



**THE WORLD BANK**  
IBRD • IDA | WORLD BANK GROUP

# Cenário de Baixa Hidrologia para o Setor Elétrico Brasileiro (2016–2030)

Impacto do Clima nas Emissões de Gases de Efeito Estufa

## COORDENAÇÃO

Christophe de Gouvello | Banco Mundial  
Thadeu Abicalil | Banco Mundial

## EQUIPE TÉCNICA

Rafael Kelman | PSR  
Pedro Ávila | PSR  
Bernardo Bezerra | PSR  
Ana Carolina Deveza | PSR



## Sumário Executivo

# Cenário de Baixa Hidrologia para o Setor Elétrico Brasileiro (2016–2030)

Impacto do Clima nas Emissões de Gases de Efeito Estufa

## Sumário Executivo

Brasília, Maio de 2017  
1ª edição



90  
80  
70  
60  
50  
40  
30  
20  
10

PREPARADO POR PSR CONSULTORIA PARA O BANCO MUNDIAL

**EQUIPE BANCO MUNDIAL**

**Christophe de Gouvello (TTL)**

Especialista Sênior em Energia  
Coordenador para Mudanças Climáticas  
Banco Mundial, Escritório de Brasília

**Thadeu Abicalil**

Especialista Sênior em Águas e Saneamento  
Banco Mundial, Escritório de Brasília

**EQUIPE DA PSR CONSULTORIA**

**Rafael Kelman** - Coordenador

**Pedro Ávila**

**Bernardo Bezerra**

**Ana Carolina Deveza**

**CT Comunicação**

Projeto Gráfico e Diagramação



# Súmarío

Prefácio .....	05
Agradecimentos .....	07
1 Objetivo geral e metodologia .....	08
2 Expansão de oferta e demanda de energia elétrica .....	12
3 Simulação do sistema hidrotérmico .....	14
4 Análise do caso de referência .....	17
5 Análise de baixa hidrologia .....	21
5.1 Caracterização de baixa hidrologia .....	21
5.2 Comparação da baixa hidrologia definida na abordagem “ <i>bottom-up</i> ” com as projeções resultantes da abordagem “ <i>top-down</i> ” de “ <i>down-scaling</i> ” dos modelos climáticos globais .....	23
5.3 Custos Marginais de Operação e Emissões associadas à baixa hidrologia .....	26
6 Caso alternativo para evitar o aumento das emissões .....	30
7 Apêndice 1: Impacto do crescimento da irrigação sobre as emissões de GEE do setor elétrico no caso de uma hidrologia seca .....	32



© 2010 O Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento / Banco Mundial

1818 H Street, NW

Washington, DC 20433

Telefone: 202-473-1000

Internet: [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)

Email: [feedback@worldbank.org](mailto:feedback@worldbank.org)

Todos os direitos reservados

Este volume é um produto da equipe do Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento / Banco Mundial. Os resultados, interpretações e conclusões expressas neste volume não refletem necessariamente a opinião dos Diretores Executivos do Banco Mundial ou dos países por eles representados.

O Banco Mundial não garante a precisão das informações incluídas neste trabalho e não aceita qualquer responsabilidade por qualquer consequência da sua utilização. As fronteiras, cores, denominações e outras informações apresentadas em qualquer mapa deste trabalho não implicam qualquer opinião por parte do Banco Mundial sobre o status legal de qualquer território ou o endosso ou aceitação de tais fronteiras.

## DIREITOS E PERMISSÕES

O material desta publicação é protegido por direitos autorais. A reprodução total ou parcial do texto deste documento sem permissão pode constituir violação da lei aplicável. O Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento / Banco Mundial incentiva a divulgação do seu trabalho e concede a permissão para reproduzir partes do mesmo, desde que citada a fonte.

Para permissões para fazer fotocópias ou reimprimir qualquer parte deste trabalho, favor enviar uma solicitação com informações completas para: Copyright Clearance Center Inc., 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, E.U.A. telefone: 978-750-8400, fax: 978-750-4470; Internet: [www.copyright.com](http://www.copyright.com).

Todas as outras consultas sobre direitos e licenças, incluindo direitos subsidiários, devem ser dirigidos ao Gabinete do editor, o Banco Mundial, 1818 H Street, NW, Washington, DC, 20433, E.U.A., fax: 202-522-2422 e-mail:

[pubrights@worldbank.org](mailto:pubrights@worldbank.org).

---

Cenário de baixa hidrologia para o setor elétrico brasileiro (2016-2030):  
impacto do clima nas emissões de gases de efeito estufa (sumário executivo).

Brasília: Banco Mundial, 2017.

36p;

**ISBN:** 978-85-88192-30-0

1. Mudanças climáticas. 2. Emissões de Gases de Efeito Estufa. 3. Setor elétrico brasileiro. 4. Sustentabilidade

---

O Projeto PMR apoia os países em seus esforços para desenvolver cenários pós-2020 de mitigação de mudanças climáticas, além de identificar conjuntos de políticas eficientes e efetivas – incluindo instrumentos de precificação decarbono – a fim de atenuar as mudanças climáticas. Esse apoio será importante para facilitar o trabalho dos países no desenho de suas ações voltadas para a mitigação descritas na sua Contribuição Nacionalmente Determinada (INDC) no escopo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. Para mais informações sobre o trabalho desenvolvido no Projeto PMR podem ser encontradas no site: [www.thepmr.org](http://www.thepmr.org). Em caso de dúvida, é possível escrever para o e-mail [pmrsecretariat@worldbank.org](mailto:pmrsecretariat@worldbank.org).



# PREFÁCIO

A publicação do estudo “Cenário 2016-2030 de Baixa Hidrologia para o Setor Elétrico Brasileiro – Impacto do Clima nas Emissões de Gases de Efeito Estufa” representa um marco na cooperação entre o Banco Mundial e o Ministério do Meio Ambiente nos estudos que serviram para embasar tecnicamente a elaboração da pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil (iNDC), ainda no contexto das negociações do Acordo de Paris.

Para uma análise adequada de cenários de emissões de gases de efeito estufa, determinante no período 2020-2025, conforme a contribuição brasileira ou, ainda mais importante, para um cenário mais longo 2020-2030, como a contribuição indicativa para 2030, era fundamental analisar o cenário de baixa hidrologia devido ao potencial impacto da mudança do clima no longo prazo e as opções para mitigar eventuais efeitos adversos, que poderia implicar um maior despacho de usinas termelétricas na matriz, com consequente aumento das emissões de gases de efeito estufa do País. A baixa hidrologia poderia tornar de difícil execução a ambiciosa contribuição brasileira, anunciada durante a Assembleia Geral da ONU, em Nova York, em setembro de 2015, ainda na fase prévia ao Acordo de Paris.

A principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil é a hidroeleticidade, que representa 64.7% da capacidade instalada, além de cerca de 80% do atendimento ao mercado brasileiro de energia elétrica em anos hidrológicos normais e 60% em anos desfavoráveis. A oferta de energia renovável de fonte hidrelétrica responde, junto com os biocombustíveis – em especial derivados da cana-de-açúcar – por cerca de 42% da matriz energética brasileira. Esse percentual qualifica o Brasil como um país com matriz energética de baixas emissões, especialmente se comparado à média mundial (13%) ou à média dos países-membros da OCDE (7%). Assim, a discussão de um cenário de longo prazo de emissões brasileiras não poderia prescindir de um estudo técnico detalhado de um cenário de baixa hidrologia para o setor elétrico.

Com a ajuda efetiva e imediata do Banco Mundial, no contexto do *Partnership for Market Readiness* (PMR), foi possível contar com o apoio da empresa PSR, reconhecida firma de consultoria com larga experiência nos estudos do setor elétrico brasileiro. Deste modo, tivemos o respaldo técnico que permitiu que a iNDC brasileira (transformada em NDC quando da entrada em vigor do Acordo de Paris,



em novembro de 2016) fosse reconhecida nacional e internacionalmente como uma das mais ambiciosas contribuições para atingir os objetivos do Acordo: limitar o aumento da temperatura média global em no máximo 2 graus Celsius em relação à era pré-industrial e fazer esforços para que esse aumento não supere 1,5 graus. Esperamos que este estudo inovador, agora editado e disponibilizado também em inglês, ajude a integração do risco associado às mudanças climáticas pelos atores do nexos água, energia e agricultura no Brasil e em outros países, em particular no que diz respeito ao seu impacto nas emissões próprias deste nexos.

O Ministério do Meio Ambiente sente-se orgulhoso de ter contribuído para o desenvolvimento desse estudo e registra sua satisfação e agradecimento pela excelência do trabalho e da parceria realizada com o Banco Mundial, que levou à publicação deste trabalho.

Com o debate técnico e responsável sobre o futuro de emissões de gases de efeito estufa do Brasil e os esforços para consolidar a liderança brasileira no combate à mudança global do clima e, em especial, com o desenho de um futuro possível de baixas emissões de gases de efeito estufa, esperamos continuar oferecendo ao mundo nosso trabalho e criatividade para a construção de um futuro melhor para todos.

**EVERTON LUCERO**

*Secretário de Mudança do Clima e Florestas  
Ministério do Meio Ambiente*

## AGRADECIMENTOS

Este relatório foi elaborado sob a direção de Christophe de Gouvello, Especialista Sênior de Energia e Coordenador da Agenda de Mudanças Climáticas do Banco Mundial, com a participação do Thadeu Abicalil, Especialista Sênior em Águas e Saneamento, a pedido da Secretaria de Mudança do Clima e Florestas (SEMCF) do Ministério de Meio Ambiente do Brasil, por uma equipe da PSR Consultoria, composta por Rafael Kelman, coordenador, Pedro Ávila, Bernardo Bezerra e Ana Carolina Deveza. Jose Domingos Gonzalez Miguez e Adriano Santhiago de Oliveira coordenaram a supervisão por parte da SEMCF. Agradecimentos especiais ao Newton Paciornik, que contribuiu na revisão técnica dos documentos intermediários.

Foram organizados vários seminários internos conjuntamente pelo Banco Mundial e a Secretaria de Mudança do Clima, com participação de especialistas brasileiros, para discutir metodologia e os resultados preliminares.

Sob a liderança de Antônio Barbalho, Diretor do Setor de Energia do Banco Mundial para América Latina, o relatório recebeu contribuições dos revisores do Banco Mundial Erwin de Nys, Especialista Sênior em Águas e Saneamento e Coordenador de Programa, Rikard Liden, Especialista Sênior em Hidroeletricidade, e Thierry David, Especialista Sênior em Gestão de Recursos Hídricos. Os agradecimentos estendem-se também a equipe de apoio administrativo do escritório do Banco Mundial em Brasília, em particular a Zélia Brandt de Oliveira e Victor Neves.

Este trabalho foi desenvolvido graças ao apoio do programa “Partnership For Market Readiness” (PMR) da Área de Soluções Transversais para Mudanças do Clima do Banco Mundial. Assim trata-se de uma colaboração de três áreas do Banco Mundial: o Setor de Energia, o Setor de Água e Saneamento e a Área de Mudanças Climáticas.

Os autores agradecem igualmente às organizações e às entidades que se dispuseram a compartilhar seus conhecimentos e impressões à medida que este estudo se desenvolvia. Erros ou omissões são de exclusiva responsabilidade dos autores.

