

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS  
ESCOLA DE ECONOMIA DE SÃO PAULO

CLAUDIO LUIS ORSO

IMPACTOS DA VARIAÇÃO DO CUSTO DE GERAÇÃO DO SETOR  
HIDRELÉTRICO E SEUS REFLEXOS NA ECONOMIA: UMA ANÁLISE DE  
EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEL

SÃO PAULO

2020

CLAUDIO LUIS ORSO

IMPACTOS DA VARIAÇÃO DO CUSTO DE GERAÇÃO DO SETOR  
HIDRELÉTRICO E SEUS REFLEXOS NA ECONOMIA: UMA ANÁLISE DE  
EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEL

Dissertação apresentada à Escola de Economia  
de São Paulo da Fundação Getulio Vargas  
(FGV/EESP) como requisito para a obtenção do  
título de Mestre em Economia.

Área de concentração: Finanças

Orientador: Prof. Dr. Angelo Costa Gurgel

SÃO PAULO

2020

Orso, Claudio Luis.

Impactos da variação do custo de geração do setor hidrelétrico e seus reflexos na economia : uma análise de equilíbrio geral computável / Claudio Luis Orso. - 2020.

61 f.

Orientador: Angelo Costa Gurgel.

Dissertação (mestrado profissional MPFE) – Fundação Getulio Vargas, Escola de Economia de São Paulo.

1. Energia hidrelétrica - Brasil. 2. Energia elétrica - Custos. 3. Energia elétrica - Produção. 4. Equilíbrio econômico. I. Gurgel, Angelo Costa. II. Dissertação (mestrado profissional MPFE) – Escola de Economia de São Paulo. III. Fundação Getulio Vargas. IV. Título.

CDU 621.8.037(81)

Ficha Catalográfica elaborada por: Isabele Oliveira dos Santos Garcia CRB SP-010191/O

Biblioteca Karl A. Boedecker da Fundação Getulio Vargas - SP

CLAUDIO LUIS ORSO

IMPACTOS DA VARIAÇÃO DO CUSTO DE GERAÇÃO DO SETOR  
HIDRELÉTRICO E SEUS REFLEXOS NA ECONOMIA: UMA ANÁLISE DE  
EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEL

Dissertação apresentada à Escola de Economia  
de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas  
(FGV/EESP) como requisito para a obtenção do  
título de Mestre em Economia.

**Área de concentração:** Finanças

**Data da Aprovação:** 21/10/2020

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Angelo Costa Gurgel (Orientador)  
FGV-EESP

---

Prof. Dr. Ricardo Ratner Rochman  
FGV-EESP

---

Prof. Dr. Gilson Batista de Oliveira  
UNILA

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, em especial a minha esposa Roberta, pela compreensão e apoio ao longo do período de desenvolvimento deste trabalho e a minha filha Beatriz pela complacência nos períodos em que estive ausente.

Aos meus pais, pelo sempre incondicional incentivo aos estudos e oportunidades de educação concedidas.

Um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Angelo Gurgel, pela dedicação, empenho e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho, estando sempre de prontidão para colaborar no que fosse preciso.

Agradeço também a todos que contribuíram, direta e indiretamente, para que fosse possível a realização deste trabalho.

“Os riscos surgem quando você não sabe o que está fazendo.”

Warren Buffett

## RESUMO

A energia hidráulica sempre teve um papel importante na matriz elétrica brasileira e seus custos de geração representam uma parcela significativa do valor pago pelo consumidor final. Fatores tecnológicos, ambientais, operacionais e governamentais contribuem diretamente para este valor apurado. Este trabalho mensurou como variações, positivas ou negativas e em diferentes níveis, no custo de geração de energia hidrelétrica afetam o preço pago pelo consumidor final e seus reflexos na economia brasileira como um todo. Os cenários foram simulados para um horizonte de 5 (2025) e 10 (2030) anos através de um modelo de equilíbrio geral computável. Este modelo permite comparar as projeções entre os diferentes cenários, bem como com os cenários projetados pelo Balanço Energético Nacional. Os resultados mostram que um aumento entre 2,5% e 7,5% ou diminuição de 2,5% a 7,5% no custo de geração de energia hidráulica no país tem reflexos não lineares e pouco consideráveis no preço da energia ao consumidor final. Estes resultados se devem tanto pelo fato de a energia hidráulica ser uma das fontes de menor custo e abundante na matriz elétrica do país, porém de pouca capacidade de expansão no curto e no médio prazo, quanto pelo complexo e regulado funcionamento do setor elétrico brasileiro. Esta complexidade, por um lado, garante estabilidade e baixa volatilidade de preços no mercado, porém contribui para uma sinalização de preços a curto prazo que reflete os custos marginais de fontes mais cara e complementares.

**Palavras-chave:** Mercado de energia elétrica, Equilíbrio geral, Setor elétrico brasileiro e Geração de energia elétrica.

## ABSTRACT

Hydraulic energy has always played an important role in the Brazilian electric matrix and its generation costs represent a significant portion of the amount paid by the final consumer. Technological, environmental, operational and governmental factors contribute directly to this amount. This work measured how variations, positive or negative and at different levels, in the cost of hydroelectric energy generation affect the price paid by the final consumer and its impact on the Brazilian economy as a whole. The scenarios were simulated for a horizon of 5 (2025) and 10 (2030) years using a computable general equilibrium model. This model allows to compare the projections between the different scenarios, as well as with the scenarios projected by the National Energy Balance. The results show that an increase of between 2.5% and 7.5% or a decrease of 2.5% to 7.5% in the cost of hydroelectric power generation in the country has non-linear and little considerations in the energy price to the consumer Final. These results are due both to the fact that hydraulic energy is one of the least expensive and abundant sources in the country's electrical matrix, but with little capacity for expansion in the short and medium term, as well as the complex and regulated functioning of the Brazilian electricity sector. This complexity, on the one hand, guarantees stability and low price volatility in the market, but contributes to a short-term price signaling that reflects the marginal costs of more expensive and complementary sources.

**Keywords:** Electricity market, General balance, Brazilian electric sector and Electricity generation

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo Energético Total .....	15
Figura 2 - Fluxo Energético – Eletricidade .....	17
Figura 3 - Fluxo Circular de Bens e Serviços .....	34
Figura 4 - Estrutura dos setores de produção de eletricidade .....	37
Figura 5 - Curvas teóricas de oferta e demanda no mercado elétrico .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre o ACR e o ACL.....	23
Tabela 2 - Consumo do mercado livre (ACL) e cativo (ACR) .....	24
Tabela 3 - Tarifa Média em R\$/MWh de Fornecimento em 2019 sem tributos .....	26
Tabela 4 - Capacidade instalada de Geração Elétrica .....	31
Tabela 5 - Setores no EPPA .....	36
Tabela 6 - Tipos de Elasticidade de Substituição dos setores produtivos .....	38
Tabela 7 - Variáveis analisadas .....	39
Tabela 8 - Cenários de redução de eficiência .....	43
Tabela 9 - Cenários de aumento de eficiência .....	44

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Consumo de energia na indústria .....	16
Gráfico 2 - Consumo residencial de energia .....	16
Gráfico 3 – Participação por Fonte na Geração de Eletricidade.....	21
Gráfico 4 - Composição da tarifa de energia .....	26
Gráfico 5 - Projeção de Consumo Total de Energia Elétrica (TWh) .....	47
Gráfico 6 – Projeção da participação da energia hidrelétrica na capacidade instalada total .....	48
Gráfico 7 - Evolução do Preço da Energia Elétrica .....	48
Gráfico 8 - Variação percentual no PIB em cenários de diminuição de eficiência...	49
Gráfico 9 – Redução Percentual da Participação Hidrelétrica no setor em cenários de diminuição de eficiência .....	51
Gráfico 10 - Variação percentual na tarifa ao consumidor final em cenários de diminuição de eficiência .....	51
Gráfico 11 - Variação percentual no PIB em cenários de aumento de eficiência....	53
Gráfico 12 – Redução Percentual da Participação Hidrelétrica no setor em cenários de aumento de eficiência .....	54
Gráfico 13 – Variação percentual na tarifa ao consumidor final em cenários de aumento de eficiência .....	54

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AIE - Agência Internacional de Energia

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CCEAR - Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado

CMO - Custo Marginal de Operação

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EG – Equilíbrio Geral

FMI - Fundo Monetário Internacional

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PDE 2029 – Plano Decenal de Energia 2029

PLD - Preço de Liquidação das Diferenças

PNE 2050 – Plano Nacional de Energia 2050

PIB – Produto Interno Bruto

SIN - Sistema Interligado Nacional

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	14
1.2.	PROBLEMA DE PESQUISA .....	18
1.3.	OBJETIVOS .....	19
<b>2.</b>	<b>CONTEXTO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO .....</b>	<b>20</b>
2.1.	A IMPORTÂNCIA DO SETOR HIDRELÉTRICO .....	20
2.2.	COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	23
2.3.	COMPOSIÇÃO TARIFÁRIA .....	25
<b>3.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>28</b>
3.1.	EFICIÊNCIA NO MERCADO DE ENERGIA .....	28
3.2.	PROJEÇÕES PARA O SETOR ELÉTRICO .....	30
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
4.1.	MODELOS DE EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEL .....	33
4.2.	O MODELO EPPA .....	34
4.3.	ESTRUTURA E FECHAMENTO DO MODELO EPPA.....	39
4.4.	CENÁRIOS SIMULADOS .....	42
4.4.1.	Cenários de redução de eficiência.....	42
4.4.2.	Cenário de referência .....	43
4.4.3.	Cenários de aumento de eficiência.....	44
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>46</b>
5.1.	CENÁRIO BASE .....	46
5.2.	RESULTADOS DOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS NA EFICIÊNCIA .....	49
5.2.1.	Cenários de diminuição de eficiência .....	49
5.2.2.	Cenários de aumento de eficiência.....	52
5.3.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	55
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A matriz elétrica tem importância fundamental para o desenvolvimento econômico e social de qualquer país, afetando diretamente as decisões de investimento e financiamento, bem como as tratativas em relação às políticas econômicas a serem adotadas. Neste quesito, o custo de energia elétrica tem um papel fundamental no equilíbrio dinâmico de cada setor da economia.

No Brasil não é diferente. Mesmo dispondo de uma grande quantidade de fontes de energia limpa e renovável, o país tem uma tarifa de energia elétrica acima da média em comparação com outros países, alguns dos fatores que contribuem para isso podemos citar os altos custos de geração, transmissão e distribuição, além dos impostos e subsídios adotados pelo governo (CASTRO, 2015). Estes fatores podem ser considerados como limitantes quanto ao crescimento econômico, uma vez que a energia elétrica é um insumo necessário a todos os setores produtivos, por isso, existe uma busca continua no intuito de fornecer energia a preços competitivos em todo cenário nacional.

Para tanto, é necessário conhecer a composição da matriz energética e a matriz elétrica brasileira, suas estruturas, fontes de oferta e consumo, e seu fluxo correspondente, a forma de funcionamento, bem como seus fatores e a participação da energia hidráulica neste contexto.

O Balanço Energético Nacional (BEN) elaborado anualmente pela EPE detalha toda a oferta e consumo de energia no Brasil. Trata-se de um documento que serve de parâmetro para pesquisas e estudos para elaboração de projeções e tendências no mercado de energia. O relatório Balanço Energético Nacional 2019 – BEN2019 (EPE, 2019a) considera o setor energético até o ano de 2018, e servirá de fonte de informações para as discussões a seguir.

A Figura 1 apresenta as diferentes fontes de oferta de energia no país no lado esquerdo, bem como os diversos tipos de consumo na parte direita. No lado da oferta chamam atenção os Produtos da Cana e Petróleo e Derivados, que representam mais

da metade da oferta nacional, e em seguida a Hidráulica e Eletricidade representando 12,6%, objeto de estudo deste trabalho.

O relatório BEN2019 (EPE, 2019a) ainda evidencia que 45,3% da oferta energética nacional de fontes renováveis, comparado com 13,7% da matriz energética mundial.

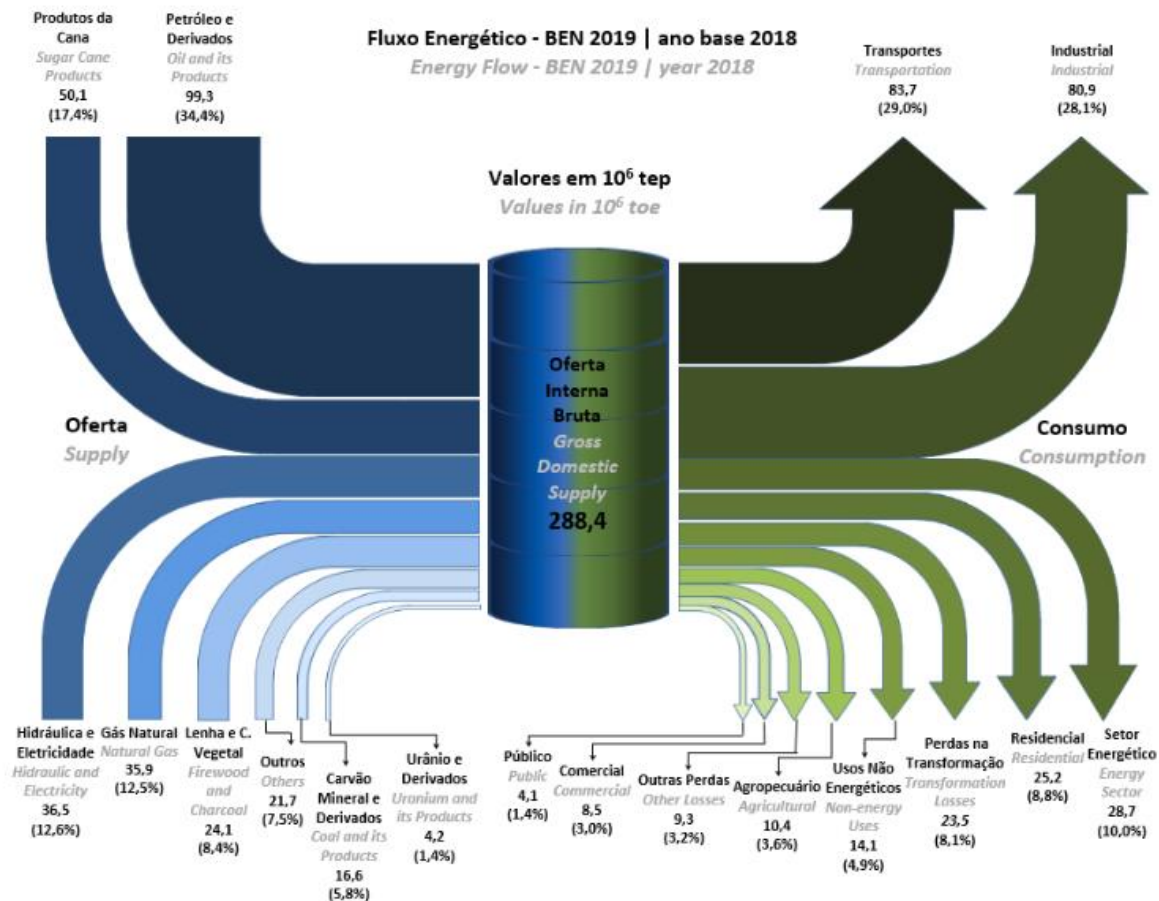


Figura 1 - Fluxo Energético Total  
Fonte: EPE (2019a)

No lado do consumo, os setores de Transportes e Industrial consomem mais de 57% da oferta nacional e o setor Residencial responde por 8,8% do total consumido.

Objeto deste estudo, a eletricidade representa a maior parcela de fonte de energia no setor Industrial e Residencial. No setor Industrial, 21,3% do consumo de energia na indústria é oriundo de eletricidade, conforme pode ser observado no Gráfico 1.

