



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

Leonardo Barrouin Melo

**ANÁLISE INTEGRADA DO NEXO ÁGUA-ENERGIA-EMISSÕES E MITIGAÇÃO
DAS EXTERNALIDADES PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS**

Belo Horizonte

2020

LEONARDO BARROUIN MELO

Análise Integrada do nexo Água-Energia-Emissões e Mitigação das Externalidades
para o Estado de Minas Gerais

Versão Final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares do Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de Concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Orientadora: Prof^a. Antonella Lombardi Costa

Co-orientadora: Prof^a. Ângela Fortini M. Ferreira

Belo Horizonte

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

M528a	<p>Melo, Leonardo Barrouin. Análise integrada do nexa água-energia-emissões e mitigação das externalidades para o Estado de Minas Gerais [recurso eletrônico] / Leonardo Barrouin Melo. - 2020. 1 recurso online (185 f.: il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Antonella Lombardi Costa. Coorientadora: Ângela Fortini M. Ferreira.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices e anexos: f. 142-184.</p> <p>Bibliografia: f. 131-140. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Mudanças climáticas - Teses. 3. Energia elétrica - Teses. 4. Energia hidrelétrica - Teses. I. Costa, Antonella Lombardi. II. Ferreira, Ângela Fortini Macedo. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.039(043)</p>
-------	---



FOLHA DE APROVAÇÃO

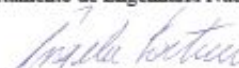
ANÁLISE INTEGRADA DO NEXO ÁGUA-ENERGIA-EMISSÕES E MITIGAÇÃO DAS EXTERNALIDADES PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS

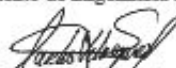
LEONARDO BARROUIN MELO

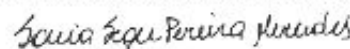
Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.


Aprovada em 22 de dezembro de 2020, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Antonella Lombardi Costa - Orientadora
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Prof. Angela Fortini Macedo Ferreira - Coorientadora
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Prof. Carlos Eduardo Velasquez Cabrera
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Prof. Sônia Seger Pereira Mercedes
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Prof. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura
Departamento de Engenharia de Produção - UFOP


Dr. Wanderson Luiz Silva
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPTEL

Belo Horizonte, 22 de dezembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Manifesto o meu profundo agradecimento e carinho a todos por toda forma de ajuda, compreensão, alento, esperança, confiança e, em especial:

- À minha orientadora, professora Antonella Lombardi Costa, pelo apoio, equilíbrio, paciência e pelas valorosas contribuições;
- À minha coorientadora, professora Ângela Fortini M. Ferreira, pelos importantes apontamentos e correções para a melhoria do trabalho;
- Ao professor Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, pela disponibilidade e pelos inúmeros encontros virtuais que contribuíram decisivamente para este trabalho;
- Ao Dr. Vinícius Verna Magalhães Ferreira, as vibrações de um coração digno e valoroso são percebidas sem muitas palavras, meu eterno carinho e agradecimento;
- Aos funcionários Thales e Aline, pelas relevantes tarefas no DEN e pelas palavras de apoio;
- Aos colegas e demais professores do DEN, pela amizade e por todas as faces do vasto e rico conhecimento que pude ter contato em nossa convivência;
- À CEMIG, na figura do engenheiro Aloísio Chaves de Carvalho, pelo acesso aos dados das usinas e pelas ideias iniciais para a compreensão das informações;
- Aos meus pais, Paulo e Lúcia, exemplos maravilhosos de seres humanos, por tudo o que fizeram por mim;
- Aos meus irmãos Stella, Valéria e Marcos, espelhos de meus pais, orgulho e honra em tê-los próximos;
- Ao meu filho Miguel e minha esposa Carla, razão de todos os esforços e pela maravilha de sermos uma família;
- Aos meus amigos, personagens fundamentais que dão significado à vida;
- À Natureza, por todas as manifestações inebriantes que justificam uma existência;
- A Deus, pela vida, saúde e por todas as Suas criações.

RESUMO

O suprimento energético de um estado ou país é uma preocupação permanente, uma vez que exige planejamento e operação bem estruturados. O crescimento populacional, a expansão territorial por moradia, a competição pelos usos das águas, a finitude das reservas energéticas de origem fóssil e a falta de um planejamento energético consistente e contínuo são alguns dos problemas existentes. Além destes, pesquisas apontam as mudanças climáticas como um dos maiores desafios que a humanidade enfrentará nas próximas décadas neste século, e que também afetarão a produção de energia. Historicamente, a matriz energética do Estado de Minas Gerais tem a peculiaridade de ser predominantemente renovável; 53,7% da demanda total foi atendida por fontes renováveis em 2017. Este percentual possui grande sensibilidade aos eventos climáticos, o que poderá resultar em alterações na matriz energética do Estado. As externalidades associadas dizem respeito à maior exposição a gases tóxicos emitidos em razão do aumento da participação de fontes energéticas mais poluentes. Neste trabalho foi realizada a análise integrada donexo água-energia-emissões para o Estado de Minas Gerais, bem como a mitigação das externalidades presentes. Para alcançar os objetivos do estudo, dois modelos computacionais combinados em uma abordagem integrada foram utilizados: WEAP – *Water Evaluation And Planning* e o LEAP – *Low Emissions Analysis Platform*. O foco da análise se concentrou na matriz elétrica do Estado de Minas Gerais, por meio do modelamento de usinas hidrelétricas. Como principais resultados obtidos, destacam-se a redução da geração hidrelétrica ao final do horizonte de estudo (2019 a 2049) entre -16,8% e -7,8% nos cenários de restrição hídrica. A demanda final de energia elétrica, no cenário de referência, aumentou 40,8% neste período e, nos cenários energéticos, houve aumento entre 63,6% e 89,5%. Houve expressivos aumentos da geração elétrica por termelétricas a combustível fóssil e, em todos os cenários estudados, houve crescimento também expressivo das emissões de CO_{2eq}. O planejamento da expansão do sistema elétrico no Estado deverá envolver o crescimento da capacidade das usinas não hidráulicas como forma de garantir a segurança energética do Estado.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Energia Elétrica. Matriz Energética. Energia Hidrelétrica. Emissões.

ABSTRACT

The energy supply of a state or country is a permanent concern, since it requires well-structured planning and operation. Population growth, territorial expansion for housing, competition for water use, the finitude of fossil energy reserves and the lack of consistent and continuous energy planning are some of the existing problems. In addition, research points climate change as one of the greatest challenges that humanity will face next decades in this century, and that will also affect energy production. Historically, energy matrix of Minas Gerais state has the peculiarity of being predominantly renewable; 53.7% of total demand was met by renewable sources in 2017. This percentage is highly sensitive to extreme weather events, which may result in changes in state energy matrix. The associated externalities are related to the greater exposure to toxic gases emitted, due to the increased share of more polluting energy sources. In this work, an integrated analysis of the water-energy-emissions nexus for Minas Gerais state was carried out, as well as the mitigation of the present externalities. To achieve the objectives of the study, two computational models combined in an integrated approach were used: WEAP - Water Evaluation and Planning and the LEAP - Low Emissions Analysis Platform. The focus of the analysis was concentrated on the electric matrix of Minas Gerais state, through the modeling of hydropower plants. The main results include the reduction in hydropower generation to the end of the study, 2019 to 2049, between -16.8% and -7.8% in water restriction scenarios. Final electricity demand, in reference scenario, increased 40.8% in this period and, in energy scenarios, there was increase between 63.6% and 89.5%. There were significant electricity generation increases by fossil fuel thermoelectric plants and, in all scenarios studied, there was also a significant increase in CO_{2eq} emissions. Electrical system expansion planning must involve non-hydraulic plants capacity increasing as way of ensuring the state's energy security.

Keywords: Climate change. Electricity. Energy matrix. Hydropower. Emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: ENA Subsistema Sudeste/Centro-Oeste (2000 a 2018) – ONS	18
Figura 2.1: Demanda de energia por fonte (A) e por setor (B) – Minas Gerais, 2017	24
Figura 2.2: Demanda de energia por setor econômico em Minas Gerais	26
Figura 2.3: Demanda de energia por fonte energética em Minas Gerais	27
Figura 2.4: Fluxo energético da fonte Hidráulica e Eletricidade em Minas Gerais - mil tep (2017)	28
Figura 2.5: Geração: Hidrelétrica e Termelétrica em Minas Gerais	29
Figura 2.6: Demanda total de energia em Minas Gerais: Produção x Dependência .	31
Figura 2.7: Importação e exportação de eletricidade em Minas Gerais	32
Figura 2.8: Regiões Hidrográficas Brasileiras	34
Figura 2.9: Bacias hidrográficas em Minas Gerais	37
Figura 2.10: Estrutura setorial para mensuração dos GEE em Minas Gerais	49
Figura 2.11: Emissões anuais de GEE do setor Energia em Minas Gerais	50
Figura 2.12: Participação dos setores nas emissões de GEE em Minas Gerais	51
Figura 2.13: Afetados pelos tipos de desastres naturais entre 1991 e 2010 no Brasil	53
Figura 2.14: Ocorrência dos desastres naturais entre 1991 e 2010 no Brasil	54
Figura 3.1: Estudo da Bacia do Zambese – SAPP: <i>Southern Africa Power Pool</i>	63
Figura 3.2: Interações com foco na segurança	67
Figura 3.3: Estrutura conceitual das escalas nos estudos de nexo	69
Figura 3.4: Estudo do nexo e abrangência	70
Figura 3.5: Modelo LEAP para São Paulo (Brasil)	75
Figura 3.6: Direcionadores do uso urbano de energia e os parâmetros de influência	76

Figura 4.1: Etapas para modelamento no WEAP	81
Figura 4.2: Entrada de dados físicos dos reservatórios/usinas no WEAP	85
Figura 4.3: Entrada de dados de operação dos reservatórios/usinas no WEAP	87
Figura 4.4: Entrada de dados de geração elétrica dos reservatórios/usinas no WEAP	88
Figura 4.5: Tela <i>Schematic</i> do WEAP – Esquema Minas Gerais	90
Figura 4.6: Tela <i>Data</i> do WEAP – Esquema Minas Gerais	91
Figura 4.7: Estrutura do modelo LEAP	92
Figura 4.8: Telas do LEAP: entrada de dados, demanda (a) e oferta de energia (b)	98
Figura 4.9: Tela do LEAP; etapa “Análise” ativa	100
Figura 4.10: Telas de conexão entre o WEAP e LEAP	102
Figura 5.1: Estrutura do modelo MG_WEAP – Inserção das usinas hidrelétricas ..	106
Figura 5.2: Estrutura do modelo MG_LEAP	108
Figura 5.3: Projeção estimada da população – Minas Gerais	109
Figura 6.1: Geração hidrelétrica modelada no WEAP – ano-base 2019	114
Figura 6.2: Geração hidrelétrica modelada - WEAP (2019 a 2049)	116
Figura 6.3: Intensidade Energética – IE. Cenário HGW (2019 a 2049)	117
Figura 6.4: Intensidade Energética nos cenários energéticos, mil kWh/hab	118
Figura 6.5: Demanda final de eletricidade no cenário HGW	118
Figura 6.6: Demanda final de energia elétrica nos cenários energéticos, em 10 ³ GWh	122
Figura 6.7: Emissões de CO _{2eq} para todos os cenários	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Balanço global de energia em Minas Gerais (2017)	23
Tabela 2.2: Demanda de energia por fonte e por setor (2017) - 10^3 tep	23
Tabela 2.3: Situação dos empreendimentos de geração em Minas Gerais – 2019 ..	28
Tabela 2.4: Dados das Bacias Hidrográficas	36
Tabela 4.1: Usinas Hidrelétricas (UHE) selecionadas em Minas Gerais	89
Tabela 5.1: Definição dos cenários de estudo	103
Tabela 5.2: Evolução do consumo de eletricidade (GWh) – Minas Gerais	110
Tabela 5.3: Parâmetros característicos das tecnologias de geração	111
Tabela 5.4: Capacidades das usinas em Minas Gerais	112
Tabela 5.5: Índices de projeção das capacidades exógenas das fontes de energia	113
Tabela 6.1: Geração de energia elétrica por fonte, em mil GWh, cenário HGW	119
Tabela 6.2: Capacidade exógena nos cenários, em GW	120
Tabela 6.3: Emissões de CO _{2eq} no cenário HGW, em milhões ton	121
Tabela 6.4: Geração das UHE nos cenários hídricos, em 10^3 GWh	121
Tabela 6.5: Geração de energia elétrica nos cenários energéticos, em 10^3 GWh ..	122
Tabela 6.6: Geração de energia elétrica – Cenário HGD, em 10^3 GWh	123
Tabela 6.7: Geração de energia elétrica – Cenário HGVD, em 10^3 GWh	124
Tabela 6.8: Geração de energia elétrica – Cenário D1, em 10^3 GWh	124
Tabela 6.9: Geração de energia elétrica – Cenário D2, em 10^3 GWh	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

AR – *Assessment Report*

BEN – Balanço Energético Nacional

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais S.A.

CGH – Centrais Geradoras Hidrelétricas

CONER – Conselho Estadual de Energia

DEN – Departamento de Engenharia Nuclear

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

GEE – Gases de Efeito Estufa

GWP – *Global Warming Potential*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEDE – Infraestrutura Estadual de Dados Espaciais de Minas Gerais

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – *Intergovernmental Panel Climate Change*

IPPU – Processos Industriais e Uso de Produtos

LEAP – *Low Emissions Analysis Platform*

MG – Minas Gerais

MME – Ministério das Minas e Energia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PEMC – Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais

RCP – *Representative Concentration Pathways*

SEDECTES – Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior de Minas Gerais

SEI - *Stockholm Environment Institute*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIN – Sistema Interligado Nacional

Tep – Tonelada Equivalente de Petróleo

Ton – Tonelada ou Tonelada métrica

UFV – Usina Fotovoltaica

UHE – Usina Hidrelétrica

UTE – Usina Termelétrica

Web – Rede mundial de computadores

WEAP – *Water Evaluation and Planning*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	14
1.1 CONSIDERAÇÕES	14
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 OBJETIVOS	18
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 O USO DA ENERGIA EM MINAS GERAIS.....	22
2.1.1 A MATRIZ ENERGÉTICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS	22
2.1.1.1 IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE ENERGIA	30
2.2 OS RECURSOS HÍDRICOS	32
2.3 AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	40
2.4 AS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	46
2.5 AS EXTERNALIDADES	51
2.6 AS FERRAMENTAS WEAP E LEAP	54
CAPÍTULO 3 – O NEXO DE RECURSOS.....	60
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA.....	79
4.1 DEFINIÇÕES GERAIS	79
4.2 OS MODELOS WEAP E LEAP	79
4.2.1 O MODELO WEAP	81
4.2.1.1 BASE DE DADOS	83
4.2.2 O MODELO LEAP	92
4.2.2.1 BASE DE DADOS	94

4.3 A CONEXÃO WEAP – LEAP	101
CAPÍTULO 5 – CENÁRIOS WEAP-LEAP PARA O NEXO ÁGUA-ENERGIA EM MINAS GERAIS	103
5.1 CENÁRIOS.....	103
5.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO WEAP.....	105
5.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO LEAP	108
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS	114
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES.....	128
7.1 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	128
7.2 CONSIDERAÇÕES.....	133
PUBLICAÇÕES	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136
GLOSSÁRIO.....	145
APÊNDICE A – DADOS ONS (VAZÃO TURBINADA)	146
APÊNDICE B – DADOS ONS (VAZÃO AFLUENTE).....	147
APÊNDICE C – GERAÇÃO HIDRELÉTRICA MODELADA NO WEAP (2019 A 2049)	148
ANEXO 1 – DADOS DAS USINAS (CEMIG)	170
ANEXO 2 – LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SIN (ONS, 2020)	183
ANEXO 3 – ANOMALIA DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NAS BACIAS (IGAM, 2015)	184

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES

Os recursos água e energia são disputados historicamente em todo o mundo e a tendência é que esta situação adquira contornos preocupantes, seja pelo crescimento das populações, seja pelo esgotamento destes recursos.

Apesar de sua abundância hídrica, alguns conceitos estão mudando no Brasil, dentre eles a falsa percepção de que este recurso nunca faltará. Gerenciar o recurso hídrico significa um desafio permanente para os governos, uma vez que sua demanda cresce continuamente, nos modelos de desenvolvimento adotados. O total de água retirada para uso cresceu aproximadamente 80% de 1997 a 2017, tendo previsão de aumento de 30% até 2030 (ANA, 2017).

Praticamente todas as atividades humanas necessitam de água e energia, seja na produção de alimentos ou na produção de bens e serviços, sendo recursos responsáveis, em grande medida, pela fixação das populações nas regiões nas quais haja disponibilidade destes recursos.

A produção e transmissão de energia elétrica no Brasil constitui um sistema interconectado hidro-termo-eólico de grande porte, designado por Sistema Interligado Nacional – SIN, composto predominantemente de usinas hidrelétricas e dividido em quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e grande parte da região Norte. A possibilidade de transferência de energia entre os subsistemas é o grande benefício do SIN, ao possibilitar geração e transmissão de energia elétrica em regimes hidrológicos diferentes.

O Brasil experimentou uma forte crise de abastecimento de energia elétrica, conhecida como “apagão”, levando ao racionamento do recurso em 2001, como consequência da falta de planejamento no setor elétrico e expressa pela limitação da geração e transmissão da energia elétrica produzida. Em adição àquele cenário crítico, ocorreu um período de hidrologia considerada desfavorável por analistas

(SAUER; VIEIRA; KIRCHNER, 2001), o que teria dificultado a manutenção dos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas. Para melhor compreensão, esses reservatórios de água das usinas são barragens que estabelecem uma diferença de níveis entre o espelho de água a montante e o canal de fuga a jusante mediante captação de água, de modo a utilizar a conversão da energia potencial em cinética para a geração da energia elétrica. Os reservatórios podem ser a fio d'água, previstos para esvaziamentos diários ou semanais e os de acumulação, capazes de regularizar as vazões de um mês, um ano ou alguns anos (FORTUNATO *et al.*, 1990).

As medidas de racionamento foram adotadas pelo governo para adequar oferta e demanda à época. No setor residencial, por exemplo, exigiu-se redução obrigatória de 20% do consumo, sobretaxação de consumidores que ultrapassavam 100 kWh/mês e corte do fornecimento de energia nas situações mais críticas de consumo, bem como no caso de reincidência de penalizações (GOLDENBERG; PRADO, 2003).

Posteriormente a esta crise, mudanças de estratégias foram admitidas no país. A rede de transmissão de energia elétrica foi ampliada, novas usinas termelétricas foram construídas e vultosos investimentos em usinas hidrelétricas de grande porte (usinas de Santo Antônio, Jirau e Belo Monte) entraram na pauta de desenvolvimento do país. Mas, alguns anos após a crise do “apagão”, uma nova e grave crise hídrica entre os anos 2014 e 2015 acometeu o Sudeste do país, comprometendo o fornecimento de água para consumo humano e gerando impactos nesta região, onde há a maior concentração populacional do Brasil (SAUER, 2015).

Desta vez, a acentuada diminuição da precipitação, que começou em 2012 e 2013, foi responsabilizada. Os reservatórios rapidamente chegaram a níveis críticos e, em 2012, houve uma redução de 26% do percentual do volume útil dos mesmos em relação a 2011, chegando a quase 48% de redução em 2014 (ANA, 2016), em razão de o padrão de consumo não ter se adequado à realidade, risco que os governos estaduais e a ANA – Agência Nacional das Águas – assumiram ao não decretar o racionamento do recurso com a antecedência necessária. Há que se destacar que as mazelas derivadas da escassez hídrica experimentadas a partir de 2012 na Região Sudeste, já ocorrem há décadas na Região Nordeste do país, com

riscos de limitações dos recursos hídricos para geração de energia e outros usos (SORIANO *et al.*, 2016).

Nos anos seguintes, houve alguma melhora nas precipitações, mas no final do ano 2017, os níveis dos reservatórios da Região Sudeste ainda refletiam a crise pluviométrica de 2014/2015. Derivado do período da crise hídrica a partir de 2012, o despacho de carga das usinas termelétricas aumentou, em face do risco de desabastecimento hidrelétrico, a um custo econômico e ambiental maior.

As questões abaixo são pertinentes e merecem consideração:

- O crescimento populacional é um desafio permanente;
- A insegurança hídrica se mostra cada vez mais presente;
- O índice de desperdício de toda a cadeia produtiva (captação, tratamento, fornecimento e uso) do recurso hídrico para abastecimento é alarmante, situa-se entre 35% a 40%, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento – SNIS (MDR, 2018);
- A escassez hídrica, além de submeter as populações a variados níveis de sofrimento, promove perda econômica considerável;
- A geração de eletricidade está cada vez mais dependente das usinas térmicas e os reservatórios estão submetidos à possibilidade do estresse hídrico;
- Com a crescente utilização das usinas termelétricas, pode-se prever aumento na emissão de gases poluentes.

1.2 JUSTIFICATIVA

A fonte hidráulica foi a responsável por 66,6% da geração de eletricidade no Brasil em 2018 (EPE/BEN, 2019). A obtenção de um fornecimento de eletricidade estável e confiável ao longo das estações do ano tem sido um desafio para as

decisões de planejamento da operação do setor de energia elétrica, devido às flutuações sazonais e significativa mudança do regime de chuvas.

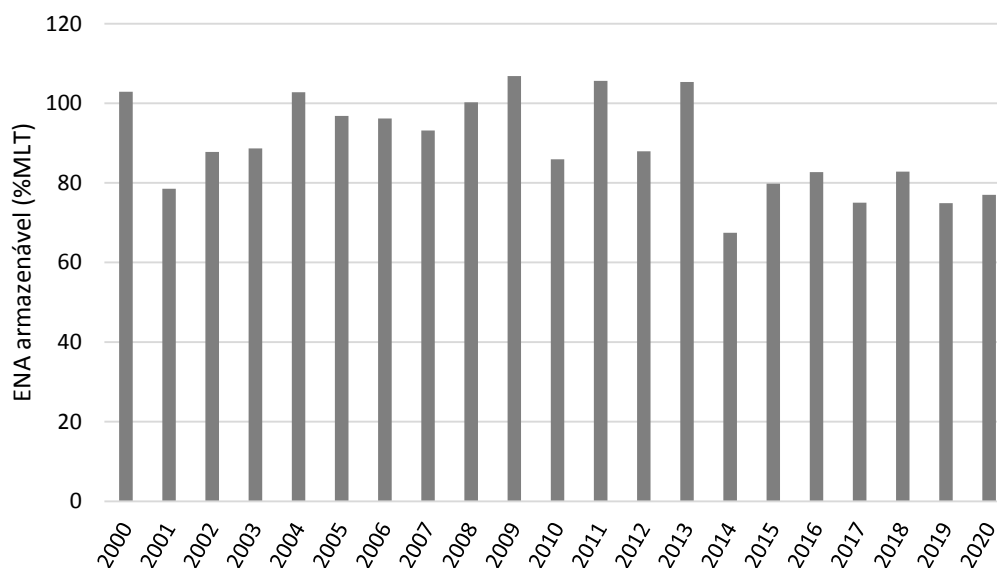
A eletricidade no Brasil, e particularmente em Minas Gerais (atingiu 85,2% em 2017 – CEMIG, 2018), é predominantemente obtida através das Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE), ou seja, fonte de energia renovável. Esta característica destaca Minas Gerais, e também o Brasil, quanto à questão das fontes de energia renovável.

A disponibilidade dos recursos hídricos é um tema de crescente preocupação no meio acadêmico e científico há alguns anos (ALVES, 2009). Estudos têm demonstrado a fragilidade e os riscos a que estão submetidos os sistemas socioeconômico e energético em um primeiro momento, com a irregularidade da distribuição hídrica natural e, em um segundo momento, com a escassez insistente e comprovada – a persistência da seca (ANA, 2015).

Segundo avaliações do *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC, os eventos estão cada vez mais evidentes através da manifestação de longos períodos de secas severas, chuvas intensas, inundações destrutivas e aumento da temperatura ambiente. São manifestações dos eventos extremos do clima que, além dos danos de toda ordem, não contribuem para normalizar os níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas.

Em relação à crise hídrica na Região Sudeste do país registrada em 2014, a Energia Natural Afluyente – ENA (percentual da MLT – Média de Longo Termo, que é uma medida do quanto de chuva foi responsável pelo enchimento dos reservatórios das hidrelétricas ou vazão média de toda a série de medições) foi a menor dos últimos anos. Na Figura 1.1 é apresentada a situação da ENA armazenável para o subsistema Sudeste/Centro Oeste de todo o histórico registrado.

Figura 1.1: ENA Subsistema Sudeste/Centro-Oeste (2000 a 2018) - ONS



Fonte: ONS, 2021

A redução da ENA a partir de 2014 expôs o problema dos reservatórios reguladores das usinas hidrelétricas em sua capacidade de acumulação, o que poderá influenciar a capacidade de gestão da oferta de energia. A crescente dificuldade para o surgimento de novos reservatórios de regularização, como custos econômicos e socioambientais, resulta na implantação de usinas a fio d'água, desprovidos da capacidade de acumulação de água para uso em épocas de escassez, a regulação.

1.3 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem o objetivo principal de realizar a modelagem da geração elétrica das 22 maiores usinas hidrelétricas no Estado de Minas Gerais diante da possibilidade de escassez do recurso hídrico, no horizonte de estudo de 2019 a 2049. O atendimento a este objetivo será baseado no estudo de cenários de restrição hídrica. Diante do contexto, torna-se relevante que seja feito um estudo da interferência climática sobre a matriz elétrica e, sobretudo, das consequências provenientes da escassez dos recursos hídricos, tanto para a escolha da composição das fontes energéticas que possam suprir eventuais reduções da geração hidrelétrica,

quanto para avaliar as emissões de gases poluentes e os impactos para a população do Estado.

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Conhecer o comportamento da geração elétrica das 22 maiores usinas hidrelétricas de Minas Gerais em capacidade outorgada, ante a possibilidade de escassez hídrica, no horizonte de 30 anos;
- Identificar as oportunidades de penetração ou ampliação da oferta de fontes energéticas que possam contribuir para a geração elétrica;
- Identificar o comportamento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) para as opções de despacho de energia;
- Conhecer a participação das outras fontes para geração elétrica na configuração da matriz elétrica para o atendimento da demanda de energia elétrica do Estado de Minas Gerais;
- Verificar a contribuição da energia hidrelétrica de Minas Gerais para o SIN – Sistema Interligado Nacional;
- Identificar o impacto ambiental, caso a matriz elétrica no Estado de Minas Gerais tenha crescimento da participação de combustíveis fósseis;
- Utilizar a abordagem “*bottom up*”¹ dos modelos LEAP – *Low Emissions Analysis Platform* e WEAP – *Water Evaluation and Planning*.

¹ Abordagem “*bottom up*” neste contexto: Consiste, basicamente, em um processo de análise no qual os elementos mais básicos dos sistemas energéticos de oferta e demanda são descritos, de maneira a formar a compreensão do todo.

Ferreira (2004) e Nobre e Marengo (2017) contribuíram para identificar e revelar a extensão dos problemas derivados da escassez hídrica, como: impactos socioeconômicos, uma vez que a irrigação para a produção de alimentos é a maior consumidora de água (no Brasil, situa-se entre 60% e 70%, segundo a ANA); aparecimento de doenças associadas à falta de saneamento; a destinação de água para consumo humano e não humano; o deslocamento de comunidades em busca do recurso hídrico e outras (ASSUNÇÃO, 2001).

Lucena (2010) ponderou que em sistemas elétricos como o brasileiro, onde a geração hidrelétrica é majoritariamente predominante, a confiabilidade do sistema é fortemente dependente das condições hidrológicas, em outras palavras, há uma dependência em relação à variabilidade a curto e médio prazos (variabilidade hidroclimática) e/ou possíveis mudanças a longo prazo (mudança hidroclimática).

Portanto, a crescente preocupação com a regularidade natural da reposição dos recursos hídricos para os suprimentos consuntivos e não consuntivos, bem como assegurar o fornecimento da energia elétrica do Estado, fundamentam a importância deste estudo por tratar dos efeitos destas questões sobre a matriz elétrica e ambiental de Minas Gerais, Estado bastante energointensivo devido às indústrias, metalurgia, e outros consumidores que fazem uso intensivo de energia. Desta forma, pretende-se fazer nesta pesquisa o estudo de alguns cenários possíveis (energético e hídrico) na abordagem das questões apresentadas, especialmente no que diz respeito à matriz elétrica do Estado.

A constatação da contínua perda da capacidade de exportação de energia elétrica pelo Estado de Minas Gerais evidencia prováveis consequências futuras para o planejamento da operação elétrica no país, dado o protagonismo do Estado neste contexto. Desta forma, a originalidade deste trabalho reside no planejamento da expansão da geração elétrica, que considere a dimensão estadual do nexo água-energia e suas consequências, em um contexto de desenvolvimento econômico e de mudanças climáticas. Este tipo de estudo ainda não foi realizado para Minas Gerais.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: no Capítulo 1 é introduzido o assunto a ser estudado, a importância do trabalho incluindo a originalidade, os objetivos e meios para alcançá-los. No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, destacando os recursos hídricos, as mudanças climáticas, as emissões de gases de efeito estufa, as externalidades ligadas ao nexo água-energia-emissões e estudos anteriores desenvolvidos a partir de modelagens com os programas WEAP e LEAP. No Capítulo 3, o conceito do “nexo” é discutido através de estudos correlacionados à pesquisa. No Capítulo 4 está a metodologia utilizada no trabalho. No Capítulo 5 estão os cenários WEAP-LEAP para o nexo água-energia em Minas Gerais. A modelagem e os resultados são apresentados no Capítulo 6. No Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões de pesquisas. Posteriormente, estão na sequência as referências bibliográficas, apêndices e anexos.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O USO DA ENERGIA EM MINAS GERAIS

2.1.1 A MATRIZ ENERGÉTICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS

As informações sobre oferta e demanda de energia elaboradas pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, através da Superintendência de Tecnologia, Inovação e Eficiência Energética, no âmbito do Conselho Estadual de Energia – CONER e coordenado pela Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior de Minas Gerais – SEDECTES são consolidadas no Balanço Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG, anualmente, referenciando o ano anterior como Ano Base (CEMIG, 2018).

O 33º BEEMG foi publicado em 2018, ano base 2017. Em linhas gerais, a demanda total de energia em Minas Gerais em 2017 (35,74 Mtep) representou 12,2% da demanda total de energia do país (292,95 Mtep). No período 1978-2017, a demanda de energia no Estado cresceu a uma taxa média de 2,1% ao ano (a.a.). A importação de energia (59,1% em 2017) é expressiva, ocorre pela necessidade do petróleo e seus derivados e do carvão mineral. A exportação diz respeito à energia elétrica e alguns derivados de petróleo. Importação e exportação são termos utilizados para descrever as transferências do fluxo de energia de Minas Gerais com os outros estados federativos (CEMIG, 2018).

De 2014 a 2017, a taxa média anual de crescimento da demanda de energia em Minas Gerais foi de -2,4%; no mesmo período, o crescimento médio do PIB do Estado foi de -2,0% ao ano. Em 2015, houve uma redução do consumo de energia elétrica de 2,9% em relação a 2014 (CEMIG, 2018). Os números gerais do balanço global de energia no Estado no ano 2017 são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Balanço global de energia em Minas Gerais (2017)

Balanço Global de Energia – 2017 (10³ tep / %)	
Importação	21.123 / 59,1%
Produção	16.324 / 45,7%
Exportação	1.711 / -4,8%
Variação de estoques	-26 / -0,1%
Ajustes	30 / 0,1%
Demanda total (2015)	35.739 / 100%

Fonte: CEMIG (2018)

Na Tabela 2.2 estão os dados da demanda de energia por fonte energética e por setor econômico, em 2017.

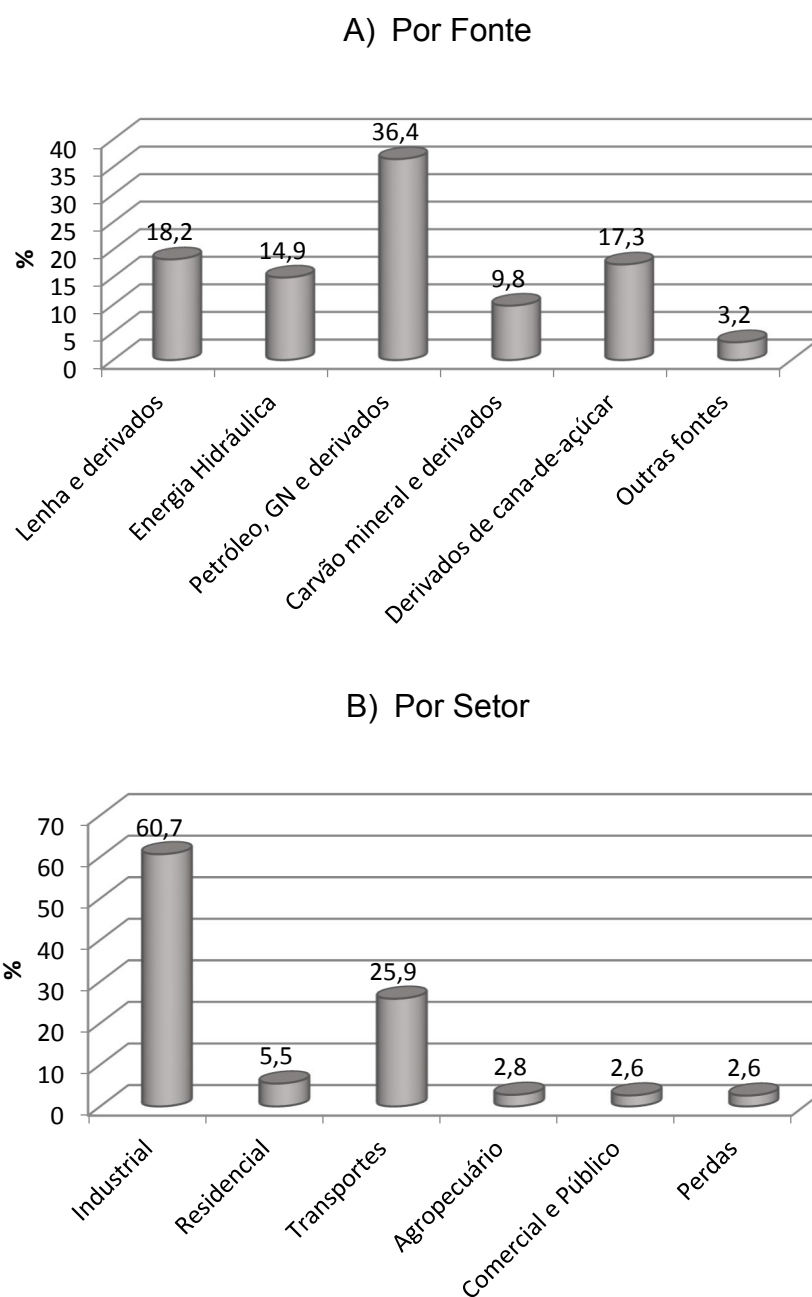
Tabela 2.2: Demanda de energia por fonte e por setor (2017) - 10³ tep

Setor	Lenha e derivados	Energia Hidráulica	Petróleo, GN e derivados	Carvão mineral e derivados	Derivados de cana-de-açúcar	Outras fontes	Total
Industrial	5.920	2.583	4.245	3.517	4.700	711	21.677
Residencial	418	888	654	-	-	-	1.961
Transportes	-	3	7.524	-	1.328	390	9.245
Agropecuário	46	327	572	-	-	48	992
Comercial e Público	29	882	29	-	-	-	940
Perdas	107	655	-	-	161	-	924
Total	6.520	5.340	13.024	3.517	6.190	1.149	35.739

Fonte: CEMIG (2018)

A Figura 2.1 indica os dados da Tabela 2.2, em percentual.

Figura 2.1: Demanda de energia por fonte (A) e por setor (B) - Minas Gerais, 2017



Fonte: CEMIG (2018)

Observa-se na Figura 2.1 que o petróleo, derivados e gás natural apresentaram a maior participação na demanda de energia, seguidos da lenha e derivados, depois os derivados de cana-de-açúcar, em seguida ficou a energia hidráulica, carvão mineral

e derivados e outras fontes. As outras fontes são licor negro, resíduos de biomassa industriais e agrícolas, oleaginosas e biodiesel. O Setor Industrial apresentou a maior demanda de energia, seguido do Setor Transportes, depois o Setor Residencial, o Setor Comercial e Público e o Agropecuário, depois as perdas.

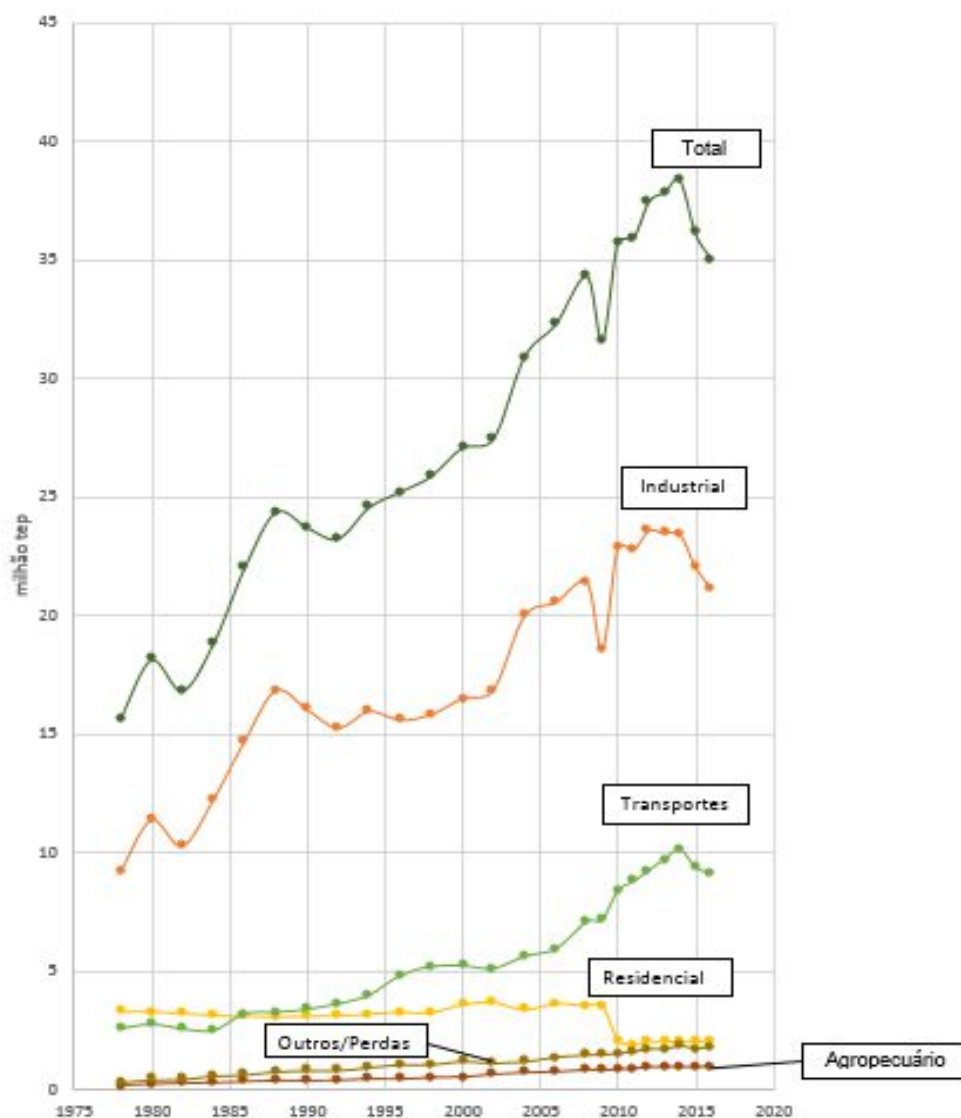
Um destaque apresentado no balanço energético estadual de 2017 foi o aumento da microgeração e minigeração distribuídas. As Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL estabeleceram as condições para a operação da microgeração e minigeração distribuídas, bem como o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012, 2015).

A microgeração é caracterizada por uma potência instalada menor que 75 kW, que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica. A minigeração é caracterizada por uma potência instalada maior que 75 kW e menor ou igual a 3 MW, para fontes hídricas, ou 5 MW, para cogeração qualificada ou outras fontes renováveis (CEMIG, 2018).

Em 2017, foram instaladas 2.801 novas unidades de geração distribuída solar em Minas Gerais, que, somadas às existentes, totalizaram 4.448 unidades instaladas, das quais 98,5% são unidades geradoras fotovoltaicas (UFV). O Setor Residencial concentra a maioria das unidades instaladas de micro e minigeração, com 2.087 unidades. A potência total instalada, conforme as definições contidas nas resoluções mencionadas acima, totalizaram 53.993 kW em 2017. Cabe ressaltar que a média anual de radiação solar direta no Estado de Minas Gerais situa-se entre 4,5 e 6,5 kWh/m²/dia o que representa uma excelente oportunidade de ampliação da geração renovável (CEMIG, 2018).

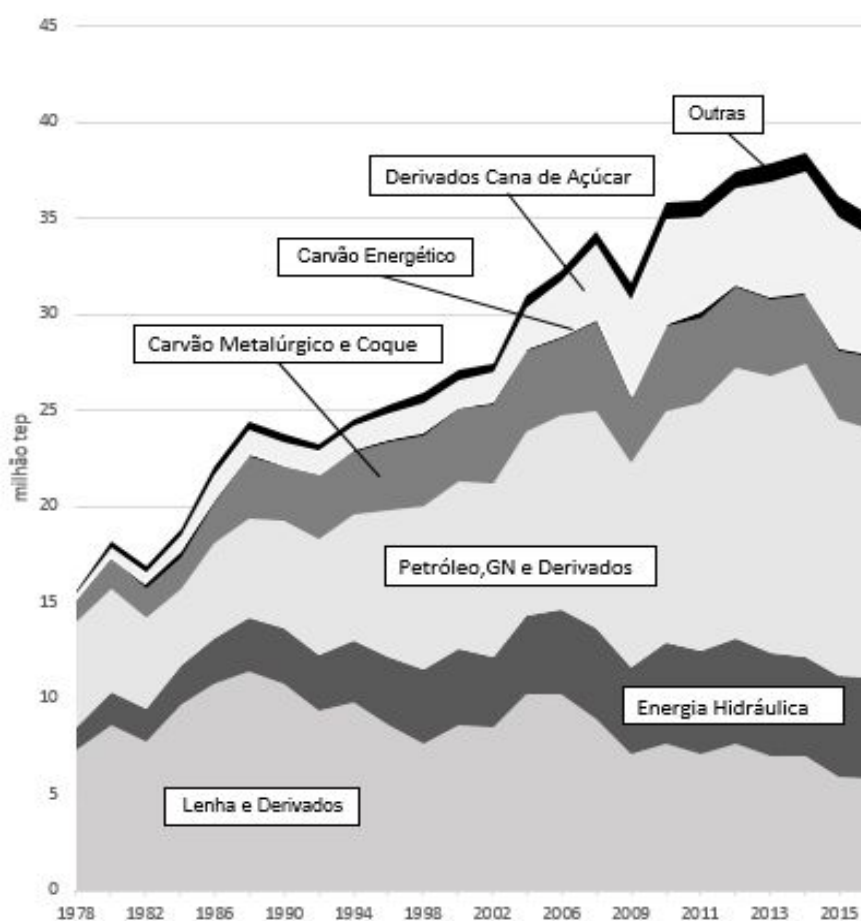
Nas próximas figuras, é possível acompanhar a evolução da série histórica da demanda de energia em Minas Gerais por setor econômico (Figura 2.2) e por fonte energética (Figura 2.3) desde o primeiro registro, em 1978. Os setores Comercial está incluído em “Outros/Perdas”, na Figura 2.2. Da mesma maneira, o licor negro (ou lixívia, proveniente da indústria de papel e celulose), resíduos de biomassa industriais e agrícolas, óleos e gorduras estão inseridos em “Outras”, na Figura 2.3.

Figura 2.2: Demanda de energia por setor econômico em Minas Gerais



Fonte: Elaboração própria (CEMIG, 2018)

Figura 2.3: Demanda de energia por fonte energética em Minas Gerais



Fonte: Elaboração própria (CEMIG, 2018)

A Tabela 2.3 contém os números da potência elétrica em operação e de construção não iniciada em Minas Gerais, do ano 2019.

Tabela 2.3: Situação dos empreendimentos de geração em Minas Gerais – 2019

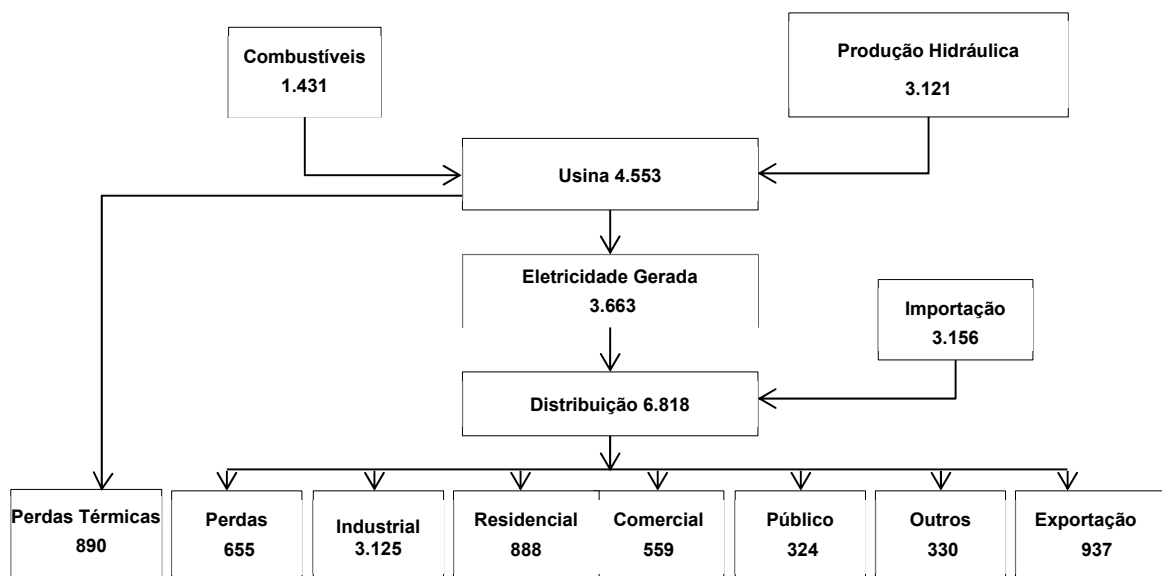
Situação dos empreendimentos em Minas Gerais			
Quantidade	Fonte	Situação	Potência associada (kW)
1	Eólica	Em operação	156
25	Fotovoltaica*	Construção não iniciada	1.066.700
27	Fotovoltaica*	Em operação	533.506
15	Hidrelétrica	Construção não iniciada	248.586
298	Hidrelétrica	Em operação	17.744.889
5	Termelétrica	Construção não iniciada	185.000
436	Termelétrica	Em operação	2.539.591

* Nota: Inclui micro e minigeração

Fonte: ANEEL (2019)

A respeito da energia hidráulica e eletricidade, o fluxo energético desta fonte, desde a geração, tanto de origem hidráulica quanto térmica, até o consumo final, pode ser observado na Figura 2.4, com dados de 2017.

Figura 2.4: Fluxo energético da fonte Hidráulica e Eletricidade em Minas Gerais - mil tep (2017)

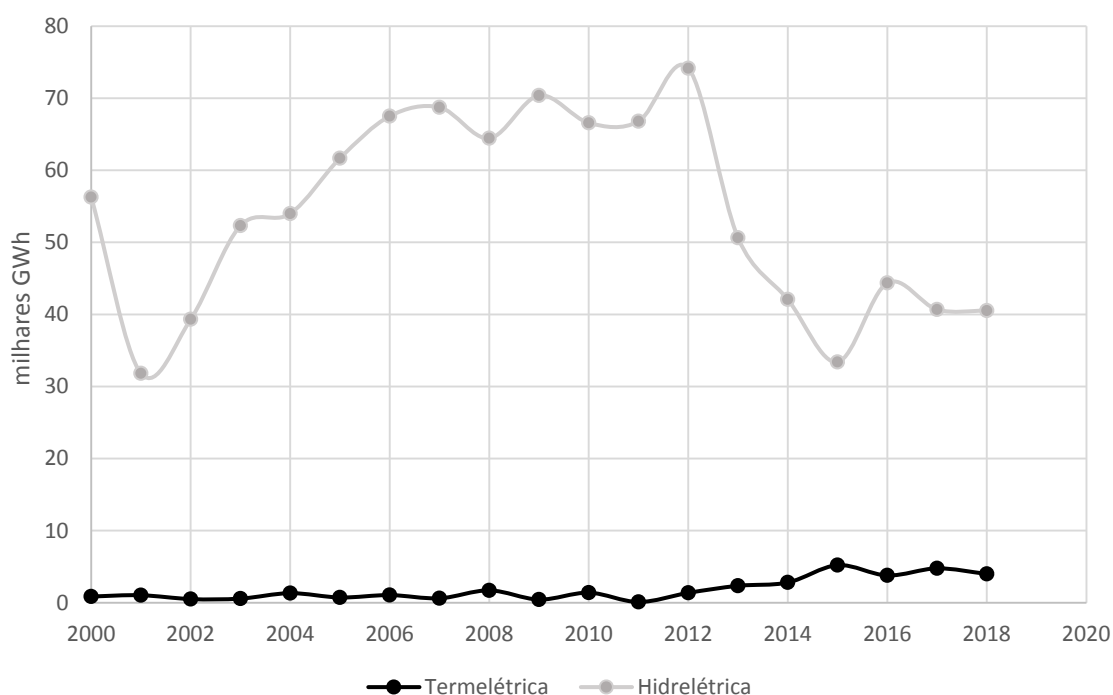


Fonte: CEMIG (2018)

Segundo dados do 33º BEEMG - CEMIG (2018), a energia hidráulica respondeu por 14,9% da demanda de energia de Minas Gerais em 2017. As usinas hidrelétricas foram responsáveis por 85,2% da energia elétrica gerada e os principais combustíveis utilizados nas termelétricas foram o gás natural, o óleo combustível, os gases siderúrgicos, o bagaço de cana e o licor negro, resíduo da indústria de celulose.

Na Figura 2.5 é indicada a geração hidráulica e térmica nos últimos anos em Minas Gerais, obtidos do ONS – Operador Nacional do Sistema. Observa-se a queda da geração hidráulica a partir de 2012, momento em que o despacho das usinas térmicas começa a crescer, em função da seca da última década.

Figura 2.5: Geração: Hidrelétrica e Termelétrica em Minas Gerais



Fonte: ONS, 2019

Minas Gerais, como integrante do Sistema Interligado Nacional – SIN, possui sua geração elétrica submetida à otimização energética que o Centro de Pesquisas

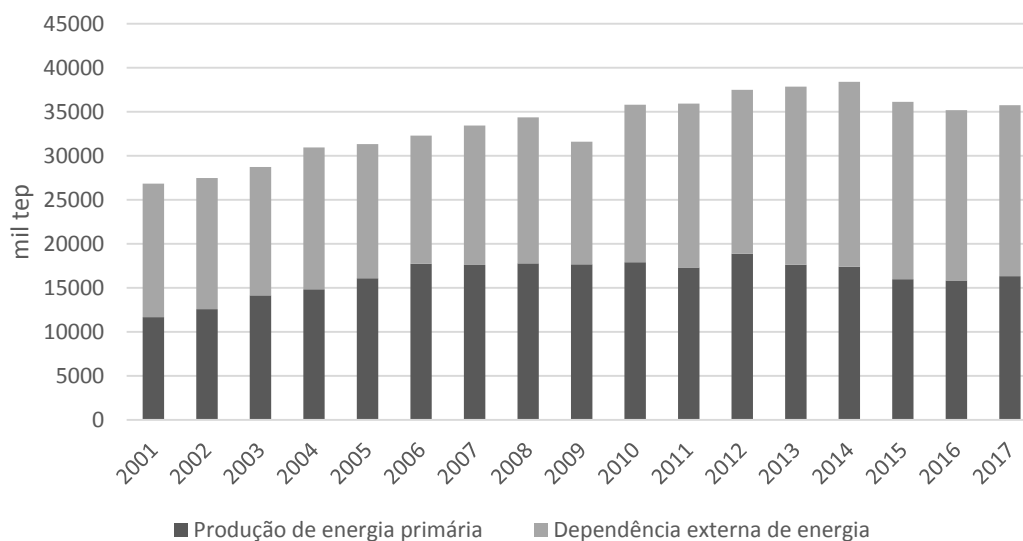
de Energia Elétrica – CEPEL realiza, de modo a orientar a operação do sistema eletroenergético brasileiro, inclusive no planejamento de sua expansão. Contempla também, programação da operação, comercialização de energia, preços, leilões de energia e definição e cálculo da garantia física de empreendimentos de geração.

