos móveis
Durabilidade	20.000 h

Fonte: Kotowicz et al [38]

4.2.7 Armazenamento e transporte de hidrogênio verde

O armazenamento do hidrogênio é uma tecnologia essencial dentro dos componentes P2G2P para o avanço desse vetor energético. Para este trabalho definiu-se a pressão de 30 MPa que corresponde a 300 bar, em termos de classes de cilindros, adotou a classe do tipo IV (4), pois, levou-se em conta o peso e a pressão, lembrando que o transporte deve ocorrer de Bissau para Bolama, o que vai demandar muitos custos.

Segundo Cruz-Soto [48], “Hidrogênio é um gás inflamável não tóxico muito leve e volátil com ampla gama de concentrações inflamáveis no ar (4% a 75%) e possui uma energia de ignição mínima, apenas um décimo de ignição da gasolina, que é o aspecto mais arriscado associado ao seu uso”.

Por causa disso, a sua segurança deve merecer uma atenção especial, sobretudo quando se trata de fins energéticos, onde é exigido um contato com o gás diretamente, por isso, deve ser bem armazenado e transportado para o local destinado à sua aplicação final.

Existem diferentes classes de armazenamento do hidrogênio denominado dos tipos “I, II, III e IV, cada uma dessas classes tem suas particularidades e seus fins, e para a escolha de classe, são levados em consideração os fatores como, pressão, peso, diferentes compósitos (materiais de composição) e diferentes aplicações [88].

Classe do tipo IV, características

- Vaso de pressão confeccionado em liner polimérico totalmente envolto em compósito fibra- resina. A porta é metálica e entrada na estrutura (boss).
- Esta classe também se destina para as aplicações portáteis, onde a redução do peso é essencial.
- Os revestimentos mais utilizados são: Polietileno e poliamida (graus semicristalinos específicos).
- É considerada uma tecnologia madura para uma pressão ($P \leq 350$ bar)
- Para as pressões de 700 bar, está em desenvolvimento.
- Excelente desempenho em termos de custos e peso [88].

A Figura 29 apresenta a imagem desta classe do hidrogênio.

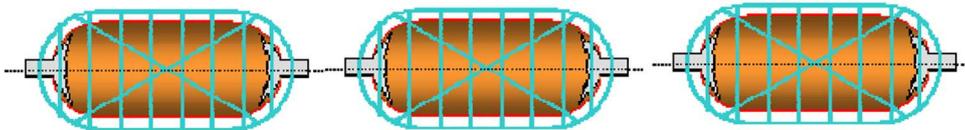


Figura 29: Classe do armazenamento do hidrogênio tipo IV

Fonte: Herve [88]

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do planejamento eletroenergético da Guiné-Bissau, considerando tanto o estudo elétrico de conexão com o sistema de transmissão do OMVG (Caso 1) como também o estudo energético de integração do hidrogênio (Caso 2), todos partindo das premissas da Organização para Valoração do Rio Gâmbia (OMVG).

Para iniciar a discussão sobre os resultados, são apresentados os estudos relativos aos critérios e análises da estabilidade desse sistema, com a ideia de validar os casos.

O sistema elétrico de potência (SEP) é uma rede complexa que inclui: geradores, cargas, transformadores, linhas de transmissão, barramentos, disjuntores, para-raios, relés e muito mais. Portanto, o planejamento, operação e controle dessa rede enfrentam vários desafios, e a viabilidade deles, depende de métodos e mecanismos visando a sua segurança.

5.1 ANÁLISE DA REDE ELÉTRICA

Análise de segurança de uma rede elétrica é fundamental para a sua estabilização, e pode ser dividida em duas fases: análise de segurança estática e análise de segurança dinâmica.

A estática, se preocupa em saber, se dada a ocorrência de uma perturbação o sistema vai ou não possuir um ponto de operação onde limites de tensão, carregamento e frequências são atendidos, ela é estudada sob ponto de vista de regime permanente.

No concernente a da dinâmica, o essencial é verificar se o sistema é capaz de suportar uma perturbação e encontrar o ponto de equilíbrio. Esta segunda análise envolve mais elementos dentro si, como: máquinas, estabilizador de tensão, regulador de velocidade, frequência e próprio fluxo de carga [89].

5.1.1 Critério de segurança N - 1

Para a confiabilidade do sistema OMVG estudado, adotou-se o critério N-1 para avaliar o comportamento da rede face a um determinado problema. A análise deste critério é realizada considerando uma natureza determinística e não probabilista, porque, as contingências ocorrem sempre na rede elétrica.

O estudo deste sistema é teste, e serve como base de auxílio aos planejadores do sistema OMVG que operam sua malha de transmissão no Sistema Interligado Regional (SIR), como também para advertir os planejadores do sistema bissau-guineense na operação de suas quatro subestações perante a ocorrência na operação da rede elétrica.

De acordo com ONS [90] “O planejamento de operação elétrica tem como base o critério N-1, consiste na perda de um elemento sem corte de carga. A sua análise contempla, a saída de linhas em corrente alternada e contínua, transformadores ou unidades geradoras, bem como equipamento de controle de tensão ou alguma contingência referente a um curto-circuito”.

O critério N-1 é simples e não é abrangente para o sistema da rede elétrica no seu todo, apenas considera a perda de um elemento e o seu restabelecimento durante uma certa hora, não considera a natureza probabilística, aliás, é o que lhe difere dos critérios N-2 e N-3, que associam mais de 1 ou 2 elementos do sistema prevendo que a saída de um equipamento pode afetar outro subsequente.

Fellow et al [4], afirmam que: “ O critério N-1 no planejamento de transmissão exige que uma interrupção de um único componente não cause qualquer instabilidade do sistema, sobrecarga térmica, redução de carga ou interrupções em cascata”.

A razão de adoção deste critério está associada as simulações feitas para as cargas: pesada, média e leve referente ao sistema OMVG, e elas são agrupadas em duas análises já mencionadas acima que por sua vez são oriundas dentro do critério de segurança N-1.

5.1.2 Análise da carga

Um dos objetivos de SEP é atender a demanda de carga aos consumidores de forma segura e ininterrupta. A carga elétrica é um importante parâmetro dentro de um SEP, ela é variável em função do comportamento de seus utentes, sejam eles, consumidores residenciais, industriais e comerciais. E dado este perfil, é dividida em: pesada, média e leve.

A rede elétrica abastece a carga aos consumidores 24h sobre 24h e nesta fase, o período de consumo é dividido em período de pico onde há mais expoente de consumo e período fora de pico, considerado período com menor intensidade de consumo na rede elétrica. Coincidentemente, os quatro países de OMVG têm o mesmo fuso horário.

A carga pesada ocorre no período de pico, isto é, das 17h às 21h, a média ocorre a partir das 7h até 17h e volta ocorrer a partir das 22h até as 0h, por último, a carga leve, ocorre a partir das 0h até 7h, e assim se completa o ciclo da operação de 24h do dia para a rede elétrica.

5.1.3 Análise de contingência estática

Como salientado anteriormente, esta análise é feita sob ponto de vista de regime estático (permanente). Para o sistema teste OMVG, selecionou-se 15 contingências que consistiram na perda de linha de transmissão que interliga cada uma de suas subestações.

Com isso, intenta-se verificar se o sistema encontraria o ponto de equilíbrio e quais barras, operariam com sobretensão ou subtensão e quais estariam na faixa definida pelo programa Anarede, isto é $[0,95 \text{ a } 1,05pu]$. Valores de tensões abaixo desta faixa são caracterizadas de subtensão e acima desta são ditas sobretensão, ou seja, tensão abaixo ou acima da nominal. Por fim, verificam-se quais linhas são convergentes e quais divergentes.

A Tabela 25, apresenta as contingências de linhas de transmissão correspondentes a cada subestação.

Tabela 25: Contingências e nomes de cada subestação

Contingência	Linha
1	100 - 120
2	120 - 130
3	130 - 140
4	140 - 150
5	150 - 160
6	150 - 170
7	170 - 180
8	180 - 190
9	180 - 200
10	200 - 210
11	210 - 220
12	220 - 230
13	230 - 240
14	240 - 250
15	100 - 250

Fonte: elaboração do autor

Analisando as três primeiras cargas sem a presença da usina fotovoltaica e comparando com as três últimas com a da fotovoltaica tem-se que, para ambos os seis casos analisados com 15 contingências, apresentaram em comum as subtensões e sobretensões em algumas barras do sistema, o que implica na necessidade de instalação de reatores em algumas barras e desligar em outras instalando banco de capacitores afim de elevar e abaixar o perfil de tensões.

Porém, quando se verifica as situações severas, houve diferença, aliás, nas três primeiras análises ocorreram divergências nas contingências 1, 2, 3, 4, 6, 10 e 11 em grosso modo para a carga pesada. Enquanto, com a instalação da usina solar fotovoltaica, se registrou 2 situações severas para a carga pesada, uma para a média e para a carga leve não constatou nada de gravidade. Portanto, entende-se que a diferença do comportamento do sistema nessa análise com relação as duas situações se deveram a instalação de uma barra PV, o que permitiu equilibrar mais o sistema diminuindo as gerações que aconteciam mais nas duas barras iniciais, isto é, Kaléta e Sambangalou.

Vale salientar que, a capacidade de linha de cada subestação é 240, e ao longo da aplicação de contingência não houve nenhuma violação, todos os fluxos de potência tanto ativas como reativas nas linhas não ultrapassaram esta faixa, o que permitiu concluir que, análise de contingência estática foi realizada com êxito, pois permitiu a observância do sistema no seu todo sob ponto de vista de regime permanente.

5.1.4 Análise de contingência dinâmica (transitória)

A análise de contingência estática é limitada de ponto de vista da operação da rede elétrica, isto, porque congrega menos componentes para a rede, o que difere da dinâmica, esta tende a ter um olhar mais holístico ao sistema, e dar maior resposta em termos da estabilidade da rede, visto que possui elementos como: estabilizador, regulador de velocidade, de tensão e outros elementos associados que permitem a verificação do comportamento e a operação do sistema em tempo real.

A avaliação do comportamento dinâmico de um conjunto gerador e respectivos reguladores baseia-se no estudo da estabilidade transitória, quando submetido a perturbações resultantes de distúrbios no sistema em que o mesmo se encontra conectado.

Para tanto, desenvolve-se a simulação temporal do sistema como um todo, a partir da ocorrência de impactos de diferentes magnitudes e variadas localizações na região de

interesse, impactos estes provocados por variações bruscas de carga ou aberturas intempestivas de circuitos, sejam as mesmas decorrentes ou não de curto-circuito.

Para os estudos de desempenho dinâmico realizados com o programa Anatem nesta dissertação foram consideradas as contingências apresentadas na Tabela 26, elas são representadas por um curto-circuito trifásico.

Dados Utilizados

O sistema elétrico representado no estudo corresponde à área eletrogeográfica do Sistema Interligado Regional (OMVG) com destaque para tensão 225 kV que interliga os países como: Senegal, Guiné Bissau, République de Guinée e Gâmbia. O diagrama unifilar da região está mostrado na Figura 12 final da metodologia, como na Figura 39. Os cenários analisados correspondem aos patamares de carga pesada, média e leve já analisadas na análise estática.

Dados das UHEs

O sistema OMVG, é composto por duas usinas: Kaléta e Sambangalou, portanto, neste item será apresentado os modelos de gerador, regulador de tensão, regulador de velocidade e estabilizador utilizados para simulação no programa Anatem.

Modelo do Gerador

Como apresentado na metodologia, o sistema (OMVG) é composto por 6 geradores para as duas UHEs, sendo três para cada uma, ou seja, três geradores síncronos cujas máquinas primárias são turbinas hidráulicas do tipo Francis. Cada uma das três unidades (UHE Kaléta) possuem capacidade nominal de 87 MVA e 49 MVA para (UHE Sambangalou), baseado no fator de potência adotado na metodologia e nas potências em MW apresentadas na Tabela 1.

Eles foram representados no programa Anatem como máquinas de polos salientes, os dados utilizados estão disponíveis na Tabela 36. A Tabela 37, destaca dados de regulador de tensão, salienta-se também, que os valores percentuais estão na base de potência de cada unidade geradora.

Tabela 26: Contingências analisadas.

Cont.	Curto		Circuito a ser aberto			
	Barra	Nome	De		Para	
			Barra	Nome	Barra	Nome
LINHAS DE TRANSMISSÃO 225 kV						
01	100	Kaléta	100	Kaléta	120	Boké
02	120	Boké	120	Boké	130	Saltinho
03	130	Saltinho	130	Saltinho	140	Bambadinca
04	140	Bambadinca	140	Bambadinca	150	Mansoa
05	150	Mansoa	150	Mansoa	160	Bissau
06	150	Mansoa	150	Mansoa	170	Tanaf
07	170	Tanaf	170	Tanaf	180	Soma
08	180	Soma	180	Soma	190	Brikama
09	180	Soma	180	Soma	200	Kaolack
10	200	Kaolack	200	Kaolack	210	Tambacounda
11	210	Tambacounda	210	Tambacounda	220	Sambangalou
12	220	Sambangalou	220	Sambangalou	230	Mali
13	230	Mali	230	Mali	240	Labé
14	240	Labé	240	Labé	250	Linsan
15	100	Kaléta	100	Kaléta	250	Linsan
16	Perda de 1 unidade geradora da UHE Sambangalou					

Fonte: elaboração do autor

Destaca-se que na análise em regime permanente à carga pesada, não foi possível obter solução para as contingências 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10 e 11 (sistema divergente). No entanto, na análise no domínio do tempo, foi possível encontrar soluções para todos os eventos devido às ações de controle.

Ainda assim, reconhece-se que os eventos 3, 4 e 11 são bastantes críticos, pois suas tensões estão muito abaixo da nominal, indicando a necessidade de corte de carga nessas barras para proteger o sistema, apesar de o sistema de proteção não ser o foco desta dissertação. Algumas barras do sistema possuem reatores e outras não, o que permite baixar ou elevar tensões, mediante a instalando de bancos de capacitores, e o acionamento ou desligamento dos reatores.

Seguindo o procedimento de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), analisou-se cada um dos parâmetros listados na Tabela 27. Esta análise inclui a observação de fluxo de potências nas linhas, abertura angular, potência elétrica, os períodos transitórios e os níveis percentuais de tensões.

Tabela 27: Critério de procedimento de rede do ONS

	Critérios
1	Tensão inferior a 60% da nominal na primeira oscilação
2	Tensão inferior a 80% da nominal após a primeira oscilação
3	Tensão inferior a 90% da nominal ao final da simulação
4	Tensão com variação pico-a-pico superior a 2% em 10s
5	Tensão superior a V _{máx} (DGLT) ao final da simulação
6	Potência reativa de UG ou CER fora da faixa ao final da simulação
7	Violação do critério angular
8	Carregamento de circuito superior a 90% da capacidade de emergência ao final da simulação
9	Atuação de relés

Fonte: elaboração do autor

A Tabela 28, avalia cada um desses parâmetros com relação as simulações realizadas no Anatem, se o parâmetro for respeitado, recebe a indicação ‘OK’; caso contrário, ‘NOK’, indicando que a opção não foi respeitada (não Ok). A avaliação foi realizada para todos os eventos do sistema.

Tabela 28: Análise dos parâmetros da OMVG para os procedimentos de rede

Critérios	EVENTOS														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
2	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
3	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NOK	NOK	NOK	NOK
4	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
5	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
6	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
8	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaboração do autor

O critério 9 que fala sobre atuação de relés, isto é sistema de proteção, não foi o foco de análise nesta dissertação. Apesar da criticidade de tensões de certas barras que vão demandar corte de carga, pois pelo vislumbrado na aplicação de curto-circuito nessas barras as tensões foram bem baixas, algumas chegando abaixo de 0,80 pu.

Os eventos 5 e 8 são severos, ou seja, a aplicação de curto-circuito nas linhas dessas barras, leva o afundamento de tensões, aliás o sistema anel da Figura 12 ou Figura 39, mostra isso claramente, com aplicação de curto nessas linhas, já lhes desvincula do sistema automaticamente levando suas tensões para zero.

Como há muitos gráficos para o sistema e para evitar a apresentação de todos, foram escolhidos apenas os eventos 3 e 11 que representam a criticidade do sistema, e evento 15, que demonstra operação estável do mesmo, com tensões nas barras dentro do padrão definido. Este procedimento foi aplicado aqui a carga pesada, mas é válido também para as cargas média e leve, bem como com a presença da usina fotovoltaica, onde serão desenvolvidos os mesmos moldes de três cargas a seguir.

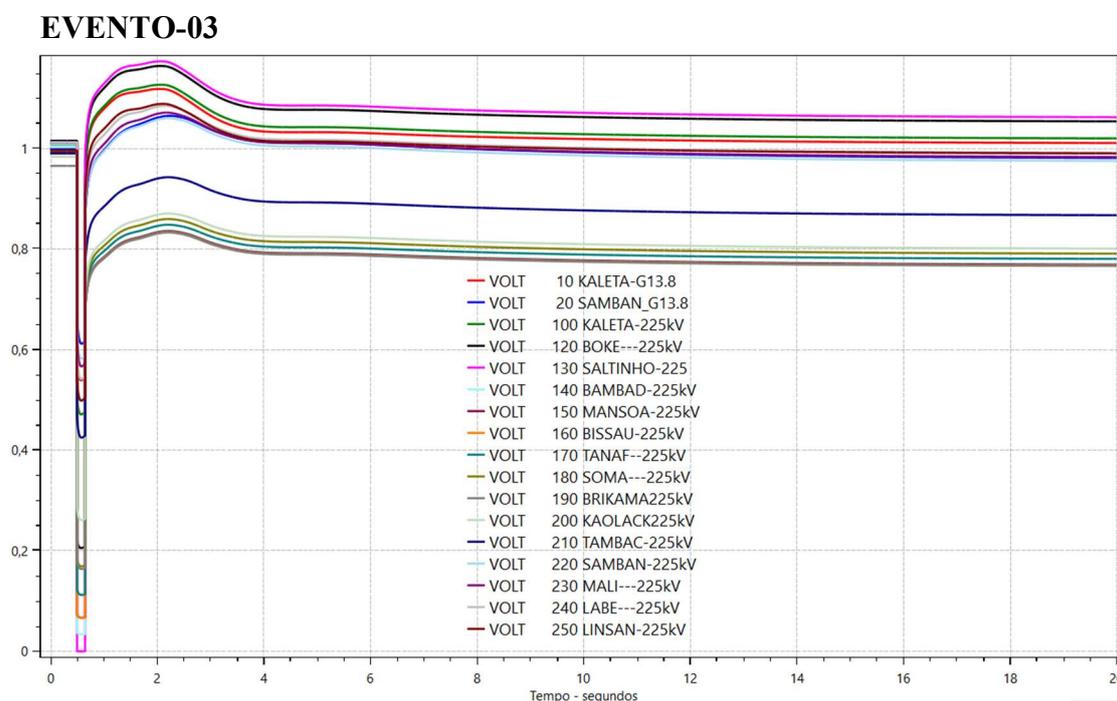


Figura 30: Curto-circuito trifásico barras 130-140 (Saltinho e Bambadinca)

Fonte: elaboração do autor

Como ficou evidente no gráfico, houve 8 linhas que apresentaram subtensões, 5 com tensões bem abaixo de 0,80 pu, ou seja, um afundamento de tensões nesse evento 3.

EVENTO-11

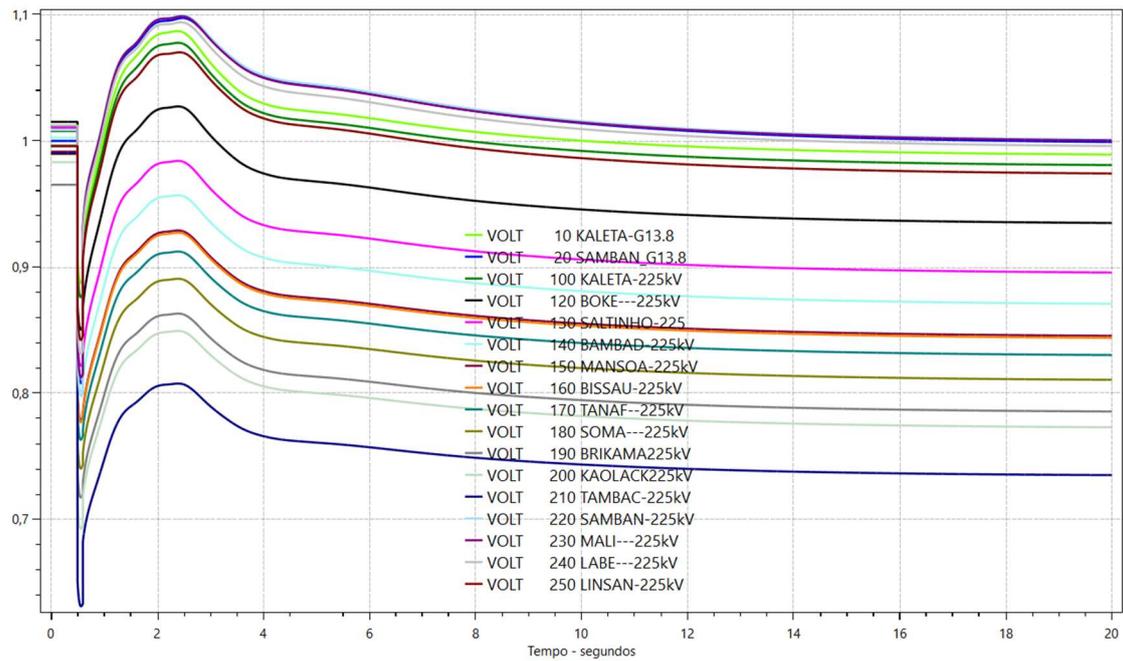


Figura 31: Curto-circuito 3 ϕ barras 210-220 (Tambacounda e Sambangalou).

Fonte: elaboração do autor

EVENTO - 15

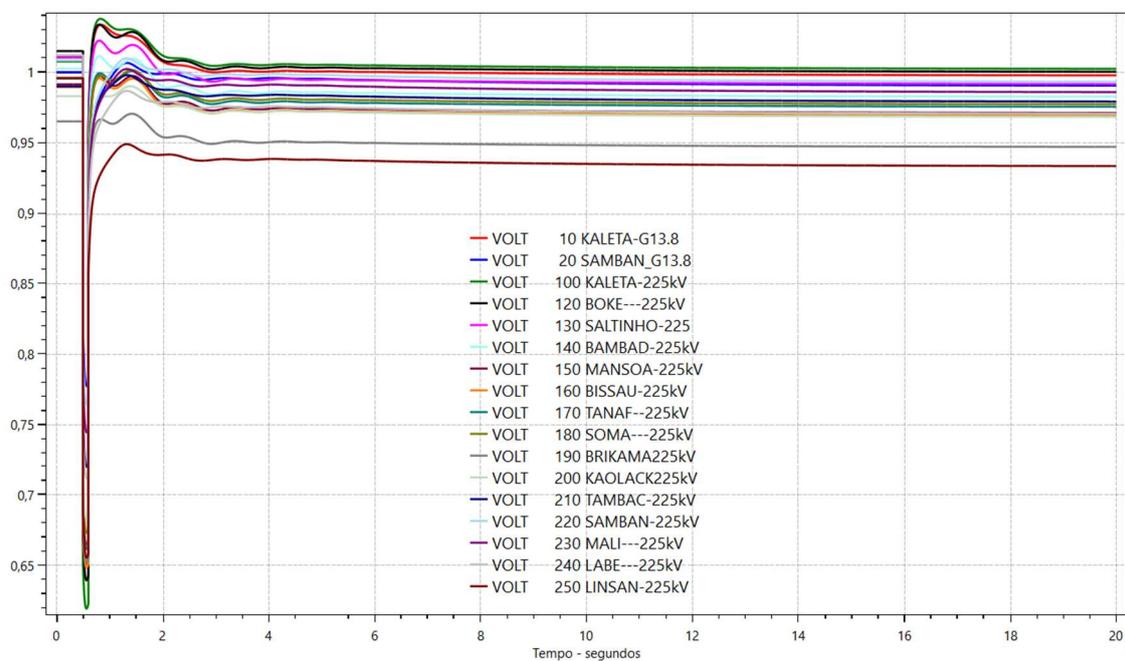


Figura 32: Curto-circuito 3 ϕ barras 100-250 (Kaléta e Linsan).