## OBJETIVO GERAL E METODOLOGIA

A principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil é a hidroeletricidade. Em 2016, esta representa 64.7% da capacidade instalada<sup>1</sup> e é responsável pela maior parte do atendimento ao mercado de energia brasileiro, da ordem de 80% em anos hidrológicos normais ou favoráveis e 60% para anos desfavoráveis. No entanto, crescentes restrições ambientais contra hidrelétricas tem tido os seguintes efeitos, inter-relacionados:

- ▶ Redução relativamente significativa na capacidade de armazenar energia pela tendência dos últimos 20 anos das hidrelétricas construídas serem a “fio d’água”, isto é, sem operação de níveis no reservatório, o que lhes permitiria regularizar vazões afluentes;
- ▶ Como consequência, mais usinas térmicas têm sido construídas para complementar a sazonalidade e a intermitência da energia renovável;
- ▶ Aumento da vulnerabilidade do sistema elétrico brasileiro às variações do clima.

Paralelamente, estudos preliminares dos possíveis impactos das mudanças climáticas sobre a hidrologia no Brasil indicam possibilidades de reduções significativas de disponibilidade de água para geração de energia hidrelétrica nas próximas décadas<sup>2</sup>.

Este estudo, elaborado pela PSR para o Banco Mundial e o Ministério do Meio Ambiente (MMA) no contexto do *Partnership for Market Readiness (PMR)*, tem como objetivo ajudar a entender as consequências para o setor elétrico brasileiro em um cenário de baixa hidrologia no horizonte 2030. Tais consequências são importantes não somente do ponto de vista do próprio setor energético, mas também no âmbito do compromisso recentemente assumido de reduzir as emissões do Brasil na sua Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC, na sigla em inglês) apresentada pelo governo na ocasião da COP21 e do novo Acordo de Paris. De fato, os anos recentes têm demonstrado que uma hidrologia baixa em relação ao normal leva ao acionamento por mais tempo das usinas termelétricas, que por sua vez aumentam as emissões do setor. Assim, um cenário de baixa hidrologia no horizonte 2030 contribuiria para o aumento das emissões nacionais projetadas neste horizonte na iNDC, possivelmente reduzindo o efeito dos esforços de mitigação que teriam sido implementados pelo país, tanto no setor elétrico como nos demais setores.

Devido a estrutura da matriz do setor elétrico, fica claro que as variações do clima – induzidas ou não pelas atividades humanas – impactam as emissões do Brasil. Vários estudos

<sup>1</sup> Dados 2016 no website da ANEEL.

<sup>2</sup> A. Lucena et alii (2009): “The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil”, *Energy Policy*, Volume 37, Issue 3, March 2009, Pages 879–889. Mais recentemente, um estudo ainda não publicada coordenada pela Secretaria de Assuntos Estratégicos (SAE) da Presidência da República, com participação de pesquisadores do Instituto de Estudos Espaciais (INPE), da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e da Universidade Federal of Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ), também aponta para riscos de hidrologias mais secas no Brasil como consequências das mudanças climáticas.

exploram as possíveis consequências das mudanças climáticas na geração de hidroeletricidade no Brasil, a partir dos dados produzidos por modelos de simulação das mudanças climáticas. Tais esforços baseiam-se numa abordagem de tipo “down-scaling”, pois são utilizados resultados de modelos de circulação global para gerar resultados com maior resolução espacial. Esta abordagem pode também ser referida como “top-down”, ou seja, da simulação global para a simulação local. Apesar dos progressos importantes observados nos últimos anos nesta área, inclusive no Brasil com o modelo Eta do INPE, resultados da abordagem de “down-scaling” ainda apresentam graus de variabilidade e de incerteza substanciais. Deste modo, esses são dificilmente compatíveis com o grau de precisão que requerem os estudos e as ferramentas de modelagem e planejamento do setor elétrico. Por exemplo, séries passadas de vazões de certas bacias (ex: Sobradinho) reconstituídas por down-scaling indicam valores as vezes significativamente mais altos ou significativamente mais baixos do que os valores observados, sendo o sentido destas variações as vezes trocado quando se passa de uma modelagem global para outra (ex: do modelo HadGEM para o modelo MIROC). Este “gap” científico, que ainda existe entre as modelagens globais e resolução espacial fina de parâmetros locais, em particular no que diz respeito às vazões afluentes nas usinas hidrelétricas, dificulta a internalização pelos agentes do setor elétrico da diferença entre o “risco climático” convencional e o novo “risco de mudanças climáticas”, o que por sua vez acaba prejudicando as projeções de emissões futuras.

É neste sentido que o presente estudo propõe uma abordagem complementar de tipo “bottom-up”, na qual se parte de séries históricas de observações locais dos parâmetros hidrológicos. Em particular, serão usadas séries das vazões afluentes de usinas hidrelétricas. Acredita-se que esta abordagem oferece resultados mais fáceis de serem utilizados pelos agentes do setor elétrico para internalizarem o risco climático, pois utiliza as mesmas séries históricas, os mesmos parâmetros hídricos e as mesmas ferramentas de modelagem utilizadas hoje por esses agentes. Em particular, a metodologia permite fazer testes de sensibilidade do setor a variações climáticas, especialmente a hidrologias secas, que poderiam resultar das mudanças climáticas, porém ainda coerentes do ponto de visto estatístico com as séries históricas conhecidas pelos agentes.

Segundo esta abordagem, propõe-se elaborar cenários futuros de hidrologia, o que foi feito de forma probabilística, representando-os através da Energia Natural Afluente (ENA) ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Esta metodologia leva à construção de um cenário de referência, cuja premissa admite que as vazões futuras repetirão – em termos estatísticos – as vazões passadas (hipótese de estacionariedade das vazões). Este racional leva ao emprego do Método Monte Carlo, segundo o qual, 200 séries de aflúências sintéticas são geradas para as 195 usinas hidrelétricas da base do Operador Nacional do Sistema (ONS), utilizando modelos estocásticos que asseguram “semelhança” estatística destas séries sintéticas com as vazões históricas observadas, ou seja preservando parâmetros como média, desvio padrão, correlações temporais e espaciais, e valores extremos observados no registro histórico. Este método traz elementos objetivos para tratar da incerteza inerente a variação climatológica pois apresenta os resultados em termos de distribuição de probabilidade.

Em um segundo momento, o estudo utiliza critérios estatísticos para definir um subconjunto de hidrologia seca para o período 2015-2030 e analisa as consequências deste cenário “seco” tanto em termos energéticos quanto em termos de emissões.

Para produzir resultados energéticos e de emissões associados a estes cenários hidrológicos, o estudo utiliza as mesmas abordagens, hipóteses e ferramentas utilizadas hoje pelo atores do setor energético, como a Empresa de Pesquisa Energetica (EPE), o Ministério de Minas e Energia (MME) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), com alguns ajustes da PSR, quando considerados necessários, tais como atrasos de certos projetos de geração ou dados relativos ao fim do período analisado. Assim, foram construídos cenários de demanda e planos de expansão da oferta utilizando as mesmas premissas do Plano Decenal de

Energia (PDE)<sup>3</sup>. A otimização da operação do sistema é feita através do modelo SDDP, propriedade da PSR, considerando os procedimentos operativos do ONS para o SIN. O modelo de simulação operativa SDDP produz como resultado a energia gerada por cada usina do sistema em cada mês, conforme os patamares de demanda (ex: ponta e fora da ponta).

Com base nesta geração (MWh) e no seu fator de emissão unitário (tCO<sub>2</sub>/MWh) é calculado o montante de gás carbônico (tCO<sub>2</sub>) emitido no SIN em cada mês para cada cenário hidrológico. O fator de emissão de cada usina (tCO<sub>2</sub>/MWh) é determinado com base em sua eficiência (consumo de combustível por MWh gerado), utilizando dados publicados pelo MME quando disponíveis<sup>4</sup>, tipo de combustível e fator de emissão do combustível (tCO<sub>2</sub> por unidade de combustível). Os fatores de emissão das usinas termoeletricas foram calculados com base em valores padrões publicados pelo Ministério de Ciência e Tecnologia e Inovação (MCTI).

Em seguida, o estudo compara estes resultados da abordagem “bottom-up” com os resultados da abordagem “top-down”, utilizando projeções de vazões para as mesmas bacias hidrográficas abordadas no trabalho de down-scaling realizado no âmbito do estudo Brasil 2040 da Secretaria de Assuntos Estratégicos (SAE) da Presidência da República. Tal estudo foi desenvolvido pelos pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCENE) e da COPPE-UFRJ e considerou os cenários de evolução das concentrações dos GEE dos RCPs<sup>5</sup> 8,5 e 4,5 do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Com base nestes dados de cenários de mudanças climáticas foram produzidos novos resultados energéticos e de emissão, utilizando as mesmas ferramentas de simulação de setor elétrico utilizadas na abordagem “bottom-up”.

O estudo também explora opções de mitigação das emissões do setor que permitiriam compensar o aumento das emissões observado no cenário de hidrologia seca da abordagem “bottom-up”.

As principais conclusões do estudo são as seguintes:

- ▶ Em caso de hidrologia seca, a disponibilidade de hidroeletricidade é reduzida, o que requer acionar mais termelétricas e assim aumentar as emissões de gás de efeito estufa.
- ▶ As emissões anuais num ano seco podem ser até quatro vezes mais altas do que as emissões anuais num ano úmido.
- ▶ No cenário de Baixa Hidrologia considerado neste estudo, as emissões acumuladas do Sistema Nacional Integrado (SIN) são multiplicadas por dois em relação ao cenário de Referência.
- ▶ No caso deste cenário de Baixa Hidrologia, o Custo Marginal Operacional (CMO) poderia ser duas vezes mais alto entre 2017 e 2027 (acima de R\$200/MWh) do que no cenário de Referência (em torno de R\$100/MWh).

<sup>3</sup> Devido a forte recessão econômica enfrentada pelo Brasil a partir do ano 2015, observou-se uma contração da demanda elétrica muito significativa. Isto certamente afeta as premissas utilizadas neste estudo. Todavia, acredita-se que esta contração seja apenas temporária, levando a uma recuperação pelo menos parcial no futuro. Esta contração acelerou o processo de ajuste do balanço entre oferta e demanda, já antecipado neste estudo. Assim, acredita-se que a corrente recessão não inviabiliza os principais resultados e conclusões deste estudo, o qual considerou efeitos acumulados de diferentes cenários de hidrologia ao longo de um período de 15 anos (2016-2030).

<sup>4</sup> Boletim de Gás Natural do MME

<sup>5</sup> Representative Concentration Pathways

No que diz respeito ao ano 2025, o ano de referência para a meta de redução do INDC do Brasil:

- ▶ o valor mediano da contribuição na oferta energia da geração hidrelétrica diminuiria em torno de 5% em comparação ao cenário de Referência (de 70% para 65%),
- ▶ o valor médio das emissões anuais do SIN aumentariam em torno de 30% em relação ao cenário de Referência (de 31.8 MtCO<sub>2</sub> para 41.3MtCO<sub>2</sub>).

Num cenário Alternativo, medidas de conservação de energia e de disseminação de energias renováveis poderia compensar ambos os aumentos do CMO e das emissões observados no cenário de Baixa Hidrologia.

Adicionalmente, uma tarefa exploratória foi conduzida para estudar os possíveis impactos do crescimento da irrigação sobre as emissões de GEE do setor elétrico no caso de uma hidrologia seca. Os resultados deste estudo preliminar são apresentados no apêndice 1.

Apresentamos a seguir os principais resultados.