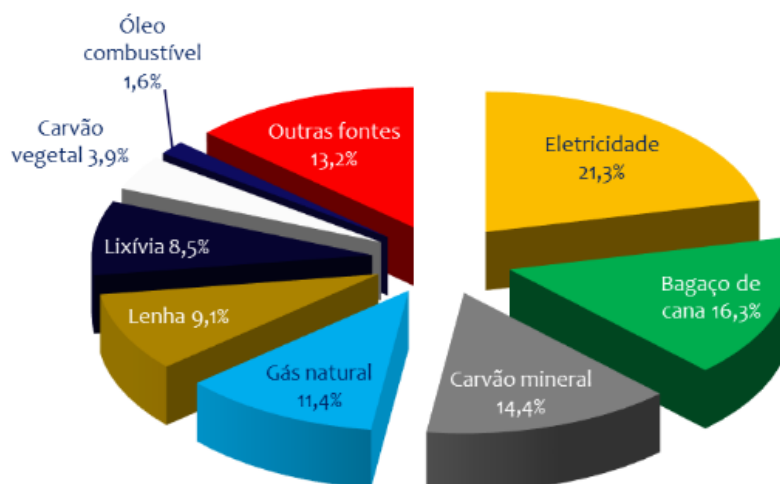


Gráfico 1 - Consumo de energia na indústria  
Fonte: EPE (2019a)

No setor residencial o percentual que a eletricidade ocupa é ainda maior, ou seja, 46,4% da energia consumida é proveniente da eletricidade, conforme pode ser observado no gráfico 2.

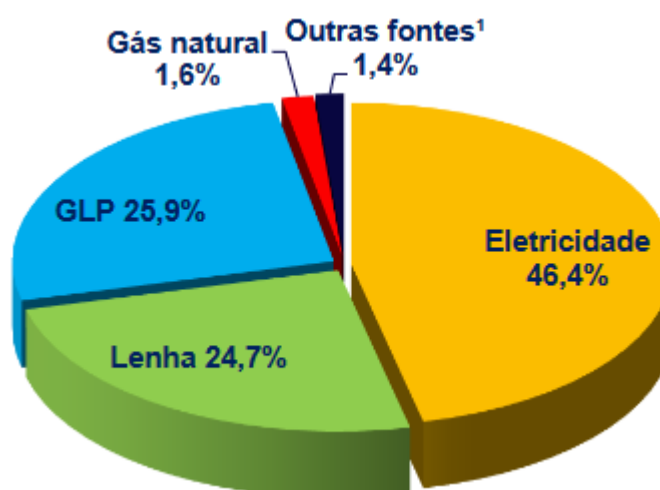


Gráfico 2 - Consumo residencial de energia  
Fonte: EPE (2019a)

Esses dados revelam que a energia elétrica é um insumo essencial, não somente ao setor Industrial e Residencial, mas também para a economia brasileira como um todo.

O BEN2019 (EPE, 2019a) detalha também a matriz elétrica brasileira e seu correspondente fluxo de oferta interna de energia (Figura 2). Ao lado esquerdo da figura é possível observar todas as fontes de geração de eletricidade, dentre elas

destaca-se uma forte predominância do setor de geração hidráulica, objeto de estudo deste trabalho, que representa 66,6% do total.

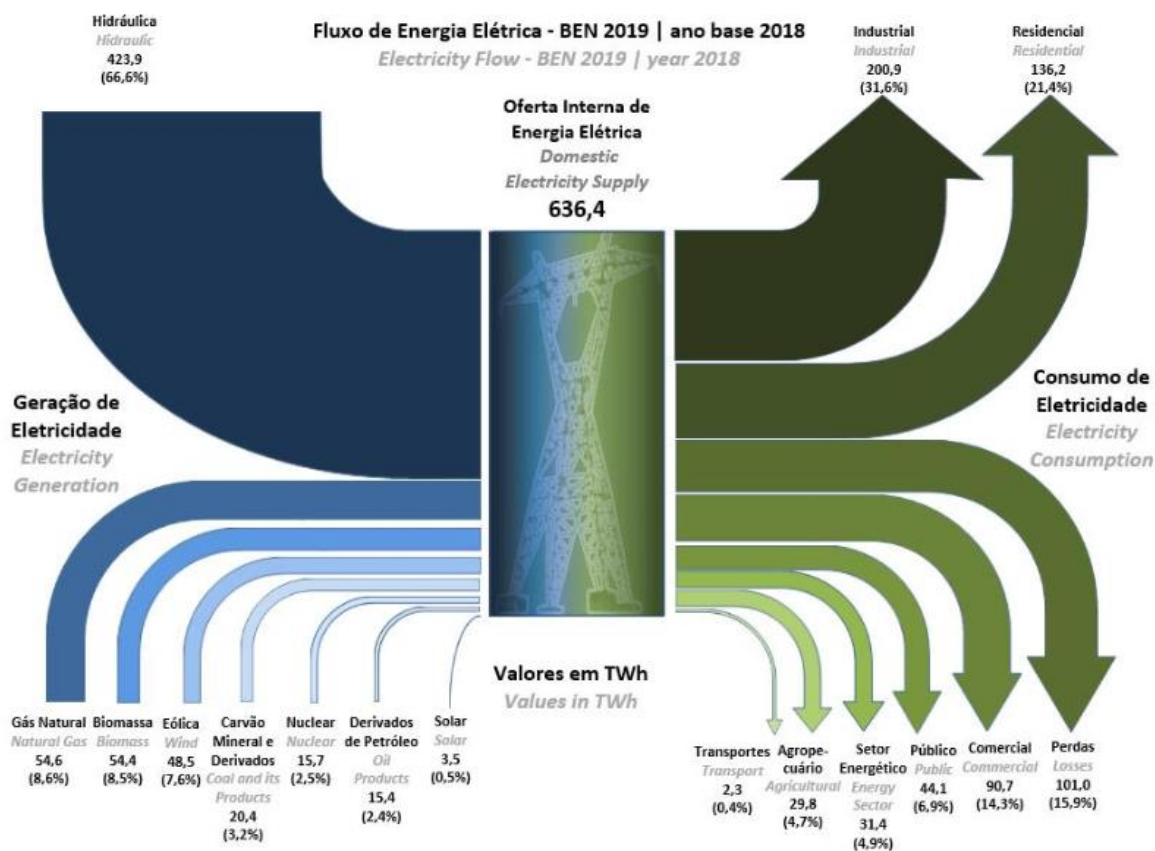


Figura 2 - Fluxo Energético – Eletricidade  
 Fonte: EPE (2019a)

Na parte direita da Figura 2 é possível observar que mais da metade da oferta elétrica é direcionada para os consumos industrial e residencial, 31,6% e 21,4% respectivamente. O relatório destaca também que 83,3% da matriz elétrica é proveniente de fontes renováveis, comparado com 24% no mundo.

Atualmente, grande parte deste fluxo está conectado e em operação no Sistema Interligado Nacional – SIN, que está sob supervisão do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. O ONS é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração, inclusive hidrelétrica, e transmissão de energia elétrica. Ele também tem a atribuição de planejamento e programação da operação e o despacho centralizado de toda a geração objetivando assim a otimização dos sistemas interligados.

De maneira geral, intuitivamente, uma redução nos custos inerentes a produção de energia elétrica e consequentemente no custo da energia às empresas e ao consumidor final poderia impactar positivamente as indústrias e consequentemente aumentar a geração de empregos e renda. Por outro lado, um aumento na tarifa poderia apresentar impactos negativos na economia e no crescimento econômico. Ou seja, a energia, por ser um insumo básico para produção de bens e serviços, tem no seu preço um elemento relevante e de grande impacto sistêmico para a economia.

Considerando a importância da oferta de eletricidade para a economia, é importante considerar que um bom planejamento energético buscando prever a demanda futura, sua expansão e seus custos, é de fundamental importância para o país. O uso de modelos energéticos e econômicos é imprescindível para auxiliar neste tipo de análise. A partir desses modelos é possível efetuar projeções de oferta e de demanda de energia em diferentes escalas e cenários, avaliando assim os resultados e informando os tomadores de decisão sobre os benefícios e custos de trajetórias alternativas para esse setor.

## 1.2. PROBLEMA DE PESQUISA

Atualmente os consumidores, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais, pagam tarifas proporcionais aos custos por eles ocasionados ao sistema elétrico nacional (CASTRO, 2015). Existe também uma grande variação de alíquotas de impostos indiretos que incidem sobre esta tarifa, bem como uma série de subsídios praticados pelo governo Federal. Assim sendo, qualquer simulação no sentido de avaliar possíveis cenários futuros, requer que todas estas variáveis sejam levadas em consideração.

No que diz respeito a possíveis mudanças em custos e eficiência do setor hidroelétrico no país, estudo recente da EPE (2019b) abordou a “Repotenciação” e “Modernização” do parque hidrelétrico brasileiro. Tal estudo avaliou os possíveis ganhos aplicados ao parque hidrelétrico brasileiro em relação a eficiência, energia e capacidade instalada. Neste documento são avaliadas estimativas de investimentos requeridos caso opte-se por uma repotenciação no sentido de aumento da eficiência e capacidade instalada. Também são avaliadas questões técnicas referente a

degradação dos equipamentos atualmente em funcionamento e como isso contribui diretamente para a perda de eficiência na geração. O documento evidencia, portanto, que existem tanto oportunidades para redução em custos e ganhos de eficiência na produção de energia hidrelétrica nos próximos anos no país, como também, é possível ocorrer o contrário caso não sejam realizados os investimentos necessários.

Dessa forma, considerando os desafios para a economia em lidar com futuros preços de energia, a presente dissertação busca responder à seguinte questão: quais são os potenciais impactos tarifários e econômicos advindos de aumentos ou diminuições em diferentes níveis de eficiência inerentes aos custos de geração de energia hidrelétrica no Brasil? A resposta a essa questão deve contribuir para o planejamento energético do país, evidenciando os potenciais impactos de alterações na eficiência da geração hidrelétrica nacional.

### 1.3. OBJETIVOS

O objetivo do presente estudo é mensurar os potenciais impactos ocasionados por possíveis mudanças nos níveis de eficiência do setor hidroelétrico no Brasil, principalmente no que diz respeito às variações de preço da energia elétrica no país ao consumidor final. Mais especificamente, pretende-se simular cenários de mudanças positivas e negativas na eficiência do setor hidrelétrico e verificar os desdobramentos dessas variações sobre a economia como um todo.

Para tal, o presente trabalho fará o uso de um modelo de projeção econômica e análise de políticas, da classe dos modelos de equilíbrio geral computável, de alcance global, ou seja, capaz de captar as interações entre os diferentes mercados e agentes econômicos para os diversos países do mundo.

Este trabalho apresenta, além desta parte introdutória, um segundo capítulo no qual discorre brevemente sobre os determinantes de composição da tarifa e uma breve explanação sobre as projeções do setor elétrico. No capítulo 3 apresenta-se a metodologia utilizada. No capítulo 4 são apresentados os cenários simulados e os resultados obtidos. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as considerações finais do estudo.

## **2. CONTEXTO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO**

Este capítulo visa apresentar o contexto existente sobre o tema e problema abordados ao longo deste trabalho. Está fora do escopo deste trabalho fazer um apanhado histórico do setor, restringindo-se somente aos conceitos e estudos necessários para um amplo entendimento deste.

Também serão abordadas neste capítulo as formas de tarifação existentes, detalhando sua composição dentro da parte de geração, transmissão, distribuição e comercialização desta energia, e como isto reflete no cálculo da tarifa ao consumidor final.

No que diz respeito à geração de energia hidrelétrica, foco deste trabalho, será discutido como os custos de geração deste setor refletem no custo de energia elétrica ao consumidor final. Ao final será feita uma abordagem de como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) faz projeções para o setor para os próximos anos. Estas projeções serão utilizadas para balizar os cenários que serão aqui estudados.

### **2.1. A IMPORTÂNCIA DO SETOR HIDRELÉTRICO**

Como discutido no capítulo de introdução, o Brasil é abundante em recursos energéticos, principalmente de origem hídrica, o que permite ter uma alta capacidade instalada de suprimento seguro e estável.

Segundo Reis (2011), a produção de energia por parte das usinas hidroelétricas depende basicamente de sua capacidade instalada. Quanto maior, maior será sua produção e conseqüentemente terá um custo de operação e manutenção menor em relação à quantidade produzida.

Para Montalvão (2009) o Brasil, ao longo dos últimos anos, está se beneficiando de uma escolha feita no passado de construção de grandes usinas hidrelétricas e agora possui uma vantagem competitiva no sentido de conseguir produzir energia mais barata se comparado a outras fontes disponíveis no mercado, que tendem ser mais caras. O autor destaca também que foi através de uma equalização tarifária que

os custos de construção destas usinas foram distribuídos entre todos os usuários do sistema.

O fato é que, ao longo dos últimos anos observou-se uma crescente demanda por energia, e esta precisou ser suprida em parte pela geração térmica e pelo surgimento de novas fontes, tais como eólicas e solares. O setor hidrelétrico vem perdendo participação na matriz elétrica total e a tendência é que continue nessa trajetória, porém, ainda mantendo a representação mais abundante, como pode ser observado no gráfico 3.

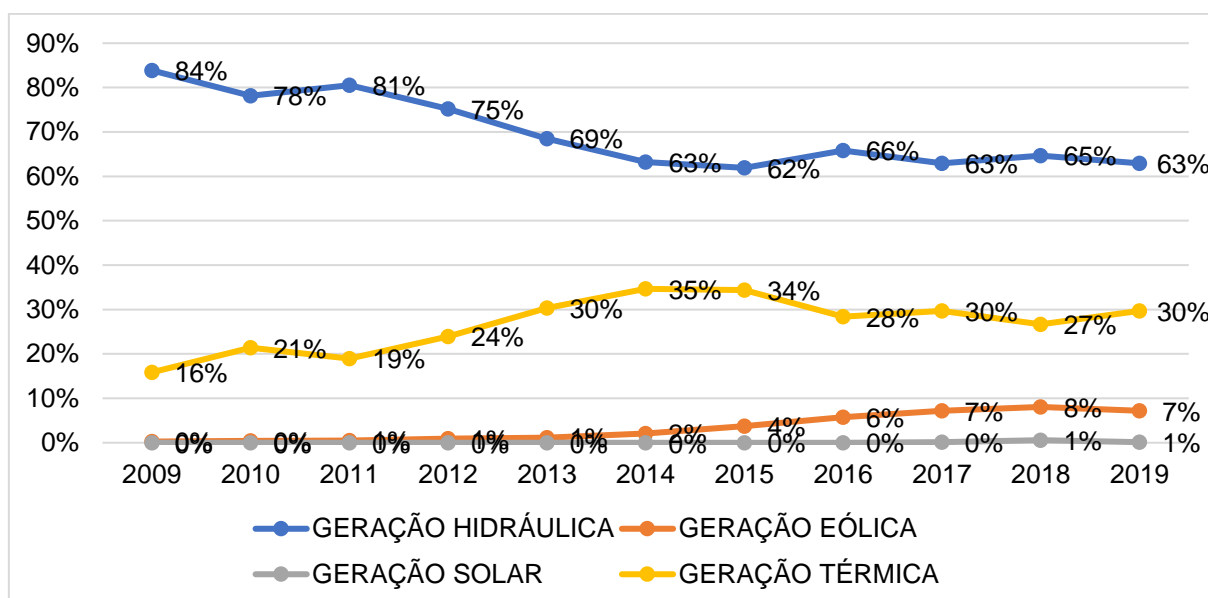


Gráfico 3 – Participação por Fonte na Geração de Eletricidade  
Fonte: EPE (2019a)

No Brasil, a fonte de geração hidráulica é um tipo de energia mais barata se comparada a outras como a energia nuclear, e mais ambientalmente desejável do que derivados do petróleo ou uso do carvão (EPE, 2019a). Ela tem uma característica única de requerer um alto investimento inicial, mas permite que este seja amortizado em prazos longos.