2.1.1.1 IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE ENERGIA

A ocorrência de fenômenos naturais, econômicos ou sociais pode acarretar alterações sobre os dados de importação e exportação de energia. Dados do 33º BEEMG - CEMIG (2018), mostram que a taxa média de crescimento da dependência externa de energia primária do Estado foi de 3,4% ao ano, considerando a série histórica no período de 1978 a 2017.

O ano 2001, caracterizado pelo racionamento de energia elétrica, foi um marco na série histórica 1978-2001, pois foi a primeira vez que ocorreu a dependência externa de energia. A importação de energia superou a produção de energia primária, alcançando 56% da demanda total naquele ano. Somente em 2005 a produção primária de energia pelo Estado voltou a ser superior à importação, reduzindo a dependência externa para 48,6%. O Estado voltou a ser exportador de eletricidade, até 2012. Em 2015, a dependência externa atingiu 55,8%, devido à redução da produção de energia hidrelétrica, consequência da estiagem naquele ano. Já em 2017, houve importação líquida de 2.218 mil tep de eletricidade (Figura 2.6).

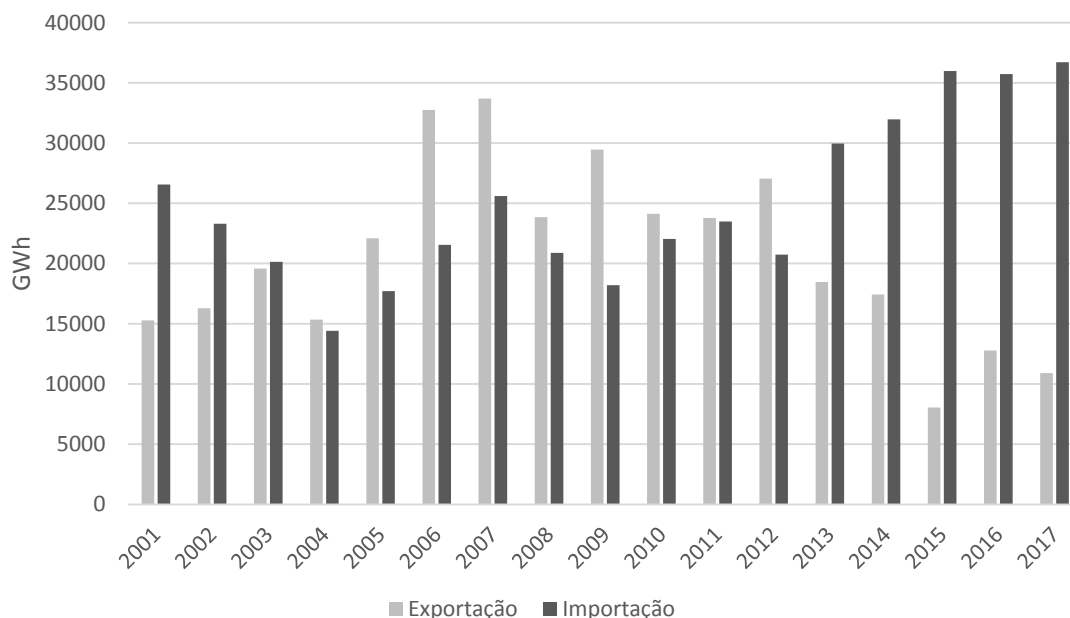
Figura 2.6: Demanda total de energia em Minas Gerais: Produção x Dependência



Fonte: CEMIG (2018)

De 2013 até 2017, verifica-se que a importação de eletricidade supera as exportações, fato devido, exclusivamente, à queda na produção de energia hidrelétrica observada nesse período. A Figura 2.7 apresenta a importação e exportação de eletricidade pelo Estado desde 2001.

Figura 2.7: Importação e exportação de eletricidade em Minas Gerais



Fonte: CEMIG (2018)

Ainda sobre a Figura 2.7, a tendência apresentada a partir de 2013 indica que o Estado de Minas Gerais permanecerá importador de energia elétrica. O planejamento da expansão hidrelétrica no Estado que, em princípio, poderia inverter esta tendência com a entrada de novos empreendimentos para a geração elétrica, poderá enfrentar dificuldades em relação ao aproveitamento hidrelétrico para a construção grandes usinas, uma vez que o potencial para este tipo de empreendimento já sinalizou esgotamento.

2.2 OS RECURSOS HÍDRICOS

A água é imprescindível para a vida sob vários aspectos: consumo animal, irrigação, produção de energia, transporte, lazer e outros. As utilizações da água são classificadas na literatura como usos consuntivos e não consuntivos.

Os usos consuntivos e não consuntivos possuem a seguinte definição:

“Os usos consuntivos são aqueles que retiram água do manancial para sua destinação, como a irrigação, a utilização na indústria e o abastecimento humano. Os usos não consuntivos não envolvem o consumo direto da água - a geração de energia hidrelétrica, o lazer, a pesca e a navegação, são alguns exemplos, pois aproveitam o curso da água sem consumi-la.” (ANA, 2018).

A Lei Federal nº 9.433 de 1997 (Lei das Águas do Brasil), prevê o uso múltiplo das águas, de maneira que todos os setores tenham igualdade de acesso a estes recursos. A exceção de cobertura desta lei ocorre em situações de escassez, nas quais a prioridade de uso das águas passa a ser o consumo humano e de animais. Segundo esta lei, a água é considerada um bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico (BRASIL, 1997).

A ANA é um órgão regulador nacional vinculado ao Ministério do Meio Ambiente - MMA, dedicado a fazer cumprir os objetivos e diretrizes da Lei 9.433 de 1997, sendo responsável pela regulação, monitoramento, aplicação da lei e planejamento dos recursos hídricos, através da gestão integrada das bacias, bem como mediar conflitos devido ao aumento da demanda dos usos das águas. É também o órgão responsável por prevenir e/ou minimizar os efeitos de secas e inundações.

Pela abrangência e sendo parte do nexos estudado neste trabalho, é relevante identificar as bacias hidrográficas que estão distribuídas no território do Estado de Minas Gerais. O Estado situa-se nos limites de quatro grandes bacias hidrográficas: São Francisco, Paraná, Atlântico Leste e Atlântico Sudeste. Estas regiões estão indicadas na Figura 2.8.

Figura 2.8: Regiões Hidrográficas Brasileiras



Fonte: IBGE, 2020

Uma comparação entre as bacias hidrográficas brasileiras é apresentada na Tabela 2.4, contendo os principais parâmetros apresentados no relatório “Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras - Edição Especial” (ANA, 2015). A definição de alguns destes parâmetros a seguir, foi obtida da publicação “Caderno de Recursos Hídricos; Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil” (ANA, 2005):

- Vazão média: a vazão natural média não contempla efeitos de sazonalidade e variabilidade climática, por esse motivo a vazão média adotada é aquela com 95% de permanência, ou seja:

“Vazão média diária que é excedida ou igualada em 95% do tempo – como sendo representativa da disponibilidade hídrica em condição de estiagem.”

- Disponibilidade hídrica superficial:

“É a vazão regularizada pelo sistema de reservatórios a montante da seção de interesse, com 100% de garantia, somada à vazão incremental de estiagem (vazão com permanência de 95%, no trecho não regularizado). Em rios onde não existe regularização, a disponibilidade hídrica foi considerada como igual à vazão de estiagem.”

- Reservação *per capita*: capacidade de reserva hídrica por habitante da bacia hidrográfica.

- Criticidade quantitativa: relação entre a demanda consuntiva e a disponibilidade hídrica dos rios.

Tabela 2.4: Dados das Bacias Hidrográficas

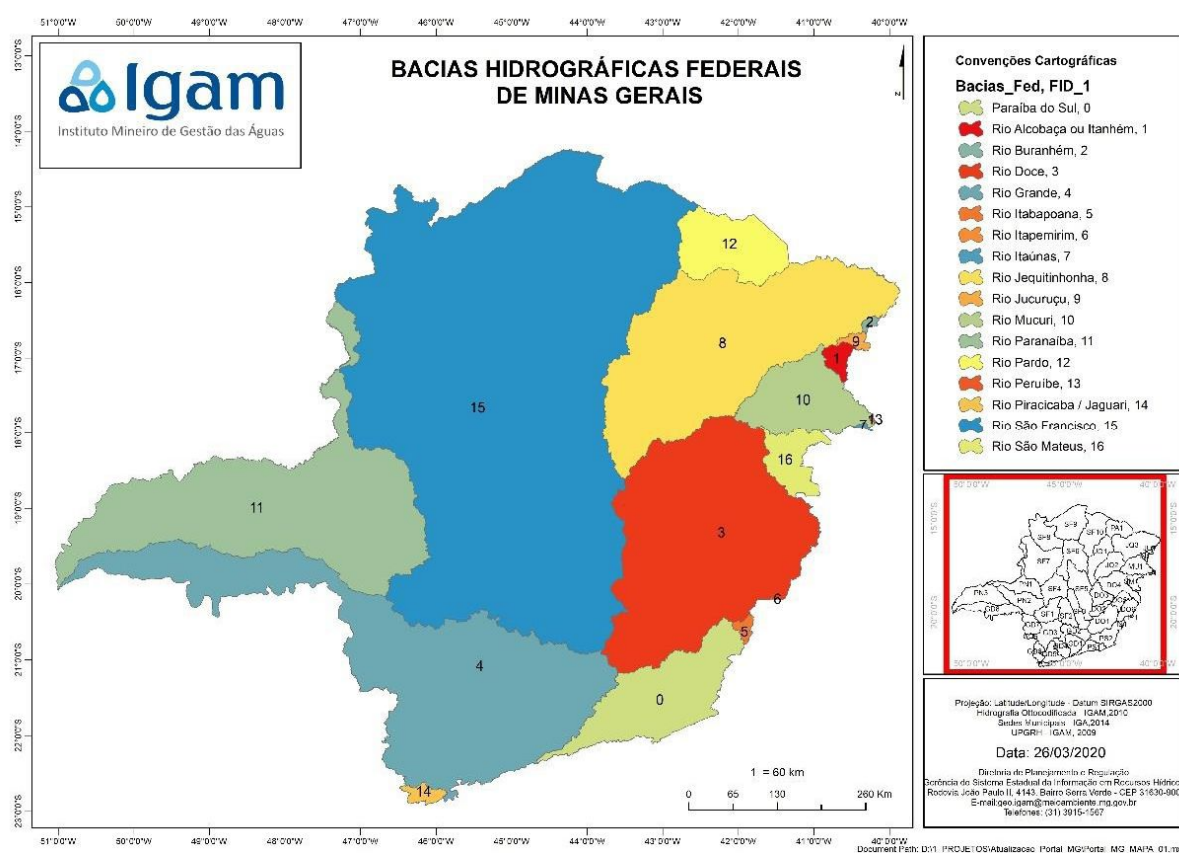
	Regiões Hidrográficas				
	Atlântico Leste	Atlântico Sudeste	Paraná	São Francisco	Nacional
Área em Minas Gerais (%)	26	ND	ND	ND	NA
Área em relação ao país (%)	3,9	2,5	10	7,5	NA
População (10 ⁶ hab)	15,1	28,24	61,3	14,3	NA
Densidade populacional (hab/km ²)	38,82	131,6	69,7	22,4	22,4
Nº municípios	491	595	1.507	503	NA
Clima ou Bioma	semiárido	mata atlântica	subtropical úmido	semiárido	NA
Precipitação média anual (mm)	1.018	1.401	1.543	1.003	1.761
Vazão média (m ³ /s)	1.484	3.107	11.831	2.846	179.516
Disponibilidade hídrica superficial (m ³ /s)	305	1.145	5.956	1.886	91.071
Reservação per capita (m ³ /hab)	945	372	4.047	5.083	3.607
Volume de reservação (hm ³)	14.242	10.505	248.081	72.687	NA
Demanda total (m ³ /s)	113	214	736	279	NA
Criticidade quantitativa (percentual da extensão dos rios)	46	9	ND	43	NA
Usos consuntivos (%): Irrigação/Industrial/Urano/Outros animais/Rural	47/10/31/8/4	27/20/49/3/1	42/28/24/5/1	77/7/11/4/1	NA
Situação Emergência - Secas e Estiagens (% municípios)	58	ND	ND	61	NA
Predominância dos eventos críticos	seca	cheia	ND	seca	NA

Nota: (NA-Não se Aplica; ND-Não Disponível)

Fonte: ANA, 2015

A subdivisão das bacias apresentadas resulta em novas bacias localizadas em Minas Gerais, cujos nomes são os mesmos dos principais rios em que estejam (Figura 2.9).

Figura 2.9: Bacias hidrográficas em Minas Gerais



Fonte: IGAM, 2020

Minas Gerais possui 9,84% de seu território inserido no polígono das secas (IGAM, 2015). O Anexo 3 contém os registros das anomalias da precipitação nas bacias do Jequitinhonha, Rio Doce, Rio São Francisco, Rio Grande, Rio Paraíba do Sul e Rio Paranaíba, nos quais os períodos chuvosos (outubro a março) são indicados no eixo X, o percentual de precipitação acumulada indicado no eixo Y, e a linha de tendência de 1979 a 2014. Nestes gráficos do Anexo 3, cada período chuvoso é indicado pela influência dos fenômenos climáticos denominados “*el niño*” e “*la niña*” ou se o registro daquele período foi considerado normal. Em todos os gráficos, a linha de tendência aponta para a redução das precipitações. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (INPE, 2020), as denominações “*el niño*” e “*la niña*”, são:

“*El Niño* é um fenômeno atmosférico-oceânico caracterizado por um aquecimento anormal das águas superficiais no oceano Pacífico Tropical, e que pode afetar o clima regional e global, mudando os padrões de vento a nível mundial, e afetando assim, os regimes de chuva em regiões tropicais e de latitudes médias.”

“*La Niña* representa um fenômeno oceânico-atmosférico com características opostas ao *EL Niño*, e que caracteriza-se por um esfriamento anormal nas águas superficiais do Oceano Pacífico Tropical. Alguns dos impactos de *La Niña* tendem a ser opostos aos de *El Niño*, mas nem sempre uma região afetada pelo *El Niño* apresenta impactos significativos no tempo e clima devido à *La Niña*.”

A redução da capacidade hidrelétrica no setor elétrico devida às alterações no regime hidrológico afeta diretamente o sistema elétrico interconectado, com efeitos não só para a população regional, mas também para o país. A redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios pode causar diminuição na confiabilidade e segurança do sistema elétrico, já que as grandes usinas hidrelétricas e seus reservatórios são a base do sistema.

Como enfatizado por Fortunato *et al.*, (1990), a capacidade de atendimento da demanda futura é a base da expansão dos sistemas de geração hidrelétrica. Para evitar perda de confiabilidade do sistema, a substituição da capacidade hidrelétrica deve ser planejada de modo que outras fontes de energia do sistema possam contribuir para suprir o fornecimento, tais como usinas a carvão mineral, gás natural ou energia nuclear.

Caso haja necessidade de operação de usinas a combustível fóssil, é necessário que tecnologias de captura e armazenamento de carbono sejam consideradas, de modo a evitar aumentos de emissões de gases de efeito estufa. Dessa forma, diversificar a matriz energética é fundamental para garantir segurança e sustentabilidade do setor elétrico (HUNT *et al.*, 2018). A geração distribuída também possui potencial para implantação no Estado, podendo contribuir para a geração hidrelétrica através das fontes eólica, solar e biomassa. Como o Brasil possui a rede de transmissão conectada entre diferentes regiões, existe flexibilidade para introduzir fontes renováveis intermitentes sem perda de segurança do sistema (SILVA *et al.*, 2019).

As usinas hidrelétricas possuem os menores custos marginais de produção de energia, portanto, quaisquer mudanças na estrutura energética do Estado de Minas Gerais causadas pela diminuição da participação da energia hidrelétrica também levariam a preços de energia mais altos e poderiam criar desafios para os setores econômico e residencial.

Cabe destacar que, se a água utilizada para agricultura, indústria e outros usos não for administrada adequadamente, poderá afetar as projeções de geração de hidreletricidade. Por exemplo, a água para irrigação tem prioridade sobre a geração de eletricidade (Hunt *et al.*, 2018). Em parte da bacia do rio São Francisco, no Nordeste, longos períodos de seca já trouxeram prejuízos para a geração de eletricidade, para a produção de alimentos e no suprimento de água para a população (RUFFATO-FERREIRA *et al.*, 2017).

Portanto, o gerenciamento de recursos hídricos deve ser aprimorado para garantir o suprimento de eletricidade e fornecimento de água para outras atividades, como irrigação e água para consumo, uma vez que a escassez pode levar à mobilidade da população, disseminação de doenças, redução da produção de alimentos e outras consequências. Algumas ações, como investimento em saúde e educação (conscientizar o público sobre o uso da água), em eficiência energética e também incentivos para as concessionárias investirem em adaptação (WBCSD, 2014) são, verdadeiramente, importantes para mitigar os impactos que podem ser causados pela redução de chuvas no Estado de Minas Gerais.

Estudos futuros, sobre os impactos nos recursos hídricos do Estado, de forma a aumentar o entendimento de como os mesmos afetam o meio ambiente e a saúde, são muito valiosos. Para tanto, o uso de ferramentas avançadas, como a avaliação do ciclo de vida dependente destes recursos, é consideravelmente relevante (YANG, 2017). Nesse caso, a avaliação do ciclo de vida vai além da avaliação convencional, compensando suas limitações e considerando as consequências ambientais como base na resposta do sistema, como demonstrado por Yang e Heijungs (2018).

São José (2018) enfatizou os riscos inerentes à predominância da geração hidrelétrica como meta para assegurar o suprimento de energia, devido a restrições

ambientais para a expansão das usinas desta modalidade; mostrou a necessidade de associar usinas renováveis intermitentes (solar, eólica, CGH) e a utilização do despacho de usinas termelétricas, em razão dos baixos níveis dos reservatórios das UHE.

2.3 AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A Revolução Industrial e o desenvolvimento da ciência trouxeram um crescimento sem precedentes da população mundial, ao estabelecer um conceito de mudanças climáticas, que carrega um componente novo e potencialmente ameaçador, as “causas antropogênicas”.

As preocupações com as consequências das mudanças climáticas ganharam força na medida em que a sistematização dos métodos científicos de monitoramento e registro de dados climáticos passou a sugerir uma correlação entre o modelo de desenvolvimento das crescentes populações mundiais e a ocorrência dos eventos críticos, como secas severas prolongadas ou alagamentos, possivelmente derivados do aquecimento global, consequência da emissão de gases de efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono. As fontes de emissão desses gases são queima de combustíveis fósseis que ocorre nas usinas termelétricas, automóveis e indústrias, nas mudanças no uso do solo, nas queimadas, com o desmatamento, na decomposição do lixo e outros.

Entretanto, alguns pesquisadores argumentam, por exemplo, que não há como atribuir às mudanças climáticas o que vem ocorrendo nas últimas décadas e, de maneira destacada, no setor elétrico. Segundo eles, outros fatores são determinantes para as mudanças observadas, tais como: equívocos no planejamento, falta de obras de infraestrutura para a produção de eletricidade, uso irresponsável de água, falta de diversificação da matriz energética e destruição de florestas e ambientes naturais (JARDIM, 2015).

É fato que a mudança climática já foi percebida praticamente em todas as regiões do planeta e poderá ser um dos problemas mais sérios que a humanidade

enfrentará ao longo do século. De acordo com o Relatório “*The Economics of Climate Change: The Stern Review*”, que discutiu os efeitos das mudanças climáticas na economia mundial, aponta um aumento de 5% a 20% do custo anual no PIB mundial se nenhuma ação de qualquer tipo for tomada para lidar com esta situação. Por outro lado, o mesmo relatório estimou um custo anual em cerca de 1% do PIB mundial para os efeitos da mitigação (STERN, 2007).

Além disso, desastres relacionados ao clima podem causar mortalidade e fome, migração, deslocamento da população e conflitos violentos (WATTS *et al.*, 2018; MONTGOMERY, 2017). Tong e Ebi (2019), destacam que em razão da variedade de riscos relacionados ao clima e intervenções preventivas necessárias, não somente o sistema de saúde deve ter iniciativas de proteção aos indivíduos e comunidades, mas também outros setores relevantes do governo e da indústria, bem como os próprios cidadãos. Acrescentam ainda que é necessária uma abordagem holística e interdisciplinar para projetar e implementar essas atividades de intervenções preventivas (TONG E EBI, 2019).

Mariani *et al.* (2016) trataram da abordagem entre as relações do consumo de água, energia e alimento num momento de crescimento populacional e econômico, em razão das mudanças do padrão de consumo e das interferências das condições climáticas.

Há aspectos sobre a existência das mudanças climáticas que devem ser consideradas:

- O acúmulo de gases de efeito estufa possui longa vida útil na atmosfera;
- A inércia do sistema climático para a observação dos efeitos totais das atuais concentrações de gases de efeito estufa, pode levar de décadas a milênios;
- Inércia acrescida ao sistema energético, devido a investimentos de capital de longa duração, proveniente de instituições que podem ser muito lentas a mudanças.

O índice de estresse hídrico é uma medida que estabelece uma graduação para a escassez do recurso. Segundo a Organização das Nações Unidas – ONU, é considerado estresse hídrico quando mais de 30% das águas das bacias hidrográficas de uma região são utilizadas para manter suas atividades econômicas e sociais. Aumentos do índice de estresse hídrico foram observados na maioria das regiões do planeta, resultantes da crescente demanda devido aos crescimentos da população e da atividade econômica, bem como das mudanças no clima.

Em muitos países em desenvolvimento na América Latina, África e Ásia, onde as populações estão crescendo e a atividade econômica está se expandindo, o crescimento da demanda é a maior fonte de aumento do índice de estresse hídrico, maior ainda que mudanças no clima, mas em muitas regiões estas mudanças exacerbam esse estresse. Em algumas bacias hidrográficas, de forma geral, o aumento do estresse hídrico é impulsionado principalmente pela demanda por irrigação e outras retiradas de água, enquanto em outras bacias a causa primária é a diminuição do escoamento devido à diminuição da precipitação (MIT, 2016).

Aproximadamente 1,5 bilhão de pessoas poderá experimentar condições de estresse em recursos hídricos em todo o mundo até 2050, dos quais aproximadamente um bilhão poderá experimentar condições extremamente estressantes destes recursos. As incertezas no padrão de mudanças climáticas desempenham um papel determinante em ambas as situações, tanto para identificar onde as pessoas enfrentarão estresse hídrico quanto para quantificar o nível de estresse hídrico que elas irão enfrentar (MIT, 2016). O período de estudo sobre o clima e suas alterações pode variar conforme a abordagem. Os modelos climáticos utilizados pelo IPCC desde o ano 2000 consideram o horizonte de estudos até o ano 2100. Até o Relatório de Avaliação 4 (AR4), os cenários de emissões apresentavam a seguinte classificação (NAKICENOVIC *et al.*, 2000):

A1: Crescimento econômico mundial acelerado. A população global atingiria o pico numérico no meio do século XXI e início de um declínio. Rápida introdução de novas tecnologias mais eficientes;

A2: Previsão de um mundo muito heterogêneo, aumento contínuo da população mundial e crescimento econômico regionalizado. Neste cenário, tais fenômenos serão mais fragmentados e mais lentos em relação aos outros cenários;

B1: Considera um mundo convergente, tendo a mesma previsão da população do cenário A1, mas com mudanças na estrutura econômica, em que serviços e informações sejam priorizados. Redução na intensidade material e introdução de tecnologias limpas e eficientes. A ênfase está nas soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, mas sem ações relacionadas ao clima;

B2: Previsão de predominância de soluções locais com o objetivo de alcançar a sustentabilidade econômica, social e ambiental. A população estaria em crescimento, porém inferior a A2 e com um nível intermediário de desenvolvimento econômico, mudança tecnológica menos rápida e mais diversa em relação aos cenários B1 e A1. Considera a proteção ambiental e a equidade social em níveis local e regional.

A partir do Relatório de Avaliação 5 (AR5), o IPCC alterou a tipologia de cenários, abandonando a abordagem baseada em emissões, mencionados no parágrafo anterior, para cenários das *Representative Concentration Pathways* – RCP, ou Trajetórias Representativas de Concentração, identificados por sua forçante radiativa² total, expressa em W/m^2 , a ser atingida ao longo do século XXI. Foram adotadas trajetórias socioeconômicas compartilhadas, em conjunto com as simulações climáticas, de forma a avaliar a adaptação, mitigação e impactos residuais, assim denominados: RCP2.6 – cenário de mitigação, nível muito baixo da forçante

² Forçante radiativa: “A forçante radiativa devido a um agente climático é definida como a diferença em irradiância líquida na tropopausa, entre um estado de referência e um estado perturbado devido ao agente climático. As temperaturas de superfície e da troposfera são mantidas fixas, mas permite-se que a estratosfera atinja o equilíbrio radiativo. O estado de referência pode ser a ausência do agente climático, ou seu impacto em uma dada situação ou época, como, por exemplo, no início da Revolução Industrial adotado pelo IPCC” (PBMC, 2014).

radiativa (+2,6 W/m²); RCP4.5 e RCP6.0 – cenários de estabilização (+4,5 W/m² e +6,0 W/m²) e RCP8.5 – cenário de grande emissão de gases de efeito estufa (+8,5 W/m²), (MMA, 2015).

Com as ferramentas tecnológicas e os conhecimentos disponíveis na atualidade, ainda é possível evitar que as transformações provenientes das ações humanas sejam catastróficas para a saúde do planeta e que seja possível integrar os pilares da sustentabilidade quais sejam o bem-estar humano, o funcionamento adequado da economia para a maioria e a preservação ambiental consistente. Há, no entanto, um ponto crucial para que os pilares da sustentabilidade possam ser uma realidade: o modelo de desenvolvimento praticado beneficia a minoria das pessoas no curto prazo, exaurindo recursos naturais vitais (NOBRE E MARENGO, 2018).

Field *et al.* (2014) consideraram que, ainda neste século, as magnitudes e as taxas de mudanças climáticas associadas a cenários de média a alta emissão (RCP4.5, 6.0 e 8.5) representam alto risco de mudança abrupta e irreversível em escala regional na composição, estrutura e função de ecossistemas terrestres e de água doce.

O Brasil, signatário do Acordo de Paris sobre Mudança do Clima e da Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável, registrou no NDC (*Nationally Determined Contribution*) a meta de reduzir em 37% as emissões de gases de efeito estufa em 2025 e de 43% em 2030, nos dois casos em relação ao ano 2005. Além disso, prevê atingir 45% de energias renováveis.

A Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês):

“É o documento do governo brasileiro que registra os principais compromissos e contribuições do Brasil para o futuro acordo climático negociado em Paris. São ações capazes de limitar o aumento da temperatura média global a até 2°C” (MMA, 2019).

De acordo com Mukheibir (2007), as mudanças na temperatura e na precipitação pluviométrica têm o potencial de afetar as instalações hidrelétricas pela evaporação de águas superficiais, pela redução do escoamento devido à seca e pelo

aumento do escoamento devido a inundações – efeitos dos eventos extremos. Existem dois tipos diferentes de impactos na geração hidrelétrica:

“Impactos diretos causados pelo clima, tais como mudanças nas variáveis hidrometeorológicas que afetam diretamente a disponibilidade de água para geração de energia e impactos indiretos pelo aumento da competição por recursos hídricos, resultado da escassez do recurso natural que leva a mudanças nas atividades sociais e econômicas” (TEOTÓNIO *et al.*, 2017).

As principais dificuldades em estabelecer parâmetros que quantifiquem as mudanças climáticas estão relacionadas às incertezas sobre os cenários de emissão e variabilidade natural do sistema climático. Segundo o documento - Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao 1º Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas:

"Sobre os cenários de emissões, as dificuldades de previsão dizem respeito à complexidade de fatores socioeconômicos, como demografia, composição de fontes de energia, uso do solo e curso de desenvolvimento humano global. Sobre a variabilidade natural do sistema climático, é fato que os processos físicos e químicos da atmosfera global são de natureza caótica, de modo que o clima pode ser sensível a mudanças mínimas (variações não lineares), difíceis de medir, tanto em dados observacionais quanto nos resultados dos modelos” (AMBRIZZI; ARAUJO, 2016).

Na análise das projeções de vazão nas bacias do setor elétrico brasileiro, observou-se que os modelos utilizados na elaboração do IPCC-AR4 (Quarto Relatório de Avaliação do IPCC) convergem para o maior impacto em regiões do sudeste, centro-oeste e sul do país, com a possibilidade de redução das vazões e, conseqüentemente, impacto na geração de energia (SILVEIRA *et al.*, 2014).

Além dos efeitos sobre as águas superficiais, a mudança climática deverá afetar as taxas de recarga de águas subterrâneas, ou seja, os recursos de águas subterrâneas renováveis e os níveis dos aquíferos. No Sistema Aquífero Guarani, quase 70% dos cenários climáticos geraram variações dos níveis freáticos situados abaixo daqueles medidos no monitoramento entre 2004 e 2011. A disponibilidade dos recursos hídricos deve levar em consideração não só a evolução das variáveis

naturais, mas também a evolução das condições socioeconômicas que, em geral, respondem por outros estímulos e modelos (ANA, 2016).

De acordo com o MMA (2015), na publicação Brasil 2040, a modelagem energética baseada em cenários de impactos climáticos e hidrológicos aponta para uma tendência de queda na vazão média na maior parte das bacias hidrográficas brasileiras, resultando em uma redução de 7% a 30% da Energia Natural Afluente – ENA - média do Sistema Interligado Nacional. O estudo evidencia a vulnerabilidade da geração hidrelétrica e sugere alternativas de adaptação, de maneira que o sistema de geração elétrica seja beneficiado, mesmo que não haja confirmação de cenários climáticos desfavoráveis.

2.4 AS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Efeito estufa é o fenômeno que ocorre na atmosfera terrestre no qual gases como o gás carbônico, o metano e o vapor d'água atuam de forma a impedir que a reflexão da energia recebida pelo Sol volte ao espaço, provocando o aumento médio da temperatura. Esta elevação da temperatura média é salutar para a vida no planeta, mas a emissão excessiva de gases como o gás carbônico, metano e óxido nitroso para a atmosfera tem elevado a temperatura média sem precedentes. A queima de combustíveis fósseis e as queimadas de biomassa são as principais fontes de gás carbônico.

A última mensuração das emissões de gases de efeito estufa em Minas Gerais foi conduzida pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), órgão do governo estadual, e apresentada no relatório “Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais”, baseado nas informações do período 2005-2014, e utilizou para as estimativas de emissões, os documentos 2006 *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* e os Relatórios de Referência Setoriais publicados pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (FEAM, 2016). Este relatório reuniu informações dos setores Energia, Processos Industriais e Uso de Produtos, Agricultura e Resíduos. As emissões e remoções do setor Mudança de uso

da Terra e Florestas não foram incluídas no documento por falta de dados espaciais oficiais atualizados.

Sendo país signatário da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), o Brasil tem a responsabilidade de reportar as emissões de gases de efeito estufa periodicamente, além de informar as metas de redução de suas emissões, como foi feito no evento COP21 em 2015.

A contribuição governamental do Estado de Minas Gerais iniciou-se em 2005, com a criação do Fórum Mineiro de Mudanças Climáticas Globais, para a discussão dos fenômenos e estabelecimento de metas de políticas públicas. O primeiro inventário de emissões de GEE feito pelo Estado de Minas Gerais foi em 2008, com base no ano 2005. Em 2013, foi publicado novo inventário, desta vez com base no ano 2010.

O Decreto nº 45.229 de 3 de dezembro de 2009 regulamentou as medidas do Poder Público Estadual no que diz respeito ao combate às mudanças climáticas e emissões de GEE. Em 2015, foi publicado o Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais (PEMC), no qual havia orientações para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas no Estado, com o objetivo de cumprir as metas de redução da emissão de carbono, com vistas ao desenvolvimento sustentável. Neste documento, foram apresentados os níveis das emissões de GEE desagregadas, por setor e subsetores socioeconômicos, com a identificação das fontes e sumidouros de carbono.

Em 2016, o Estado de Minas Gerais se comprometeu a informar com transparência os dados das emissões de GEE, periodicamente, de forma a colaborar com os compromissos internacionais assumidos pelo país. Conforme sugerido pelo IPCC, as estimativas de emissões estaduais incluíram a divisão do Estado nos seguintes setores e fontes de emissão: Energia, Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU), Resíduos e Agricultura (FEAM, 2016).

Definição dos Setores (FEAM, 2016):

- Energia:

“Emissões devido à queima de combustíveis e emissões fugitivas. As emissões de CO₂ devido ao processo de redução nas usinas siderúrgicas foram consideradas no setor de Processos Industriais.”

- Processos Industriais:

“Emissões resultantes dos processos produtivos nas indústrias química (amônia), de metais (alumínio, magnésio, ferro-ligas, ferro gusa e aço) e produtos minerais (cimento e cal).”

- Agropecuária:

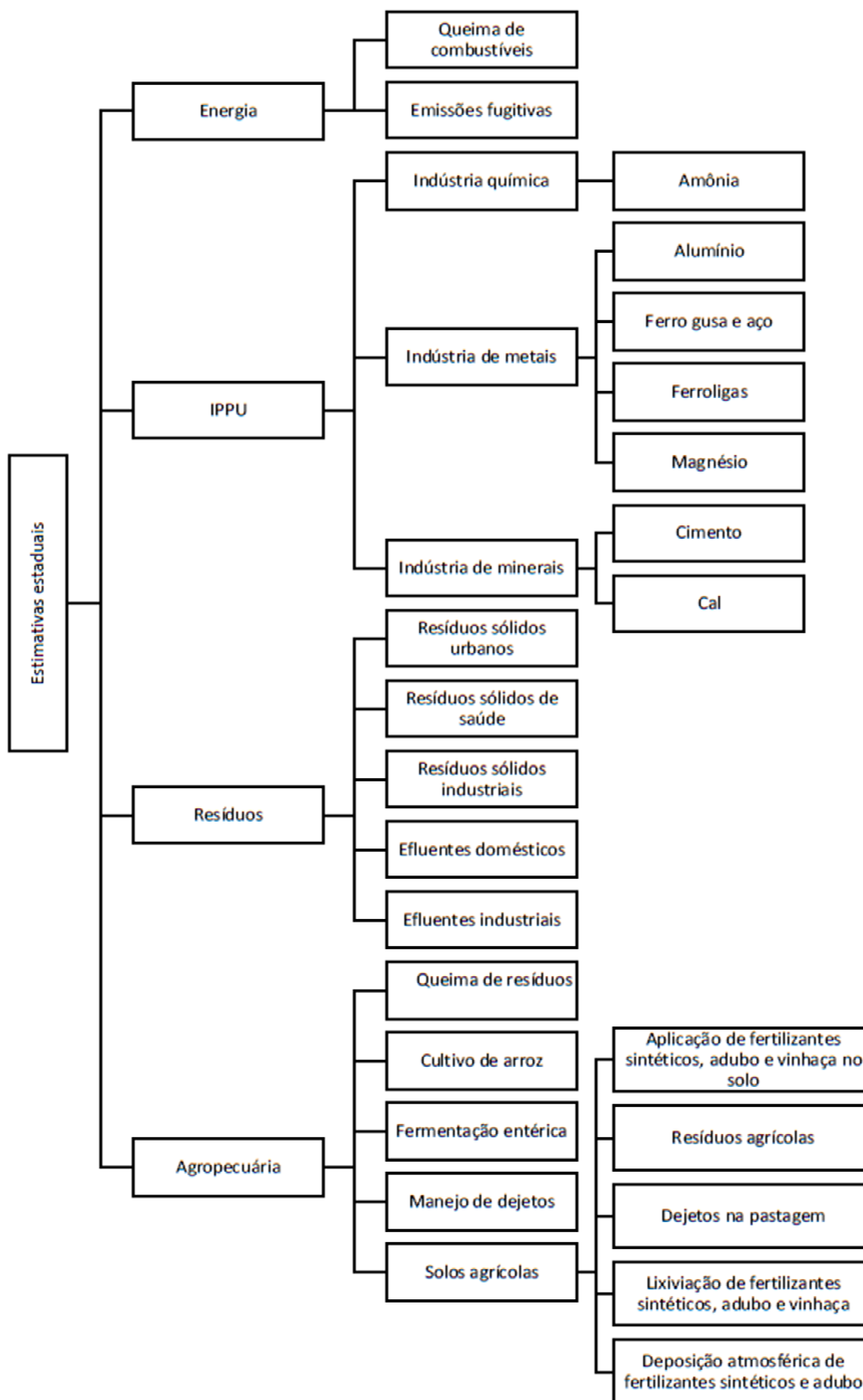
“Emissões devido à fermentação entérica do gado, manejo de dejetos animais, solos agrícolas, calagem, cultivo de arroz e queima de resíduos agrícolas.”

- Tratamento de Resíduos:

“Emissões pela disposição e tratamento de resíduos, incluindo compostagem, incineração e tratamento de efluentes domésticos e industriais.”

A mensuração dos GEE no Estado de Minas Gerais citada no relatório engloba a estrutura setorial mostrada na Figura 2.10, no qual IPPU significa Processos Industriais e Uso de Produtos.

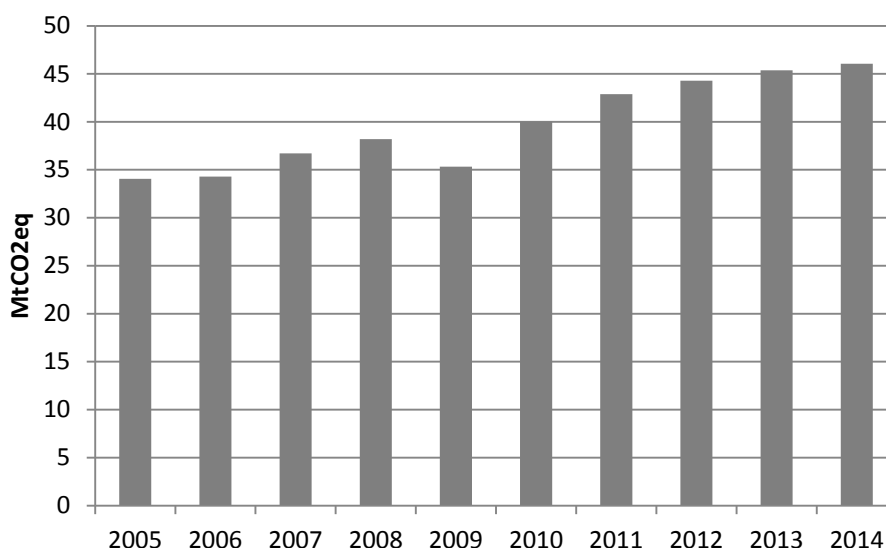
Figura 2.10: Estrutura setorial para mensuração dos GEE em Minas Gerais



Para o Setor Energia foram contabilizados os dados dos gases dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), expressos na unidade de dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}), conforme valores do Potencial de Aquecimento Global (GWP) propostos pelo AR2 do IPCC. São estimativas de GEE provenientes da produção, transformação e consumo de energia, considerando a queima direta de combustíveis, fugas na cadeia de produção, transformação, distribuição e consumo final de energia.

Entre 2005 e 2014, houve um crescimento aproximado de 35% nas emissões no Setor Energia do Estado de Minas Gerais, significando uma taxa de crescimento 3,5% ao ano. Na Figura 2.11, é possível observar o comportamento dos GEE do setor Energia em Minas Gerais.

Figura 2.11: Emissões anuais de GEE do Setor Energia em Minas Gerais



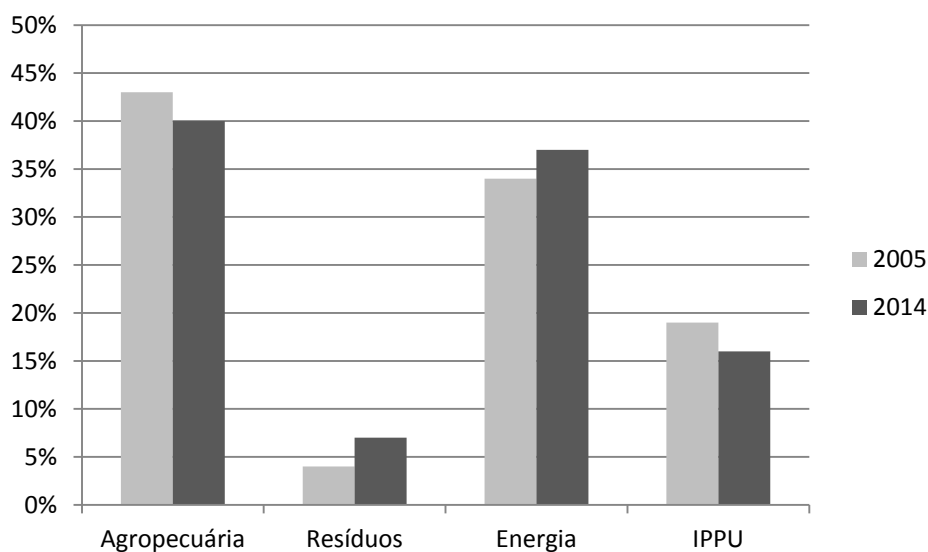
Fonte: FEAM, 2016

De acordo com o levantamento do relatório “Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais”, a participação do setor Energia em 2005 era de 34% do total de emissões, passando a 37% em 2014. O total de emissões do

Estado de Minas Gerais em 2014 alcançou 124 MtCO_{2eq}. Caso fossem empregados os valores GWP do AR5, estas emissões passariam a 134 MtCO_{2eq} (FEAM, 2016).

O percentual de participação dos setores nas emissões estaduais para os anos 2005 e 2014 está representado na Figura 2.12.

Figura 2.12: Participação dos setores nas emissões de GEE em Minas Gerais



Fonte: FEAM, 2016

As emissões registradas em Resíduos dizem respeito aos resíduos sólidos e de efluentes de origem urbana e industrial. A crescente destinação de resíduos sólidos urbanos a usinas de triagem e compostagem e aterros sanitários controlados por um número maior de municípios, facilita a coleta de dados e explica a maior participação deste setor em 2014.

2.5 AS EXTERNALIDADES

Na economia, externalidades são os efeitos sociais, econômicos e ambientais indiretamente causados pela venda de um produto ou serviço. Pode ser entendida

como “uma imposição de um efeito externo causado a terceiros, gerada em uma relação de produção, consumo ou troca” (SOARES, 1999).

As externalidades podem assumir valores positivos ou negativos. A externalidade é dita negativa quando se traduz num custo, ou ônus para terceiros, ao passo que a positiva se traduz num benefício para terceiros.

Como exemplo de externalidade, pode-se citar a relação entre um produtor rural em uma cultura de frutas e o produtor de mel. A florada da cultura das frutas do primeiro propicia o necessário para a produção do segundo, caracterizando o efeito de externalidade positiva. A poluição do ar é outro exemplo, mas para o caso de externalidade negativa no Setor de Transportes.

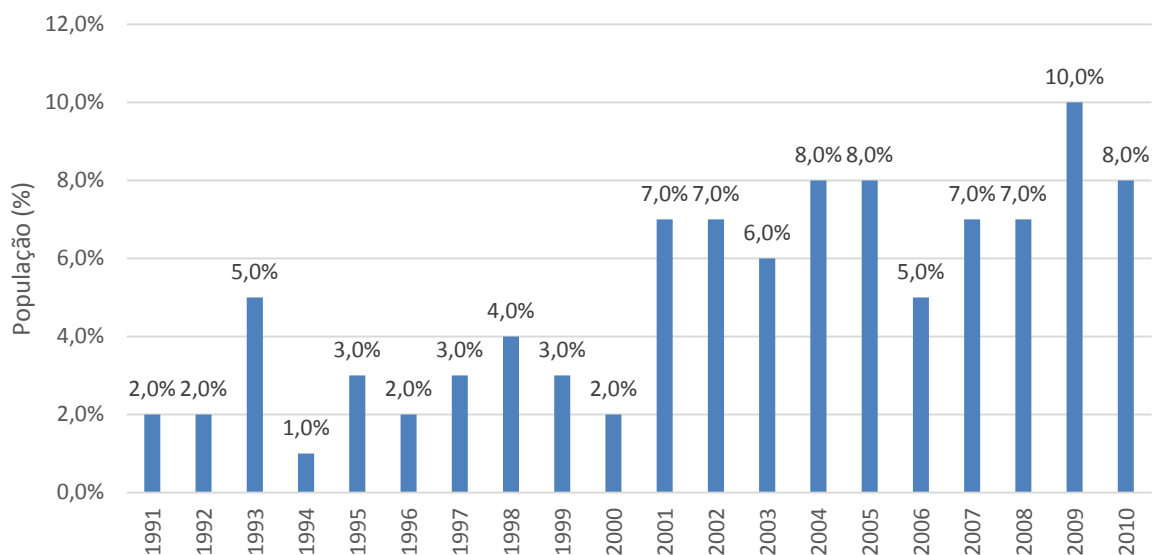
Os impactos resultantes da exposição aos eventos climáticos extremos são percebidos de forma diferente, tanto territorialmente quanto socioeconomicamente. A pobreza pode potencializar os danos às classes mais desfavorecidas, resultando em doenças, perdas de vidas, fome, perdas de moradias e de meios produtivos, conseqüentemente de fontes de renda. Os prejuízos podem ir mais longe, como a ocupação inadequada do solo, falta de saneamento básico, falta de acesso às formas mais limpas de energia e inalação de poluentes. A identificação de grupos populacionais vulneráveis às mudanças climáticas, para que sejam devidamente preparados para a adaptação, devem ser medidas humanitárias e ambientais necessárias do governo federal (MMA, 2016).

A publicação Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010 mostra que a estiagem e seca foram as ocorrências mais frequentes, com 50,34%. Em segundo lugar, estão as inundações bruscas, com 29,56% (CEPED, 2012). Estas duas ocorrências, registradas nacionalmente, são as conseqüências atribuídas às mudanças climáticas mais frequentes.

Em que pese a dificuldade para manter a existência e regularidade dos registros dos eventos naturais por parte da Defesa Civil no Brasil, os dados obtidos e apresentados nesta pesquisa do CEPED são úteis para avaliar a tendência de crescimento e realizar comparações entre períodos.

Na Figura 2.13 estão os percentuais de pessoas afetadas pelos desastres naturais no Brasil, de um universo de 96.220.879 de registros.

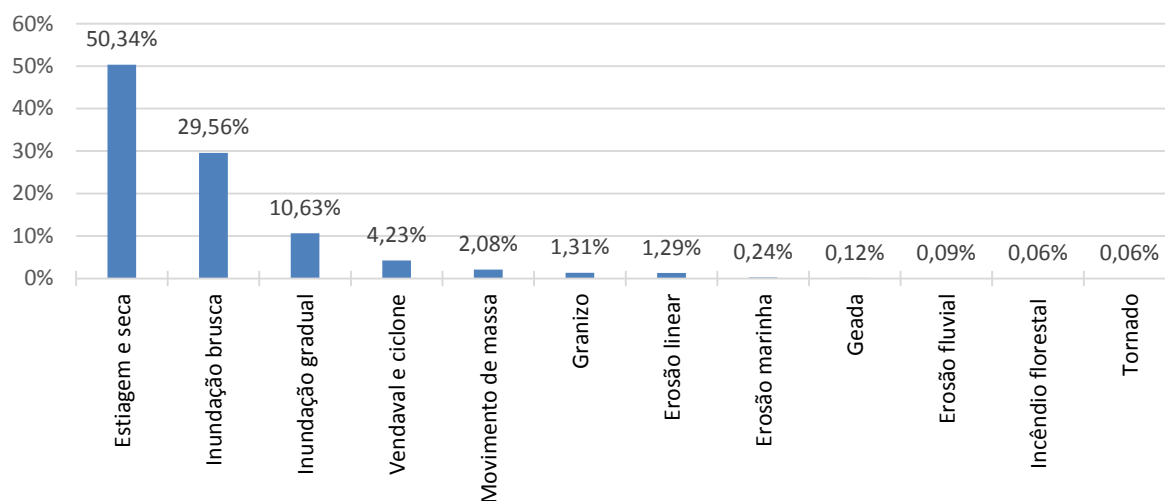
Figura 2.13: Afetados pelos tipos de desastres naturais entre 1991 e 2010 no Brasil



Fonte: CEPED - UFSC, 2012

Na Figura 2.14, estão os tipos de desastres ocorridos entre 1991 e 2010 no Brasil e os respectivos percentuais de ocorrência.

Figura 2.14: Ocorrência dos desastres naturais entre 1991 e 2010 no Brasil



Fonte: CEPED - UFSC, 2012

Eventos extremos do clima podem ser compreendidos por secas prolongadas, altas temperaturas ou chuvas que redundem em inundações, ou seja, a água (ou a falta dela) é um meio pelo qual as populações perceberão com clareza os efeitos das mudanças climáticas. Os impactos destas mudanças nos sistemas de produção de energia, especialmente a geração hidrelétrica, com a redução das vazões e redução do nível dos reservatórios, conduzem a um cenário de potencial aumento das externalidades negativas.

2.6 As Ferramentas WEAP e LEAP

Para realizar os estudos propostos nesta tese, foram utilizados os modelos *Water Evaluation and Planning System* – WEAP (SIEBER, 2020) e o *Low Emissions Analysis Platform* – LEAP (HEAPS, 2016), ambos desenvolvidos pelo *Stockholm Environment Institute* – SEI, os quais são descritos em maiores detalhes no capítulo da metodologia (Cap. 4).

O modelo WEAP é uma ferramenta computacional para planejamento integrado e análise de políticas (regulamentações) de recursos hídricos. Utiliza o princípio básico do balanço hídrico, ou seja, conhecer o volume de água que entra e sai de um sistema, em um intervalo de tempo determinado, podendo ser aplicado em sistemas municipais e agrícolas, em uma única bacia ou em sistemas complexos de bacias transfronteiriças (SIEBER, 2020).

O WEAP é capaz de simular ocorrências naturais e intervenientes como escoamento de precipitação; fluxos de base e recarga de água subterrânea por precipitação; análise de demandas setoriais; conservação de água; direitos de água e prioridades de alocação; operações de reservatórios; geração hidrelétrica; monitoramento da qualidade e contaminação da água; avaliações de vulnerabilidade e requisitos do ecossistema; evapotranspiração e bombeamento de águas subterrâneas de sistemas hídricos. Um módulo de análise financeira incorporado também permite ao usuário realizar comparações de custo-benefício para projetos.

O WEAP possui as capacidades:

- Base de dados do balanço hídrico: sistema para manutenção de informações da demanda e suprimento de água;
- Ferramenta de geração de cenários: útil para simulação de demanda de água, suprimento, escoamento, vazões, emissão de poluentes, tratamento e descarga hídrica e qualidade da água;
- Ferramenta de análise de política (regulamentações): útil na avaliação das opções de gerenciamento e desenvolvimento de sistemas hídricos, considerando os usos múltiplos do recurso hídrico.

A modelagem é feita a partir da representação do sistema hídrico em termos de suas várias fontes de suprimento (por exemplo, rios, córregos, águas subterrâneas, reservatórios ou usinas de dessalinização); estações de extração, transferência e tratamento de águas residuais; demandas de água; geração de poluição e requisitos do ecossistema. A estrutura de dados e o nível de detalhes podem ser modificados

para atender às necessidades e disponibilidade de dados para um determinado sistema em análise.

Pesquisadores têm utilizado modelagens WEAP em análises que incluem o nexo de recursos. Como exemplo, Schneider *et al.*, 2019, investigaram a aplicação dessa ferramenta para avaliar os efeitos de AWD (*Alternate Wetting and Drying* – Umedecimento e secagem alternados) em relação ao uso dos recursos hídricos no campo para diferentes tipos de irrigação em dois estudos de caso nas Filipinas. Nos dados de entrada foram consideradas informações sobre calendários de cultivo, tipo de solo e a relação entre o solo e as propriedades hidrológicas do local. Como resultado das análises, o WEAP mostrou que, para um dos tipos de irrigação considerados, os níveis de água no reservatório diminuirão substancialmente levando a um severo estresse hídrico em relação ao outro sistema.

Em um outro estudo, o modelo WEAP foi aplicado para avaliar a demanda de água para atender às necessidades dos usuários em uma determinada região da Argélia com clima semiárido, com temperaturas que variam entre 25°C a 40°C no verão e 12°C a 0°C no inverno, e com chuvas entre 400 e 600 mm por ano. Foi construído um modelo para gerenciar a demanda de água da sub-bacia hidrográfica do local, e foram considerados cinco cenários para simular as incertezas no período de 30 anos (2008-2037) levando em consideração: o crescimento populacional, o aumento das áreas irrigadas, a diminuição do consumo básico de água potável, a diminuição da água consumida na irrigação e o aumento do consumo básico de água no setor industrial (KINIOUAR *et al.*, 2017). Os resultados deste estudo mostraram que o cenário de diminuição de consumo de água potável é o melhor cenário alternativo e o mais eficiente, reduzindo a demanda água potável demanda por cerca de 37 Mm³ em 30 anos.

Considerando o nexo alimento-energia-água, um modelo WEAP foi aplicado para simular cenários futuros (2010-2069) da demanda e suprimento de água, seja na geração de energia ou na produção de alimentos em uma área metropolitana de Fênix, no Arizona, onde a irrigação na agricultura foi o maior consumidor de água até o final dos anos 90 (GUAN *et al.*, 2020).