## 2 EXPANSÃO DE OFERTA E DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA

Para o primeiro capítulo desse estudo, a PSR elaborou um plano de expansão de oferta e demanda para o período 2015-2030 (caso de referência). O plano de expansão representa uma extensão da infraestrutura de geração e transmissão usada pelo ONS em atividades de planejamento energético para os próximos 5 anos, bem como utiliza premissas do Plano Decenal de Energia da EPE.

O processo inicia-se com a definição de hipóteses macroeconômicas para a previsão da carga futura do sistema, incluindo estimativas para perdas elétricas. Em seguida é feita a avaliação da oferta de energia (projetos existentes) além da criação de um plano de expansão de longo-prazo da capacidade de geração incluindo reservas.

Cenários de vazões hidrológicas são gerados para determinar a Energia Natural Afluyente (ENA) que pode ser aproveitada pelas usinas hidrelétricas disponíveis.

Na sequência, é realizada uma simulação energética do SIN através de um modelo de despacho hidrotérmico estocástico proprietário, denominado SDDP (*Stochastic Dual Dynamic Programming*). As principais etapas dessa metodologia são apresentadas na Figura 1.

Por fim, um grande volume de resultados é produzido pelo modelo SDDP, sendo os de maior interesse para o estudo a geração e os custos das usinas, as emissões de GEE e os custos marginais. Os resultados variam por mês e cenário hidrológico.



FIGURA 1 - Visão geral da metodologia

---

Para os cenários de demanda, as simulações de curto e médio-prazo (2015-2019) foram feitas com base no Plano Mensal de Operação (PMO) do ONS de janeiro de 2015 e nas revisões da PSR para os cronogramas de construção/comissionamento dos novos projetos de geração que passam por algum tipo de restrição na construção.

Para as simulações de longo-prazo (2019 em diante), a expansão se baseia em um mix de hidroelétricas, eólicas e térmicas a gás. As seguintes hipóteses são utilizadas: (i) A hidrelétrica de Belo Monte começou a operar em outubro de 2016; (ii) a planta nuclear de Angra 3 começará a operar em janeiro de 2019; (iii) todas as hidrelétricas contratadas em leilões até 2019 entrarão em operação com seis meses de atraso com relação à data prevista no contrato. Essa última hipótese representa o atraso habitual nas datas de comissionamento de hidrelétricas que vencem leilões.

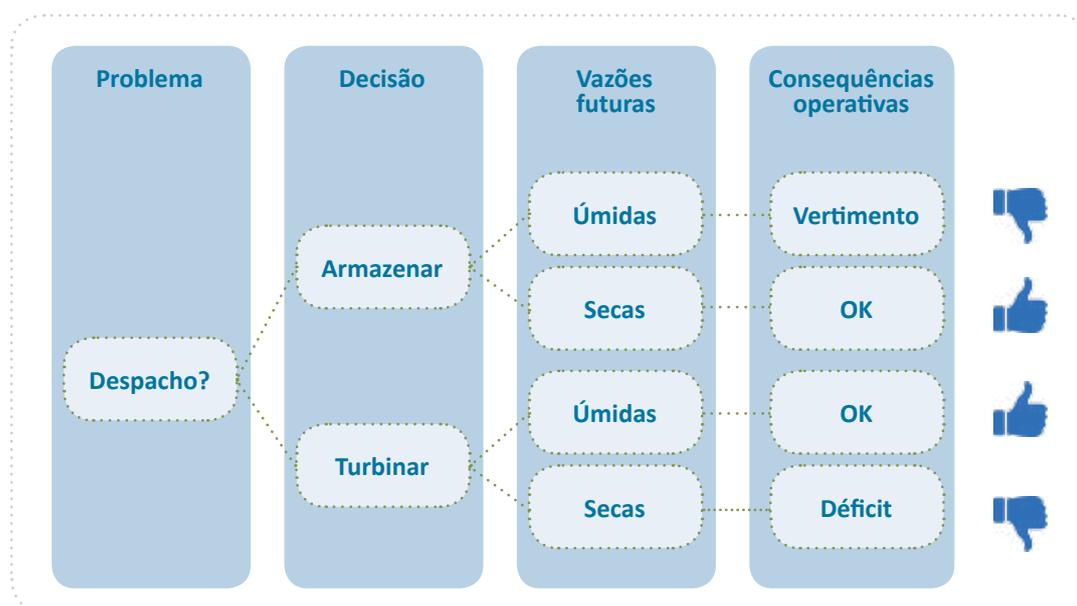
Atrasos nos comissionamentos de novos projetos eólicos e de gás não foram representados porque seu efeito é compensado pelo viés de contratação adicional por parte das distribuidoras (compra de energia baseada em crescimento da demanda, que são comumente superestimados).

A oferta do sistema respeita o critério regulatório de oferta: (i) as distribuidoras compram adicionais de contrato nos leilões para gerir seu crescimento de demanda incerto e (ii) a quantidade de energia de reserva contratada atende ao critério de confiabilidade definido pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE).

A elaboração dos cenários de vazões hidrológicas constitui um ponto determinante da metodologia, pois define a sensibilidade do sistema em relação às variações climáticas, e, portanto, a necessidade de despacho das usinas termelétricas para equilibrar o SIN e, conseqüentemente, as emissões do sistema.

### 3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA HIDROTÉRMICO<sup>6</sup>

A forte dependência da operação do SIN à hidrologia torna a otimização do despacho hidrotérmico para um único cenário futuro uma estratégia arriscada. Se um cenário úmido é utilizado, a otimização irá utilizar mais as hidroelétricas. Caso na vida real a hidrologia seja seca, o sistema chegará numa situação de baixo armazenamento ou mesmo de racionamento (planejamento da operação muito arriscado). Por outro lado, se um cenário seco é utilizado, a otimização irá utilizar menos as hidroelétricas e terá um custo elevado por conta do alto despacho térmico. Caso na vida real a hidrologia seja úmida, o sistema chegará numa situação de armazenamento excessivo ou mesmo de vertimento (planejamento da operação muito conservador). A **Figura 2** esquematiza as consequências operativas das decisões do despacho hidrotérmico.



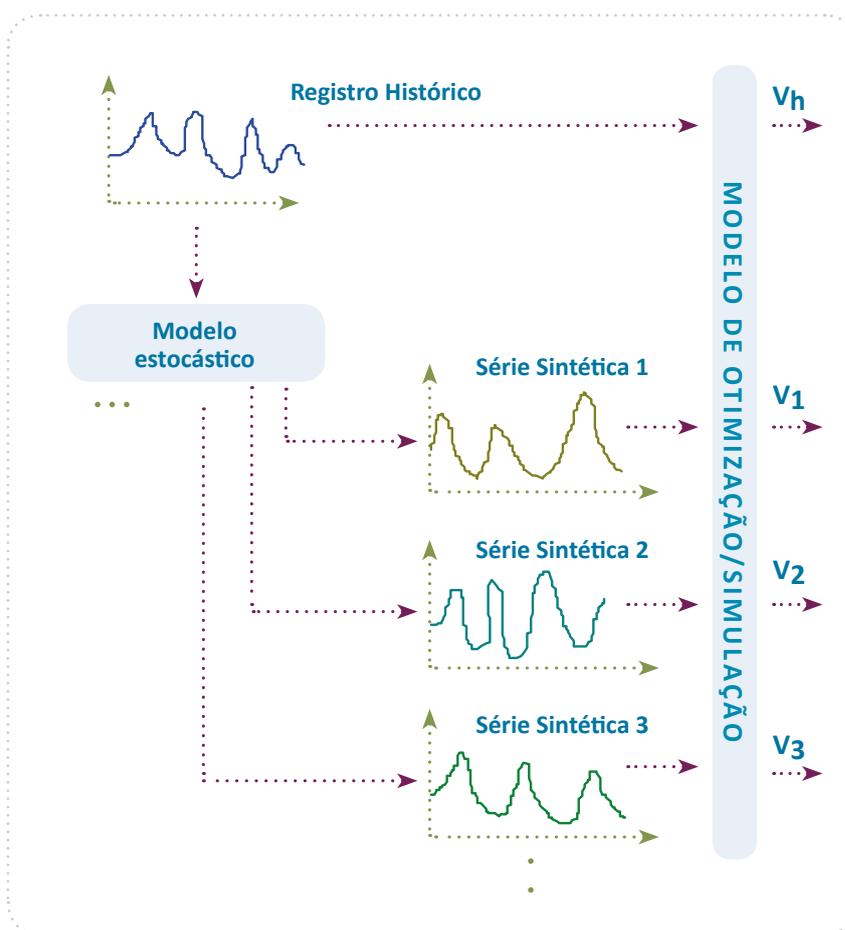
**FIGURA 2 - Consequências operativas das decisões do despacho hidrotérmico**

Assim, é mais adequado um modelo de otimização sob incerteza, mais especificamente um modelo estocástico para despacho hidrotérmico. Essa abordagem se baseia na geração de séries sintéticas de vazões futuras afluentes nas 195 usinas hidrelétricas da base do ONS para o horizonte de planejamento (2015-2030). Há quase quatro décadas, utiliza-se hidrologia sintética para a avaliação probabilística do suprimento de energia no setor elétrico brasileiro<sup>7</sup>. Assumiu-se que o processo é estacionário, o que significa que estas séries seguem a mesma

<sup>6</sup> Todos os elementos metodológicos relativos à simulação dos cenários de hidrologia e à definição da hidrologia seca foram reunidos num único capítulo dedicado à análise do caso de baixa hidrologia (capítulo 4).

<sup>7</sup> ARARIPE NETO, T. A.; COTIA, C. B.; PEREIRA, M. V. F. & KELMAN, J. Comparison of Stochastic and Deterministic Approaches in Hydrothermal Generation Scheduling. In: IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, Rio de Janeiro, 1985. p. 201-206.  
KELMAN, J.; GOMES, F. B. M.; PINHEIRO, S. F. & PEREIRA, M. V. F. Revisão do Conceito de Energia Firme Através do Uso de Séries Hidrológicas Sintéticas. In: V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, 1979. 17 p.

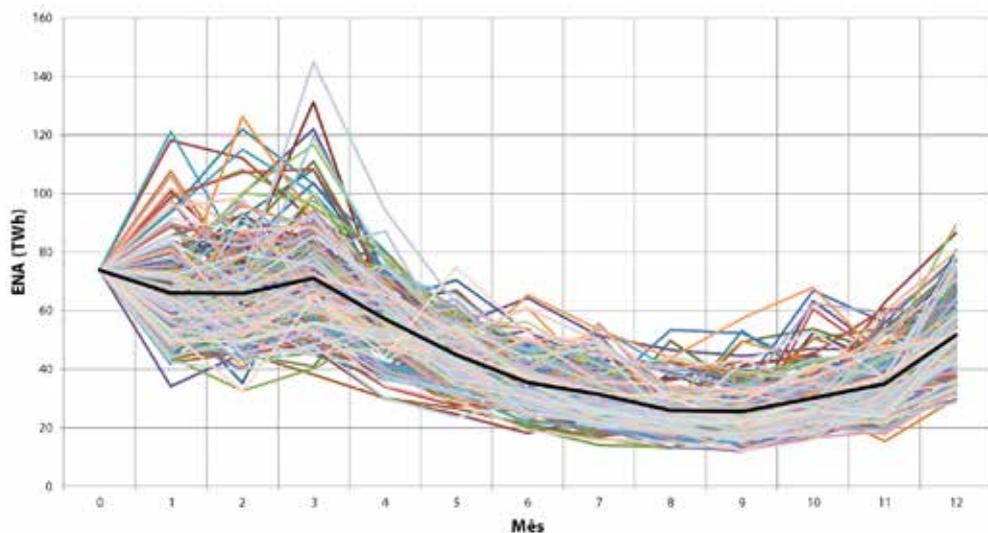
distribuição de probabilidade do que a série histórica das vazões passadas<sup>8</sup>, ou seja, *séries sintéticas* são geradas com o modelo periódico multivariado auto-regressivo PAR(p) que preservem os parâmetros do histórico desde 1931 (média, desvio padrão, correlações temporais e espaciais). A principal motivação é que a *série histórica* é somente uma das possíveis realizações de um processo estocástico: se pode imaginar que a natureza “sorteou” a série histórica conforme algum conjunto de leis probabilísticas. Um novo sorteio redundaria em outra série, diferente da histórica, mas igualmente provável. Este racional leva ao emprego do Método Monte Carlo, segundo o qual o modelo PAR(p) é rodado para gerar 200 *séries sintéticas* de vazões afluentes para cada uma das 195 usinas hidrelétricas da base do ONS. Para cada usina, cada série é constituída dos valores de ENA para cada mês do período 2015-2030, ou seja 192 pontos mensais. Na sequência, a otimização da operação do sistema é feita através do modelo SDDP, considerando os procedimentos operativos do ONS para o SIN.