Fonte: elaboração do autor

Depois, disso, foi feita uma segunda análise dinâmica denominada de contingência 16, apresentado na tabela 33. Trata-se da perda de uma unidade geradora da

usina de Sambangalou. De recordar que cada uma das duas usinas possui 3 unidades geradoras, retirou-se uma de Sambangalou e aplicou curto-circuito para verificar se o sistema é capaz de ser despachado por menos unidades de geradoras.

O resultado desta análise, é apresentado através dos gráficos nas seguintes, onde a Figura 33, Figura 54 e Figura 55 representam a rede sem a presença da usina fotovoltaica e a Figura 55, Figura 56 e Figura 57 com a presença desta usina.

EVENTO – 16- Carga pesada sem UFV

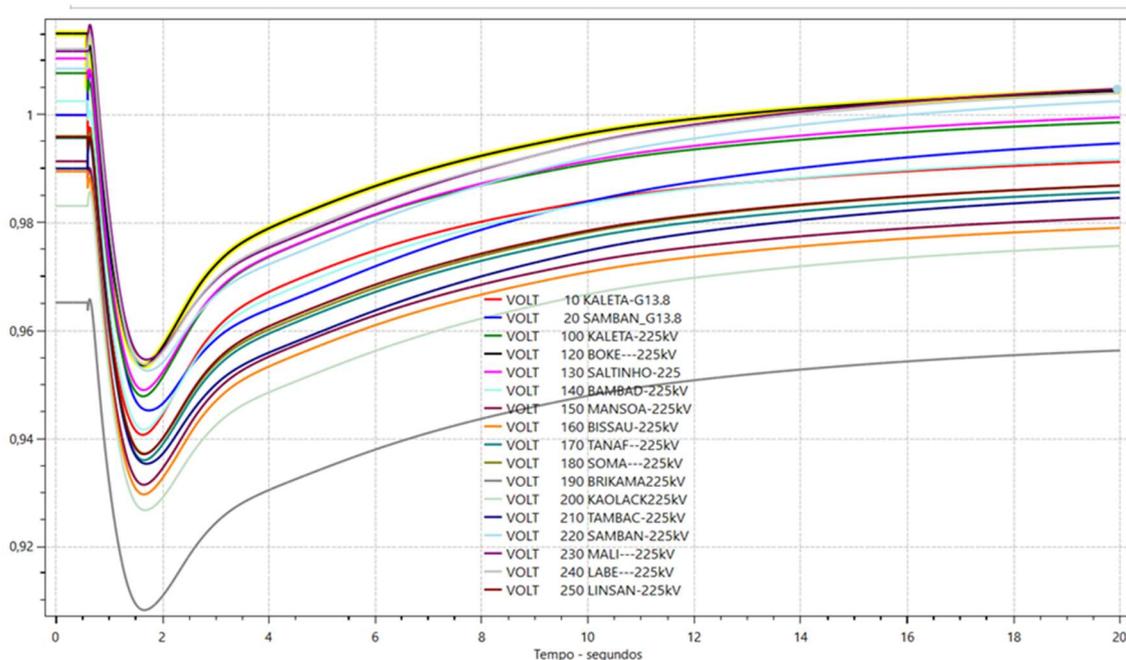


Figura 33: Carga Pesada com perda da geração de Sambangalou sem UFV

Fonte: elaboração do autor

EVENTO – 16- Carga pesada com UFV.

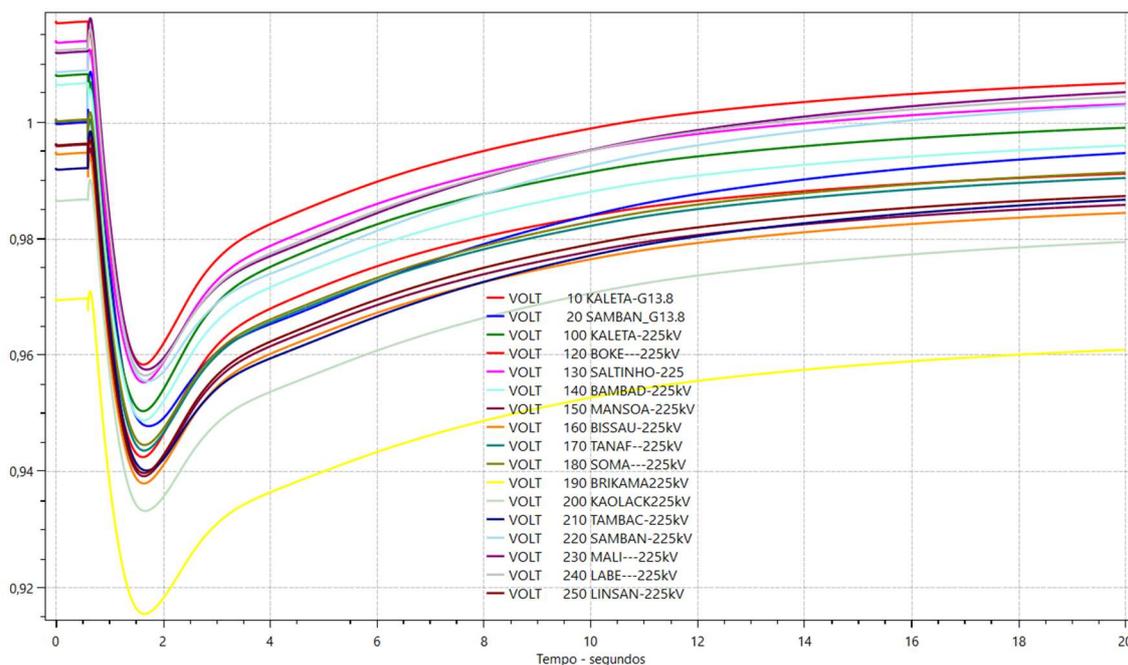


Figura 34: Carga Pesada com perda da geração de Sambangalou com UFV

Fonte: elaboração do autor

Como observado nos gráficos pelos perfis de tensões, mesmo com a perda de uma unidade geradora, o sistema opera normalmente sem nenhum impacto negativo, isso é uma garantia que a usina mesmo tendo 3 máquinas, pode ser despachada apenas com duas sem causar problema para a rede elétrica.

Portanto, depois destes três testes realizados para verificar a consistência do sistema teste da OMVG tanto na análise de contingência estática que consistiu na perda de linha de cada uma de suas subestações como na primeira análise dinâmica que debruçou sobre a aplicação de curto-circuito trifásico nas barras do sistema para eventos variados de 1-15 e por fim, esta última, igualmente no domínio do tempo sobre a perda de uma unidade de geração de Sambangalou. Concluiu-se que, o sistema da Organização para Valorização do Rio Gâmbia está em condições para o seu pleno funcionamento.

5.1.5 Frequências das duas usinas de gerações nos eventos

O equilíbrio entre a carga e a geração é muito importante para o ajuste da geração e consumo na rede elétrica, o sistema OMVG está bastante equilibrado, aliás isto pode ser visto na metodologia para as três cargas calculadas e a geração total. Controle de tensões e frequências, igualmente é fundamental para manter os equipamentos operando

nos valores nominais de fábrica evitando danificações de componentes de rede elétrica. Ou seja, a frequência operando no nível preconizado permite controlar as velocidades de turbinas e a sincronização de controladores.

Para cada evento simulado no domínio do tempo, foi plotado o gráfico de frequência das duas usinas. O objetivo foi verificar se, com a aplicação de um curto-circuito trifásico, haveria um desequilíbrio significativo de frequência. No entanto, conforme observado, não houve um aumento excessivo de frequências em nenhum dos eventos de contingências.

Em todos os eventos, os valores permaneceram abaixo de 62 Hz, operando apenas na faixa de (60, 60,1 até 61,02 Hz). Isso permitiu concluir novamente que o sistema, por meio de suas máquinas geradoras, velocidades e controladores, está em condições de operar normalmente.

5.2 RESULTADOS DO ESTUDO DO CASO 1: CONEXÃO NA OMVG

A Guiné-Bissau é um país cujo sistema energético é operado de forma isolado. Como destacado no estudo elétrico caso 1, tem uma única concessionária que faz função dupla tanto na área de energia como na parte de distribuição de água. Essa empresa é estatal, na área de energia, ela é encarregada de transmitir e distribuir energia elétrica aos consumidores de Bissau.

O papel de geração de energia elétrica que fazia no passado recente, foi substituído pela empresa Karpower que atualmente abastece a carga para a cidade de Bissau com 36 MW dividido em dois grupos de geradores, ambos com 18 MW cada. Essa empresa gera energia para a cidade de Bissau a partir do barco que estaciona no mar, portanto, a geração sujeita as consequências ambientais.

Com o funcionamento em plenitude do sistema OMVG, permitirá a ligação energética das três províncias do país, isto é: Norte, Sul e Leste integrando todas as regiões e mais setor autônomo (Bissau) por meio de linhas de transmissão, inclusive, contribuirá para a redução de possíveis danos ambientais que possam ser causados pela Karpower na geração de energia elétrica.

A operação das subestações de: Bambadinca, Bissau, Mansoa e Saltinho, dará mais fôlego em termos de abastecimento de eletricidade, pois, permitirá que a EAGB possa penetrar em alguns cantos do país, inclusive aumentando a sua capacidade de abastecimento de carga aos consumidores. Essas subestações foram escolhidas estrategicamente por se localizarem nos pontos que facilitam as ligações com outras partes do país. O exemplo concreto é, a subestação de Bissau, liga com duas outras regiões (Biombo e Cacheu). A subestação de Bambadinca abastecerá a carga para toda província Leste, a de Mansoa fica a cargo de abastecer Oio (Norte) e por fim, a de Saltinho a província Sul [52].

Pela extensão territorial e composição de suas 8 regiões administrativas com 36 setores e cada um desses setores é formado por diferentes secções como enfatizado no estudo de caso 1, essa potência, não será suficiente para cobrir todo o território.

Por isso, para ampliação de geração de energia elétrica com vista ao atendimento da demanda de sua população, é necessário efetivar sua 33,94 MW vinda das pequenas centrais hidrelétrica de Saltinho e Cussilinta assim como algumas microbarragens

[69],[72]. Essa potência somada com a da OMVG, tornará o mapa de transmissão mais robusto, visto que, com certeza cobrirá todo território Nacional.

A configuração da energia da OMVG e de pequenas centrais hidrelétricas concernente a Guiné-Bissau foi apresentada na Figura 22. Agregação disso, permitirá de fato, a instalação de novas subestações de energia e ampliação da política de acesso a eletricidade que é um dos problemas que o país enfrenta tal como avançado na justificativa desta dissertação.

Mas, para que haja acesso a eletricidade, é imperativo que haja a carga, o que ela não tinha e agora passa a ter em grosso modo a partir da energia da OMVG. Por consequente, para ilustrar o que foi enfatizado nos parágrafos acima, o resultado da carga da OMVG e da carga interna através de suas pequenas centrais hidrelétricas é apresentado na Figura 35 via mapa de transmissão, mostrando possível configuração do sistema de transmissão que passará a ter com a operação do sistema OMVG.

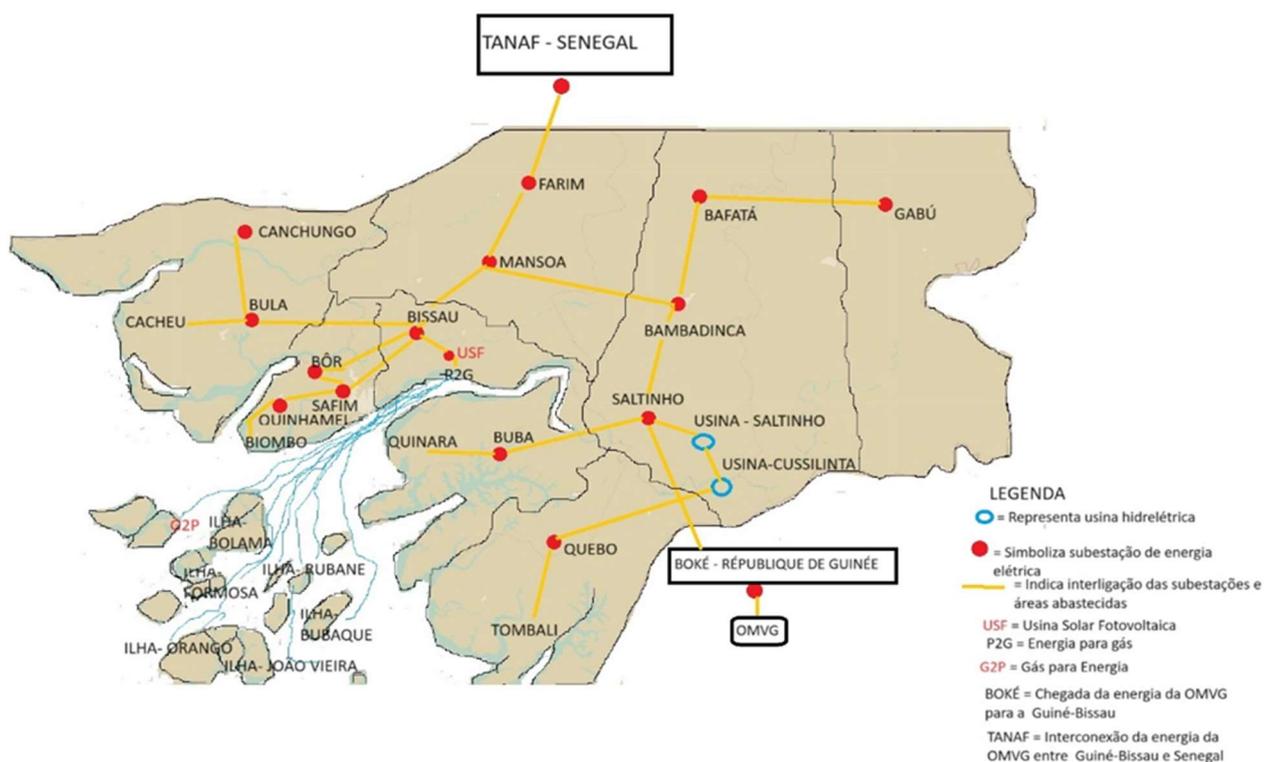


Figura 35: Sistema de transmissão da Guiné-Bissau no projeto OMVG

Fonte: elaboração do autor

Cada uma das subestações, conforme sinalizadas em vermelho, atenderá uma área específica do país. Entretanto, a mesma figura apresenta apenas o mapa de transmissão

de energia elétrica. Ora, para solucionar o problema de acesso à energia elétrica, é vital, a execução do projeto “PRAE” (Projeto Regional de Acesso a Eletricidade), cujo objetivo é o fornecimento de carga aos consumidores a partir da instalação da rede de distribuição de energia elétrica. Ou seja, tendo a rede elétrica da OMVG em funcionamento, é necessário efetivar esse projeto cumprindo assim as metas e perspectivas definidas no estudo de caso 1.

Com o funcionamento do projeto OMVG, a Guiné-Bissau terá outros benefícios adicionais como:

- Exploração de potencial de energias sustentáveis como: solar, eólica e biomassa;
- Diversificar a forma de geração de energia elétrica através de sua matriz apresentada na figura 14.
- Aumentar mais carga para as zonas rurais do país através de EAGB;
- Diminuir o uso em excesso do diesel para geração de energia elétrica;
- Diminuir o uso em excesso da biomassa vegetal (lenha).
- Diminuir a possível poluição ambiental uma vez que OMVG é uma fonte renovável.

O país possui um potencial considerável em energia solar. Portanto, tendo o sistema de transmissão já em funcionamento, é possível aproveitar esse potencial integrando essa energia com a rede elétrica permitindo mais concorrência e ampliação de política de acesso a eletricidade.

A Figura 36 apresenta a insolação e a irradiação por região, destacando o potencial de energia solar. Anualmente, a Guiné-Bissau recebe cerca de 1800 a 2000 kWh/m² de irradiação solar, e diariamente recebe cerca de 4,93 kWh/m² a 5,48 kWh/m² de irradiação [69].

De igual modo, possui algum potencial para o aproveitamento eólico, em média tem entre 4,44 m/s. A Figura 37 resume a velocidade média de ventos em cada região.

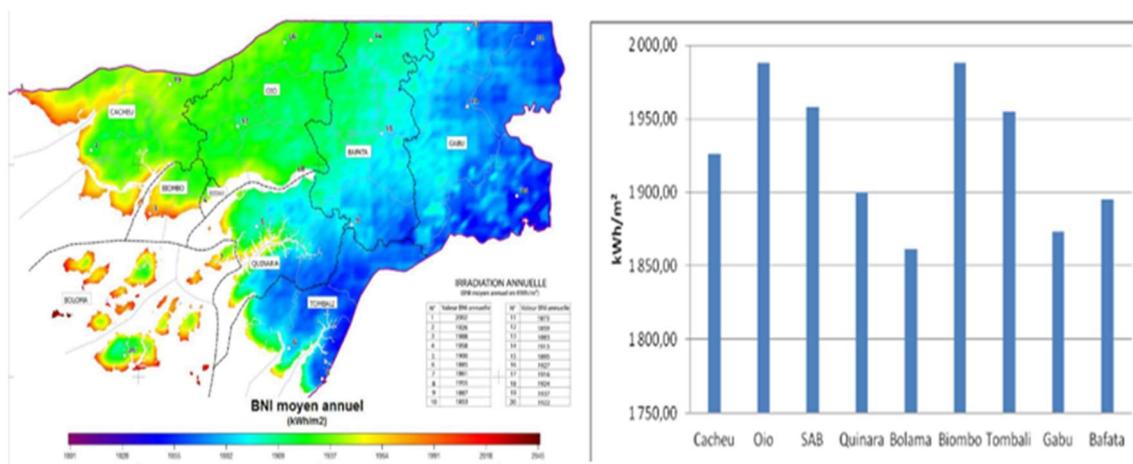


Figura 36: Mapa de insolação e histograma da irradiação anual por regiões do país.

Fonte: MEIRN [69].

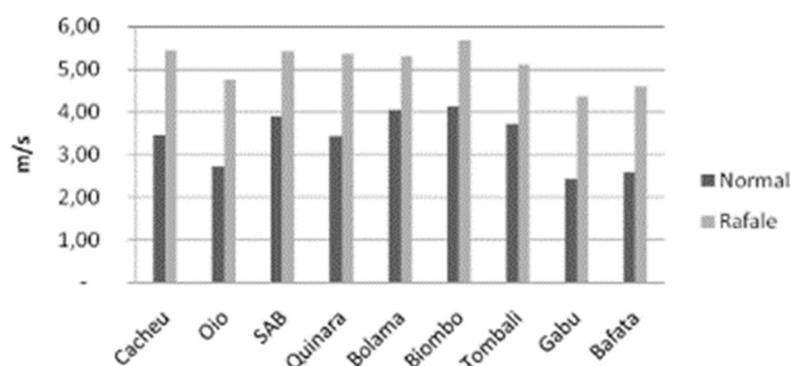


Figura 37: Valores médios dos ventos e rajadas a 10m do chão por região

Fonte: MEIRN [69].

As estruturas do MEIRN, que estão sob a responsabilidade da Direção Geral de energia, como a Direção de Energias Renováveis e Domésticas, a Direção de Estudos, Projetos, Planificação e Estatísticas, a Direção de Combustíveis e Derivados de Petróleo, a Direção de Centro de Produção convencional, a Agência de Eletrificação Rural Descentralizada e as Delegacias Regionais de Energia, devem continuar com suas ações diárias, visando melhorar continuamente o setor energético do país.

Essas ações buscam amenizar o problema de acesso à eletricidade por meio da ampliação da capacidade de carga sobretudo, no setor de planeamento, que tem a missão de criar perspectivas futuras para o desenvolvimento do setor energético do país.

5.3 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 2: INTEGRAÇÃO DO HIDROGÊNIO

A barra 165 que é responsável para suprir a produção de hidrogênio por meio de um eletrolisador localizado na subestação de Bissau, isto é, barra 160. Pelas análises feitas e discutidas neste capítulo sobre o sistema OMVG e diferentes critérios aplicados, conclui-se que ela esteja em condições para efetividade de suas funções.

Na análise de contingência estática, a subestação de Bissau apresentou divergência, porém, quando realizou a análise transitória, ela se mostrou consistente apresentando valores de tensões dentro da faixa definida pelo programa e em alguns casos pequenas subtensões. No terceiro teste se estabilizou com tensão padrão, portanto é viável para plenitude de sua operação. Entretanto, não deixa de merecer a atenção sobretudo com a subestação de Mansoa, qualquer contingência nessa subestação pode comprometer a de Bissau que por sua vez, comprometa a operação da barra 165 que é sua extensão, isso ficou evidente na aplicação de curto-circuito trifásico no evento 5 que é a barra de Mansoa.

Portanto, como destacado no capítulo 4 sobre estudo de caso 2, a operação ininterrupta de 24 horas da usina solar fotovoltaica com eletrolisador, cujas potências são, respetivamente: 33 MWp e 300 kW, foi concretizada.

Com a célula a combustível de 50kW, variando em uma eficiência de 40% a 60%, e o eletrolisador com eficiência na faixa de 62% a 90%, espera-se, com base na equação (4), uma produção diária de 90 kg de hidrogênio, destinada a abastecer as localidades identificadas em vermelho na figura 24, assim como no mapa de transmissão apresentado na figura 58.

$$\begin{aligned}
 \text{Poder calorífico inferior de hidrogênio (LHV)} &= 12000 \text{ kJ/kg} \\
 \text{Quantidade de Hidrogênio} &= \frac{Px t(h) \cdot 3600s}{\eta(\%) \cdot LHV} = \frac{50 \times 10^3 \cdot 24 \cdot 3600}{0,40 \cdot 120 \cdot 10^3} \quad (4) \\
 &= 90 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

A região de Bolama é muito atrativa em termos de turismo, fauna e pesca [78]. A disponibilidade de energia nessa área é fundamental para promover o desenvolvimento econômico, ressaltando a importância do projeto P2G2P em fornecer essa energia.

Com a vida útil do eletrolisador e da célula a combustível, espera-se uma produção do hidrogênio em larga escala na região, o que, no futuro, pode permitir a expansão do

projeto P2G2P para outras regiões do país, aumentando ainda mais a demanda por energia elétrica.

Com atual configuração da OMVG, e do projeto P2G2P, somada às minigerações de Bambadinca, Contuboel, Canchungo, Bolama, Bubaque, além da forma habitual de fornecimento de eletricidade pela EAGB, o país passa a contar com o formato de geração de energia elétrica apresentado na Figura 38.