Nas últimas três décadas, houve intensa urbanização da região que levou a uma redução da área cultivada que, por sua vez, causou uma diminuição do consumo de água para irrigação de 1561 hm³, em 1985, para 908 hm³, em 2009, correspondendo a 57% e 33% da demanda total de água, respectivamente. Entre os resultados das simulações, os autores concluíram que, se a atual tendência decrescente da demanda de água na agricultura continuar, o uso da água subterrânea diminuirá em ~23% e isso, provavelmente, resultaria na proteção do aquífero e reduziria a demanda de água para resfriamento de geração de energia (GUAN *et al.*, 2020).

Por sua vez, a ferramenta LEAP é um modelo utilizado para análise de políticas energéticas e avaliação de mitigação de mudanças climáticas, desenvolvida pelo *Stockholm Environment Institute* – SEI e adotada em mais de 190 países com aplicações em agências governamentais, acadêmicas, organizações não governamentais, empresas de consultoria e empresas de energia. Sua utilização é possível em diferentes escalas, abrangendo desde cidades e estados até aplicações nacionais, regionais e globais. É adotado também por muitos países que se comprometeram a informar seus compromissos de redução de poluentes à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas – UNFCCC.

O LEAP é uma ferramenta de modelagem integrada, baseada em cenários, que pode ser utilizada para rastrear o consumo de energia, produção e extração de recursos em todos os setores de uma economia, contabilizar fontes e sumidouros de emissões de GEE do setor de energia e do setor não energético. Além de rastrear os GEE, o LEAP também pode ser utilizado para analisar as emissões de poluentes atmosféricos locais, regionais e poluentes climáticos de curta duração, tornando-o bem adequado para estudos sobre os benefícios climáticos da redução da poluição atmosférica local (HEAPS, 2016).

Assim como ocorre com a ferramenta WEAP, artigos podem ser encontrados na literatura com aplicações da ferramenta LEAP, conforme serão descritos alguns exemplos. Nieves *et al.*, (2019), utilizaram um modelo LEAP para obter as previsões dos setores econômicos (terciário, industrial, habitação e transporte) na Colômbia, em relação à demanda de energia e emissões de gases de efeito estufa para os citados

setores. Para cada setor foi considerado um cenário positivo e um negativo com suas especificidades. Nos dois cenários, o maior consumidor de energia foi o setor de transportes, seguido pelo setor industrial.

Os autores apontam que os esforços para melhorar a eficiência deveriam se concentrar nas características de cada setor, como por exemplo no setor industrial onde a atenção deveria ser dirigida aos sistemas de geração de calor e de potência (NIEVES *et al.*, 2019). Um fato importante, também apontado pelos autores, é que as principais limitações da pesquisa desenvolvida, estão relacionadas ao uso do LEAP, o qual não é um modelo de um sistema energético específico, mas uma ferramenta que pode ser usada para a construção de diferentes modelos de energia e, dessa forma, requerem suas próprias estruturas de dados. Entre os principais resultados do estudo, os autores concluem que é possível otimizar o consumo de energia através de políticas econômicas para energias específicas, com possibilidade de redução de 10 milhões de toneladas de equivalentes de carvão e consequente redução de emissões (PAN; XIE; LI, 2013).

Em um outro estudo, o modelo LEAP foi utilizado para realizar simulações de expansão a longo prazo para o sistema de energia das ilhas Java-Bali devido à sua capacidade de acomodar a complexidade tecnológica do sistema de energia, seus suportes para projeções de cenários alternativos, sua modelagem de otimização de menor custo de expansões de sistemas de energia e sua capacidade de calcular as emissões de CO₂ provenientes das várias tecnologias de geração de energia (HANDAYANI *et al.*, 2020).

É comum encontrar estudos em que o modelo LEAP aparece combinado com outros modelos. Por exemplo, em um estudo para identificar potenciais políticas de redução do consumo de energia e cenários de mudança climática para o setor de energia australiano para fins de análises de otimização, o LEAP foi utilizado de forma integrada ao modelo OSeMOSYS (*Open Source Energy Modelling System*). Entre os principais resultados, os autores identificaram cenários de otimização de custos para gerar menores gastos com menos impacto em relação às mudanças climáticas e metas considerando cenários com energia renovável (EMODI *et al.*, 2019). A análise

econômica mostra que políticas de redução de emissões resultarão em um custo adicional para a economia e redução das externalidades ambientais até 2050.

O modelo LEAP também pode trabalhar de forma integrada ao modelo WEAP, como verificado por exemplo em um estudo de caso que considera a cidade de Xiamen, China. Os autores propõem um quadro geral para a avaliação do nexo urbano água-energia e desenvolvem um modelo integrado dinâmico e quantitativo nas análises, considerando onze cenários futuros projetados para explorar os impactos de diferentes fatores, tanto na análise da oferta quanto da demanda em tal nexo urbano (LIN *et al.*, 2019).

CAPÍTULO 3 – O NEXO DE RECURSOS

Este capítulo descreve a utilização do conceito de nexo de recursos, através de modelagens de sistemas energéticos que relacionam água, alimentos, uso da terra, matérias primas, minerais e outros. Este capítulo também cumpre o propósito de apresentar estudos acadêmicos, nos quais houve o emprego das ferramentas LEAP/WEAP utilizadas nesta pesquisa, na modelagem de sistemas interligados e interdependentes e, sobretudo, para demonstrar a amplitude e abrangência do termo “nexo”, como abordagem sistêmica e holística.

Semertzidis (2015) realizou uma revisão bibliográfica em seu artigo sobre o significado do nexo de recursos, a categorização de sistemas de energia e sobre ferramentas de modelagem que possam apoiar decisões e elaborar políticas. O autor apresentou uma visão geral sobre diversas ferramentas usadas para abordar o nexo de recursos. Seu ponto de partida foi o aumento mundial do consumo de recursos já que bilhões de pessoas estão se movendo em direção a um melhor estilo de vida.

Segundo o autor, no entanto, outros bilhões de pessoas permanecerão na pobreza, gerando uma sequência de problemas associados. São temas complexos para serem tratados e quantificados. Após apresentar as vantagens e desvantagens de análises “*bottom-up*” e “*top-down*”, o modelo LEAP é citado no artigo como uma ferramenta que realiza análises de sistemas de energia em uma cidade, estado, país, entre países e globalmente.

Como exemplo de aplicação da modelagem de sistemas, Semertzidis apresentou o trabalho de Karlberg (2015 *apud* SEMERTZIDIS, 2015) no qual o modelo LEAP, em conjunção com o modelo WEAP, foi utilizado para avaliar os impactos do desenvolvimento alternativo da agricultura, energia e meio ambiente na sub-bacia do lago Tana, na Etiópia. Como resultado, o estudo identificou o forte vínculo entre transformação agrícola e transições de energia.

Shannak, Mabrey e Vittorio (2018) realizaram uma revisão da literatura sobre modelos que tratam o nexo água-energia-alimento para compreender o que já é

conhecido, buscar o que está faltando e identificar as oportunidades e desafios para a modelagem deste nexos. A revisão da literatura dos últimos 15 anos sobre o nexos água-energia-alimento identificou os seguintes desafios e considerações:

- As complexas interações e a dinâmica dos sistemas formam os maiores desafios na modelagem do nexos;
- A complexidade na coleta detalhada de dados de entrada para um modelo espacial-temporal;
- Incorporar a distribuição espacial na abordagem de planejamento é uma consideração importante para a modelagem do nexos;
- Incorporar a variação temporal dos padrões climáticos é outra importante consideração.

As implicações derivadas desta pesquisa foram:

- Organizar instituições capazes de monitorar a interligação entre recursos e fornecer ferramentas analíticas a estas instituições para avaliação das interconexões entre estes recursos;
- Projetar políticas econômicas através da configuração de múltiplos objetivos de recursos entre os setores;
- Gerenciar fontes alternativas de energia para influenciar positivamente os preços de água e alimentos;
- Promover a inovação tecnológica para identificar novas opções, de maneira a explorar melhor as interligações entre os componentes do nexos e melhores resultados para a política aplicada.

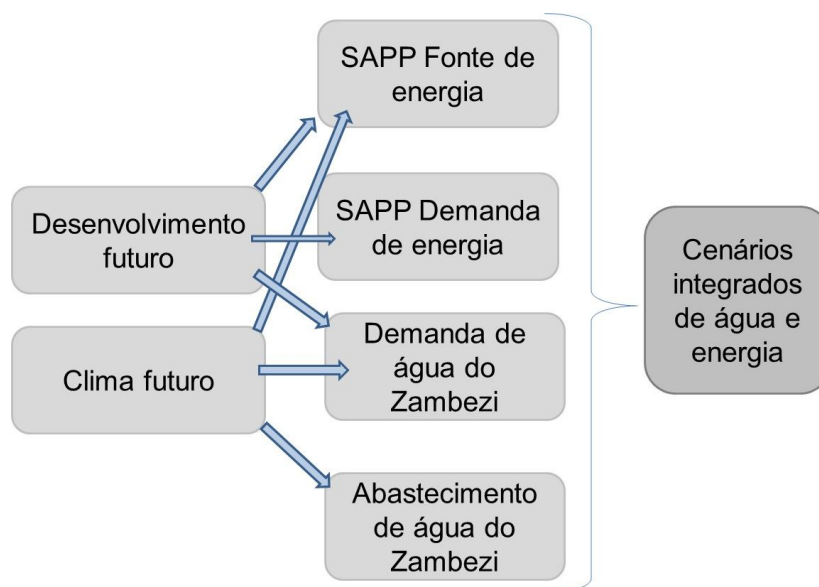
Este nexos água-energia-alimento também havia sido discutido no trabalho de Al-Saidi e Elagib (2017), quando algumas publicações foram revisadas com a finalidade de esclarecer o significado da integração ao se discutir o “nexos”. Segundo os autores, há três motivadores para o surgimento do conceito de nexos de recursos: a interdependência de recursos, estimulada pela crescente escassez dos mesmos; aumento da frequência de crises de fornecimento de recursos e falhas de estratégias de gerenciamentos direcionados por setores.

Uma importante contribuição deste estudo foi a síntese da importância do conceito denexo, ao esclarecer que este conceito é a mais recente transição do pensamento científico e político em direção ao pensamento integrativo para enfrentar as mudanças e desafios globais.

Spalding-Fecher, Joyce e Winkler (2017) apresentaram um trabalho que examinou o impacto que as mudanças climáticas poderão exercer sobre a geração hidrelétrica e as consequências na expansão do sistema de eletricidade na região da bacia do Zambese, África. Este trabalho também considerou a pressão exercida sobre a demanda de recursos, decorrente do aumento populacional na região sul africana, passando de 260 milhões de pessoas em 2012 para perto de 500 milhões em 2042.

A geração hidrelétrica, que responde por 40% da capacidade total na África Austral, é fundamental para garantir a segurança e a estabilidade energética da região. Quando interferências das mudanças climáticas atingem este modo de geração, vários países da região poderão experimentar dificuldades na conversão para a geração elétrica a combustíveis fósseis. A metodologia utilizada na citada pesquisa, apresentada na Figura 3.1, envolveu a construção de modelos integrados (água e energia), testados em cenários futuros de desenvolvimento, usando os modelos LEAP e WEAP, considerando o suprimento e a demanda de energia e água.

Figura 3.1: Estudo da Bacia do Zambese – SAPP: *Southern Africa Power Pool*



Fonte: Adaptado de Spalding-Fecher; Joyce; Winkler (2017)

O estudo apontou para a necessidade de investimentos na diversificação das fontes geradoras de energia elétrica, de maneira a atender a demanda nos períodos de seca da região. Além do conseqüente aumento de custos para a geração de eletricidade, acordos internacionais assinados para a redução da emissão de GEE trazem dificuldades extras para os países desta região da África. Isto porque o aumento de geração elétrica a combustível fóssil estará severamente monitorado.

Esta perspectiva leva a mudanças de postura na formulação de políticas, necessidade de investimento em infraestrutura de água e energia, bem como acordos para o mercado de energia na África Austral, atividades que estão sendo estimuladas pelo Banco Mundial.

Segurança alimentar, demanda por uso da terra, água e energia são os temas tratados no artigo de Midgley, New e Methner (2019). A premissa do estudo baseou-se na projeção de crescimento populacional global, de 7,4 bilhões de pessoas para 9,8 bilhões de pessoas em 2050, no crescimento econômico, comércio internacional, urbanização, diversificação de dietas, novas fontes energéticas e mudanças

climáticas, acarretando aumento estimado entre 60% e 70% da demanda por alimento.

A produção de alimento, por sua vez, necessita do equacionamento da competição entre terra, água e energia. Subnutrição e fome estão frequentemente relacionados à falta ou escassez destes recursos. Estas relações complexas necessitam de uma abordagem integrada e, desta forma, foi indicada pelos autores a adoção do nexo água-energia-alimento como uma prática ferramenta conceitual de grande interesse global.

Os elementos que participam nesta abordagem incluem, poluição do ar e da água, perda de biodiversidade, mudanças climáticas, segurança energética e alimentar, disseminação de doenças, invasão de espécies e escassez de água, interconectados em três dimensões: níveis organizacionais, espaço e tempo.

Em seguida ao exposto, os autores comentaram no artigo sobre a aplicação de modelos com diversas abordagens metodológicas em estudos aplicados ao “nexo”, com exemplos que empregam “múltiplas pegadas quantitativas”, dentre outros os modelos WEAP e LEAP. Consideraram que todos os modelos têm limitação de dados e apresentam dificuldades em lidar com múltiplas escalas de interação e, até mesmo, incapacidade para captar implicações ecológicas e sociais complexas.

No entanto, concluíram que a utilização do conceito de nexo é vantajosa por fornecer uma estrutura analítica para a compreensão integrada das demandas concorrentes, otimizações e compensações no uso de recursos em várias escalas de espaço e tempo.

Com o objetivo de investigar a integração do sistema de energia da China com os recursos hídricos, Huang, Ma e Chen (2017) realizaram um estudo baseado em um modelo “*bottom-up*” de 2010 até o ano 2050. A China enfrenta grandes desafios para o desenvolvimento sustentável como limitações dos recursos água e energia, distribuição temporal e espacial desigual, baixa eficiência na utilização, grandes índices de emissão de poluentes e, mais recentemente, mudança climática.

Com a maior população mundial, a China experimenta dificuldades com o processo de industrialização e urbanização crescentes, obrigando o governo a estabelecer metas vinculativas sobre a utilização de água, energia e controle da emissão de poluentes. Segundo o artigo, reduzir as emissões de CO₂ por unidade do PIB entre 60% a 65% abaixo dos valores de 2005 e promover a participação de combustíveis não fósseis a um patamar de 20% até 2030 estão na pauta do governo chinês.

Para avaliar as premissas estipuladas pelos autores, os sistemas de água e energia foram integrados em um modelo (*China TIMES model*) de maneira a projetar a demanda futura de água e avaliar os impactos causados pelas restrições de carbono e água na geração de energia. A metodologia utilizada para a modelagem determinou a decisão das opções de menor custo dentre as tecnologias e combustíveis relacionados no modelo, de maneira que atendam a demanda de energia projetada para as suposições social e econômica estabelecidas. Tais suposições, aplicadas aos cenários, foram: população chinesa alcançar o pico de 1,47 bilhões em torno de 2030, acompanhando taxa próxima a 62,5% para a urbanização do país. A partir de 2030, a expectativa do estudo foi a redução da população para 1,38 bilhões até 2050, acompanhada de uma taxa de 75% de urbanização.

Foi considerada uma desaceleração da economia no horizonte de estudo, desta maneira a taxa média anual de crescimento do PIB assumida foi de 7%, 5,5%, 4,5% e 3,5% para os períodos 2015-2020, 2020-2030, 2030-2040 e 2040-2050. Neste estudo nove cenários foram desenvolvidos e investigados sendo um cenário de referência, dois cenários de mitigação de CO₂, dois cenários de custos da água e quatro cenários com combinações de restrições de carbono e água.

Os resultados da modelagem demonstraram que no cenário de referência, a geração de eletricidade passará de 4.518 TWh em 2010 para 13.270 TWh, a emissão de CO₂ passará de 3,1 Gt para 6,1 Gt e a captação de água de 59 Gm³ para 104Gm³. Os cenários de mitigação de CO₂ mostraram que poderá haver redução de captação de água para a geração de energia e, ao mesmo tempo, promover a expansão de tecnologias renováveis.

Os cenários de custo da água impactaram significativamente a captação de água para a geração de energia, devido à tecnologia de resfriamento utilizada. Por fim, os cenários de restrição de água e CO₂ mostraram que, nestas condições, as tecnologias renováveis são notoriamente prevalentes.

O nexa Água-Energia-Alimentos (AEA) também foi tratado por Bazilian *et al.* (2011) ao descreverem as interligações destes recursos em alto nível de agregação, especialmente sob a perspectiva de um país em desenvolvimento. A consideração que foi feita neste trabalho é que, embora as questões ambientais normalmente sejam fortes polos de investigação, as grandes desigualdades de acesso aos recursos sugerem que os aspectos de segurança sejam motivadores mais efetivos para nortear as análises.

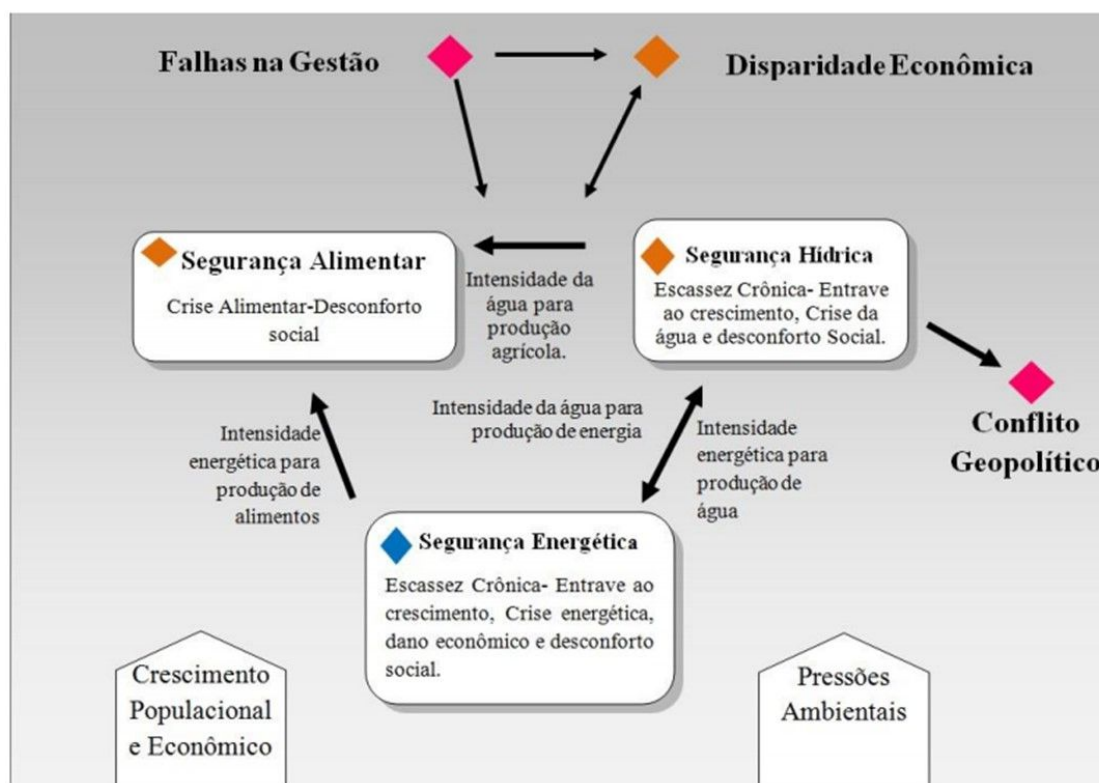
Assim, alguns elementos descritivos dos três componentes do nexa AEA, para a construção de modelos, identificados pelos autores são:

- Há bilhões de pessoas sem acesso (em quantidade, qualidade ou ambas);
- Rápido crescimento da demanda global;
- Restrições de recursos;
- São bens globais, envolvem comércio internacional e implicações globais;
- Diferentes disponibilidades regionais e variações de oferta e demanda;
- Forte interdependência com as mudanças climáticas e o meio ambiente;
- Questões de segurança são fundamentais para o funcionamento da sociedade;
- Operam rigorosamente em mercados regulados;
- Requerem identificação explícita e tratamento de riscos.

O esquema das interações com foco na segurança é apresentado na Figura 3.2, na qual é possível identificar as questões interrelacionadas de segurança alimentar, segurança hídrica e segurança energética, como elementos do contexto governamental e econômico, submetido às pressões das questões ambientais e do

crescimento populacional. Esta dinâmica poderá conduzir aos conflitos geopolíticos mostrados na figura.

Figura 3.2: Interações com foco na segurança



Fonte: Adaptado de Bazilian *et al.* (2011)

Os autores defendem a criação de uma estrutura robusta para o processamento das interconexões entre o Clima, Terra, Energia e Água (sigla na língua inglesa: CLEW), bem como a adoção de um tratamento holístico na condução dos estudos, de maneira a suprir as deficiências das atuais ferramentas analíticas de integração e planejamento conhecidas na literatura.

A respeito da adoção de ferramentas adequadas para investigação do conceito denexo, Brouwer *et al.* (2018) apresentaram um trabalho no qual seis ferramentas computacionais foram estudadas para avaliação de estratégias, visando o

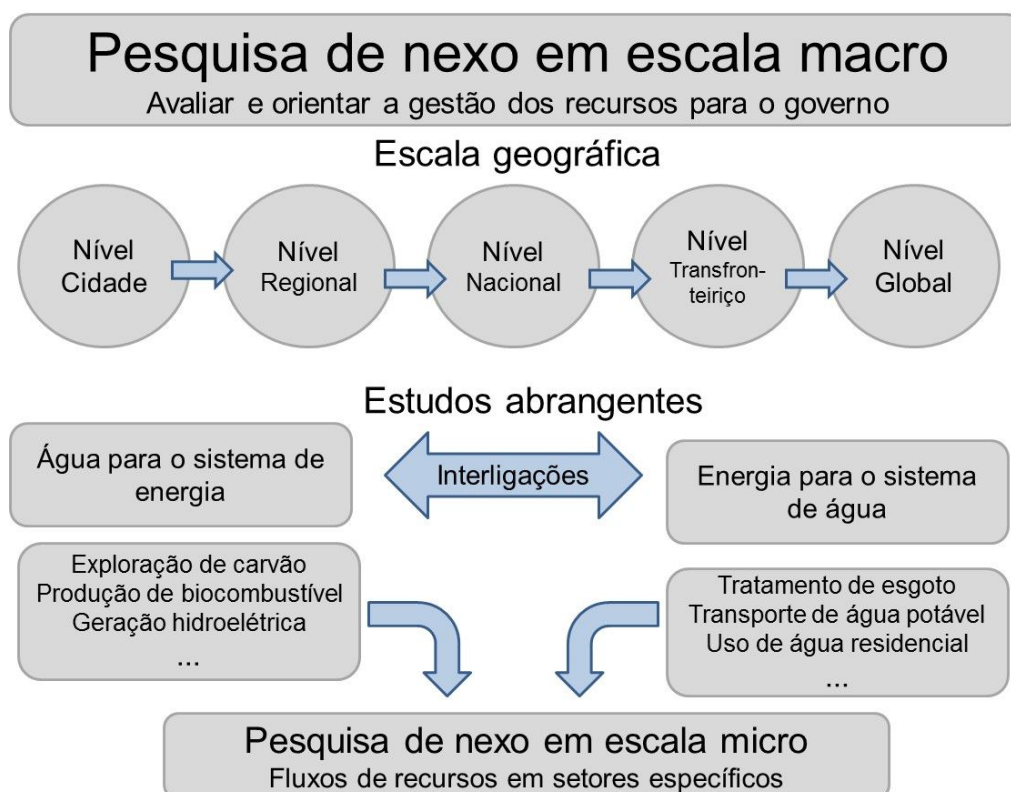
desenvolvimento sustentável e melhorar a capacidade de modelagem energética na Europa. Para os autores, a confiabilidade e a real utilidade dos resultados de modelos energéticos que consideram o conceito denexo, devem levar em conta os impactos:

- Da mudança nos níveis de precipitação no potencial de geração hidrelétrica;
- Nos recursos hídricos para resfriamento e operação de usinas;
- Da implantação de usinas (principalmente renováveis), bem como disponibilidade de culturas bioenergéticas e produção de alimentos;
- Do uso da energia, considerando as mudanças climáticas;
- Do tratamento e dessalinização da água para a demanda de energia;
- Da mudança climática na temperatura atmosférica e, conseqüentemente, na demanda de energia (para aquecimento e refrigeração).

Uma revisão de trinta e cinco estudos científicos sobre o nexo água-energia foi conduzida por Dai *et al.* (2018), gerando um depósito de trabalhos variados em escalas geográficas, ampla gama de métodos, ferramentas e abordagens. Para tanto, foi utilizado um sistema de revisão e classificação destes estudos, de maneira a possibilitar a avaliação dos trabalhos. Os objetivos específicos desse trabalho foram: conhecer o desenvolvimento dos casos do nexo água-energia em escala macro, oferecer uma visão geral das ferramentas existentes que podem ser usadas no conceito de nexo e fazer reflexões sobre os desafios e necessidades para o desenvolvimento futuro de métodos de nível macro escala.

O estudo de escala “micro” concentra-se, principalmente, na avaliação dos fluxos de recursos em setores econômicos específicos. O estudo em escala “macro”, geralmente, visa a gestão dos recursos em diferentes escalas geográficas, conforme demonstrado na Figura 3.3. A análise dos trabalhos selecionados considerou uma ampla gama de questões como escala, conceituação, contexto, sustentabilidade e impactos.

Figura 3.3: Estrutura conceitual das escalas nos estudos de nexo



Fonte: Adaptado de Dai *et al.* (2018)

A variedade de métodos de análise dos trabalhos levou os autores a estabelecerem um critério holístico contendo uma série de propriedades para possibilitar a comparação, compreensão e verificação de efetividade entre os mesmos. Tais propriedades, são:

1 – Escopo do nexo; 2 – Método; 3 – Tipo do modelo; 4 – Desenvolvedor do *software*; 5 – Escala geográfica; 6 – Propósito; 7 – Usuário; 8 – Componentes do *software*; 9 – Disponibilidade e qualidade de dados; 10 – Variação temporal de cenários; 11 – Contexto e local do estudo; 12 – Nível de desafio do nexo.

A Figura 3.4 elucida as possibilidades, escopo e abrangência do estudo do nexo neste trabalho nas diversas regiões de abrangência.

Figura 3.4: Estudo do nexo e abrangência



Fonte: Adaptado de Dai *et al.* (2018)

Este trabalho contribuiu para melhorar a resolução e a capacidade analítica de pesquisa do nexo, mas também significou o aumento na demanda de dados e também na complexidade dos modelos.

O estresse hídrico vivido pelos chineses na região de Beijing-Tianjin-Hebei foi o tema explorado por Sun *et al.* (2018) em um trabalho científico publicado para o horizonte de 2013 a 2030, oportunidade na qual a análise do nexo água e energia também foi empregada. A metodologia do trabalho baseou-se na aplicação dos modelos WEAP-LEAP. A região estudada, além de apresentar o estresse hídrico, poderá ver recrudescer esta situação motivada pelas mudanças climáticas, desta forma, os autores estabeleceram cenários considerando situações climáticas e de desenvolvimento para avaliação.

A geração de eletricidade a carvão mineral também demanda grande volume hídrico, uma dificuldade para o setor elétrico da região considerando as restrições. Com o aumento da industrialização e da urbanização, novas fontes sustentáveis de energia deverão ser introduzidas. A estrutura limitada dos rios e a exploração das águas subterrâneas da região parece ter chegado ao seu limite para drenagens diversas que acompanhem o crescimento da demanda.

Os resultados do trabalho mostraram o real estresse hídrico da região. Foi identificada uma demanda anual de água não atendida entre 15,3 e 21,1 bilhões de m³, entre os anos 2017-2030. Nos cenários de introdução fontes renováveis de energia e aumento de tecnologia foi esperada uma economia entre 200 e 250 milhões de m³ de água até 2030. A demanda de água não atendida para geração de energia pode ser parcialmente aliviada, mas a escassez de água pode não ser revertida.

Na província de Alberta, Canadá, o consumo de água para a produção energética cresce a uma taxa de 4% ao ano. Em 2009 este consumo alcançou, somente para geração de eletricidade, 171 milhões de m³, chegando a 413 milhões de m³ em 2030. Ali (2018) estudou a relação da água para a geração de eletricidade e para a produção de combustíveis primários nesta província do Canadá (nexo água-energia) no horizonte de 2009 a 2030, utilizando a modelagem WEAP-LEAP.

As atividades de óleo e gás, geradores térmicos (resfriamento e geração de vapor) e usinas hidrelétricas são muito intensivas no uso de água no Canadá. Alberta é uma região de produção de combustíveis primários, especialmente petróleo retirado da areia betuminosa, o que traz grande impacto negativo na qualidade e na quantidade de água local. A grande seca ocorrida em 2002 na região forçou o debate público sobre o assunto. A capacidade de geração elétrica em Alberta é representada por 52% de usinas termelétricas a gás natural e 36% a carvão mineral, os 12% restantes são compostos por fontes renováveis de energia, incluindo hidrelétricas.

A análise de sensibilidade realizada com base na redução de 1% no coeficiente de demanda de água e na taxa de produção, mostraram os caminhos mais sensíveis à demanda de água no setor de energia. Se uma melhoria de 1% ocorrer no coeficiente de consumo de água considerado ou 1% de redução na produção, a produção de etanol de trigo pode economizar anualmente cerca de 4,3 milhões m³ no consumo total de água. O mesmo fator de sensibilidade de 1% aplicado na extração de areias betuminosas da mineração de superfície, pode resultar em uma economia média anual de 1,9 milhões de m³. Uma melhoria de 1% no coeficiente de consumo de água e uma redução de 1% na quantidade gerada esperada economizaria cerca de 1,5 milhões m³ por ano em média. O arrefecimento a seco em termelétricas é uma

tecnologia adequada devido ao clima frio em Alberta e pode diminuir significativamente o uso da água na fase de geração de eletricidade.

A análise de sensibilidade realizada mostrou que a via mais sensível à demanda de água do setor de energia em Alberta é a de produção de etanol à base de trigo, dentre as vias de combustível primário. A geração de eletricidade a partir do ciclo combinado a gás natural com a torre de resfriamento é o caminho mais sensível para o consumo de água da geração de energia em Alberta.

A busca por uma estrutura integrada motivou o trabalho de Agrawal, Ahiduzzaman e Kumar (2018) ao avaliar os impactos de longo prazo dos cenários de mudanças climáticas sobre a condição hídrica, bem como nas emissões de GEE também na província de Alberta, Canadá, utilizando a integração dos modelos WEAP e LEAP. O período de estudo foi de 2015 a 2050. Nesta região canadense, mais de 85% da geração de eletricidade provém de combustíveis fósseis. Assim, foram estabelecidos cenários para avaliar os impactos sobre a demanda hídrica, as emissões de GEE, bem como a relação custo-benefício.

Os autores atribuíram ao crescimento populacional o crescimento do consumo de água e energia. Segundo o artigo, também há correlação direta entre o consumo *per capita* de eletricidade e qualidade de vida, acrescentando mais esta premissa à anterior, formulada pelos autores. Neste ponto, surge um desafio crucial: como manter o crescimento da qualidade de vida para uma população crescente, enquanto se reduz a emissão de poluentes dos combustíveis fósseis?

Os resultados da modelagem indicaram que, para o setor de energia, embora a implementação de cenários de mudanças climáticas resulte na redução de GEE, a demanda de água aumentará. As usinas a carvão mineral são mais intensivas no consumo de água e emissão de GEE. Neste estudo, o único cenário que trouxe economia de demanda hídrica foi com a conversão precoce de carvão mineral para gás natural para a geração de energia, mantendo uma razoável relação custo-benefício.

Em escala global, Khan, Linares e García-González (2017) discutiram a necessidade de melhores representações da infraestrutura hídrica e os correspondentes vínculos com o setor de energia, quando o conceito do nexo água-energia for aplicado. Segundo os autores, as questões abaixo caracterizam a importância da análise integrada de água e energia sobre os sistemas de análise individuais:

- 1 – Previsão e planejamento considerando restrições hídricas;
- 2 – Sustentabilidade hídrica do setor de descarbonização e energias alternativas;
- 3 – Expansão dos biocombustíveis e exploração demasiada dos recursos hídricos;
- 4 – Questões de dissociação de água e energia;
- 5 – Fontes hídricas alternativas e as demandas de energia correspondentes;
- 6 – Vulnerabilidade da geração hidrelétrica com as mudanças climáticas;
- 7 – Restrições da temperatura da água na produção de energia;
- 8 – Eficiência do sistema e “*feedbacks*” intersetoriais;
- 9 – Conflitos intersetoriais, regionais e de partes interessadas.

Igualmente importantes, também foram listadas as barreiras que dificultam a integração água-energia:

- A – Gestão setorial tradicionalmente independente e isolada;
- B – Características espaciais, temporais e físicas distintas;
- C – Requisitos de disponibilidade de dados complementares;
- D – Grau de agregação e generalização do modelo;
- E – Compartilhamento de expertise e esforço;
- F – Complexidade da topologia multiuso dos reservatórios das hidrelétricas e gestão;

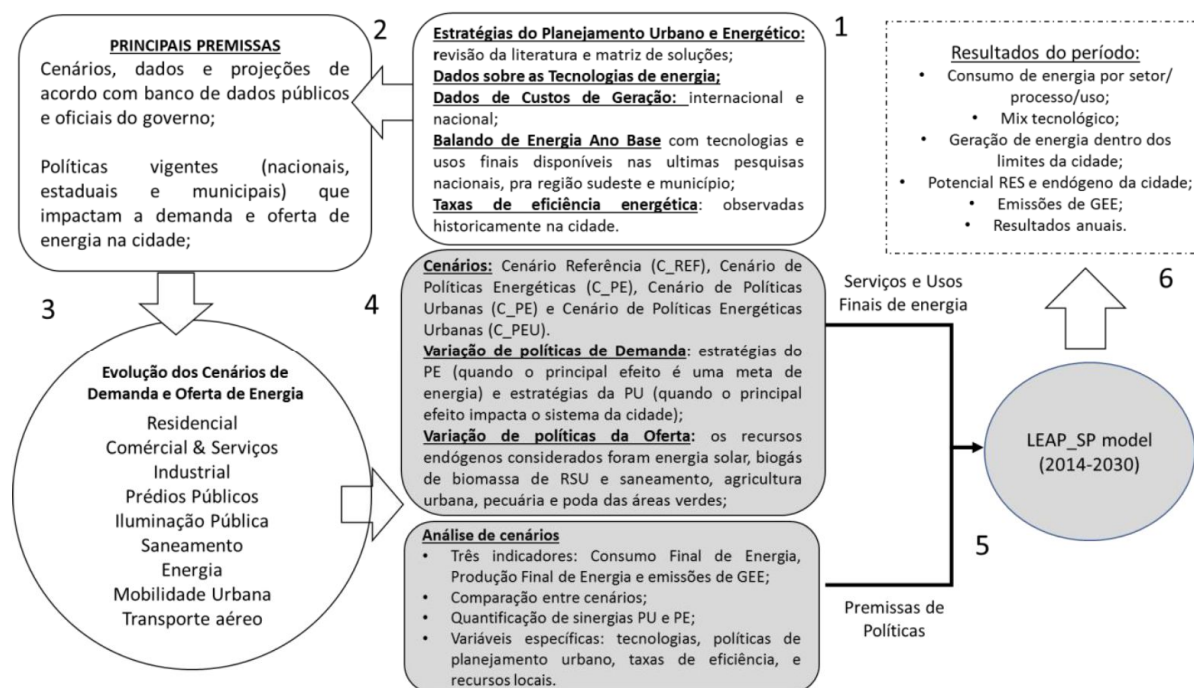
G – Acompanhamento das mudanças das características de infraestrutura e tecnologia;

H – Incertezas sobre o futuro da água e da energia.

Collaço *et al.* (2019a) aplicaram o modelo LEAP para estudar o sistema de energia atual e futuro da cidade de São Paulo para o período de 2014 a 2030. O trabalho apresentado neste artigo mostra que os autores exploraram as possibilidades para o aumento dos recursos endógenos e renováveis de energia, de maneira a reduzir a dependência da importação de energia e a emissão de GEE. Este estudo considerou sete cenários para a projeção da demanda de energia multissetorial integrada. O modelo LEAP para a cidade de São Paulo é mostrado a seguir na Figura 3.5, contendo a sequência e o fluxo de condução da análise.

São mostrados neste esquema as principais suposições do modelo que influenciam diretamente a demanda e a evolução dos cenários de suprimento de energia, as premissas adotadas, os parâmetros e considerações, de acordo com a literatura consultada. Também foi levada em conta a coleta de dados sobre tecnologias de energia atuais e futuras, eficiência energética e demais informações sobre energia para a cidade no ano-base.

Figura 3.5: Modelo LEAP para São Paulo (Brasil)



Fonte: Adaptado de Collaço *et al.* (2019a)

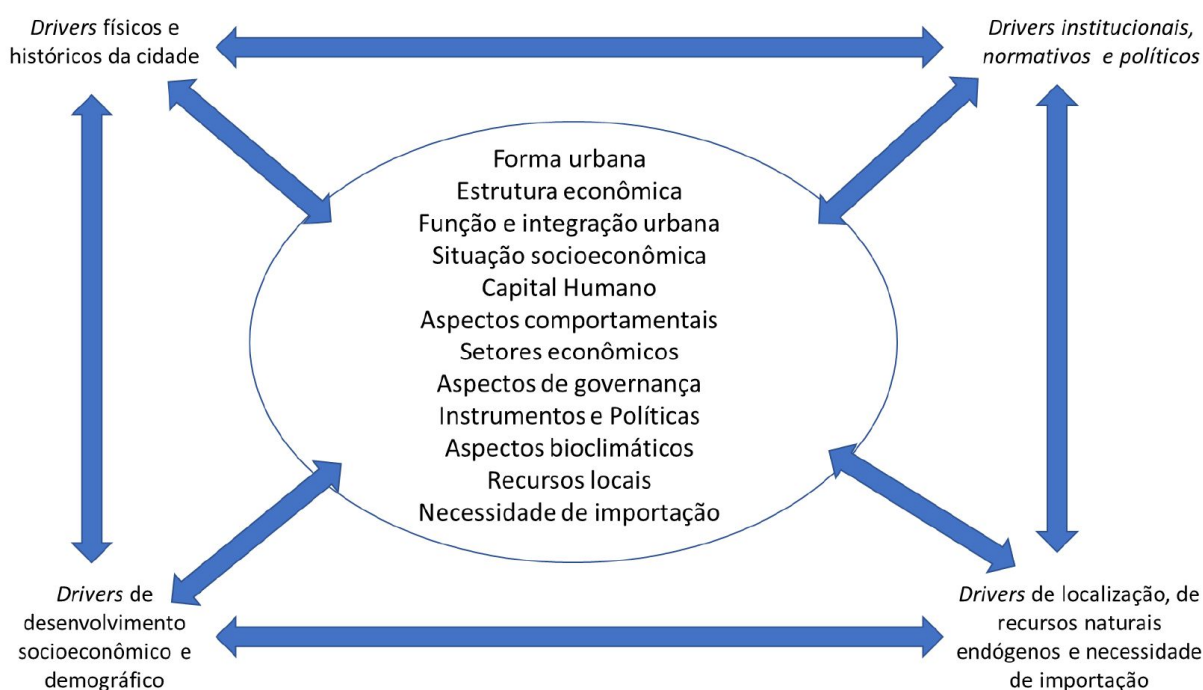
O objetivo deste estudo foi investigar a demanda e o suprimento no sistema urbano de energia da cidade de São Paulo, de modo a permitir o rastreamento energético detalhado de uma megacidade, particularmente seu potencial endógeno, sabendo-se que o recurso energético endógeno neste trabalho refere-se a recursos energéticos disponíveis dentro do perímetro da megacidade e que inclui, energia solar, eólica, biomassa, hidráulica, resíduos e calor industrial.

O estudo mostrou que a transição para a sustentabilidade energética da megacidade que acompanhe a melhoria de vida de seus residentes é tecnicamente viável, porém, necessita de novos estudos para garantir a viabilidade econômica, legal, política e social, sob o ponto de vista da governança. Para alcançar o objetivo de redução efetiva do consumo e da dependência de recursos de energia exógena nas megacidades, não basta atuar apenas nas políticas de eficiência energética e na substituição tecnológica de equipamentos. É preciso focar na análise do potencial de conservação de energia num planejamento integrado urbano e energético.

Ainda com a atenção voltada para as cidades e o espaço urbano, Collaço *et al.* (2019b) propuseram neste trabalho um novo método para a avaliação de soluções integradas de energia e planejamento urbano da cidade de São Paulo, ao modelar e quantificar o impacto das estratégias em termos de economia da energia, a redução da emissão de GEE, o aumento da distribuição de energia renovável nas cidades e geração local de energia. Os autores propuseram um método que promove um sistema energético urbano sustentável a partir da economia de energia e aumento dos sistemas locais renováveis de energia, levando a menores emissões de GEE.

Este sistema energético urbano pode ser considerado uma teia complexa de interações com inúmeras causas e efeitos que se articulam. A proposta de soluções integradas para as estratégias de planejamento urbano e de energia segue o esquema da Figura 3.6.

Figura 3.6: Direcionadores do uso urbano de energia e os parâmetros de influência



Fonte: Adaptado de Collaço *et al.* (2019b)

Como resultado, os autores concluíram que, ao usar a abordagem tradicional para o planejamento energético é possível atingir 2% de economia de energia na situação atual, redução de 18% de GEE e um aumento de três vezes na implantação de energias renováveis. Ao aplicar apenas as estratégias de planejamento urbano, é possível alcançar 10% de economia de energia, 8% na redução de GEE e uma vez de aumento na implantação de energias renováveis. Ao adotar uma abordagem holística, integrar as políticas energéticas e de planejamento urbano, observa-se uma economia de energia de 12%, 30% de redução de GEE e um aumento de quatro vezes na geração de energia elétrica renovável, local e distribuída.

O “conceito de nexos” e as ferramentas LEAP e WEAP também foram abordados no trabalho de Lin *et al.* (2019) ao estudarem a relação água-energia na cidade portuária chinesa de Xiamen. O desafio apontado pelos autores deste estudo está na enorme pressão sobre o meio ambiente e nos recursos, incluindo água e energia, devido ao crescimento populacional, especialmente nas áreas urbanas. Consideraram que a análise do nexo água-energia, via ferramenta computacional, era pouco explorada sob a perspectiva da demanda e menos ainda numa escala municipal.

Neste artigo, os autores apresentaram uma estrutura dinâmica, quantitativa e sinérgica para modelagem do nexo água-energia na escala urbana com base nos modelos LEAP e WEAP. A análise de cenários foi aplicada para examinar os impactos intersetoriais de diferentes escolhas de políticas futuras, incluindo mudanças na estrutura da indústria, conservação e alternativas de abastecimento de água e energia, tanto do lado da oferta quanto da demanda.

Este estudo de caso de Xiamen, China, sugere que a economia dos recursos água e energia estão mais no lado da oferta do que do lado da demanda, exceto para cenários de gerenciamento de demanda. Como a cidade importa muita energia (exógena) a maioria dos cenários estudados aponta para maiores efeitos de economia transfronteiriços. Os autores consideraram que para promover pesquisas mais comparáveis, os limites da pesquisa, incluindo escopos de pesquisa, processos, tipos e fontes de água, devem receber mais atenção em estudos futuros.

Além disso, os autores consideraram que apesar do método LEAP-WEAP ser flexível em requisitos de dados e estrutura de modelagem, é um modelo relativamente fraco na simulação de “*feedback*” em comparação com o modelo matemático *System Dynamic*. As incertezas da pesquisa têm origem, principalmente, nos parâmetros de intensidade (água para energia ou energia para água), que são extraídos da literatura ou estimados com base em relatórios de engenharia.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as modelagens desenvolvidas, bem como as bases de dados utilizadas, por meio das ferramentas LEAP e WEAP. Também será tratada a conexão entre estes dois programas para a simulação dos cenários considerados.

4.1 DEFINIÇÕES GERAIS

Trata-se de uma pesquisa prospectiva, por analisar as variações de certas características, ou parâmetros, por um longo período – anos – cujo sentido de condução da pesquisa é partir de determinado ano-base e fluir em direção ao futuro (FONTELLES, 2009).

Como visto, o problema de escassez das águas pode ser causado por vários motivos e a frequência de ocorrência, especialmente sua perspectiva futura de intensificação, trazem um alerta para as gerações.

Este trabalho consiste na modelagem da oferta e demanda de energia elétrica, utilizando dados construtivos das maiores usinas hidrelétricas situadas no Estado de Minas Gerais, bem como dados médios de vazão nestas usinas, de modo a estabelecer cenários de alterações do regime hídrico através de hipóteses de escassez hídrica, para posterior verificação de prováveis consequências na geração hidrelétrica no horizonte de estudo, estimar os impactos da emissão de GEE e identificar externalidades.

4.2 OS MODELOS WEAP E LEAP

Para a elaboração dessa pesquisa, foram definidos os modelos WEAP e LEAP, ambos desenvolvidos pelo *Stockholm Environment Institute* – SEI. Os resultados da geração hidrelétrica, com a criação das hipóteses e cenários, são obtidos no modelo WEAP. Os resultados das alterações da produção da energia de fonte hidrelétrica,

nestes cenários, serão enviados diretamente para o modelo LEAP, onde está a representação da oferta e demanda da matriz elétrica do Estado de Minas Gerais atual e onde será projetada a evolução futura da capacidade instalada.

A escolha destas ferramentas computacionais foi apoiada pelos seguintes motivos:

- Confiabilidade, amplitude técnica e científica baseados em trabalhos publicados;
- Disponibilidade de dados em quantidade suficiente para que os modelos funcionem adequadamente;
- Modelos conhecidos no meio acadêmico;
- Disponibilidade de material para instrução, incluindo fóruns de discussão internacional para esclarecimento de dúvidas e troca de experiências no *website* de cada programa.

A utilização dos modelos foi feita de acordo com o material disponibilizado na página³ *web* de cada modelo. No caso do WEAP, foram consultados:

- *TUTORIAL MODULES*: documento para consulta rápida;
- *USER GUIDE*: trata-se do Guia de Usuário, mais completo;
- Vídeos básicos do modelo.

³ www.weap21.org

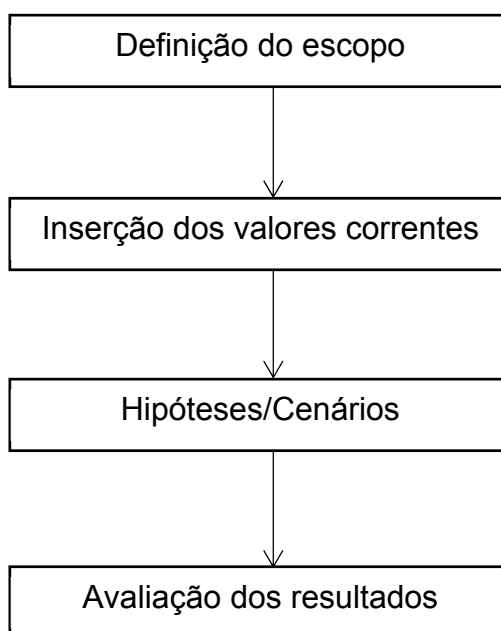
Para o modelo LEAP, foram consultados⁴ os materiais a seguir:

- *TRAINING EXERCISES*: trata-se de um conjunto de exercícios que exploram as principais utilizações do modelo;
- *GHG TRAINING EXERCISES*: trata-se dos exercícios da mitigação e análise dos GEE;
- *INTEGRATED WATER/ENERGY PLANNING TRAINING EXERCISES*: são exercícios para familiarização da interligação entre LEAP e WEAP.
- Vídeos básicos do modelo.

4.2.1 O MODELO WEAP

Geralmente as aplicações do modelo WEAP seguem as seguintes etapas (Figura 4.1):

Figura 4.1: Etapas para modelamento no WEAP



Fonte: Elaboração própria, 2019

⁴ <https://leap.sei.org/default.asp>

- Definição do escopo: definição do horizonte de estudo, dos limites espaciais, dos componentes do sistema e a configuração do problema a ser estudado;
- Valores correntes: levantamento do panorama da demanda de água, contendo, por exemplo, dados das cargas contaminantes, das fontes e dos recursos desenvolvidos para o sistema;
- Cenários: é possível explorar hipóteses acerca dos impactos futuros de políticas, clima, custos e outros, mediante a criação de cenários;
- Avaliação: os cenários estabelecidos na etapa anterior são avaliados conforme a disponibilidade de água, dos custos e benefícios compatíveis com os objetivos ambientais e a sensibilidade às incertezas das variáveis principais.

A criação das hipóteses em cenários configura o elemento fundamental para a modelagem de sistemas hídricos no WEAP. Desta maneira, muitas possibilidades podem ser avaliadas quando hipóteses baseadas no conceito “e se...” caracterizam determinado cenário, por exemplo, “o que ocorrerá no fornecimento de água para determinada região se os padrões de crescimento populacional e de desenvolvimento econômico mudarem?”, ou, “o que ocorrerá se medidas de conservação de água forem introduzidas em certo sistema?”, ou “o que ocorrerá se as mudanças climáticas alterarem a demanda e o suprimento de água?”.

Na modelagem realizada, as vinte e duas maiores usinas hidrelétricas em capacidade do Estado de Minas Gerais são representadas individualmente na interface gráfica do modelo WEAP, com base no Sistema de Informação Geográfica – SIG. Os dados técnicos da operação das usinas, reservatórios e demais dados são inseridos para a representação correta dos sistemas. Portanto, o modelo WEAP é usado, neste caso, para a investigação e teste das hipóteses da parte hídrica, utilizando a abordagem determinística.

As informações das usinas hidrelétricas geradas no modelo WEAP são compartilhadas no modelo LEAP via protocolo de conexão entre os modelos. Desta

maneira, é possível observar como os resultados da geração hidrelétrica do WEAP poderão afetar o despacho de eletricidade no modelo LEAP e identificar a expansão futura da geração e sua capacidade instalada em Minas Gerais.

4.2.1.1 BASE DE DADOS

Para a modelagem no WEAP, os seguintes dados de entrada podem ser necessários, conforme as aplicações desejadas pelo usuário:

- Reservatórios:

- Capacidade de armazenamento total;
- Volume inicial (quantidade de água armazenada);
- Curva de volume/elevação (relação entre o volume e a elevação do reservatório);
- Evaporação (taxa líquida mensal de evaporação: evaporação menos a precipitação na superfície do reservatório);
- “Perdas” de águas subterrâneas (infiltração do reservatório para águas subterrâneas).

- Operação:

- Máximo volume de água no reservatório;
- Máximo nível de segurança (abaixo deste nível as liberações de água serão restritas);
- Máximo nível de inatividade (volume do reservatório não disponível para alocação).

- Hidroeletricidade:

- Vazão máxima da turbina (em m^3/s);
- Elevação da água (nível máximo de água sobre a turbina);
- Fator de disponibilidade da planta (percentual de tempo ao mês do funcionamento da hidrelétrica);
- Eficiência de geração (razão entre a energia elétrica gerada e a energia hidráulica que entra no sistema);

- Cursos de água:
 - Séries históricas de vazão nos pontos das usinas hidrelétricas representadas no esquema.

- Clima:
 - Precipitação (séries históricas, média mensal);
 - Temperatura (séries históricas, média mensal).

No Anexo 1 estão os dados das usinas localizadas em Minas Gerais, fornecidos pela Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. No Apêndice A estão os dados médios das vazões utilizadas e obtidas do Operador Nacional do Sistema Elétrico-ONS. A forma de cálculo que o algoritmo do WEAP utiliza para a obtenção da energia elétrica produzida pode ser conferida no Guia do Usuário do WEAP⁵.