Zucarato (2009) discute que a principal consequência de um mercado predominantemente hidrelétrico é a necessidade de qualquer decisão ser analisada em um horizonte temporal suficientemente longo, ou seja, por possuir a capacidade de armazenar água nos reservatórios em períodos úmidos para utilização em períodos

secos, as decisões de despacho devem ser analisadas em um horizonte de tempo e em conjunto com as demais usinas.

A política energética brasileira estimula a utilização de fontes renováveis de energia, promovendo a conservação da energia, a proteção ao meio ambiente e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e seus poluentes em suas soluções energéticas, e a geração hidráulica atende estes preceitos. Além disso, através de seus reservatórios de acumulação, a hidroeletricidade dispõe de uma alta flexibilidade operativa, sendo capaz de responder a variações na demanda de forma quase que imediata, estando somente suscetível a vulnerabilidade dos recursos hídricos disponíveis (EPE, 2019a).

Como exposto acima a geração hidráulica possui inúmeras vantagens, e para fazer frente à crescente demanda por energia elétrica, seria pertinente buscar sua expansão. Ocorre que, segundo a EPE, grande parte do potencial inventariado está localizado em regiões de áreas protegidas e distantes dos grandes centros comerciais, o que põe em discussão a relação custo-benefício.

Como alternativa, dentro do próprio setor hidrelétrico, com o surgimento de novas tecnologias aplicadas na geração, é possível através de sua modernização obter ganhos de eficiência associados aos custos de operação e manutenção ou até mesmo uma repotenciação das unidades geradoras, contribuindo assim para um aumento em termos da quantidade de energia gerada com a capacidade instalada corrente. Recentemente a EPE (2018), através da Nota Técnica PR 07/18, divulgou um estudo sobre o tema aplicado ao parque hidrelétrico brasileiro. Os resultados indicam ganhos energéticos de eficiência, otimização da geração e redução do custo de operação. Estes ganhos em eficiência que se dariam no segmento de geração e, em tese, poderiam ser repassados ao consumidor.

Enfim, empresas geradoras hidrelétricas eficientes conseguem operar com custos relativamente menores quando comparadas com empresas similares com baixa eficiência. De certo modo seria razoável o incentivo à eficiência e que este ganho seja capturado e repassado ao consumidor final por meio dos preços praticados (Viana, 2018).

## 2.2. COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A comercialização de energia elétrica segundo o modelo brasileiro de comercialização se dá em dois ambientes de contratação: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), em que as distribuidoras adquirem a energia para atendimento de seus consumidores cativos e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), no qual vendedores e compradores de energia elétrica transacionam livremente (Viana, 2018). A tabela 1 detalha as principais características dos dois ambientes.

Tabela 1 - Diferenças entre o ACR e o ACL

	Ambiente Livre	Ambiente Regulado
Participantes	<b>Geradoras, comercializadoras, consumidores livres e especiais</b>	<b>Geradoras, distribuidoras e comercializadoras. As comercializadoras podem negociar energia somente nos leilões de energia existente.</b>
Contratação	<b>Livre negociação entre os compradores e vendedores</b>	<b>Realizada por meio de leilões de energia promovidos pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE, sob delegação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.</b>
Tipo de contrato	<b>Acordo livremente estabelecido entre as partes</b>	<b>Regulado pela ANEEL, denominado Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR).</b>
Preço	<b>Acordado entre comprador e vendedor</b>	<b>Estabelecido no leilão.</b>

Fonte: CCEE (2019)

A principal distinção entre os dois ambientes remete ao fato de que no ACL o consumidor pode escolher o comercializador de energia e ter os preços acordados livremente, enquanto no ACR o consumidor está refém da distribuidora local e os preços são definidos por meio de leilões públicos. Em ambos os ambientes é garantida a segurança do suprimento.

A regulação destes mercados faz-se necessário tendo em vista os interesses que surgem, onde determinadas empresas possuem elevado poder econômico no setor e assim podem facilmente manipulá-lo. Dessa forma, a regulação tenta mitigar os conflitos existentes entre empresas e consumidores em ambientes monopolizados (KESSLER, 2006).

Segundo dados da ANEEL (2020), atualmente aproximadamente 70% da demanda total está representada pelos consumidores cativos dentro do ambiente ACR.

A tabela 2 detalha um histórico do consumo de energia dos três primeiros meses do ano corrente, para os ambientes ACR e ACL.

Tabela 2 - Consumo do mercado livre (ACL) e cativo (ACR)

	Consumo (MWh)	Percentual	Consumo (MWh)	Percentual	Consumo Total (MWh)	Percentual Total
JAN/20	47038	70,2%	19938	29,8%	66976	100%
FEV/20	46559	69,0%	20888	31,0%	67447	100%
MAR/20	44912	69,1%	20077	30,9%	64989	100%

Fonte: ANEEL (2020).

Todos os contratos de compra e venda de energia celebrados em ambos os mercados devem ser registrados na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que realiza a medição dos montantes efetivamente produzidos/consumidos por cada agente. Eventuais diferenças apuradas, positivas ou negativas, são contabilizadas para posterior liquidação financeira no Mercado de Curto Prazo ao Preço de Liquidação das Diferenças (PLD).

Assim, o Mercado de Curto Prazo pode ser definido como o segmento da CCEE onde são contabilizadas as diferenças entre os montantes de energia elétrica contratados pelos agentes e os montantes de geração e de consumo efetivamente verificados e atribuídos aos respectivos agentes.

Segundo Reis (2011), é neste ambiente que quaisquer diferenças entre os contratos de compra são comercializados ou seja, o gerador comercializa as diferenças, sejam elas negativas ou positivas, de sua produção em relação a energia contratada. Se ocorrer um excesso de produção, o gerador irá comercializar esta diferença neste mercado de curto prazo, o mesmo ocorre caso haja uma produção menor e o gerador necessita adquirir o complemento em relação ao total contratado.

Dentro do ambiente ACR o fornecimento de energia elétrica aos consumidores é cobrado em forma de tarifas. Pode-se entender a tarifa de energia elétrica como sendo o preço cobrado por unidade de energia consumida ou potência demandada. A ANEEL detalha a tarifa como sendo o resultado de três custos distintos, o custo da energia gerada (geração), o transporte de energia até as unidades consumidoras (transmissão de distribuição) e os encargos setoriais.

Para que possíveis ganhos derivados da eficiência na geração de energia hidrelétrica sejam repassados aos consumidores finais é necessário que o ambiente de comercialização permita tal fato. No ACL, como os contratos de energia são firmados livremente, o ajuste de preços se dá de forma automática pelas variações na oferta e na demanda. Porém, como atualmente a maior quantidade demandada e maioria dos consumidores de energia elétrica, sejam eles residenciais ou comerciais, estão sujeitos ao ACR, o ajuste de preços está associado à forte regulação estatal.

### 2.3. COMPOSIÇÃO TARIFÁRIA

No mercado regulado, cada um dos segmentos de geração, transmissão, distribuição e comercialização, afeta diretamente a tarifa ao consumidor final, além dos impostos e encargos. Segundo a ANEEL a tarifa visa assegurar aos prestadores dos serviços acima listados remuneração suficiente para cobrir custos operacionais e ainda remunerar investimentos necessários para expandir a capacidade do sistema.

O gráfico 4 detalha a composição média percentual da tarifa de energia elétrica no ano de 2018. A geração em si responde por aproximadamente um terço do valor final da tarifa.

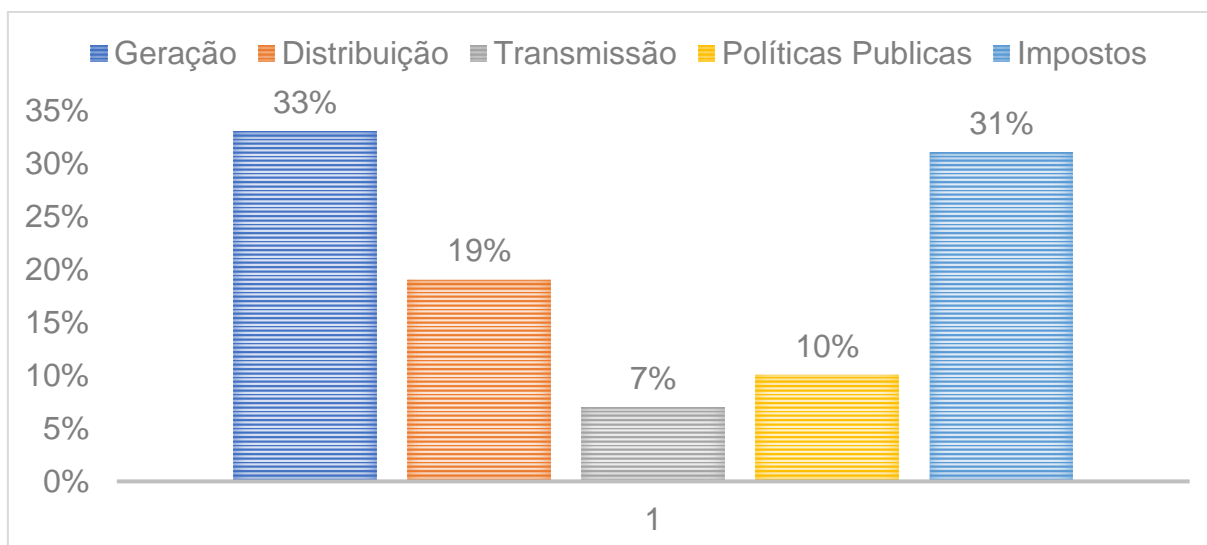


Gráfico 4 - Composição da tarifa de energia

Fonte: ANEEL (2018)

Montalvão (2009) aponta que a parte dos encargos setoriais e tributos embutidos na tarifa é de certa forma responsável por criar uma série de distorções e ineficiências dentro do sistema elétrico brasileiro. Estes custos de energia atendem questões específicas, instituídas em lei e derivadas de políticas estabelecidas pelo governo federal.

A ANEEL também estabelece classes de consumo e pratica tarifas diferenciadas para seus consumidores de energia elétrica. A Tabela 3 apresenta as tarifas médias praticadas ao longo do ano de 2019 por classe de consumo e fornecimento, com e sem tributos.

Tabela 3 - Tarifa Média em R\$/MWh de Fornecimento em 2019 sem tributos

Classe de Consumo	Tarifa Média R\$/MWh
<b>Comercial e Serviços e Outras</b>	524,88
<b>Consumo Próprio</b>	534,7
<b>Iluminação Pública</b>	311,39
<b>Industrial</b>	469,88
<b>Poder Público</b>	533,8
<b>Residencial</b>	536,48
<b>Rural</b>	389,5
<b>Rural Aquicultor</b>	260,7
<b>Rural Irrigante</b>	302,25
<b>Serviço Público (água e esgoto e saneamento)</b>	397,59
<b>Serviço Público (tração elétrica)</b>	420,67

Fonte: ANEEL (2019)

A fixação destas tarifas de energia elétrica tem por objetivo promover principalmente o equilíbrio econômico-financeiro dos agentes que prestam estes serviços de energia. Para isto, periodicamente é feita uma revisão tarifária no sentido de que este objetivo seja alcançado (CASTRO, 2015).

Os contratos de concessão referentes à atividade de distribuição estão sob supervisão e regulação da ANEEL, sendo esta a responsável por homologar os valores calculados para efeito de reajuste referente às revisões e aos reajustes tarifários.

O reajuste tarifário anual é um dos mecanismos de atualização do valor da energia pago pelo consumidor final. Anualmente os custos referentes à compra de energia elétrica, transmissão de energia elétrica e encargos setoriais são recalculados em função dos preços vigentes e suas respectivas variações para mais ou para menos. Segundo a ANEEL, o reajuste corresponde aos custos efetivamente realizados no período apurado e repassados ao processo tarifário subsequente.

No mercado ACR, eventuais ganhos ou perdas de eficiência nos custos de geração hidrelétrica seriam repassadas ao consumidor proporcionalmente à parcela correspondente ao valor apurado nestes reajustes. Em contrapartida, no mercado ACL os preços tenderiam ao ajuste naturalmente de acordo com a lei da oferta e demanda.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. EFICIÊNCIA NO MERCADO DE ENERGIA

Um mercado livre de energia que preze pela competição na comercialização tem na teoria microeconômica um de seus pilares. Quanto melhor for a sinalização de preços, melhor será sua eficiência. Neste caso, as empresas objetivam maximizar seus lucros e os consumidores por sua vez tentam minimizar os pagamentos (Viana, 2018).

ROCKMANN (2018) classifica a liberalização do mercado de energia em três estágios, no primeiro estágio trata da desverticalização das atividades de geração, comercialização, distribuição e transmissão de energia elétrica, ou seja, existe a impossibilidade de uma mesma empresa prestar mais de uma atividade.

No segundo estágio de liberalização existe a criação de um mercado livre, em que somente determinados consumidores podem transacionar livremente com qualquer agente de geração. Atualmente o Brasil está enquadrado neste estágio, ou seja, a migração para mercado livre ACL ainda é limitada e pouco flexível.

O terceiro estágio de liberalização ocorre quando todos os consumidores podem livremente transacionar com qualquer agente. Neste estágio as leis microeconômicas de formação de preço diante do equilíbrio entre oferta e demanda se aplicariam perfeitamente.

Ocorre que, quanto maior for o grau de liberalização de um mercado, mais o Estado perde a capacidade de regulação, de formulação de políticas públicas e atuação e controle. Em um terceiro estágio, como um mercado competitivo, a atuação do Estado estaria limitada ao papel de agência reguladora no sentido de evitar práticas anticompetitivas entre vendedores e consumidores (Viana, 2018).

O mecanismo de formação de preço também pode ser afetado pela possibilidade de exercício de poder de mercado de grandes agentes. Ou seja, um agente responsável por um elevado volume ou parcela da produção conseguiria manipular o preço em benefício próprio. Este é um dos grandes desafios na

implementação de um mercado de energia elétrica baseado em oferta de preços (ZUCARATO, 2009).

Atualmente a geração de energia elétrica enfrenta o desafio contínuo no sentido de sempre melhorar seu desempenho, objetivando promover a eficiência e crescimento econômico, garantindo um suprimento de energia de qualidade, confiabilidade, fazendo isto de maneira a apresentar os menores custos possíveis aos consumidores (ZUCARATO, 2009). O fato é que na indústria de energia elétrica cada vez mais a leis de mercado ditam as regras de precificação da energia elétrica, deixando esta de ser definida somente pelos custos e passando a ser tratada como uma *commodity* competitiva, tendo o seu preço sendo definido pelo mercado (HOGAN, 1998).

Este ambiente competitivo permite que a formação de preços seja estabelecida de acordo com o comportamento dos agentes e suas interações acabam influenciando o funcionamento do mercado. Neste sentido, as decisões são tomadas no sentido de reduzir margens, preços e custos em relação aos componentes da geração de energia. O Fato é que o preço praticado precisa ser suficientemente competitivo para viabilizar a produção.

Os estudos citados até aqui discutem aspectos de precificação, funcionamento e eficiência no mercado de energia elétrica. Nenhum deles, contudo, busca avaliar quantitativamente os possíveis impactos de mudanças em custos do setor hidroelétrico. Alguns outros estudos, contudo, se dedicam a avaliações quantitativas de fontes alternativas de energia. Entre eles, Alves (2018) analisou os benefícios do aproveitamento energético da biomassa florestal e seus reflexos no mercado de energia em diferentes cenários utilizando um modelo econômico de amplo espectro, da classe dos modelos de equilíbrio geral computável. Suas conclusões sugerem praticamente não haver impactos nos setores econômicos e nas taxas anuais de crescimento derivados destas alterações.