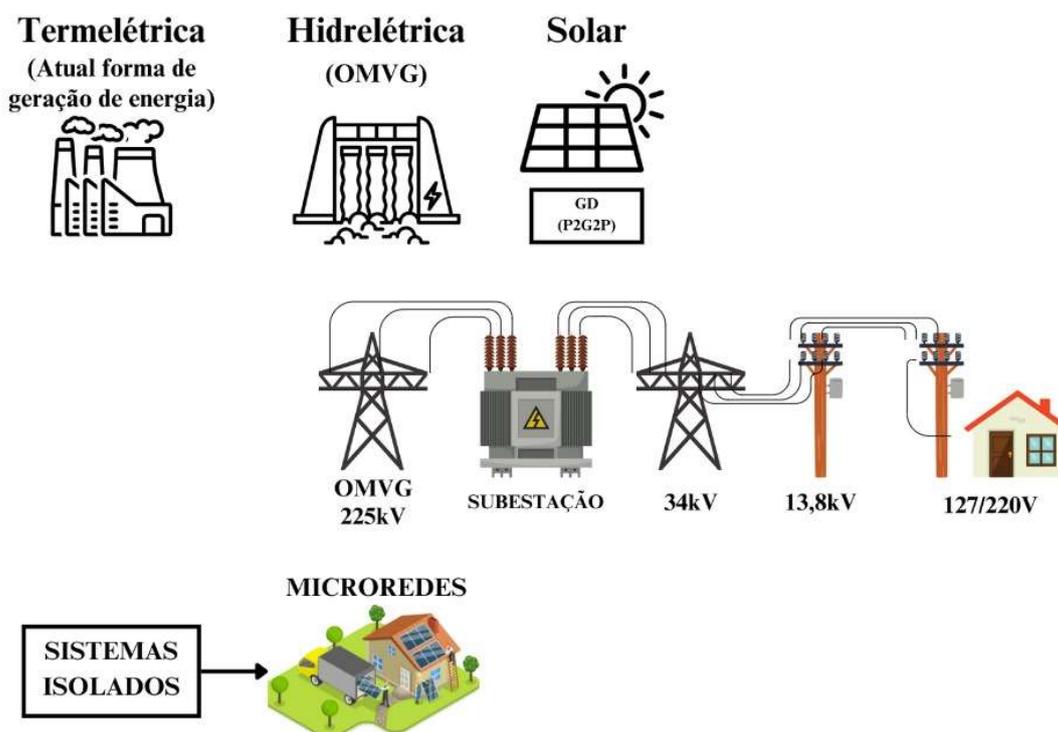


Figura 38: Matriz elétrica na Guiné-Bissau com OMVG em operação

Fonte: elaboração do autor

A geração termelétrica da EAGB opera em sistema isolado e abastece apenas a cidade de Bissau. As microrredes, também em sistemas isolados, atendem o interior do país. O projeto P2G2P, com sistema isolado na região de Bolama, e OMVG, com o Sistema Interligado Regional (SIR), atuam na transformação de energia do sistema de transmissão para distribuição, e posteriormente de distribuição para consumidores residenciais. Dessa forma, o país se conecta em todo o território nacional. Assim, este é o panorama geral dos resultados desta dissertação.

6 CONCLUSÕES

Um sistema elétrico de potência é um empreendimento muito importante que congrega vários elementos que compõem os sistemas de: geração, transmissão, distribuição e comercialização. Ambos os componentes operam integrados com o objetivo de atender a carga dos consumidores.

O sistema de transmissão objetiva através de linhas de transmissão escoar a energia gerada na usina e transportá-la até centros de distribuição para atender o consumidor final. No desenvolvimento desta dissertação, foi perceptível sua importância não só para interligar as subestações de energia elétrica para os quatro países da OMVG, mas também, em particular, atender à Guiné-Bissau na interconexão do seu sistema energético, possibilitando condição técnica para solucionar o problema de acesso a eletricidade para todo o território nacional.

O planejamento energético é, de fato, um portfólio de cada país. Por tudo o que foi abordado nos casos 1 e 2, a Guiné-Bissau reúne condições de aproveitar o seu potencial energético, devendo, entretanto, a Direção de Estudos, Projetos, Planificação e Estatística, setor responsável para o planejamento energético do país, investigar os possíveis recursos de oferta, auxiliando o poder público no estabelecimento de metas de curto, médio e longo prazos.

Na análise de rede elétrica, além dos diferentes testes para a viabilidade do sistema OMVG visando sua segurança, foi possível mostrar a importância de manter a tensão e a frequência operando na faixa estabelecida. A aplicação do critério N-1 durante a análise estática em regime permanente e da análise dinâmica no domínio do tempo permitiram o levantamento de dados suficiente para averiguação das condições limites de operação.

Após a avaliação dos resultados, foram identificadas as situações de colapso do sistema. Deste modo, os planejadores da rede podem usar tais contingências como espelho e eventos críticos para a operação do sistema OMVG.

A Guiné-Bissau enfrenta por anos o problema de disponibilidade de potência e de acesso à energia elétrica. Pela afirmação de Aler [7], em 2018, apenas 2,6% da população tinha acesso contínuo à eletricidade e 5,7% tinha acesso à eletricidade em intervalos irregulares. Esses dados mostram o desafio enorme que o país enfrenta.

O relatório de PNUD [54] de 2022 informou que o país possui IDH igual a 0,483 figurando na posição 177 no conjunto de países do mundo. Ainda que o IDH seja avaliado

em questões como: saúde, educação e renda da população, o consumo de energia elétrica é importantíssimo para a melhoria desses itens, sobretudo, na economia cuja relação é direta e intrínseca. Por isso, por motivar acesso à eletricidade, espera-se que esse trabalho seja útil para melhorar as condições de vida nesse país.

Na Figura 18 e Figura 19, foram apresentadas tanto a evolução esperada da população rural e urbana da Guiné-Bissau quanto a demanda de eletricidade esperada até 2030. O planejamento energético é feito olhando o crescimento populacional e, em função disso, projeta-se a potência necessária para o suprimento. Resumindo, trata-se do gerenciamento da oferta de energia em função da demanda solicitada.

O sistema OMVG é uma iniciativa importante que traz a possibilidade ao país criar condições para respostas à deficiência energética que enfrenta. Sendo assim, cabe ao Estado criar mecanismos de aquisição da eletricidade por meio da renda econômica, gerando a oportunidades de industrialização que aumentem o poder aquisitivo e reduza a disparidade gigantesca da renda de sua população.

As três etapas do sistema elétrico de potência, referenciadas na contextualização deste trabalho, criam as condições necessárias para melhorar a matriz energética do país e incorporar recursos adicionais, tais como, a energia solar fotovoltaica dedicada à produção de hidrogênio verde. Este último, podendo ser considerado um insumo energético importante nesta condição específica.

Sobre o estudo energético apresentado no caso 2, conclui-se ser viável a implementação do P2G2P no país, em especial na região de Bolama, porquanto, onde as condições climáticas são viáveis para a produção de hidrogênio verde. Nessa região, além da abundância de água, é uma zona de elevada irradiação e potenciais interessantes, inclusive, eólicas para a geração de energia. Vale salientar que a presença de energia elétrica em Bolama é uma ação estratégica, pois trata-se de uma região de atração econômica, com boas condições de biodiversidade e potencial turístico.

A experiência de produção de hidrogênio pode se expandir para outras regiões, cujo potencial de irradiação de energia solar foi apresentado na figura 59, como Biombo, Cacheu, Oio e Tombali. O conceito P2G2P ainda é novo no mercado, mas já figura entre as melhores formas de armazenamento de hidrogênio, seja a partir da produção com excedentes de energias renováveis, ou através do processo termodinâmico, que consiste na troca de calor por meio de ciclos combinados.

No contexto de transição energética, hidrogênio verde é um ator importante nas pretensões para descarbonização da economia global, podendo ser útil na aplicação no setor de transportes, em substituição de motor diesel, em aplicações industriais e agropecuárias e, obviamente como insumo energético para geração de eletricidade como descrito no P2G2P.

Com a implementação plena do sistema OMVG, espera-se que a Guiné-Bissau possa reduzir a dependência da produção de energia elétrica fornecida pela empresa Karpower via barco, uma vez que essa modalidade acarreta sérios riscos ambientais, especialmente em relação a poluição em alto nível. O país precisa considerar essas questões, aliás, o “PIR” enfatizado na justificativa e no referencial, proporciona essa visão, ao afirmar que o modelo atual do planejamento considera não apenas a oferta e demanda, mas também as questões ambientais.

Da mesma forma, espera-se uma redução na dependência da geração termelétrica, já que, com a participação da energia hidráulica (OMVG), P2G2G (solar), microrredes e, futuramente, a integração de outras fontes renováveis, conforme demonstrado na figura 61, o país poderá reduzir essa dependência e avançar em direção a um mix energético. Isso é viável, considerando o considerável potencial energético presente em sua matriz energética e elétrica, como apresentado na figura 15.

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização deste trabalho, foi possível reunir várias informações, entre elas os dados populacionais de cada um dos quatro países da OMVG. No entanto, foi muito difícil encontrar esses dados de forma rápida e acessível. Além disso, alguns dados já estão desatualizados há muitos anos, como no caso da Guiné-Bissau, cujo último censo ocorreu em 2009. Portanto, para próximos trabalhos neste sentido, sugere-se buscar dados atualizados e, em seguida projetar a carga de consumo para as cidades atendidas pelas subestações da OMVG.

Outro trabalho a ser sugerido diz respeito ao estudo analítico mais profundo do sistema OMVG no plano complexo, estimando os estados de fluxo de potência para o monitoramento da rede.

Simulações ou avaliações mais técnicas sobre o setor de energia na Guiné-Bissau são desafiadoras, pois há poucas referências disponíveis, e muitas delas não estão acessíveis online. No que diz respeito aos sistemas de potência, a dificuldade de encontrar

materiais é ainda maior. Esse trabalho, portanto, é pioneiro para a Guiné-Bissau nesse formato. Assim, recomenda-se a realização de testes com 2 e 3 condutores para verificar o comportamento do sistema com novas cargas.

Outra sugestão importante para o futuro é trabalhar o sistema de distribuição de energia elétrica da Guiné-Bissau a partir da OMVG. Para mais detalhes sobre essa parte, aconselha-se utilizar como base o documento de “Electrification de quatorze localités”, no qual são indicados os locais por onde passam cada uma dessas subestações.

Em relação ao P2G2P, sugere-se a realização de uma análise de sensibilidade econômica sobre os equipamentos de hidrogênio verde e, em seguida, calcular os custos de energia, o que não foi possível realizar nesta dissertação, devido à falta de dados energéticos de consumo real. Além disso, recomenda-se expandir o P2G2P para mais ilhas, implementando usinas fotovoltaica localmente, uma vez que toda a região insular possui boa irradiação solar.

7 APÊNDICE

7.1 ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA ESTÁTICA

A Tabela 29 apresenta as contingências referentes à carga pesada. Na opção Caso Base, são mostradas todas as tensões da carga pesada sem aplicação de contingências. A partir dos números 1 a 15, são apresentadas as contingências. A opção “Div” significa divergente, ou seja, a linha cuja perda fez com que o sistema não encontrasse uma solução para o fluxo de potência. O mesmo procedimento se aplica para a Tabela 30 e Tabela 31, que tratam das cargas média e leve, respectivamente. A Tabela 32, Tabela 33 e Tabela 34, apresentam as mesmas cargas, porém com a presença da usina solar e a Tabela 35 resume as tensões da rede completa.

Na Tabela 29 as contingências 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10 e 11 são severas, e, a análise em regime permanente, por meio de um estudo de fluxo de potência, não encontra uma solução viável (sistema divergente). Na prática, isso significa que, se qualquer um desses eventos ocorrer, o sistema entra em colapso.

Ainda na Tabela 29, nas contingências em que se observa subtensão, consta o número de reatores apresentados na metodologia, que devem ser desligados, instalando banco de capacitores para elevar o perfil de tensão. Quanto às sobretensões, é necessário instalar reatores para reduzir o perfil de tensões nessas barras, de acordo com o critério de regime permanente, ajustando as tensões dentro da faixa de $\pm 5\%$.

Para a Tabela 30, o procedimento anterior adotado para a carga pesada é válido para esta tabela da carga média, porém, existe uma pequena diferença com relação às situações críticas ou severas. A contingência 7 que foi divergente na carga pesada, encontra solução nesta média em regime permanente.

Em relação a Tabela 31, sobre a carga leve, é notória a diferença significativa do comportamento do sistema teste. Ela apresenta menos contingências severas em relação as duas cargas anteriores. A ocorrência de contingências nas linhas: 1, 2, 3, 4 e 11, resultará no colapso do sistema, pois não foi encontrada uma solução de fluxo de potência em regime permanente.

Além disso, há uma maior presença de subtensões neste caso leve, e nem todas as barras que apresentam esse comportamento possuíam reatores, o que indica a necessidade de ajustar esses valores para a faixa de $\pm 5\%$, instalando bancos de capacitores. Da mesma

forma, é necessário ajustar as barras cujas tensões estão acima da nominal definida pelo programa Anarede.

A Tabela 32, Tabela 33 e a Tabela 34 apresentam as mesmas contingências do sistema em regime permanente, porém com a presença da Usina Solar Fotovoltaica conectada à barra 165. Na Tabela 32, verificou uma diminuição de contingências críticas, o sistema encontrou solução de fluxo de potência, no entanto, se constatou uma divergência para os casos 6 e 7. Igualmente, algumas barras apresentam subtensões e sobretensões.

A Tabela 33, apresenta uma contingência severa que é 6, ou seja, com a perda desta linha o sistema de fato entra em colapso. Por fim, a Tabela 34 apresenta a última análise com a presença da Usina Solar Fotovoltaica referente à carga leve, o que se verificou é que não houve nenhuma situação severa para o sistema, aliás o sistema encontrou a solução de fluxo de potências em todas as barras mesmo perante as contingências.

Os valores de tensões apresentados na Tabela 35 são referentes à rede completa, sem aplicação de contingência. Na convergência de todos os casos, não foi constatada nenhuma sobretensão e nem subtensão, o sistema encontrou solução de fluxo de potência convergente para todos os casos com tensões nas barras dentro da faixa da nominal.

Tabela 29: As contingências referentes à carga pesada.

		Contingências														
Barra	Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	1,000	DIV	DIV	DIV	DIV	1,000	DIV	DIV	1,000	1,000	DIV	DIV	1,000	1,000	1,000	1,000
20	1,000					1,000			1,000	1,000						
100	1,008					1,010			1,014	1,004			1,008	1,003	0,995	1,003
120	1,015					1,026			1,044	1,002			1,017	1,003	0,990	0,997
130	1,010					1,026			1,052	0,990			1,012	0,996	0,981	0,987
140	1,003					1,020			1,051	0,979			1,004	0,987	0,972	0,977
150	0,991					1,010			1,044	0,964			0,992	0,975	0,961	0,965
160	0,990					0,990			1,043	0,962			0,990	0,973	0,959	0,963
170	0,996					1,014			1,055	0,964			0,996	0,980	0,966	0,969
180	0,996					1,014			1,060	0,959			0,995	0,982	0,969	0,971
190	0,965					0,983			0,965	0,927			0,964	0,951	0,938	0,939
200	0,983					0,998			1,038	0,849			0,980	0,973	0,965	0,964
210	0,990					1,000			1,024	0,916			0,985	0,987	0,986	0,981
220	1,009					1,010			1,014	0,999			1,004	1,006	1,010	1,002
230	1,012					1,014			1,018	1,003			1,013	1,004	1,016	0,994
240	1,012	1,014	1,019	1,005	1,013	0,991	1,019	0,978								
250	0,996	0,998	1,002	0,990	0,996	0,983	0,958	0,941								

Fonte: elaboração do autor

Tabela 30: As contingências referentes à carga média.

		Contingências														
Barra	Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	1,000	DIV	DIV	DIV	DIV	1,000	DIV	1,000	1,000	1,000	DIV	DIV	1,000	1,000	1,000	1,000
20	1,000					1,000		1,000	1,000	1,000			1,000	1,000	1,000	
100	1,011					1,011		1,010	1,015	1,010			1,012	1,008	1,002	1,010
120	1,028					1,031		1,031	1,047	1,028			1,029	1,026	1,019	1,026
130	1,027					1,031		1,030	1,056	1,028			1,027	1,025	1,019	1,024
140	1,020					1,025		1,023	1,054	1,022			1,019	1,017	1,012	1,017
150	1,009					1,014		1,011	1,047	1,012			1,006	1,006	1,001	1,005
160	1,007					1,007		1,010	1,046	1,011			1,005	1,005	1,000	1,004
170	1,011					1,016		1,012	1,055	1,016			1,006	1,007	1,004	1,007
180	1,006					1,011		0,779	1,056	1,013			0,997	1,001	1,000	1,001
190	0,974					0,979		0,744	0,974	0,981			0,966	0,970	0,968	0,970
200	0,984					0,988		0,789	1,025	0,834			0,970	0,978	0,979	0,978
210	0,977					0,980		0,862	1,001	0,898			0,960	0,970	0,975	0,970
220	1,008					1,009		0,992	1,012	0,998			1,001	1,004	1,009	1,001
230	1,013					1,014		0,999	1,017	1,004			1,026	1,004	1,016	0,995
240	1,015	1,016	1,004	1,019	1,008	1,024	0,999	1,021	0,980							
250	0,999	0,999	0,993	1,003	0,995	1,004	0,990	0,964	0,942							

Fonte: elaboração do autor

Tabela 31: As contingências referentes à carga leve.

Barra	Base	Contingências																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15				
10	1,020	DIV	DIV	DIV	DIV	1,000	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	DIV	1,020	1,020	1,020	1,020				
20	1,000					1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	1,025					1,025	1,023	1,025	1,028	1,026	1,009		1,027	1,024	1,017	1,030				
120	1,041					1,042	1,031	1,043	1,055	1,049	0,973		1,040	1,039	1,034	1,044				
130	1,037					1,038	1,020	1,040	1,058	1,051	0,937		1,033	1,034	1,030	1,038				
140	1,028					1,029	1,007	1,031	1,052	1,046	0,910		1,022	1,024	1,021	1,028				
150	1,015					1,015	0,989	1,017	1,042	1,036	0,882		1,006	1,010	1,007	1,014				
160	1,014					1,014	0,989	1,016	1,041	1,035	0,880		1,006	1,009	1,007	1,013				
170	1,017					1,017	0,893	1,019	1,048	1,043	0,863		1,005	1,010	1,009	1,014				
180	1,010					1,011	0,891	0,835	1,046	1,043	0,836		0,994	1,002	1,002	1,005				
190	0,982					0,983	0,862	0,805	0,982	1,014	0,807		0,966	0,973	0,974	0,976				
200	0,982					0,983	0,878	0,837	1,011	0,821	0,786		0,960	0,970	0,973	0,973				
210	0,973					0,974	0,908	0,890	0,990	0,889	0,914		0,950	0,960	0,966	0,959				
220	1,009					1,009	0,999	0,997	1,011	0,998	0,999		0,999	1,003	1,008	0,997				
230	1,015					1,015	1,006	1,005	1,017	1,005	1,003		1,033	1,003	1,016	0,986				
240	1,017	1,017	1,009	1,010	1,019	1,010	1,002	1,031	1,003	1,021	0,963									
250	1,001	1,001	0,996	0,997	1,003	0,998	0,985	1,008	0,993	0,968	0,915									

Fonte: elaboração do autor

Tabela 32: As contingências referentes à carga pesada com a UFV

Barra	Contingências																	
	Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
10	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	DIV	DIV	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		
20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000			1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	1,008	0,992	1,001	1,007	1,011	1,010			1,010	1,007	1,003	1,008	1,009	1,008	0,999	1,007		
120	1,017	1,011	1,012	1,041	1,057	1,026			1,024	1,016	0,999	1,017	1,019	1,017	1,006	1,011		
130	1,014	1,005	0,988	1,049	1,057	1,026			1,022	1,013	0,994	1,014	1,015	1,014	1,006	1,008		
140	1,007	0,994	0,986	0,978	1,078	1,020			1,014	1,005	0,988	1,007	1,007	1,007	1,001	1,003		
150	0,996	0,980	0,979	0,976	0,974	1,010			1,002	0,995	0,981	0,996	0,996	0,996	0,994	0,994		
160	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995			0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995		
165	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995			0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995		
170	1,001	0,942	0,951	0,948	0,948	1,014			1,014	0,996	0,961	1,001	1,000	1,001	0,998	0,998		
180	1,001	0,891	0,911	0,909	0,910	1,014			1,023	0,993	0,935	1,001	0,999	1,001	1,000	0,998		
190	0,970	0,858	0,878	0,875	0,877	0,983			0,970	0,962	0,902	0,970	0,968	0,970	0,969	0,967		
200	0,987	0,812	0,847	0,845	0,849	0,998			1,008	0,850	0,886	0,987	0,983	0,987	0,990	0,987		
210	0,992	0,807	0,844	0,844	0,850	1,000			1,007	0,916	0,952	0,992	0,986	0,992	0,992	0,993		
220	1,009	0,970	0,978	0,978	0,980	1,010			1,011	0,999	1,004	1,009	1,004	1,009	1,012	1,003		
230	1,012	0,967	0,977	0,978	0,981	1,014	1,015	1,003	1,007	1,012	1,014	1,012	1,018	0,996				
240	1,013	0,965	0,976	0,979	0,982	1,014	1,015	1,006	1,007	1,013	1,014	1,013	1,021	0,980				
250	0,996	0,958	0,969	0,974	0,977	0,998	0,999	0,993	0,991	0,996	0,997	0,996	0,961	0,942				

Fonte: elaboração do autor

Tabela 33: As contingências referentes à carga média com a UFV

Barra	Contingências																
	Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
10	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	DIV	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	1,010	0,999	1,007	1,013	1,017	1,011		1,010	1,010	1,009	1,006	1,002	1,012	1,009	1,002	1,011	
120	1,027	1,038	1,019	1,047	1,064	1,031		1,029	1,031	1,026	1,015	1,003	1,030	1,027	1,022	1,027	
130	1,026	1,031	1,010	1,056	1,082	1,031		1,028	1,031	1,026	1,013	1,000	1,028	1,026	1,023	1,026	
140	1,019	1,020	1,007	0,999	1,085	1,025		1,020	1,024	1,019	1,007	0,995	1,020	1,019	1,017	1,019	
150	1,008	1,005	1,000	0,997	0,994	1,014		1,008	1,012	1,008	0,998	0,988	1,008	1,008	1,007	1,008	
160	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007		1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	
165	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007		1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	
170	1,010	0,993	0,991	0,988	0,986	1,016		1,009	1,022	1,012	0,984	0,958	1,007	1,009	1,010	1,009	
180	1,005	0,972	0,971	0,968	0,967	1,011		0,778	1,026	1,009	0,960	0,916	0,999	1,003	1,005	1,004	
190	0,974	0,940	0,938	0,937	0,935	0,979		0,743	0,974	0,977	0,928	0,884	0,967	0,971	0,973	0,972	
200	0,983	0,928	0,931	0,929	0,928	0,988		0,789	1,001	0,833	0,912	0,846	0,971	0,979	0,983	0,980	
210	0,977	0,917	0,922	0,921	0,922	0,980		0,862	0,988	0,898	0,922	0,767	0,961	0,971	0,977	0,971	
220	1,008	0,995	0,997	0,997	0,998	1,009		0,992	1,010	0,998	1,001	1,004	1,001	1,004	1,010	1,001	
230	1,013	0,998	1,001	1,003	1,004	1,014		0,999	1,015	1,004	1,005	1,005	1,026	1,004	1,017	0,995	
240	1,015	0,998	1,003	1,005	1,007	1,016		1,004	1,016	1,008	1,007	1,004	1,025	0,999	1,021	0,980	
250	0,999	0,983	0,989	0,994	0,997	0,999		0,992	1,000	0,995	0,992	0,988	1,004	0,990	0,965	0,942	

Fonte: elaboração do autor

Tabela 34: As contingências referentes à carga leve com a UFV

Barra	Contingências															
	Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020
20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	1,026	1,016	1,024	1,030	1,034	1,025	1,025	1,025	1,026	1,024	1,022	1,019	1,028	1,024	1,018	1,030
120	1,041	1,047	1,036	1,065	1,083	1,042	1,042	1,042	1,044	1,040	1,031	1,023	1,044	1,041	1,037	1,045
130	1,037	1,040	1,017	1,074	1,101	1,038	1,037	1,038	1,040	1,037	1,027	1,017	1,039	1,037	1,035	1,039
140	1,028	1,028	1,015	1,007	1,103	1,029	1,027	1,029	1,031	1,029	1,018	1,009	1,029	1,028	1,027	1,029
150	1,015	1,013	1,008	1,004	1,002	1,015	1,013	1,015	1,081	1,016	1,006	0,998	1,014	1,014	1,014	1,015
160	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014
165	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,044	1,014	1,014	1,014
170	1,017	1,006	1,003	1,000	0,997	1,017	0,893	1,016	1,025	1,023	0,994	0,971	1,012	1,014	1,015	1,015
180	1,011	0,990	0,988	0,985	0,983	1,011	0,892	0,835	1,026	1,022	0,971	0,932	1,001	1,005	1,008	1,006
190	0,982	0,961	0,959	0,957	0,955	0,983	0,862	0,805	1,982	0,994	0,943	0,903	0,972	0,977	0,979	0,977
200	0,982	0,949	0,949	0,947	0,946	0,983	0,879	0,837	0,995	0,821	0,919	0,857	0,965	0,973	0,978	0,973
210	0,973	0,937	0,939	0,939	0,939	0,974	0,908	0,890	0,981	0,889	0,915	0,774	0,952	0,962	0,968	0,960
220	1,009	1,001	1,002	1,003	1,003	1,009	0,999	0,997	1,010	0,998	1,000	1,005	1,000	1,003	1,009	0,997
230	1,015	1,006	1,008	1,010	1,011	1,015	1,006	1,005	1,015	1,005	1,006	1,007	1,034	1,003	1,017	0,986
240	1,017	1,007	1,011	1,014	1,016	1,017	1,010	1,010	1,017	1,009	1,008	1,007	1,032	1,004	1,022	0,963
250	1,001	0,991	0,997	1,001	1,004	1,001	0,998	0,997	1,001	0,997	0,994	0,991	1,009	0,994	0,968	0,915

Fonte: elaboração do autor

Tabela 35: Tensões em regime permanente considerando a rede completa.