O modelo WEAP é construído segundo a descrição dos passos abaixo:

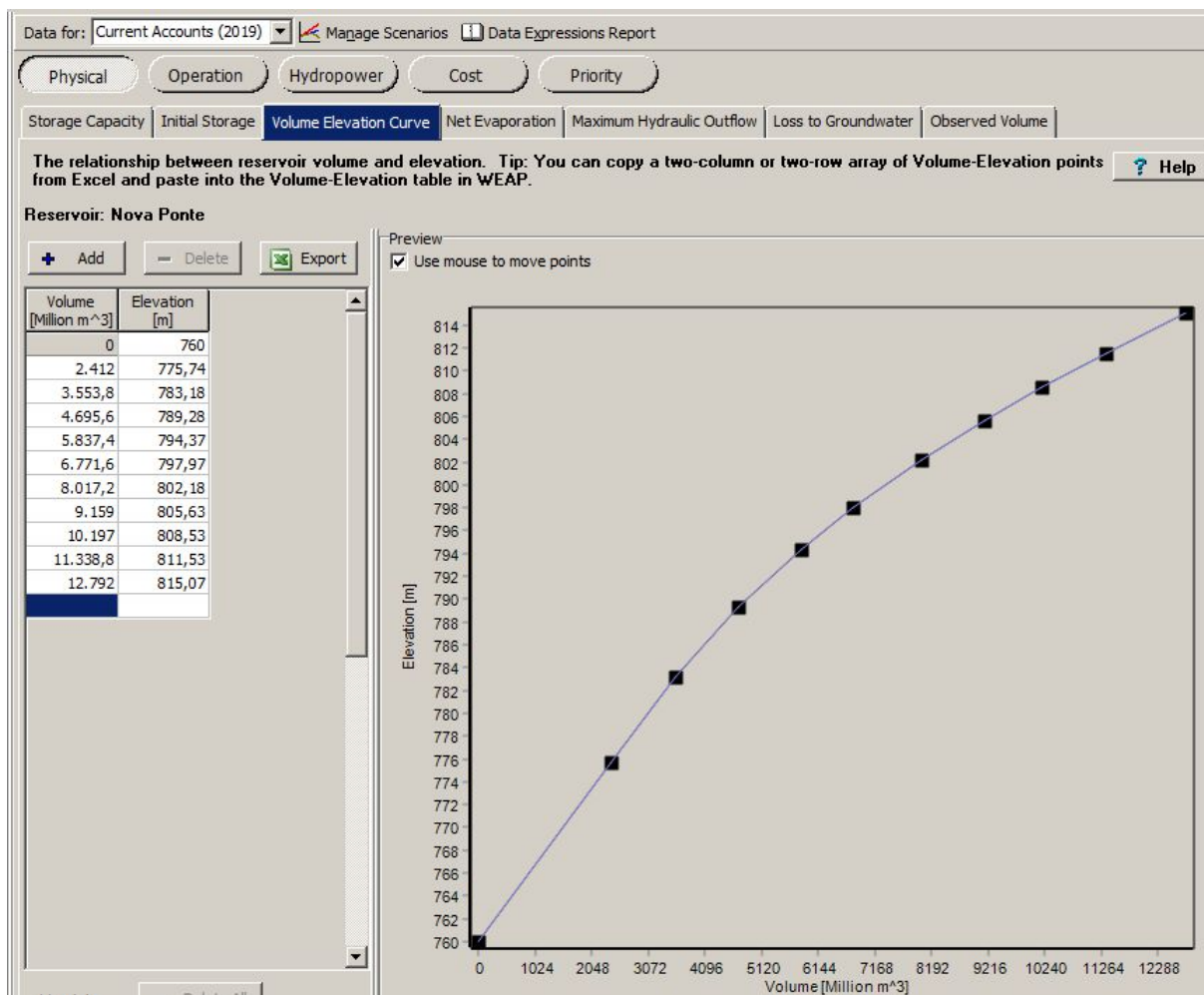
1 – Criação dos reservatórios/usinas: utilizam-se os recursos gráficos do próprio WEAP após a localização vetorial dada pelo arquivo SIG, conforme apresentado na Figura 4.2a;

2 – Entrada de dados físicos dos reservatórios/usinas é vista na Figura 4.2b. Observar a guia “*Physical*” ativada. Os dados utilizados são os que estão no Anexo 1.

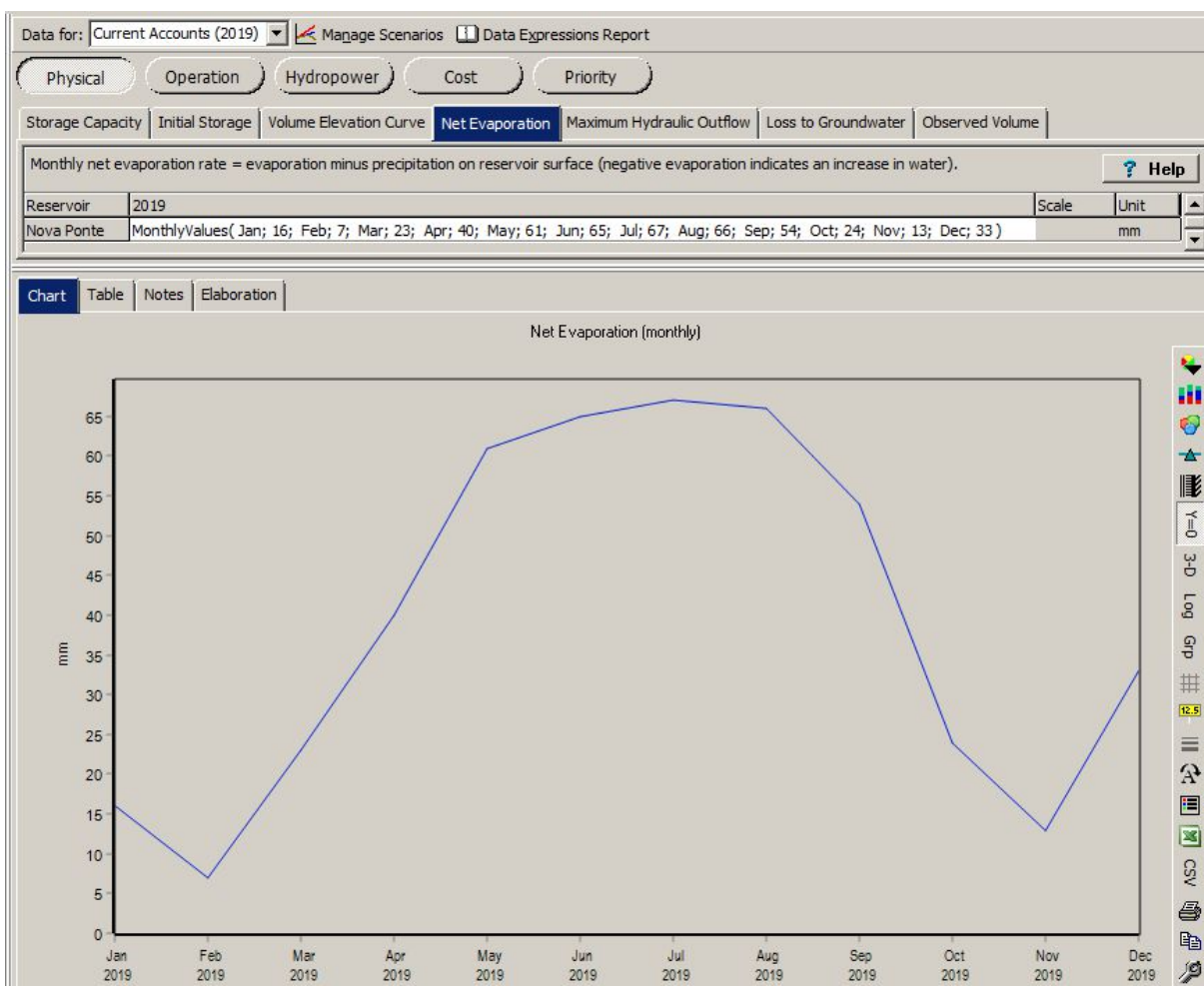
⁵ www.weap21.org

Figura 4.2: Entrada de dados físicos dos reservatórios/usinas no WEAP

(a)



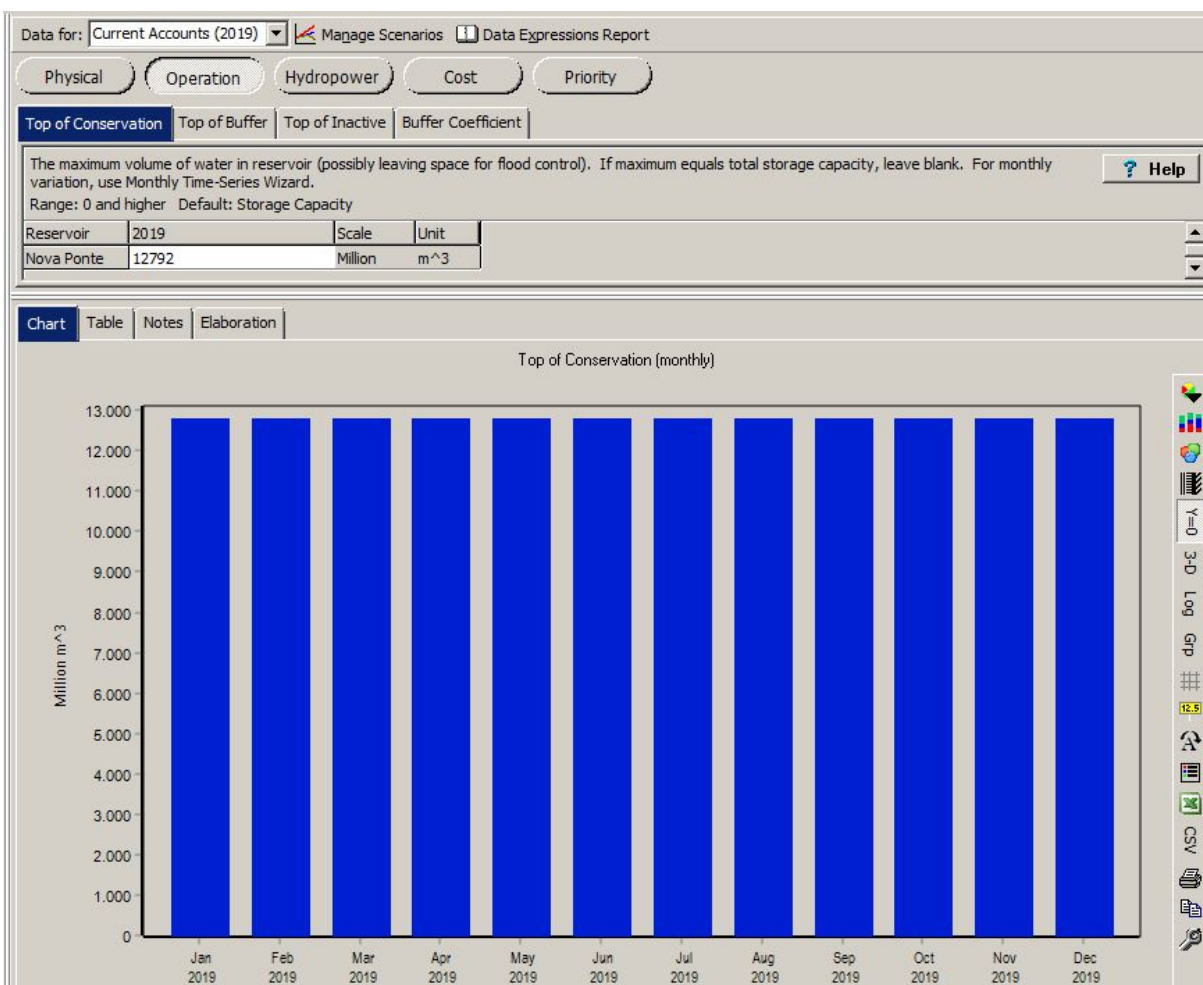
(b)



Fonte: Elaboração própria (WEAP)

3 – Em seguida, deve-se entrar com os dados de operação, conforme mostrado na Figura 4.3. A guia “Operation” está ativa neste caso.

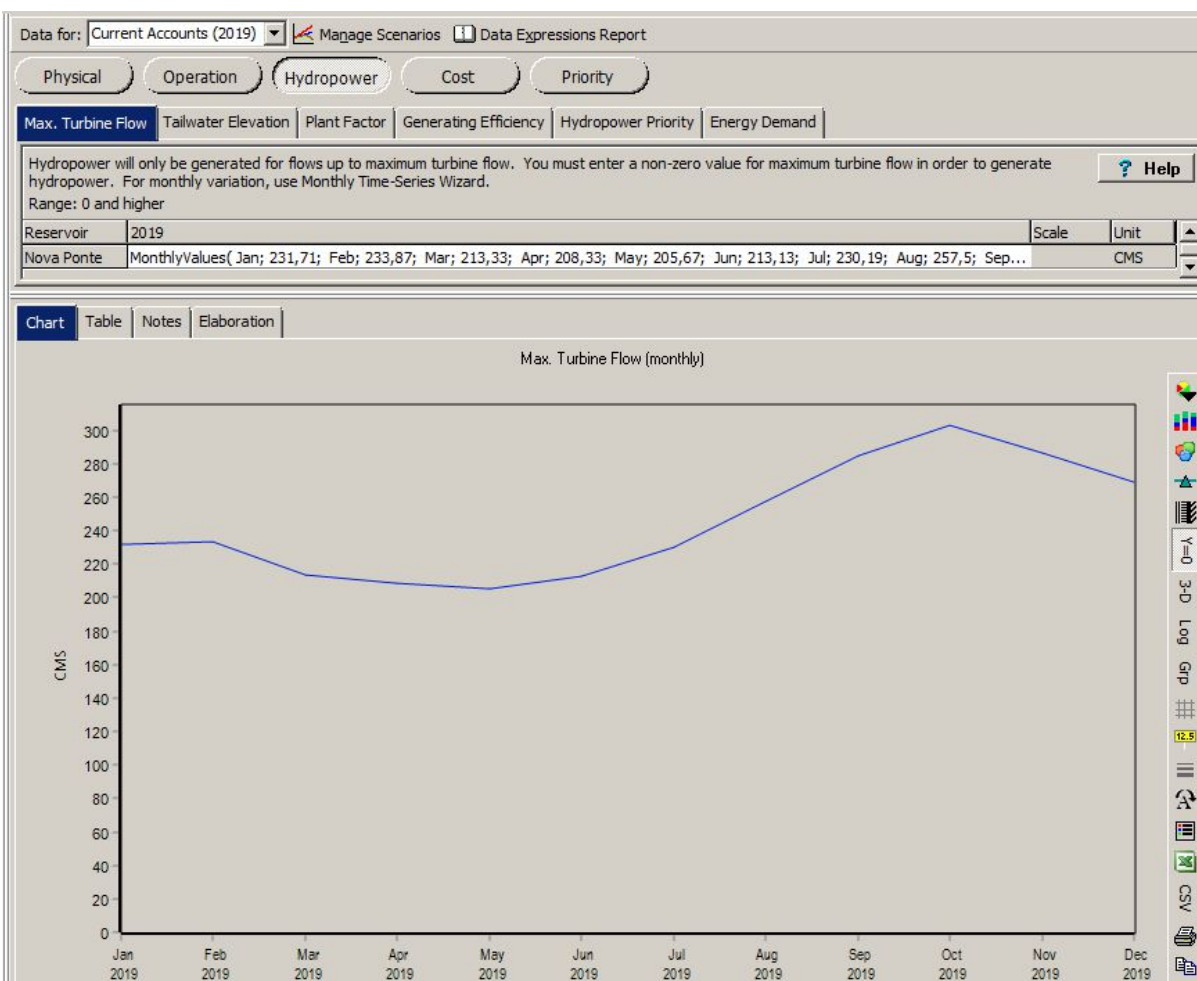
Figura 4.3: Entrada de dados de operação dos reservatórios/usinas no WEAP



Fonte: Elaboração própria (WEAP)

4 – O próximo passo é a entrada dos dados para a geração elétrica na guia “Hydropower” ativa, conforme mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4: Entrada de dados de geração elétrica dos reservatórios/usinas no WEAP



Fonte: Elaboração própria (WEAP)

O modelo WEAP será utilizado neste trabalho para simular a geração elétrica no horizonte de 2019 a 2049 das 22 maiores usinas hidrelétricas situadas no Estado de Minas Gerais, em abordagem determinística. Estas 22 usinas hidrelétricas a reservatório (UHE) mais representativas em termos de capacidade outorgada estão identificadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Usinas Hidrelétricas (UHE) selecionadas em Minas Gerais

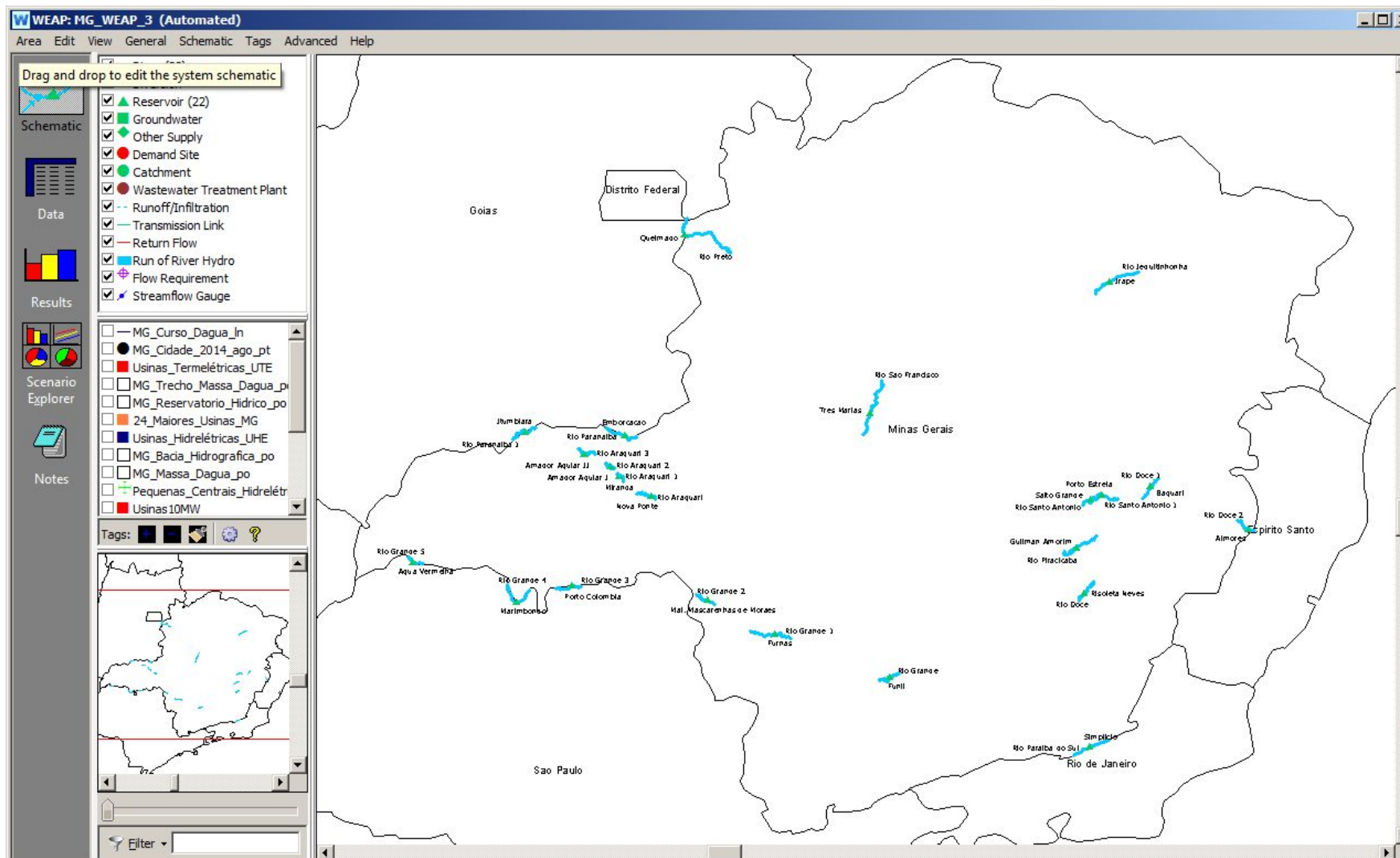
Usina	Início de Operação	Potência(kW) Outorgada
Itumbiara	24/04/1980	2.082.000
Marimbondo	25/10/1975	1.440.000
Água Vermelha (Antiga José Ermírio de Moraes)	22/08/1978	1.396.200
Furnas	04/09/1963	1.216.000
Emborcação	02/08/1982	1.192.000
Nova Ponte	01/01/1994	510.000
Marechal Mascarenhas de Moraes (Antiga Peixoto)	01/04/1957	492.100
Miranda	30/05/1998	408.000
Irapé	20/07/2006	399.000
Três Marias	01/01/1962	396.000
Simplício	05/06/2013	333.700
Aimorés	30/07/2005	330.000
Porto Colômbia	29/06/1973	320.000
Amador Aguiar I (Antiga Capim Branco I)	21/02/2006	243.675
Amador Aguiar II (Antiga Capim Branco II)	09/03/2007	210.000
Funil	30/12/2002	180.000
Baguari	09/09/2009	140.544
Guilman Amorim	02/11/1997	140.040
Risoleta Neves (Antiga Candonga)	07/09/2004	140.000
Porto Estrela	04/09/2001	112.000
Queimado	16/06/2004	105.450
Salto Grande	01/01/1956	102.000
	Total:	11.888.709

Fonte: ANEEL (2020)

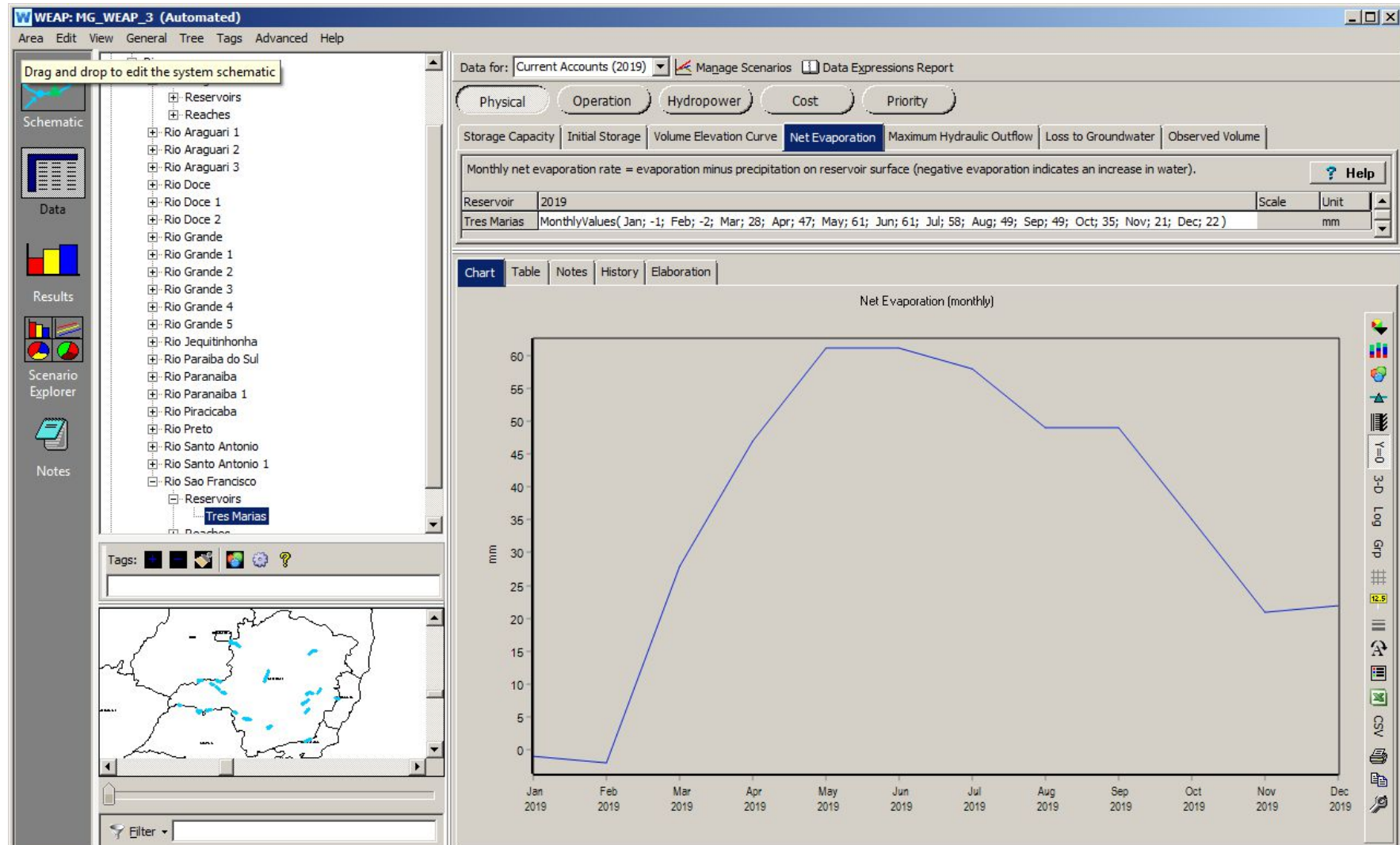
A tela típica do WEAP, na etapa de construção da modelagem das usinas hidrelétricas (*Schematic*) é apresentada na Figura 4.5. À esquerda da tela estão: os comandos para a construção dos elementos do sistema (*River, Diversion, Reservoir*, e outros); acesso aos componentes vetoriais dos dados SIG (caixa central em português); botões de telas (*Schematic, Data, Results, Scenario Explorer* e *Notes*) e, acima, está localizada a barra de comandos (*Area, Edit, View* e outros).

Na Figura 4.6 é apresentada a tela de entrada de dados, neste caso dados físicos do reservatório da usina hidrelétrica de Três Marias.

Figura 4.5: Tela Schematic do WEAP – Esquema Minas Gerais



Fonte: Elaboração própria (WEAP)

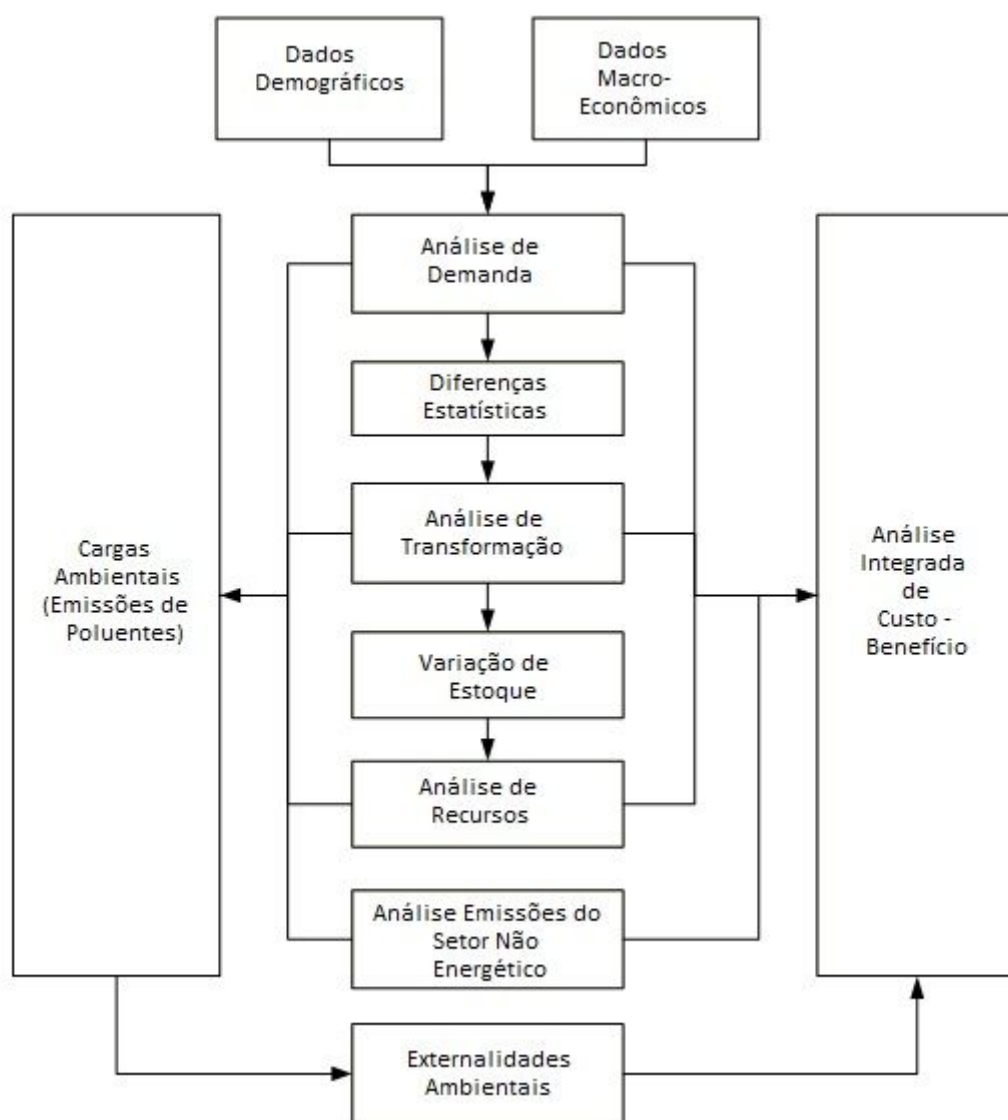
Figura 4.6: Tela *Data* do WEAP – Esquema Minas Gerais

Fonte: Elaboração própria (WEAP)

4.2.2 O MODELO LEAP

Na Figura 4.7 são apresentadas as etapas dos processamentos realizados no modelamento LEAP.

Figura 4.7: Estrutura do modelo LEAP



Fonte: LEAP, 2019

Cada aplicação do modelo LEAP requer uma estrutura de dados exclusiva, de maneira a representar fielmente o sistema em análise. O LEAP admite ampla gama de metodologias de projeção: pelo lado da demanda através das técnicas “*bottom-up*” (do específico para o amplo, ou seja, o estudo parte do nível mais desagregado, por exemplo, modelos técnico-paramétricos) ou “*top-down*” (do amplo para o específico, ou seja, o estudo parte do nível mais agregado, por exemplo, modelos econométricos, modelos de equilíbrio geral). Pelo lado da oferta, o modelo LEAP permite uma variedade de metodologias de contabilidade, simulação e otimização, suficientes para a modelagem, por exemplo, da geração no setor elétrico ou do planejamento de expansão da capacidade energética de um sistema.

A modelagem do LEAP opera em dois níveis conceituais básicos. Em um nível, os cálculos embutidos do LEAP lidam com as operações de contabilidade de energia, emissões e custo-benefício. No segundo nível, os usuários inserem expressões semelhantes às utilizadas em planilhas, que podem ser usadas para especificar dados variáveis no tempo ou para criar uma ampla variedade de modelos multivariados sofisticados, permitindo que abordagens econométricas e de simulação sejam incorporadas à estrutura contábil geral do LEAP.

As versões mais recentes do LEAP também suportam a otimização na modelagem, permitindo a construção de modelos de menor custo da capacidade de expansão e despacho do sistema elétrico, potencialmente sob várias restrições, como por exemplo, limites de CO₂ ou poluição do ar local (HEAPS, 2016). É possível realizar modelagens de sistemas locais, regionais ou nacionais de médio a longo prazo. A maioria de seus cálculos ocorre em um período anual, sendo que o horizonte do estudo pode se estender por um número ilimitado de anos, mas os valores típicos se situam entre 20 e 50 anos. O período definido neste trabalho é de 2019 a 2049, ou seja, 30 anos.

O LEAP é projetado em torno do conceito de análise de cenário. Os cenários são hipóteses de como um sistema de energia pode evoluir ao longo do tempo. Usando o LEAP, os analistas de políticas podem criar e avaliar cenários alternativos, comparando seus requisitos de energia, seus custos e benefícios sociais e seus impactos ambientais. O gerenciador de cenários do LEAP pode ser usado para

descrever medidas de políticas individuais que podem então, ser estruturadas em diferentes combinações e permutações em cenários integrados alternativos. Essa abordagem permite que os formuladores de políticas avaliem o impacto de uma política individual, bem como as interações que ocorrem quando várias políticas e medidas são combinadas. Por exemplo, os benefícios dos padrões de eficiência de eletrodomésticos combinados com um padrão de portfólio de energia renovável podem ser inferiores à soma dos benefícios das duas medidas consideradas separadamente.

O LEAP é estruturado como uma série de etapas de um sistema de energia. A principal, denominada "Análise", é o local em que os usuários criam estruturas de dados e cenários e inserem todos os dados, quer sejam históricos ou cenários prospectivos. Na etapa "Análise", uma árvore hierárquica exibe a estrutura de dados principal. A árvore oferece uma grande flexibilidade na forma como um sistema é modelado. Por exemplo, um modelo de demanda pode ser altamente desagregado em um setor onde uma análise detalhada baseada em tecnologia é necessária, mas muito mais agregada em setores onde o uso de energia é menos importante ou menos compreendido.

O LEAP também suporta análises multirregionais, nas quais diferentes estruturas de dados podem ser criadas para cada região. Por exemplo, alguns países podem ser descritos com mais detalhes onde os dados estão disponíveis ou onde questões importantes precisam ser abordadas.

4.2.2.1 BASE DE DADOS

Para o modelamento no LEAP, conforme consta no documento "*Data Requirements for Energy Planning and Mitigation Assessment*" (LEAP), podem ser necessários os seguintes dados, dependendo da aplicação desejada pelo usuário:

- Dados demográficos:

- População;

- Taxa de urbanização;
 - Média de habitantes por moradia.
- Dados econômicos:
- Produto interno bruto – PIB;
 - Valor adicionado por setor/subsetor;
 - Níveis médios de rendimento;
 - Taxa de juros;
 - Taxa de inflação.
- Dados gerais de energia:
- Dados que constam do balanço energético como produção e consumo, por setor;
 - Políticas e planos nacionais de energia;
 - Relatórios estatísticos anuais para cada energético, emissões, e outros.
- Dados de demanda:
- Na análise de demanda, o LEAP prevê o consumo futuro de energia como produto de dois fatores: níveis de atividade (medida da atividade de um setor, por exemplo, número de casas, toneladas de cimento, e outros) e intensidades de energia.
 - Dados de intensidade de energia são difíceis de obter. É possível combinar os dados de nível de atividade energia com estatísticas de consumo de energia para calcular os valores históricos de intensidade de energia por setor e por fonte, assim:
$$\text{Intensidade Energética} = (\text{Consumo total de energia}) / (\text{Nível de atividade})$$

Para os cenários prospectivos, o LEAP calcula o consumo total de energia projetando a intensidade de energia e o nível de atividade, ou seja:
$$\text{Consumo total de energia} = (\text{Intensidade energética}) \times (\text{Nível de atividade})$$

- Fontes de dados a partir de pesquisas de consumo nos diversos setores da economia, bem como dados sobre a venda de combustíveis (eletricidade, gás natural, derivados de petróleo). Preferencialmente, obter dados desagregados por setor e por categoria de consumidor.

- Dados da Transformação: de maneira geral, uma análise de transformação requer um quadro completo de como a energia é extraída, convertida e transportada no sistema de energia. Isso requer dados sobre os fluxos de energia dentro e fora dos principais processos, bem como informações sobre a eficiência, custos (capital, operação e manutenção e de combustível) e as cargas ambientais associadas a cada processo principal.

- Setor elétrico: dados que descrevem o histórico, as capacidades instaladas (MW), eficiências, custos (capital, operação e manutenção e de combustível) e despacho (MWh) dos vários tipos de usinas geradoras, fator de carga sazonal, máxima disponibilidade e prioridade de despacho de cada usina, planos de expansão de capacidade, perdas de transmissão e distribuição;
- Refinaria de Petróleo: caso exista no estudo, é necessário coletar dados dos diferentes produtos produzidos, a eficiência e a capacidade da refinaria;
- Setores de extração: se setores de extração como mineração de carvão mineral ou produção de petróleo e gás são importantes, são necessários dados que descrevam a eficiência e a capacidade desses setores, bem como informações sobre os combustíveis produzidos e a energia consumida durante a extração;
- Fontes Renováveis: a energia renovável está se tornando cada vez mais importante em muitos países e pode ser um foco importante de qualquer análise de mitigação de GEE. Coletar dados descrevendo as atuais capacidades instaladas, eficiências, custos e planos de expansão para quaisquer renováveis relevantes, como eólica, geotérmica, resíduos sólidos urbanos, solar e outros.
- Biomassa: se a madeira ou outros combustíveis de biomassa são importantes, tentar coletar quaisquer que sejam os dados disponíveis sobre o consumo e a

produção desses combustíveis. Os levantamentos sobre a madeira podem ser uma importante fonte de dados para estimar a sustentabilidade da produção de combustíveis de madeira.

- Outros Setores: outros setores de conversão que podem ser importantes incluem a produção de carvão vegetal, produção de etanol e produção de combustível sintético a partir do carvão mineral.

- Dados ambientais: para uma primeira avaliação de mitigação de GEE, estão incluídos no LEAP os fatores básicos de emissão “TIER 1”, que é a denominação do nível (camada 1) de complexidade metodológica mais simples utilizado pelo IPCC, quando não há disponibilidade do fator de emissão específico do objeto estudado; esta metodologia permite a realização de estimativas. No entanto, ao refinar a análise, é possível coletar fatores de emissão locais que reflitam as características de combustível e tecnologia dos dispositivos usados. É importante ter dados sobre a composição química dos combustíveis usados localmente, pois isso pode ser usado para refinar as estimativas dos fatores de emissão de diferentes dispositivos. Neste caso, a complexidade metodológica evolui para “TIER 2” ou “TIER 3”.

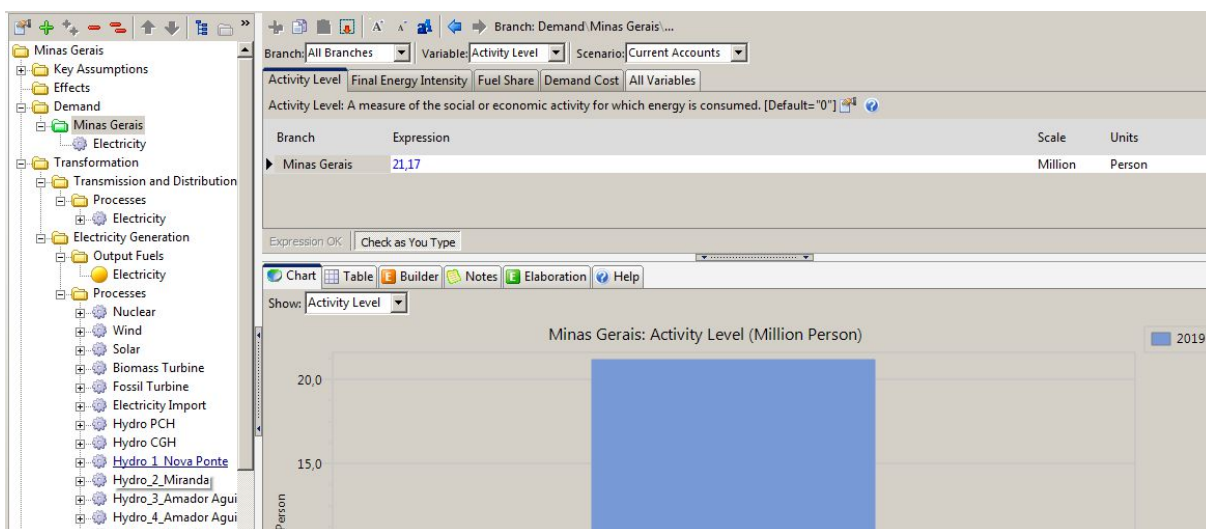
- Dados de combustíveis: o LEAP inclui uma lista padrão de combustíveis e suas características (conteúdo energético, composição química), que deve atender às necessidades da maioria dos estudos. No entanto, é relevante ajustar o conteúdo de energia, carbono e enxofre nesta lista para refletir as características dos combustíveis usados localmente. Em particular, as características dos combustíveis de carvão mineral e biomassa variam muito entre (e mesmo dentro) os países. Além das características físicas, são necessários os custos de produção de quaisquer combustíveis primários produzidos no país e os custos de importação e exportação de quaisquer combustíveis relevantes.

Os dados necessários ao modelo LEAP foram obtidos do 33º BEEMG, CEMIG (2018), IBGE (2019), IEA-ETSAP (2013), CEMIG (2019).

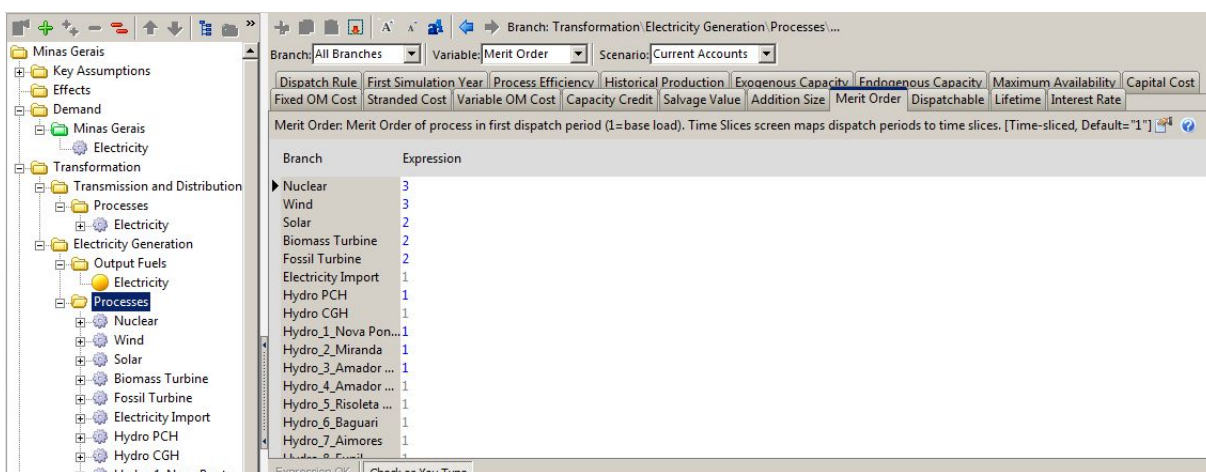
A seguir, na Figura 4.8, são mostradas duas telas distintas, a primeira com entrada de dados da demanda e a segunda com a entrada de dados da oferta de energia das diversas fontes.

Figura 4.8: Telas do LEAP: entrada de dados, demanda (a) e oferta de energia (b)

(a)



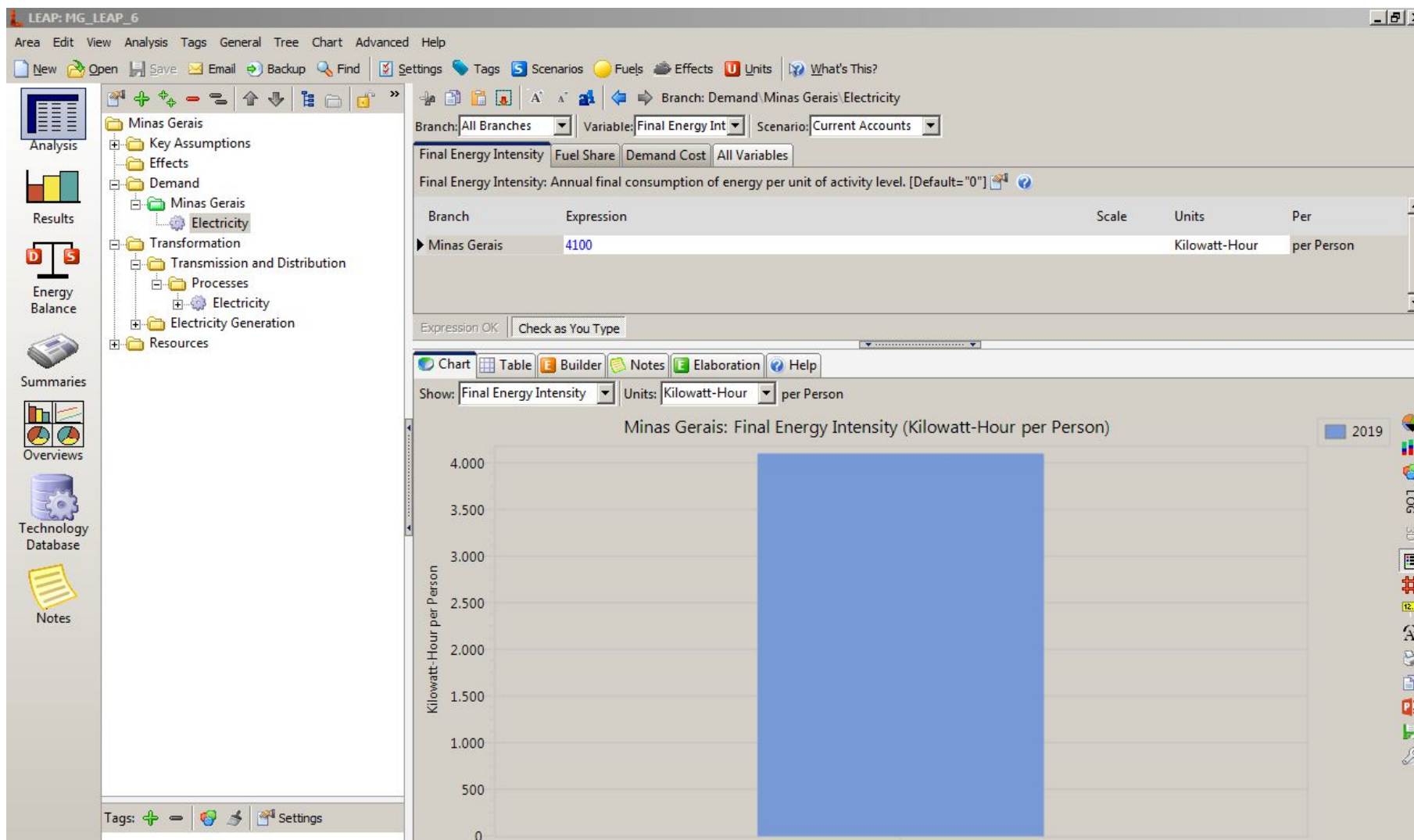
(b)



Fonte: Elaboração própria (LEAP)

Como exemplo, pode-se observar na Figura 4.9 a tela ativa da etapa “Análise” para a entrada de dados, especificamente, para “*Activity Level*” na qual dados socioeconômicos relacionados ao consumo de energia são introduzidos no modelo.

Figura 4.9: Tela do LEAP; etapa “Análise” ativa



Fonte: Elaboração própria (LEAP)

4.3 A CONEXÃO WEAP – LEAP

Os programas WEAP e LEAP são ferramentas muito próximas na concepção e operação. Ambos foram desenvolvidos no SEI - Stockholm Environment Institute, com mútua colaboração entre as equipes de desenvolvimento de cada programa e compartilham as seguintes características técnicas:

- Plataforma de “*software*” (Delphi);
- Terminologias estreitamente coordenadas;
- Interfaces de programação de aplicativos (APIs, na sigla em inglês) estreitamente integradas com base no *Windows Common Object Model* (COM, na sigla em inglês);
- Interfaces de usuário semelhantes para entrada de dados e relatórios;
- Adoção de mesma linguagem para a definição de dados, para a entrada de dados e na criação de modelos;
- Abordagens semelhantes e coordenadas, para a gestão de cenários.

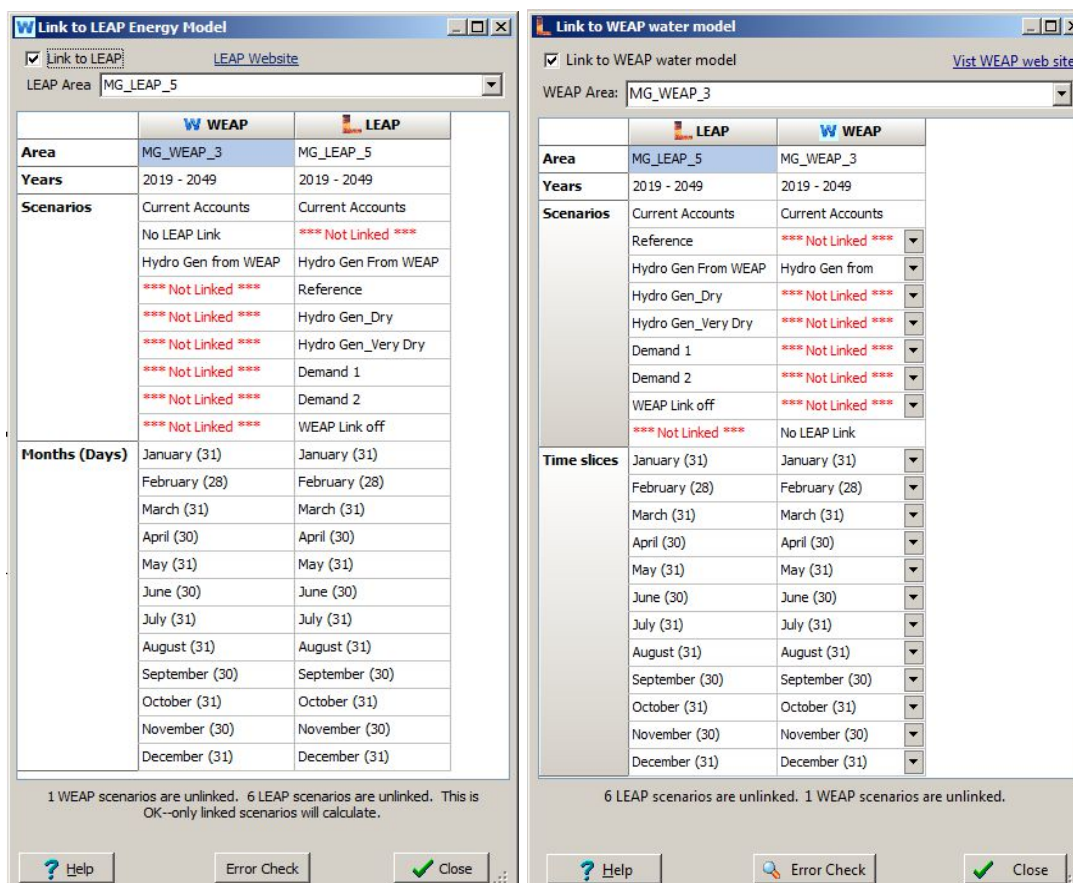
Para efetuar a conexão, é necessário acessar a guia “*Advanced*” na barra de ferramentas em ambos os programas:

- *Link to LEAP Energy Model* (se for no WEAP); ou,
- *Link to WEAP Water Model* (se for no LEAP).

Após a seleção dos modelos que serão conectados em cada programa, os dados de configuração que descrevem o modelo WEAP serão lidos pelo LEAP, a partir das escolhas dos elementos que serão mapeados entre eles. Um botão de verificação de erro possibilita verificar eventuais problemas na conexão.

Desta forma, é possível visualizar as respectivas telas como estão na Figura 4.10.

Figura 4.10: Telas de conexão entre o WEAP e LEAP



Fonte: Elaboração própria (LEAP e WEAP)

Existem quatro restrições que se aplicam à conexão entre os modelos:

- 1- Ambos os modelos devem ter o mesmo ano-base e horizonte de estudo;
- 2- No LEAP, deve existir apenas um ano especificado para a entrada de dados no modo *Current Accounts*;
- 3- O modelo LEAP deve ter apenas uma única região;
- 4- LEAP e WEAP devem ter exata correspondência quanto ao fatiamento do tempo (*time slices*) e, normalmente, deve ser mensal.

CAPÍTULO 5 – CENÁRIOS WEAP-LEAP PARA O NEXO ÁGUA-ENERGIA EM MINAS GERAIS

Neste capítulo são apresentadas: a construção dos modelos, a entrada de dados e as definições dos cenários estudados. Foram utilizados dados de vinte e duas usinas hidrelétricas no Estado de Minas Gerais que representam mais de 90% da capacidade das UHE instaladas. Como descrito no capítulo anterior, dados hídricos (histórico de 20 anos do ONS) e construtivos das usinas são inseridos no modelo WEAP de maneira a executar os cálculos da geração hidrelétrica.

Em seguida estas informações da geração elétrica são transferidas para o LEAP através do recurso “*Link to LEAP Energy Model*” como conexão entre os modelos. No modelo LEAP são definidas questões energéticas, a demanda de energia no horizonte de estudo e as fontes concorrentes da geração de eletricidade que atenderão esta demanda.

5.1 CENÁRIOS

As modelagens têm a finalidade de investigar e quantificar o comportamento da geração hidrelétrica das usinas situadas no Estado de Minas Gerais, conforme definição das premissas, bem como apontar as necessidades da expansão da capacidade de geração do sistema de fornecimento elétrico. Para tanto, cinco cenários foram estabelecidos, conforme mostrados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Definição dos cenários de estudo

Classificação	Cenário	Abreviatura	Premissas
Referência	<i>Hydro Gen From WEAP</i>	HGW	Sem políticas ou regulações (IE +1,0% a.a.)
Climático (vazão)	<i>Hydro Gen Dry</i>	HGD	Cenário seco (Vazão -0,5% a.a.)
Climático (vazão)	<i>Hydro Gen Very Dry</i>	HGVD	Cenário muito seco (vazão -1,0% a.a.)
Energético (IE)	<i>Demand 1</i>	D1	Crescimento econômico (IE +1,5% a.a.)
Energético (IE)	<i>Demand 2</i>	D2	Forte crescimento econômico (IE +2,0% a.a.)
IE = Intensidade Energética (kWh/habitante)			

HGW é o cenário de referência para os demais. Nesse cenário, os dados correntes das variáveis são inseridos com as informações do ano 2019. Não há, nesse cenário, previsão de alteração de parâmetros influenciados por políticas ou regulações. As médias mensais dos últimos 20 anos para a vazão afluente e turbinada apuradas do ONS, dados das usinas e as considerações para a demanda de energia são as informações necessárias para iniciar o estudo deste cenário.