Já Maluf (2014), também através de um modelo de equilíbrio geral computável, projetou cenários de utilização de fontes alternativas para a geração de energia elétrica e avaliou os impactos nos diferentes setores da economia em especial ao setor agropecuário e energético, concluindo pela sua viabilidade e crescimento.

É notável, por meio da literatura existente, que o tema eficiência no setor elétrico vem sendo discutido a bastante tempo e objeto de inúmeros estudos por parte da comunidade acadêmica. No entanto, inexistem estudos específicos que utilizaram modelos econômicos de equilíbrio geral computável para projetar em cenários de eficiência exclusivamente na parte de geração de energia hidrelétrica, objeto desta presente dissertação.

### 3.2. PROJEÇÕES PARA O SETOR ELÉTRICO

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) auxilia no planejamento do setor energético, inclusive o setor elétrico. Dentre algumas de suas competências está a de realizar estudos e projeções futuras para a matriz energética brasileira, efetuar estudos para o aproveitamento ótimo dos potenciais hidráulicos, elaborar estudos relativos aos planos de expansão da geração e transmissão de energia elétrica no curto, médio e longo prazo, entre outros.

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) é um documento informativo elaborado anualmente pela EPE e seu objetivo primordial é determinar as expectativas de expansão do setor de energia nos próximos dez anos. O PDE 2029 (EPE, 2020) é o mais recente documento deste tipo e foi elaborado no ano de 2019. Compreende um estudo para o horizonte de 2019-2029, e nele estão consolidadas as estratégias a serem adotadas para atendimento da demanda futura por energia.

Tal documento servirá de base para orientar as projeções futuras do presente estudo, no que diz respeito às trajetórias de evolução do sistema elétrico, de forma a calibrar um cenário de referência para o modelo econômico a ser utilizado.

A tabela 4 detalha a capacidade instalada de cada fonte energética e seu respectivo percentual de incremento e participação ao longo do período analisado no PDE 2029 (EPE, 2020). Algumas projeções desta tabela merecem destaque, em especial, a redução da participação da capacidade instalada de energia hidráulica no total, de 61% em 2019 para 46% em 2029, e o aumento total na capacidade instalada de 44%. A redução na participação de energia hidráulica se deve principalmente pelo

aumento considerável da geração eólica (163%) e solar (386%) em relação ao ano base de 2019.

Tabela 4 - Capacidade instalada de Geração Elétrica

	2019	2024	2029	2019-2024		2024-2029		2019-2029	
				Incremento	%	Incremento	%	Incremento	%
Capacidade Instalada de Geração Elétrica <sup>(6)</sup> (GW)	176	204	251	28	16%	47	23%	75	44%
<i>Centralizada</i>	161	184	222	23	14%	38	20%	61	38%
<i>Hidráulica <sup>(7)</sup></i>	108	110	114	3	2%	3	3%	6	6%
<i>Térmica <sup>(8)</sup></i>	34	42	55	8	22%	13	31%	20	60%
- Renovável	13	14	16	1	7%	1	10%	2	18%
- Não-Renovável	21	27	39	7	32%	11	42%	18	87%
<i>Eólica</i>	15	25	40	9	63%	15	61%	25	163%
<i>Solar</i>	2	6	11	3	158%	5	89%	8	387%
<i>Nuclear</i>	2	2	3	0	0%	1	71%	1	71%
<i>Autoprodução e GD</i>	15	20	29	5	36%	10	48%	15	101%
<i>Renováveis</i>	8	13	21	4	50%	8	63%	12	144%
<i>Não-Renováveis</i>	6	7	9	0	17%	2	22%	3	42%
<b>Transmissão de Energia Elétrica<sup>(9)</sup></b>									
Linhas de Transmissão (km)	147.632	186.214	203.417	38.582	26%	17.203	9%	55.785	38%
Subestações (MVA)	385.206	495.625	557.353	110.419	29%	61.728	12%	172.147	45%
Transporte de Gás Natural (km gasodutos) <sup>(10)</sup>	9.409	9.503	9.503	94	1%	0	0%	94	1%

Notas: (1) Estimativa do IBGE para a população residente em 1º de julho de cada ano.  
 (2) Consumo final nos setores industrial, agropecuário, transportes, residencial, comercial, público. Também inclui consumo no setor energético (E&P, refinarias e movimentação do sistema) e consumo como matéria-prima. Não inclui o consumo para geração de eletricidade e consumo para bunker.  
 (3) Valores de importação e exportação têm sinal positivo e negativo, respectivamente.  
 (4) Produção esperada, estimada com base na disponibilidade projetada de gás natural para UPGNs.  
 (5) Variação anual média calculada de 2020 a 2029, que equivale ao período estimado com exportações de etanol.  
 (6) Inclui as usinas já em operação comercial nos sistemas isolados, com previsão de interligação dentro do horizonte do estudo e considerando a motorização das usinas.  
 (7) Não inclui a importação da geração da UHE Itaipu.  
 (8) Contempla a geração a gás natural, carvão mineral, óleos combustível e diesel e gás industrial. Não inclui energia nuclear.  
 (9) Os valores se referem a instalações da Rede Básica do SIN, incluindo subestações de fronteira com a rede de distribuição.  
 (10) Não inclui gasodutos de transporte em fase de planejamento que ainda não foram propostos pelo MME.

Fonte: EPE (2029)

Essas informações disponíveis no PDE 2029 (EPE, 2020), serão utilizadas para calibrar o modelo que será utilizado, de maneira a retratar da forma mais próxima possível o comportamento do setor elétrico nos próximos anos.

Outras agências internacionais tais como a *International Energy Agency*, *World Energy Council* e a *British Petroleum* também disponibilizam relatórios de projeção para diversos países, inclusive o Brasil. Aqui, o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e apresentado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) é o principal documento disponível de projeção do setor para os próximos anos. É importante ter em mente que o PDE-2029 foi elaborado antes do momento atípico corrente de pandemia. Dessa forma, as

projeções apresentadas neste documento também seguem trajetórias relativamente “otimistas”, baseadas no PDE.

## 4. METODOLOGIA

Para responder ao questionamento proposto neste trabalho utiliza-se um modelo de equilíbrio geral computável desenvolvido pelo *MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, denominado de *Economic Projection and Policy Analysis (EPPA) Model*.

### 4.1. MODELOS DE EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEL

Os modelos de equilíbrio geral computável são ferramentas para simulação do funcionamento da economia que permitem a projeção de variáveis no intuito de mensurar e analisar todo o fluxo de recursos de uma economia real. O fato de ser um modelo computável permite um processamento muito grande de informações objetivando mensurar todos os impactos derivados de variações em variáveis específicas (CHEN *et al.*, 2017).

Nessa linha, este modelo permite avaliar os impactos ocasionados e os efeitos econômicos em outros setores que não foram diretamente afetados por um choque inicial, exibindo os efeitos econômicos sistêmicos de tais fenômenos apurados.

No fluxo circular de renda a interação entre as famílias e as empresas se dá através do fluxo real e do fluxo monetário, passando necessariamente pelo mercado de bens e serviços e pelo mercado de fatores de produção. O Governo tem um papel passivo, através dos impostos cobrados e assim financiando seu consumo e serviços. O Fluxograma apresentado na figura 3 detalha uma representação simplificada de como ocorre o fluxo comercial entre agentes econômicos e regiões e como se dá a interação entre elas. Nele também é detalhado, internamente por região, como o setor produtivo se relaciona com os consumidores. Basicamente o modelo pode ser descrito por uma combinação de vários fluxos circulares de bens e serviços na economia, interligados pelas relações comerciais (exportações e importações).

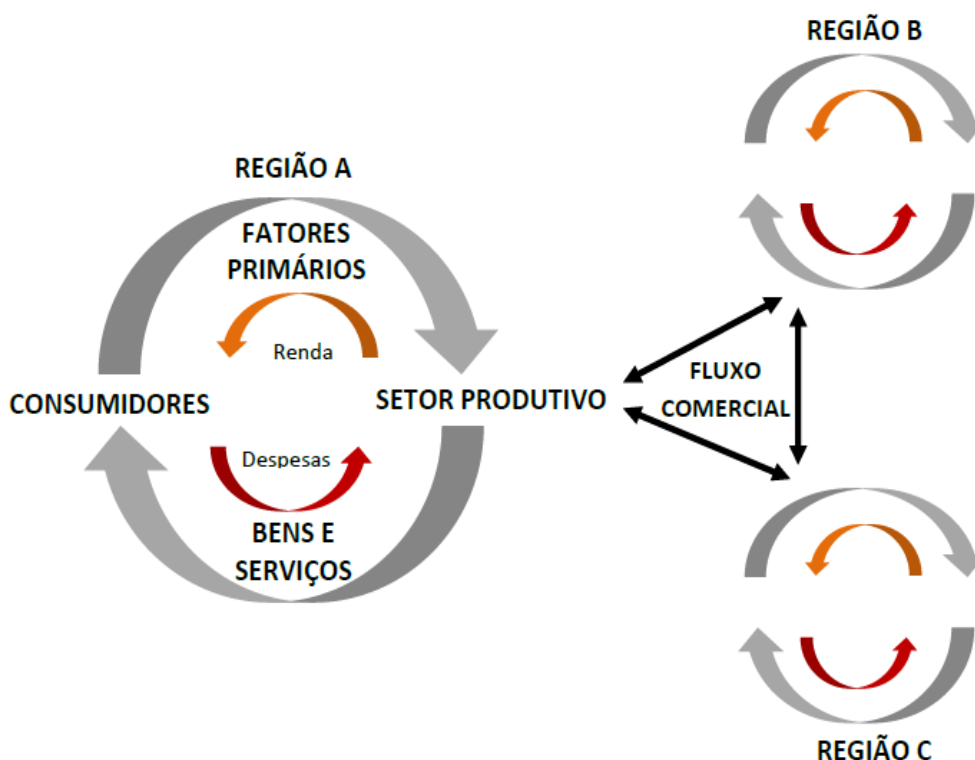


Figura 3 - Fluxo Circular de Bens e Serviços  
Fonte: Chen *et al.* (2017)

A utilização desse tipo de modelo permite compreender como se dá o equilíbrio geral nas relações entre os diversos agentes envolvidos, sendo que cada um deles busca otimizar seu comportamento (de consumo ou de produção) e o relacionamento se dá por meio dos mercados de bens e fatores de produção (SHOVEN; WHALLEY, 1998).

O equilíbrio ocorre quando as variáveis relacionadas a preços e quantidades se alteram na direção de um ajuste, induzidas pela busca dos agentes econômicos pela otimização do comportamento. Ou seja, oferta e demanda se ajustam nos mercados, as empresas competitivas alcançam lucros normais, e as despesas dos consumidores e do governo se igualam às suas receitas (PIERMARTINI; TEH, 2005).

#### 4.2. O MODELO EPPA

O EPPA é um modelo de equilíbrio geral computável que agrupa informações de várias regiões e vários setores da economia mundial. Foi projetado para fornecer

projeções futuras da economia em um contexto mundial, com ênfase no funcionamento dos mercados de energia e nas fontes de emissões de gases de efeito estufa. O modelo é solucionado por meio do *software General Algebraic Modeling System* – (GAMS) (Brooke *et al.*, 1998). No presente estudo, os choques econômicos simulados, as projeções consequentes desses choques, e a discussão de resultados do modelo serão restritas ao Brasil, mantendo o cenário padrão do modelo para todo o resto do mundo (CHEN *et al.*, 2017).

Para o presente estudo utilizou-se a versão mais atual do modelo o EPPA6, que simula o comportamento das economias em etapas de 5 em 5 anos de 2010 até 2100, partindo de do ano base de 2007. Para os objetivos do presente estudo, será considerado apenas o horizonte temporal dos próximos 5 a 10 anos, ou seja, 2025 e 2030.

Dados de entrada do modelo são considerados para que os resultados simulados se aproximem dos dados macroeconômicos projetados pelo do Fundo Monetário Internacional (FMI), os dados energéticos da Agência Internacional de Energia (AIE), e, para o caso deste estudo, a projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2029).

O modelo é multissetorial e considera o tratamento explícito das interações entre todos os setores da economia. A tabela 5 representa os diversos setores da economia representados dentro do modelo, a atenção especial se dará ao setor eletricidade representado pela sigla ELEC.

Tabela 5 - Setores no EPPA

<b>Setor</b>	<b>Sigla EPPA</b>
Agricultura - Culturas	CROP
Agricultura - Pecuária	LIVE
Agricultura - Florestal	FORS
Produtos Alimentícios	FOOD
Carvão	COAL
Petróleo	OIL
Petróleo Refinado	ROIL
Gás	GAS
Eletricidade	ELEC
Industria Intensiva em Energia	EINT
Outras Indústrias	OTHR
Habitação	DWE
Serviços	SERV
Transporte	TRAN

Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2017)

Dentro do modelo o setor ELEC foi desmembrado em subsetores representando cada fonte existente e seu respectivo percentual participativo ao longo do tempo, objetivando assim retratar o comportamento do setor frente as mudanças projetadas. Cada setor e subsetor é modelado como uma empresa representativa em um ambiente competitivo, buscando maximizar seus lucros e minimizar seus custos (CHEN *et al.*, 2017).

A figura 4 representa a estrutura do setor de produção de eletricidade do modelo, nele está representada a Produção Doméstica Total subdivida entre as tecnologias Eólica e Solar e a Produção Doméstica para os Substitutos Perfeitos, esta última compreendendo as tecnologias de geração tipo Fóssil convencional, Nuclear, Hidroelétrica e Tecnologias Avançadas de Geração Paltsev *et al.* (2005).

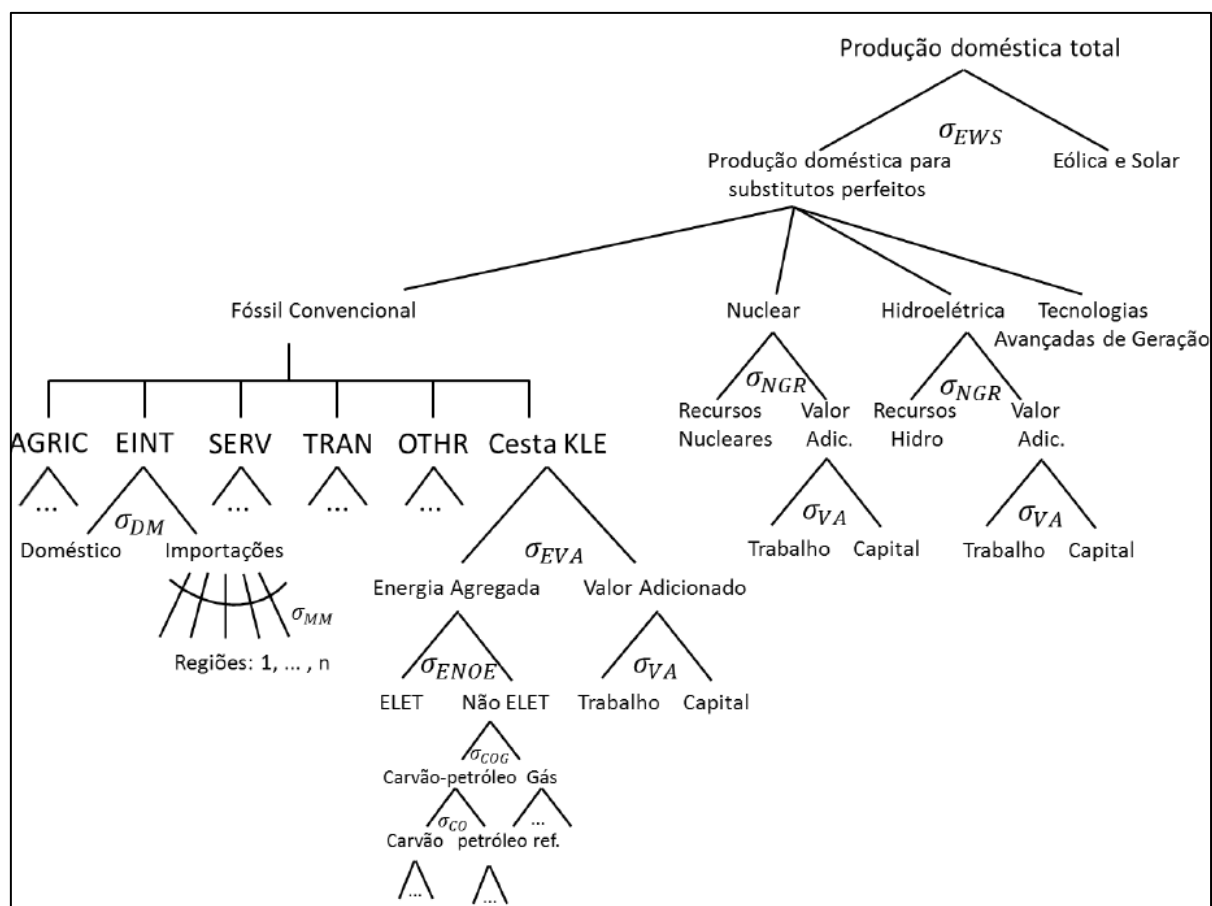


Figura 4 - Estrutura dos setores de produção de eletricidade

Fonte: Paltsev, *et al.*, 2005

A tabela 6 apresenta as diversas elasticidade de substituição utilizadas no modelo.