	Descrição	Pesada	Média	Leve	Pesada UFV e H2	Média UFV e H2	Leve UFV e H2
Barra	NOME	Tensão (pu)	Tensão (pu)	Tensão (pu)	Tensão (pu)	Tensão (pu)	Tensão (pu)
10	KALÉTA ---G13.8	1,000	1,000	1,020	1,000	1,000	1,020
20	SAMBAN --G13.8	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	KALÉTA ---225 KV	1,008	1,011	1,025	1,008	1,010	1,025
120	BOKÉ -----225 KV	1,015	1,028	1,041	1,017	1,027	1,041
130	SALTINHO --225 KV	1,010	1,027	1,037	1,014	1,026	1,037
140	BAMBADINCA ---225 KV	1,003	1,020	1,028	1,007	1,019	1,028
150	MANSOA --225 KV	0,991	1,009	1,015	0,996	1,008	1,015
160	Bissau -----225 KV	0,990	1,007	1,014	0,995	1,007	1,014
165	USINA FOTOV--225 KV	-	-	-	0,995	1,007	1,014
170	TANAF ----225 KV	0,996	1,011	1,017	1,001	1,010	1,017
180	SOMA ----225 KV	0,996	1,006	1,010	1,001	1,005	1,011
190	BRIKAMA ---225 KV	0,965	0,974	0,982	0,970	0,974	0,982
200	KAOLACK ---225 KV	0,983	0,984	0,982	0,987	0,983	0,982
210	Tambaco--225 KV	0,990	0,977	0,973	0,992	0,977	0,973
220	SAMBAN -- -225 KV	1,009	1,008	1,009	1,009	1,008	1,009
230	MALI -----225 KV	1,012	1,013	1,015	1,012	1,013	1,015
240	LABÉ ----225 KV	1,012	1,015	1,017	1,013	1,015	1,017
250	LINSAN -225 KV	0,996	0,999	1,001	0,996	0,999	1,001

Fonte: elaboração do autor

7.2 ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA DINÂMICA

A seguir é apresentado o diagrama elétrico do sistema OMVG na Figura 39, visando facilitar a compreensão na análise de contingência dinâmica.

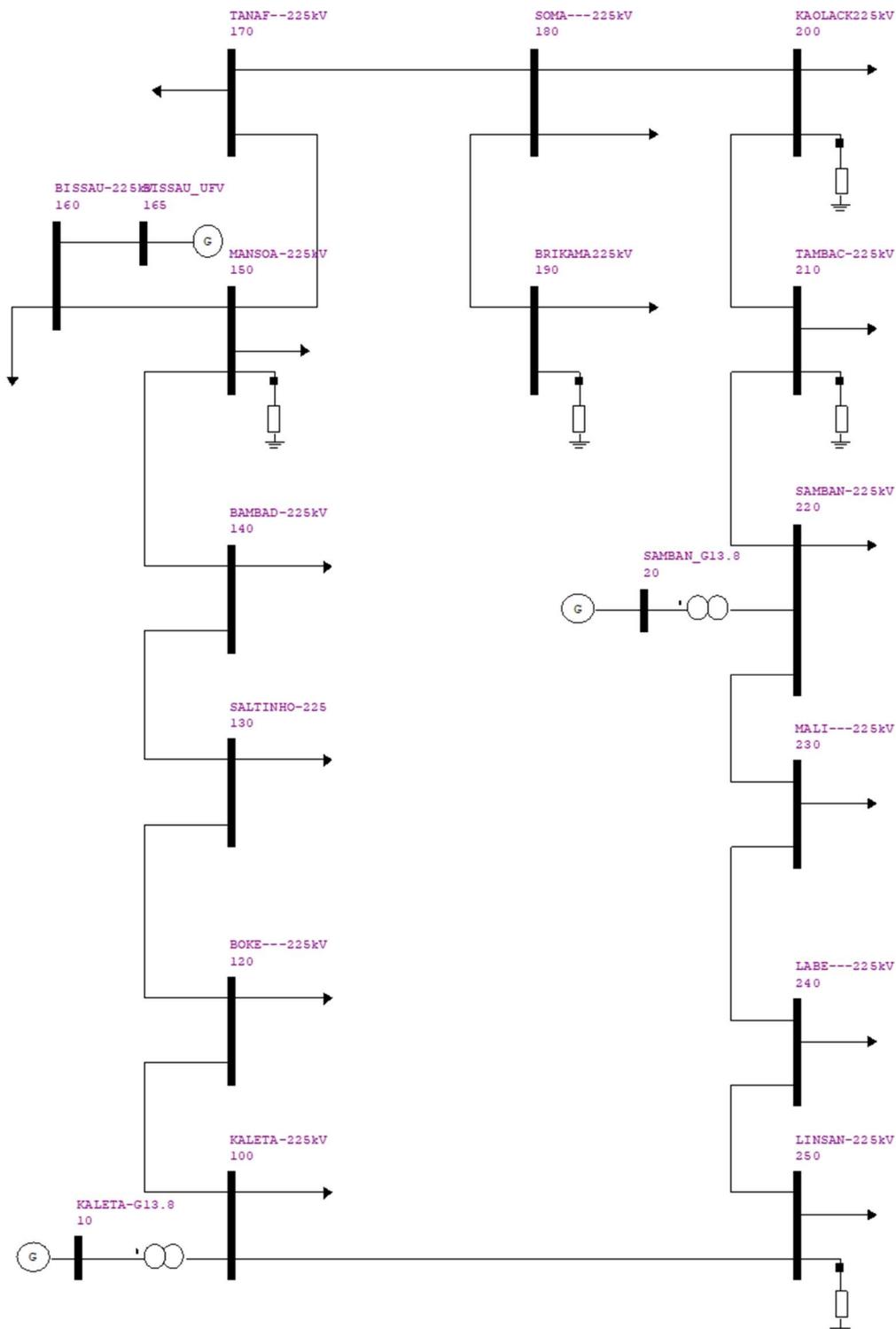


Figura 39: Diagrama unifilar do OMVG e contingências do Anatem

Fonte: elaboração do autor

A Tabela 36 apresenta modelos de geradores e seus respectivos parâmetros para as duas usinas.

Tabela 36: Dados dos Geradores

Parâmetros	Descrição	Unidade	Kaléta	Sambangalou
Xd	Indutância Síncrona de Eixo Direto	%	101,4	106,0
Xq	Indutância Síncrona de Eixo de Quadratura	%	77,0	61,0
X'd	Indutância Transitória de Eixo Direto	%	31,4	31,5
X''d	Indutância Subtransitória de Eixo Direto	%	28,0	25,0
Xl	Indutância de Dispersão da Armadura	%	16,3	14,7
T'd0	Constante de Tempo Transitória de Eixo Direto Circuito Aberto	s	6,55	8,68
T''d0	Constante de Tempo Subtransitória de Eixo Direto Circuito Aberto	s	0,039	0,040
T''q0	Constante de Tempo Subtransitória de Eixo Quadratura em Circuito Aberto	s	0,071	0,080
Ra	Resistência do enrolamento da armadura	%	0,5	0,24
H	Inércia	MWs/MVA	3,12	3,817
D	Amortecimento	pu/pu	2,0	2,0
Potência	Potência Nominal	MVA	80,0	45,0

Fonte: elaboração autor

A Figura 40 e a Figura 41, apresentam os modelos de Regulador de Tensão (RT) e sinal adicional Estabilizador (PSS). As Tabela 37, Tabela 38 e Tabela 39 contém os parâmetros de ajustes de dados dos respectivos modelos.

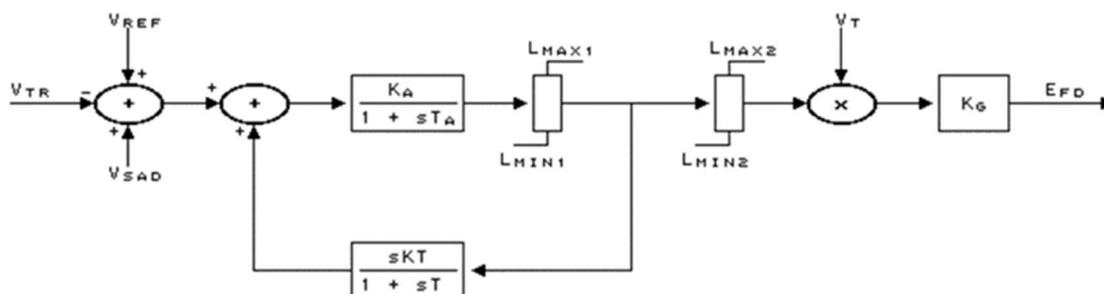


Figura 40: Regulador de tensão

Fonte: CEPEL [25]

Tabela 37: Ajustes de Regulador de tensão.

Parâmetro	Kaléta	Sambangalou
K	0,010	0,010
Ka	15,0	15,0
Kg	1,0	1,0
T	1,06	1,06
Ta	0,02	0,02
Ln1	-6,73	-6,73
Lx1	6,73	6,73
Ln2	-999	-999
Lx2	999	999

Fonte: elaboração do autor

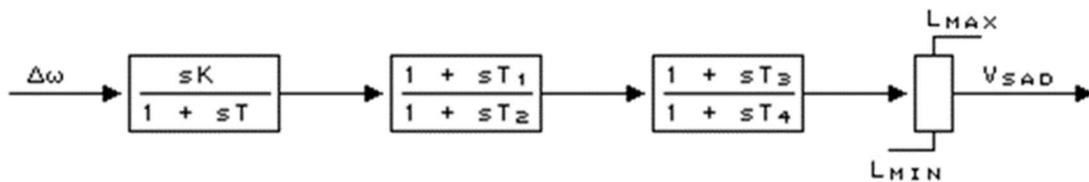


Figura 41: Modelo de Estabilizador (PSS) adotado para o estudo da OMVG.

Fonte: CEPEL [25].

Tabela 38: Ajustes de PSS

Parâmetro	Kaléta	Sambangalou
K	15	20
T	1,5	1,5
T1	0,15	0,15
T2	0,03	0,03
T3	0,15	0,15
T4	0,03	0,03
LMN	-0,1	-0,1
LMX	0,1	0,1

Fonte: elaboração do autor

O último modelo apresentado para o estudo de estabilidade transitória é o de regulador de velocidade utilizado nas duas unidades geradoras. Ele é mostrado na Figura 42 e a Tabela 39 contém dados do respectivo modelo para as duas usinas de gerações.

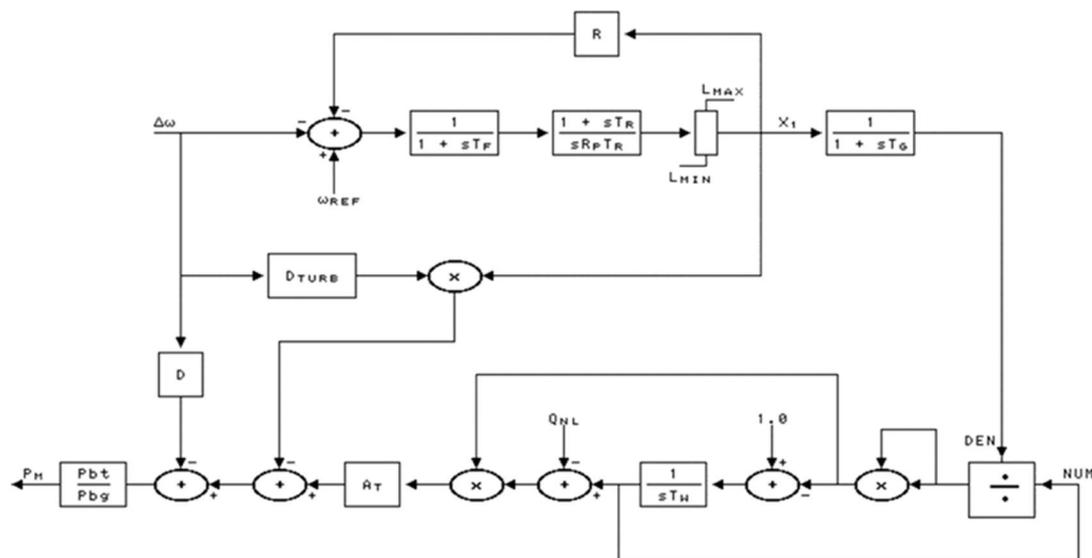


Figura 42: Modelo de Regulador de velocidade

Fonte: CEPEL [25].

Tabela 39: Ajustes de Regulador de Velocidade.

Parâmetro	Kaléta	Sambangalou
R	0,38	0,38
Rp	0,05	0,05
At	1,2	1,2
Qnl	0,15	0,15
Tw	1,5	1,5
Tr	7,0	7,0
Tf	0,05	0,05
Tg	0,5	0,5
Lmn	-2,0	-2,0
Lmx	0,98	0,98
Dt	0,5	0,5
D	1,0	1,0
Pbg	1,0	1,0
Pbt	1,0	1,0

Fonte: elaboração do autor

Terminado todo esse procedimento sobre a análise dinâmica e a rotina do que foi apresentado na metodologia especificamente na figura 11, seguem-se os resultados nas para os três patamares de cargas sem a Usina Sola Fotovoltaica.

CARGA PESADA

Tabela 40: Resultado da aplicação de curto-circuito para carga pesada.

EVENTOS															
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	1,000	1,007	1,023	1,015	1,006	1,000	1,000	1,012	1,000	0,993	0,989	1,006	0,996	0,988	0,997
20	0,984	0,984	0,999	0,993	1,007	0,985	0,990	1,015	0,994	0,999	0,999	0,992	0,996	1,004	0,990
100	0,999	1,014	1,041	1,024	1,015	1,000	1,01	1,025	1,005	0,989	0,981	1,008	0,999	0,984	1,003
120	0,904	1,028	1,053	1,075	1,029	1,013	1,021	1,049	1,009	0,958	0,935	1,016	1,002	0,984	1,000
130	0,892	0,825	1,062	1,093	1,027	1,004	1,015	1,055	1,000	0,928	0,896	1,011	0,996	0,978	0,992
140	0,884	0,828	0,775	1,095	1,021	0,992	1,006	1,052	0,991	0,906	0,871	1,003	0,987	0,971	0,982
150	0,869	0,821	0,787	0,744	1,010	0,976	0,992	1,044	0,978	0,886	0,847	0,991	0,997	0,962	0,971
160	0,870	0,826	0,783	0,751	0,000	0,974	0,990	1,042	0,976	0,882	0,845	0,988	0,975	0,959	0,969
170	0,870	0,832	0,797	0,771	1,014	0,901	0,991	1,054	0,979	0,873	0,834	0,994	0,982	0,968	0,976
180	0,862	0,839	0,808	0,786	1,013	0,900	0,895	1,061	0,976	0,857	0,816	0,992	0,984	0,974	0,977
190	0,836	0,800	0,783	0,760	0,981	0,871	0,866	0,000	0,950	0,831	0,785	0,961	0,953	0,944	0,947
200	0,845	0,836	0,823	0,802	0,998	0,892	0,896	1,038	0,883	0,818	0,773	0,976	0,975	0,971	0,968
210	0,878	0,888	0,886	0,881	1,002	0,920	0,932	1,029	0,937	0,953	0,735	0,978	0,986	0,992	0,979
220	0,971	0,986	0,990	0,977	1,016	0,984	0,991	1,027	0,997	1,002	1,001	0,996	1,003	1,015	0,994
230	0,977	0,978	0,994	0,997	1,020	0,992	0,997	1,031	1,002	1,004	1,000	1,013	1,001	1,020	0,986
240	0,981	0,994	1,003	0,997	1,020	0,996	0,999	1,031	1,005	1,002	0,996	1,013	0,988	1,024	0,971
250	0,973	0,991	1,000	0,997	1,004	0,987	0,993	1,014	0,991	0,982	0,975	0,997	0,980	0,947	0,933

Fonte: elaboração do autor

CARGA MÉDIA

Tabela 41: Resultado de aplicação de curto-circuito para carga média

EVENTOS															
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	0,984	0,998	1,009	1,015	1,004	0,999	1,002	1,012	0,999	0,987	0,983	1,002	0,997	0,986	1,000
20	0,983	0,987	0,989	0,990	1,005	0,992	0,993	1,013	0,990	0,992	0,999	0,987	0,993	1,002	0,988
100	0,983	1,000	1,021	1,031	1,016	1,006	1,013	1,026	1,009	0,988	0,980	1,014	1,005	0,988	1,010
120	0,986	1,016	1,055	1,078	1,036	1,019	1,033	1,05	1,026	0,975	0,951	1,031	1,023	1,008	1,026
130	0,979	0,880	1,064	1,096	1,036	1,013	1,032	1,064	1,026	0,954	0,920	1,027	1,021	1,009	1,023
140	0,969	0,877	0,824	1,099	1,029	1,002	1,025	1,061	1,020	0,937	0,898	1,018	1,014	1,003	1,015
150	0,954	0,871	0,822	0,781	1,017	0,987	1,014	1,054	1,009	0,917	0,874	1,005	1,003	0,993	1,003
160	0,953	0,870	0,821	0,781	0,000	0,986	1,013	1,053	1,008	0,916	0,873	1,004	1,001	0,992	1,002
170	0,950	0,877	0,833	0,797	1,019	0,933	1,014	1,061	1,013	0,907	0,857	1,004	1,004	0,997	1,004
180	0,938	0,877	0,841	0,810	1,014	0,931	0,895	1,062	1,010	0,888	0,832	0,994	0,998	0,994	0,998
190	0,908	0,850	0,814	0,784	0,983	0,902	0,866	0,000	0,978	0,860	0,806	0,964	0,966	0,963	0,966
200	0,907	0,870	0,843	0,822	0,993	0,916	0,893	1,032	0,856	0,846	0,781	0,966	0,974	0,975	0,973
210	0,908	0,898	0,889	0,881	0,985	0,928	0,923	1,010	0,909	0,917	0,721	0,952	0,965	0,974	0,962
220	0,980	0,986	0,987	0,988	1,014	0,994	0,995	1,025	0,992	0,992	1,002	0,998	0,997	1,011	0,989
230	0,984	0,992	0,997	0,999	1,019	1,000	1,003	1,030	0,999	0,996	1,002	1,027	0,996	1,018	0,983
240	0,984	0,998	1,005	1,009	1,021	1,004	1,007	1,031	1,004	0,995	0,997	1,026	0,996	1,024	0,969
250	0,969	0,986	0,998	1,006	1,004	0,991	0,996	1,014	0,993	0,977	0,974	1,005	0,987	0,952	0,932

Fonte: elaboração do autor

CARGA LEVE

Tabela 42: Resultado de aplicação de curto-circuito para carga leve

EVENTOS															
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	0,995	1,018	1,036	1,046	1,025	1,015	1,022	1,035	1,020	0,998	0,990	1,024	1,015	0,997	1,031
20	0,987	0,993	0,994	0,996	1,006	0,995	0,995	1,014	0,989	0,990	1,000	0,984	0,991	1,000	0,979
100	0,992	1,021	1,044	1,057	1,031	1,018	1,028	1,043	1,025	0,996	0,984	1,030	1,018	0,994	1,040
120	1,000	1,034	1,080	1,107	1,047	1,027	1,045	1,068	1,046	0,984	0,959	1,043	1,034	1,014	1,050
130	0,994	0,883	1,088	1,126	1,043	1,017	1,042	1,071	1,046	0,963	0,927	1,034	1,029	1,012	1,044
140	0,993	0,881	0,825	1,128	1,034	1,004	1,033	1,064	1,040	0,950	0,904	1,022	1,019	1,004	1,032
150	0,967	0,874	0,824	0,781	1,021	0,986	1,019	1,054	1,029	0,924	0,879	1,006	1,005	0,992	1,016
160	0,967	0,874	0,823	0,781	0,000	0,986	1,018	1,053	1,029	0,924	0,879	1,006	1,004	0,992	1,016
170	0,966	0,883	0,837	0,798	1,022	0,953	1,021	1,060	1,036	0,915	0,862	1,004	1,005	0,996	1,015
180	0,956	0,886	0,847	0,814	1,016	0,950	0,900	1,058	1,035	0,896	0,836	0,992	0,997	0,991	1,003
190	0,928	0,861	0,823	0,791	0,988	0,923	0,875	0,000	1,005	0,871	0,813	0,964	0,969	0,963	0,975
200	0,924	0,877	0,849	0,826	0,989	0,929	0,895	1,023	0,838	0,850	0,779	0,956	0,965	0,965	0,967
210	0,922	0,907	0,897	0,888	0,980	0,937	0,924	1,002	0,896	0,908	0,713	0,950	0,954	0,962	0,947
220	0,988	0,993	0,995	0,996	1,015	0,999	0,998	1,025	0,990	0,990	1,002	0,984	0,994	1,008	0,977
230	0,991	1,000	1,006	1,008	1,021	1,005	1,006	1,031	0,994	0,993	1,002	1,036	0,994	1,016	0,967
240	0,990	1,005	1,015	1,021	1,023	1,008	1,012	1,034	1,004	0,992	0,995	1,033	0,998	1,021	0,950
250	0,971	0,993	1,009	1,019	1,008	0,993	0,999	1,018	0,994	0,974	0,969	1,011	0,989	0,950	0,898

Fonte: elaboração do autor

A Tabela 41, resume a aplicação de curto-circuito para a carga média após o período transitório. Como visto, o sistema não apresentou tantas situações críticas, apenas foram constatadas subtensões e sobretensões em algumas barras, por isso, é aplicável os procedimentos e comentários feitos anteriormente sobre reatores e capacitores nas linhas.

Além disso, houve seis barras com afundamentos de tensões abaixo de 0,80 pu, especificamente nos eventos 4 e 11, que serão representados graficamente com fatos demonstrativos. O evento 14 será apresentado como uma situação de estabilidade do sistema.