A premissa de crescimento para a IE (kWh/habitante) está baseada no histórico registrado do BEEMG, desde o início da série em 1978 que, ao ser apurada, resulta em 2,97% a.a. até 2017. Desta maneira, para os cenários hídricos HGW, HGD e HGVD foi adotado o valor de 1% a.a. para este parâmetro, de maneira a manter um padrão conservador de crescimento em relação ao apurado (2,97% a.a.).

A falta de dados relacionados às influências efetivas das mudanças climáticas nos regimes de precipitação de curto prazo – curto prazo quando comparado aos períodos de estudos do IPCC (50, 70, 100 ou mais anos) – dificulta a correlação entre anos quentes e secos e a redução das vazões nos reservatórios das usinas. Desta forma, a condição *ceteris paribus* foi utilizada para verificar as alterações provocadas por diferentes estímulos nas vazões afluentes do sistema e também para quantificar a geração hidrelétrica. Assim, no primeiro cenário de restrição hídrica, HGD, para anos secos ao longo do estudo, foi definida uma redução média de 0,5% a.a. na vazão afluente das usinas hidrelétricas. Para uma sequência de anos muito secos foi criado o cenário HGVD, com a adoção do índice de 1,0% a.a. de restrição hídrica ao longo do estudo.

Os cenários energéticos definidos no LEAP foram criados para observar respostas para o crescimento da demanda sob diferentes estímulos e pressupõem o crescimento econômico refletido na intensidade energética – IE (kWh/habitante). O cenário D1 impõe um crescimento de 1,5% a.a. para este parâmetro e, no cenário D2, o índice de crescimento é de 2,0% a.a. Estes índices acompanham a premissa inicial para este parâmetro, adotada no cenário HGW, acrescidos de 0,5% e 1%, respectivamente, cenários D1 e D2, com a finalidade de quantificar a interferência nos valores da energia elétrica para a demanda e oferta.

5.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO WEAP

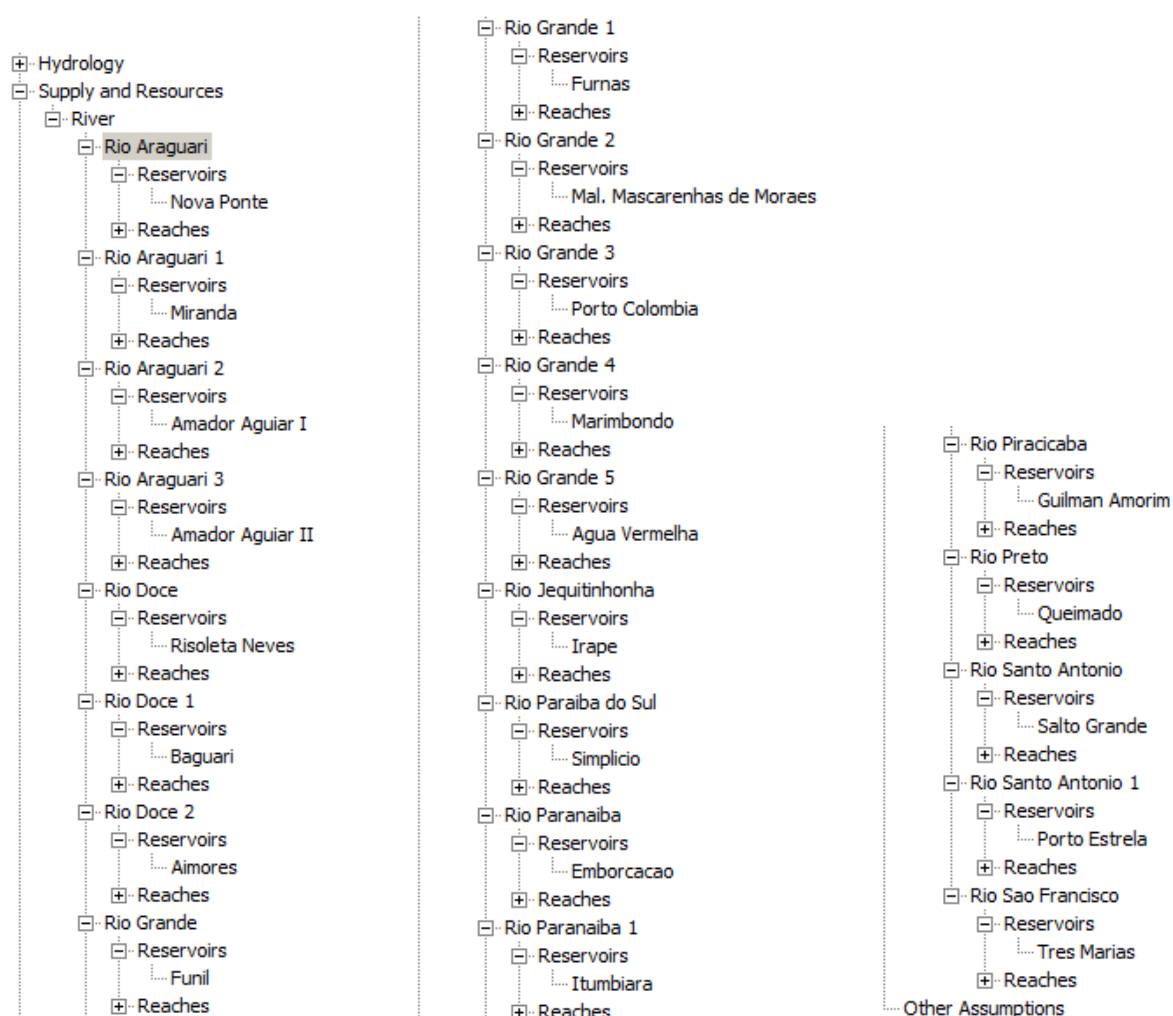
A construção do modelo WEAP parte da definição do esquema (*Schematic View*) no qual os objetos estudados são inseridos, utilizando o recurso incorporado ao programa para utilização de dados SIG – Sistema de Informação Geográfica.

Para este estudo, os dados vetoriais, geralmente arquivos no formato “*shapefile*”, foram obtidos do IEDE/MG – Infraestrutura de Dados Espaciais de Minas Gerais (IEDE, 2018) para a exata localização e o posicionamento de cada usina hidrelétrica no esquema.

Em seguida, utilizam-se os elementos construtivos do WEAP simbolizando as usinas, cursos de rios e outros, de modo a obter a visualização completa do esquema desejado.

O posicionamento das usinas deve ser respeitado quanto à sequência montante-jusante no leito do rio, o que também deve ser feito ao estabelecer o sentido do fluxo do mesmo. A estrutura em árvore das 22 usinas hidrelétricas inseridas no modelo WEAP é vista na Figura 5.1.

Figura 5.1: Estrutura do modelo MG_WEAP – Inserção das usinas hidrelétricas



Fonte WEAP (Sieber, 2020)

O próximo passo é a entrada de dados (*Data View*), para o ano base (*Current Accounts*), de todos os parâmetros necessários para a modelagem, conforme Anexo 1. Estes dados foram obtidos da CEMIG (CEMIG, 2019) e complementados pelo módulo *Hydrodata* (*software* livre) da *Hydrobyte Software* (CICOGNA (b), 2020).

Como bem explicado em seu trabalho, Cicogna (a) (2003) demonstrou a relevância do *Hydrodata* para os estudos da expansão do sistema elétrico ao trabalhar as características físicas das usinas hidrelétricas no planejamento da operação.

Para cada usina hidrelétrica foram necessários dados da vazão afluyente (m^3/s) e turbinada (m^3/s) – Apêndices A e B; dados físicos de capacidade do reservatório (10^6 m^3), capacidade inicial do reservatório (10^6 m^3), curva elevação (m) x volume (10^6 m^3) do reservatório e evaporação líquida mensal (mm) do reservatório; dados de operação dos limites do perfil da barragem como volume para controle de enchentes, volume efetivo para a operação da usina, volume morto do reservatório e dados para a geração de energia hidrelétrica tais como vazão turbinada (m^3/s), elevação (m) do canal de fuga do reservatório, fator de planta (percentual do tempo de funcionamento mensal da usina) e rendimento da geração de energia (%).

Os ajustes para a definição do horizonte de estudo, unidades empregadas e período das variações são realizados em “*General Parameters*”. Assim, foram feitos os seguintes ajustes:

- Horizonte de estudo: 2019 a 2049
- Ano base: 2019
- Primeiro ano da simulação: 2020
- Período das variações: mensal
- Unidades: Sistema Internacional

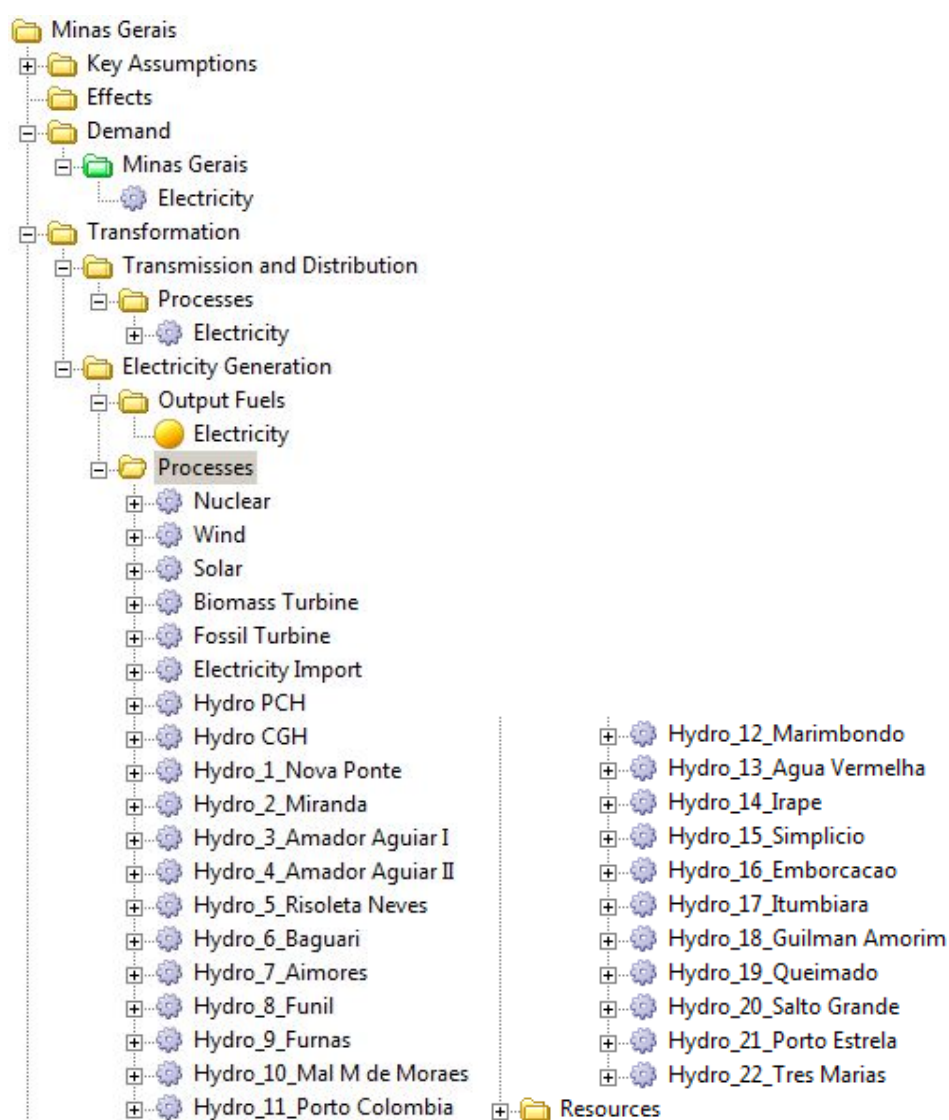
No Apêndice C estão os perfis da geração hidrelétrica modelada para todas as 22 usinas no ano-base 2019.

É necessário um esclarecimento a respeito dos dados do ano-base 2019. Os dados de vazão afluyente e turbinada contidos nos Apêndices A e B, dizem respeito à média de valores mensais desde o primeiro registro encontrado no ONS, ano 1999. Este procedimento busca evitar as interferências de precipitação pluviométrica ou que exista distanciamento das médias de chuvas caso somente os dados de 2019 forem inseridos no ano-base, tornando-o atípico para a produção de energia elétrica. Assim, trata-se de um planejamento determinístico, considerando os últimos 20 anos de ENA que o ONS registrou da operação.

5.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO LEAP

O LEAP também adota a organização da estrutura de árvore, tal como no WEAP, ao definir as pastas: suposições iniciais, demanda de energia e transformação. Os dados iniciais são definidos para o ano base (*Current Accounts*) e os ajustes iniciais são realizados na guia *General (Settings)*. Como apresentado na Figura 5.2, observa-se a estrutura de árvore e a divisão das pastas onde são estabelecidas as premissas, a demanda e a transformação.

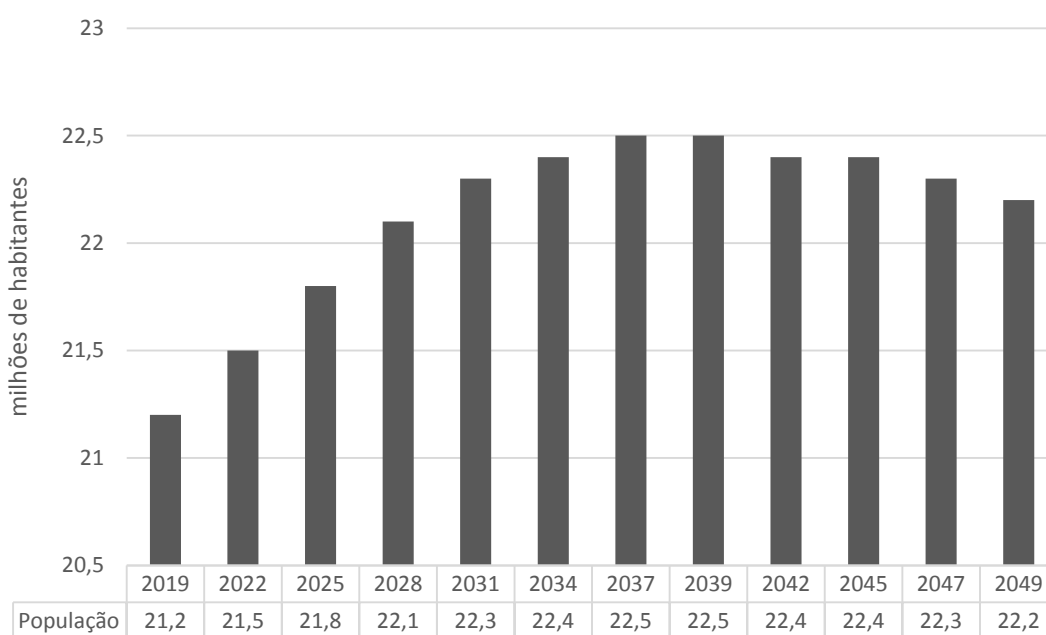
Figura 5.2: Estrutura do modelo MG_LEAP



A caracterização da demanda e das tecnologias de transformação é a próxima etapa da modelagem. Como apresentado na Figura 5.2, são inseridas todas as tecnologias em operação e as opções disponíveis para a expansão da capacidade instalada, considerando os custos de investimento, operação e manutenção, conforme ajuste desejado em determinado cenário. O algoritmo do modelo LEAP determina como ocorrerá a expansão ótima da capacidade instalada para o atendimento da demanda, baseando-se nos critérios de ordem de despacho, custos, capacidades e disponibilidades. Nesta modelagem, não houve restrições de emissão de CO₂.

Ao efetuar a entrada de dados para a demanda, o número de habitantes é um importante motivador para o crescimento dos setores econômicos. Por esse motivo, na elaboração do modelo LEAP neste caso particular, o parâmetro “*Activity Level*” é a projeção do número de habitantes do Estado de Minas Gerais para o horizonte de estudo. Observa-se a projeção da população de Minas Gerais na Figura 5.3, segundo dados do IBGE.

Figura 5.3: Projeção estimada da população – Minas Gerais



Fonte: IBGE, 2019

A intensidade energética – IE, é definida pelo consumo anual total de eletricidade, dividido pelo número de habitantes. Segundo dados da eletricidade do 33º BEEMG (CEMIG, 2018), série de 1978 a 2017 e fazendo a projeção linear até 2019, tem-se na Tabela 5.2 a evolução do consumo de eletricidade.

Tabela 5.2: Evolução do consumo de eletricidade (GWh) – Minas Gerais

Ano	1978	1986	1994	2002	2010	2014	2017	2018	2019
Balanco (GWh)	15.430	30.263	43.336	52.023	70.858	74.197	76.004	81.219	86.798

Fonte: Cemig, 2018.

Desta forma, obtém-se:

$$\text{Intensidade energética (2019)} = \frac{\text{balanço da eletricidade (2019)}}{n^{\circ} \text{ habitantes (2019)}}$$

$$\text{Intensidade energética (2019)} = \frac{86.798 \text{ GWh}}{21,17 \text{ milhões habitantes}} = 4.100 \text{ kWh/habitante}$$

Esta intensidade energética reflete a eletricidade destinada a todos os setores econômicos por habitante, no Estado de Minas Gerais.

A parametrização dos elementos da transformação requer a inserção dos seguintes dados:

- Custo de capital, custo de O&M, custo variável e taxa de juros;
- Eficiência das centrais elétricas;
- Regra e ordem de despacho de energia;
- Produção histórica;
- Tempo de vida da usina, em anos;
- Disponibilidade máxima de horas em cada período de despacho de energia;
- Capacidades endógena e exógena;

- Perdas, em %;
- Taxa de juros de 5%;
- Margem de reserva de 20%.

Neste trabalho foram utilizados parâmetros característicos das tecnologias de geração, obtidos do IEA/ETSAP (2013), conforme mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Parâmetros característicos das tecnologias de geração

Technology	Investment cost US\$/kW	Fixed cost US\$/kW	Variable cost US\$/GJ	Capacity Factor %	Efficiency %	Lifetime Years
Biogas	2449	50	1,8	85	40	25
Biomass Incineration	1905	13	0,5	66	35	25
Photovoltaics	1944	40	0	25	25	25
Photovoltaics Distributed	3000	40	0	32	25	25
Fuel Oil	1400	25	1,7	85	15	20
Hydro Large	2939	45	1	na	100	60
Hydro Small	3499	35	1	na	100	60
Hydro Strategic Large	2351	26	0	na	100	60
Natural Gas Combined Cycle	1260	20	2,5	85	57	30
Natural Gas Open Cycle	583	10	2,5	85	38	40
Nuclear (PLWR and PHWR)	7200	115	3,1	85	35	40
Wind on-shore	1620	36	0	31	100	30
na=not available						

Fonte: IEA/ETSAP (2013)

Não há previsão para a entrada de novas usinas hidrelétricas - UHE - no horizonte de estudo. Para as demais fontes, foram adotados índices de crescimento obtidos a partir das capacidades outorgadas, conforme dados SIGA – ANEEL (2020) e apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Capacidades das usinas em Minas Gerais

Fonte		Potência Outorgada (MW)	Potência Fiscalizada (MW)	Quantidade (Usinas)
CGH		178,332	169,576	167
EOL		0,156	0,156	1
PCH		1.025,658	758,426	83
UFV		4.709,563	533,822	120
UHE		12.576,941	12.595,660	53
UTE	Biomassa	2.060,419	1.681,219	81
	Fóssil	977,972	947,972	365
Total		21.529,041	16.686,831	870

Fonte: ANEEL, 2020

No entanto, no caso da energia fotovoltaica, a potência outorgada atual informada na ANEEL é de 4,71GW, sendo 533,8 MW a potência fiscalizada. É um recurso energético incipiente, de grande potencial de crescimento mas ainda de alto custo para implantação, fato que reforça a necessidade de políticas de incentivo para esta tecnologia. Para a projeção do índice de intensidade energética, adotou-se um percentual conservador em relação ao apurado no histórico da demanda de eletricidade total para o Estado de Minas Gerais – 1978 a 2017 (CEMIG, 2018).

Quanto ao índice projetado para a capacidade de importação de eletricidade para o Estado de Minas Gerais, há que se observar que também é um índice conservador, uma vez que a energia importada é proveniente do SIN – Sistema Interligado Nacional e depende da existência de infraestrutura para geração (fora de Minas Gerais) e transmissão, bem como disponibilidade de energia no sistema.

As projeções das capacidades exógenas das fontes de energia, da intensidade energética, a demanda e a oferta de energia inseridas no LEAP estão apresentadas na Tabela 5.5. Nesta tabela, a classificação “conforme outorga” significa que a

capacidade alcançada pela fonte energética, ao final do horizonte de estudo, é aquela que foi outorgada e informada no ano-base 2019.

Tabela 5.5: Índices de projeção das capacidades exógenas das fontes de energia

Fonte	Projeção adotada (2019-2049)	Observação	Motivo
UHE	na	não há previsão	na
PCH	1,01122% a.a.	conforme outorga	na
CGH	0,168% a.a.	conforme outorga	na
UFV	4% a.a.	pela outorga: 7,5% a.a.	conservador
UTE	Biomassa	0,68027% a.a.	conforme outorga
	Fóssil	0,10398% a.a.	conforme outorga
EE import	1,5% a.a.	pela série: 13,3% a.a.	conservador
IE	1% a.a.	pela série: 2,97% a.a.	conservador
LT=Linhas de Transmissão EE import=Energia Elétrica importada IE=Intensidade Energética na=não se aplica série: 1978 a 2017 (BEEMG)			

Fonte: Elaboração própria.

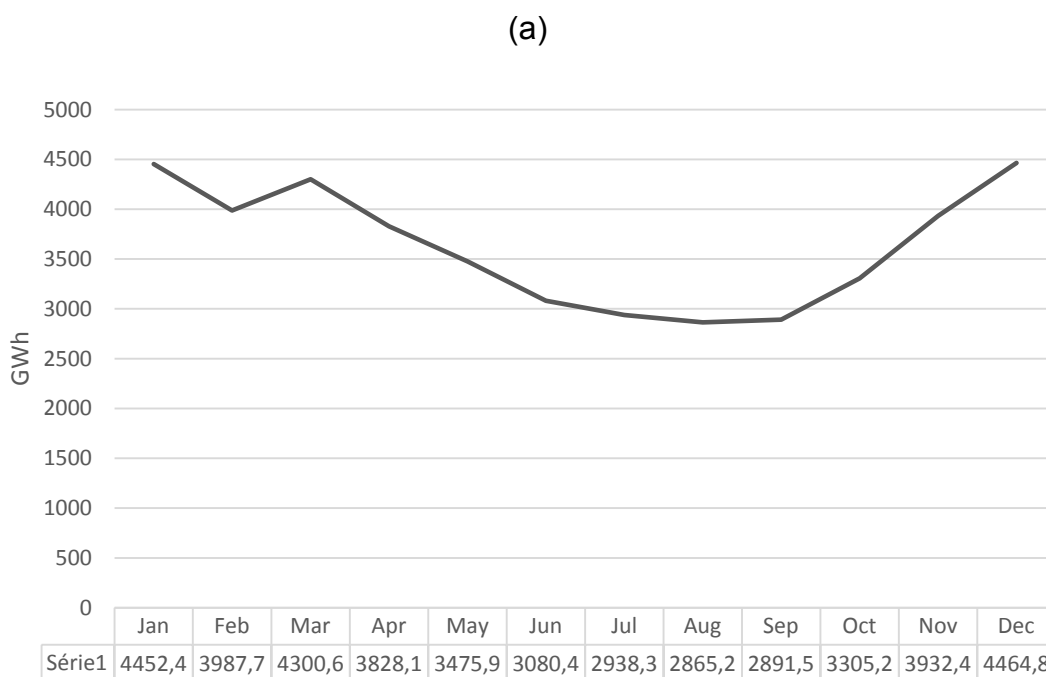
Em seguida, no capítulo 6, serão apresentados os principais resultados obtidos através das modelagens dos sistemas propostos nesta Tese.

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS

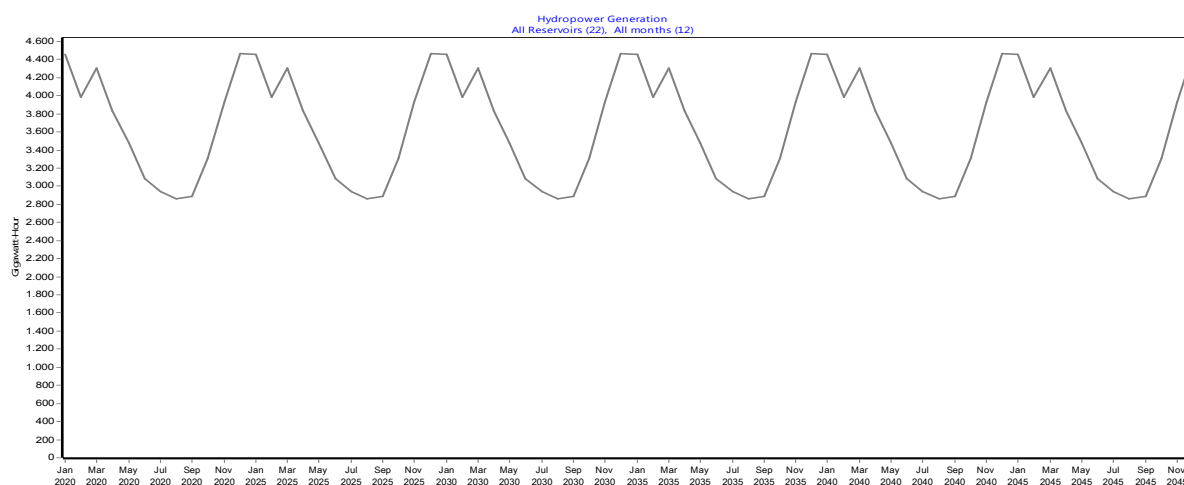
Neste capítulo são apresentados os dados das premissas assumidas e os resultados obtidos através das modelagens dos sistemas propostos.

A contribuição da energia hidrelétrica das UHE modelada no WEAP em 2019 segue a distribuição mensal vista na Figura 6.1, sendo 43.522 GWh a soma anual das usinas selecionadas. A diferença para o valor de 86.798 GWh em 2019, da Tabela 5.2, é oriunda das outras fontes de energia elétrica como, usinas térmicas a biomassa e fóssil, PCH, CGH, das usinas UHE restantes, energia fotovoltaica, saldo entre importação e exportação e perdas.

Figura 6.1: Geração hidrelétrica modelada no WEAP – ano-base 2019
(a) variação mensal; (b) variação anual no horizonte de estudo (5 em 5 anos)



(b)



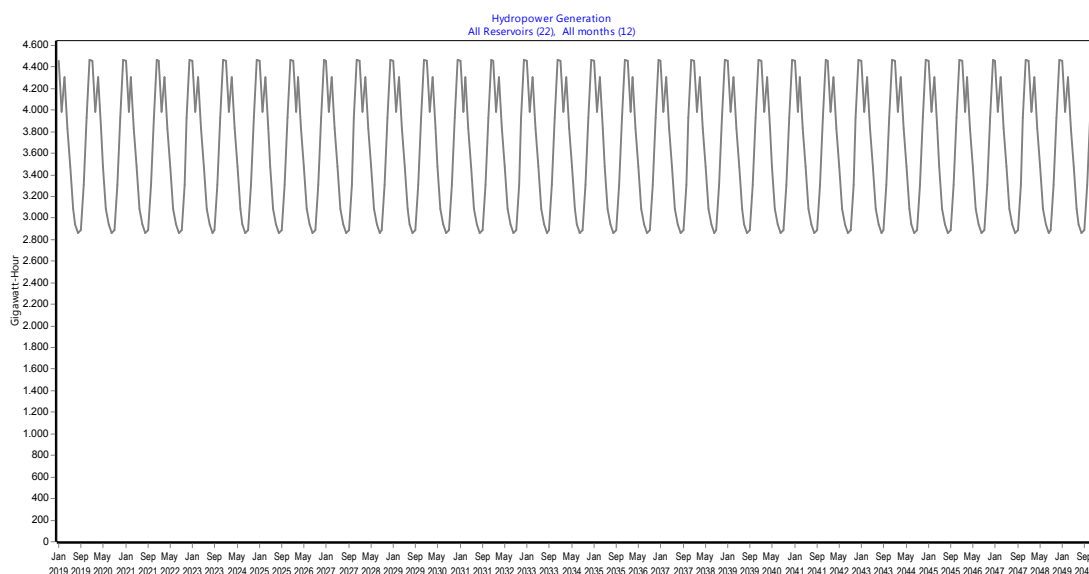
Fonte: WEAP (SIEBER, 2020)

O perfil da geração de energia hidrelétrica modelada no WEAP, e que nesta modelagem se repetirá em todos os anos no horizonte 2019-2049, está apresentado na Figura 6.2. O valor anual calculado para a geração elétrica para o cenário no ano-base, HGW, é 43,5 mil GWh, quando somado mês a mês.

O que se observa na Figura 6.2 é o padrão do comportamento da geração mês a mês somadas para todas as usinas modeladas. A redução observada entre os meses centrais do ano diz respeito à geração nos meses do chamado período seco, mais facilmente verificada na Figura 6.1(a), por ser a representação da geração mês a mês.

Para os cenários de restrição hídrica os valores anuais da geração de energia elétrica serão alterados conforme as premissas adotadas e indicadas na Tabela 5.1.

Figura 6.2: Geração hidrelétrica modelada - WEAP (2019 a 2049)

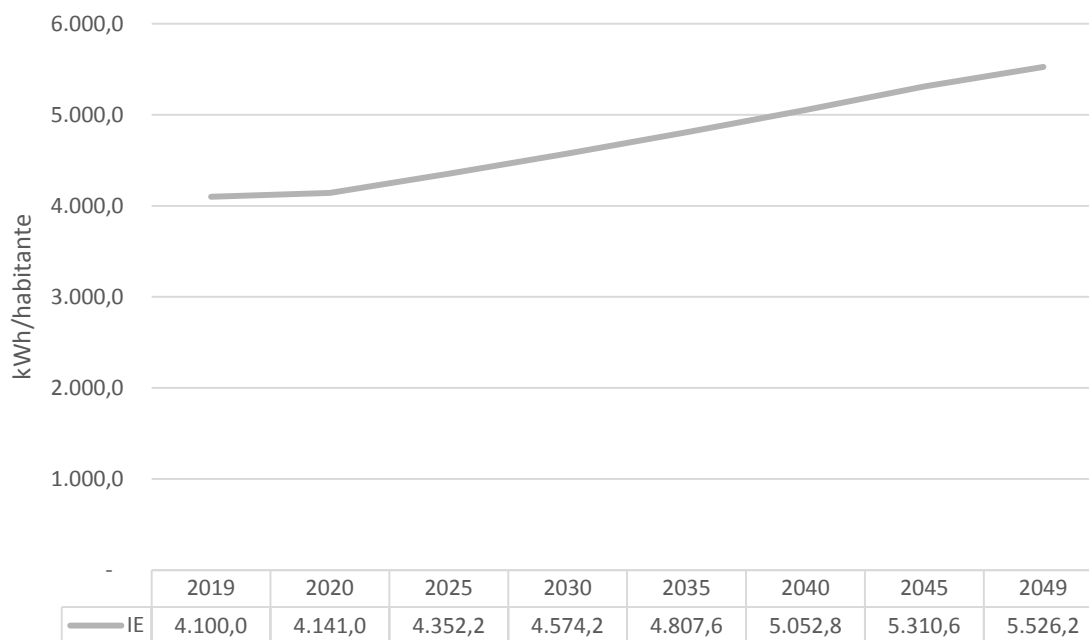


Fonte: WEAP (SIEBER, 2020)

O crescimento da IE para o cenário de referência HGW é mostrado na Figura 6.3, sendo de 4.100 kWh/habitante em 2019 até o final do período, quando alcançará 5.526 kWh/habitante em 2049, considerando que este índice é o consumo total de energia elétrica do Estado de Minas Gerais por habitante e concentra todos os setores econômicos.

O crescimento da IE será o mesmo observado no cenário HGW para os cenários de restrição hídrica HGD e HGVD.

Figura 6.3: Intensidade Energética – IE. Cenário HGW (2019 a 2049)

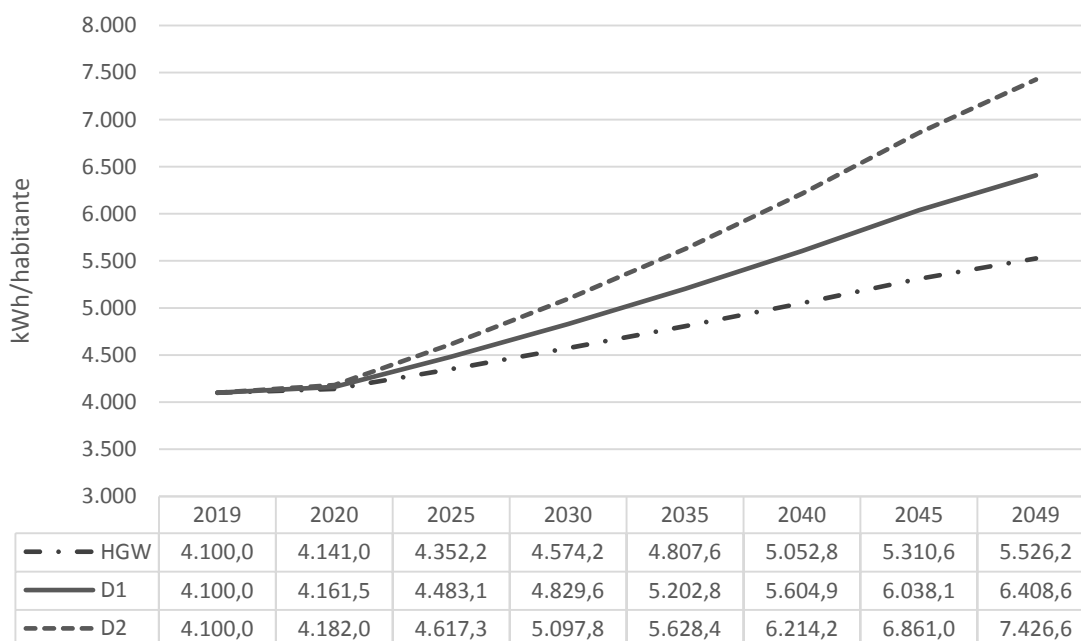


Fonte: Elaboração própria com uso do LEAP

Ao aplicar os índices do crescimento da IE para os cenários energéticos, observam-se na Figura 6.4 os resultados para o cenário de referência HGW, comparado aos cenários D1 e D2.

Ao final do período de estudo em 2049, o crescimento da IE nos cenários D1 e D2 serão superiores em relação ao cenário de referência HGW, de modo a retratar o crescimento da demanda de energia elétrica por habitante, de 1,5% a.a. em D1 e 2,0% a.a. em D2.

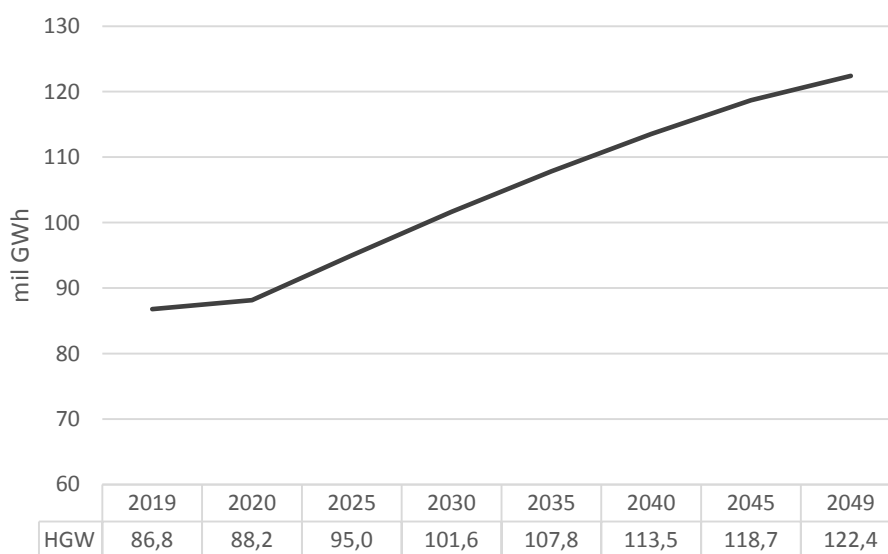
Figura 6.4: Intensidade Energética nos cenários energéticos, mil kWh/hab



Fonte: Elaboração própria com uso do LEAP

Na Figura 6.5 é apresentada a evolução da demanda final de energia elétrica para o cenário de referência HGW.

Figura 6.5: Demanda final de eletricidade no cenário HGW



Fonte: Elaboração própria com uso do LEAP

Até o momento foram apresentados as premissas da geração hidrelétrica proveniente do WEAP para o cenário de referência HGW, o nível de atividade – traduzido pelo crescimento da população - e as variações da IE no LEAP para todos os cenários.

A seguir, são apresentados resultados da demanda de energia elétrica, a participação por fonte energética, a evolução das capacidades das usinas que compõem a oferta de eletricidade e a estimativa da quantidade de CO_{2eq} emitido, para todos os cenários. Na Tabela 6.1 estão apresentados os resultados da geração de eletricidade por fonte energética para o cenário de referência HGW, em milhares de GWh.

Tabela 6.1: Geração de energia elétrica por fonte, em mil GWh, cenário HGW

Fonte	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2049
UFV	1,2	1,8	2,4	2,8	3,3	3,6	2,6	3,8
UTE biomassa	3,2	6,5	8,4	10,1	11,5	12,6	9,1	13,3
UTE fóssil	1,8	8,7	11,2	13,5	15,4	16,9	23,5	18,9
Eletricidade Import.	32,4	35,4	38,1	41,1	44,2	47,6	51,3	54,5
PCH	4,0	6,4	6,7	7,1	7,4	7,8	8,2	8,5
CGH	0,8	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
UHE	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5
Total (mil GWh):	86,9	103,7	111,8	119,6	126,9	133,6	139,6	144,0

Fonte: Elaboração própria com o uso do LEAP

Capacidades exógenas refletem a capacidade existente, bem como adições e/ou retiradas planejadas de capacidades. As capacidades exógenas em todos os cenários, em GW, são apresentadas na Tabela 6.2.

No cenário D2 foi prevista a adição de uma usina nuclear de 1.300 MW na composição das fontes energéticas a partir do ano 2035, para verificar a competição desta fonte energética com as demais fontes, fato que gerou o acréscimo observado na Tabela 5.5.

O Complexo Nuclear Almirante Álvaro Alberto, localizado na cidade de Angra dos Reis, Rio de Janeiro, levou quinze anos para que a primeira usina nuclear - Angra 1 - entrasse em operação. Trazendo esta experiência para o cenário D2, justifica-se a entrada de uma usina nuclear hipotética em Minas Gerais no ano 2035. Os dados utilizados para a usina nuclear também foram obtidos da IEA-ETSAP (2013) contidos na Tabela 5.3.

Tabela 6.2: Capacidade exógena nos cenários, em GW

Cenário	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2049
HGW	20,2	20,3	20,8	21,4	22,1	22,9	23,7	24,4
HGD	20,2	20,3	20,8	21,4	22,1	22,9	23,7	24,4
HGVD	20,2	20,3	20,8	21,4	22,1	22,9	23,7	24,4
D1	20,2	20,3	20,8	21,4	22,1	22,9	23,7	24,4
D2	20,2	20,3	20,8	21,4	23,4	24,2	25,0	25,7

Fonte: Elaboração própria com o uso do LEAP

A métrica utilizada para a apresentação dos resultados das emissões de CO_{2eq} foi a 100-Year GWP, que por definição é a energia absorvida por um gás que produzirá impactos após a emissão deste gás, dentro de seu tempo de vida útil, num período de 100 anos.

Na Tabela 6.3 estão os resultados da emissão de CO_{2eq} para o cenário de referência HGW, indicando a participação por tipo de combustível da UTE e o total da emissão.

Tabela 6.3: Emissões de CO_{2eq} no cenário HGW, em milhões ton

Fonte	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2049
UTE biomassa	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
UTE fóssil	1,0	5,1	6,6	7,9	9,0	9,9	13,7	11,0
Total (milhões ton CO _{2eq}):	1,1	5,2	6,7	8,1	9,2	10,1	13,8	11,2

Fonte: Elaboração própria com o uso do LEAP

A geração de energia elétrica, exclusivamente das UHE nos cenários hídricos HGD e HGVD, é apresentada na Tabela 6.4, resultado da análise que estabelece a restrição hídrica nas vazões afluentes das UHE. São resultados provenientes do WEAP e que, posteriormente, são utilizados pelo LEAP para a composição com as demais fontes energéticas no atendimento da demanda final de energia.

Tabela 6.4: Geração das UHE nos cenários hídricos, em 10³ GWh

Cenários	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2049
HGW	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5
HGD	43,5	43,4	42,9	42,4	41,8	41,2	40,6	40,1
HGVD	43,5	43,3	42,3	41,1	39,9	38,6	37,3	36,2

Fonte: WEAP (SIEBER, 2020)

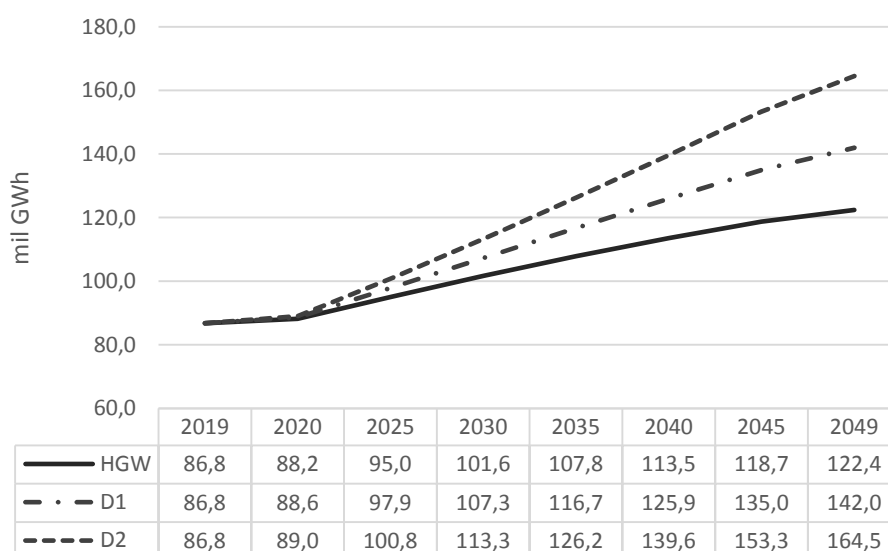
Nos cenários energéticos do LEAP, os resultados da geração de energia elétrica são apresentados na Tabela 6.5, em milhares de GWh.

Tabela 6.5: Geração de energia elétrica nos cenários energéticos, em 10³ GWh

Cenário	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2049
HGW	86,9	103,7	111,8	119,6	126,9	133,6	139,6	144,0
D1	86,9	104,2	115,1	126,3	137,3	148,2	158,8	167,0
D2	86,9	104,7	118,6	133,3	148,5	164,3	180,4	193,5

Fonte: WEAP (SIEBER, 2020)

As perdas totais de energia elétrica na transmissão e distribuição, incluindo perdas técnicas - aquelas inerentes aos processos de distribuição - e as não técnicas - referentes principalmente ao furto de energia - foram estimadas em 15%, índice próximo da média apurada (14%) pelas concessionárias de energia/ANEEL (ANEEL, 2020). Esta é a diferença percebida entre os resultados da Tabela 6.5 e da Figura 6.6 a seguir.

Figura 6.6: Demanda final de energia elétrica nos cenários energéticos, em 10³ GWh

Fonte: Elaboração própria com o uso do LEAP

A participação de cada fonte energética varia conforme o cenário observado. Pelo fato de não haver alteração nas características físicas das UHE que afete a geração de energia nesses cenários, a parcela da participação dessas unidades é invariável nos cenários energéticos, ou seja, nesses cenários a geração de eletricidade das UHE será 43,5 mil GWh/ano ao longo do horizonte de estudo, conforme visto na modelagem WEAP e também pelo fato de não haver incremento previsto na capacidade desse tipo de usina, segundo a ANEEL. Em razão disso, o crescimento da demanda deverá ser atendido com o aumento da oferta das outras fontes energéticas, conforme apresentado nas Tabelas 6.6 a 6.9.

Nos cenários hídricos, observa-se a redução da geração de eletricidade no horizonte de estudo, conforme estabelecido nas definições dos mesmos. Como visto na Tabela 6.6, no cenário HGD, o valor anual de geração das UHE está reduzindo ao longo do período de estudo, ao passo que para manter a demanda, as fontes energéticas UFV e UTE aumentam a participação.

Tabela 6.6: Geração de energia elétrica – Cenário HGD, em 10³ GWh

Fonte	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2049
UFV	1,2	1,8	2,4	3,0	3,4	3,8	2,8	4,1
UTE biomassa	3,2	6,5	8,6	10,6	12,2	13,5	9,8	14,6
UTE fóssil	1,8	8,8	11,5	14,1	16,3	18,1	25,4	20,7
Eletricidade Import.	32,4	35,4	38,1	41,1	44,2	47,6	51,3	54,5
PCH	4,0	6,4	6,7	7,1	7,4	7,8	8,2	8,5
CGH	0,8	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
UHE	43,5	43,4	42,9	42,4	41,8	41,2	40,6	40,1
Total (mil GWh):	86,9	103,7	111,8	119,6	126,9	133,6	139,6	144,0

Fonte: Elaboração própria com o uso do LEAP

Na Tabela 6.7 é mostrada uma redução mais severa para a geração elétrica das UHE no cenário HGVD, o que implica maior parcela de geração e dependência das fontes UFV e UTE para atender a demanda.

Tabela 6.7: Geração de energia elétrica – Cenário HGVD, em 10³ GWh

Fonte	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2049
UFV	1,2	1,8	2,5	3,1	3,6	4,1	3,0	4,6
UTE biomassa	3,2	6,6	8,9	11,0	12,9	14,5	10,7	16,0
UTE fóssil	1,8	8,8	11,9	14,8	17,3	19,4	27,7	22,7
Eletricidade Import.	32,4	35,4	38,1	41,1	44,2	47,6	51,3	54,5
PCH	4,0	6,4	6,7	7,1	7,4	7,8	8,2	8,5
CGH	0,8	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
UHE	43,5	43,3	42,3	41,1	39,9	38,6	37,3	36,2
Total (mil GWh):	86,9	103,7	111,8	119,6	126,9	133,6	139,6	144,0

Fonte: Elaboração própria com o uso do LEAP

Como visto na Tabela 6.8, nos cenários energéticos nos quais há maior crescimento da IE e com a limitação da fonte UHE, são observadas os maiores crescimentos das outras fontes. A demanda total no cenário D1 apresenta valor quase 16% maior em relação ao cenário HGW.

Tabela 6.8: Geração de energia elétrica – Cenário D1, em 10³ GWh

Fonte	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2049
UFV	1,2	1,9	2,7	3,6	4,4	5,2	4,2	6,2
UTE biomassa	3,2	6,7	9,7	12,7	15,5	18,2	14,7	21,7
UTE fóssil	1,8	9,0	13,0	16,9	20,8	24,4	35,3	31,1
Eletricidade Import.	32,4	35,4	38,1	41,1	44,2	47,6	51,3	54,5
PCH	4,0	6,4	6,7	7,1	7,4	7,8	8,2	8,5
CGH	0,8	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
UHE	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5
Total (mil GWh):	86,9	104,2	115,1	126,3	137,3	148,2	158,8	167,0

Fonte: Elaboração própria com o uso do LEAP.

No cenário D2 há a maior variação da IE no horizonte de estudo, quando alcança 7.426,6 kWh/habitante em 2049 visto na Tabela 6.9, segundo a suposição inicial para este cenário.

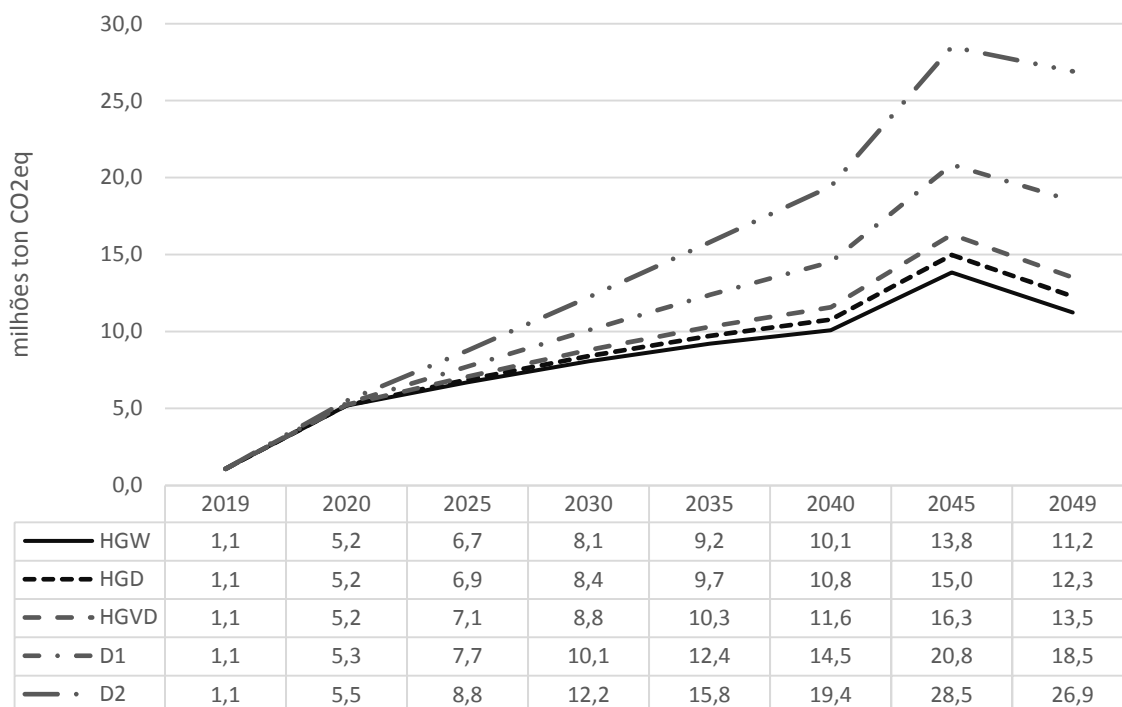
Tabela 6.9: Geração de energia elétrica – Cenário D2, em 10³ GWh

Fonte	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2049
UFV	1,2	1,9	3,1	4,3	5,6	6,9	6,1	8,9
UTE biomassa	3,2	6,9	11,0	15,3	19,8	24,3	21,5	31,3
UTE fóssil	1,8	9,2	14,7	20,5	26,5	32,6	48,3	45,3
Eletricidade Import.	32,4	35,4	38,1	41,1	44,2	47,6	51,3	54,5
PCH	4,0	6,4	6,7	7,1	7,4	7,8	8,2	8,5
CGH	0,8	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
UHE	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5
Total (mil GWh):	86,9	104,7	118,6	133,3	148,5	164,3	180,4	193,5

Fonte: Elaboração própria com o uso do LEAP

O resultado desta modelagem aponta um crescimento de 34% em relação ao cenário HGW, é um cenário especialmente mais intensivo na utilização da fonte fóssil.

Os resultados da emissão de CO_{2eq} levam em conta apenas duas fontes significativas, UTE biomassa e UTE fóssil e estão apresentados na Figura 6.7.

Figura 6.7: Emissões de CO_{2eq} para todos os cenários

Fonte: Elaboração própria com o uso do LEAP

Os resultados estimados da emissão de CO_{2eq} na Figura 6.7 apontam para duas fontes energéticas, UTE biomassa e UTE fóssil e possuem crescimentos expressivos em todos os cenários. Estes valores evidenciam a possibilidade do crescimento das externalidades associadas às emissões.

A forma de mitigação destas externalidades poderá ocorrer através da implementação de políticas de incentivo ao aumento da eficiência energética com maior rigor, bem como tornar a energia solar efetivamente importante na matriz energética estadual, eventualmente mediante subsídios para a disseminação desta tecnologia.

O Estado de Minas Gerais possui excelentes condições para a ampliação da geração distribuída de energia solar fotovoltaica, através de sistemas de microgeração

(até 75 kW) e minigeração (acima de 75 kW até 5 MW) implantados em residências, comércios, indústrias, prédios públicos e propriedades rurais.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

As ferramentas para modelagem LEAP e WEAP possuem recursos para a investigação de políticas e diferentes configurações dos sistemas energético e hídrico. No desenvolvimento deste trabalho, várias versões para atualizações e aprimoramentos foram disponibilizadas pelos desenvolvedores dos programas, bem como atualização de material para instrução e consulta, o que representa pontos favoráveis para a adoção e aplicação dos mesmos. Há trabalhos acadêmicos que já foram realizados utilizando estes programas, em universidades e instituições governamentais no Brasil e no exterior.