**FIGURA 3 - Modelagem de aflúncias sintéticas utilizando modelo estocástico**

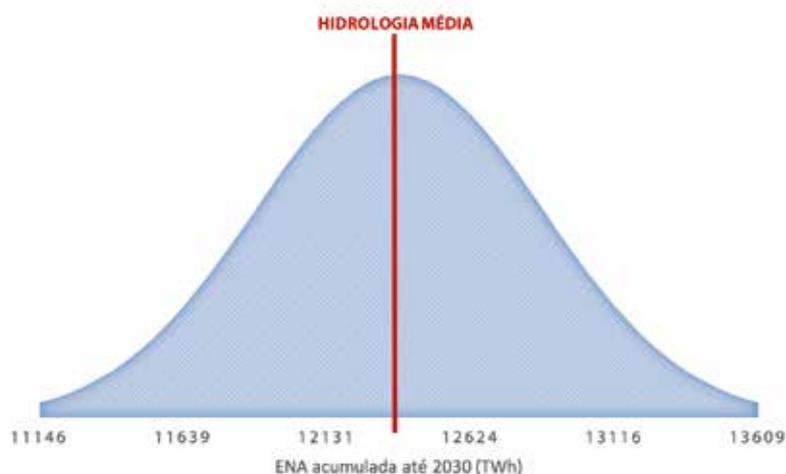
A Figura 4 mostra a ENA do SIN originada no uso do modelo PAR(p) para geração de 200 cenários hidrológicos condicionados (referência: Jan/2015) ao primeiro ano (TWh).

<sup>8</sup> Essa hipótese está sub-júdice, especialmente no contexto de aquecimento global e mudanças no uso e ocupação do solo relacionadas a atividades como desmatamento e pecuária extensiva.



**FIGURA 4 - Variabilidade de ENAs geradas pelos cenários hidrológicos do modelo PAR (p) para o ano 2015**

A Figura 5 ilustra a distribuição de probabilidades da ENA acumulada no sistema inteiro no período 2015-2030, ou seja a soma das ENAs dos 192 meses do período, com valores variando entre 11 e 14 mil TWh, o valor médio sendo 12 378 TWh.



**FIGURA 5 - Definição da hidrologia média**

O planejamento da operação e da expansão no Brasil é então realizado considerando estas séries sintéticas de vazão (ou energia natural afluyente).

Assim, a partir da simulação com o SDDP, é possível relacionar a ENA aos Custos Marginais de Operação (CMOs) e respectivas emissões de GEE acumuladas para o período considerado para os 200 cenários hidrológicos. Estes resultados são apresentados abaixo.

## 4 ANÁLISE DO CASO DE REFERÊNCIA

No capítulo três, apresenta-se os resultados médios obtidos no caso de referência a partir da simulação da operação do SIN para as séries estatísticas de hidrologia sem hipótese de mudanças climáticas apresentadas acima.

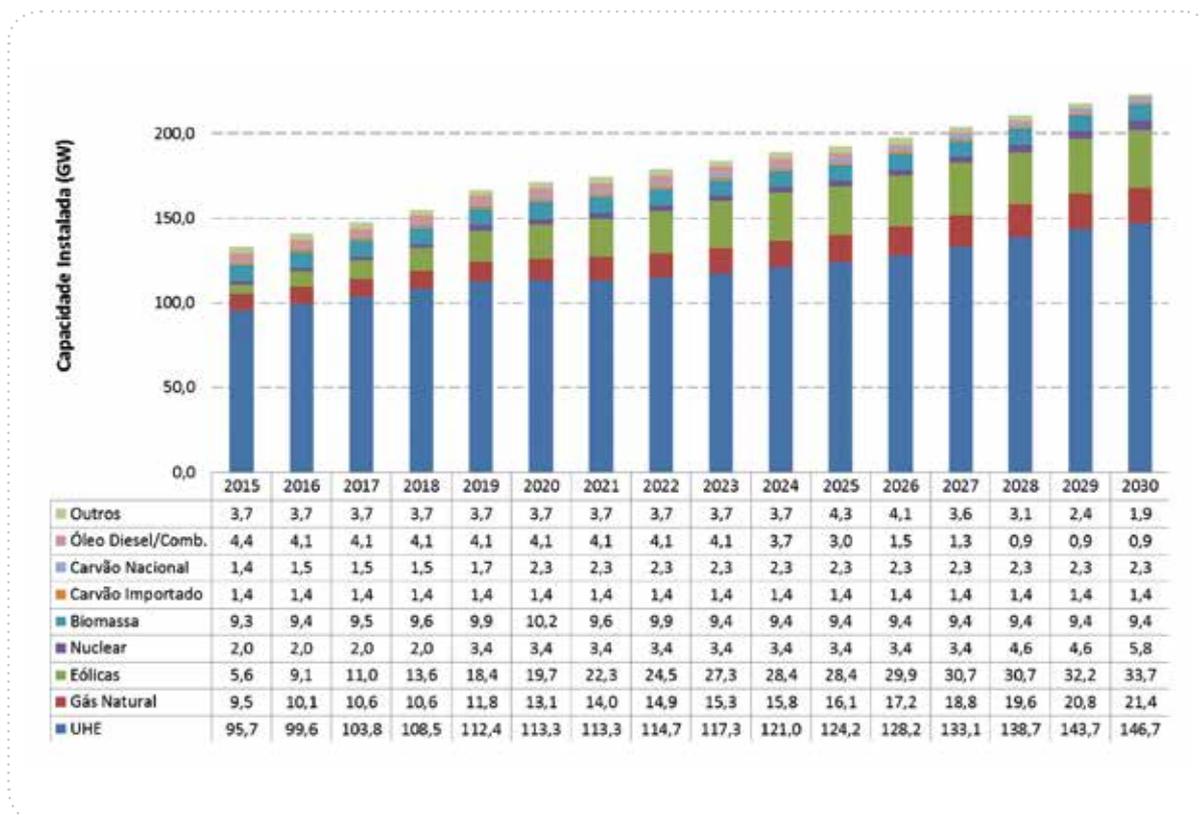
Verifica-se que a sobre-oferta existente no sistema para o horizonte de curto e médio prazos (até 2019) aumenta, resultado da baixa projeção de crescimento da demanda no horizonte 2015-2019 e ainda a motorização de grandes projetos hidrelétricos já contratados.

No horizonte de mais longo prazo, a sobra tende a se manter em torno de 8-9% da demanda (2% sem energia de reserva).



FIGURA 6 - Balanço físico de oferta e demanda média anual com energia de reserva

A Figura 7 mostra a oferta de energia em capacidade instalada discriminada para as diversas fontes.<sup>9</sup>



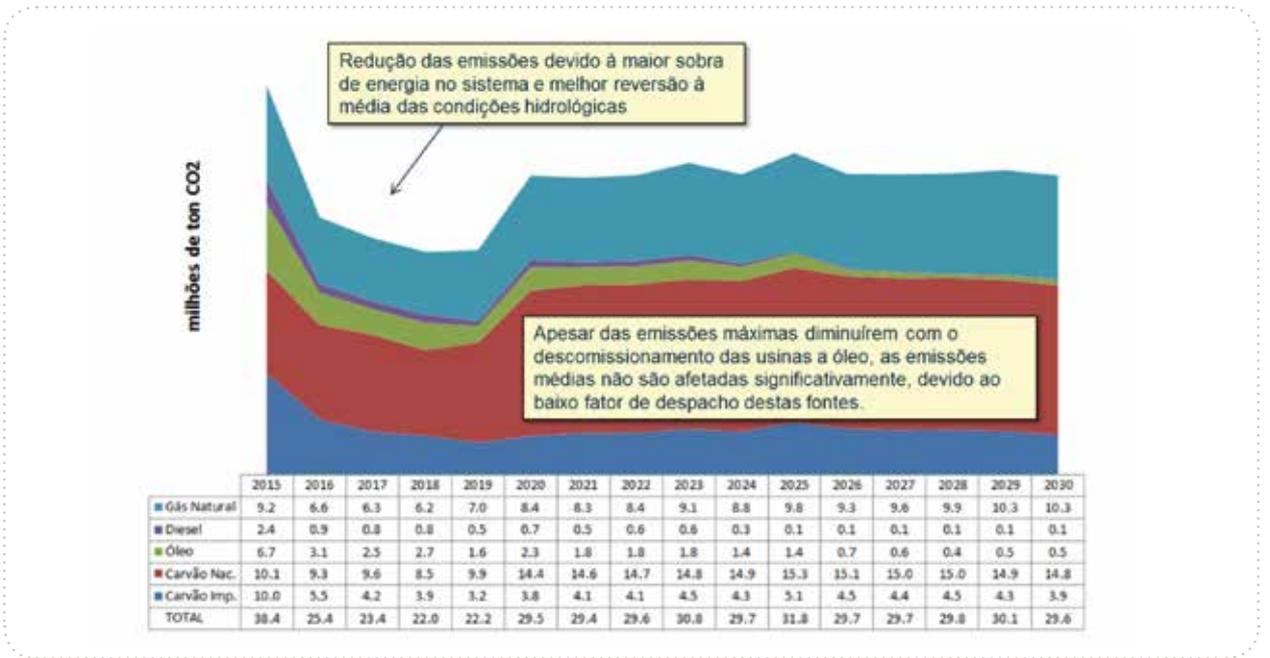
**FIGURA 7 - Evolução do parque gerador por fonte (valores absolutos)**

Os resultados de Custo Marginal de Operação (CMO) são maiores para os anos iniciais (em torno de R\$470/MWh para 2015 e de R\$225/MWh para 2016) por consequência das baixas vazões em 2013 e 2014 e devido a problemas estruturais. De 2017 em diante, os valores de CMO se reduzem porque as usinas com cronograma atrasado e a nova oferta contratada são incluídas no horizonte de simulação. De 2019 a 2023, o CMO médio é 120 R\$/MWh, aumentando para 140 R\$/MWh no longo prazo.