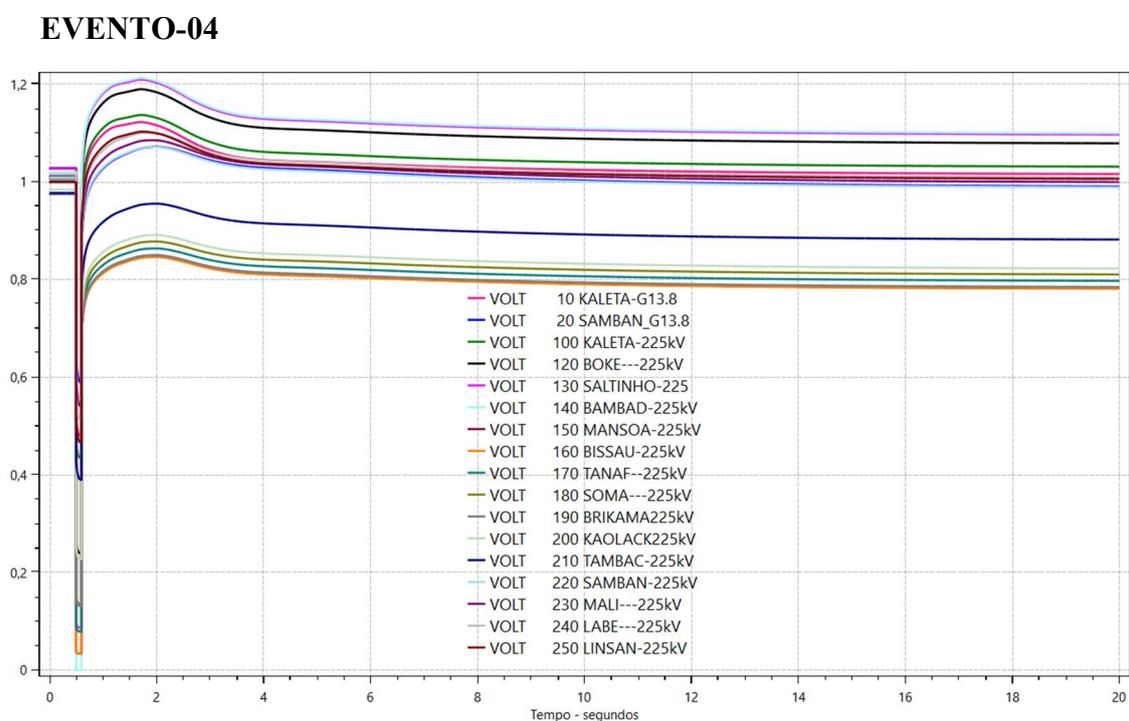


Figura 43: Curto-circuito 3φ barras 140-150 (Bambadinca e Mansoa).

Fonte: elaboração do autor

Após o período transitório, foram verificadas as subtensões nas barras: 150 - Mansoa, 160-Bissau, 170-Tanaf, 180- Soma, 190-Brikama e 200 Kaolack. Igualmente foram registradas as sobretensões nas barras 120-Boké, 130-Saltinho e 140 Bambadinca.

Para este patamar de carga, o critério de procedimento de rede é atendido no mesmo molde da carga pesada já enfatizada na Tabela 40.

EVENTO- 11

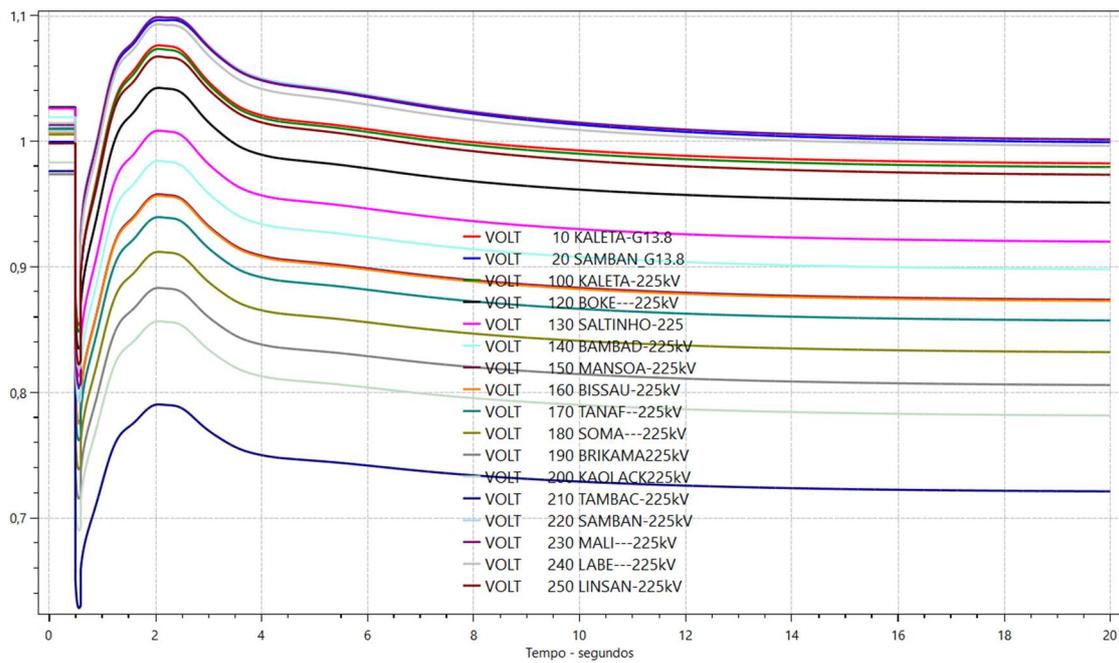


Figura 44: Curto-circuito 3 ϕ barras 210-220 (Tambacounda e Sambangalou).

Fonte: elaboração do autor.

EVENTO -14

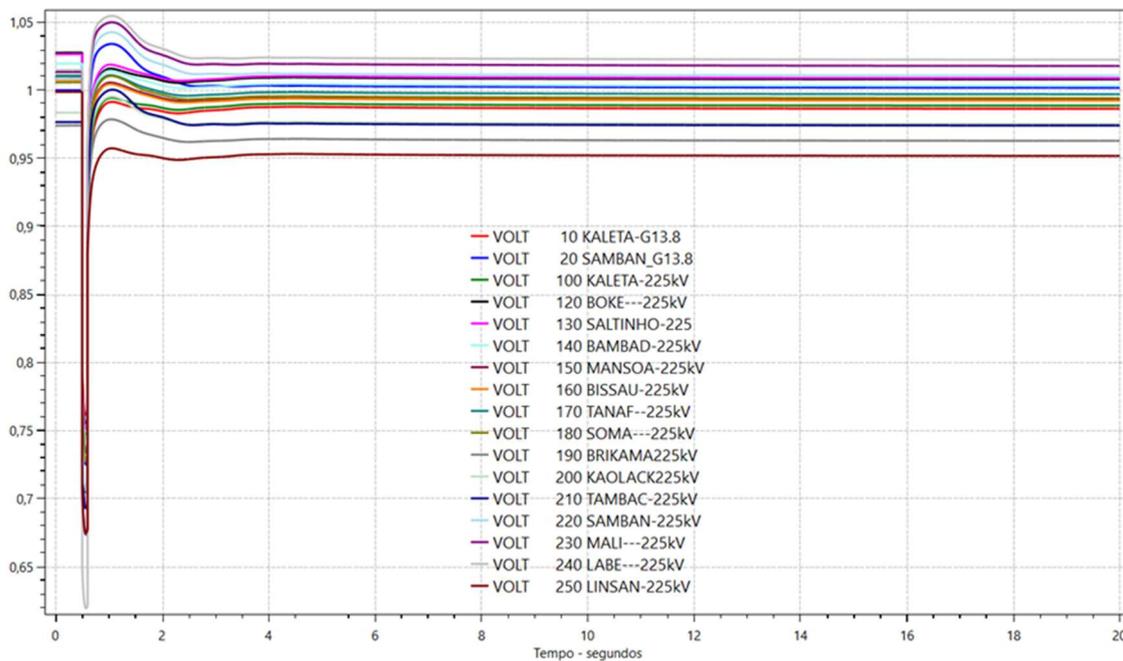


Figura 45: Curto-circuito 3 ϕ barras 240-250 (Labé e Linsan).

Fonte: elaboração do autor

A análise dos resultados desta carga segue o mesmo padrão das duas anteriores. Constatou-se como diferença, que os eventos considerados críticos, como os eventos 4 e 11, em que algumas barras operaram com tensões abaixo de 0,80 pu, são comuns a todos. No entanto, nesta carga, há menos ocorrências de subtensões abaixo de 0,80 pu.

Outra constatação refere-se aos eventos 5 e 8, envolvendo as subestações de Bissau e Brikama, que se mostraram bastante sensíveis à variação no sistema para todas as cargas. Como o sistema é em Anel e essas subestações estão localizadas nas laterais, qualquer sensibilidade anormal no sistema resulta em uma mudança em seus comportamentos.

Seguindo o critério de procedimento de rede dos itens apresentados na Tabela 27, segue resumo da análise de resultados desta carga leve na Tabela 43.

Tabela 43: Critério de procedimento de rede para carga leve.

Critérios	EVENTOS														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
2	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
3	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NOK	NOK	NOK	OK
4	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
5	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
6	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
8	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaboração do autor

Considerando o evento 4 como situação com mais tensões abaixo de 0,80 pu, segue o seu gráfico, enfatizando comportamento de suas tensões.

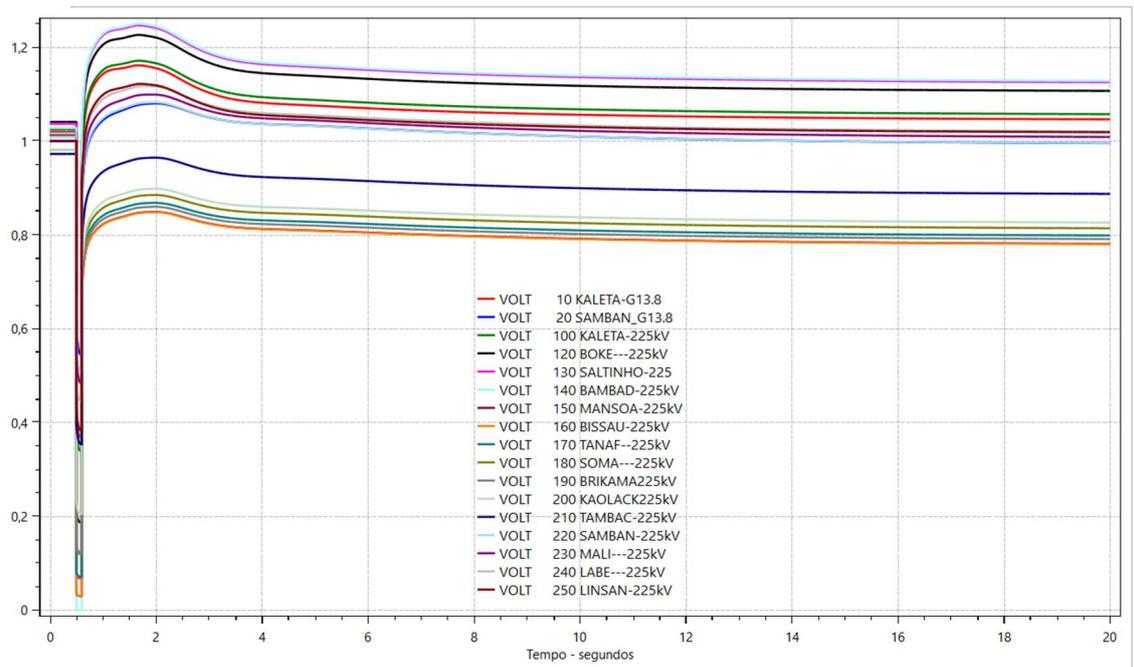
EVENTO -4

Figura 46: Curto-circuito 3φ barras 140-150 (Bambadinca e Mansoa).

Fonte: elaboração do autor

A Tabela 44, Tabela 45 e Tabela 46, apresentam os resultados dos três patamares de carga com a presença da Usina Solar Fotovoltaica, os procedimentos de análise, segue os mesmos moldes apresentados para as três cargas anteriores sem a Usina Solar Fotovoltaica.

ESTUDO DE ANÁLISE TRANSITÓRIA COM A USINA FOTOVOLTAICA PARA AS TRÊS CARGAS

Tabela 44: Curto-circuito 3φ para carga pesada com UFV.

EVENTOS															
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	0,991	1,002	1,009	1,014	1,013	1,001	1,003	1,011	1,000	0,994	0,990	1,006	0,996	0,987	0,998
20	0,973	0,980	0,976	0,978	1,013	0,985	0,990	1,015	0,993	0,999	0,999	0,992	0,996	1,004	0,990
100	0,987	1,005	1,018	1,026	1,023	1,006	1,010	1,025	1,006	0,991	0,983	1,009	1,000	0,984	1,003
120	0,915	1,017	1,052	1,073	1,037	1,016	1,024	1,050	1,012	0,964	0,941	1,018	1,004	0,987	1,003
130	0,909	0,844	1,060	1,091	1,036	1,008	1,019	1,057	1,005	0,935	0,905	1,014	0,999	0,982	0,995
140	0,900	0,842	0,741	1,093	1,029	0,996	1,011	1,055	0,996	0,915	0,881	1,006	0,992	0,976	0,987
150	0,886	0,836	0,739	0,711	1,018	0,981	0,997	1,048	0,984	0,893	0,857	0,995	0,981	0,967	0,976
160	0,885	0,835	0,737	0,709	0,994	0,979	0,996	1,046	0,983	0,892	0,856	0,994	0,980	0,966	0,975
165	0,885	0,835	0,737	0,709	0,994	0,979	0,996	1,057	0,983	0,892	0,856	0,994	0,980	0,966	0,975
170	0,883	0,842	0,751	0,727	1,022	0,904	0,997	1,050	0,986	0,881	0,842	0,998	0,986	0,974	0,980
180	0,875	0,844	0,762	0,743	1,022	0,903	0,896	1,063	0,982	0,863	0,822	0,996	0,988	0,978	0,982
190	0,847	0,818	0,738	0,720	0,990	0,875	0,869	0,000	0,952	0,836	0,797	0,966	0,950	0,950	0,952
200	0,853	0,839	0,774	0,764	1,007	0,891	0,895	1,041	0,884	0,823	0,784	0,979	0,978	0,974	0,972
210	0,877	0,883	0,849	0,848	1,010	0,917	0,929	1,030	0,938	0,954	0,746	0,980	0,988	0,994	0,981
220	0,965	0,974	0,968	0,971	1,023	0,984	0,991	1,027	0,997	1,003	1,001	0,996	1,003	1,015	0,993
230	0,967	0,980	0,977	0,981	1,026	0,988	0,996	1,030	1,002	1,004	1,001	1,013	1,001	1,020	0,986
240	0,969	0,985	0,987	0,992	1,027	0,992	1,000	1,030	1,005	1,002	0,997	1,013	0,989	1,024	0,971
250	0,962	0,979	0,987	0,994	1,011	0,984	0,990	1,013	0,992	0,983	0,976	0,997	0,981	0,950	0,933

Fonte: elaboração do autor

Tabela 45: Curto-circuito 3φ para carga média com UFV

EVENTOS															
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	0,984	0,999	1,010	1,009	1,010	0,999	1,002	1,012	1,000	0,988	0,984	1,002	0,997	0,986	1,000
20	0,983	0,989	0,992	0,979	1,009	0,992	0,993	1,013	0,990	0,993	1,008	0,986	0,993	1,002	0,987
100	0,983	1,005	1,022	1,024	1,021	1,006	1,012	1,026	1,008	0,989	0,981	1,014	1,005	0,988	1,010
120	0,990	1,017	1,057	1,071	1,041	1,020	1,033	1,056	1,026	0,977	0,954	1,030	1,023	1,008	1,025
130	0,984	0,890	1,065	1,089	1,040	1,013	1,032	1,063	1,026	0,956	0,924	1,027	1,021	1,008	1,023
140	0,973	0,887	0,837	1,092	1,033	1,002	1,025	1,060	1,019	0,939	0,902	1,018	1,014	1,003	1,015
150	0,958	0,881	0,835	0,749	1,022	0,987	1,013	1,053	1,009	0,920	0,878	1,005	1,002	0,993	1,003
160	0,957	0,880	0,834	0,748	1,007	0,986	1,012	1,051	1,008	0,919	0,877	1,004	1,001	0,992	1,002
165	0,957	0,880	0,834	0,748	1,007	0,986	1,012	1,060	1,008	0,919	0,877	1,004	1,001	0,992	1,002
170	0,954	0,887	0,846	0,764	1,024	0,933	1,014	1,060	1,012	0,909	0,861	1,004	1,004	0,997	1,004
180	0,941	0,888	0,854	0,778	1,019	0,931	0,895	1,061	1,009	0,890	0,836	0,994	0,997	0,994	0,997
190	0,912	0,859	0,827	0,753	0,987	0,902	0,866	0,000	0,977	0,862	0,809	0,963	0,966	0,962	0,966
200	0,911	0,878	0,855	0,792	0,997	0,915	0,893	1,030	0,856	0,846	0,785	0,965	0,973	0,975	0,972
210	0,910	0,905	0,898	0,859	0,989	0,928	0,923	1,009	0,909	0,918	0,724	0,952	0,964	0,974	0,961
220	0,981	0,988	0,991	0,976	1,018	0,994	0,996	1,024	0,992	0,993	1,003	0,988	0,997	1,011	0,989
230	0,984	0,994	1,000	0,987	1,023	1,000	1,003	1,029	0,999	0,997	1,003	1,027	0,997	1,018	0,983
240	0,984	0,998	1,007	0,999	1,025	1,003	1,007	1,031	1,004	0,996	0,998	1,025	0,996	1,022	0,968
250	0,969	0,987	1,000	0,997	1,009	0,991	0,996	1,014	0,992	0,979	0,975	1,005	0,987	0,915	0,931

Fonte: elaboração do autor

Tabela 46: Curto-circuito 3 ϕ para à carga leve com UFV

EVENTOS															
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	0,995	1,020	1,038	1,035	1,028	1,016	1,023	1,035	1,020	0,999	0,992	1,024	1,015	0,996	1,031
20	0,988	0,995	0,998	0,979	1,008	0,995	0,995	1,014	0,989	0,991	1,001	0,984	0,991	1,000	0,980
100	0,992	1,023	1,046	1,045	1,034	1,019	1,027	1,043	1,025	0,997	0,987	1,030	1,019	0,995	1,040
120	1,005	1,035	1,082	1,094	1,050	1,028	1,045	1,068	1,045	0,987	0,963	1,043	1,034	1,014	1,052
130	0,998	0,893	1,091	1,113	1,046	1,017	1,042	1,070	1,046	0,966	0,932	1,035	1,029	1,013	1,044
140	0,987	0,891	0,839	1,115	1,037	1,004	1,033	1,064	1,040	0,950	0,909	1,023	1,020	1,005	1,032
150	0,972	0,885	0,837	0,748	1,023	0,987	1,019	1,053	1,029	0,928	0,884	1,007	1,005	0,993	1,016
160	0,971	0,884	0,837	0,747	1,014	0,986	1,019	1,053	1,028	0,927	0,883	1,006	1,005	0,992	1,016
165	0,971	0,884	0,837	0,747	1,014	0,986	1,019	1,053	1,028	0,927	0,883	1,006	1,005	0,992	1,016
170	0,970	0,893	0,851	0,765	1,025	0,954	1,021	1,059	1,035	0,918	0,867	1,004	1,006	0,996	1,015
180	0,960	0,896	0,861	0,781	1,019	0,951	0,901	1,058	1,034	0,899	0,840	0,992	0,997	0,991	1,004
190	0,933	0,871	0,836	0,759	0,990	0,924	0,875	0,000	1,005	0,874	0,817	0,964	0,969	0,963	0,975
200	0,927	0,886	0,862	0,795	0,991	0,930	0,895	1,023	0,837	0,853	0,783	0,956	0,966	0,966	0,967
210	0,925	0,913	0,906	0,862	0,982	0,937	0,924	1,002	0,896	0,909	0,716	0,940	0,954	0,963	0,947
220	0,988	0,995	0,999	0,978	1,017	0,999	0,998	1,025	0,990	0,991	1,004	0,984	0,994	1,008	0,977
230	0,992	1,003	1,010	0,992	1,023	1,005	1,006	1,031	0,998	0,994	1,003	1,036	0,995	1,016	0,967
240	0,991	1,007	1,019	1,005	1,025	1,008	1,011	1,034	1,004	0,993	0,997	1,033	0,998	1,021	0,950
250	0,971	0,995	1,012	1,005	1,009	0,993	0,999	1,018	0,994	0,975	0,971	1,011	0,989	0,950	0,898

Fonte: elaboração do autor

Com a presença da usina fotovoltaica na avaliação dinâmica, considerando os resultados finais após o transitório, foram constatadas situações críticas para o sistema nos eventos 3,4 e 11, em que as tensões estão bem abaixo de 0,80 pu, indicando a necessidade de cortes de cargas nesses eventos. Além disso, foram verificadas subtensões e sobretensões nesses eventos, e os comentários anteriores aplicam-se a este caso.

Observando o critério de procedimento de rede sobre o comportamento desta carga, a Tabela 47 resume, as informações de cada evento do sistema.

Tabela 47: Critério de procedimento de rede para carga pesada com UFV

Critérios	EVENTOS														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
2	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
3	OK	OK	Ok	OK	NOK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NOK	NOK	NOK	OK
4	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
5	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
6	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
8	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaboração do autor

Para representar os comportamentos dessas tensões em formas de gráficos, foram escolhidos os eventos 3 e 12, justamente um representando a criticidade do sistema e o outro a estabilidade de tensões na faixa definida pelo programa.

EVENTO -03 – Carga pesada com usina na fotovoltaica

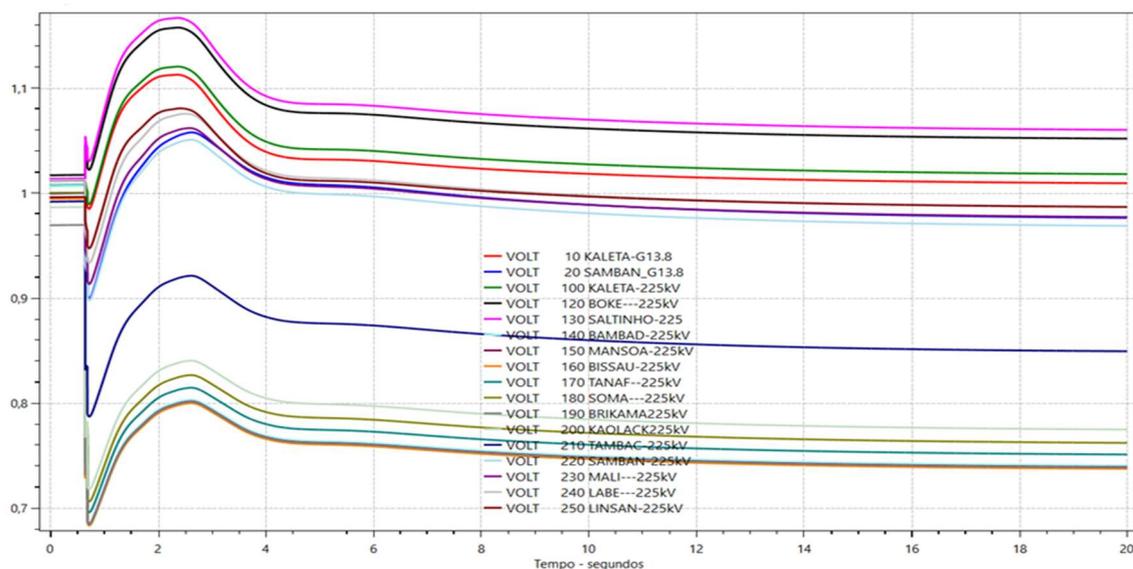


Figura 47: Curto-circuito 3 ϕ barras 130-140 (Saltinho e Bambadinca) com UFV

Fonte: elaboração do autor

EVENTO -12 – Carga pesada com usina na fotovoltaica

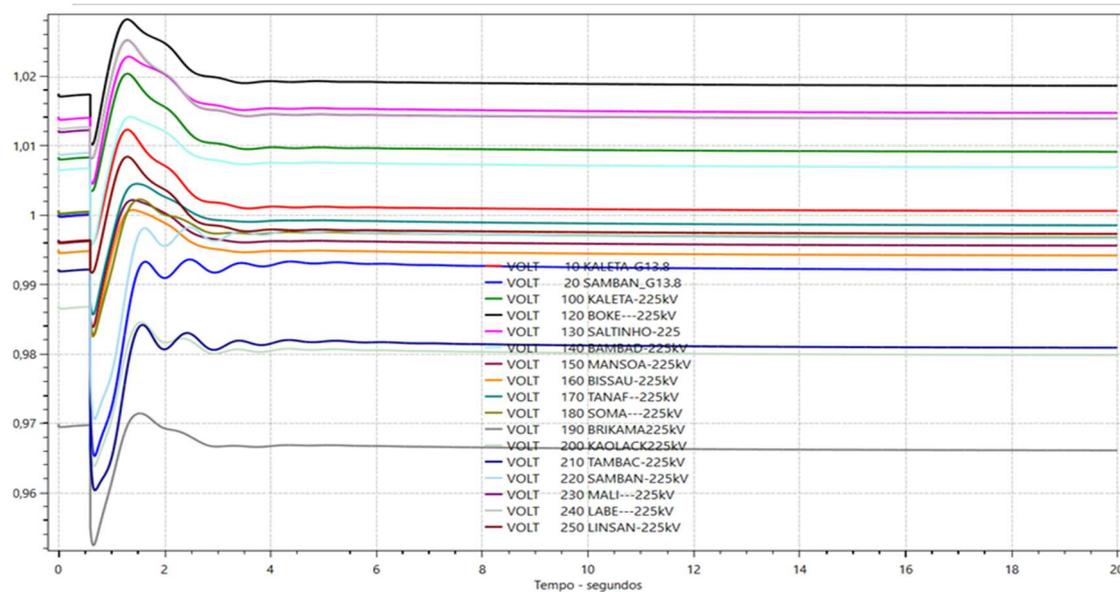


Figura 48: Curto-circuito 3 ϕ barras 130-140 (Saltinho e Bambadinca) com UFV

Fonte: elaboração do autor

A seguir é apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a análise concernente à carga média com a usina fotovoltaica.