Tabela 6 - Tipos de Elasticidade de Substituição dos setores produtivos

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>	<b>Comentários</b>
<b>Elasticidades de substituição de energia</b>			
<b><math>\sigma_{EVA}</math></b>	Energia - valor adicionado	0,4 a 0,5	Aplicado na maior parte dos setores; 0,5 para os setores Intensivos em Energia e Outras Indústrias
<b><math>\sigma_{ENOE}</math></b>	Eletricidade - combustíveis agregados	0,5	Todos os setores
<b><math>\sigma_{EN}</math></b>	Entre combustíveis	1,0	Todos os setores exceto Eletricidade
<b><math>\sigma_{EVRA}</math></b>	Energia/materiais/terra - valor adicionado	0,7	Setor de Agricultura
<b><math>\sigma_{ER}</math></b>	Energia/materiais – terra	0,6	Setor de Agricultura
<b><math>\sigma_{AE}</math></b>	Energia – materiais	0,3	Setor de Agricultura
<b><math>\sigma_{CO}</math></b>	Carvão – petróleo	0,3	Setor de Eletricidade
<b><math>\sigma_{COG}</math></b>	Carvão/petróleo – gás	1,0	Setor de Eletricidade
<b>Outras elasticidades de produção</b>			
<b><math>\sigma_{VA}</math></b>	Trabalho – capital	1,0	Em todos os setores
<b><math>\sigma_{GR}</math></b>	Recursos – todos os outros insumos	0,6	Setores de Petróleo Bruto, Gás e Carvão
<b><math>\sigma_{NGR}</math></b>	Recursos Nucleares – valor adicionado	0,04 a 0,4	De acordo com a região
<b>Elasticidades comerciais de Armington</b>			
<b><math>\sigma_{DM}</math></b>	Doméstico – importado (Armington)	2,0 a 3,0 0,3	De acordo com o bem Setor de Eletricidade
<b><math>\sigma_{MM}</math></b>	Entre importações de diferentes regiões (Armington)	5,0 4,0 6,0 0,5	Bens não energéticos Setores de Gás e Carvão Setor de Petróleo Refinado Setor de Eletricidade

Fonte: Paltsev, *et al.*, 2005

A elasticidade de substituição em cada um dos setores produtivos tem seus efeitos retratados de acordo com as especificidades de cada setor, podendo assim mensurar choques na economia global e setorial, tendo em vista esta divisão (CHEN *et al.*, 2015).

O modelo conta com uma base de dados ampla e uma quantidade de variáveis considerável. A tabela 7 detalha apenas as variáveis do modelo que serão objeto deste presente trabalho.

Tabela 7 - Variáveis analisadas

<b>Descrição</b>	<b>Sigla EPPA</b>
PIB (billion US\$)	01_GDP
Consumo (billion US\$)	02_Consumption
Taxa de crescimento anual do PIB (billion US\$)	03_GDP Growth
PIB per capita (US\$)	04_GDP per capita
Emissões de CO2 de combustíveis fósseis (million ton)	05_CO2_fossil
Emissões totais de gases de efeito estufa (million ton)	06_CO2eq_total
Part. Setor Hidro na Geração Primária	07_Hydro share in primary energy
Part. Setor Hidro na Matriz Elétrica	08_Hydro share in electricity
Volume gerado de energia hidro (TWh)	09_Hydro gen.
Volume previsto de geração hidro no PDE (TWh)	10_Hydro gen. EPE
Índice de preço pago pelo consumidor	11_Electr price_dem
Índice de preço recebido pelo produtor	12_Electr price_sup

Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2017)

#### 4.3. ESTRUTURA E FECHAMENTO DO MODELO EPPA

O modelo EPPA tem sua estrutura baseada no conjunto de variáveis relacionados a preços quantidades e seus respectivos reflexos de equilíbrio dos mercados e de renda.

Três condições são necessárias para o funcionamento dos modelos de equilíbrio geral. Uma condição necessária é a de que o lucro econômico seja zero nos setores produtivos. Isto remete a um mercado em competição perfeita e um ajuste natural entre o preço e custo marginal. Esta condição (1) precisa necessariamente ser atendida para todos os setores da economia (CHEN *et al.*, 2017).

$$lucro \geq 0, \quad y \geq 0, \quad produto^T (-lucro) = 0 \quad (1)$$

O equilíbrio dos mercados se dá quando a oferta é igual a demanda para todos os bens que fazem parte da simulação (equação 2). Esta é a condição necessária

para cada bem e cada fator de produção. Um preço de equilíbrio surge a partir do atendimento desta condição.

$$oferta - demanda \geq 0 ; p \geq 0 ; p^T(oferta - demanda) = 0 \quad (2)$$

A condição de equilíbrio de renda exige que, para o agente representativo que agrega consumidores e governo, o valor da receita seja igual ao retorno das dotações de fatores e da receita tributária (equação 3).

$$renda = dotações de fatores + receita tributária \quad (3)$$

As empresas no modelo têm seu comportamento objetivando a maximização dos lucros conforme equação (4). Para cada região (r) e cada setor (i) elas escolhem o nível de produto (y) e a respectiva quantidade de fatores primários (k), os insumos intermediários (x) de outros setores (j), estando sujeito à sua restrição tecnológica de produção (CHEN *et al.*, 2017). As variáveis  $\pi$  e  $C$  denotam as funções de lucro e custo, respectivamente, e  $p$  são os preços de bens e  $w$  são os preços dos fatores.

$$\max_{y_{ri}, x_{rij}, k_{rfi}} \pi_{ri} = p_{ri}y_{ri} - C_{ri}(p_{ri}, w_{rf}, y_{ri}) \text{ tal que } y_{ri} = \varphi_{ri}(x_{rji}, k_{rfi}) \quad (4)$$

Pelo lado das famílias, em cada período, elas escolhem o consumo (d) e a poupança (s) objetivando maximizar uma função de utilidade, sujeita a uma restrição orçamentária dada pelo nível de renda M conforme equação (5).

$$\max_{d_{ri}, s_r} w_{ri}(d_{ri}, s_r) \text{ tal que } M_r = \sum_f W_{rf} K_{rf} = p_{rs}S_r + \sum_i p_{ri}d_{ri} \quad (5)$$

As equações (6) e (7), no conceito otimizador, remetem a como as condições de equilíbrio observadas acima são representadas, remetendo a retornos constantes de escala e lucro econômico zero.

Pelas empresas equação (6):

$$p_{ri} = c_{ri}(p_{ri}, w_{rf}) \quad (6)$$

Pelas famílias equação (7), em que E é a função de dispêndio unitário:

$$p_{rw} = E_r(p_{ri}, p_{rs}) \quad (7)$$

As equações (8) e (9) referem-se ao equilíbrio dos mercados de bens e fatores em cada período simulado. A condição de equilíbrio dos mercados exige que qualquer bem tenha um preço positivo perante o equilíbrio entre a oferta (y) e a demanda total (demanda das empresas mais demanda das famílias), e qualquer bem com excesso de oferta deve ter um preço zero. No caso dos fatores de produção, a dotação dos mesmos deve se igualar ao total demandado pelas diferentes indústrias. A condição de equilíbrio de renda remete ao fato de que o valor das despesas se iguale ao valor da renda para todos os agentes do modelo.

$$y_{ri} = \sum_j y_{rj} \frac{\partial C_{rj}}{\partial p_{ri}} + \bar{m}_r \frac{\partial E_r}{\partial p_{ri}} \quad (8)$$

Onde  $\bar{m}_r$  é o nível inicial de despesas de cada região.

$$K_{rf} = \sum_j y_{rj} \frac{\partial C_{rj}}{\partial w_{rf}} \quad (9)$$

De acordo com Chen *et al.* (2015) o fechamento macroeconômico do EPPA considera a cada período a oferta total dos fatores de produção como constante.

Porém, os fatores são móveis entre setores dentro de uma região, exceto para uma parcela não maleável do capital. Deve-se considerar ainda que o nível de investimento é igual ao nível de poupança. A arrecadação e consumo do governo se alteram e se ajustam diante das mudanças na atividade e no consumo. O fluxo internacional se ajusta sempre que ocorrer uma mudança na atividade de comércio de bens e serviço, e a taxa real de câmbio se ajusta diante dessas mudanças.

Como este trabalho tem como objetivo principal fazer uma análise sobre características presentes no setor elétrico brasileiro, em especial no setor de hidroeletricidade, foram realizados ajustes na base de dados inicial em variáveis exógenas, como crescimento do PIB projetado no cenário de referência, crescimento da demanda por energia e outros, para o caso brasileiro. Estes dados foram apurados conforme projeções divulgadas pelo PDE 2029 (EPE, 2020).

#### 4.4. CENÁRIOS SIMULADOS

Para alcançar os objetivos desse trabalho, serão considerados diferentes cenários simulados a partir da trajetória da economia projetada pelo modelo EPPA. Estes cenários foram simulados com diferentes variações lineares nos níveis de eficiência para o ano de 2025 e 2030 em relação ao cenário base. Ao todo serão avaliados sete cenários.

##### 4.4.1. Cenários de redução de eficiência

Estes cenários simulam uma perda ou redução de eficiência, ou seja, os custos de geração de energia hidrelétrica aumentam em diferentes proporções ao longo dos próximos 5 e 10 anos, conforme detalhado na tabela 8.

Os cenários foram identificados da seguinte maneira:

- CEN1.1: uma perda de eficiência de 3,75% no ano de 2025 acrescido de uma nova perda de 3,75% em 2030.

- CEN1.2: uma perda de eficiência de 2,5% no ano de 2025 acrescido de uma nova perda de 2,5% em 2030.
- CEN1.3: uma perda de eficiência de 1,25% no ano de 2025 acrescido de uma nova perda de 1,25% em 2030.

Tabela 8 - Cenários de redução de eficiência

Tipo	Cenários Simulados	Variação	
		2020-2025	2020-2030
<b>Aumento do custo inerente a geração de energia</b>	1.1	+3,75%	+7,50%
	1.2	+2,50%	+5,00%
	1.3	+1,25%	+2,50%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O objetivo destes três cenários é avaliar como medidas que levariam à diminuição de eficiência em diferentes níveis se refletem na economia e no custo da energia elétrica ao consumidor final. Segundo Montalvão (2009) a redução de eficiência pode ser provocada pela aplicação dos tributos sobre o mercado de energia elétrica, em especial ao setor de geração. Já Zucarato (2009) concluiu que o mecanismo de formação de preços pode ser afetado quando agentes que detêm o monopólio ou participações consideráveis em determinados setores como a geração podem manipular o preço em benefício próprio contribuindo assim para um aumento nos custos. Dessa forma, os cenários aqui discutidos buscam representar mudanças no setor nas direções apontadas por esses autores.

Estes cenários de redução de eficiência propostos podem ser alcançados de diversas formas e não necessariamente nos percentuais exatos objeto deste estudo. As escolhas destes percentuais, objetivam analisar se os resultados obtidos através da redução de eficiência entre os diferentes cenários comportam-se de forma linear, ou seja, o CEN1.2 remete a uma perda de eficiência de 2 vezes em relação ao CEN1.3, e o CEN1.1 de 3 vezes em relação ao CEN1.3.

#### 4.4.2. Cenário de referência

O modelo é calibrado para refletir a tendência histórica de crescimento econômico, geração e consumo de energia e preços dos últimos anos, o que implicitamente considera os efeitos das regras vigentes no período.

Este cenário, aqui representado por CEN2.0, detalha a representação do cenário base no modelo. Dessa forma, pode-se dizer que este cenário, ou cenário de referência, reflete nas variáveis uma trajetória da economia sem choques ou alterações no padrão de evolução da eficiência no sistema hidroelétrico observado nos últimos anos.

O objetivo deste cenário é servir de parâmetro para comparação com os demais cenários projetados no modelo e o cenário projetado no PDE 2029 pela EPE (2020).

#### 4.4.3. Cenários de aumento de eficiência

Estes cenários retratam aumentos de eficiência, ou seja, nos quais os custos de geração de energia hidrelétrica diminuem em diferentes proporções ao longo dos próximos 5 e 10 anos, conforme detalhado na tabela 9.

Os cenários foram detalhados e classificados da seguinte maneira:

- CEN3.1: um ganho de eficiência de 1,25% no ano de 2025 acrescido de um novo ganho de 1,25% em 2030.
- CEN3.2: um ganho de eficiência de 2,5% no ano de 2025 acrescido de um novo ganho de 2,5% em 2030.
- CEN3.3: um ganho de eficiência de 3,75% no ano de 2025 acrescido de um novo ganho de 3,75% em 2030.

Tabela 9 - Cenários de aumento de eficiência

Tipo	Cenários Simulados	Variação	
		2020-2025	2020-2030
<b>Diminuição do custo inerente a geração de energia</b>	3.1	-1,25%	-2,50%
	3.2	-2,50%	-5,00%
	3.3	-3,75%	-7,50%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O objetivo destes três últimos cenários é avaliar o efeito de medidas que levem a um aumento de eficiência sobre a economia e o custo da energia elétrica ao consumidor final. Kessler (2016) discutiu em detalhes que a regulação de mercados monopolizados motiva as empresas geradoras a adotarem práticas de aumento de eficiência produtiva permitindo assim que estes cenários se concretizem. Já Rockmann (2018) retratou que a desverticalização das atividades de geração, comercialização, distribuição e transmissão de energia elétrica também contribui para um cenário de aumento de eficiência.

Enfim, os cenários de aumento de eficiência também podem ser alcançados de diversas formas e não necessariamente nos percentuais exatos apresentados. As escolhas destes percentuais, objetivam analisar se os resultados obtidos através destes ganhos de eficiência entre os diferentes cenários comportam-se de forma linear, ou seja, o CEN3.2 remete a um ganho de eficiência de 2 vezes em relação ao CEN3.1, e o CEN3.3 de 3 vezes em relação ao CEN3.1.

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo são detalhados os resultados decorrentes da simulação dos cenários no modelo EPPA. Inicialmente buscou-se apurar os efeitos de natureza macro relacionadas ao objeto de estudo da deste trabalho, em seguida buscou-se avaliar de forma detalhada algumas outras variáveis que dão suporte a estes resultados ou estão a eles ligadas diretamente. Após, apresenta-se os efeitos setoriais derivados dos cenários simulados.