A Figura 8 apresenta a evolução das emissões anuais médias ao longo do horizonte de planejamento considerado. Para o período de 2017-2019, observa-se uma redução nas emissões de GEE em relação a 2015. Isso se deve ao maior adicional de energia hidrelétrica no sistema devido à expectativa de melhores condições hidrológicas. Isto se deve ao fato que os próximos anos não devem ser tão secos como o triênio 2012-2015: as projeções médias que resultam da simulação Monte Carlo indicam uma melhoria da hidrologia em comparação a este triênio muito seco. Além disto, novas hidrelétricas devem entrar em operação.

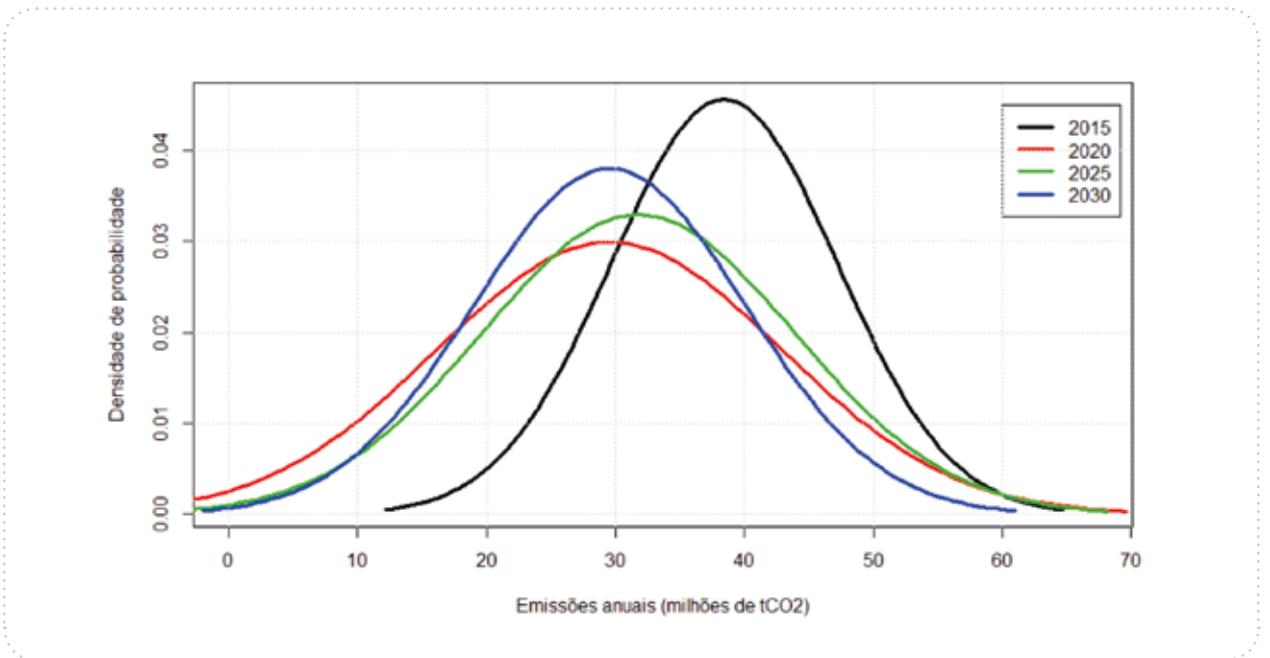
O descomissionamento de térmicas a óleo reduz as emissões máximas anuais, mas não altera significativamente a média dos valores, o que se deve ao baixo fator de despacho dessas usinas.

<sup>9</sup> A classificação "Outros" inclui: projetos resultantes do PROINFA e gás de processo industrial.



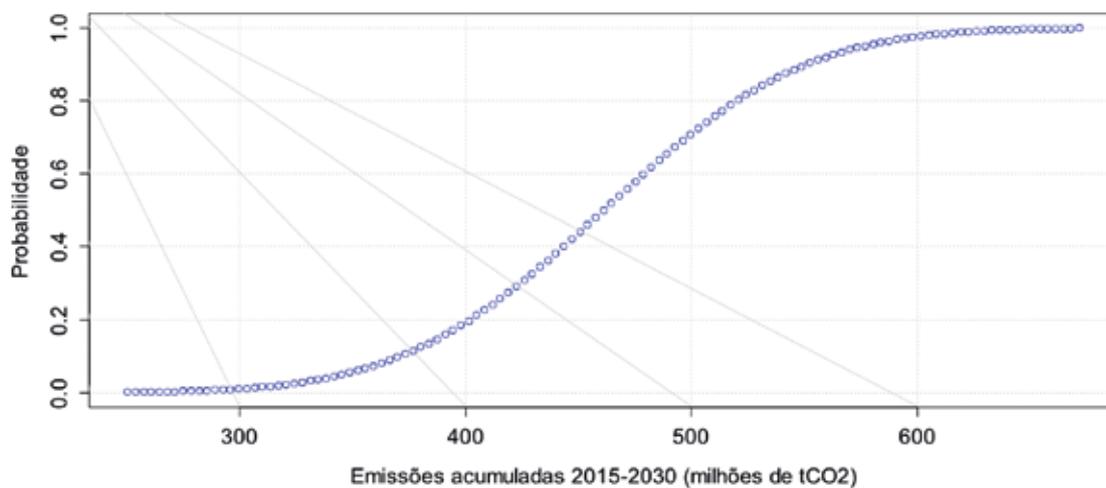
**FIGURA 8 - Emissão média anual por fonte para o caso de referência**

A Figura 9 apresenta a função densidade de probabilidade da emissão anual em anos selecionados. Observa-se que 2015 é um ano atípico, uma vez que boa parte do parque térmico estará ligada a maior parte do tempo. A distribuição de probabilidade está condicionada a esta situação conjuntural. Há uma queda esperada nos anos subsequentes pelo reequilíbrio oferta x demanda, provocando redução média nas emissões. Entretanto, é possível observar pequena elevação da média de 2020 a 2030 pelo acréscimo previsto de geração térmica a combustíveis fósseis na matriz elétrica.



**FIGURA 9 - Função densidade de probabilidade das emissões anuais - o caso de referência**

Apesar de a média das emissões em 2030 ser 30 milhões de tCO<sub>2</sub>, há 10% de probabilidade de que elas sejam menores que 17 milhões de tCO<sub>2</sub> por ano e 10% de probabilidade que elas sejam maiores que 50 milhões de tCO<sub>2</sub> por ano. Com relação às emissões cumulativas de 2015 a 2030, há 10% de probabilidade de elas excedam 550 milhões de tCO<sub>2</sub> (Figura 10).



**FIGURA 10 - Probabilidade para as emissões acumuladas do SIN no horizonte 2015-2030**

# 5 ANÁLISE DE BAIXA HIDROLOGIA

No capítulo quatro, caracteriza-se uma “hidrologia seca” a partir de uma análise estatística das séries sintéticas de Energia Natural Afluente (ENA) produzidas no cenário de referência para cada uma das 195 usinas hidrelétricas da base do ONS. Trata-se de metodologia “*bottom-up*” embasada na variabilidade hidrológica histórica observada no campo, sem considerar o efeito de mudanças climáticas<sup>10</sup>.

A partir desta caracterização, são avaliados os efeitos da ocorrência da baixa hidrologia sobre indicadores relacionados à operação do setor elétrico brasileiro, como custos operativos, incremento de produção em usinas térmicas e emissões de GEE. A avaliação permite uma fácil compreensão sobre a *variabilidade* das emissões do setor elétrico brasileiro decorrente da variabilidade hidrológica.

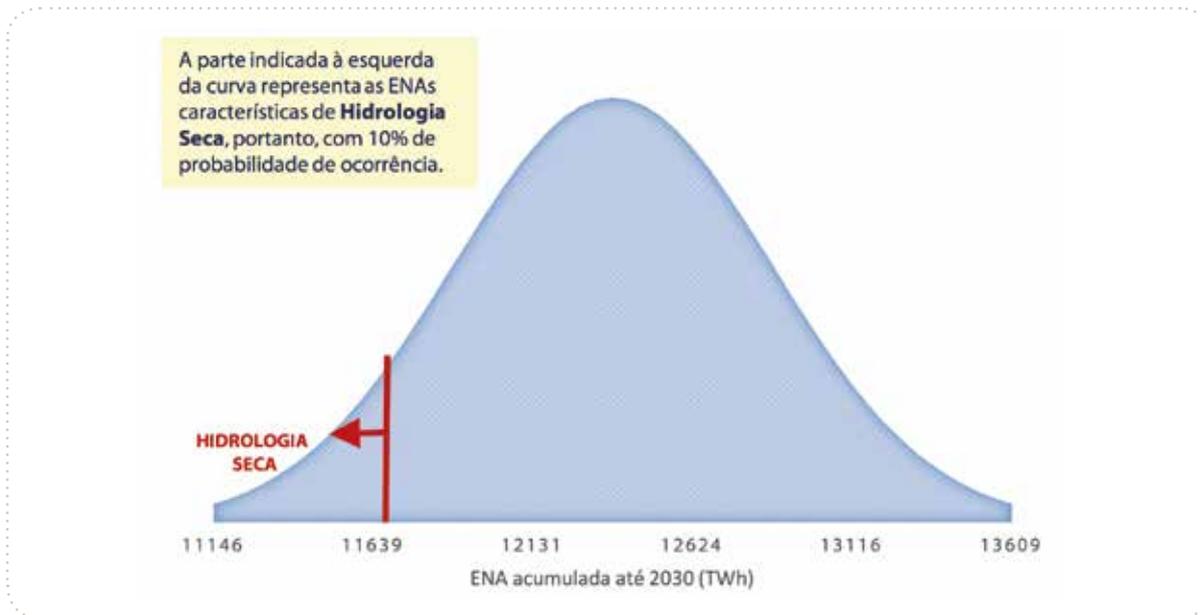
As comparações são feitas tanto sobre as emissões *anuais* como sobre as emissões *cumulativas* no horizonte 2015-2030 (de maior interesse para a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, portanto, para as mudanças climáticas).

## 5.1 Caracterização de baixa hidrologia

A hipótese de hidrologia seca é definida como o conjunto de cenários cuja ENA acumulada até 2030 esteja entre os 10% menores valores dos 200 cenários gerados para definir os valores médios do caso de referência<sup>11</sup>, ou seja abaixo de 11750 TWh (também chamado “valor do p10”) (Figura 11). É importante ressaltar que a definição dos cenários de hidrologia seca se baseou em valores da ENA acumulada para o horizonte total 2015-2030. De fato, é possível que existam anos de boa hidrologia dentro de uma série selecionada como “seca” para o período inteiro, na medida que a série como um todo mostrou que a ENA acumulada é baixa. Isso ocorre devido à inércia do SIN associada ao esvaziamento dos reservatórios.