A elaboração de um trabalho de modelagem em computador requer disponibilidade de grande número de dados e definições, de modo a retratar o mais fiel quanto possível, a realidade física existente. Neste ponto reside uma dificuldade conhecida, a carência de dados atualizados para o que se propõe a fazer. Este problema foi parcialmente contornado através da busca de trabalhos científicos e acadêmicos correlatos, bem como adoção de premissas para construção dos cenários.

Esta pesquisa passou por três fases distintas. A primeira iniciou-se com a necessidade de obtenção da base de dados das usinas hidrelétricas que fizeram parte do estudo. Estes dados foram disponibilizados pela concessionária CEMIG. A segunda fase consistiu na compreensão do uso e inserção correta dos dados, juntamente com o estudo da conexão entre os modelos, e a terceira fase, na qual ajustes foram necessários antes da obtenção do conjunto de resultados apresentados.

7.1 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

As conclusões específicas seguirão a ordem: resultados da geração hidrelétrica no WEAP para todos os cenários, resultados do LEAP para o cenário de referência, cenários da restrição hídrica e cenários energéticos.

A geração hidrelétrica no WEAP para os cenários de referência (HGW) e cenários energéticos (D1 e D2), possuem o mesmo valor anual de 43,5 mil GWh, o que era esperado por não haver nenhuma limitação na definição destes cenários. Levando em conta os dados históricos de operação e geração da fonte hidrelétrica na ONS, totalizando 49,4 mil GWh em 2019, o valor encontrado para as usinas modeladas neste estudo em Minas Gerais atingiu 88% deste valor.

Ao aplicar a condição *ceteris paribus* para a vazão afluyente nos cenários de restrição hídrica, foi verificada uma redução de -0,2% a -7,8% no horizonte de estudo para o cenário de anos secos (HGD) e de -0,5% a -16,8% no cenário de anos muito secos (HGVD).

No cenário de referência (HGW), a demanda final por energia elétrica passou de 86,9 mil GWh em 2019 para 122,4 mil GWh em 2049, aumento de 40,8%. A geração elétrica com a participação de todas as fontes energéticas, cresceu 65,7%, passando de 86,9 mil GWh em 2020 para 144,0 mil GWh em 2049.

Como foi informado ao longo do texto do capítulo 5, a geração proveniente das usinas hidrelétricas permaneceu no mesmo patamar ao longo de todo o período nos cenários de referência (HGW) e nos cenários energéticos (D1 e D2), com 43,5 mil GWh por ano. Já a capacidade total das fontes energéticas no cenário de referência HGW parte de 20,2 GW em 2019 para 24,4 GW em 2049, crescimento de 20,8% no período.

Em relação à emissão dos GEE, o cenário HGW registrou variação de 1,1 milhões de ton CO_{2eq} em 2019 para 11,2 milhões de ton CO_{2eq} em 2049, um resultado expressivo de 918%. O LEAP atribuiu à fonte UTE fóssil a maior contribuição nas emissões, conforme foi apresentado na Tabela 6.3.

O primeiro cenário de restrição hídrica, HGD, apresentou o mesmo padrão de crescimento da demanda final de energia elétrica do cenário de referência, passando de 86,9 mil GWh em 2019 para 122,4 mil GWh em 2049, crescimento de 40,8%. Entretanto, a restrição hídrica imposta neste cenário levou à redução da geração da fonte UHE de 2019 a 2049 em -7,8%, passando de 43,5 mil GWh para 40,1 mil GWh.

Como a demanda final permaneceu a mesma neste cenário, a oferta (geração de eletricidade) total de eletricidade também foi a mesma, passando de 86,9 mil GWh para 144,0 mil GWh no período. Assim, as demais fontes energéticas assumiram os seguintes valores de crescimento para a geração total de eletricidade, 2019 a 2049: UFV 242%, UTE biomassa 356%, UTE fóssil 1.050%, Eletricidade Importada 68,2%, PCH 112,5% e CGH 87,5%. A evolução da capacidade total das fontes energéticas neste cenário foi a mesma do cenário de referência.

No cenário HGD, as emissões de CO_{2eq} crescem de 1,1 milhões de ton em 2019 para 12,3 milhões de ton em 2049, também com maior parcela da fonte UTE fóssil.

No segundo cenário de restrição hídrica, HGVD, a demanda final permaneceu nos mesmos valores anuais do cenário HGD, mas, pelo fato de ser um cenário ainda mais restritivo, a geração de eletricidade das usinas hidrelétricas passou de 43,5 mil GWh em 2019 para 36,2 mil GWh em 2049, redução de -16,8%. Neste cenário a oferta total também variou de 86,9 mil GWh em 2020 a 144,0 mil GWh em 2049. Então, os valores de crescimento das outras fontes energéticas para o atendimento da demanda final, de 2019 a 2049, foram: UFV 283%, UTE biomassa 400%, UTE fóssil 1.161%, Eletricidade Importada 68,2%, PCH 112,5% e CGH 87,5%.

As emissões de CO_{2eq} no cenário HGVD passaram de 1,1 milhões de ton em 2019 para 13,5 milhões de ton em 2049. Também não houve variação da capacidade total das fontes energéticas neste cenário, repetindo os valores do cenário de referência.

Ao modelar o aumento da intensidade energética (IE) nos cenários energéticos D1 e D2, há substancial variação observada. As variações da IE no período de 2019 a 2049 foram de 4,1 MWh/habitante a 6,4 MWh/habitante em D1, 56% de crescimento e de 4,1 MWh/habitante a 7,4MWh/habitante em D2, crescimento de 80,5%. No cenário D1 a demanda final de energia elétrica cresceu 63,6% de 2019 a 2049, passando de 86,8 mil GWh para 142,0 mil GWh. Como não houve restrição hídrica para a geração das usinas hidrelétricas modeladas neste cenário, os valores anuais destas fontes seguem o cenário de referência, 43,5 mil GWh por ano. A oferta total variou de 86,9 mil GWh em 2020 a 167,0 mil GWh em 2049. Assim, os valores do

crescimento da geração das demais fontes foram: UFV 417%, UTE biomassa 578%, UTE fóssil 1.627%, Eletricidade Importada 68,2%, PCH 112,5% e CGH 87,5%.

As emissões de CO_{2eq} no cenário D1 passaram de 1,1 milhões de ton em 2019 para 18,5 milhões de ton em 2049.

Por fim, o cenário D2, que impõe o maior crescimento da intensidade energética. Neste cenário a demanda final aumentou 89,5%, passando de 86,8 mil GWh em 2019 para 164,5 mil GWh em 2049. Tal como ocorreu no cenário D1, a geração hidrelétrica não sofreu restrição, assim, as demais fontes contaram com os seguintes percentuais de crescimento no período: UFV 642%, UTE biomassa 878%, UTE fóssil 2.417%, Eletricidade Importada 62,5%, PCH 112,5% e CGH 87,5%.

As emissões de CO_{2eq} no cenário D2 passaram de 1,1 milhões de ton em 2019 para 26,9 milhões de ton em 2049. O cenário D2 possui maior crescimento na capacidade de produção de energia uma vez que foi configurada a inserção de uma usina nuclear de 1.300 MW a partir do ano 2035, para verificação da competitividade desta fonte em relação às demais fontes. Passou de 20,2 GW em 2019 para 25,7GW em 2049.

Ao estabelecer uma comparação entre cenários ao final do período em 2049, verifica-se que a demanda final nos cenários hídricos é a mesma quando comparados com o cenário de referência. O mesmo ocorre ao verificar a geração total de energia elétrica nestes cenários. As diferenças ocorrem na geração de energia elétrica pelas usinas hidrelétricas. Na comparação com o cenário de referência HGW, houve redução de -7,8% no cenário HGD e de -16,8% no cenário HGVD. Não houve variação a ser comparada entre as capacidades e as IE. No que diz respeito às emissões de CO_{2eq}, o cenário HGD é 9,8% superior e o cenário HGVD é 20,5% superior, comparados ao cenário HGW no ano 2049.

A comparação do cenário de referência HGW com os cenários energéticos D1 e D2 ocorre na verificação das variações da IE ao final do período de estudo em 2049, quando no cenário D1 foi 16,4% superior e D2, 34,4% superior. Estes índices são

refletidos no aumento da demanda final de energia e também para a geração de energia, comparados ao cenário de referência.

Em relação às diferenças numéricas da geração de eletricidade ao final do período de estudo entre os cenários, foi possível estimar que entre o cenário HGW e HGD, a parte da geração que foi reduzida nas usinas UHE em razão da restrição hídrica, equivale aproximadamente a uma usina de 500 MW de capacidade. Quando o cenário HGW é comparado ao cenário HGVD, a diferença entre eles equivale à energia gerada por uma usina de 1.050 MW de capacidade. As diferenças que aparecem nos cenários energéticos em relação ao cenário HGW equivalem, a uma usina de 3.200 MW e 7.000 MW de capacidade, respectivamente cenários D1 e D2.

Os números mostrados no parágrafo anterior são importantes quando discute-se o planejamento da expansão do sistema elétrico. A característica de confiabilidade para o atendimento da demanda é condição fundamental no planejamento. Para garantir o suprimento da demanda futura de energia, em valores como os mostrados através das capacidades necessárias acima, requer planejamento da expansão do sistema, já que as restrições ambientais para a construção de novos empreendimentos hidrelétricos de grande porte estão ainda mais restritivos. Além disso, há que se discutir a disponibilidade técnica para a viabilidade destes empreendimentos. Desta maneira, a complementação destas capacidades projetadas recai sobre as outras fontes energéticas.

No cenário energético D2, quando a intensidade energética foi propositalmente aumentada no horizonte de estudo, alcançando 7,4 MWh/habitante em 2049, uma usina nuclear de 1.300 MW de capacidade foi introduzida a partir de 2035, para avaliação. Os resultados mostraram que, mesmo com o crescimento da demanda como foi visto neste cenário, não houve participação desta usina nuclear na composição da energia elétrica gerada para o atendimento desta demanda por não ser competitiva, devido aos custos desta tecnologia.

A mitigação das externalidades geradas pelas emissões de GEE deve ser tratada pela elaboração de legislação específica. A implantação de usinas de geração fotovoltaica em áreas degradadas pelo setor da mineração poderia fazer parte da

contrapartida das empresas que exploram estas riquezas do subsolo mineiro. Não havendo viabilidade técnico-econômica para a utilização de determinadas áreas degradadas pela mineração para esta finalidade, a legislação poderia prever a criação de um fundo, pagos por estas empresas, com a finalidade de oferecer financiamento a baixo custo para a geração distribuída de energia para as famílias no Estado. A exigência de máquinas e equipamentos mais eficientes também contribui para mitigar a emissão de poluentes da fonte termelétrica.

Quanto às externalidades provocadas por escassez do recurso hídrico, essas precisam ser avaliadas criteriosamente, para o caso dos usos que não sejam para a geração da energia elétrica. A ANA possui dados mínimos de vazão para o atendimento das diversas demandas hídricas. Este gerenciamento do recurso deverá prever situações de restrição em caso de alterações climáticas severas e a adoção de medidas para evitar o colapso das atividades e o conseqüente caos entre a população. A quantificação dos volumes de água das bacias hidrográficas em situação de escassez não fez parte do escopo deste trabalho.

7.2 CONSIDERAÇÕES

A ordem de mérito na modelagem LEAP determina a ordem em que as usinas entrarão no despacho de energia para o atendimento da demanda. A sequência correta para este parâmetro é o despacho inicial das usinas de base e de menor custo de geração como hidrelétricas e renováveis e, depois, havendo necessidade de novos despachos de energia, entram usinas de custo mais elevado como as não renováveis, a combustível fóssil e nuclear, de forma a garantir a confiabilidade do sistema.

O ONS tem a prerrogativa de modular os parâmetros das usinas geradoras do sistema hidro-termo-eólico-solar conforme as necessidades dentro do planejamento e operação deste sistema, como por exemplo, no atendimento das regulações da ANA, ocorrências de perturbação no atendimento da curva de carga momentânea, transmissão de energia e programação eletroenergética.

Esta modulação de parâmetros é uma operação coordenada e complexa, muito bem executada por aquela instituição e que, no caso das usinas hidrelétricas, envolve

monitoramento e controle do nível dos reservatórios, vazão defluente, vazão turbinada, número de máquinas em operação por usina, entre outros. Estas funções de controle não entraram no escopo deste trabalho, dado o nível de complexidade que traria para a avaliação das condições estabelecidas nos cenários criados.

A seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Investigar, exclusivamente, as condições físicas das usinas hidrelétricas para apuração da energia gerada sob condições adversas;
- Avaliar a importação da energia elétrica para o Estado de Minas Gerais, considerando os impactos de restrição hídrica nas outras regiões do país;
- Estudar o balanço hídrico das usinas hidrelétricas, realizar projeções e avaliar a questão da segurança energética no Estado de Minas Gerais no longo prazo, considerando a idade das usinas em funcionamento;
- Aplicar o conceito “nexo de recursos” para avaliação de programas de complementaridade energética, em nível regional.
- Considerar a avaliação do nexo de recursos entre água e energia, e quantificar as vazões das bacias hidrográficas para os diversos usos, sob condições adversas.

PUBLICAÇÕES

MELO, L. B. et al., A. Impacts of the hydrological potential change on the energy matrix of the Brazilian State of Minas Gerais: A case study. RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS **JCR**, v. 110, p. 415-422, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.018>

MELO, L. B., COSTA, A. L., FORTINI, A., A segurança energética no estado de Minas Gerais em seus aspectos climáticos e sociais. REVISTA TECNOLOGIA E SOCIEDADE (ONLINE), v. 15, p. 417-428, 2019. [10.3895/rts.v15n37.9769](https://doi.org/10.3895/rts.v15n37.9769)

MELO, L. B. et al., Análise dos Impactos na Matriz Energética do Estado de Minas Gerais em Consequência de Alterações no Potencial Hidrológico, REVISTA GESTÃO & SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL, Florianópolis, n. esp, p.181-194, dez. 2015. <https://pdfs.semanticscholar.org/cbaa/4272fca7c2e9a657de0d6760520b8b6f5516.pdf>

CONGRESSOS:

MELO, L. B., COSTA, A. L., FORTINI, A. A segurança energética no estado de Minas Gerais em seus aspectos climáticos e sociais. In: Quarta Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações - IV SENCIR, 2018, Belo Horizonte. Anais da IV Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações, 2018. v. 1. p. 372-377. (Paper indicado para publicação estendida no periódico REVISTA TECNOLOGIA E SOCIEDADE).

MELO, L. B., COSTA, A. L., FORTINI, A. Impacts of the Hydrological Potential Change on the Energy Matrix of the State of Minas Gerais. In: 1st Latin American Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (SDEWES), 2018, Rio de Janeiro. Proceedings of the 1st Latin American SDEWES, 2018. (Resumo. Indicado para publicação no periódico RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, N.; AHIDUZZAMAN, M.; KUMAR, A. The development of an integrated model for the assessment of water and GHG footprints for the power generation sector. **Applied Energy**, v. 216, p. 558-575, Feb. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.116>. Acesso em: 7 jul. 2019.

AL-SAIDI, M.; ELAGIB, N. A. Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 1131-1139, Jan. 2017. Disponível em: <https://10.1016/j.scitotenv.2016.09.046>. Acesso em: 7 jul. 2019.

ALI, B. Forecasting model for water-energy nexus in Alberta, Canada. **Water-Energy Nexus**, v. 1, p. 104-115, Sep. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2018.08.002>. Acesso em: 19 jan. 2019.

ALVES, L. A. **A valoração dos impactos ambientais associados à expansão da Matriz Elétrica Brasileira: proposta de instrumentos econômicos para a promoção das fontes alternativas e limpas**. 2009. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

AMBRIZZI, T.; ARAÚJO, M. Contribuição do Grupo de Trabalho do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao 1º Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climática. PBMC, v. 1, 2016.

ANA - Agência Nacional De Águas ANA. **Caderno de Recursos Hídricos: Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: CDOC, 2005. 134 p. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2020

ANA - Agência Nacional De Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Edição Especial, Brasília: ANA, 2015. Disponível em: <http://ana.gov.br>. Acesso em 2 dez. 2017.

ANA - Agência Nacional De Águas. **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação**. Brasília: ANA, 2016. 93 p. Disponível em: <http://ana.gov.br>. Acesso em: 5 dez. 2017.

ANA - Agência Nacional De Águas. **Usos da água > Outros Usos**. Brasília, DF: ANA, c2018. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/usos-da-agua/outros-usos>. Acesso em 15 mai. 2018.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução 482/2012**. Brasília: DOU, 2012. 4 p.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução 687/2015**. Brasília: DOU, 2015. 25 p.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de Informações da Geração. **SIGA**. Brasília: AID, 2020. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 3 mai. 2020.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Perdas de Energia Elétrica na Distribuição**. Edição 01/2020. Brasília: 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia+2019.pdf/6cb0bf36-4074-bbc3-d15d-ed370f44b34b>. Acesso em: 30 dez. 2020.

ASSUNÇÃO, F. N. A.; BURSZTYN, M. A. A. Conflitos pelo uso dos recursos hídricos *in*: THEODORO, S. H. (org.). **Conflitos e uso sustentável dos recursos naturais**. Rio de Janeiro: Garamond, 2001.

BAZILIAN, M. *et al.* Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modeling approach. **Energy Policy**, v. 39, n. 12, p. 7896-7906, dez. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039>. Acesso em: 23 fev. 2019.

BRASIL, Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a política nacional de recursos hídricos [...]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 470, 9 jan. 1997.

BROUWER, F. *et al.* Energy modelling and the Nexus concept. **Energy Strategy Reviews**, v. 19, p. 1-6, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.10.005>. Acesso em: 3 fev. 2019

CEMIG - Companhia Energética De Minas Gerais S/A. 33º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais - BEEMG 2018: ano Base 2017. Belo Horizonte: CEMIG, 2018. 175 p. Disponível em: http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/BEEMG.pdf. Acesso em: 20 mai. 2020.

CEMIG - Companhia Energética De Minas Gerais S/A. Planilha de Dados das Usinas Hidrelétricas – Comunicação pessoal, Dados restritos. Belo Horizonte: CEMIG, 2019

CEPED - CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRE. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010**. 2. ed. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. 105 p. Disponível em: <http://www.ceped.pr.gov.br/arquivos/File/BrasilRev.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2018.

CICOGNA (a), M. A. **Sistema de suporte à decisão para o planejamento e a programação da operação de sistemas de energia elétrica**. 2003. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal Campinas, Campinas.

CICOGNA (b), M. A. **HYDRODATA XP**: Aplicativo de banco de dados para o gerenciamento, à organização e à análise de dados de usinas hidrelétricas, reservatórios. Versão: 1.7.2, HydroByte. Disponível em: <https://hydrobyte.com.br/site/pt-br/hydrodata-xp>. Acesso em: 2 jan. 2020.

COLLAÇO (a), F. M. A. *et al.* A What if São Paulo (Brazil) would like to become a renewable and endogenous energy -based megacity? **Renewable Energy**, v. 138, p. 416-433, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.073>. Acesso em: 17 dez. 2019.

COLLAÇO (b), F. M. A. *et al.* The dawn of urban energy planning e Synergies between energy and urban planning for Sao Paulo (Brazil) megacity. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 458-479, Apr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.013>. Acesso em: 17 dez. 2019.

DAI, J. *et al.* Water-energy nexus: A review of methods and tools for macro-assessment. **Applied Energy**, v. 210, p. 393-408, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.243>. Acesso em: 20 jan. 2020.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**. Brasília, DF: EPE, c2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 23 out. 2020.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas. **Alterações Climáticas 2014**: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Genebra: IPCC, 2014. 34 p. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wg2_spmport-1.pdf. Acesso em 21 mai. 2016.

EMODI, N. V. *et al.* Are Emission Reduction Policies Effective under Climate Change Conditions? A Backcasting and Exploratory Scenario Approach using the LEAP-OSeMOSYS Model. **Applied Energy**, v. 236, p. 1183-1217, 2019.

FEAM - Fundação Estadual Do Meio Ambiente. **Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais – Ano Base 2014**. 2 ed. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais, 2016. Disponível em: <http://www.feam.br/mudancas-climaticas/inventario-gee>. Acesso em: 5 fev. 2018.

FERREIRA, V. V. M. **Avaliação de Externalidades do Setor Hidrelétrico no Estado de Minas Gerais**. 2004. 192 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio-Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FIELD; C. B. *et al.* Summary for Policemakers. *In*: FIELD; C. B. *et al.* (org.). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. IPCC, 2014, p. 1-32. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2>. Acesso em: 5 dez. 2017.

FONTELLES, M.J. *et al.* Metodologia da Pesquisa Científica: Diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa. **Rev. Para. Med**, v. 23, lil-588477, 2009. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C8_NONAME.pdf. Acesso em: 2 jan. 2018.

FORTUNATO, L. A. M. *et al.* **Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: EDUFF, 1990. 232 p.

GOLDENBERG, J.; PRADO, Luiz T.S. Reforma e Crise do Setor Elétrico no período FHC. 2003. **Tempo Social – USP**. ISSN 1809-4554. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-20702003000200009> Acesso em: 5 mar. 2021,

GUAN, X. *et al.* A Metropolitan Scale Water Management Analysis of the Food-Energy-Water Nexus. **Science of the Total Environment**, v. 701, Jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134478>. Acesso em: 23 jun. 2020.

HANDAYANI, K. *et al.* Seeking for a Climate Change Mitigation and Adaptation Nexus: Analysis of a Long-Term Power System Expansion. **Applied Energy**, v. 262, Mar. 2020.

HEAPS, C. G. **Low Emissions Analysis Planning (LEAP) system**: Software de análise de política energética e avaliação de mitigação de mudanças climáticas. Versão: 2.0. 223.1, Stockholm Environment Institute, 2016. Disponível em: <https://www.energycommunity.org>. Acesso em: 23 set. 2018.

HUANG, W.; MA, D.; CHEN, W. Connecting water and energy: Assessing the impacts of carbon and water constraints on China's power sector. **Applied Energy**, China, v. 185, p. 1497-1505, 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915016219>. Acesso em: 8 mar. 2018.

HUNT, J. D.; STILPEN, D.; DE FREITAS, M. A. V. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, p. 208-222, 2018.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeção**. Brasília, DF: IBGE, c2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps//populacao/projecao/>. Acesso em: 8 mar. 2019.

IEA / ETSAP - International Energy Agency - Energy Technology Systems Analysis Program. **Supply Technologies Data**. IEA – ETSAP, c2019. Disponível em: <https://iea-etsap.org/index.php/energy-technology-data/energy-supply-technologies-data>. Acesso em: 8 abril 2020.

IEDE/MG - Infraestrutura Estadual de Dados Espaciais de Minas Gerais. **Catálogo de dados**. Belo Horizonte, MG: FJP. Disponível em: <http://iede:fjp.mg.gov.br>. Acesso em: 14 fev. 2018.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão de Águas. **Relatório de Avaliação Hidrológica**. Belo Horizonte: IGAM, 2015. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/>. Acesso em: 5 nov. 2017.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Monitoramento do EL Niño durante DDJ-2019/2020. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/> Acesso em: 15 mar. 2021.

JARDIM, C. H. A "Crise Hídrica" no Sudeste do Brasil: Aspectos Climáticos e Repercussões Ambientais. **Revista Tamoios**, v. 11, n. 2, p. 67-83, jul./dez. 2015.

KHAN, Z.; LINARES, P.; GARCÍA-GONZÁLEZ, J. Integrating water and energy models for policy driven applications. A review of contemporary work and recommendations for future developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 1123-1138, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.043>. Acesso em: 23 ago. 2019.

KINIOUAR, H.; HANI, A.; KAPELAN, Z. Water Demand Assessment of the Upper Semi-arid Sub-catchment of a Mediterranean Basin. **Energy Procedia**, v. 119, p. 870-882, 2017.

LEAP - Low Emissions Analysis Platform. **Stockholm Environment Institute**. Somerville, MA, USA: LEAP, c2019. Disponível em: <https://www.energycommunity.org>. Acesso em: 23 set. 2019.

LIN, J. *et al.* Modeling the urban water-energy nexus: a case study of Xiamen, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 680-688, Apr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.063>. Acesso em: 28 nov. 2019.

LUCENA, A. F. P. **Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas no setor hidroelétrico**. 2010. 208 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MARIANI, L. *et al.* Análise de oportunidades e desafios para o Nexo Água-Energia. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**. v. 37, p. 9-30, mai. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v37i0.45046>. Acesso em: 30 nov. 2016.

MIDGLEY, S. J. E.; NEW, M.; METHNER, N. Competition for Land, Water and Energy (Nexus) in Food Production. **Encyclopedia of Food Security and Sustainability**, v. 1, p. 187-195, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21993-8>. Acesso em: 27 out. 2017

MIT - Massachusetts Institute of Technology. **Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Food, Water, Energy, Climate Outlook Perspectives from 2016**. MIT Joint Program, 2016, 44 p. Disponível em: <https://globalchange.mit.edu/publications>. Acesso em: 2 jan. 2018.

MDR - Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018**. Brasília: SNS/MDR, 2019. 180 p.: il. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2018> Acesso em: 11 nov.2019.

MMA - Ministério Do Meio Ambiente. **Brasil 2040: Documento Síntese**. MMA: Brasília, 2015. 62 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80182/BRASIL-2040-Resumo-Executivo.pdf> Acesso em: 10 out. 2017.

MMA - Ministério Do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima - Volume II: Estratégias Setoriais e Temáticas**. MMA: Brasília, 2016. 297 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao> Acesso em: 17 dez. 2017.

MMA - Ministério Do Meio Ambiente. **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada Para Consecução Do Objetivo Da Convenção-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança Do Clima**. MMA: Brasília, 2019. 10 p. Disponível em:

<https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80108/BRASIL%20iNDC%20portugues%20FINAL.pdf> Acesso em: 22 fev. 2020.

MONTGOMERY, H. Preventing the progression of climate change: one drug or polypill? **Biofuel Research Journal**, v. 4, p. 536-536, 2017.

MUKHEIBIR, P. Possible Climate Change Impacts in large Hydroelectricity Schemes in Southern Africa. *Journal of Energy in Southern Africa*, v. 18, n. 1, Feb. 2007.

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; DE VRIES, B.; et al. *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, 2000.

NIEVES, J. A. et al. Energy Demand and Greenhouse Gas Emissions Analysis in Colombia: A LEAP model application. *Energy*, v. 169, p. 380-397, 2019.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. (org). **Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar**. São José dos Campos: Canal6, 2018. 608 p.

ONS - Operador Nacional do Sistema. **Histórico da operação**. Brasília, DF: ONS, c2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/>. Acesso em: 15 fev. 2021.

Pan, L. J.; Xie, Y. B.; Li, W. An Analysis of Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases in Beijing based on the LEAP Model. **Procedia Environmental Sciences**, v. 18, p. 347-352, 2013.

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Base Científica das Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro: PBMC, 2014, 464 p. Disponível em: <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/index.php/pt/>. Acesso em: 26 ago. 2018.

RUFFATO-FERREIRA, V. *et al.* A foundation for the strategic long-term planning of the renewable energy sector in Brazil: Hydroelectricity and wind energy in the face of climate change scenarios. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1124-1137, 2017.

SÃO JOSÉ, D. R. **Climate changes in Brazil: The use of smart grids as a mitigation and adaptation strategy**. 2018. 180 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio-Ambiente e Recursos Hídricos) - Faculty of Engineering, University of Porto, Porto.

SAUER, Ildo Luís; VIEIRA, José Paulo; KIRCHNER, Carlos Augusto Ramos. O Racionamento de energia elétrica decretado em 2001: um estudo sobre as causas e as responsabilidades. [S.l: s.n.], 2001.

SAUER, I. L. A gênese e a permanência da crise do setor elétrico no Brasil. *Revista USP*. São Paulo. nº 104, p. 145-174. Jan/Fev/Mar. 2015. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/download/106763/105401/188589>
Acesso em: 5 mar. 2021.

SCHNEIDER, P. *et al.* Potential and versatility of WEAP model (Water Evaluation and Planning System) for hydrological assessments of AWD (Alternate Wetting and Drying) in irrigated rice. ***Agricultural Water Management***, v. 224, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.030>. Acesso em: 11 jan. 2020.

SEMERTZIDIS, T. Can energy systems models address the resource nexus? ***Energy Procedia***, London, v. 83, p. 279-288, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.182>. Acesso em: 17 set. 2019.

SHANNAK, S.; MABREY, D.; VITTORIO, M. Moving from theory to practice in the water–energy–food nexus: An evaluation of existing models and frameworks. ***Water-Energy Nexus***, v. 1, n. 1, p. 17-25, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2018.04.001>. Acesso em: 24 out. 2019.

SIEBER, J. **Water Evaluation and Planning (WEAP) System**: Software de planejamento de recursos hídricos. Versão: 2019,2132(Beta), Stockholm Environment Institute. Disponível em: <https://www.weap21.org>. Acesso em: 2 jan. 2020.

SILVA, W. L. *et. al.* Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants. ***Theoretical and Applied Climatology***, v. 137, p. 353-371, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2600-8>. Acesso em: 6 jan. 2020.

SILVEIRA, C. S. *et. al.* Análise das Projeções de Vazões nas Bacias do Setor Elétrico Brasileiro Usando Dados do IPCC-AR4 para o Século XXI. ***RBRH***, v. 19, n. 4, p. 59-71, out./dez. 2014.

SOARES, E. S. **Externalidades Negativas e Seus Impactos no Mercado**. 1999. 99 f. Dissertação (Mestrado em Finanças Públicas) - Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 1999.

SPALDING-FECHER, R.; JOYCE, B.; WINKLER, H. Climate change and hydropower in the Southern African Power Pool and Zambezi River Basin: System-wide impacts and policy implications. **Energy Policy**, v. 103, p. 84-97, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.009>. Acesso em: 13 out. 2019.

STERN, N. **The Economics of Climate Change: The Stern Review**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

SORIANO, E. *et al.* Crise hídrica em São Paulo sob o ponto de vista dos desastres. *Ambiente & Sociedade* vol.19 nº1. São Paulo. Jan./Mar. 2016. ISSN 1809-4422. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc150120r1v1912016> Acesso em: 7 mar. 2021.

SUN, L. *et al.* Energy–water nexus analysis in the Beijing–Tianjin–Hebei region: Case of electricity sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, p. 27-34, Mai, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.111>. Acesso em: 17 jan. 2019.

TEOTÓNIO, C. *et al.* Assessing the impact of climate change on hydropower generation and the power sector in Portugal: A partial equilibrium approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. n. 74, p. 788-799, 2017.
TONG, S.; EBI, K. Preventing and mitigating health risks of climate change. **Environmental Research**, v. 174, p. 9-13, 2019.

WATTS, N. *et al.* The 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: shaping the health of nations for centuries to come. **The Lancet**, v. 392, p. 2479-2514, 2018. www.energycommunity.org. Acesso em: 2 jan. 2020.

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development. (2014). **Building a resilient power sector: Executive Summary**. Geneva: WBCSD. Disponível em: http://docs.wbcsd.org/2014/03/Building_A_Resilient_Power_Sector.pdf Acesso em 29 dez. 2020.

YANG, Y. Beyond the conventional "life cycle" assessment. **Biofuel Research Journal**, v. 4, p. 637-637, 2017.

YANG, Y., Heijungs, R. On the use of different models for consequential life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 751-758, 2018.

GLOSSÁRIO

Abordagem holística – Pressupõe que as partes de um todo comungam íntima interconexão, abordagem recorrente nas atuais análises científicas.

Capacidade exógena – São valores utilizados para refletir a capacidade existente de uma usina, considerando as adições e retiradas planejadas de capacidade.

Margem de reserva – Capacidade instalada acima da demanda de pico do sistema, de maneira a manter a segurança no atendimento da demanda.

Uso consuntivo – utilização do recurso hídrico para destinação a um fim específico, sem retorno do recurso ao manancial de onde foi retirado. Exemplo: Irrigação.

Uso não consuntivo – utilização do recurso hídrico de maneira que não há prejuízo no que diz respeito ao consumo direto do recurso. Exemplo: Navegação.

APÊNDICE A – DADOS ONS (VAZÃO TURBINADA)

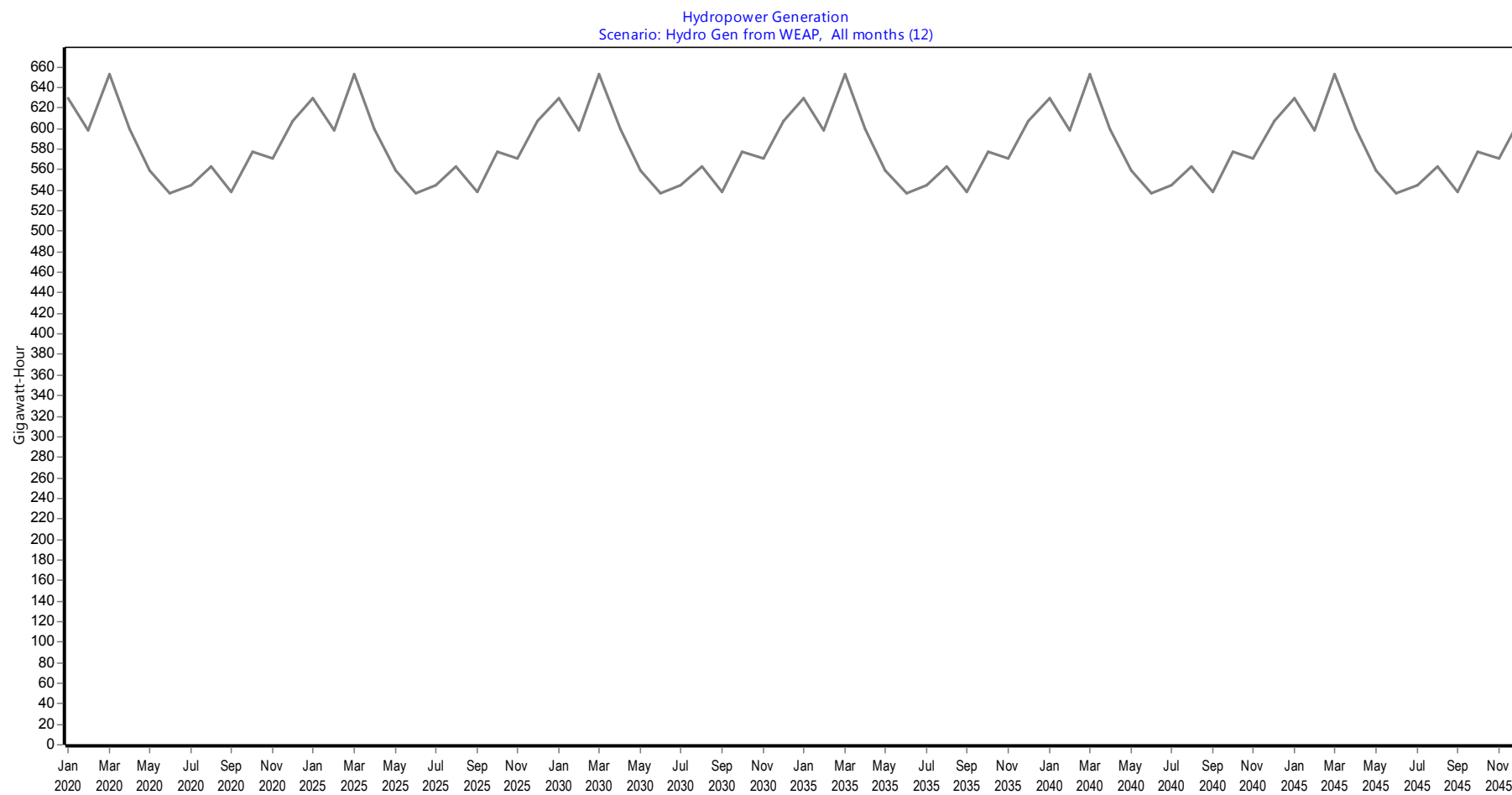
		Médias mensais VAZÃO TURBINADA obtidas do O N S (01/01/1999 a 31/12/2019)												
		Rio	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro	outubro	novembro	dezembro
1	Nova Ponte	Araguari	231,71	233,87	213,33	208,33	205,67	213,13	230,19	257,50	284,75	303,38	286,56	269,19
2	Miranda	Araguari	315,47	301,60	299,00	270,73	246,93	253,27	269,63	282,38	320,19	347,25	338,13	333,13
3	Amador Aguiar I	Araguari	334,92	313,83	310,67	269,08	234,50	238,83	261,85	289,00	312,92	352,50	349,92	333,54
4	Amador Aguiar II	Araguari	351,31	343,00	331,67	285,75	252,25	255,25	271,15	277,15	322,61	361,23	365,92	362,85
5	Risoleta Neves	Doce	172,12	151,67	159,38	130,29	106,89	88,43	75,71	65,00	68,73	76,50	116,10	213,56
6	Baguari	Doce	363,56	390,33	404,10	363,10	285,00	235,30	191,30	165,50	129,82	165,55	301,73	479,90
7	Aimores	Doce	587,27	535,17	587,67	468,77	344,85	275,54	196,64	180,85	149,57	214,58	420,77	621,62
8	Funil	Grande	350,50	314,42	306,50	228,50	173,17	156,42	136,92	124,00	132,23	165,38	229,46	345,33
9	Furnas	Grande	663,69	677,12	634,31	603,69	586,50	576,12	648,12	745,65	796,29	825,65	775,88	669,88
10	Mal. Mascar. Moraes	Grande	788,19	790,50	737,56	686,00	640,13	642,94	690,47	733,82	837,17	863,35	824,24	768,94
11	Porto Colombia	Grande	1136,86	1177,81	1190,06	1005,31	878,75	814,47	816,24	843,76	943,53	962,41	984,65	1030,35
12	Marimbondo	Grande	1655,13	1688,38	1708,25	1533,82	1347,19	1270,12	1320,76	1381,88	1357,35	1397,94	1391,94	1389,88
13	Água Vermelha	Grande	1683,50	1774,23	1747,77	1659,23	1498,38	1580,08	1610,08	1682,77	1760,77	1718,00	1644,00	1625,69
14	Irape	Jequitinhonha	99,67	96,67	82,08	82,08	64,92	68,83	72,23	71,23	79,23	91,15	97,38	105,54
15	Simplicio	Paraíba do Sul	166,50	132,67	156,50	123,17	88,14	77,86	54,57	41,14	41,43	48,57	103,00	162,86
16	Emborcação	Parnaíba	305,13	279,80	298,27	298,47	296,73	292,20	311,69	380,06	455,13	470,25	433,94	362,56
17	Itumbiara	Parnaíba	1116,00	1136,69	1016,94	939,63	965,94	1051,00	1243,18	1436,29	1595,76	1537,35	1276,65	1148,82
18	Guilmar Amorim	Piracicaba	88,44	72,89	75,05	63,05	42,42	36,44	29,58	26,95	27,00	31,72	61,05	86,32
19	Queimado	Preto	28,42	26,67	25,25	33,33	34,33	30,67	29,85	27,77	28,77	28,62	27,23	28,77
20	Salto Grande	Santo Antonio	78,69	79,08	76,93	73,25	59,40	47,93	42,50	33,47	34,53	38,25	68,36	90,67
21	Porto Estrela	Santo Antonio	155,13	137,25	141,06	117,00	82,27	66,67	54,67	45,06	38,70	47,88	111,53	168,59
22	Três Marias	São Francisco	398,17	393,42	363,17	371,83	382,58	421,91	419,23	453,92	465,31	478,00	450,85	405,85

APÊNDICE B – DADOS ONS (VAZÃO AFLUENTE)

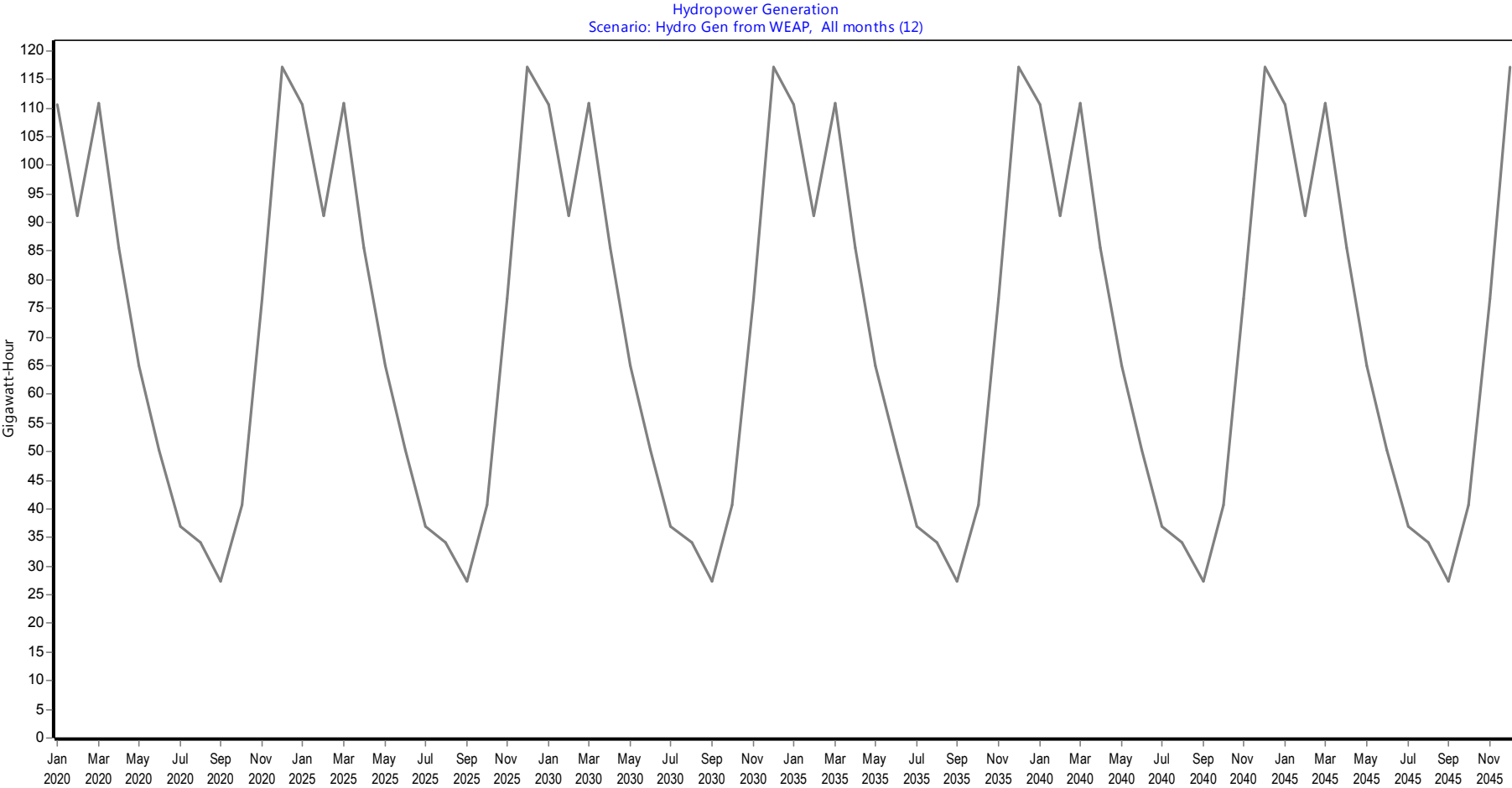
Médias mensais VAZÃO AFLUENTE obtidas do O N S (01/01/1999 a 31/12/2019)														
		Rio	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro	outubro	novembro	dezembro
1	Nova Ponte	Araguari	411,14	409,52	421,67	288,38	198,43	155,62	122,67	92,00	83,76	104,00	180,71	323,43
2	Miranda	Araguari	318,95	308,95	292,19	268,76	241,95	242,57	258,90	296,71	323,14	335,76	341,81	321,71
3	Amador Aguiar I	Araguari	375,71	370,21	328,93	302,21	251,86	254,71	272,00	280,57	325,29	356,21	359,07	351,80
4	Amador Aguiar II	Araguari	400,69	392,85	346,46	302,92	256,62	261,69	275,69	282,54	335,50	367,71	375,50	372,07
5	Risoleta Neves	Doce	220,20	161,67	174,73	130,53	96,53	87,56	75,25	67,25	64,00	73,63	124,50	221,56
6	Baguari	Doce	793,09	521,18	542,73	444,27	316,45	259,45	221,27	184,36	173,36	212,27	417,45	916,67
7	Aimores	Doce	935,00	679,93	638,14	553,00	392,93	327,00	276,07	235,93	214,53	260,40	542,47	1055,73
8	Funil	Grande	481,50	382,44	323,78	230,22	177,06	160,89	146,44	132,56	135,17	161,83	227,56	383,83
9	Furnas	Grande	1534,86	1259,19	1110,62	725,95	524,14	472,95	380,76	308,67	322,57	379,43	581,33	1029,24
10	Mal. Mascar. Moraes	Grande	958,38	952,76	900,67	732,95	650,62	640,38	683,33	776,62	799,86	866,29	828,28	819,95
11	Porto Colombia	Grande	1349,43	1397,62	1348,57	1088,43	904,90	831,33	835,05	848,62	914,81	960,43	990,33	1086,71
12	Marimbondo	Grande	2203,05	2281,52	2153,76	1666,48	1349,52	1252,45	1150,57	1102,57	1180,14	1244,00	1344,76	1635,67
13	Água Vermelha	Grande	2234,48	2387,09	2365,28	1915,14	1582,00	1502,76	1474,33	1519,90	1503,95	1549,67	1578,67	1698,57
14	Irape	Jequitinhonha	176,53	157,59	150,82	98,00	41,24	27,59	20,78	16,83	16,78	36,94	142,56	278,72
15	Simplicio	Paraíba do Sul	165,17	132,50	156,50	123,17	75,43	77,71	54,57	41,14	41,43	48,43	102,57	162,85
16	Emborcação	Parnaíba	696,43	673,57	660,28	464,28	303,71	234,75	200,81	175,62	165,09	185,52	296,05	515,62
17	Itumbiara	Parnaíba	1534,90	1580,90	1618,67	1403,28	1096,76	956,86	915,48	985,43	1066,81	1136,52	1222,33	1407,76
18	Guilam Amorim	Piracicaba	120,52	83,48	84,09	59,67	43,24	36,62	31,52	27,81	27,33	33,14	69,28	113,28
19	Queimado	Preto	52,81	58,67	65,19	57,00	38,86	29,95	23,48	18,76	16,24	17,48	28,48	48,00
20	Salto Grande	Santo Antonio	153,57	141,00	129,48	98,81	73,86	61,48	51,48	43,71	42,24	47,19	99,48	152,38
21	Porto Estrela	Santo Antonio	249,00	180,50	174,22	122,37	82,83	66,72	55,89	44,94	41,79	52,95	128,79	254,58
22	Três Marias	São Francisco	1153,57	1048,81	1019,86	565,81	323,24	241,00	182,94	136,38	130,71	153,33	403,78	935,38

APÊNDICE C – GERAÇÃO HIDRELÉTRICA MODELADA NO WEAP (2019 a 2049)

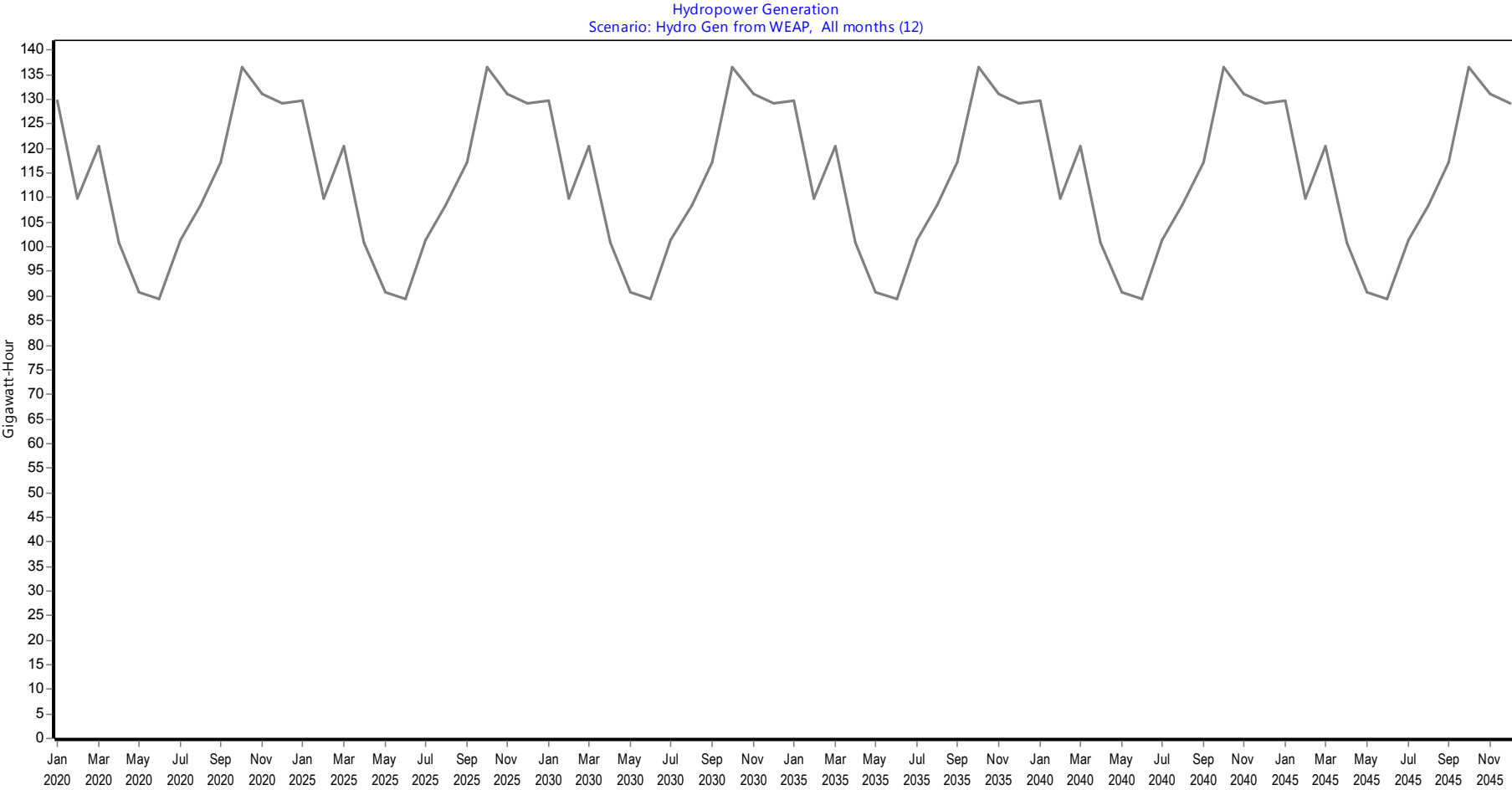
Usina Água Vermelha:



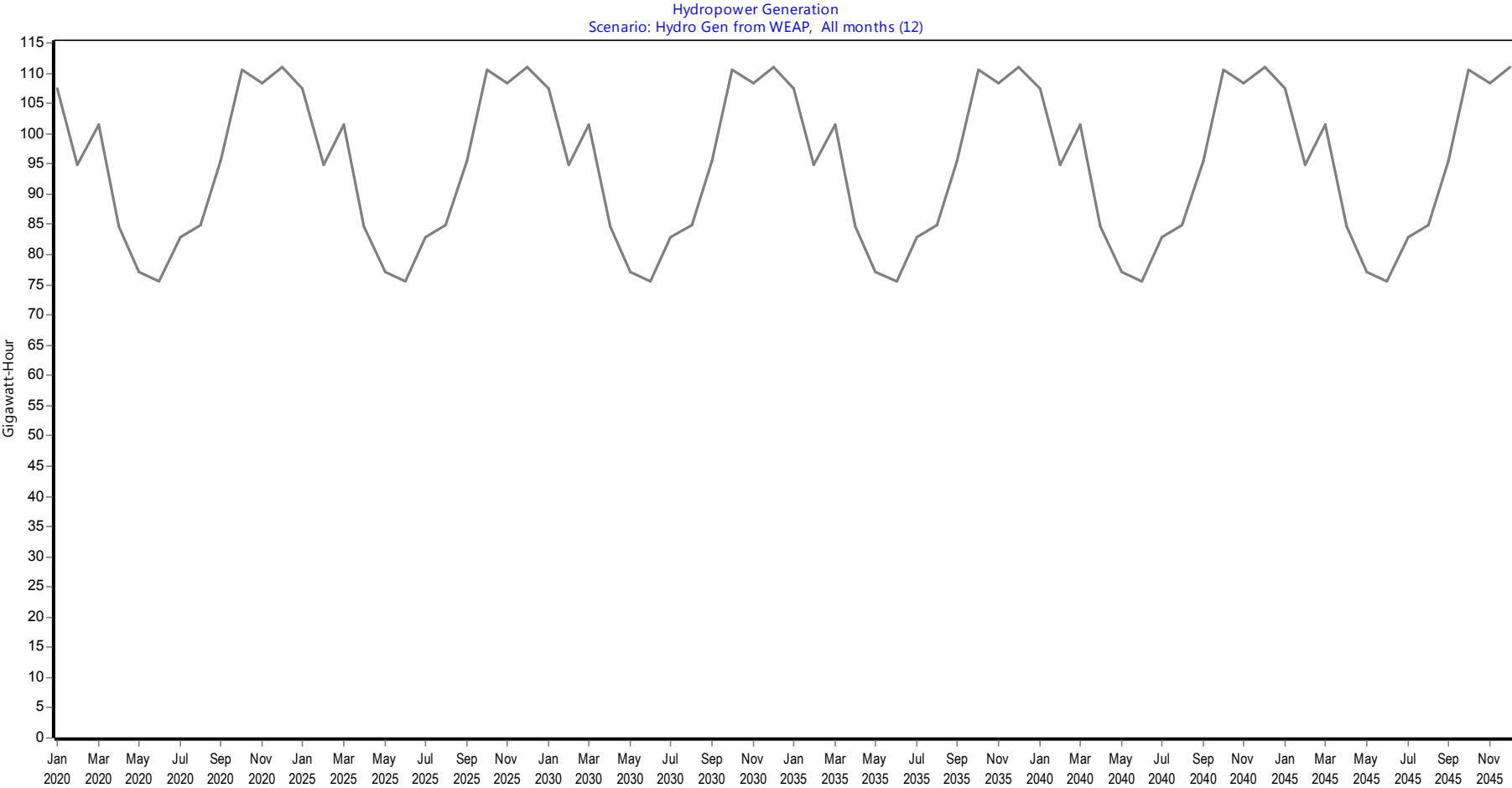
Usina Aimorés:



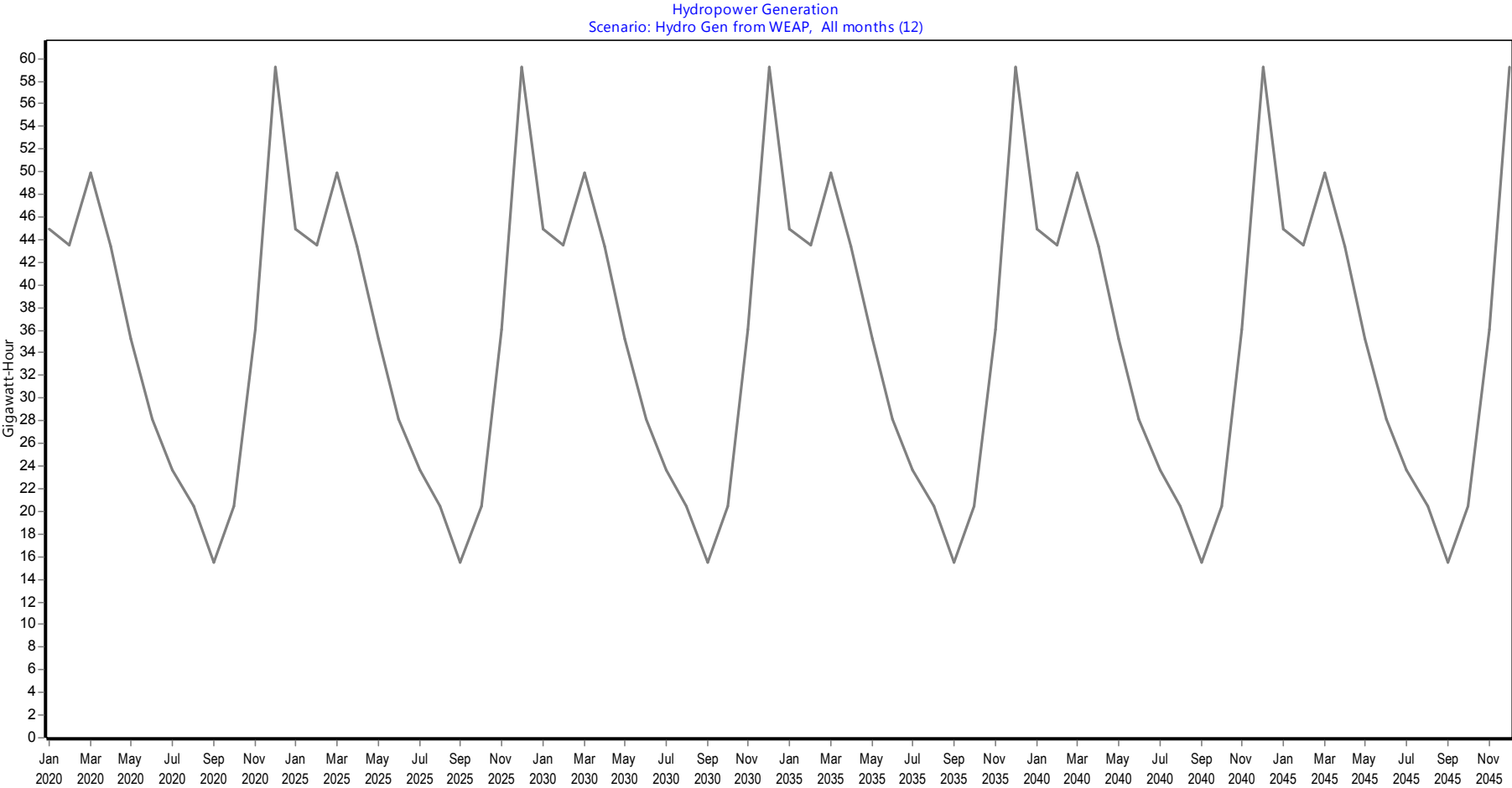
Usina Amador Aguiar I:



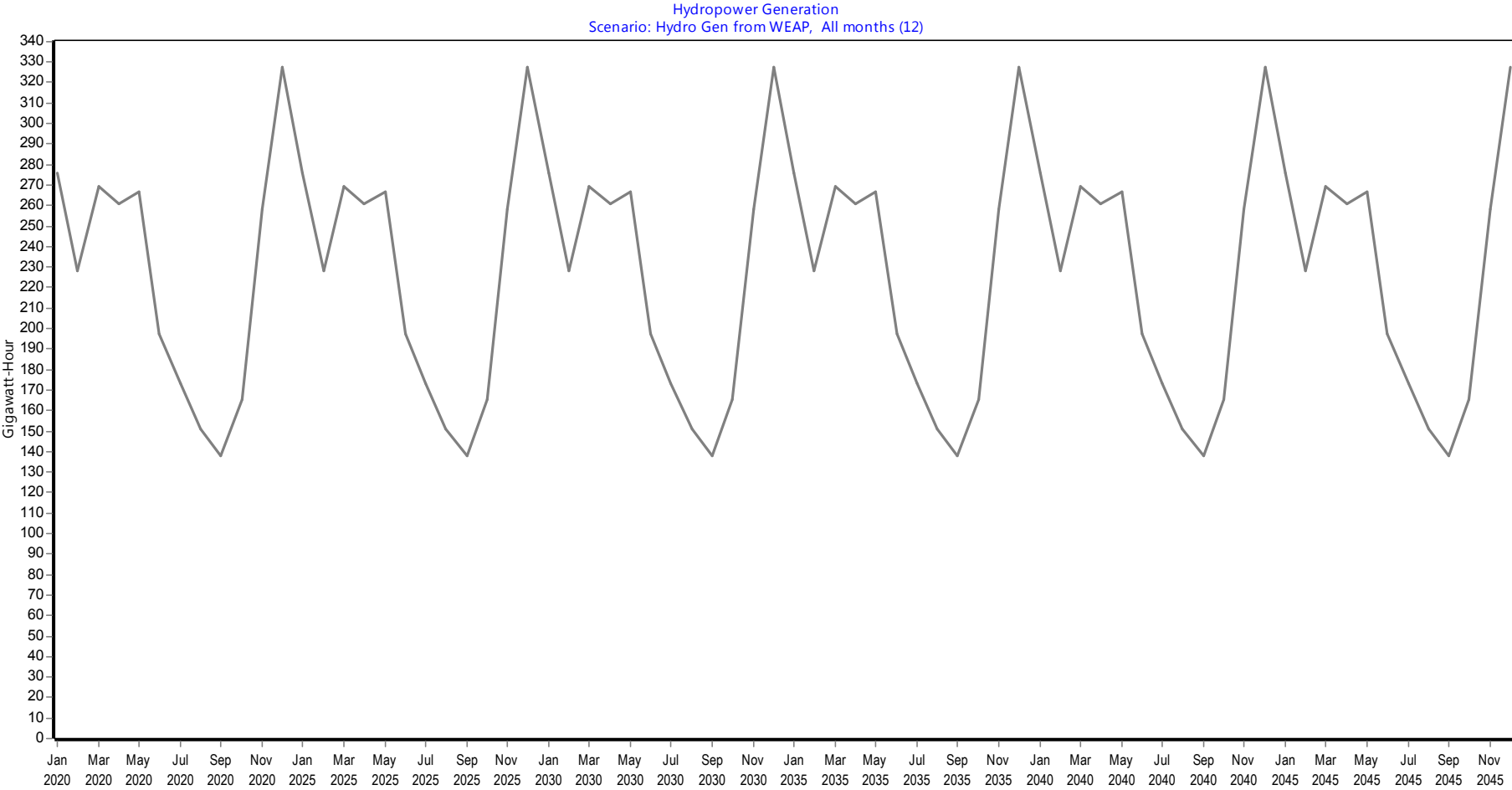
Usina Amador Aguiar II:



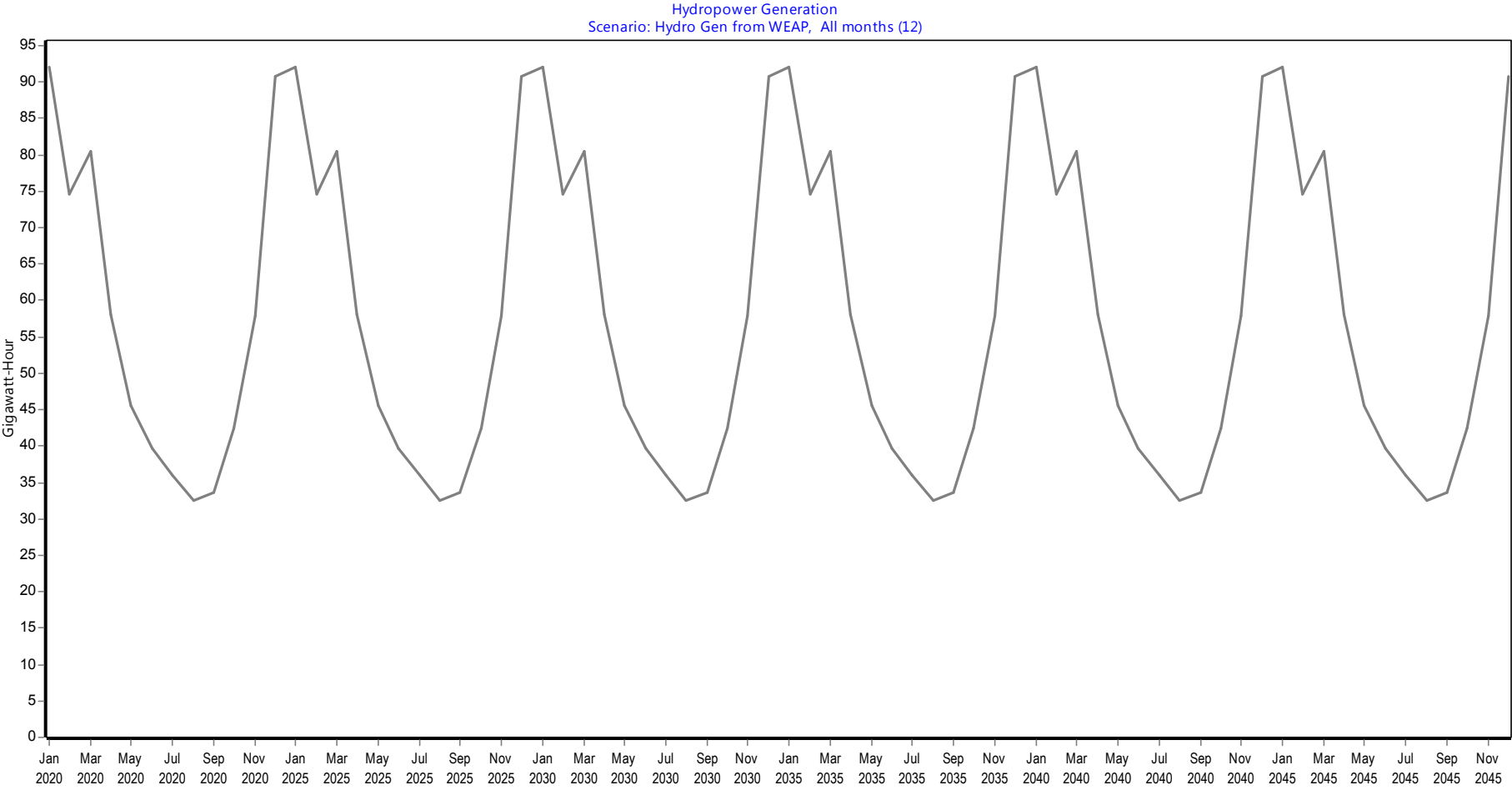
Usina Baguari:



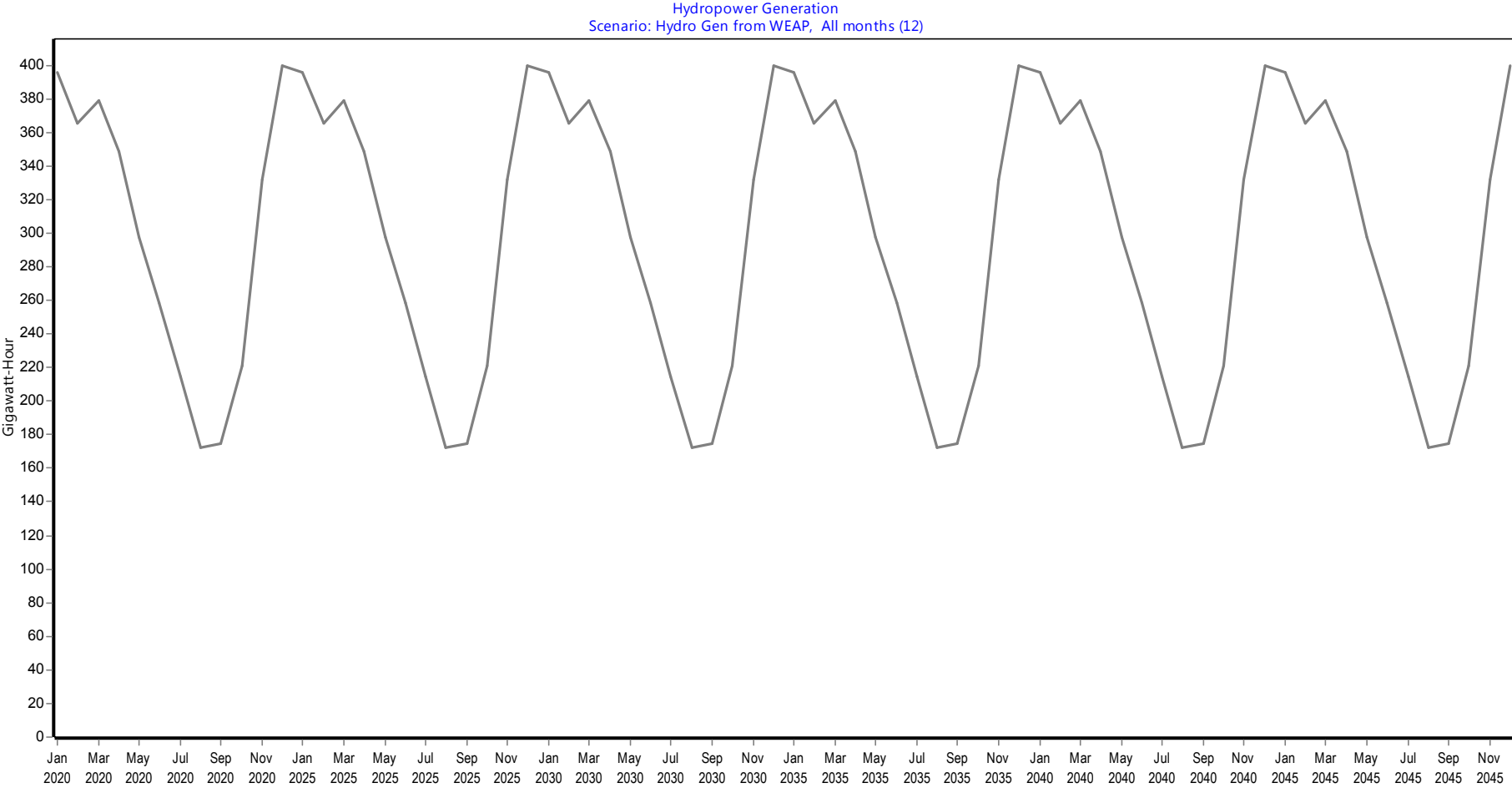
Usina Emborcação:



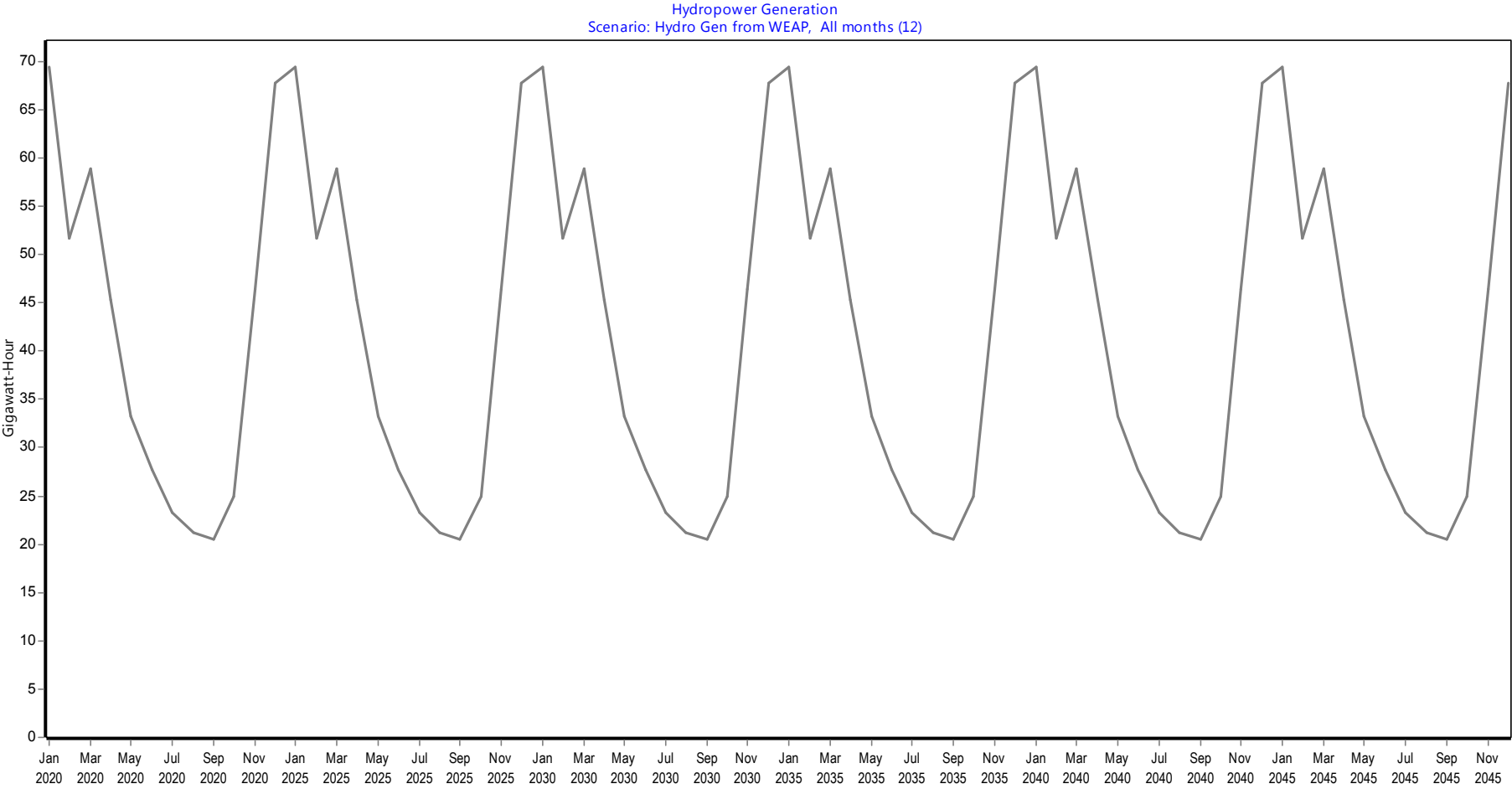
Usina Funil:



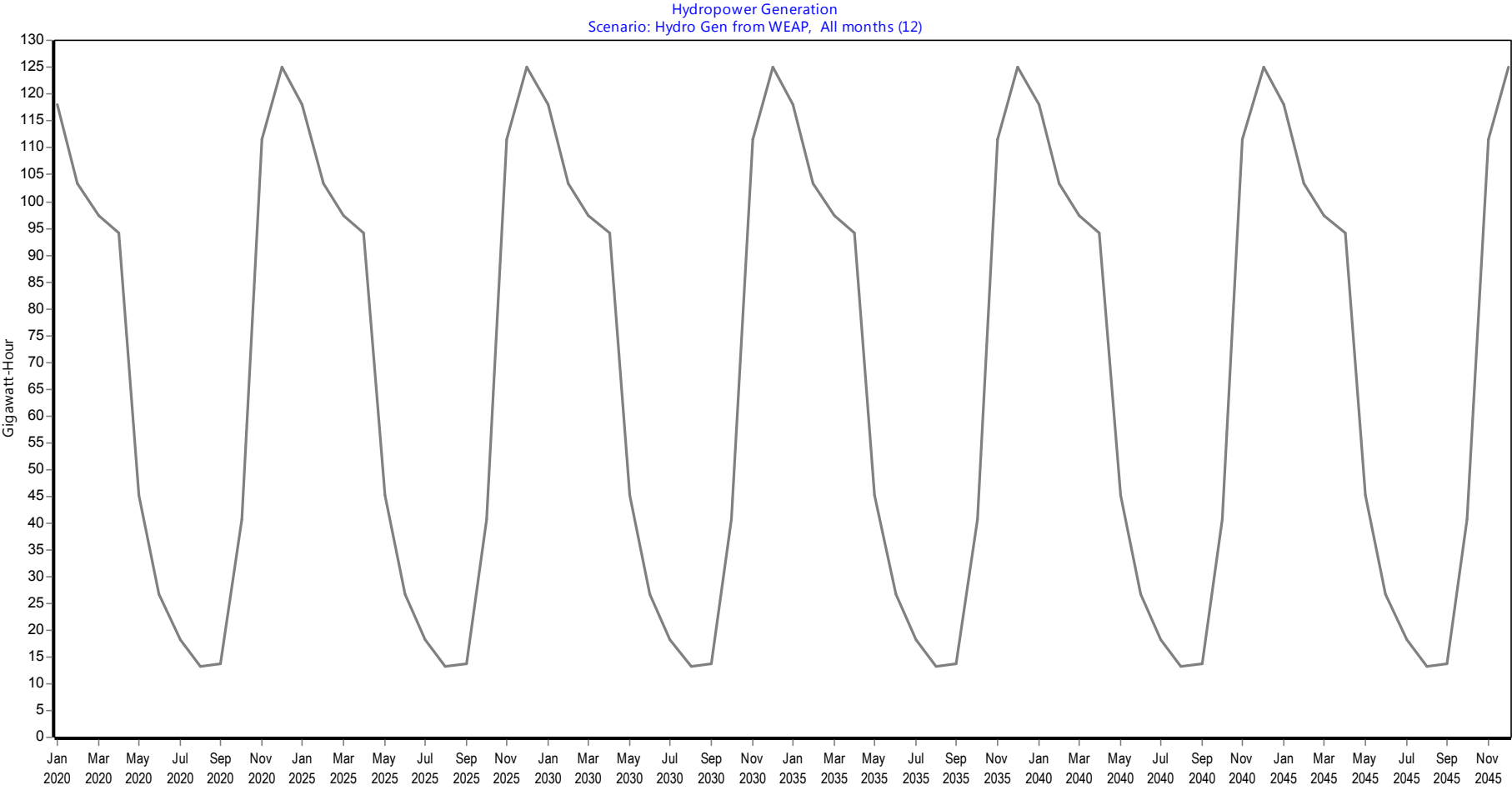
Usina Furnas:



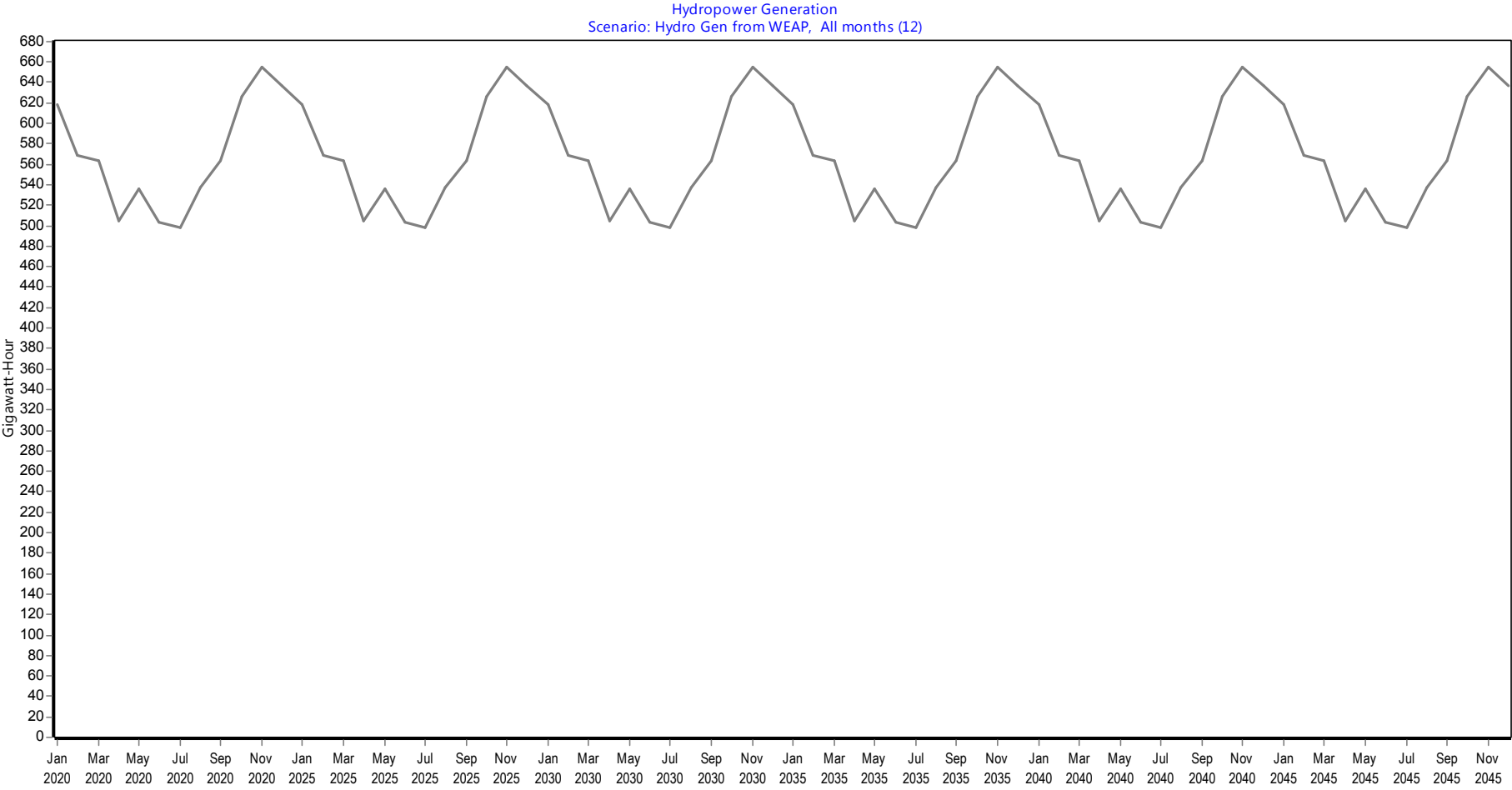
Usina Guilman Amorim:



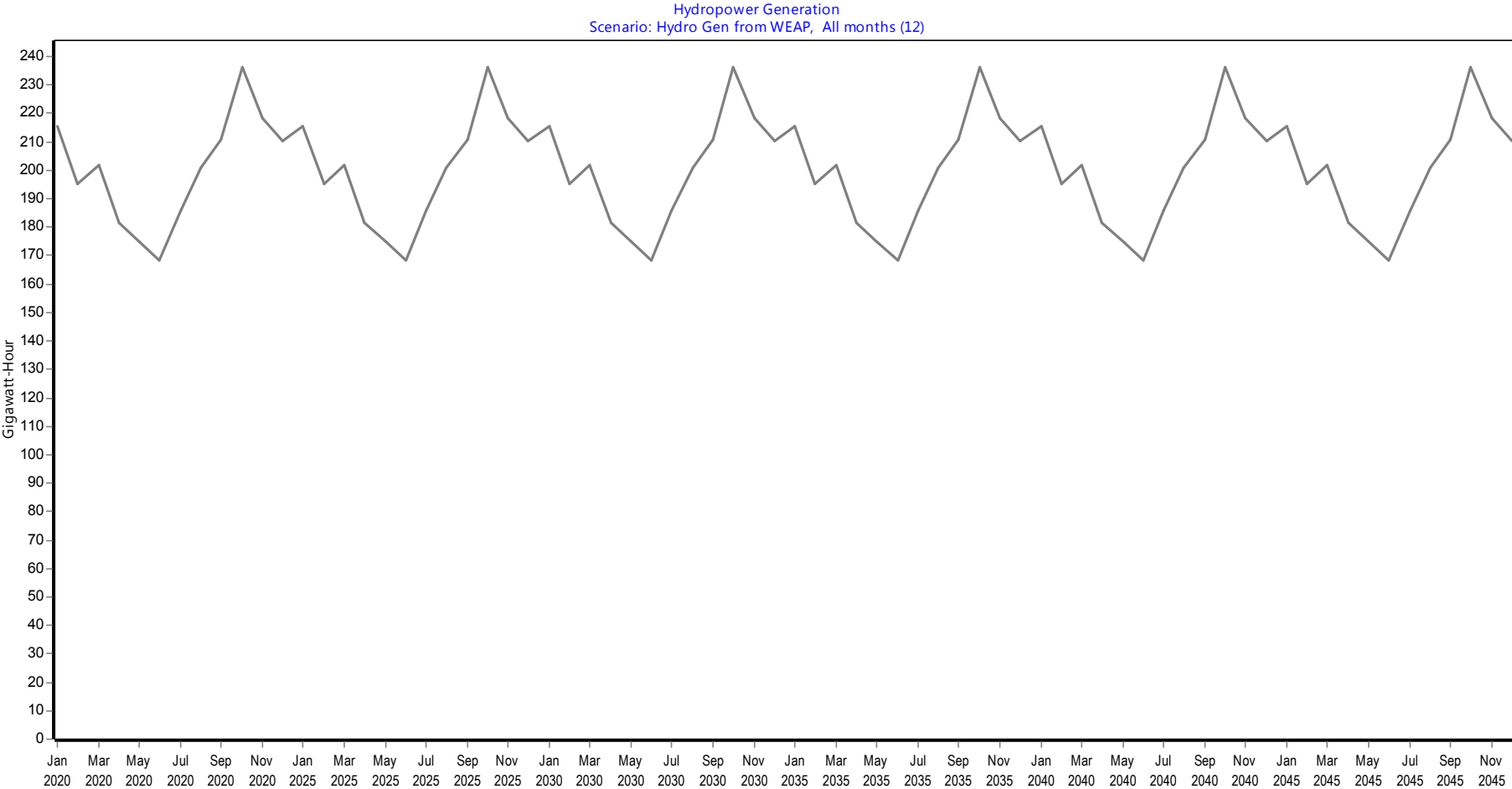
Usina Irapé:



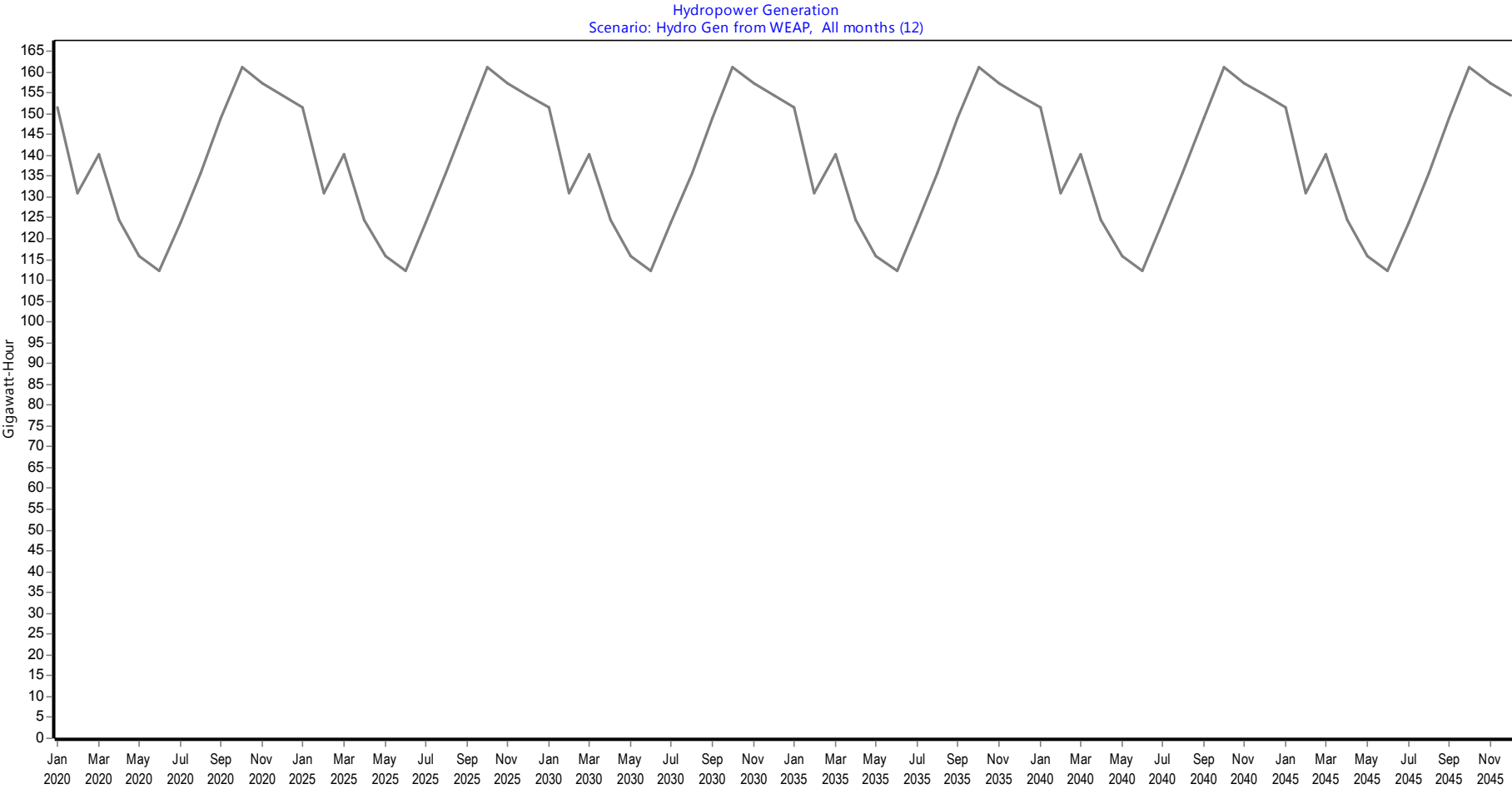
Usina Itumbiara:



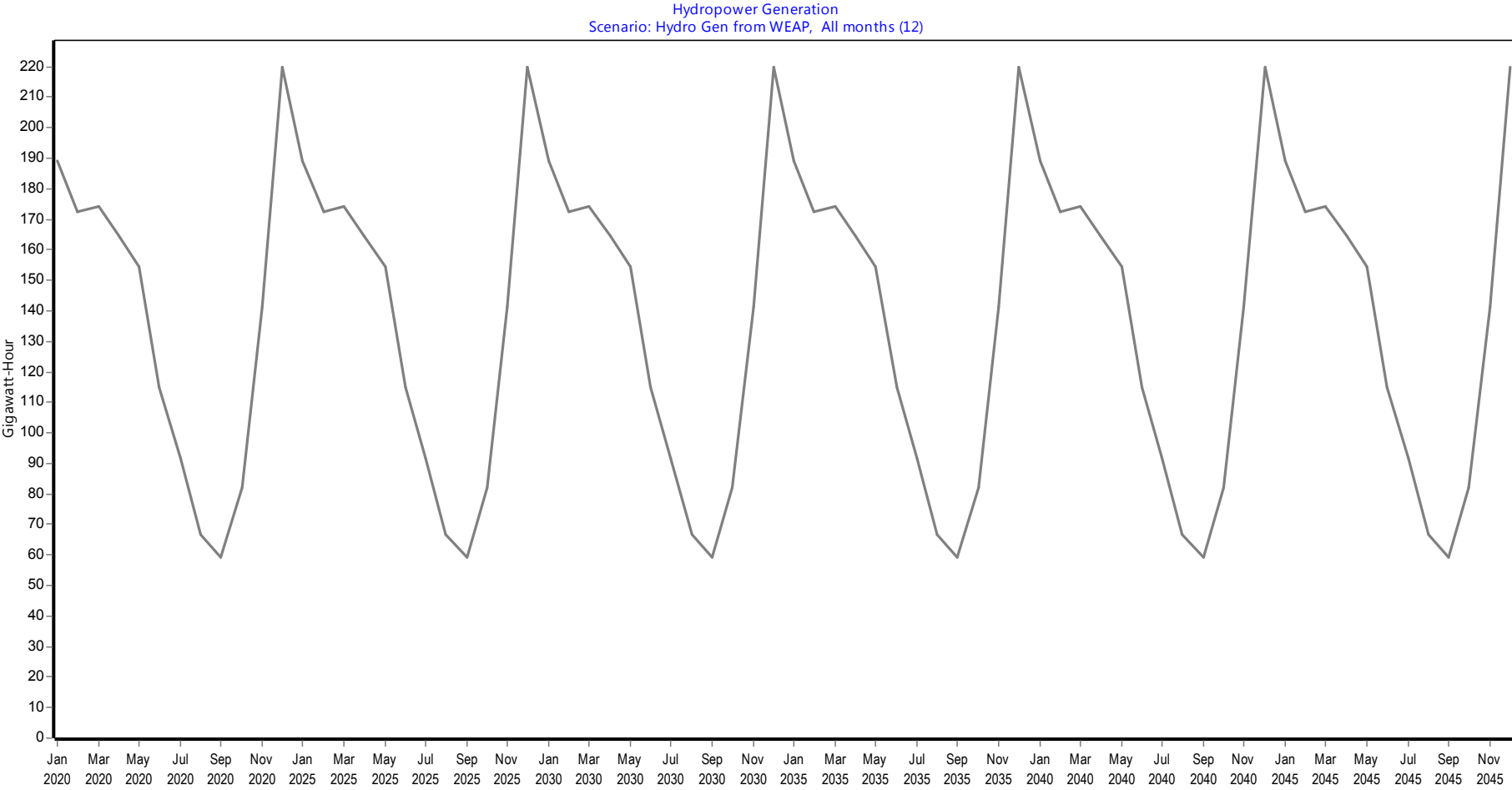
Usina Mal. Mascarenhas de Moraes:



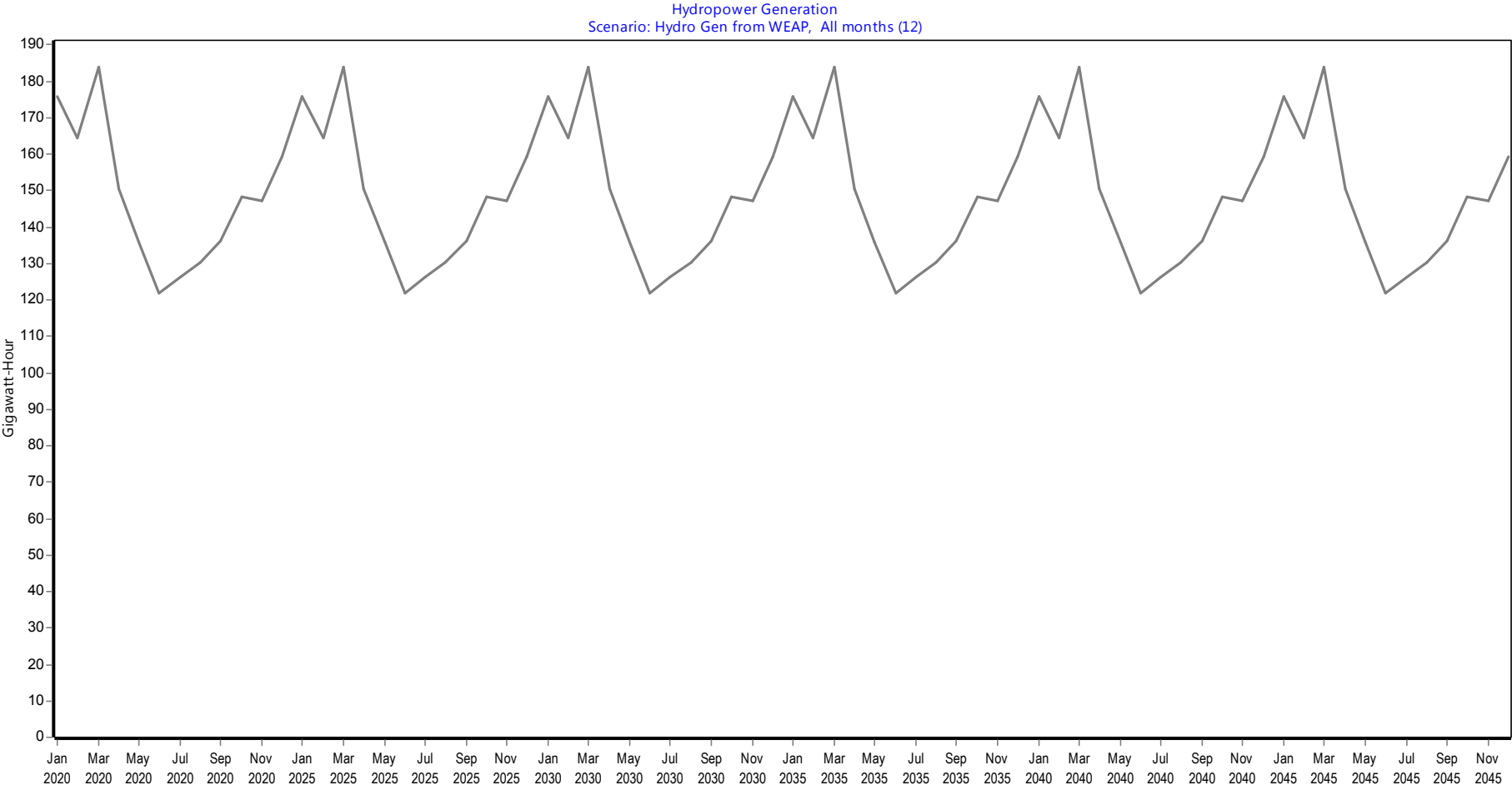
Usina Miranda:



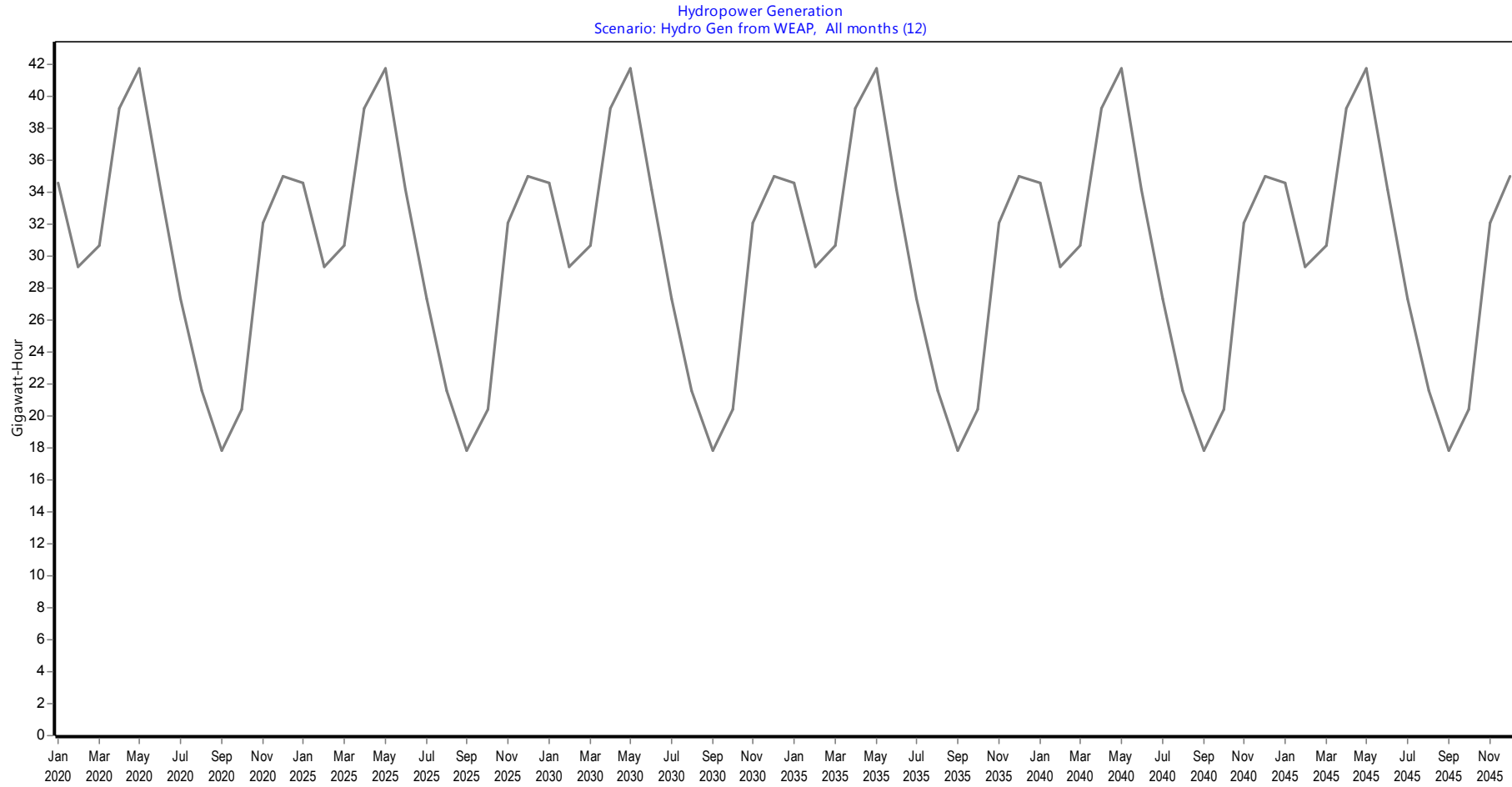
Usina Nova Ponte:



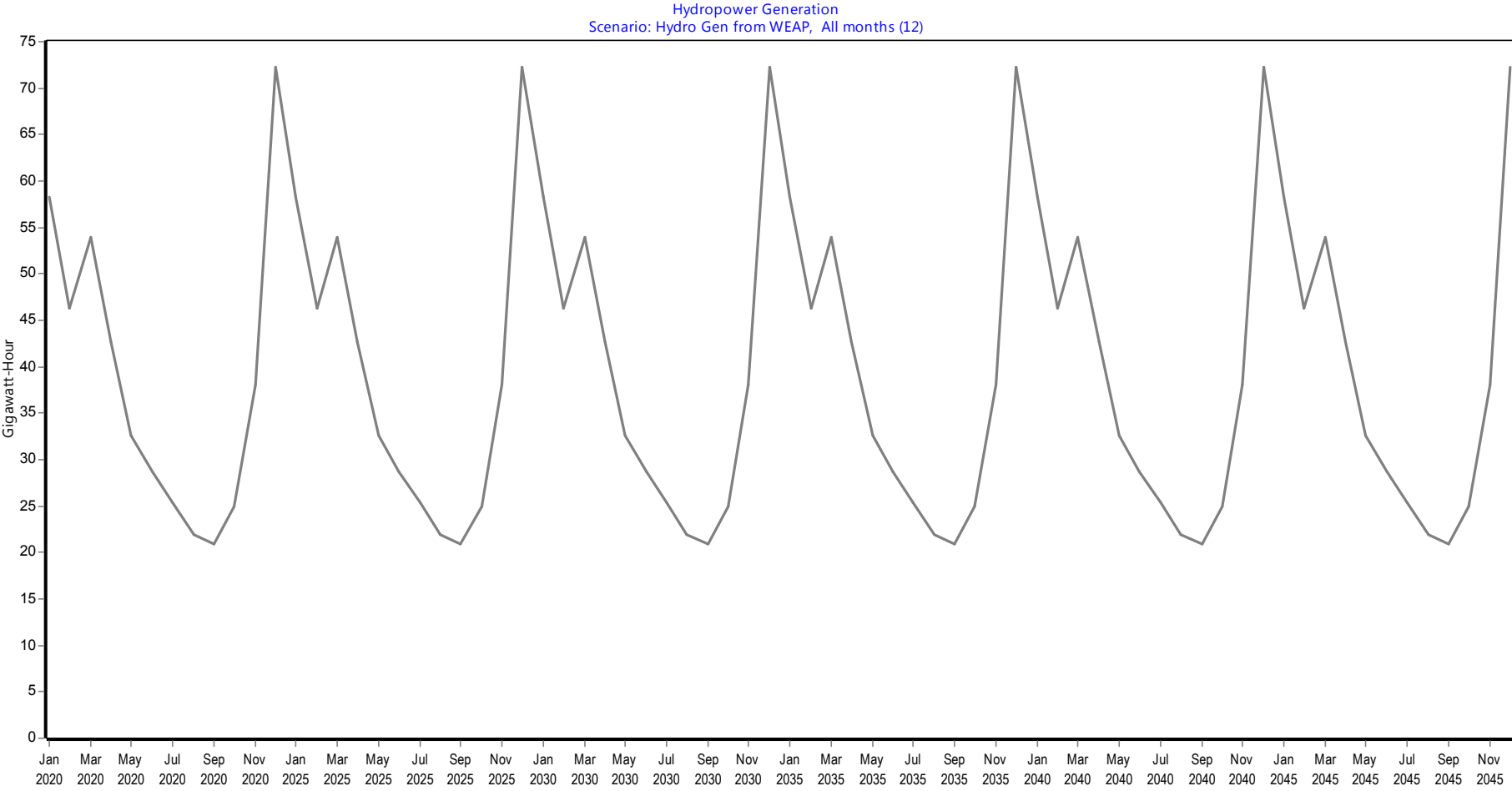
Usina Porto Colômbia:



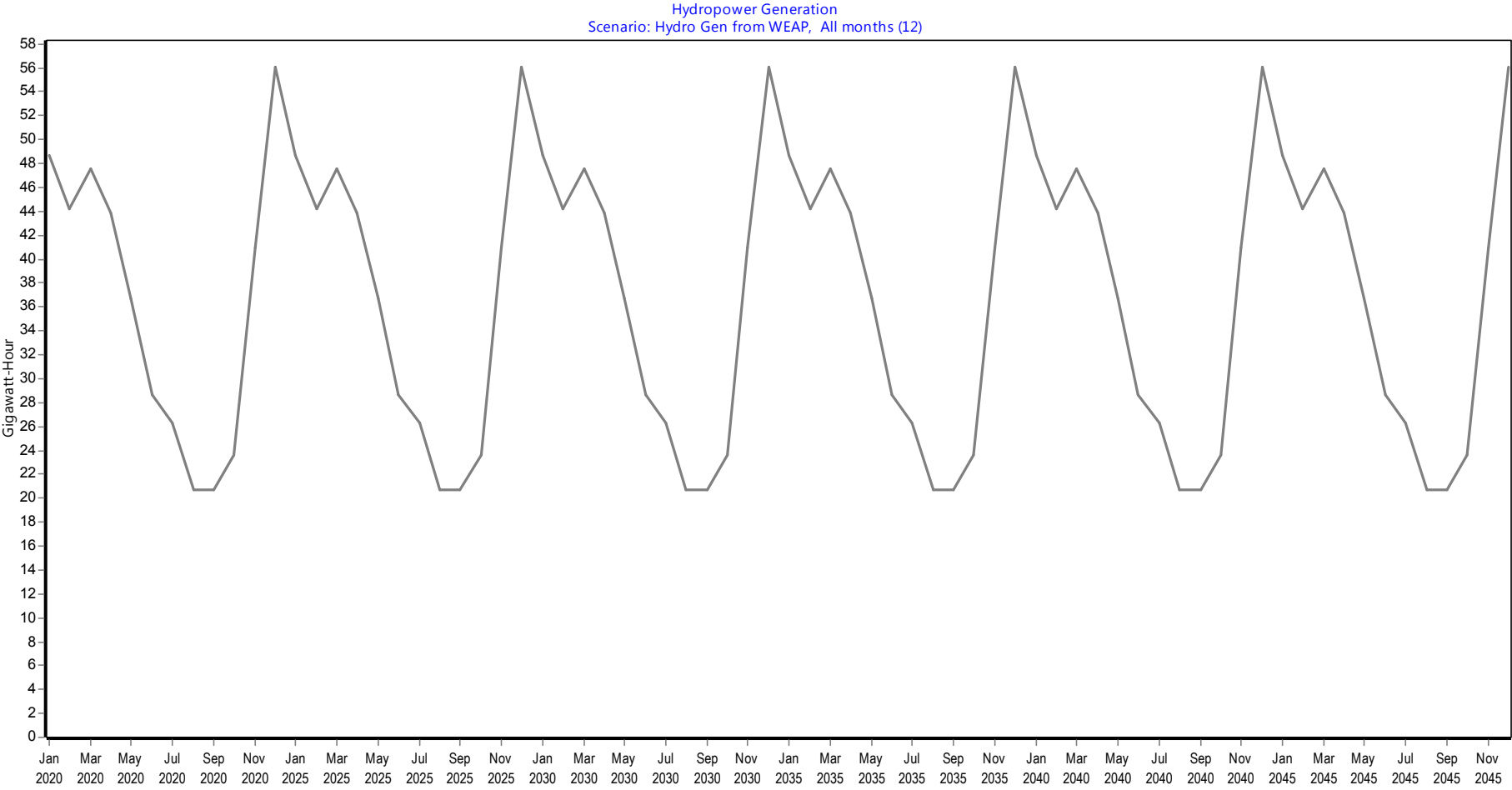
Usina Queimado:



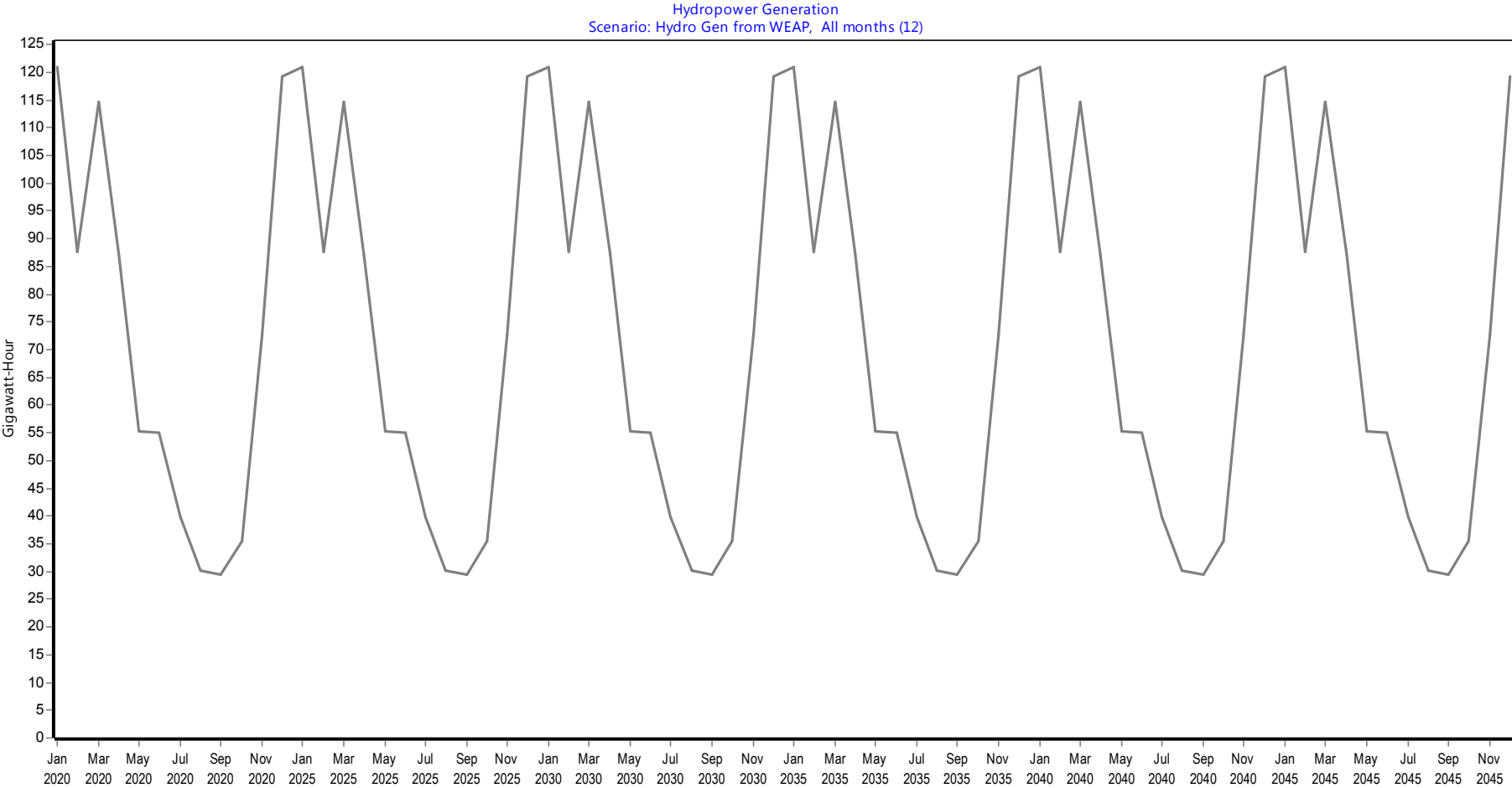
Usina Risoleta Neves:



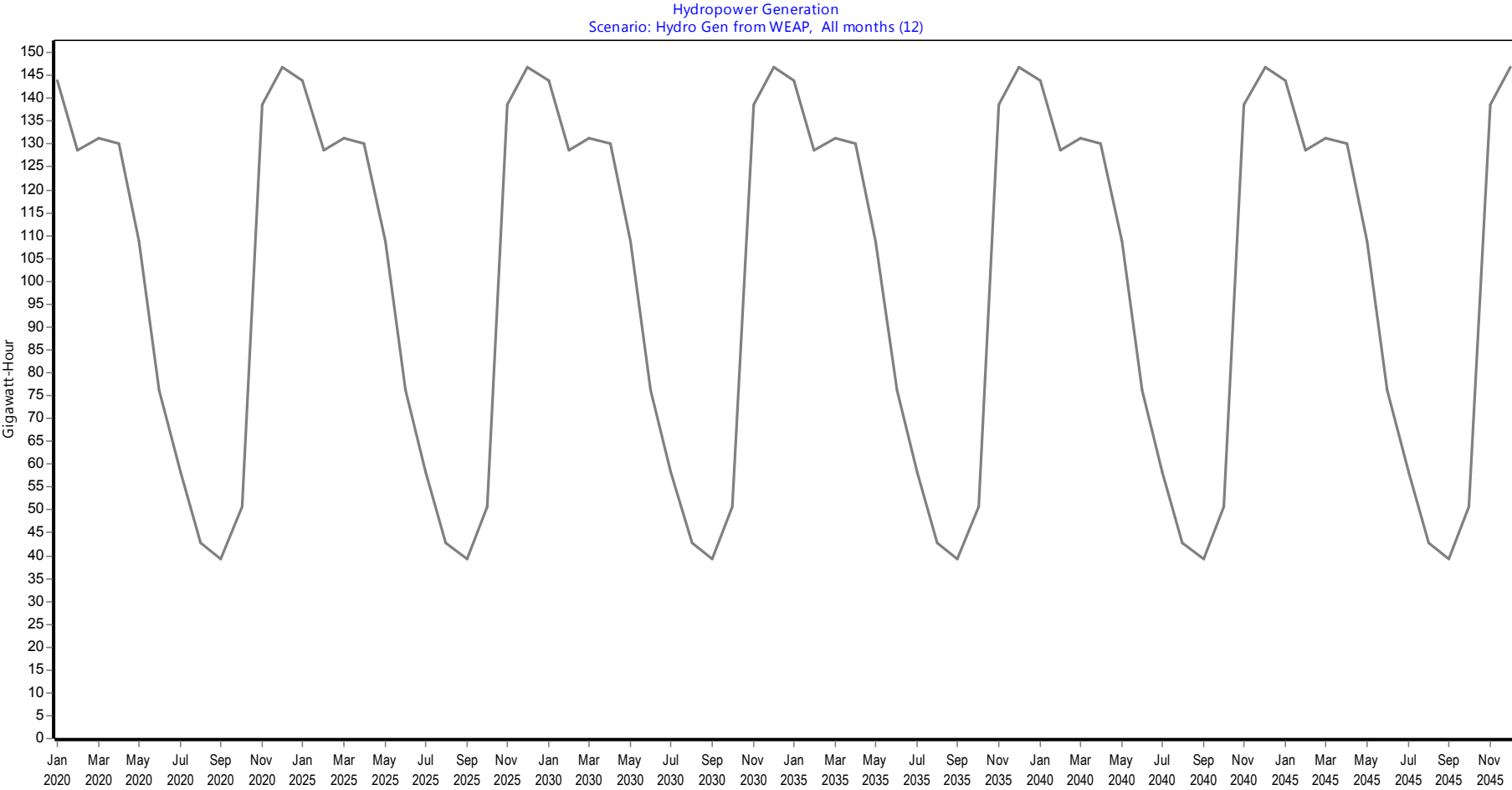
Usina Salto Grande:



Usina Simplício:



Usina Três Marias:



ANEXO 1 – DADOS DAS USINAS (CEMIG)

Definição dos dados das tabelas:

Vol. Máx.(hm³) – Volume máximo em hm³, significa o volume máximo total armazenado no reservatório da usina, em hectômetro cúbico;

Vol. Mín.(hm³) – Volume mínimo em hm³, significa o volume mínimo no reservatório da usina que ainda mantém a geração hidrelétrica, em hectômetro cúbico;

Cota Máx.(m) – Cota máxima em m, significa a cota máxima do reservatório da usina em relação ao nível do mar, em metros;

Cota Mín.(m) – Cota mínima em m, significa a cota mínima do reservatório da usina em relação ao nível do mar, em metros;

Vol. Vert.(hm³) – Volume vertido em hm³, significa o volume de água que escoia pelos vertedouros da usina sem que haja produção de energia, em hectômetro cúbico;

PCV(0)...(4) – Coeficiente do Polinômio Cota-Volume, são os coeficientes do polinômio de até quarto grau, que definem o gráfico do volume do reservatório da usina em função de sua cota.

PAC(0)...(4) - Coeficiente do Polinômio Área-Cota, são os coeficientes do polinômio de até quarto grau, que definem o gráfico da área do reservatório da usina em função de sua cota.

Evap.Men.(1)...(12) – Evaporação mensal de janeiro a dezembro, significa a medida da evaporação média do lago formado pelo reservatório da usina hidrelétrica no período de um mês, em milímetros;

Prod. Esp.(MW/m³/s/m) – Produtibilidade específica é um parâmetro que relaciona a potência gerada (em MW) em razão da vazão (m³/s) por metro, e está relacionado ao rendimento da usina.

Canal de fuga médio(m) – É a cota do canal, em metros, por onde a água que já passou pela turbina da usina (vazão turbinada) segue para formar a vazão defluente.

TEIF% - De acordo com o histórico de taxas de falha devido a fenômenos aleatórios da usina hidrelétrica é definida a taxa equivalente de indisponibilidade forçada (TEIF). Este índice é construído com base em estatística de falhas, em percentual;

IP% - Indisponibilidade Programada, é um índice que reflete o percentual do tempo que a usina fica fora de operação devido à manutenção programada;

Tipo Turbina - As turbinas hidráulicas são classificadas em turbinas de ação e de reação. As turbinas de ação têm a propriedade de transformar a energia cinética portada por um fluido em energia mecânica. Já as turbinas de reação trabalham submersas e aproveitam a energia cinética e de pressão do fluido para obter energia mecânica. Tipos: turbina Francis (Reação), turbina Kaplan (Reação) e turbina Pelton (Ação).

Num.Conj.Máq.- Número de conjuntos de máquinas gerador/turbina da usina.

Num. Pols.Jus.- Não identificado;

Fat.Carga (%) – Fator de carga, significa a taxa de ocupação da usina para a geração de energia, em percentual.

Tipo Perdas(1=%/2=M/3=K) - Não identificado;

Valor Perdas - Não identificado;

Vazão Mín.Hist.(m³/s) – É a vazão histórica mínima registrada em metros cúbicos por segundo;

Num.Unid.Base - Não identificado;

Infl.Vert.Canal de Fuga - Não identificado;

Rep.Conj(0=aprox./1=det/3=simp) - Não identificado;

#Maq(1) – Número de máquinas geradoras da usina;

PotEf(1) – Potência efetiva, significa a máxima potência ativa por máquina geradora, em Watts (W), em regime permanente de operação;

QEf(1) – A vazão turbinada que, submetida à queda efetiva, produz a potência efetiva e é chamada de vazão efetiva ou engolimento efetivo, em metros cúbicos por segundo;

HEf(1) – Queda efetiva ou altura efetiva. Significa a menor queda d'água líquida que permite ao conjunto gerador/turbina geração de potência efetiva, em metros;

Cota(m) – Cota da superfície do reservatório da usina em relação ao nível do mar, em metros;

Área(km²) – Área total ocupada pela usina hidrelétrica, em quilômetros quadrados.

Tabela A-1 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

Usina	Vol.Máx.(hm ³)	Vol.min.(hm ³)	Cota Máx.(m)	Cota min.(m)	Vol.Vert.(hm ³)
FURNAS	22950	5733	768	750	6173,76
M. DE MORAES	4040	1540	666,12	653,12	1895
P. COLOMBIA	1524	1524	467,2	467,2	1524
MARIMBONDO	6150	890	446,3	426	1175,09
A. VERMELHA	11025	5856	383,3	373,3	5856
EMBORCACAO	17725	4669	661	615	10626,45
NOVA PONTE	12792	2412	815	775,5	5500,05
MIRANDA	1120	974	696	693	975
CAPIM BRANC1	241,13	228,27	624	623,3	228,27
CAPIM BRANC2	879	878	565	564,99	878
ITUMBIARA	17027	4573	520	495	6915,6
FUNIL	888	283	466,5	444	405,03
SIMPLICIO	126,5	126,5	251,5	251,5	126,5
SALTO GRANDE	78	78	356	356	78
P. ESTRELA	89	56	255	246	56
CANDONGA	54,44	54,44	327,5	327,5	54,44
BAGUARI	38,07	31,42	185	184,5	31,42
AIMORES	185,52	156,55	90	89	156,55
IRAPE	5963,92	2267,94	510	470,8	2267,94
TRES MARIAS	19528	4250	572,5	549,2	8526,31
QUEIMADO	557	95,25	829	811	212,12
GUILMAN-AMOR	12	12	495	495	12

Tabela A-2 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

Usina	PCV(0)	PCV(1)	PCV(2)	PCV(3)	PCV(4)	PAC(0)	PAC(1)	PAC(2)
FURNAS	7,35E+02	3,50E-03	-1,97E-07	6,92E-12	-9,77E-17	1,79E+05	-3,85E+02	2,21E-02
M. DE MORAES	6,42E+02	8,09E-03	-3,70E-07	-7,11E-11	9,12E-15	6,66E+05	-2,93E+03	4,28E+00
P. COLOMBIA	4,67E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,44E+02	0,00E+00	0,00E+00
MARIMBONDO	4,18E+02	1,12E-02	-2,29E-06	2,91E-10	-1,48E-14	5,86E+05	-3,96E+03	8,86E+00
A. VERMELHA	3,52E+02	5,00E-03	-2,74E-07	7,10E-12	0,00E+00	5,54E+04	-3,15E+02	4,48E-01
EMBORCACAO	5,68E+02	1,45E-02	-1,20E-06	5,83E-11	-1,12E-15	-1,82E+04	5,66E+01	4,52E-02
NOVA PONTE	7,52E+02	1,23E-02	-1,26E-06	7,85E-11	-1,98E-15	-3,23E+05	9,30E+02	-3,85E-01
MIRANDA	6,85E+02	-4,02E-03	-7,94E-07	2,79E-08	-1,42E-11	6,34E+04	-9,56E+01	-6,59E-02
CAPIM BRANC1	5,94E+02	3,52E-01	-2,16E-03	7,36E-06	-9,60E-09	-3,58E+06	2,35E+04	-5,79E+01
CAPIM BRANC2	5,27E+02	1,10E-01	-1,89E-04	1,93E-07	-7,45E-11	1,07E+06	-7,79E+03	2,12E+01
ITUMBIARA	4,71E+02	7,28E-03	-5,61E-07	2,60E-11	-4,85E-16	-8,75E+05	5,33E+03	-1,09E+01
FUNIL	4,21E+02	1,04E-01	-9,57E-05	4,00E-08	0,00E+00	2,95E+04	-1,93E+02	4,18E-01
SIMPLICIO	2,52E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,14E+01	0,00E+00	0,00E+00
SALTO GRANDE	3,56E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,80E+00	0,00E+00	0,00E+00
P. ESTRELA	2,31E+02	2,72E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-2,70E+01	1,22E-01	0,00E+00
CANDONGA	2,84E+02	2,59E+00	-8,33E-02	1,45E-03	-9,41E-06	3,33E+03	-4,37E+01	2,15E-01
BAGUARI	1,80E+02	1,73E-01	-1,41E-03	0,00E+00	0,00E+00	-6,14E+02	3,40E+00	-1,27E-07
AIMORES	7,99E+01	1,03E-01	-4,82E-04	1,54E-06	-1,94E-09	-1,62E+05	7,31E+03	-1,24E+02
IRAPE	4,15E+02	3,53E-02	-5,88E-06	5,82E-10	-2,34E-14	4,77E+03	-2,22E+01	2,36E-02
TRES MARIAS	5,30E+02	6,08E-03	-4,84E-07	2,20E-11	-3,85E-16	1,21E+07	-8,93E+04	2,48E+02
QUEIMADO	8,02E+02	1,14E-01	-1,98E-04	1,44E-07	-2,49E-17	-7,22E+06	2,65E+04	-3,25E+01
GUILMAN-AMOR	4,95E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tabela A-3 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

Usina	PAC(3)	PAC(4)	Evap.Men.(1)	Evap.Men.(2)	Evap.Men.(3)	Evap.Men.(4)
FURNAS	2,33E-04	0,00E+00	13	2	25	40
M. DE MORAES	-2,07E-03	0,00E+00	12	2	19	37
P. COLOMBIA	0,00E+00	0,00E+00	9	8	27	55
MARIMBONDO	-6,59E-03	0,00E+00	12	11	30	58
A. VERMELHA	0,00E+00	0,00E+00	12	16	30	53
EMBORCACAO	-2,91E-04	2,39E-07	0	2	16	36
NOVA PONTE	-8,80E-04	6,76E-07	16	7	23	40
MIRANDA	2,46E-05	1,14E-07	7	4	18	37
CAPIM BRANC1	6,34E-02	-2,60E-05	2	0	18	38
CAPIM BRANC2	-2,58E-02	1,17E-05	2	0	18	40
ITUMBIARA	7,38E-03	0,00E+00	6	1	19	42
FUNIL	-3,01E-04	0,00E+00	-40	-34	-11	24
SIMPLICIO	0,00E+00	0,00E+00	-45	-29	-7	22
SALTO GRANDE	0,00E+00	0,00E+00	-43	-10	11	28
P. ESTRELA	0,00E+00	0,00E+00	-26	-8	14	32
CANDONGA	-4,71E-04	3,87E-07	-41	-15	6	23
BAGUARI	0,00E+00	0,00E+00	-11	5	37	57
AIMORES	9,29E-01	-2,62E-03	-22	-18	24	57
IRAPE	1,36E-05	-1,87E-08	-18	3	29	49
TRES MARIAS	-3,06E-01	1,42E-04	-1	-2	28	47
QUEIMADO	1,33E-02	0,00E+00	21	4	21	33
GUILMAN-AMOR	0,00E+00	0,00E+00	-38	-20	4	20

Tabela A-4 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

Usina	Evap.Men.(5)	Evap.Men.(6)	Evap.Men.(7)	Evap.Men.(8)	Evap.Men.(9)
FURNAS	52	51	43	42	39
M. DE MORAES	49	46	42	40	38
P. COLOMBIA	67	68	57	55	52
MARIMBONDO	71	72	59	58	54
A. VERMELHA	73	74	65	61	58
EMBORCACAO	53	54	54	50	45
NOVA PONTE	61	65	67	66	54
MIRANDA	54	54	53	52	41
CAPIM BRANC1	51	51	48	46	45
CAPIM BRANC2	55	56	53	49	50
ITUMBIARA	58	62	60	56	58
FUNIL	51	56	66	71	48
SIMPLICIO	53	71	81	75	54
SALTO GRANDE	46	65	97	87	64
P. ESTRELA	63	81	104	82	60
CANDONGA	48	67	90	81	59
BAGUARI	76	71	72	42	31
AIMORES	84	81	64	39	19
IRAPE	65	86	111	119	96
TRES MARIAS	61	61	58	49	49
QUEIMADO	59	70	77	79	80
GUILMAN-AMOR	41	54	78	79	52

Tabela A-5 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

Usina	Evap.Men.(10)	Evap.Men.(11)	Evap.Men.(12)	Prod.Esp.(MW/m ³ /s/m)
FURNAS	18	12	27	0,008633
M. DE MORAES	15	5	25	0,00834
P. COLOMBIA	29	6	32	0,00873
MARIMBONDO	27	5	33	0,008535
A. VERMELHA	23	3	27	0,008829
EMBORCACAO	16	5	19	0,008731
NOVA PONTE	25	13	33	0,009223
MIRANDA	15	5	26	0,009117
CAPIM BRANC1	18	6	25	0,008829
CAPIM BRANC2	19	4	23	0,008829
ITUMBIARA	22	5	23	0,008829
FUNIL	8	-21	-36	0,00824
SIMPLICIO	20	-10	-38	0,008849
SALTO GRANDE	39	8	-19	0,00826
P. ESTRELA	32	3	-21	0,009055
CANDONGA	37	5	-25	0,009074
BAGUARI	21	11	-1	0,009221
AIMORES	4	-14	-12	0,009123
IRAPE	54	20	-8	0,009025
TRES MARIAS	35	21	22	0,008564
QUEIMADO	51	17	51	0,008829
GUILMAN-AMOR	32	2	-22	0,008829

Tabela A-6 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

Usina	Canal Fuga Médio(m)	TEIF(%)	IP(%)	Tipo Turbina	Num.Conj.Máq.
FURNAS	672,9	5,881	11,119	1 - Francis	2
M. DE MORAES	622	7,686	5,523	1 - Francis	4
P. COLOMBIA	443,4	10,451	4,553	2 - Kaplan/Propeller	1
MARIMBONDO	382,8	5,068	3,935	1 - Francis	1
A. VERMELHA	326,4	0,257	3,987	1 - Francis	1
EMBORCACAO	521,9	4,103	4,109	1 - Francis	1
NOVA PONTE	696	6,002	1,888	1 - Francis	1
MIRANDA	625,2	1,609	4,311	1 - Francis	1
CAPIM BRANC1	565	0,472	3,436	1 - Francis	1
CAPIM BRANC2	518,4	2,566	2,879	1 - Francis	1
ITUMBIARA	435,6	0,783	5,12	1 - Francis	1
FUNIL	394,3	1,877	5,41	1 - Francis	1
SIMPLICIO	140	8,125	10,908	1 - Francis	1
SALTO GRANDE	255,1	0,673	3,092	1 - Francis	2
P. ESTRELA	204	0,971	1,334	2 - Kaplan/Propeller	1
CANDONGA	277,08	0,321	1,63	2 - Kaplan/Propeller	1
BAGUARI	167	0,521	3,53	2 - Kaplan/Propeller	1
AIMORES	62,5	0,339	2,867	2 - Kaplan/Propeller	1
IRAPE	331,48	1,211	4,449	1 - Francis	1
TRES MARIAS	515,7	2,733	8,483	2 - Kaplan/Propeller	1
QUEIMADO	637,5	2,619	2,457	1 - Francis	1
GUILMAN-AMOR	375,5	17,834	9,264	1 - Francis	1

Tabela A-7 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

Usina	Num.Pols.Jus.	Fat.Carga Máx.(%)	Fat.Carga mín.(%)	Tipo Perdas(1=%/2=M/3=K)
FURNAS	1	100	0	1
M. DE MORAES	1	100	0	1
P. COLOMBIA	1	100	0	1
MARIMBONDO	1	100	0	1
A. VERMELHA	1	100	0	1
EMBORCACAO	5	100	0	1
NOVA PONTE	1	100	0	2
MIRANDA	1	100	0	2
CAPIM BRANC1	1	100	0	2
CAPIM BRANC2	1	100	0	2
ITUMBIARA	1	100	0	1
FUNIL	1	100	0	2
SIMPLICIO	1	100	0	1
SALTO GRANDE	1	100	0	1
P. ESTRELA	1	100	0	2
CANDONGA	1	100	0	2
BAGUARI	1	100	0	2
AIMORES	1	100	0	2
IRAPE	1	100	0	2
TRES MARIAS	1	100	0	2
QUEIMADO	1	100	0	2
GUILMAN-AMOR	1	100	0	2

Tabela A-8 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

Usina	Valor Perdas	Vazão Mín.Hist.(m3/s)	Num.Unid.Base	Infl.Vert.Canal de Fuga
FURNAS	1,09	102	4	Yes
M. DE MORAES	0,8	113	8	Yes
P. COLOMBIA	1,9	143	3	Yes
MARIMBONDO	1,6	245	4	Yes
A. VERMELHA	1,11	364	3	No
EMBORCACAO	1,27	48	2	No
NOVA PONTE	0,93	40	2	Yes
MIRANDA	2,4	42	2	No
CAPIM BRANC1	1,8	42	3	No
CAPIM BRANC2	1,1	42	2	Yes
ITUMBIARA	1,2	187	3	Yes
FUNIL	1,5	50	2	Yes
SIMPLICIO	6	0	2	Yes
SALTO GRANDE	6,06	18	1	No
P. ESTRELA	1	19	2	Yes
CANDONGA	0,4	28	2	Yes
BAGUARI	0,4	78	3	Yes
AIMORES	0,4	91	2	No
IRAPE	2,7	5	3	Yes
TRES MARIAS	0,6	27	4	Yes
QUEIMADO	5,8	4	2	No
GUILMAN-AMOR	3,5	11	3	No

Tabela A-9 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

Usina	Rep.Conj(0=aprox/1=det/2=simp)	#Maq(1)	PotEf(1)	QEf(1)	HEf(1)
FURNAS	2	6	164	211	90
M. DE MORAES	2	2	38	109	41,8
P. COLOMBIA	2	4	82	497	18,9
MARIMBONDO	2	8	186	368	59,2
A. VERMELHA	2	6	232,7	493	53,5
EMBORCACAO	2	4	298	262	130,3
NOVA PONTE	2	3	170	192	96
MIRANDA	2	3	136	225	66,4
CAPIM BRANC1	2	3	80	165	55
CAPIM BRANC2	2	3	70	179	44,4
ITUMBIARA	2	6	347	490	80,2
FUNIL	2	3	74	129	69,6
SIMPLICIO	2	3	101,9	103	111,46
SALTO GRANDE	2	2	27	35	93
P. ESTRELA	2	2	56	124	49,8
CANDONGA	2	3	46,7	106	48,6
BAGUARI	2	4	35	218	17,4
AIMORES	2	3	110	432	27,9
IRAPE	2	3	133	89	166,4
TRES MARIAS	2	6	66	154	50,2
QUEIMADO	2	3	35	24	168,1
GUILMAN-AMOR	2	4	35	34	116,8

Tabela A-10 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

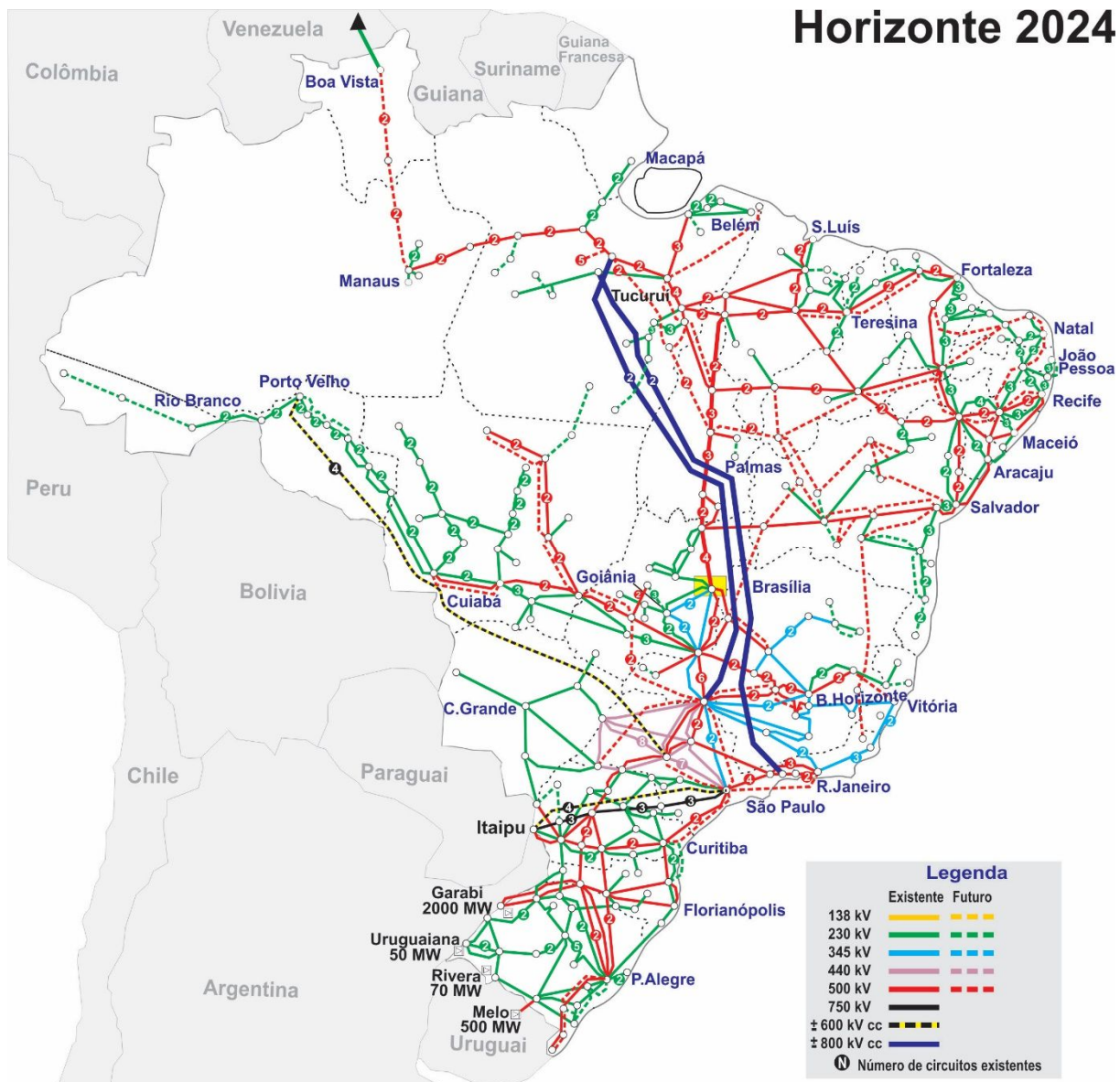
Usina	#Maq(2)	PotEf(2)	QEf(2)	HEf(2)	#Maq(3)	PotEf(3)	QEf(3)
FURNAS	2	164	213	89,3	0	0	0
M. DE MORAES	2	45	123	43,9	4	51	142
P. COLOMBIA	0	0	0	0	0	0	0
MARIMBONDO	0	0	0	0	0	0	0
A. VERMELHA	0	0	0	0	0	0	0
EMBORCACAO	0	0	0	0	0	0	0
NOVA PONTE	0	0	0	0	0	0	0
MIRANDA	0	0	0	0	0	0	0
CAPIM BRANC1	0	0	0	0	0	0	0
CAPIM BRANC2	0	0	0	0	0	0	0
ITUMBIARA	0	0	0	0	0	0	0
FUNIL	0	0	0	0	0	0	0
SIMPLICIO	0	0	0	0	0	0	0
SALTO GRANDE	2	24	31	93	0	0	0
P. ESTRELA	0	0	0	0	0	0	0
CANDONGA	0	0	0	0	0	0	0
BAGUARI	0	0	0	0	0	0	0
AIMORES	0	0	0	0	0	0	0
IRAPE	0	0	0	0	0	0	0
TRES MARIAS	0	0	0	0	0	0	0
QUEIMADO	0	0	0	0	0	0	0
GUILMAN-AMOR	0	0	0	0	0	0	0

Tabela A-11 – Parâmetros das Usinas Hidrelétricas

Usina	HEf(3)	#Maq(4)	PotEf(4)	QEf(4)	HEf(4)	Cota (m)	Área (km²)
FURNAS	0	0	0	0	0	768,00	1.442,10
M. DE MORAES	43,2	2	54	148	43,8	666,16	263,55
P. COLOMBIA	0	0	0	0	0	467,20	143,90
MARIMBONDO	0	0	0	0	0	446,32	438,87
A. VERMELHA	0	0	0	0	0	383,30	643,52
EMBORCACAO	0	0	0	0	0	661,00	477,68
NOVA PONTE	0	0	0	0	0	815,00	442,43
MIRANDA	0	0	0	0	0	695,99	50,52
CAPIM BRANC1	0	0	0	0	0	624,09	31,16
CAPIM BRANC2	0	0	0	0	0	565,00	54,50
ITUMBIARA	0	0	0	0	0	520,00	797,10
FUNIL	0	0	0	0	0	466,50	39,53
SIMPLICIO	0	0	0	0	0	251,50	11,36
SALTO GRANDE	0	0	0	0	0	356,00	5,80
P. ESTRELA	0	0	0	0	0	254,99	4,20
CANDONGA	0	0	0	0	0	328,88	2,86
BAGUARI	0	0	0	0	0	185,00	14,16
AIMORES	0	0	0	0	0	89,99	32,56
IRAPE	0	0	0	0	0	510,00	137,16
TRES MARIAS	0	0	0	0	0	572,71	1.073,70
QUEIMADO	0	0	0	0	0	829,00	64,02
GUILMAN-AMOR	0	0	0	0	0	495,00	1,00

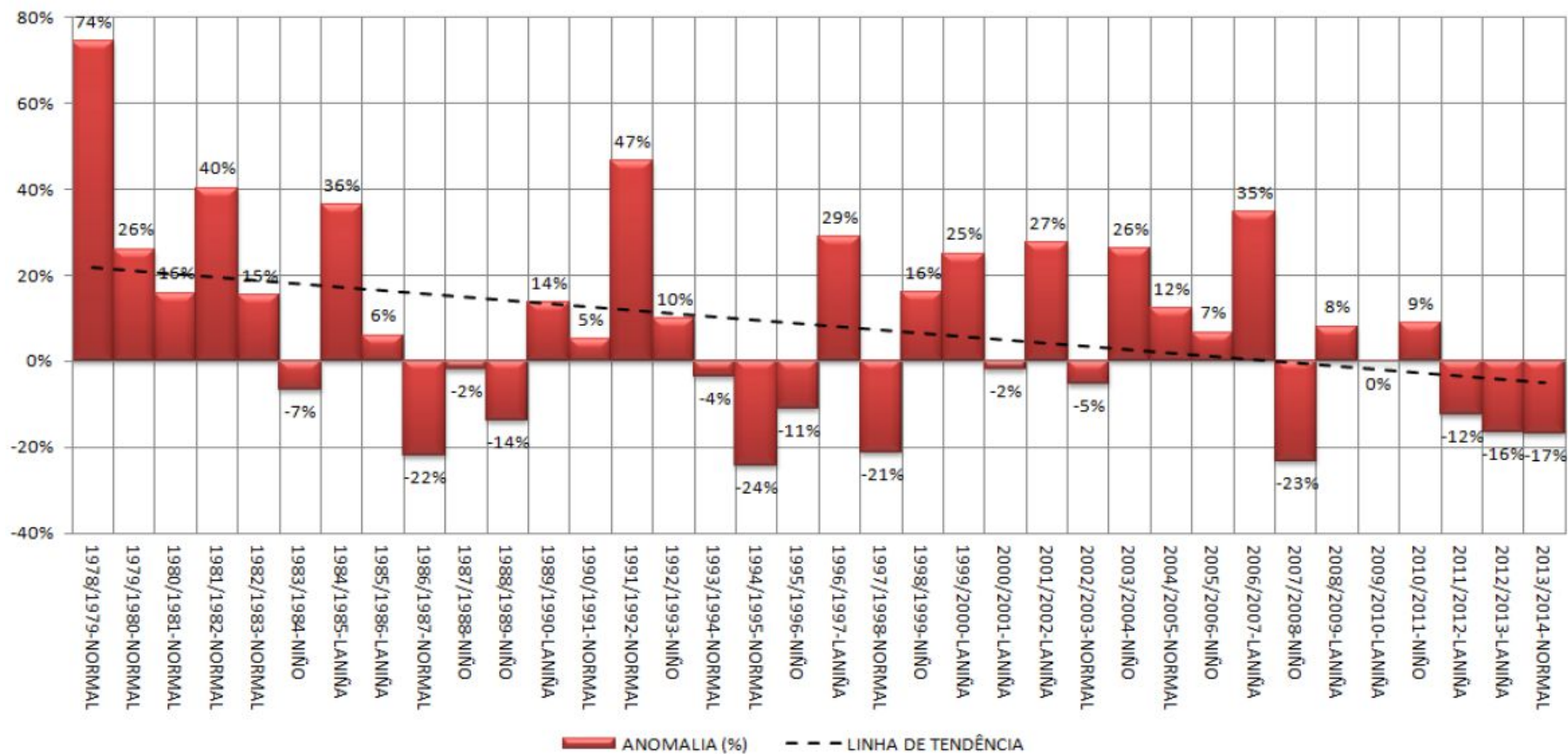
ANEXO 2 – LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SIN (ONS, 2020)

Horizonte 2024

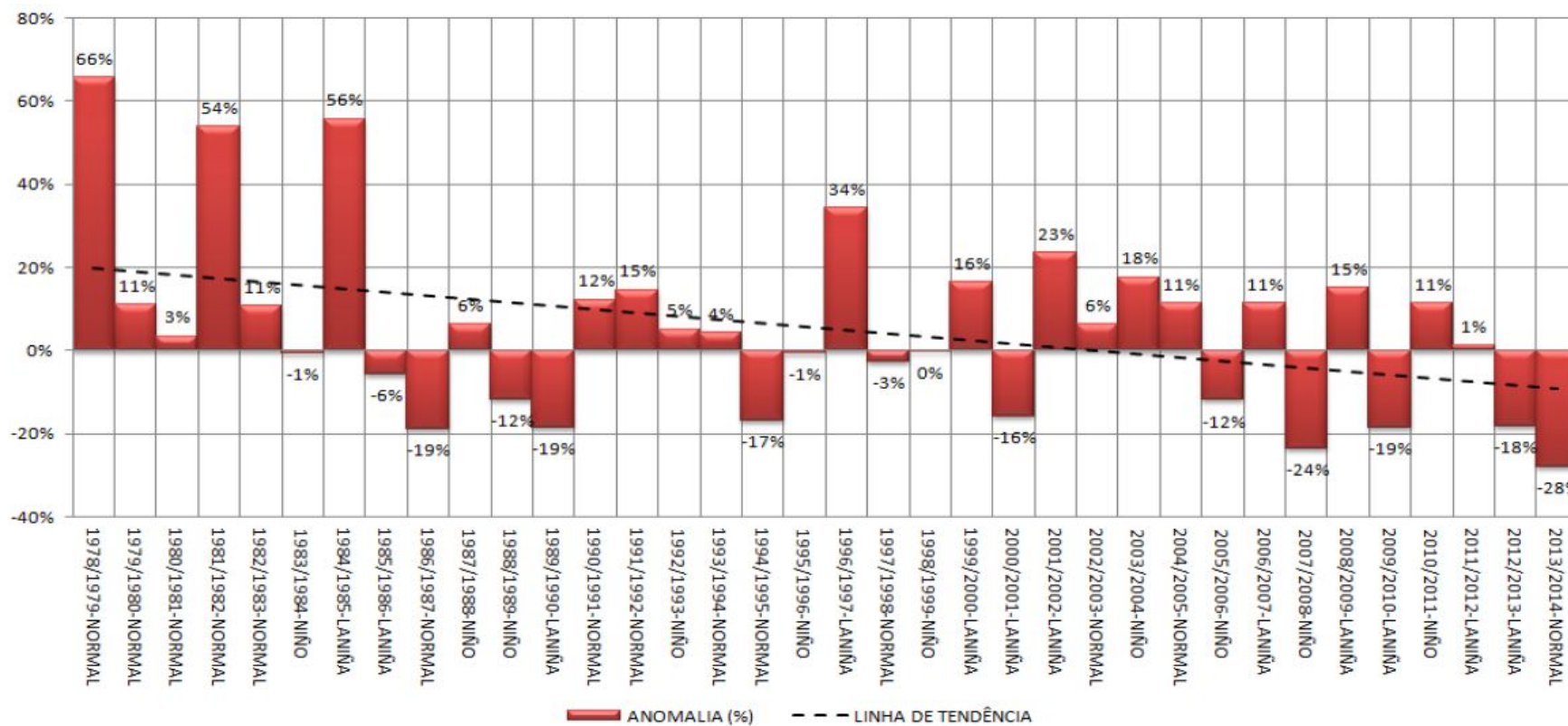


ANEXO 3 – ANOMALIA DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NAS BACIAS (IGAM, 2015)

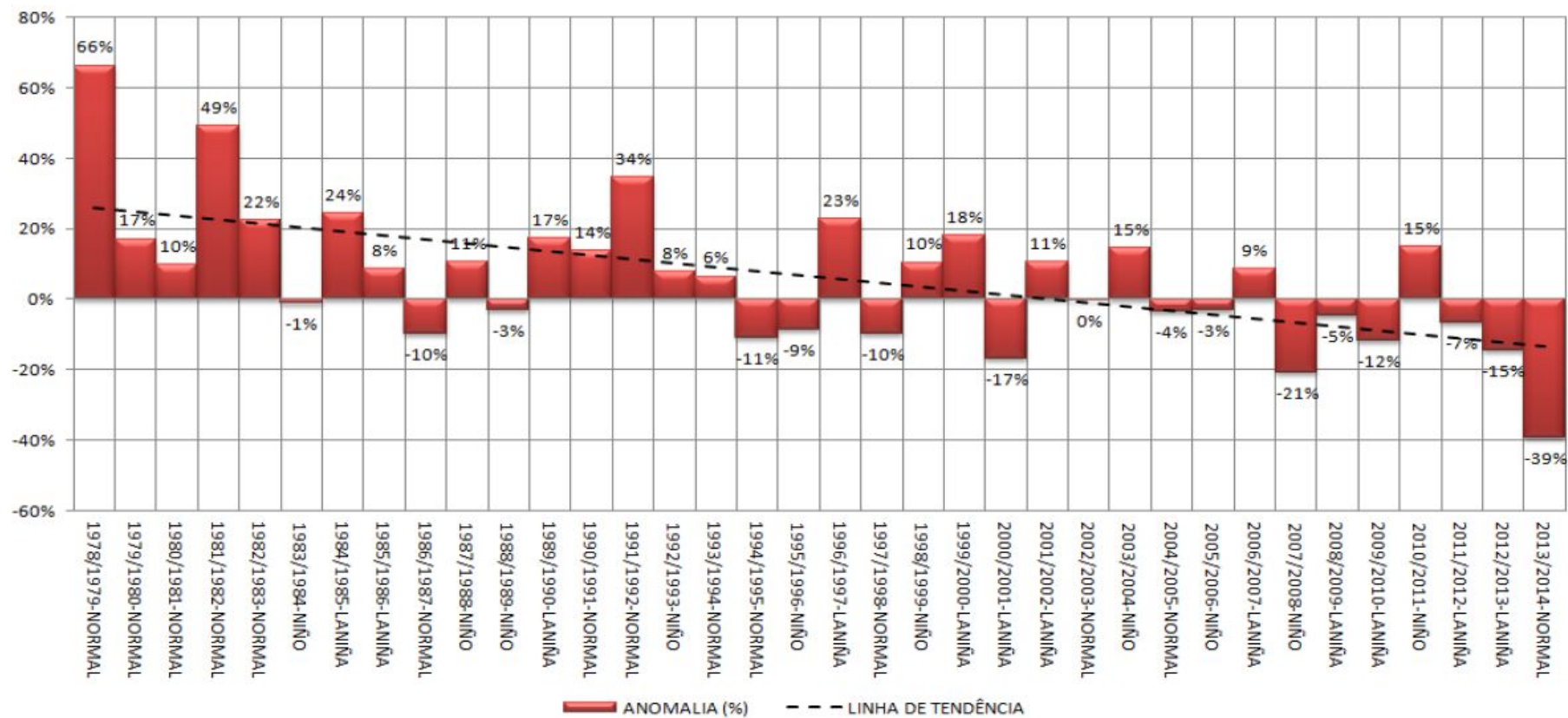
a) Bacia do Jequitinhonha – Todos os períodos chuvosos (outubro a março) 1979 a 2014



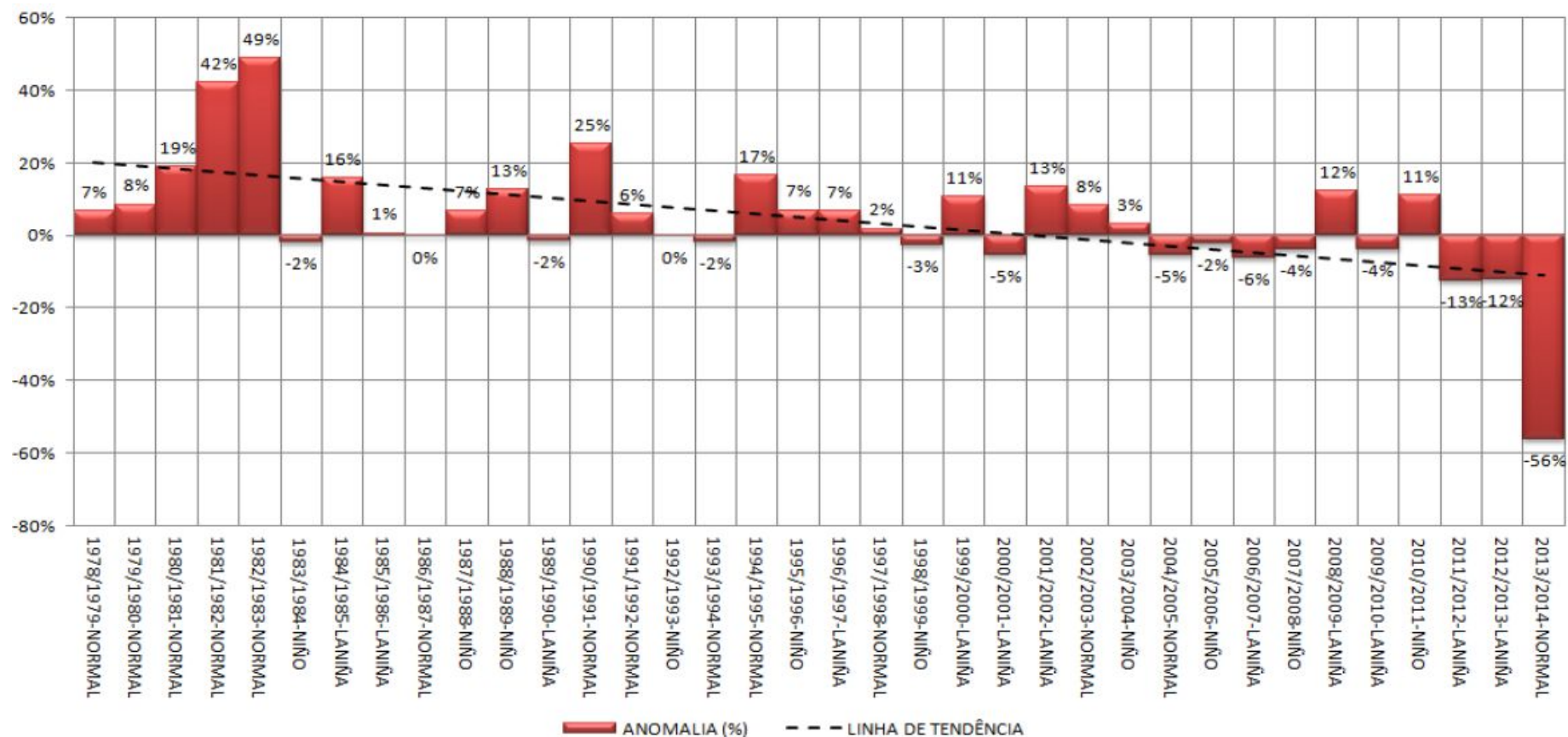
b) Bacia do Rio Doce – Todos os períodos chuvosos (outubro a março) 1979 a 2014



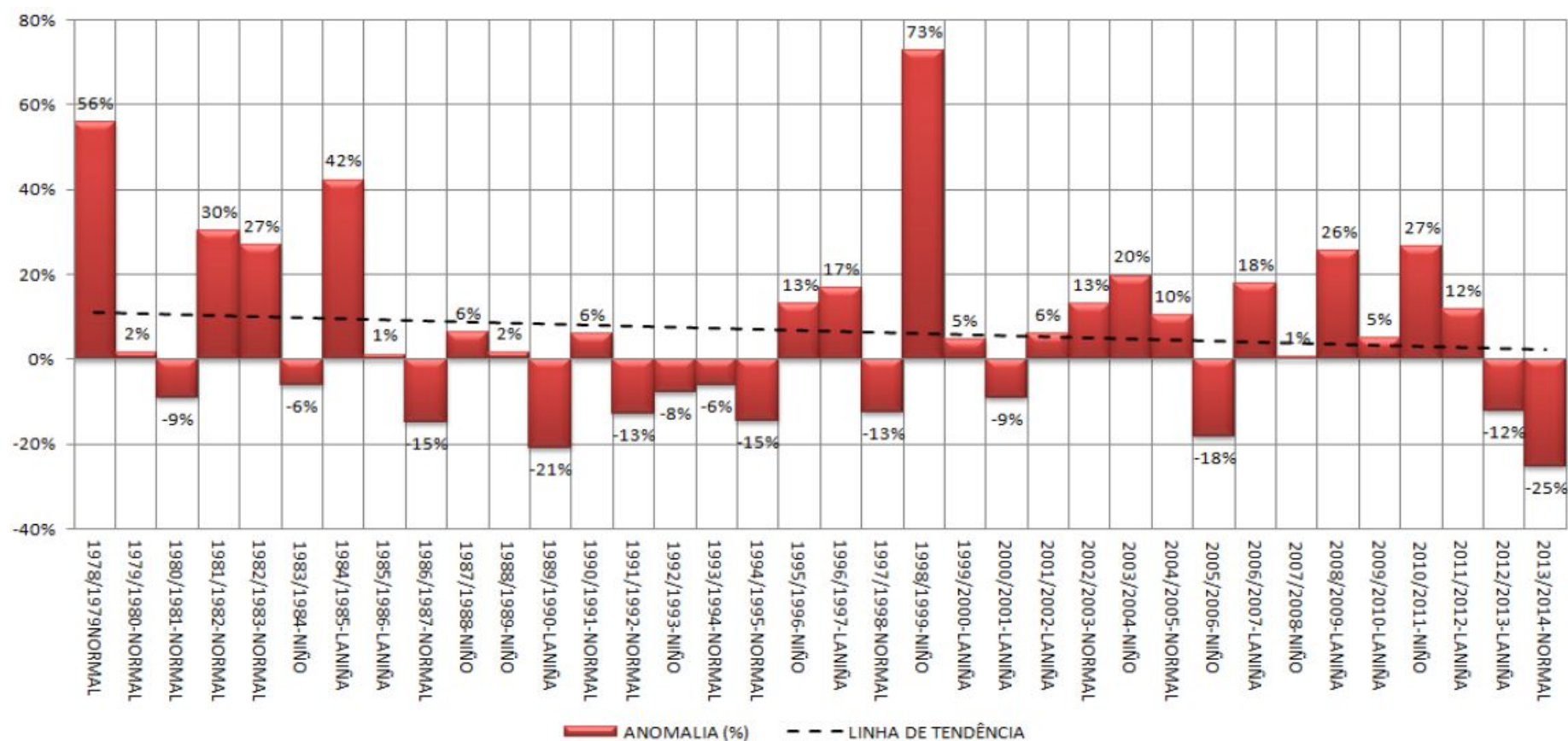
c) Bacia do Rio São Francisco – Todos os períodos chuvosos (outubro a março) 1979 a 2014



d) Bacia do Rio Grande – Todos os períodos chuvosos (outubro a março) 1979 a 2014



e) Bacia do Rio Paraíba do Sul – Todos os períodos chuvosos (outubro a março) 1979 a 2014



f) Bacia do Rio Paranaíba – Todos os períodos chuvosos (outubro a março) 1979 a 2014