### 5.1. CENÁRIO BASE

A partir das projeções efetuadas e das perspectivas nacionais projetadas pelo PDE 2029 (EPE, 2020), foi elaborado um cenário de referência (CEN2.0) para a economia nacional, considerando uma trajetória de crescimento a taxas modestas de 2015 a 2020, e sinalizando uma recuperação gradual da economia ao longo dos 10 próximos anos, objeto deste estudo.

É importante destacar que existem uma série de fatores que precisam ocorrer para que este cenário base se concretize, tais como, questões fiscais, reformas estruturais, produtividade, investimentos, entre outros. Estes fatores poderão impactar o desempenho da atividade econômica em todos os setores da economia, não permitindo que este cenário se concretize exatamente desta maneira ao longo dos próximos anos. O fato deste cenário retratar o desempenho da economia como um todo permite a comparação com os cenários alternativos permitindo uma mensuração dos efeitos possíveis em termos relativos, diante dos choques simulados.

A demanda por energia elétrica está alinhada com as expectativas de evolução do consumo diante da tendência crescente de eletrificação no País. Para o setor hidrelétrico, observa-se uma crescente demanda sem perspectivas para aumento do suprimento, tendo em vista suas limitações de expansão. Isso permite o surgimento de novas fontes, tais como à energia eólica e solar, ainda que com participações menores, porém, em níveis relevantes se analisadas em conjunto.

No gráfico 5 é possível observar crescimento do consumo projetado de energia elétrica pelo PDE 2029 (EPE, 2020) e sua correspondente projeção no cenário base da simulação efetuada no EPPA.

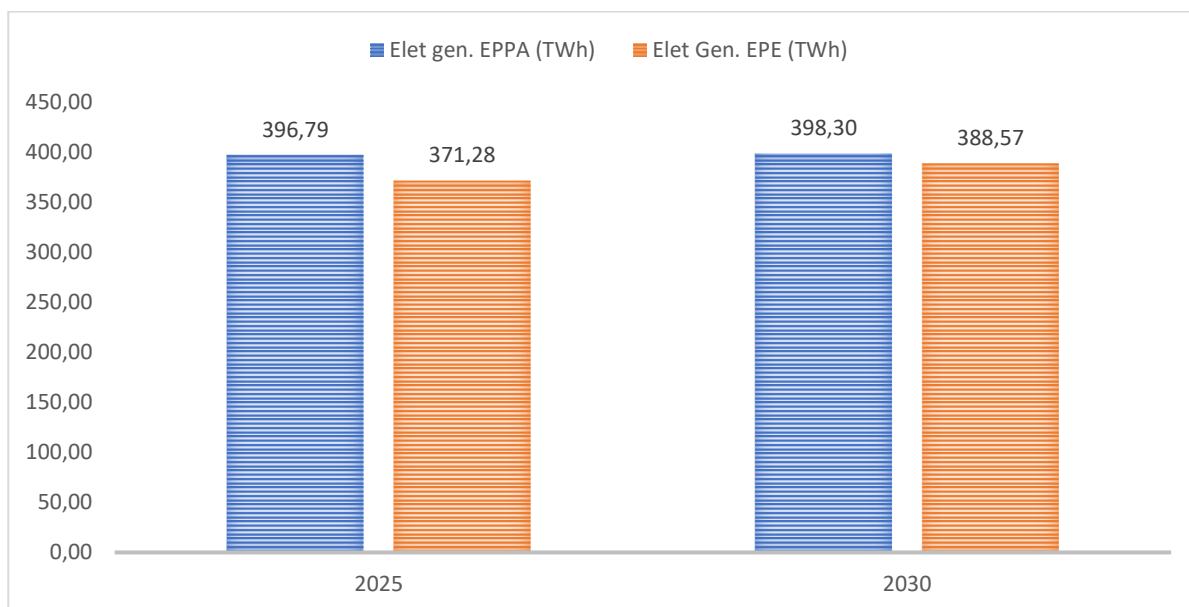


Gráfico 5 - Projeção de Consumo Total de Energia Elétrica (TWh)

Fonte: Elaborado pelo autor

Comparativamente, o consumo projetado pelo EPE para 2025 e 2030, representado pela cor laranja está alinhado ao cenário base (CEN2.0) do modelo EPPA, representado pela cor azul.

Outra variável que merece destaque é o crescimento do PIB, tendo o PDE 2029 (EPE, 2020) projetado um crescimento de 2,8% nos próximos 5 anos e 3,0% nos 5 anos seguintes e consequentemente um crescimento acumulado de 14,81% nos próximos 5 anos e de 33,09% nos próximos 10 anos. A trajetória de evolução do modelo EPPA considerou que essas taxas de crescimento serão exatamente as observadas na economia brasileira no cenário base.<sup>1</sup>

No gráfico 6 é possível observar a redução, projetada em relação ao cenário base EPPA, de participação do setor hidrelétrico no total de energia consumido, ou seja, no ano de 2025 haverá uma redução de 8,31% em relação ao ano de 2020 e no

<sup>1</sup> O modelo EPPA permite que a taxa de crescimento de um dado país ou economia seja fixada exogenamente no cenário de referência (ou cenário base), de forma que a produtividade total dos fatores (capital e trabalho) se ajuste endogenamente para que tal taxa de crescimento seja alcançada. Nos cenários alternativos (de choque), o PIB passa a ser endógeno, enquanto a produtividade total dos fatores se torna exógena, e igual à do cenário Base.

ano de 2030 haverá uma redução ainda mais expressiva de 17,15% em relação ao ano de 2020. Aqui também percebe-se que estes resultados estão bem alinhados com as projeções divulgadas pelo PDE 2029 (EPE, 2020).

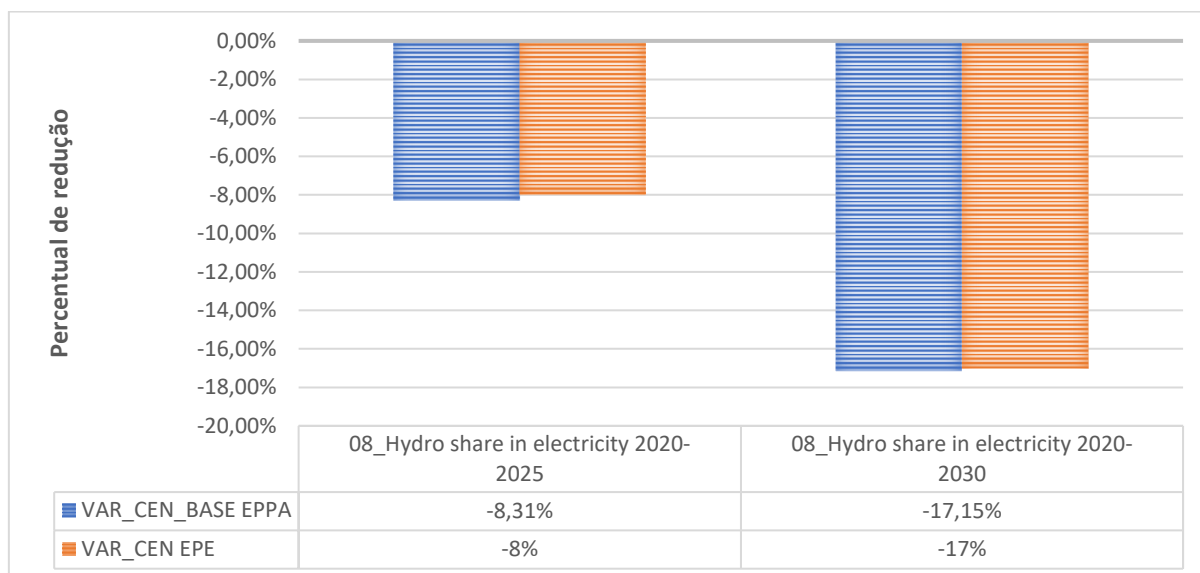


Gráfico 6 – Projeção da participação da energia hidrelétrica na capacidade instalada total

Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo também projeta, conforme gráfico 7, um incremento na ordem de 2,13% do preço médio pago pelo consumidor final pela energia elétrica ao longo dos próximos 5 anos (2020-2025) e um incremento na ordem de 3,25% nos 5 anos seguintes (2025-2030).

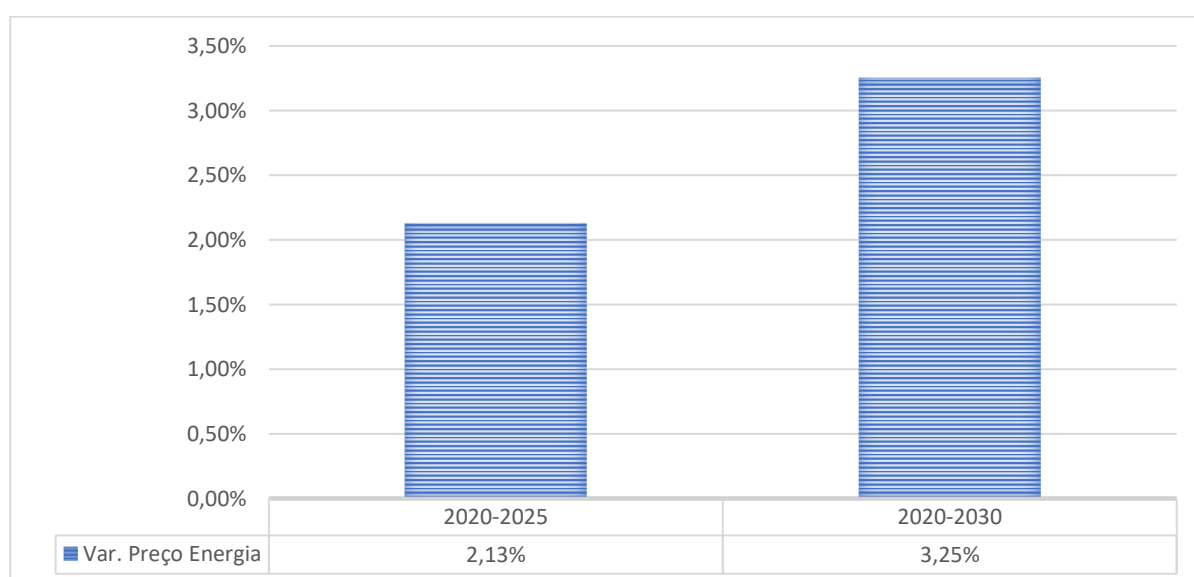


Gráfico 7 - Evolução do Preço da Energia Elétrica

Fonte: Elaborado pelo autor

O preço pago pelo consumidor final servirá de parâmetro comparativo entre os diferentes cenários de aumento e diminuição de eficiência na geração de energia elétrica.

## 5.2. RESULTADOS DOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS NA EFICIÊNCIA

### 5.2.1. Cenários de diminuição de eficiência

Como detalhado acima, o modelo EPPA projeta no cenário base (CEN2.0) um crescimento no Produto Interno Bruto – PIB de 2,8% nos próximos 5 anos e 3,0% nos 5 anos seguintes tendo assim um crescimento acumulado de 14,81% nos próximos 5 anos e de 33,09% nos próximos 10 anos. O Gráfico 8 mostra como essa projeção é alterada nos cenários de redução da eficiência do setor hidroelétrico. No CEN1.1 o PIB projetado em 2030 é de 32,94%, ou seja, neste cenário ocorre uma variação negativa de -0,15 pontos percentuais em termos absolutos de variação ao longo dos próximos 10 anos em relação ao projetado no cenário base (CEN2.0).

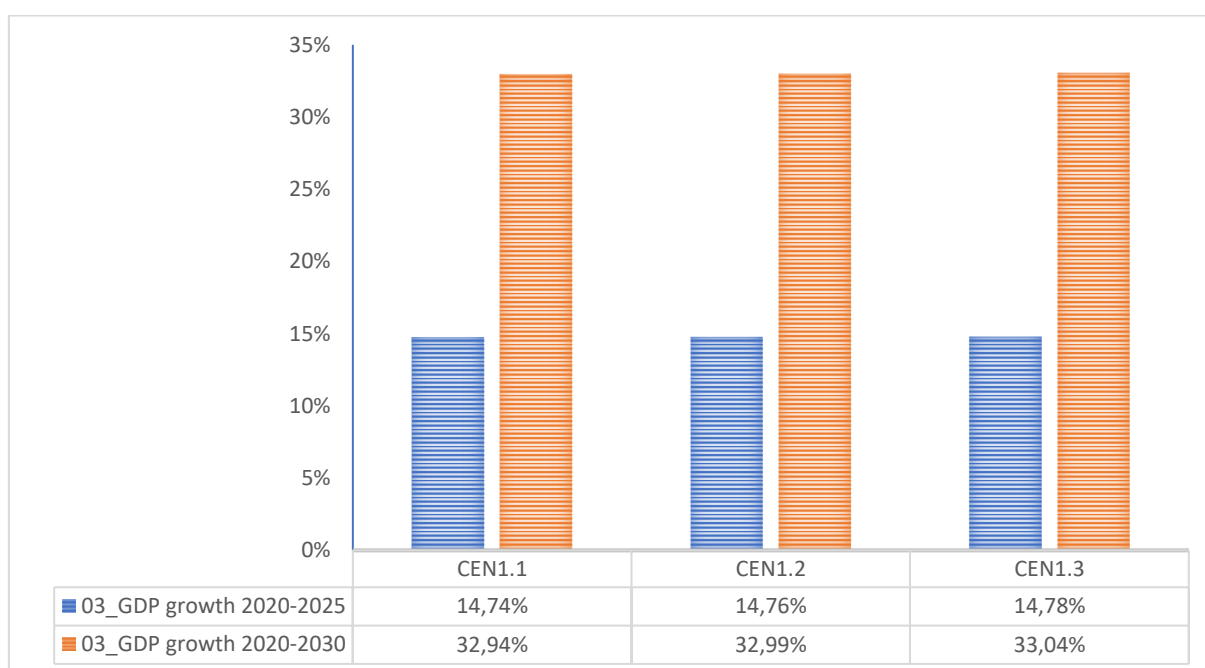


Gráfico 8 - Variação percentual no PIB em cenários de diminuição de eficiência

Fonte: Elaborado pelo autor

Isso significa que a diminuição de eficiência na geração de energia hidrelétrica é pouco relevante para impactar o PIB, afetando muito pouco a alocação dos recursos na economia. Consequentemente, a trajetória de crescimento econômico do país seria quase nada afetada em cenários de queda de até 7,5% na eficiência na geração de hidroeletricidade. Vale considerar que esse resultado reflete a participação direta relativamente pequena do setor de energia hidroelétrica no valor adicionado nacional e na geração do PIB do país. Apesar deste setor ser responsável por cerca de 67% da geração elétrica no país, a eletricidade contribui com apenas 13% da oferta total de energia (EPE, 2019). De acordo com as contas nacionais do IBGE (IBGE), a produção e distribuição de eletricidade, gás, água, esgoto e limpeza urbana contribuiu em 2009 com R\$ 86,59 bilhões para o valor adicionado bruto do país, de um total de 2.794,38 bilhões (IBGE, 2009). Isso equivale a apenas 3,1% do valor adicionado bruto gerado naquele ano. Dessa forma, a contribuição direta da geração de eletricidade para o PIB é inferior a 3%, e portanto, aumentos nos custos desse setor em até 7,5% causariam pequenos impactos no PIB do país.

Outra variável relevante está relacionada à participação do setor hidrelétrico dentro da matriz elétrica brasileira. O cenário base (CEN2.0) já projetava uma redução nesta participação, sendo que, com a simulação de cenários de diminuição de eficiência, este declínio na participação foi mais intenso.

Como detalhado acima, no cenário base (CEN2.0), no ano de 2025 haverá uma redução de 8,31% em relação ao ano de 2020 e no ano de 2030 haverá uma redução ainda mais expressiva de 17,15% em relação ao ano de 2025.