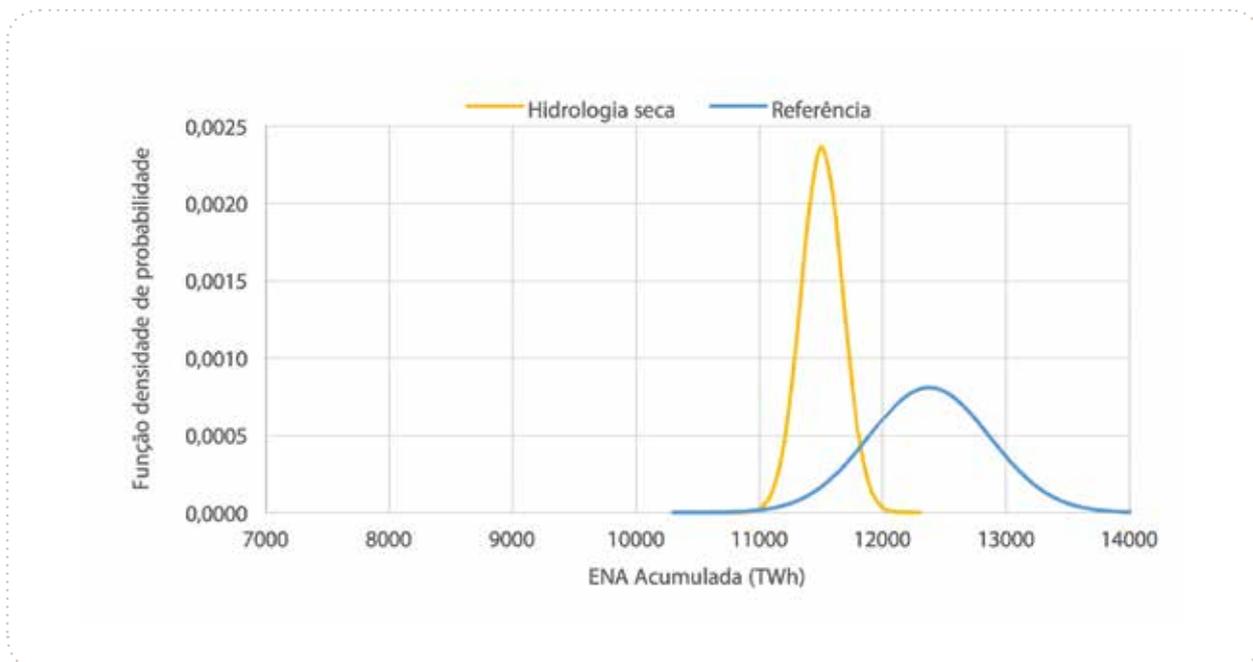
<sup>10</sup> Esta abordagem *bottom-up* se diferencia da abordagem “*top-down*” apresentada mais adiante, que utiliza modelos globais do clima e extrapola resultados destes modelos ao nível local (*down-scaling*).

<sup>11</sup> Embora o limite de 10% seja arbitrário, ele é coerente com o limite de 10% adotado pelo setor para definir o nível do risco aceitável; além disso, a maioria dos direitos de águas emitidos no país baseiam-se num nível de garantia de 90%.



**FIGURA 11 - Definição de hidrologia seca (1)**

Alternativamente, a Figura 1212 ilustra a distribuição de probabilidades da ENA acumulada com indicação do subconjunto de cenários de hidrologia seca.



**FIGURA 12 - Definição de hidrologia seca (2)**

A relação entre o valor esperado da ENA acumulada do subconjunto de hidrologia seca, em amarelo (11510 TWh) na Figura 12 e o valor esperado da ENA acumulada para toda a amostra de séries simuladas no caso de referência, curva em azul (12378 TWh), é 93%.

Todavia, antes de prosseguir com a comparação entre ENA, CMOs e emissões de GEE, é interessante apresentar elementos de comparação da baixa hidrologia assim definida a partir de uma abordagem “*bottom-up*”, com projeções hidrológicas oriundas de uma abordagem “*top-down*”, resultando do “*down-scaling*” de modelos climáticos globais.

## 5.2 Comparação da baixa hidrologia definida na abordagem “*bottom-up*” com as projeções resultantes da abordagem “*top-down*” de “*down-scaling*” dos modelos climáticos globais

Como mencionado, na abordagem “*bottom-up*”, a simulação tanto do caso de referência como do caso de baixa hidrologia assume a hidrologia como processo estacionário (as características estatísticas das séries futuras conservam as características estatísticas das séries observadas no campo no passado).

Já na abordagem “*top-down*”, essa hipótese é deixada de lado em face dos impactos resultantes de um *down-scaling* da modelagem climática global para as bacias hidrográficas brasileiras. Portanto, trata-se de um cenário cuja variabilidade hidrológica resulta da modelagem das mudanças climáticas.

Os cenários utilizados para avaliar os impactos das mudanças climáticas foram estabelecidos no Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e estão associados à concentração atmosférica de GEE. Nesse relatório, o IPCC adotou cenários de evolução do mundo a partir de RCP (*Representative Concentration Pathways*). Para as simulações aqui apresentadas, foram utilizados os cenários RCP 8,5 e RCP = 4,5<sup>12</sup>.

Essa análise de sensibilidade a mudanças climáticas é parte de um estudo desenvolvido para a Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Participaram da elaboração: o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a COPPE-UFRJ, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e a PSR.

O INPE ficou responsável pelo downscaling dos resultados dos modelos de circulação global HadGEM<sup>13</sup> e MIROC<sup>14</sup> para o território brasileiro, utilizando para isto o modelo Eta. A FUNCEME usou os outputs produzidos pelo INPE (séries de chuva e temperatura) e o modelo chuva-vazão SMAP para gerar séries de vazão para as usinas hidrelétricas do SIN. Por fim a PSR, em parceria com a COPPE, usou essas séries de vazão para recalibrar o modelo PAR(p) das diferentes usinas e aplicar o SDDP para otimizar o despacho hidrotérmico.

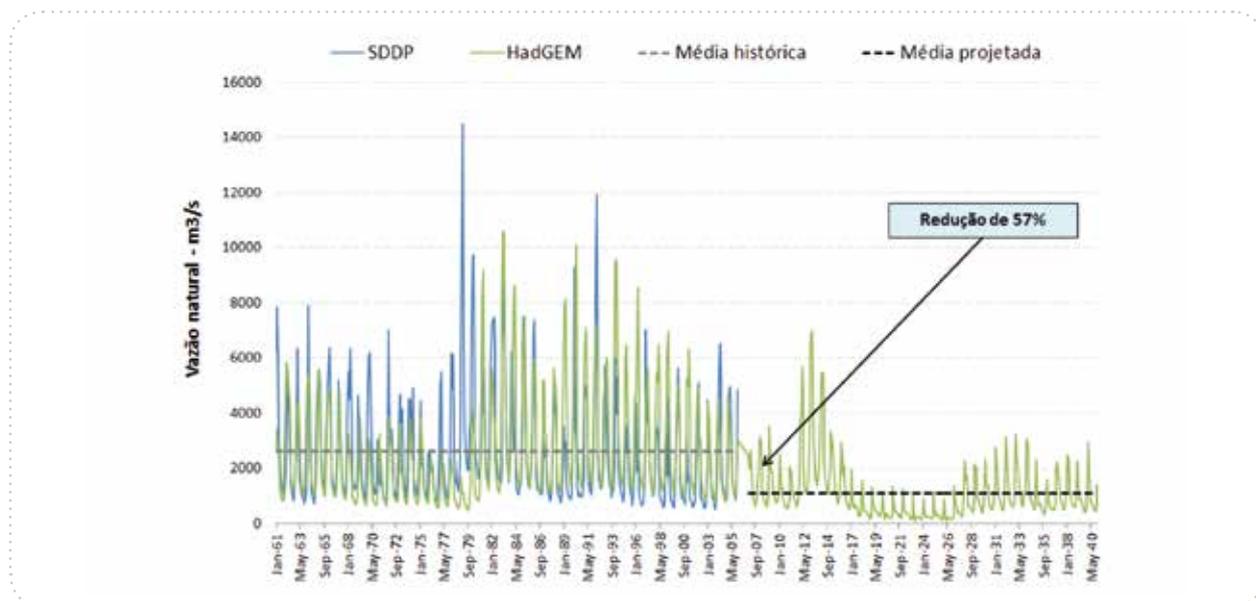
Observou-se que, para ambos os modelos de circulação global, ocorre significativa descontinuidade na comparação entre séries históricas e séries projetadas de vazão, sendo as projetadas muitas vezes significativamente inferiores às históricas. Em média, observou-se redução nas séries de vazão entre 44% e 57% do valor médio para o modelo HadGEM e entre 12% e 34% para o modelo MIROC. A simulação com o modelo HadGEM resultou em ENA 30% menor que a ENA histórica, enquanto o modelo MIROC produziu ENA 10% menor.

<sup>12</sup> RCP 4,5: As emissões de GEE atingem valor máximo em 2040, quando começariam a diminuir por medidas de controle de emissões de GEE). A concentração atmosférica dos GEE se estabiliza a partir de 2060 acima de 550 partes por milhão até o final do século (aumento de mais de 50% na concentração em relação à referência pré-industrial). O aumento de temperatura média, neste caso, seria de 1,8 graus Celsius e haveria elevação média do nível do mar de 0,47 metros em 2100. RCP 8,5: As emissões de GEE sobem continuamente durante o século XXI. Como resultado, há um aumento superior a 3x na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera em 2100. O aumento médio da temperatura terrestre é 3,7 graus Celsius e a elevação média do nível do mar 0,63 metros (estes valores de temperatura e nível do mar são a média de um conjunto de diversos modelos climáticos utilizados para a mesma premissa de GEE).

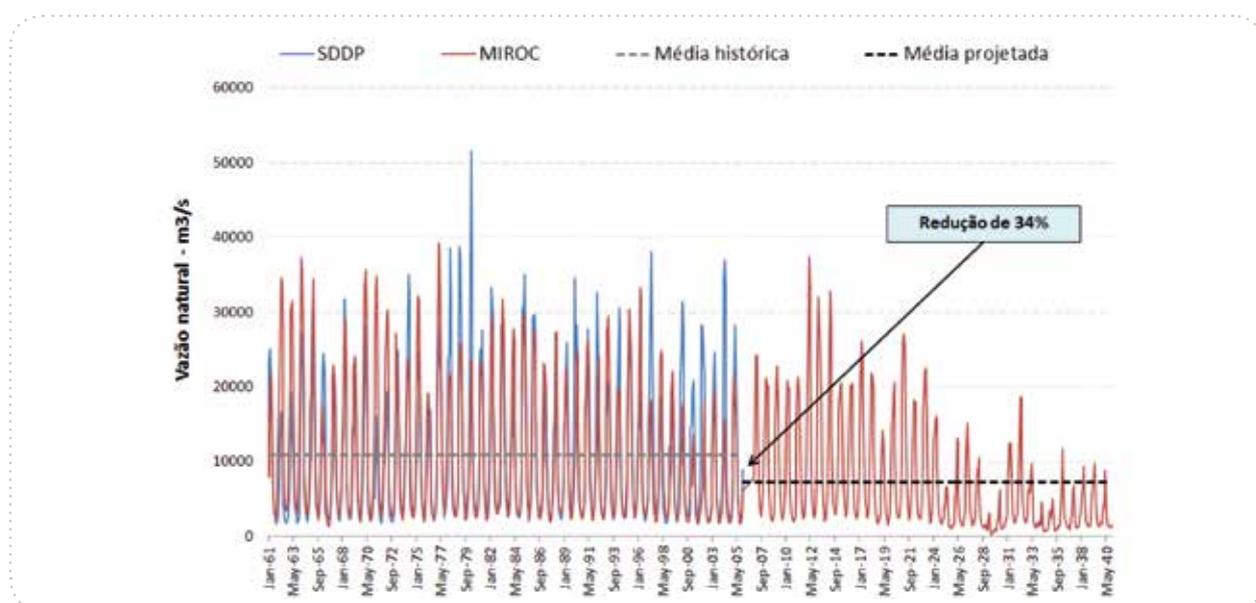
<sup>13</sup> Hadley Centre Global Environment Model (HADGEM) do Met Office britânico.

<sup>14</sup> Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) de instituições no Japão.