Para avaliação desta carga, as situações mais severas são os eventos 4 e 11, pois possuem tensões muito abaixo do padrão, sobretudo evento 4. Ainda sobre as subtensões e sobretensões registradas, o processo deles segue o molde anterior já mencionado nas outras análises. Segue na Tabela 48, avaliação em relação aos critérios de procedimentos de rede.

Tabela 48: Critério de procedimento de rede para à carga média com UFV

Critérios	EVENTOS														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	NOK	NOK	NOk	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
2	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
3	NOK	OK	Ok	OK	NOK	NOK	OK	OK	OK	OK	OK	NOK	NOK	NOK	NOK
4	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
5	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
6	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
8	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaboração do autor

Os gráficos das Figura 49, Figura 50 e Figura 51, espelham os perfis das tensões para os eventos 4, 11 e 13, respetivamente situação crítica para o sistema, representada pelos eventos 4 e 11 e não crítica representado pelo evento 13.

EVENTO -4 – Carga média com usina fotovoltaica

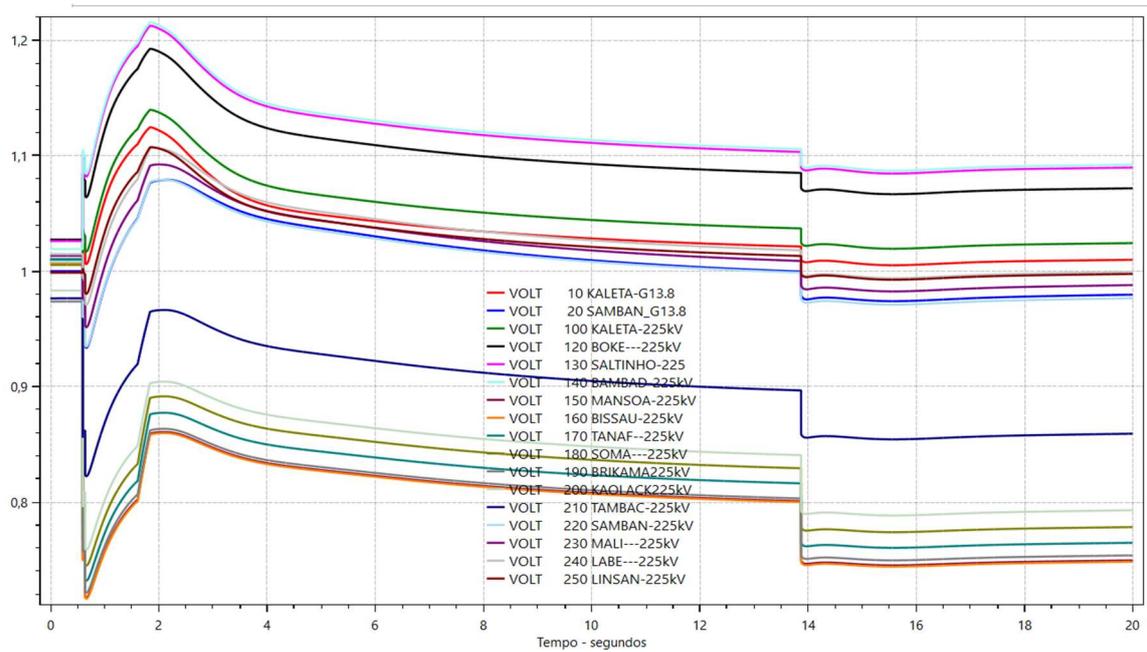


Figura 49: Curto-circuito 3 ϕ barras 140-150 (Bambadinca e Mansoa) com UFV

Fonte: elaboração do autor

EVENTO -11 – Carga média com usina fotovoltaica

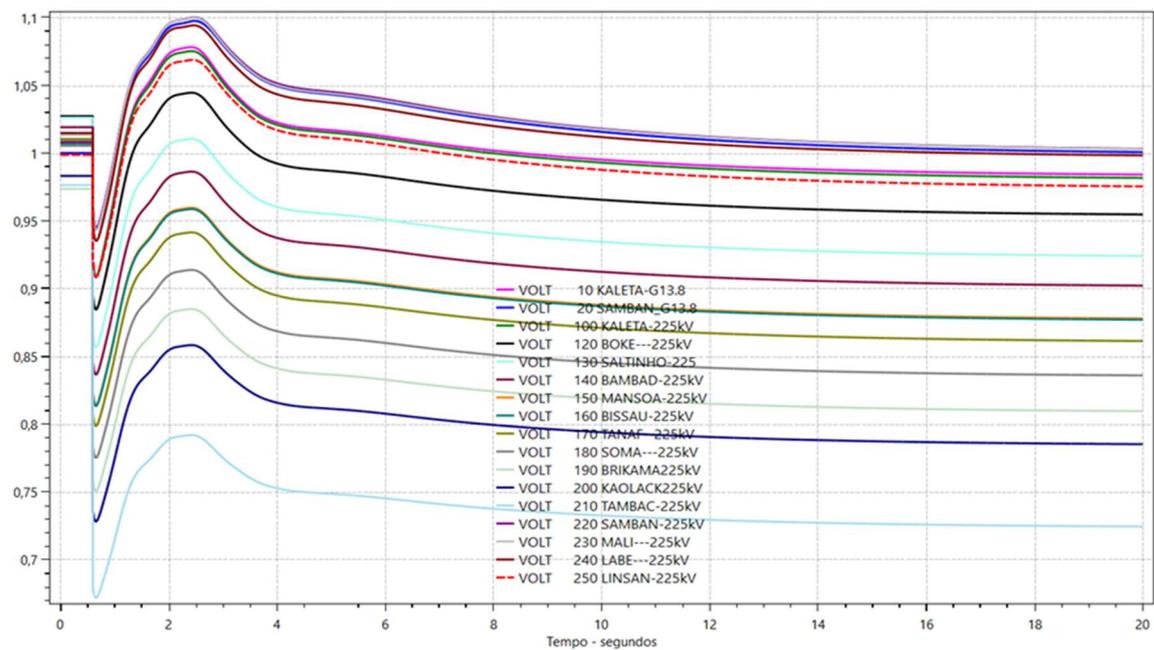


Figura 50: Curto-circuito 3 ϕ barras 210-220 (Tambacounda e Sambangalou) com UFV

Fonte: elaboração do autor

EVENTO -13 – Carga média com UFV

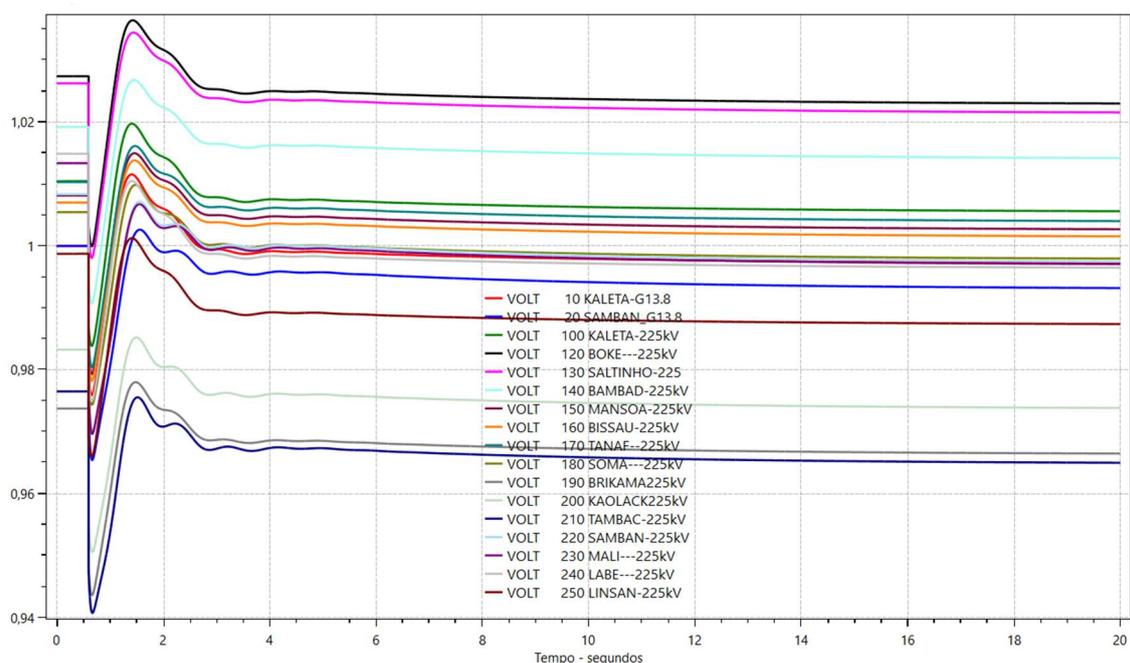


Figura 51: Curto-circuito 3 ϕ barras 230-240 (Mali e Labé) com UFV

Fonte: elaboração do autor

Por último, a Tabela 42 apresenta a análise para à carga leve com a usina fotovoltaica.

Como mostrado na Tabela 42, a análise desta carga, se assemelha com à da carga média, tanto em relação ao número de subtensões nas barras quanto às sobretensões. Para todas as três (pesada, média e leve), os eventos 4 e 11 apresentaram algumas tensões muito abaixo e distantes do valor nominal padronizado, chegando em alguns eventos a menos de 0,80 pu.

As sobretensões nesta análise transitória, referentes à presença da usina fotovoltaica ocorreram com maior frequência no evento 8. Portanto, para seus ajustes, é válido aplicar da instalação de bancos de reatores para reduzir os perfis de tensões nas barras, consumindo o reativo.

A Tabela 49 apresenta o resultado do procedimento da rede com relação aos resultados finais da carga média.

Tabela 49: Critério de procedimento de rede para à carga média com UFV

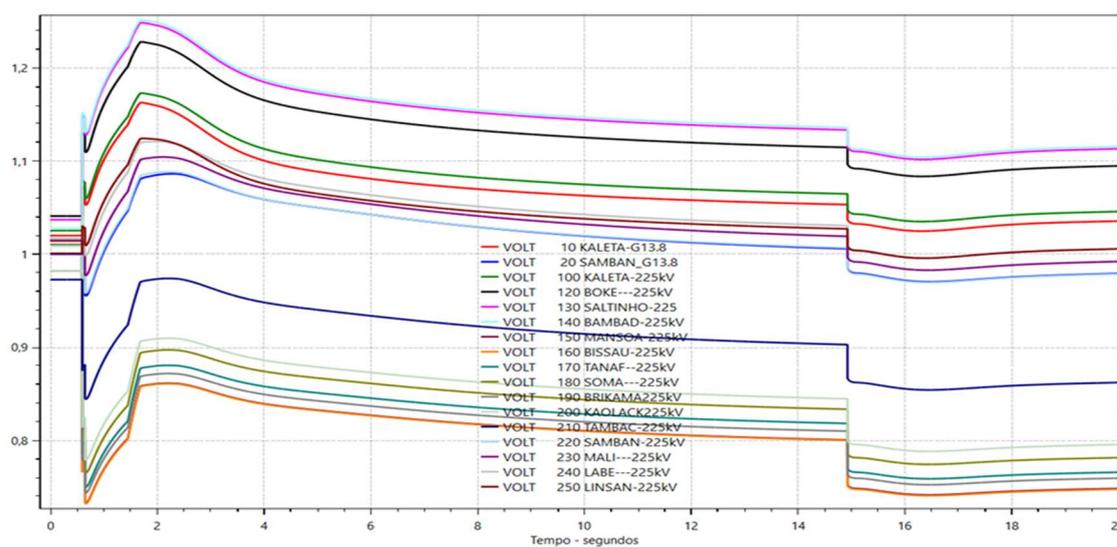
Critérios	EVENTOS														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
2	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
3	NOK	OK	Ok	OK	NOK	NOK	OK	OK	OK	OK	OK	NOK	NOK	NOK	OK
4	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
5	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
6	OK	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
8	OK	Ok	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaboração do autor

Em representação sobre a criticidade do sistema para esses eventos de carga leve com a usina fotovoltaica, foi escolhido o Evento 4 para espelhar seu perfil de tensão via gráfico, pois nele são registradas barras com tensões muito menores chegando 0,747pu. E para os eventos cuja tensões nas barras operaram na faixa de operação, foi escolhido o Evento 6 para representar esta estabilidade.

Portanto, para finalizar esta análise, seguem nas Figura 52 e Figura 53, os gráficos dos Eventos 4 e 5. O evento 4 mostra a criticidade do sistema com tensões abaixo da nominal e o 5 mostra estabilidades de tensões nas barras na faixa definida pelo programa.

EVENTO -04 – Carga leve com UFV

**Figura 52: Curto-circuito 3φ barras 140-150 (Bambadinca e Mansoa) com UFV**

Fonte: elaboração do autor

Evento -05 – Carga leve com UFV

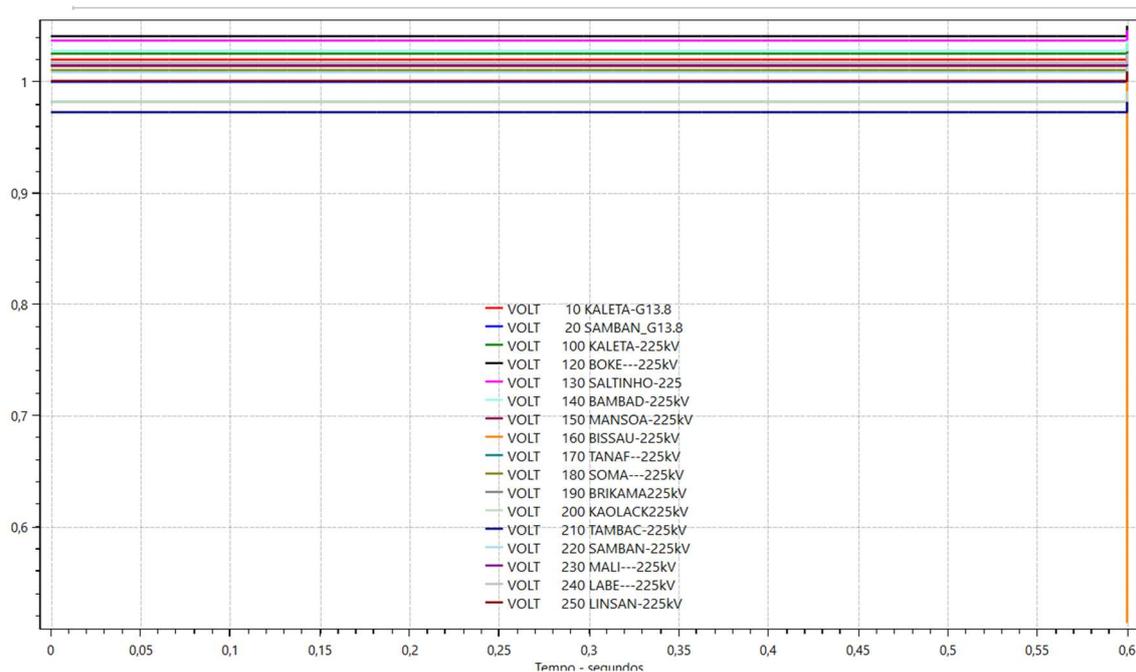


Figura 53: Curto-circuito 3φ barras 140-150 (Bambadinca e Mansoa) com UFV

Fonte: elaboração do autor

7.3 ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO COM PERDA DE GERAÇÃO

O mesmo princípio argumentativo é válido para as cargas média e leve.

EVENTO – 16- Carga média sem UFV

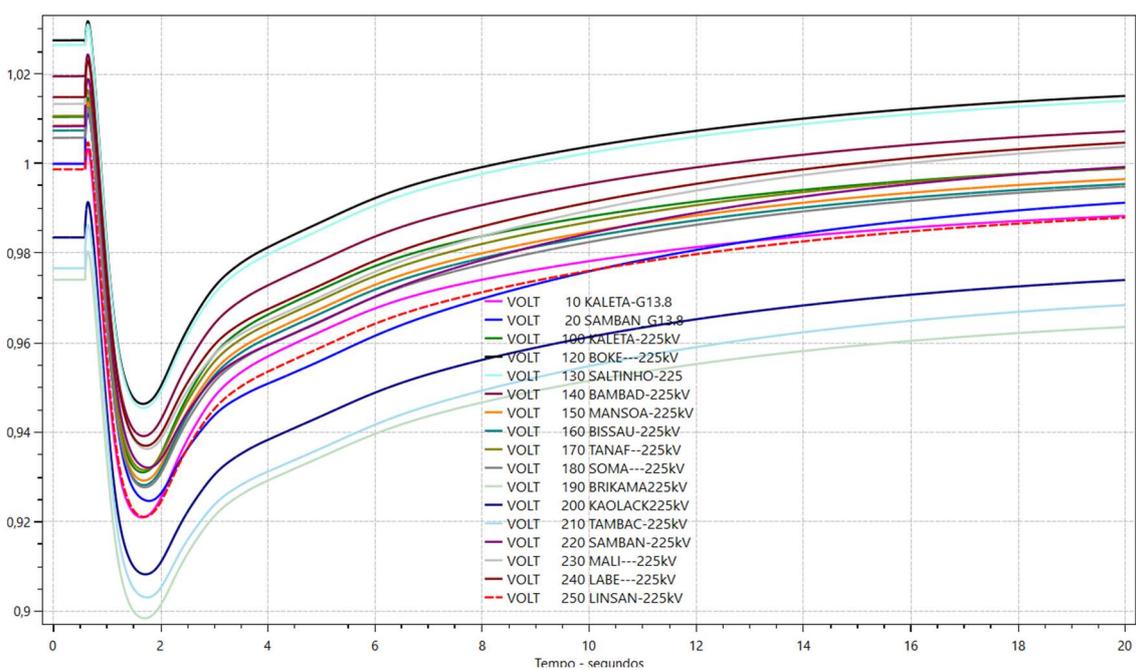


Figura 54: Carga Média com a perda da geração de Sambangalou sem UFV

Fonte: elaboração do autor

EVENTO – 16- Carga leve sem UFV

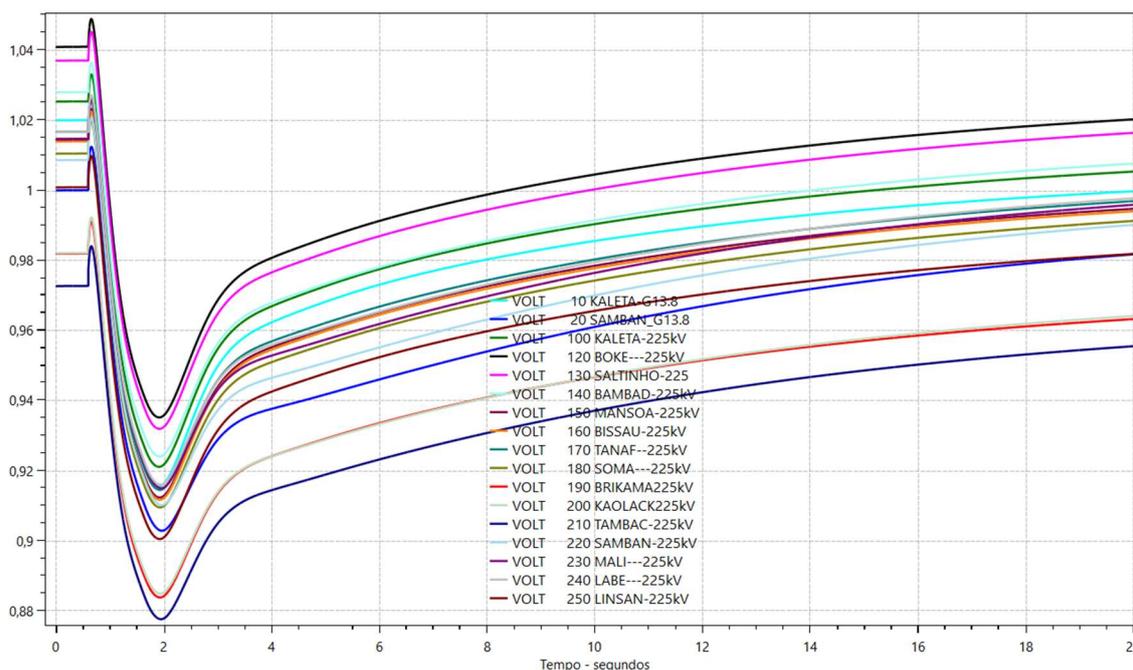


Figura 55: Carga Leve com perda da geração de Sambangalou sem UFV

Fonte: elaboração do autor

Com a perda de uma unidade geradora de Sambangalou, não constatou nenhuma anomalia no sistema, todas as barras de três patamares de cargas sem a usina fotovoltaica estabilizaram com tensões na faixa definida, portanto, não se verificou subtensões e nem sobretensões nas barras.

Os gráficos da Figura 55, Figura 56 e Figura 57 apresentam as mesmas cargas, porém com a usina fotovoltaica.

Como consta na Figura 55, praticamente não há diferença em relação à mesma carga apresentada na Figura 33 sem a presença da usina solar fotovoltaica, e isso era o esperado, exatamente, porque o dimensionamento de máquina para o despacho da usina é o mesmo, o que difere é apenas a barra 165 que é uma extensão da barra 160. O mesmo princípio argumentativo é válido para as cargas média e leve que seguem respectivamente nas Figura 56 e Figura 57.