Analisando os resultados, o cenário CEN 1.3 apresentou uma variação negativa na ordem de 6,32% nos próximos 5 anos (2020-2025), e no CEN 1.1 a variação foi negativa na ordem 8,89% também para os próximos 5 anos. Para os próximos 10 anos (2020-2023) o CEN 1.3 projetou uma redução de 21,03% e o CEN 1.1 uma redução de 18,44%. Ou seja, comparando com o cenário base (CEN2.0), através do gráfico 9 percebe-se que o setor hidrelétrico continuará reduzindo sua participação e esta será um pouco mais acentuada após a aplicação dos cenários de diminuição eficiência.

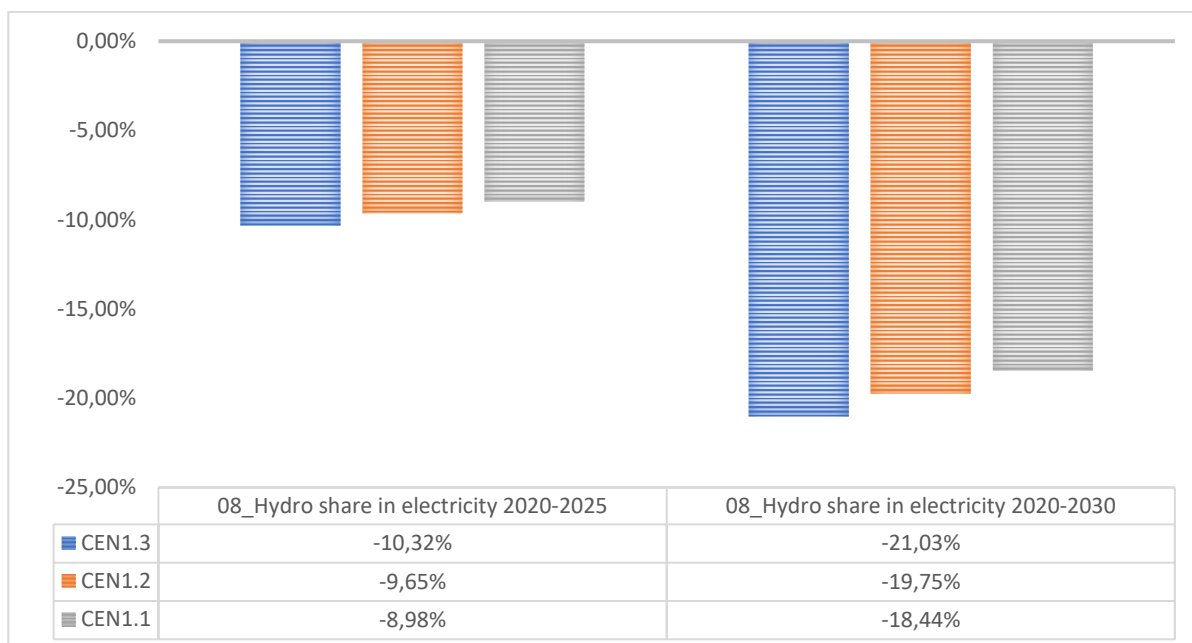


Gráfico 9 – Redução Percentual da Participação Hidrelétrica no setor em cenários de diminuição de eficiência

Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico 10 apresenta os impactos dos cenários de perda de eficiência sobre o preço da energia elétrica aos consumidores. Os resultados sugerem que a variação percentual da tarifa é relativamente baixa, ou seja, uma diminuição de eficiência e consequente aumento nos custos de geração de energia hidrelétrica de até 7,5%, nos próximos 10 anos poderia trazer um aumento no preço final da energia de apenas 0,12% de maneira geral.

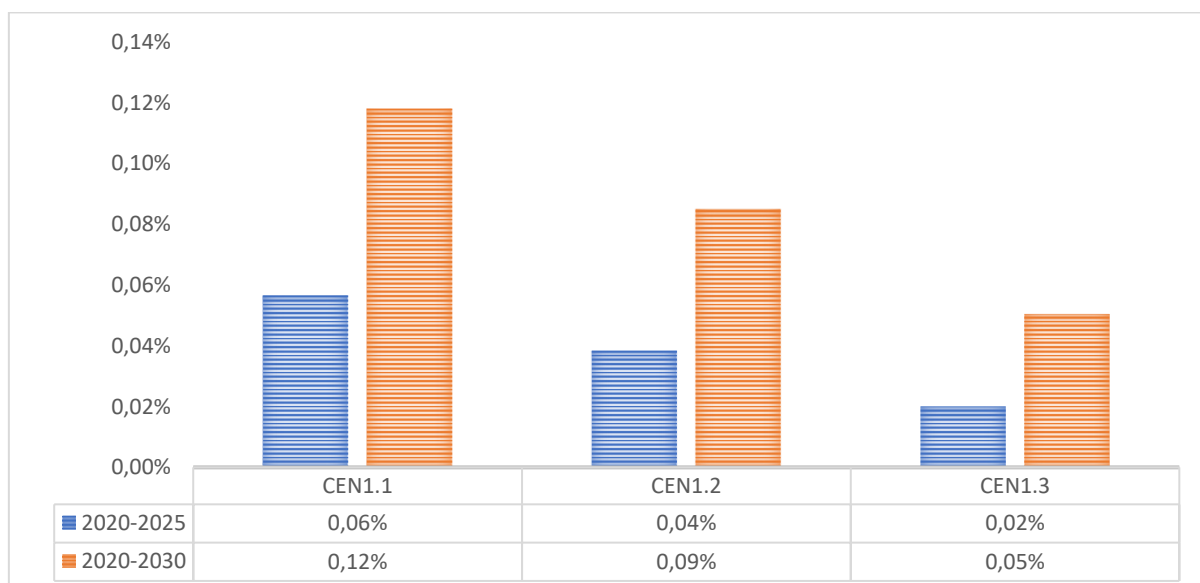


Gráfico 10 - Variação percentual na tarifa ao consumidor final em cenários de diminuição de eficiência

Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo, no cenário base (CEN2.0), projeta um incremento na variação percentual da tarifa de energia elétrica da ordem de 2,13% ao longo dos próximos 5 anos (2020-2025) e um incremento na ordem de 3,25% ao longo dos próximos 10 anos seguintes (2020-2030). Por exemplo, no cenário projetado para 2030, com uma diminuição de eficiência em 2,5%, o reflexo seria de aumento de apenas 0,05% na tarifa em relação ao cenário base (CEN2.0).

Esse resultado demonstra uma baixa sensibilidade do preço final da energia elétrica a mudanças em custos do setor hidroelétrico. Isso é consequência da competição entre as diferentes fontes de energia elétrica do modelo, das quais a hidroeletricidade é a mais relevante em volume, dos custos relativos mais baixos da geração hidroelétrica, e da baixa capacidade de expansão e contração dessa fonte. Ou seja, mesmo com um aumento nos seus custos, essa fonte ainda é relativamente mais barata que as fontes térmicas, que são complementares ao sistema energético, e como o modelo considera competição perfeita entre as fontes fósseis e a hidráulica, o custo mais elevado das fontes fósseis predomina na formação do preço final. Ainda, mesmo com custo mais elevado, a fonte hidráulica tende a ter sua capacidade total aproveitada para a oferta de energia, uma vez que não faz sentido não aproveitar os recursos fixos (reservatórios) construídos para sua geração.

#### 5.2.2. Cenários de aumento de eficiência

Como detalhado anteriormente, o modelo EPPA projeta no cenário base (CEN2.0) um crescimento no Produto Interno Bruto – PIB de 2,8% nos próximos 5 anos e 3,0% nos 5 anos seguintes, tendo assim um crescimento acumulado de 14,81% nos próximos 5 anos e de 33,09% nos próximos 10 anos. Para os cenários de aumento de eficiência, o modelo também projeta um aumento em PIB com variações pouco expressivas no ano de 2025 e 2030 em relação ao ano de 2020 se comparado ao cenário base (CEN2.0). No gráfico 11 podemos observar que no CEN3.3 houve uma variação positiva no PIB de 33,27% ao longo dos próximos 10 anos, ou seja, se comparado com ao cenário base (CEN2.0) trata-se de uma variação

pouco expressiva de 0,18 pontos percentuais, o mesmo ocorre para os demais cenários aqui reportados para os próximos 5 e 10 anos.

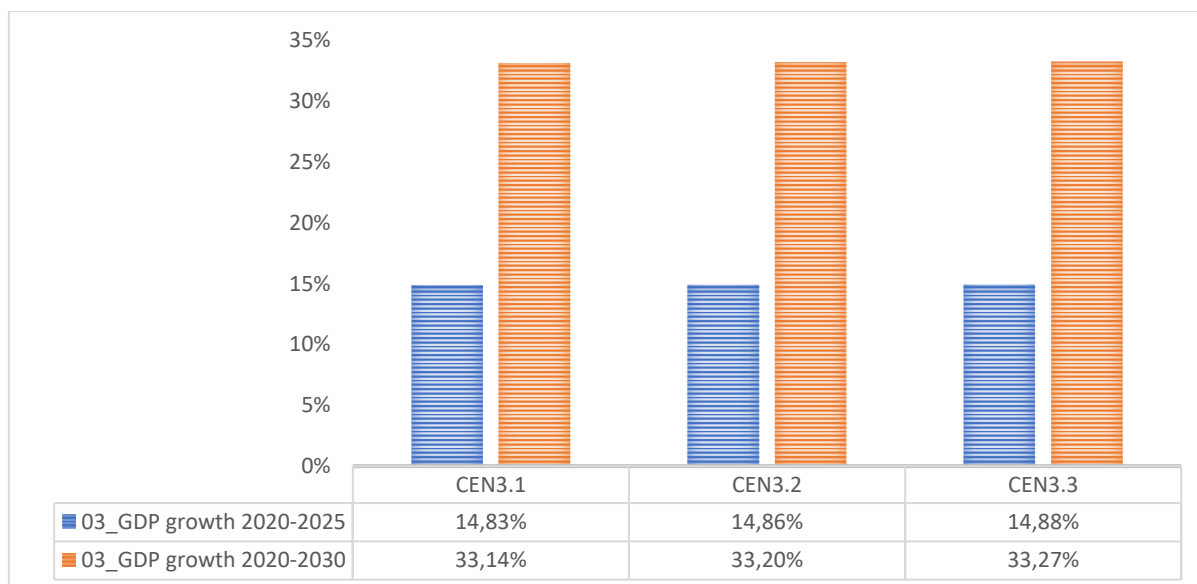


Gráfico 11 - Variação percentual no PIB em cenários de aumento de eficiência

Fonte: Elaborado pelo autor

Ou seja, estes resultados sugerem que os diferentes cenários simulados alteram de forma pouco expressiva as taxas anuais de crescimento.

Também como detalhado acima, no cenário base (CEN2.0), em 2025 haverá uma redução da participação hidrelétrica no cenário nacional de 8,31% e em 2030 de 17,15% em relação aos 5 anos anteriores. Analisando os resultados, o cenário CEN 3.1 apresentou uma variação negativa na ordem de 8,98% nos próximos 5 anos (2020-2025), e no CEN 3.3 a variação foi negativa na ordem 7,64% também para os próximos 5 anos. Para os próximos 10 anos (2020-2023) o CEN 3.1 projetou uma redução de 15,86% e o CEN 3.3 uma redução de 13,32%. Ou seja, comparando com o cenário base (CEN2.0), no gráfico 12 podemos perceber que continuaremos tendo uma redução na participação, mas esta será amenizada após a aplicação dos cenários de eficiência.

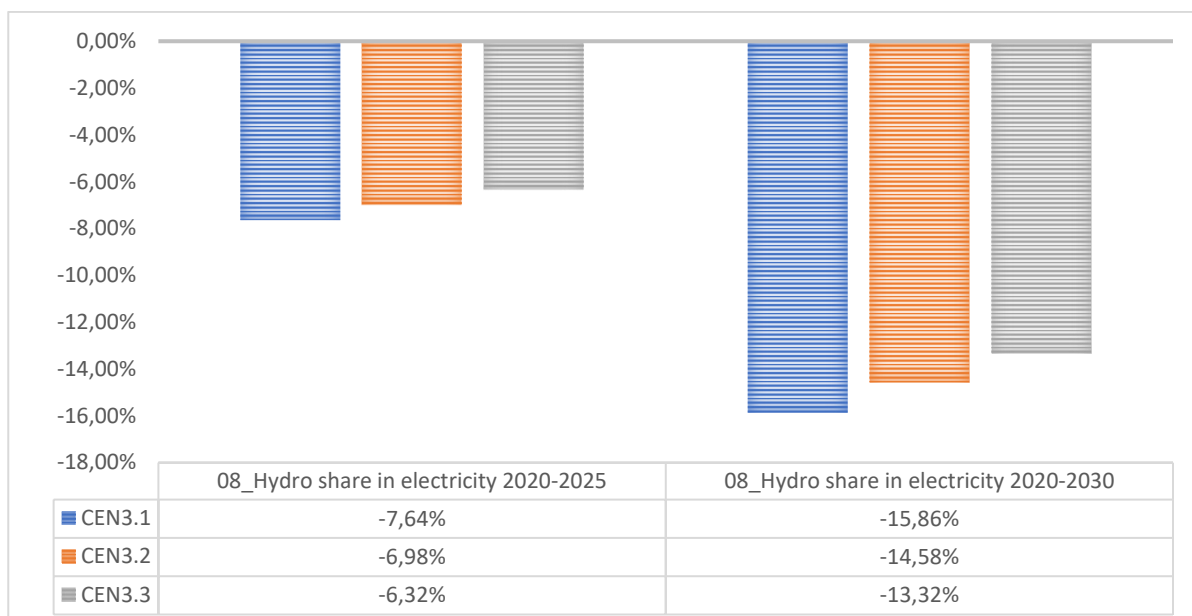


Gráfico 12 – Redução Percentual da Participação Hidrelétrica no setor em cenários de aumento de eficiência

Fonte: Elaborado pelo autor

Como nos cenários acima de diminuição de eficiência, nos cenários de aumento de eficiência os resultados apontam para uma variação pouco expressiva na tarifa ao consumidor final. Como podemos observar no gráfico 13, em 2025 uma redução no custo da hidroeletricidade em 3,75% leva a uma redução na tarifa de 0,06%, e em 2030 uma variação negativa em custos de 7,5% resulta em uma redução na tarifa de apenas 0,10% no CEN 3.3.