As figuras abaixo (Figura 13 e 14) comparam postos representativos da diversidade hidrológica do Brasil (Sobradinho e Tucuruí) as vazões naturais históricas com as projetadas pelo INPE / FUNCEME a partir de um modelo chuva-vazão combinado com os modelos climáticos HadGEM/Eta e MIROC/Eta.

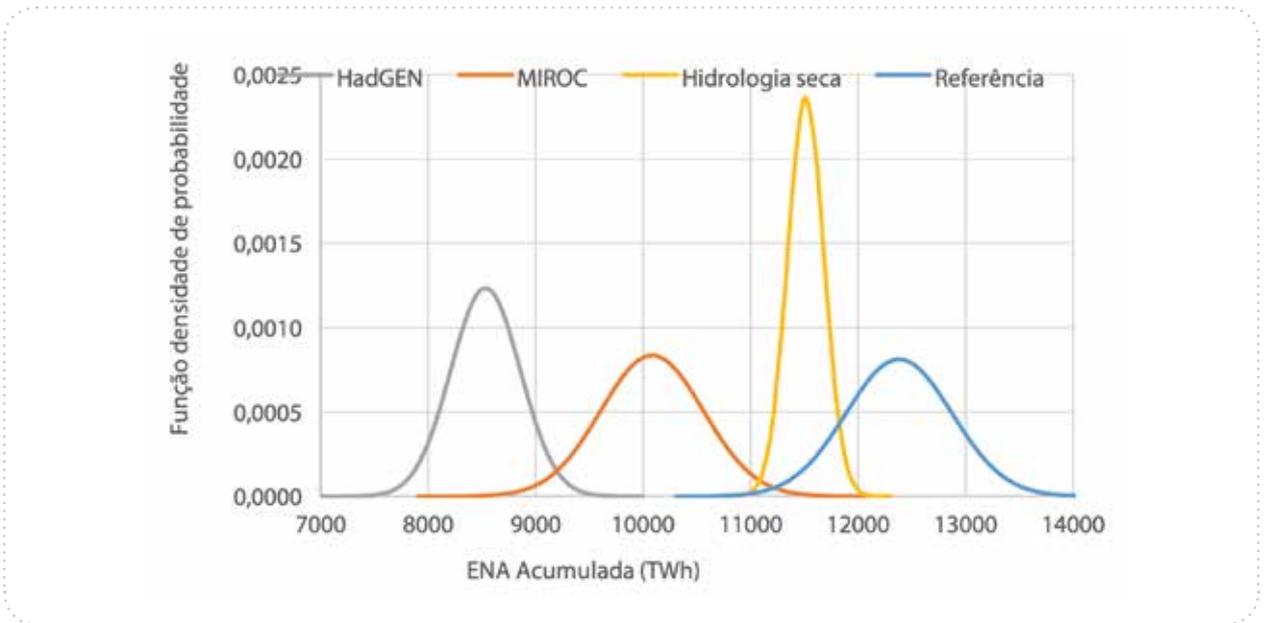


**FIGURA 13 - Vazão natural UHE Sobradinho (HadGEM/Eta)**



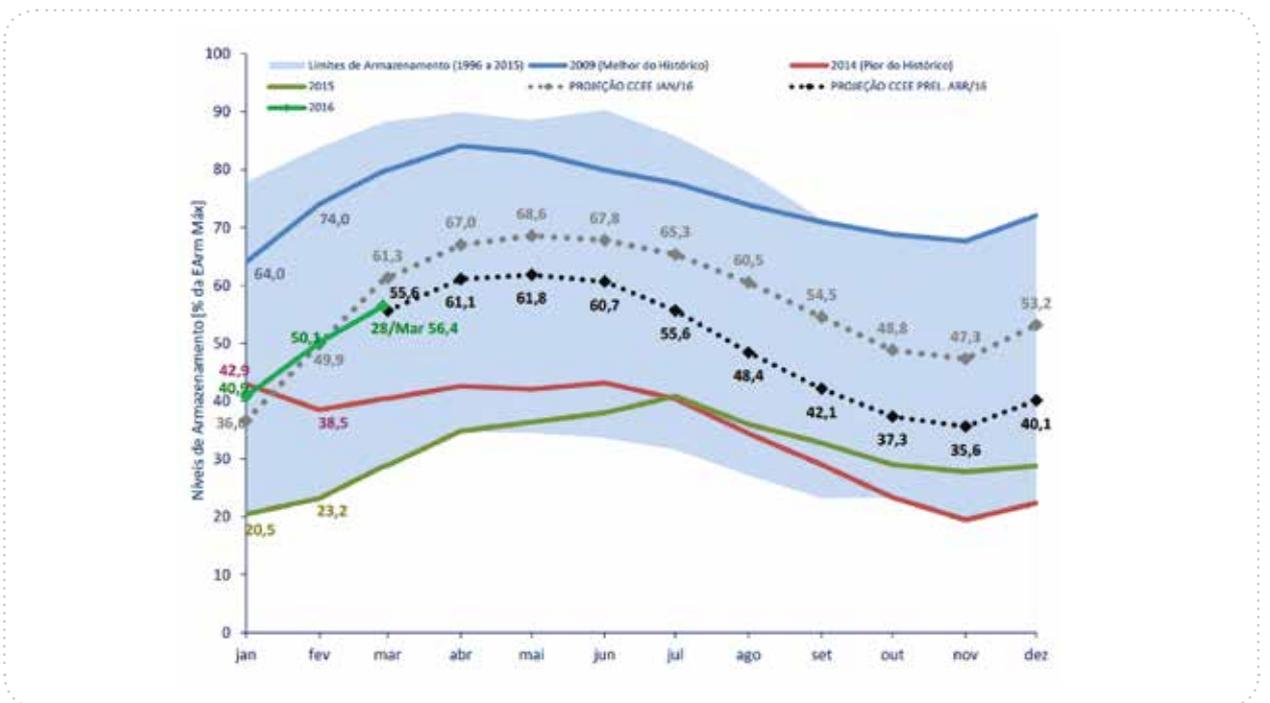
**FIGURA 14 - Vazão natural UHE Tucuruí (MIROC/Eta)**

É portanto importante observar que a hipótese de hidrologia seca definida na abordagem “bottom-up” para o período 2015-2030 ainda é muito mais úmida do que as hidrologias para o mesmo período que resultam das técnicas atualmente disponíveis de down-scaling dos modelos globais de mudanças climáticas (Figura 15).



**FIGURA 15 - Distribuição de probabilidades das ENA Acumuladas 2015-2030**

A razoabilidade da hipótese de hidrologia seca definida na abordagem bottom-up parece também ser coerente com os baixos históricos sofridos pelo SN nos anos 2014 e 2015, conforme ilustrado na Figura 16 abaixo: todos os meses de outubro de 2014 a abril de 2015 registraram novos limites inferiores do nível de armazenamento histórico do SIN.



**FIGURA 16 - Projeção de energia armazenada**

Fonte: CCEE

### 5.3 Custos Marginais de Operação e Emissões associadas à baixa hidrologia

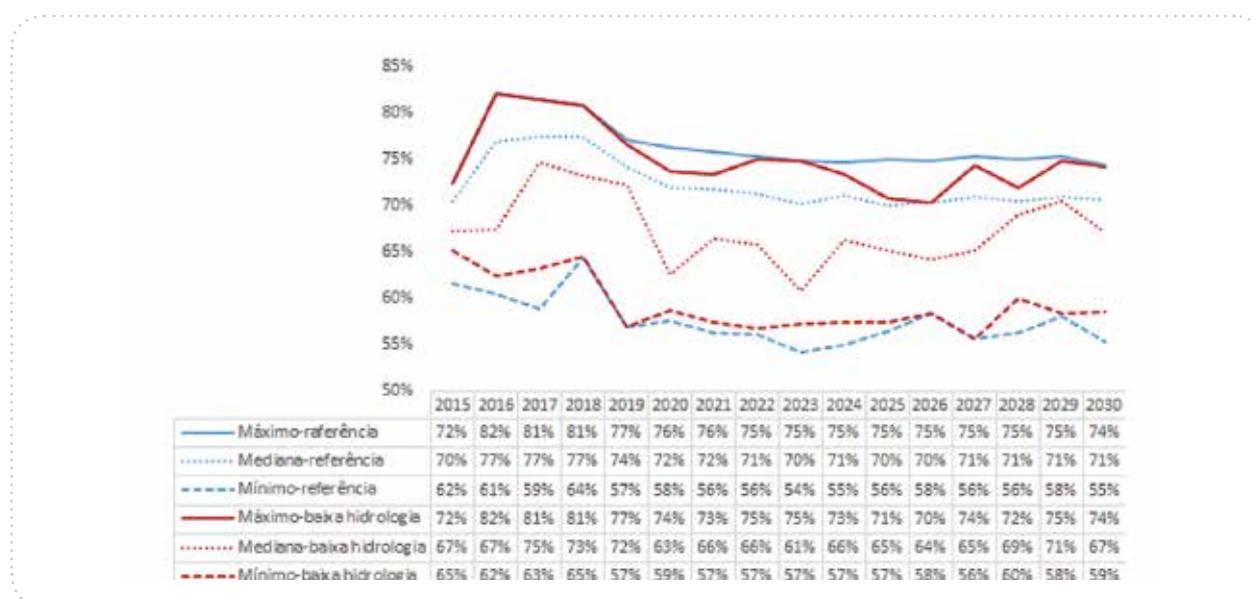
Apresentamos a seguir os principais resultados associados à hidrologia seca do método “bottom-up”.

A Tabela 1 abaixo apresenta a comparação entre a energia gerada por fonte no caso de referência e no subconjunto de hidrologia seca. As principais diferenças são a diminuição da geração hidrelétrica (a qual é relativamente pequena, mas é considerável em valores absolutos) e o aumento da participação das fontes térmicas emissivas como carvão importado, óleo e diesel. A figura 17.a apresenta a evolução ano das probabilidades de participação da hidroeletricidade, a qual fica em torno de 5% mas baixa no cenário de Baixa Hidrologia em relação ao cenário de Referência ao longo do período. A geração total também apresenta pequena diminuição, o que se deve à maior incidência de déficit de energia no subconjunto de cenários de hidrologia seca.