EVENTO – 16- Carga média com UFV

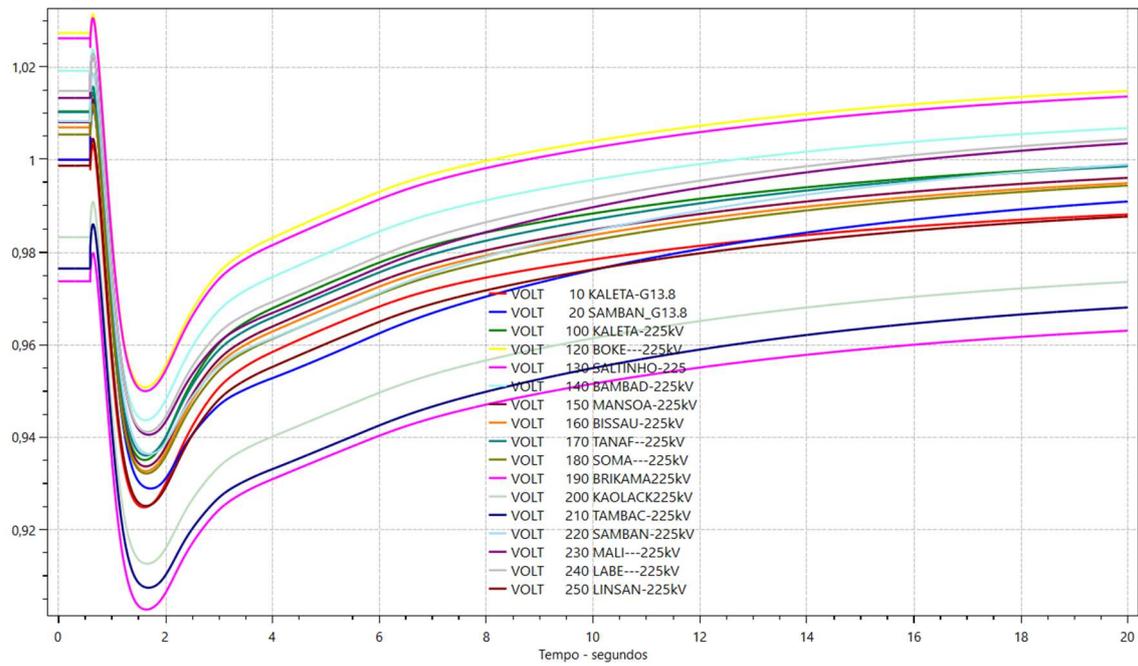


Figura 56: Carga Média com perda da geração de Sambangalou com UFT

Fonte: elaboração do autor

EVENTO – 16- Carga leve com UFV

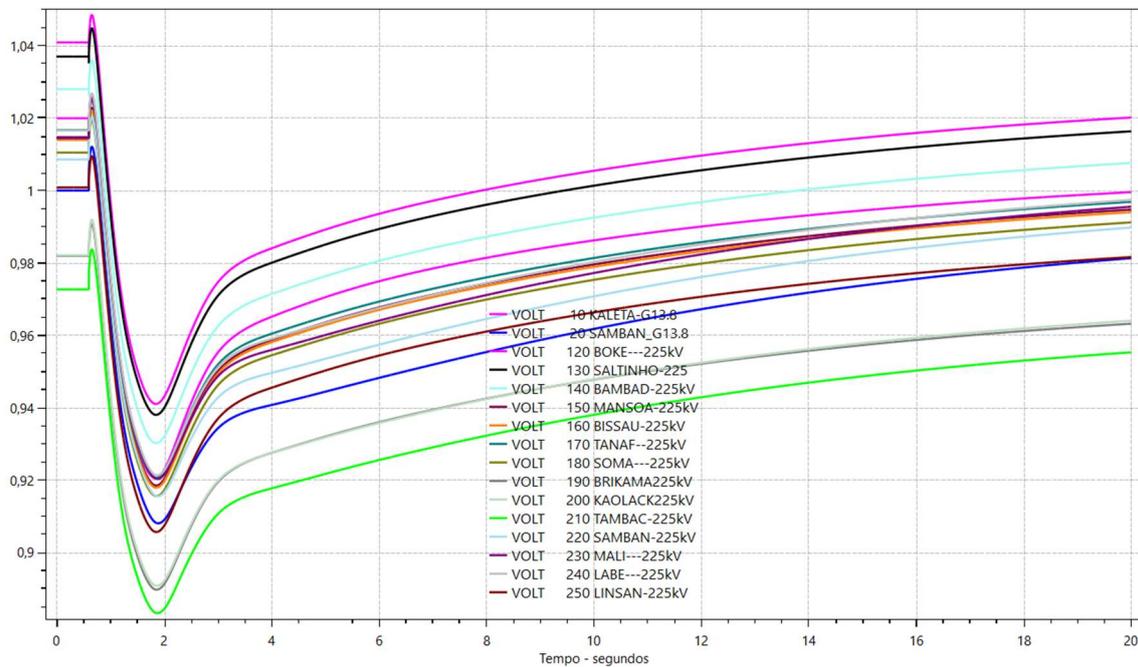


Figura 57: Carga Leve com perda da geração de Sambangalou com UFT

Fonte: elaboração do autor

7.4 ANÁLISE DA FREQUÊNCIA

A seguir, são ilustrados alguns gráficos de frequências relacionados a cada uma das cargas, inclusive para alguns eventos do sistema, pois nem todos foram plotados. A Figura 58 inicia com a carga pesada relacionado ao Evento 15.

Nos três gráficos, pode-se observar que, com a perda das linhas Kaléta/Linsan na carga Pesada, Mali/Labé na carga média e Mansoa/Bissau na carga leve, houve uma sobrefrequência sustentada de menos de 1%.

Este comportamento é provavelmente causado pela diminuição das perdas totais, resultando em um desequilíbrio entre carga e geração. Embora seja uma sobrefrequência leve, ainda assim, merece uma atenção por parte dos planejadores e operadores do sistema OMVG, que devem tomar os devidos cuidados em relação a essas barras.

Com essa análise relacionada às frequências das usinas, conclui-se todos os testes definidos e realizados com sucesso para o sistema da OMVG.

A Figura 59, apresenta o gráfico da frequência com relação a carga média.

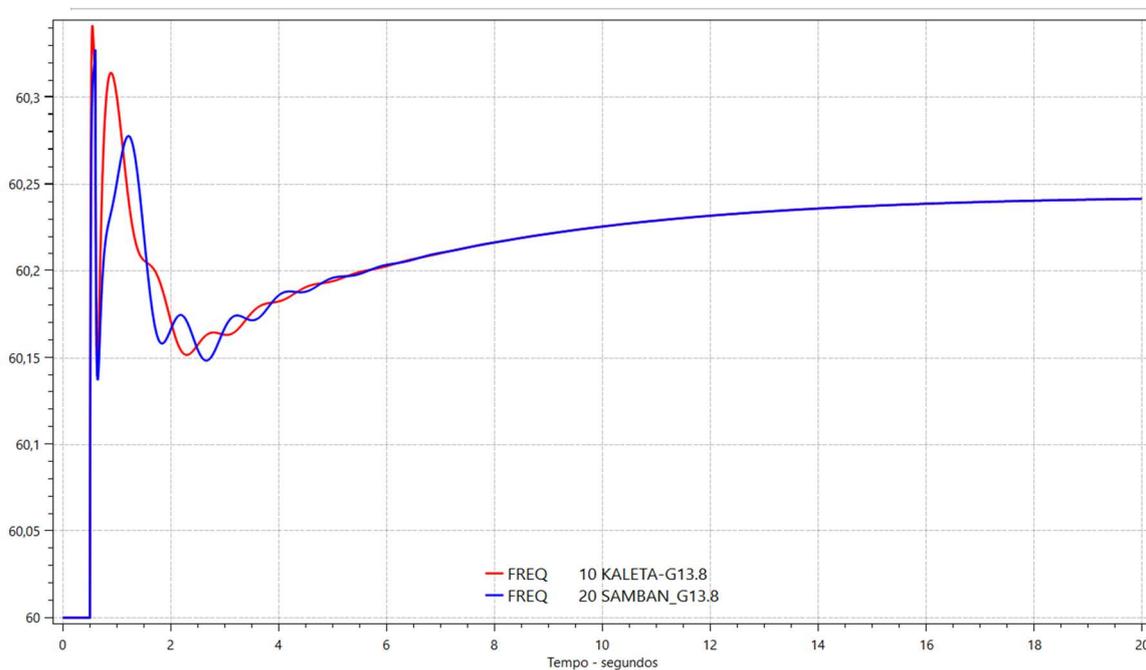


Figura 58: Frequências das usinas para curto-circuito em carga pesada (Evento 15)

Fonte: elaboração do autor

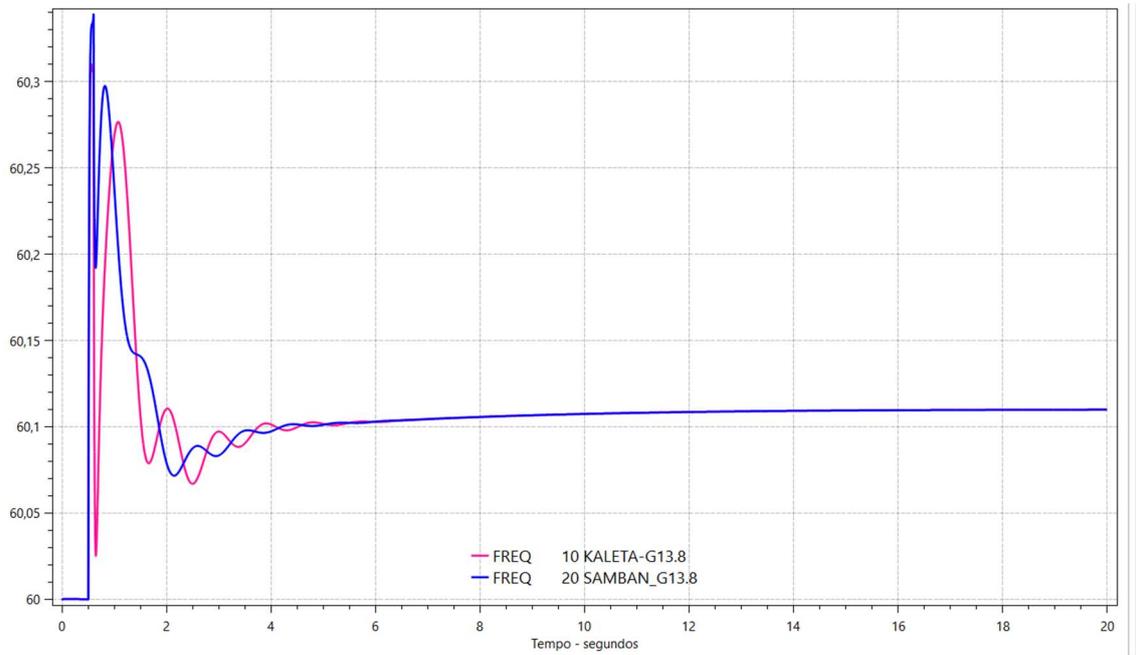


Figura 59: Frequências das usinas para curto-circuito em carga Média (Evento 13)

Fonte: elaboração do autor

A Figura 60, apresenta o gráfico de frequências para a carga leve.

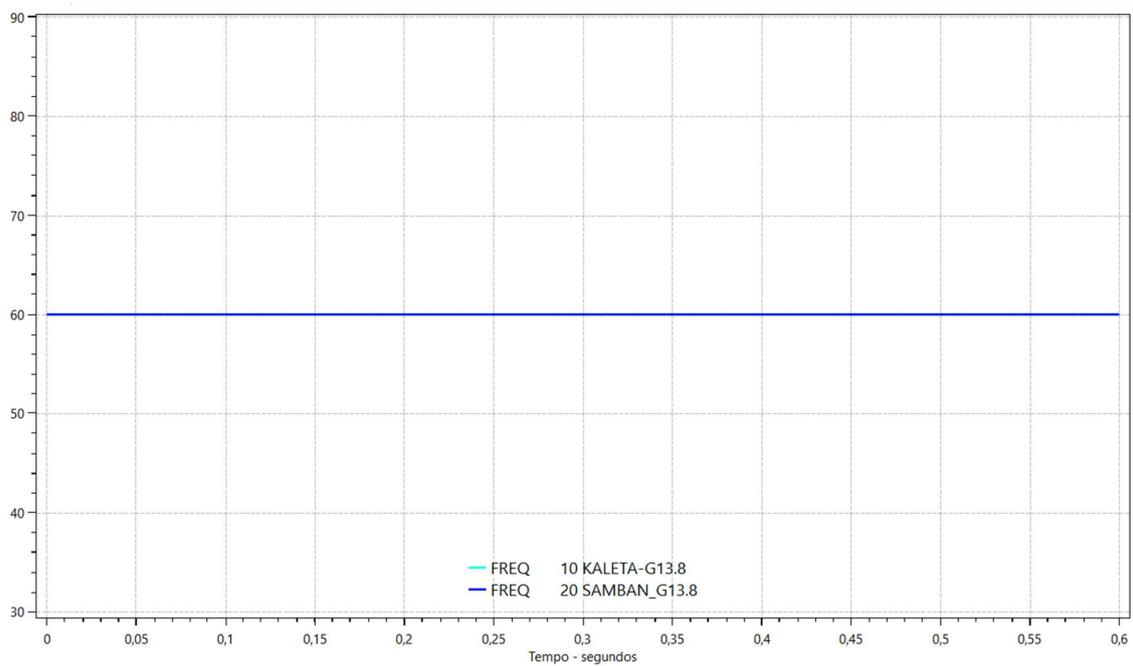


Figura 60: Frequências das usinas para curto-circuito em carga Leve (Evento 5)

Fonte: elaboração do autor

8 REFERÊNCIAS

- [1] A. Bichels, *Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução*. Curitiba: EDUTFPR, 2018.
- [2] E. de Pesquisa Energética, “Matriz Energética”. Acessado: 4 de março de 2024. Available at: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>
- [3] Entidade Nacional de Eletricidade, “A energia do universo”. Acessado: 19 de maio de 2024. Available at: <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/hidrogenio>
- [4] W. L. F. and P. Choudhury, “Probabilistic Planning of Transmission Systems: Why, How and an Actual Example Wenyuan Li, Fellow, IEEE and Paul Choudhury, Member, IEEE”.
- [5] E. A. Indi, “Importância de Planejamento Integrado de Recursos (PIR) para Planejamento Energético de Longo Prazo na Guiné-Bissau”. Acessado: 14 de novembro de 2023. Available at: <https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/handle/123456789/2882>
- [6] L. A. P. M. R. Costa, “Estudo de Avaliação de Perdas em Sistemas de Distribuição de energia Elétrica: Caso Bissau”. 2022.
- [7] A. L. de E. Renováveis, “Eletrificação rural através de mini-redes em Contuboeil”. Acessado: 31 de maio de 2024. Available at: <https://www.aler-renovaveis.org/pt/comunicacao/noticias/electrificacao-rural-atraves-de-mini-redes-em-contuboeil/>
- [8] R. R. B. De Aquino *et al.*, “Improving reservoir based wind power forecasting with ensembles”, 2014, doi: 10.1109/SMC.2014.6974034.
- [9] R. D. Prasad, R. C. Bansal, e A. Raturi, “Multi-faceted energy planning: A review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.021.
- [10] G. de M. Jannuzzi, J. Swisher, e R. Redlinger, *Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: oferta, demanda e suas interfaces*, 2º ed. Campinas IEI Brasil, 2018.
- [11] L. F. A. Cordeiro, “Planejamento do setor elétrico brasileiro com foco nas emissões de CO₂”. Acessado: 12 de fevereiro de 2024. Available at: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/15547>
- [12] A. P. Neto, “Metodologia para planejamento Energético Estadual de longo prazo.”, 2013.
- [13] L. dos S. G. Othon Luiz Pinheiro da Silva, “O sistema Elétrico Nacional e a Necessidade Nuclear”, 2006.
- [14] A. Gómez, C. Dopazo, e N. Fueyo, “The ‘cost of not doing’ energy planning: The Spanish energy bubble”, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.02.004.
- [15] S. V. Bajay, “Evolução do planejamento energético no Brasil na última década e desafios pendentes”, *Rev. Bras. Energ.*, 2013.
- [16] C. U. Vila, *Energias Renováveis: Políticas Públicas e Planejamento Energético*. Curitiba: EDUTFPR, 2014.

- [17] M. E. M. Udaeta, L. C. R. Galvão, A. L. V. Gimenes, e R. J. Fujii, “Elementos de planejamento integrado de recursos energéticos”, 2004.
- [18] J. B. G. S. Neto, “Mais luz para o Espírito Santo desenvolver seu potencial”, 2005.
- [19] A. S. Filho, “Síntese Dinâmica para o planejamento a longo prazo de sistemas de transmissão de energia”. 1988.
- [20] S. A. Flávio, “Planejamento da expansão de sistemas de transmissão com elevada participação de fontes renováveis”, 2015.
- [21] P. S. R. Murthy, *Power System Analysis*. BS Publications, 2007.
- [22] C. A. Moraes, “Heurística construtiva e otimização bioinspirada aplicada à expansão de sistema de transmissão de energia elétrica”. 2015.
- [23] A. H. Escobar, R. A. Gallego, e R. Romero, “Multistage and coordinated planning of the expansion of transmission systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004. doi: 10.1109/TPWRS.2004.825920.
- [24] M. Rahmani, R. A. Romero, e M. J. Rider, “Risk/investment-driven transmission expansion planning with multiple scenarios”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2013, doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0742.
- [25] C. de P. em E. Elétrica, “Manual de Anatem”. Acessado: 2 de janeiro de 2023. Available at: <https://www.cepel.br/>
- [26] C. de P. em E. Elétrica, “Manual de Anarede”. Acessado: 2 de janeiro de 2023. Available at: <https://www.cepel.br/>
- [27] C. T. Miasaki e R. Romero, “Um algoritmo genético especializado aplicado ao planejamento da expansão do sistema de transmissão com alocação de dispositivos de compensação série”, 2007, doi: 10.1590/s0103-17592007000200007.
- [28] C. de C. do P. da E. dos S.-V. I. Elétricos, “Aperfeiçoamento dos processos e Metodologia para Expansão da Transmissão”. 2002.
- [29] E. de P. Energética, “Critério e Procedimentos para o Planejamento da Expansão dos Sistemas de Transmissão.” Acessado: 7 de abril de 2023. Available at: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/criterios-e-procedimentos-de-planejamento-da-transmissao>
- [30] R. Hemmati, R. A. Hooshmand, e A. Khodabakhshian, “Comprehensive review of generation and transmission expansion planning”, 2013, doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0031.
- [31] Operador Nacional Do Sistema Elétrico - ONS, “Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SIN”, 2017.
- [32] IRENA (International Renewable Energy Agency), “International trade and green hydrogen.” 2023.
- [33] I. (International A. E. Agency), “Hydrogen production and Infrastructure Projects Database”. Acessado: 19 de março de 2024. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and->

infrastructure-projects-database

- [34] J. W. Mengdi, “Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators”, 2021.
- [35] M. Velasquez-Jaramillo, J. G. García, e O. Vasco-Echeverri, “Techno economic model to analyze the prospects of hydrogen production in Colombia”, 2024, doi: 10.1016/j.ijft.2024.100597.
- [36] O. A. Marzouk, “Expectations for the Role of Hydrogen and Its Derivatives in Different Sectors through Analysis of the Four Energy Scenarios: IEA-STEPS, IEA-NZE, IRENA-PES, and IRENA-1.5°C”, 2024, doi: 10.3390/en17030646.
- [37] IRENA (Agência Internacional para as Energias Renováveis), “Perspectiva Da Transição Energética Mundial Caminho Para 1,5°C”. Acessado: 15 de abril de 2024. [Online]. Available at: www.irena.org
- [38] J. Kotowicz, D. Węcel, e M. Jurczyk, “Analysis of component operation in power-to-gas-to-power installations”, *Appl. Energy*, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.050.
- [39] D. E. L. R. E. D. Italia *et al.*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 2023.
- [40] F. K. Bahnamiri, M. Khalili, P. Pakzad, e M. Mehrpooya, “Techno-economic assessment of a novel power-to-liquid system for synthesis of formic acid and ammonia, based on CO₂ electroreduction and alkaline water electrolysis cells”, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.01.085.
- [41] K. B. Syariah e G. Ilmu, “Green hydrogen for ammonia production - A case for the Netherlands”.
- [42] O. A. MARZOUK, “Growth in the Worldwide Stock of E-Mobility Vehicles (by Technology and by Transport Mode) and the Worldwide Stock of Hydrogen Refueling Stations and Electric Charging Points between 2020 and 2022”.
- [43] P. A. Pilavachi, S. D. Stephanidis, V. A. Pappas, e N. H. Afgan, “Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies”, 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.11.014.
- [44] A. Boretti, “A market opportunity in power generation for hydrogen energy storage systems”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.162.
- [45] D. Katla, Ł. Bartela, e A. Skorek-Osikowska, “Evaluation of electricity generation subsystem of power-to-gas-to-power unit using gas expander and heat recovery steam generator”, vol. 212, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118600.
- [46] A. Boretti, “Hydrogen key technology to cover the energy storage needs of NEOM City”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.240.
- [47] L. Schmeling, A. A. I. Buchholz, H. Heineke, P. Klement, B. Hanke, e K. von Maydell, “Planning, Optimisation and Evaluation of Small Power-to-Gas-to-Power Systems: Case Study of a German Dairy”, 2022, doi: 10.3390/su14106050.

- [48] J. de la Cruz-Soto, I. Azkona-Bedia, N. Velazquez-Limon, e T. Romero-Castanon, “A techno-economic study for a hydrogen storage system in a microgrid located in baja California, Mexico. Levelized cost of energy for power to gas to power scenarios”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.026.
- [49] Organização para Valorização do rio Gâmbia, “Gâmbia república da guiné guiné-bissau senegal”. 2021.
- [50] O. para V. do rio Gâmbia, “Banco de dados global da sociedade Civil”. 2021.
- [51] A. D. B. Group, “OMVG Energy Project”. Acessado: 20 de abril de 2024. Available at: https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Environmental-and-Social-Assessments/Multinational_-_OMVG_Energy_Project_-_Summary_FRP-_05_2015.pdf
- [52] M. N. Nancabi e R. I. O. Gambia, “Plano de apresentação”. 2018.
- [53] O. E. Project, “Gambia River Development Organization Energy Project Resettlement Action Plan (RAP) Gambia Interconnexion Power lines”, 2019.
- [54] PNUD, “Desenvolvimento humano. Relatório de 2021/2022. Tempos incertos, vidas instáveis: A construir o nosso futuro num mundo em transição.” Acessado: 21 de abril de 2024. Available at: <https://hdr.undp.org/system/files/documents/global-report-document/hdr2021-22ptpdf.pdf>
- [55] Instituto Nacional de Estatística, “Projections Demographiques en Guinea-Bissau 2009 - 2030”, 2009.
- [56] The Gambia Bureau of Statistics, “População das subestações de Gâmbia - Documento Impresso”. 2023.
- [57] I. N. de la Statistique, “População das Subestações de République de Guinée - Documento Impresso”. 2023.
- [58] Agence National de la Statistique et de la Démographie., “Dados Populacionais das Subestações do Senegal - Documento Impresso”. 2023.
- [59] P. R. and M. R. Hannah Ritchie, “Energy Use Per Person, 2022”. Acessado: 20 de novembro de 2022. Available at: <https://ourworldindata.org/energy>
- [60] J. C. G. de S. E e B. D. Bonatto, *Introduction to Transients in Electrical Circuits*. 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-68249-1>.
- [61] FICAP, “Fios e Cabos Nus de Alumínio para Linhas Aéreas Bare Aluminum Wires and Cables for Overhead Lines”. Acessado: 12 de outubro de 2023. Available at: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7994099/mod_resource/content/1/Tabela condutores.pdf
- [62] W. V. da S. Azevedo, “Linhas de Transmissão - LT, documento impresso.”, 2023.
- [63] A. J. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1983.