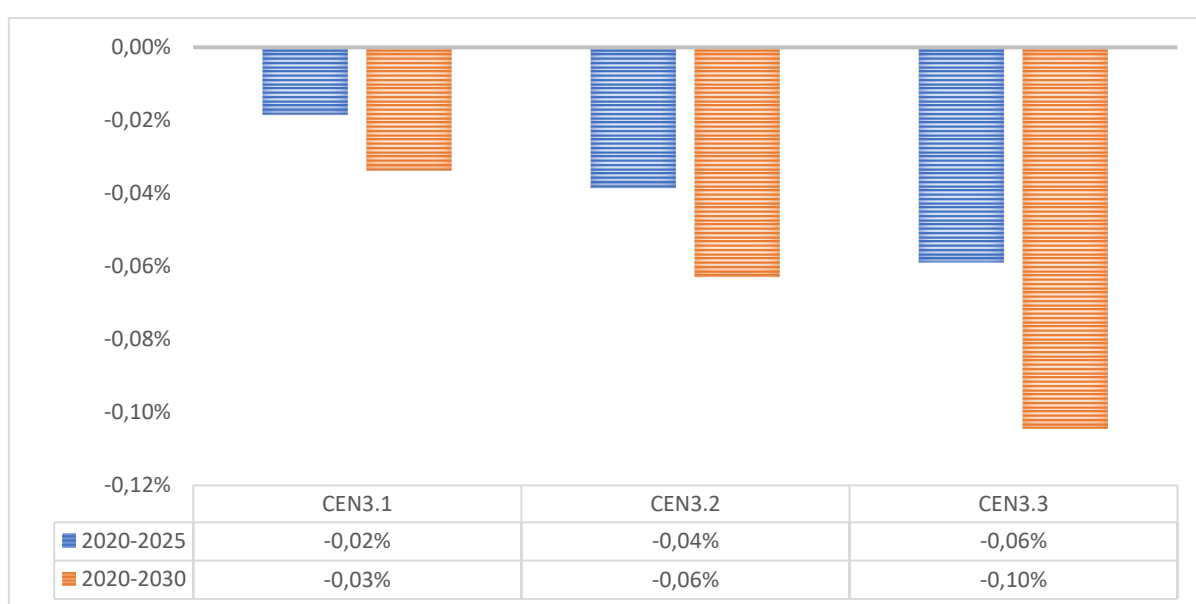


Gráfico 13 – Variação percentual na tarifa ao consumidor final em cenários de aumento de eficiência

Fonte: Elaborado pelo autor

Esse resultado reforça o achado nos cenários anteriores, de baixa sensibilidade do preço final da energia elétrica a mudanças em custos do setor hidroelétrico. Como o ganho de eficiência é restrito à geração hidroelétrica, que possui capacidade limitada de expansão da oferta no curto e no médio prazo diante de quedas em custos, e outras fontes alternativas, principalmente fósseis, são necessárias para satisfazer a demanda nacional, o preço final da tarifa de energia será determinado, em um sistema competitivo, pelo custo marginal das fontes mais caras, que são as fósseis. Em outras palavras, a curva de oferta nacional de energia elétrica, sendo composta pela soma das curvas de custo marginal das diferentes fontes de geração, sofre um deslocamento para baixo apenas do seu segmento formado pelo custo marginal da geração hidroelétrica, enquanto as demais fontes com custos marginais mais elevados não sofrem nenhuma alteração. Como a curva de custo marginal da geração hidroelétrica se desloca muito pouco para a direita, devido à limitação de expansão da capacidade instalada, o preço final da tarifa acaba sendo determinado pelo cruzamento da curva de demanda com a curva de custo marginal das fontes mais caras de geração, que são as fontes fósseis e térmicas. Assim, o ganho de eficiência na hidroeletricidade se traduz em reduções quase nulas nos preços da tarifa ao consumidor final.

É relevante pensar que, se a demanda de energia elétrica atual do país fosse toda satisfeita por geração hidroelétrica, os ganhos de eficiência por redução de custos nesse setor provavelmente seriam traduzidos em quedas de preços de magnitude relativa similar aos ganhos de eficiência, já que a demanda de eletricidade tende a ser pouco elástica a mudanças em preços. Isso aconteceria uma vez que a curva de demanda estaria cruzando a curva de oferta de energia elétrica exatamente em um ponto determinado pelo custo marginal da geração hidroelétrica. Dessa forma, um deslocamento deste custo marginal para baixo determinaria um novo ponto de equilíbrio entre oferta e demanda com preço mais baixo.

### 5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em um mercado competitivo as forças de oferta e demanda garantem o pleno funcionamento do mercado, determinando assim o preço a quantidade e

consequentemente o ponto de equilíbrio. Este modelo funcionaria em um mercado em concorrência perfeita e com inúmeros compradores e vendedores transacionando livremente entre si.

O mercado de energia elétrica brasileiro, como visto acima, é caracterizado como sendo um mercado predominantemente hidrelétrico e a energia proveniente desta fonte é a mais barata quando comparada com as demais.

Como a energia hidrelétrica, objeto deste estudo, é incapaz de atender toda demanda do mercado, o preço no ponto de equilíbrio se dá através de outras fontes com custo de geração maior que a hidrelétrica. Ou seja, qualquer variação na eficiência, negativa ou positiva, no custo de geração hidrelétrica produz efeitos pouco significativos no ponto de equilíbrio entre oferta e demanda do mercado, e consequentemente, no preço pago pelo consumidor final. A Figura 5 ilustra essa situação de forma hipotética. A partir da figura pode-se interpretar cada “degrau” da curva de oferta (segmentos numerados de 1 a 11 na figura) como sendo oriundo da curva de custo marginal de cada empresa ou supridor de energia elétrica. Os fornecedores de fontes hidrelétricas estariam entre os de custo mais baixo, como nos degraus 2 e 3. Mudanças nos custos desses fornecedores não seriam capazes de alterar o preço do mercado, uma vez que este preço se forma a partir do cruzamento da curva de demanda com o segmento da curva de oferta correspondente ao custo marginal de número 7 na figura. Assim, quedas nos custos dos fornecedores de hidroeletricidade deslocariam apenas seus custos marginais para baixo, mas não afetariam os custos marginais dos demais supridores, enquanto que aumentos nos custos marginais da hidroeletricidade só teriam algum impacto no mercado se tais custos se tornassem mais elevados do que do segmento 7 da curva de oferta.

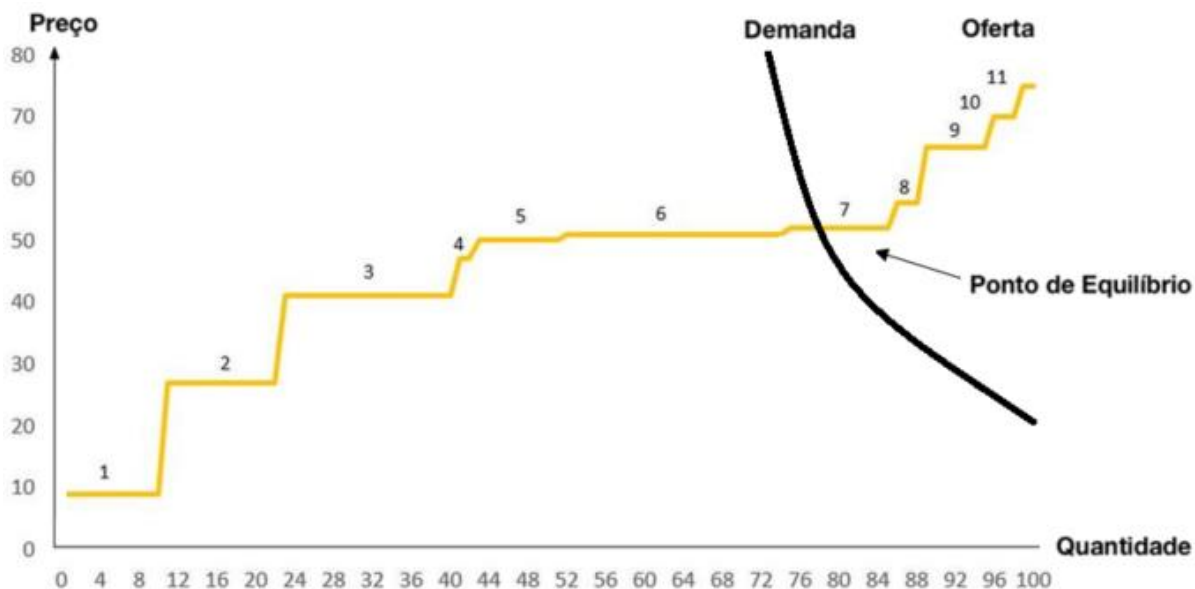


Figura 5 - Curvas teóricas de oferta e demanda no mercado elétrico

Fonte: Elaborado pelo autor

Outro ponto a ser considerado está relacionado à regulação estatal do mercado de energia elétrica. Cabe ao agente regulador o papel de mitigar conflitos de interesse entre empresas e consumidores, coibindo práticas anticompetitivas e atuando em políticas sociais que o estado julga pertinente. Ocorre que, quanto maior for esta intervenção estatal, maior será o impacto sobre a correta sinalização de preços de um mercado de concorrência perfeita.

## 6. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo principal analisar os possíveis impactos de mudanças na eficiência do setor hidrelétrico brasileiro.

A constituição e análise das tarifas de energia elétrica é bastante complexa, apurar detalhadamente como cada setor, geração, transmissão, distribuição e comercialização impacta a tarifa requer uma ampla análise de todo o setor elétrico brasileiro. É necessário conhecer também as diferentes fontes de geração e como elas se comportam, seja garantindo a estabilidade do sistema ou fornecendo energia complementar quando necessário.

Na parte de distribuição é preciso conhecer seu comportamento e como se dá a garantia de expansão, permitindo assim que novos entrantes sempre sejam atendidos. Na parte de comercialização é necessário compreender a estrutura tarifária vigente e como funciona o mercado livre e regulado. Os encargos também representam um papel considerável e devem ser variável objeto de estudo indispensável.

Este trabalho avaliou como mudanças de até +7,5% (7,5% positivos) ou diminuição de até -7,5% (7,5% negativos) nos custos de geração do setor hidrelétrico afetam a economia e a tarifa ao consumidor final. Fez-se uso de um modelo de equilíbrio geral computável para projeção destes cenários de alterações nos custos do setor hidrelétrico. Os resultados indicaram que o setor hidrelétrico, mesmo possuindo maior participação na geração de eletricidade no país (o que garante a estabilidade ao sistema como um todo), se submetido a ganhos ou perdas em sua eficiência, provoca poucos impactos sobre a economia em geral e sobre a tarifa de energia a ser paga pelos consumidores, em particular. Os resultados mostram que o mercado de energia elétrica como um todo é muito pouco vulnerável a variações de custos do setor hidrelétrico.

Nos cenários de diminuição de eficiência simulados no modelo, o crescimento projetado para o PIB do país apresentou leve redução em comparação ao cenário base (CEN2.0). A participação hidrelétrica na matriz elétrica Brasileira continuará caindo e terá sua queda um pouco mais acentuada nestes cenários, e o preço pago pelo consumidor na tarifa de energia terá uma redução pouco significativa. Um

aumento nos custos de até 7,5% (7,5% positivos) refletiria em uma variação no percentual da tarifa ao consumidor final de 0,12% nos próximos 10 anos.

Já nos cenários de aumento da eficiência, o crescimento do PIB será impactado positivamente, a participação hidrelétrica na matriz elétrica terá sua queda amenizada e o preço pago pelo consumidor terá um aumento, mesmo que pouco significativo. A diminuição nos custos de até -7,5% (7,5% negativos) teria reflexos na variação percentual da tarifa ao consumidor final de -0,10% nos próximos 10 anos.

Um aspecto relevante do funcionamento do setor hidrelétrico, não capturado pelo modelo aqui utilizado, é o fato da maioria dos grandes contratos de compra e venda de eletricidade estarem pactuados em longos prazos e com pouca variação ao consumidor final. Como tal, estão sujeitos somente a reajustes anuais pactuados anteriormente dentro do mercado regulado, onde está concentrado a maior demanda energética. De certa forma, esta condição, garante uma estabilidade ao setor e permite elaborar políticas de programação e expansão de longo prazo. Por outro lado, ganhos de eficiência obtidos pelo setor hidroelétrico tenderiam a causar poucos impactos nos preços pagos pelos consumidores, o que é um efeito parecido com o encontrado no presente estudo.

Outra conclusão a do presente estudo foi que o setor hidrelétrico, mesmo perdendo participação nos próximos anos, ainda será de fundamental importância e garantia de estabilidade ao SIN. Observa-se que fontes como a eólica e solar vem ganhando espaço, porém ainda de maneira gradual.

O presente trabalho expôs o contexto e o papel do setor hidroelétrico no país, e quantificou os impactos causados por possíveis ganhos ou perdas de eficiência na geração de energia hidrelétrica. Os resultados confirmam que o setor é relevante para o desenvolvimento econômico e social do país e vem passando por uma série de transformações. Sugere-se que futuros estudos busquem avaliar como essas transformações devem afetar a capacidade do setor elétrico como um todo em lidar com os desafios de crescimento da demanda de energia e aumento dos riscos ambientais na geração e de intermitência das novas fontes renováveis.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **A Tarifa de Energia Elétrica**. 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/tarifas>>. Acesso em: 22 fev. 2020.

ALVES, GABRIEL L.C. **Impactos da utilização da biomassa florestal para a geração de energia elétrica no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Escola de Economia de São Paulo. São Paulo, 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª. Ed. Brasília: ANEEL, 2008.

BROOKE, A. *et al.* **GAMS: a user's guide**. Washington: GAMS Development Corporation, 1998.

CASTRO, N *et al.* **As tarifas de energia elétrica no Brasil e em outros países: O porquê das diferenças**. Rio de Janeiro, 2015.

CHEN, Y.H.H.; PALTSEV, S.; REILLY, J.; MORRIS, J.; KARPLUS, V.; GURGEL, A.; WINCHESTER, N.; KISHIMOTO, P.; BLANC, E.; BABIKER, M. **The MIT economic projection and policy analysis (EPPA) model: version 5**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, mar. 2017.

CHEN, Y.-H. HENRY; PALTSEV, SERGEY; REILLY, JOHN M.; MORRIS, JENNIFER F.; BABIKER, MUSTAFA H. **The MIT EPPA6 Model: Economic Growth, Energy Use, and Food Consumption**, 2015.

EPE/MME, **Balanço Energético Nacional 2019 - BEN2019**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF 2019a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>> Acesso em: 20 Jul. 2020.

EPE/MME, **Expansão Da Geração. Repotenciação e Modernização de Usinas Hidrelétricas**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF 2019b. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>> Acesso em: 20 Jul. 2020.

EPE/MME, **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 - PDE2029**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>> Acesso em: 20 Jul. 2020.

EPE/MME, Nota Técnica PR 07/18 - **Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050**. 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>> Acesso em: 22 Jul. 2020.

GLOBAL TRADE ANALYSIS PROJECT (GTAP). **Página Principal**. Disponível em <<https://www.gtap.agecon.purdue.edu/default.asp>>. Acesso em: 20 Jul. 2020.

HOGAN, W. W. **Competitive electricity market design: A wholesale primer**. December, John F. Kennedy School of Government, Harvard University. 1998.

KESSLER, M. **A regulação Econômica no Setor Elétrico Brasileiro: Teoria e Evidências**. 170 p. Dissertação. (Doutorado em Desenvolvimento Econômico) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2006.

MALUF, GABRIEL. **A competição entre o etanol de segunda geração e a produção de eletricidade pelo uso do bagaço**. Dissertação de Mestrado. Escola de Economia de São Paulo. São Paulo, 2014.

MONTALVÃO, E. **Impactos de Tributos, Encargos e Subsídios Setoriais sobre as Contas de Luz dos Consumidores**. Brasília: Senado Federal, Centro de Estudos da Consultoria, 2009.

PALTSEV, S.; PEILLY, J.M.; JACOBY, H.D.; ECKAUS, R.S.; McFARLAND, J.; SAROFIM, M.; ASADOORIAN, M.; BABIKER, M. **The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: version 4**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2005.

PIERMARTINI, R.; TEH, R. **Demystifying Modeling Methods for Trade Policy**. WTO Discussion Papers, n. 10, 2005.

ROCKMANN, Roberto. **20 anos do Mercado Brasileiro de Energia Elétrica**. 1ª ed. São Paulo: CCEE, 2018.

REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. 2. ed. São Paulo: Manole, 2011.

SANTOS, G. F. **Política Energética e Desigualdades Regionais na Economia Brasileira**. Tese (Doutorado em Economia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SHOVEN, J. B.; WHALLEY, J. **Applying general equilibrium**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

SISTEMA de contas nacionais: Brasil 2005-2009. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

VIANA, ALEXANDRE GUEDES. 2018. **Leilões como mecanismo alocativo para um novo desenho de mercado no Brasil**. Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, São Paulo, 2018.

ZUCARATO, A. N. **Simulação de mercados de energia elétrica com predominância de geração hidrelétrica**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.