- [64] C. de P. em E. Elétrica., “ANAREDE: Análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente.” Acessado: 30 de dezembro de 2023. Available at: <https://www.cepel.br/produtos/anared-2/anarede/#:~:text=O ANAREDE é%2C na verdade%2C um conjunto de,Fluxo de Potência%2C módulos para%3A Equivalente de Redes>
- [65] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Relação dos sistemas e modelos computacionais”. p. 30, 2009.
- [66] A. S. Global, “Dados característicos do sistema solar da região de Bolama - Guiné-Bissau”. Acessado: 18 de março de 2024. Available at: <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.697696,-15.394592,8&s=11.486013,-16.342163&m=site>
- [67] Horizon, “Liquid-Cooled Fuel Cell”. Acessado: 4 de maio de 2024. [Online]. Available at: <https://www.horizonfuelcell.com/fuel-cell>
- [68] A. L. de E. Renováveis, *Relatório Nacional de Ponto de Situação / Dezembro 2018*, nº December. 2018.
- [69] I. e R. N. Ministério de Energia, “Relatórios sobre o Plano Diretor de Energia e de um Plano para o Desenvolvimento de Infra-estruturas para a produção e distribuição de electricidade. Documento impresso”. 2011.
- [70] Emissora Internacional da Alemanha, “Bissau: Governo negocia dívida e evita corte de energia”. Acessado: 23 de maio de 2023. Available at: <https://www.dw.com/pt-002/bissau-governo-negoceia-dívida-e-evita-corte-de-energia/a-66826164#:~:text=A empresa turca Karpower assinou em 2018 um,se encontra ao largo da cidade de Bissau.>
- [71] M. C. De Almeida, “Bambadinca , Bolama , Bubaque Solar hybrid mini-grids ”:
- [72] I. e R. N. da G.-B. Ministério de Energia, “Plano de Investimento para Energia Sustentável da Guiné-Bissau Período 2015-2030 Alcançar acesso universal aos serviços de energia”. 2015.
- [73] G. da Guiné-Bissau, “Decreto lei nº 2,3 junho 2007. boletim oficial sobre regulação do setor energético da Guiné-Bissau. Documento Impresso.” 2007.
- [74] I. e R. N. da G.-B. Ministério de Energia, “Plano de Ação Nacional no Sector das Energias Renováveis”. 2017.
- [75] Cabira, “Projet D ’ Electrification de Quatorze Localités Proches”.
- [76] T. W. Bank, “Population, total - Guinea-Bissau”. Acessado: 5 de maio de 2022. Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?locations=GW>
- [77] P. Fernandes, “Bijagós, um arquipélago a descobrir na Guiné – Bissau”. Acessado: 9 de maio de 2024. Available at: <https://jornalpovodeportugal.eu/2017/03/06/bijagos-um-arquipelago-a-descobrir-na-guine-bissau/>
- [78] P. Narra, “Bijagós, o tesouro sagrado da Guiné-Bissau”. Acessado: 20 de maio de 2024. Available at: https://www.nationalgeographic.pt/meio-ambiente/bijagos-o-tesouro-sagrado-da-guine-bissau_1556
- [79] S. K. Dash, S. Chakraborty, e D. Elangovan, “A Brief Review of Hydrogen

- Production Methods and Their Challenges”, 2023, doi: 10.3390/en16031141.
- [80] B. Flamm, C. Peter, F. N. Büchi, e J. Lygeros, “Electrolyzer modeling and real-time control for optimized production of hydrogen gas”, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116031.
- [81] B. Panigrahy, K. Narayan, e B. Ramachandra Rao, “Green hydrogen production by water electrolysis: A renewable energy perspective”, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.254.
- [82] Hugo Souto e Teresa Nogueira, “Hidrogênio como vetor energético.pdf”.
- [83] S. Shiva Kumar e V. Himabindu, “Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review”, *Mater. Sci. Energy Technol.*, 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- [84] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, e D. Stolten, “A comprehensive review on PEM water electrolysis”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.
- [85] S. Mekhilef, R. Saidur, e A. Safari, “Comparative study of different fuel cell technologies”, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.09.020.
- [86] Franco Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice.*, 2^o ed. Academic Press, Califórnia: Elsevier, 2013.
- [87] H. E. Systems, “Development of a 50 kW, High Efficiency, High Power Density, CO-Tolerant PEM Fuel Cell Stack System”.
- [88] B. Herve, “Hydrogen Storage Vessels - Recent improvements and industrial prospectives”, 2018.
- [89] E. A. R. Theodoro, “Desenvolvimento de uma Ferramenta computacional para análise de segurança Dinâmica , no contexto da Estabilidade Transitória , de Sistemas Elétricos de Potência via Métodos Diretos”, 2010.
- [90] O. Nacional e S. Elétrico, “Adoção de Critérios Flexibilizados para suprimento eletroenergético do SIN”. 2021.

9 ANEXO

Cálculos de cargas de consumo

GUINÉ-BISSAU

Procedimento para cálculos de cargas

Subestações

$$1^\circ \text{ Bambadinca} = 32.225 \times 677 \text{ kWh/ano} = 21.8163 \text{ GWh/ano}$$

$$2^\circ \text{ Bissau} = 1.449230 \times 677 \text{ kWh/ano} = 981.1287 \text{ GWh/ano}$$

$$3^\circ \text{ Mansoa} = 47.000 \times 677 \text{ kWh/ano} = 31.819 \text{ GWh/ano}$$

$$4^\circ \text{ Saltinho} = 19.336 \times 677 \text{ kWh/ano} = 13.0904 \text{ GWh/ano}$$

Para uma carga diária tem -se:

$$1 \text{ ano} = 365 \text{ dias}$$

$$1 \text{ dia} = 24 \text{ horas}$$

$$T = 365 \times 24 = 8760 \text{ horas}$$

$$E = P \times T$$

Em que:

E = Energia anual gerada MWh;

P = Potência em Watt;

T = Tempo em horas.

$$E = P \times T$$

BAMBADINCA:

$$P = \frac{E}{T} = \frac{21.81632 \times 10^9}{8760} = 2,4904 \text{ MW}$$

$$P = 2,4904 \text{ MW}$$

Para encontrar a carga reativa tem, $S = P + jQ$

$$\phi = \theta$$

$$F_p = 0,92$$

$$F_p = \cos \theta$$

$$\cos^{-1}(0,92)$$

$$\theta = 23,07^\circ$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{2,4904 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 2,7070 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(2,7070 \times 10^6)^2 - (2,4904 \times 10^6)^2}$$

$$Q = 1,0610 \text{ MVar}$$

$$S = (2,4904 + j1,0610) \text{ MVA}$$

BISSAU

$$P = \frac{E}{T} = \frac{981.12871 \times 10^9}{8760} = 112 \text{ MW}$$

$$P = 112 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{112 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 121,7391 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(121,73913 \times 10^6)^2 - (112 \times 10^6)^2} = 47,71179 \text{ MVar}$$

$$S = (112 + j47,71179) \text{ MVA}$$

$$S = (37,33333 + j15,90393) \text{ MVA}$$

MANSOA

$$P = \frac{E}{T} = \frac{31.819 \times 10^9}{8760} = 3,6323 \text{ M W}$$

$$P = 3,6323 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{3,6323 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 3,9482 \text{ M VA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(3,9482 \times 10^6)^2 - (3,6323 \times 10^6)^2} = 1,5475 \text{ MVar}$$

$$S = (3,6323 + j1,5475) \text{ MVA}$$

SALTINHO

$$P = \frac{E}{T} = \frac{13,09047 \times 10^9}{8760} = 1,49434 \text{ M W}$$

$$P = 1,4943 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{1,4943 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 1,6242 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(1,6242 \times 10^6)^2 - (1,4943 \times 10^6)^2} = 0,6365 \text{ MVar}$$

$$S = (1,4943 + j0,6364) \text{ M VA}$$

$$S = (0,37358 + j0,15914) \text{ M VA}$$

GÂMBIA

SUBESTAÇÕES

$$5^\circ \text{ Brikama} = 699.704 \times 931 \text{ kWh/ano} = 651.424424 \text{ GWh/ano}$$

$$6^\circ \text{ Soma} = 11.100 \times 931 \text{ kWh/ano} = 10.3341 \text{ GWh/ano}$$

$$E = P \times T$$

BRIKAMA

$$P = \frac{E}{T} = \frac{651.424424 \times 10^9}{8760} = 74,3635 \text{ MW}$$

$$P = 74,36351 \text{ MW}$$

$$S = P + jQ$$

$$FP = 0,92$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{74,3635 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 80,8299 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(80,8299 \times 10^6)^2 - (74,3635 \times 10^6)^2} = 31,6787 \text{ MVar}$$

$$S = (74,3635 + j31,6787) \text{ MVA}$$

SOMA

$$P = \frac{E}{T} = \frac{10,3341 \times 10^9}{8760} = 1,1797 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{1,1797 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 1,2823 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(1,2823 \times 10^6)^2 - (1,1797 \times 10^6)^2} = 0,5026 \text{ MVar}$$

$$S = (1,1797 + j0,5026) \text{ MVA}$$

RÉPUBLIQUE DE GUINÉE

SUBESTAÇÕES

$$7^\circ \text{ Boké} = 61.449 \times 1282 \text{ kWh/ano} = 78.77761 \text{ GWh/ano}$$

$$8^\circ \text{ Kaléta} = 1000 \times 1282 \text{ kWh/ano} = 1,282 \text{ GWh/ano}$$

$$9^\circ \text{ Labé} = 99.717 \times 1282 \text{ kWh/ano} = 127.83719 \text{ GWh/ano}$$

$$10^\circ \text{ Linsan} = 10.369 \times 1282 \text{ kWh/ano} = 13.29305 \text{ GWh/ano}$$

$$11^\circ \text{ Mali} = 240.000 \times 1282 \text{ kWh/ano} = 307.68 \text{ GWh/ano}$$

BOKÉ

$$E = P \times T$$

$$S = P + jQ$$

$$FP = 0,92$$

$$P = \frac{E}{T} = \frac{78,77762 \times 10^9}{8760} = 8,9928 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{8,99271 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 9,7747 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(9,7747 \times 10^6)^2 - (8,9928 \times 10^6)^2} = 3,8307 \text{ MVar}$$

$$S = (8,99271 + j3,8307) \text{ MVA}$$

KALÉTA

$$P = \frac{E}{T} = \frac{1,282 \times 10^9}{8760} = 0,1463 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{0,1463 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 0,1590 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(0,1590 \times 10^6)^2 - (0,1463 \times 10^6)^2} = 0,0623 \text{ MVar}$$

$$S = (0,1463 + j0,0623) \text{ MVA}$$

LABÉ

$$P = \frac{E}{T} = \frac{1276,50919 \times 10^9}{8760} = 14,5932 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{14,5558 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 15,8622 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(15,8622 \times 10^6)^2 - (14,5932 \times 10^6)^2} = 6,2167 \text{ MVar}$$

$$S = (14,5932 + j6,2167) \text{ MVA}$$

LINSAN

$$P = \frac{E}{T} = \frac{13,29305 \times 10^9}{8760} = 1,5175 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{1,51747 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 1,6494 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(1,6494 \times 10^6)^2 - (1,5175 \times 10^6)^2} = 0,6463 \text{ MVar}$$

$$S = (1,5175 + j0,6463) \text{ MVA}$$

MALI

$$P = \frac{E}{T} = \frac{307,68 \times 10^9}{8760} = 35,1233 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{35,1233 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 38,1775 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(38,1775 \times 10^6)^2 - (35,1233 \times 10^6)^2} = 14,9612 \text{ Mvar}$$

$$S = (35,12328 + j14,9612) \text{ MVA}$$

SENEGAL

SUBESTAÇÕES

$$12^\circ \text{ Kaolack} = 795.906 \times 2505 \times 10^3 / \text{ano} = 1993.74453 \text{ GWh/ano}$$

$$13^\circ \text{ Sambangalou} = 925 \times 2505 \times 10^3 / \text{ano} = 2,3171 \text{ GWh/ano}$$

$$14^\circ \text{ Tambacounda} = 651.018 \times 2505 \times 10^3 / \text{ano} = 1630.80009 \text{ GWh /ano}$$

$$15^\circ \text{ Tanaf} = 2829 \times 2505 \times 10^3 / \text{ano} = 7,0866 \text{ GWh/ano}$$

KAOLACK

$$P = \frac{E}{T} = \frac{1993,74453 \times 10^9}{8760} = 227,5964 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{227,5964 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 247,3874 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(247,3874 \times 10^6)^2 - (227,5964 \times 10^6)^2} = 96,9556 \text{ MVar}$$

$$S = (227,5964 + j96,9556) \text{ MVA};$$

$$(75,8654 + j32,3185) \text{ MVA}$$

SAMBANGALOU

$$P = \frac{E}{T} = \frac{2,3171 \times 10^9}{8760} = 0,2650 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{0,2650 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 0,2880 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(0,2880 \times 10^6)^2 - (0,2650 \times 10^6)^2} = 0,1128 \text{ MVar}$$

$$S = (0,2650 + j0,1128) \text{ MVA}$$

TAMBACOUNDA

$$P = \frac{E}{T} = \frac{1630,80009 \times 10^9}{8760} = 186,1644 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{186,1644 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 202,3526 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(202,3526 \times 10^6)^2 - (186,1644 \times 10^6)^2} = 79,3056 \text{ Mvar}$$

$$S = (186,1644 + j79,3056) \text{ MVA}$$

$$S = (62,0548 + j26,4352) \text{ MVA}$$

TANAF

$$P = \frac{E}{T} = \frac{7,0866 \times 10^9}{8760} = 0,8089 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{0,8089 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 0,8792 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(0,8792 \times 10^6)^2 - (0,8089 \times 10^6)^2} = 0,3445 \text{ MVar}$$

$$S = (0,8089 + j0,3445) \text{ MVA}$$

CRITÉRIO DE CARGAS

A definição deste critério baseia-se na seguinte premissa:

É o fato da cidade por onde passa a subestação já ter a energia abastecida para atender a necessidade da população, só que essa energia não é suficiente para atender toda a demanda, e a energia da OMVG serve como complemento da carga para a população dessa localidade, por isso, as subestações que se encontram nesta condição, a sua carga total calculada é dividida por três no final.

É o caso das subestações de Bissau, Kaolack e Tambacounda.

Cálculos de parâmetros de linhas de transmissão e conversão das grandezas.

$$V_{base_{Linha}} = 230 \text{ kV}$$

$$S_{base} = 100 \text{ MVA}$$

Onde:

$$V_{base_{Linha}} = \text{tensão de linha da rede.}$$

$$S_{base} = \text{potência aparente (dotada para questão de ANAREDE)}$$

$$I_{base} = \text{Corrente base}$$

$$Z_{base} = \text{Impedância base}$$

Para calcular a corrente tem-se:

$$S_{base} = \sqrt{3} \times V_{base} \times I_{base}$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times V_{base}} = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 230 \times 10^3} = 251,0218562 \text{ [A]}$$

Calculando a impedância base tem:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(230 \times 10^3)^2}{(100 \times 10^6)} = 529 \text{ } [\Omega]$$

Calculando admitância base (Y), tem:

$$Y_{base} = \frac{1}{529} = 1,890359168 \times 10^{-3} \text{ [Siemens]}$$

Calculados impedâncias em [PU] fica:

KALÉTA – BOKÉ; $\dot{Z} = 3,056252292 + j36,49161088 \text{ } [\Omega]$

$$\dot{Z}_{pu} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{3,056252292 + j36,49161088}{529} = 0,005777415 + j0,068982251 \text{ [pu]}$$

BOKÉ – SALTINHO; $\dot{Z} = 2,325636252 + j27,76806528 \text{ } [\Omega]$

$$\dot{Z}_{pu} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{2,325636252 + j27,76806528}{529} = 0,004396288 + j0,052491617 \text{ [pu]}$$

SALTINHO – BAMBADINCA; $\dot{Z} = 1,30941576 + j15,63440640 \text{ } [\Omega]$

$$\dot{Z}_{pu} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{1,30941576 + j15,63440640}{529} = 0,002475266 + j0,029554643 \text{ [pu]}$$

BAMBADINCA – MANSOA; $\dot{Z} = 1,275968727 + j15,23504928 \text{ } [\Omega]$

$$\dot{Z}_{pu} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{1,275968727 + j15,23504928}{529} = 0,002412039 + j0,028799715 \text{ [pu]}$$

MANSOA – BISSAU; $\dot{Z} = 0,835701399 + j9,97826336 \text{ } [\Omega]$

$$\dot{Z}_{pu} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{0,835701399 + j9,97826336}{529} = 0,001579776 + j0,018862502 \text{ [pu]}$$

MANSOA – TANAF; $\dot{Z} = 1,725724575 + j20,60512800 \text{ } [\Omega]$

$$\dot{Z}_{pu} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{1,725724575 + j20,60512800}{529} = 0,003262239 + j0,038951093 \text{ [pu]}$$

TANAF – SOMA; $\dot{Z} = 2,174768784 + j25,96670976 \text{ } [\Omega]$

$$\dot{Z}_{pu} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{2,174768784 + j25,96670976}{529} = 0,004111094 + j0,049086408 \text{ [pu]}$$

SOMA – BRIKAMA; $\dot{Z} = 3,392857539 + j40,51067296 \text{ } [\Omega]$

$$\dot{Z}_{pu} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{3,392857539 + j40,51067296}{529} = 0,006413719 + j0,076579722 \text{ [pu]}$$

SOMA – KAOLACK; $\dot{Z} = 3,609195795 + j43,09374880 \text{ } [\Omega]$

$$\dot{Z}_{pu} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{3,609195795 + j43,09374880}{529} = 0,006822676 + j0,081462663 \text{ [pu]}$$

KAOLACK - TAMBACOUNDA; $\dot{Z} = 6,117248844 + j73,03986816 \text{ } [\Omega]$

$$Z_{pu}^{\cdot} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{6,117248844 + j73,03986816}{529} = 0,011563797 + j0,138071584 \text{ [pu]}$$

TAMBACOUNDA – SAMBANGALOU; $\dot{Z} = 5,790132117 + j69,13409888 \text{ } [\Omega]$

$$Z_{pu}^{\cdot} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{5,790132117 + j69,13409888}{529} = 0,010945429 + j0,13688278 \text{ [pu]}$$

SAMBANGALOU – MALI; $\dot{Z} = 1,412366202 + j16,86363328 \text{ } [\Omega]$

$$Z_{pu}^{\cdot} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{1,412366202 + j16,86363328}{529} = 0,002669879 + j0,031878324 \text{ [pu]}$$

MALI – LABÉ; $\dot{Z} = 2,101944393 + j25,09718752 \text{ } [\Omega]$

$$Z_{pu}^{\cdot} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{2,101944393 + j25,09718752}{529} = 0,003973430 + j0,047442699 \text{ [pu]}$$

LABÉ – LINSAN; $\dot{Z} = 2,845844361 + j33,97934304 \text{ } [\Omega]$

$$Z_{pu}^{\cdot} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{2,845844361 + j33,97934304}{529} = 0,005379668 + j0,064233163 \text{ [pu]}$$

SAMBANGALOU – MALI; $\dot{Z} = 1,412366202 + j16,86363328 \text{ } [\Omega]$

LINSAN – KALÉTA; $\dot{Z} = 2,736963594 + j32,67930816 \text{ } [\Omega]$

$$Z_{pu}^{\cdot} = \frac{\dot{Z}}{Z_{base}} = \frac{2,736963594 + j32,67930816}{529} = 0,005173844 + j0,061775630 \text{ [pu]}$$

Cálculos de charging em (MVAR)

KALÉTA – BOKÉ; $B = 0,000754101 \text{ [Siemens]}$

$$Q = V^2 * B = (230 \times 10^3)^2 * (0,000754101) = 39,8919429 \text{ [MVar]}$$

BOKÉ – SALTINHO; $B = 0,000573828 \text{ [Siemens]}$

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230 \times 10^3)^2 * (0,000573828) = 30,3555012 \text{ [MVar]}$$

SALTINHO – BAMBADINCA; $B = 0,000323086 \text{ [Siemens]}$

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230 \times 10^3)^2 * (0,000323086) = 17,0912494 \text{ [MVar]}$$

BAMBADINCA – MANSOA; $B = 0,000314833 \text{ [Siemens]}$

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230 \times 10^3)^2 * (0,000314833) = 16,6546657 \text{ [MVar]}$$

MANSOA – BISSAU; $B = 0,0002062019 \text{ [Siemens]}$

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230 \times 10^3)^2 * (0,0002062019) = 10,90804295 \text{ [MVar]}$$

MANSOA – TANAF; $B = 0,000425806 \text{ [Siemens]}$

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230x10^3)^2 * (0,000425806) = 22,5251374[\text{MVar}]$$

TANAF – SOMA; B = 0,000536603 [Siemens]

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230x10^3)^2 * (0,000536603) = 28,3862987 [\text{MVar}]$$

SOMA – BRIKAMA; B = 0,000837155 [Siemens]

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230x10^3)^2 * (0,000837155) = 44,2854995 [\text{MVar}]$$

SOMA – KAOLACK; B = 0,000890534 [Siemens]

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230x10^3)^2 * (0,000890534) = 47,1092486 [\text{MVar}]$$

KAOLACK - TAMBACOUNDA; B = 0,001509372 [Siemens]

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230x10^3)^2 * (0,001509372) = 79,8457788 [\text{MVar}]$$

TAMBACOUNDA – SAMBANGALOU; B = 0,001428659 [Siemens]

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230x10^3)^2 * (0,001428659) = 75,5760611 [\text{MVar}]$$

SAMBANGALOU – MALI; B = 0,000348488 [Siemens]

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230x10^3)^2 * (0,000348488) = 18,4350152 [\text{MVar}]$$

MALI – LABÉ; B = 0,000518634 [Siemens]

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230x10^3)^2 * (0,000518634) = 27,4357386 [\text{MVar}]$$

LABÉ – LINSAN; B = 0,000702184 [Siemens]

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230x10^3)^2 * (0,000702184) = 37,1455336 [\text{MVar}]$$

LINSAN – KALÉTA; B = 0,000675319 [Siemens]

$$Q = V^2 * B = Q = V^2 * B = (230x10^3)^2 * (0,000675319) = 35,7243751[\text{MVar}]$$

Dimensionamento do reativo para despacho de geração

Usina de Kaléta

Tem 3 grupos de geradores, cada gerador tem 80 [MW], o que totaliza 240 [MW] de potência. Para os cálculos dos reativos dessas máquinas, tem:

Usou-se fator de potência de 0,92

$$\cos^{-1}(0,92)$$

$$\theta = 23,07^\circ$$

$$S = \frac{P}{F_p} = S = \frac{80}{0,92}$$

$$S = 86,96 [\text{MVA}]$$

$$Q = S \times \sin(\varphi)$$

$$Q = 86,96 \times \sin(23,07)$$

$$Q = \pm 34,08 \text{ [MVar]}$$

Usinas de Sambangalou

Tem 3 grupos de geradores, e a potência total é 128 [MW], pelas cifras cada gerador deveria ter 42,6 [MW], porém, reconhecendo a não existência desse gerador, elevou para 45 [MW] de cada gerador e o despacho, dependerá apenas do operador de energia, assim:

$$S = \frac{P}{F_p} = S = \frac{45}{0,92}$$

$$S = 48,91 \text{ [M]}$$

$$Q = S \times \sin(\varphi)$$

$$Q = 48,91 \times \sin(23,07)$$

$$Q = \pm 19,17 \text{ [MVar]}$$

Procedimento para estimação da carga de região de Bolama atrelado a P2G2P

População da região:

$$32.424 \times 10^3 \times 677 \times 10^3 / \text{ano} = 21,951048 \text{ GWh/ano}$$

$$P = \frac{E}{T} = \frac{21,951048 \times 10^9}{8760} = 2,505827397 \text{ MW}$$

$$S = \frac{P}{FP} = \frac{2,505827397 \times 10^6 \text{ W}}{0,92} = 2,723725432 \text{ MVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(2,723725432 \times 10^6)^2 - (2,505827397 \times 10^6)^2} = 1,067478002$$

$$Q = 1,067478002 \text{ MVar}$$

$$S = (2,505827397 + j1,067478002) \text{ MVA}$$

Aplicação dos questionários para coleta de dados

Questão 1: porque OMVG?

Questão 2: qual o proposito de reunir os quatro países?

Questão 3: quais modelos de geradores e quantidades para cada usina? Modelos de amortecedores, parâmetros de linhas de transmissão como: parâ-raios, altura do vão, faixa de servidão e reguladores, incluindo condutores foram usados?

Questão 4: OMVG, será reponsável pelo sistema de transmissão. De que forma a Guiné-Bissau pretende trabalhar e operar o sistema de distribuição de energia elétrica?

Questão 5: de que forma a EAGB gera energia? Sabe-se que é a única concessionária do país e também é pública, a cadeia de fornecimento de energia elétrica é feita gerando, transmitindo, distribuindo e comercializando para os consumidores. Ela é única que faz esse papel?

Questão 6: qual a quantidade de geradores EAGB usa para gerar energia e quais suas potências?