FONTE	CENÁRIO DE REFERÊNCIA	SUBCONJUNTO DE HIDROLOGIA SECA	DIFERENÇA RELATIVA
Carvão Imp.	9.5	13.9	46.2%
Carvão Nac.	21.7	23.2	6.9%
Óleo	5.3	11.3	114.0%
Diesel	1.5	3.3	117.0%
Gás Natural	99.2	134.4	35.4%
Biomassa	35.4	35.6	0.6%
Eólica	128.4	128.5	0.1%
Solar	6.4	6.4	-0.1%
Nuclear	46.4	46.7	0.6%
Outros	74.1	74.3	0.4%
Hidro	1034.9	981.3	-5.2%
<b>TOTAL</b>	<b>1462.7</b>	<b>1458.9</b>	<b>-0.3%</b>

**TABELA 1 - Comparação entre gerações médias anuais (GWm)**

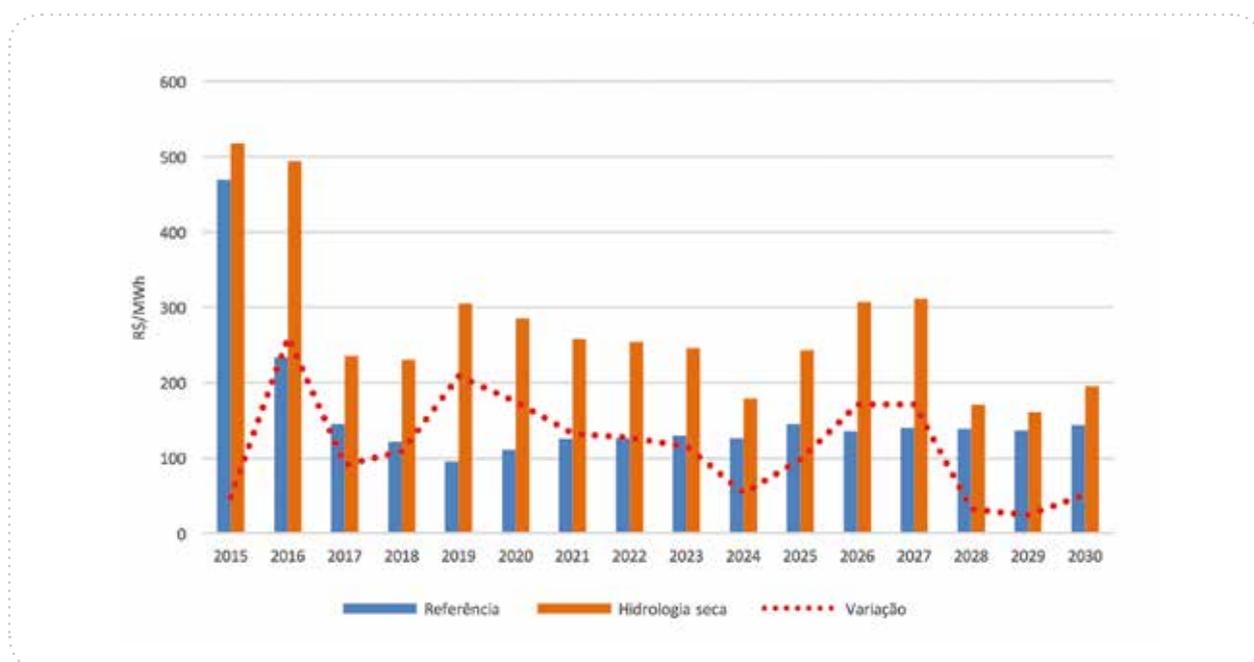
Nota: diferença relativa positiva significa um aumento no caso da hidrologia seca em relação ao caso de referência



**FIGURA 17.a - Participação da hidroeletricidade na geração nos cenários de Referência e Baixa Hidrologia**

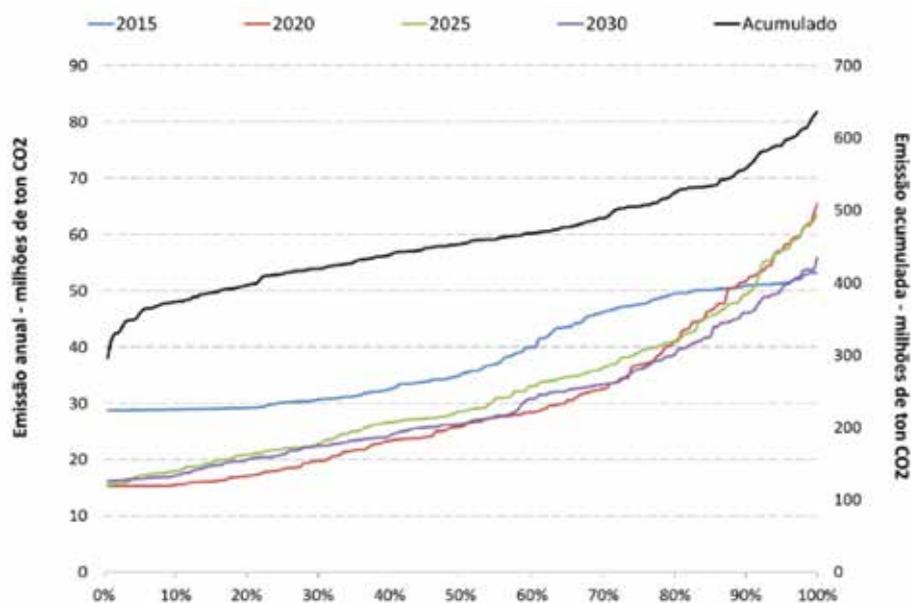
Foram calculados novos valores dos custos marginais de operação (CMOs) para cada ano do cenário de baixa hidrologia. Observa-se valores mais altos de CMO do que no cenário de referência nos anos de 2015 (R\$518/MWh ao invés de R\$470/MWh) e 2016 (R\$465/MWh ao invés de R\$225/MWh), consequência não somente da baixa afluência verificada no período úmido 2013/2014 como também por problemas estruturais, como o fator de fricção das hidrelétricas. Os CMOs se mostram mais baixos a partir de 2017 onde as usinas atrasadas e nova oferta dos leilões recentes entram no horizonte de simulação. De 2019 a 2023 observam-se preços que variam entre 250 e 320 R\$/MWh, significativamente mais altos do que no cenário de referência (média de R\$120/MWh). No horizonte de mais longo prazo os CMOs têm alta progressiva (até R\$300/MWh ou mais em 2026-2027) seguida de queda abrupta, alcançando cerca de 200 R\$/MWh no final do histórico, também significativamente mais alto do que no caso de referência (R\$140/MWh).

Esta queda do CMO no final do período se deve principalmente a entrada de novas capacidades hidrelétricas.



**FIGURA 17.b - Comparação entre CMOs dos cenários de Baixa Hidrologia e de Referência**

Foram também simuladas as emissões que resultariam de uma baixa hidrologia seguindo a abordagem bottom-up.



**FIGURA 17.c - Distribuição de probabilidade das emissões anuais para o caso de referência**

A Figura 17 apresenta a distribuição de probabilidade das emissões para os anos 2015, 2020, 2025 e 2030 (escala da esquerda), além das emissões acumuladas durante todo o horizonte de estudo (curva preta, escala da direita). Nos anos mais avançados do histórico (2020, 2025 e 2030) pode-se notar que as séries com maiores emissões (à direita) apresentam valores cerca de quatro vezes maiores que as com menores emissões (à esquerda). Por exemplo, para os anos 2020 (em vermelho) e 2025 (em verde), cujas distribuições estão apresentadas na Figura 17 abaixo (valores na escala da esquerda), as emissões anuais mais altas, que correspondem a uma hidrologia mais baixa e a um despacho maior das termelétricas podem ultrapassar 60MtCO<sub>2</sub>/ano, enquanto as emissões anuais mais baixas, que correspondem a uma hidrologia mais úmida estão em torno de 15MtCO<sub>2</sub>/ano.

As Figuras 18 e 19 mostram respectivamente a probabilidade e a densidade de probabilidade para as emissões acumuladas do SIN no horizonte 2015-2030 para o subconjunto de hidrologia seca em comparação ao caso de referência. Observa-se um aumento médio acumulado de 150 MtCO<sub>2</sub> (de cerca de 460MtCO<sub>2</sub> para cerca de 610MtCO<sub>2</sub>). Observa-se também que o desvio padrão foi reduzido consideravelmente (basicamente a maior parte das usinas térmicas está despachada no caso da hidrologia seca).

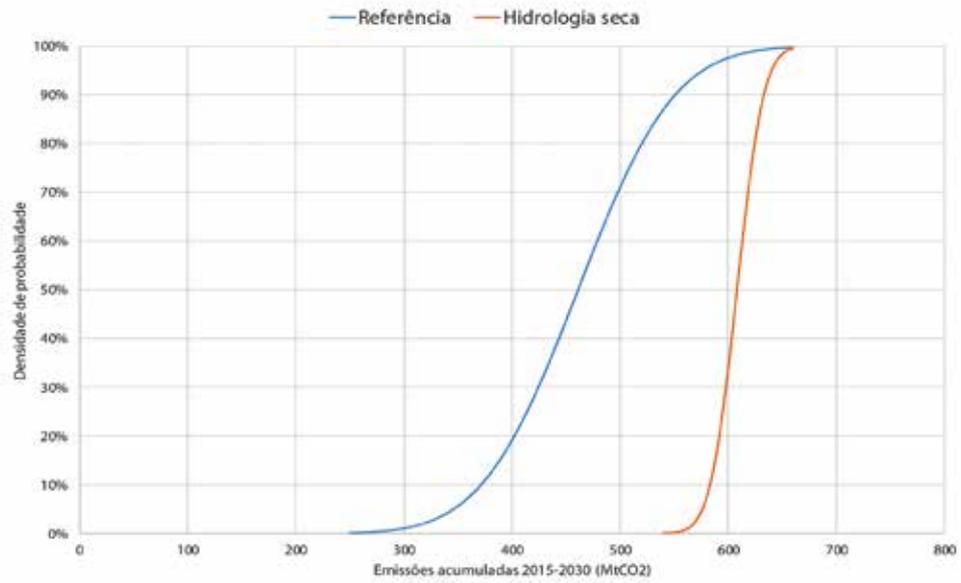


FIGURA 18 - Probabilidade para as emissões acumuladas do SIN para a hidrologia seca

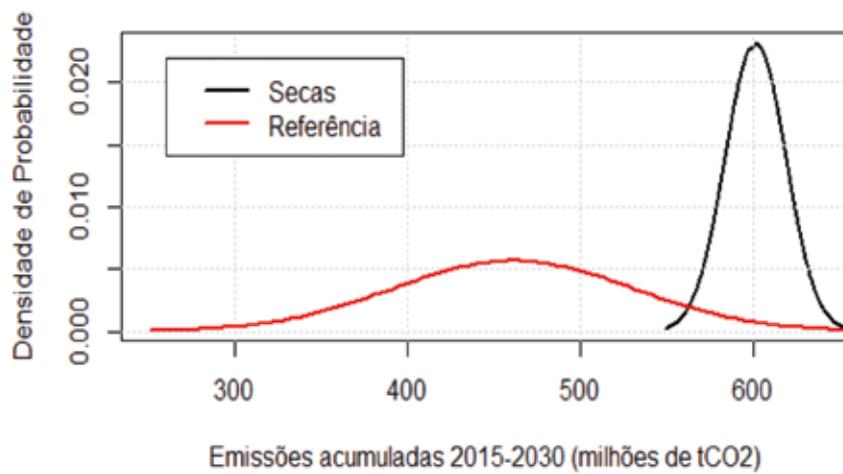


FIGURA 19 - Função densidade de probabilidade das emissões acumuladas para a hidrologia seca

## 6 CASO ALTERNATIVO PARA EVITAR O AUMENTO DA EMISSÕES

De modo a considerar uma alternativa que possa compensar o aumento de emissões de GEE que seria induzido por um cenário de baixa hidrologia conforme apresentado acima, a PSR e a equipe da COPPE/UFRJ estabeleceram um caso alternativo de expansão, para o qual há uma substituição de fontes energéticas baseadas em queima de combustíveis fósseis por outras renováveis (ex: eólica, solar e biomassa). Essas fontes conjuntamente atenderiam o mercado previsto com mesmo critério de confiabilidade. Além da substituição de fontes, este cenário utilizou, para mesmas condições macroeconômicas e sobre o crescimento esperado da população, uma demanda menor para energia elétrica resultante de medidas mais contundentes de eficiência energética e geração distribuída postas em prática.

Com base nas novas medidas propostas em parceria com a COPPE, este caso alternativo teve uma redução de 15% na demanda de energia em 2030 em relação ao caso de referência – em termos de carga, essa redução representa 14 GW médios no SIN.

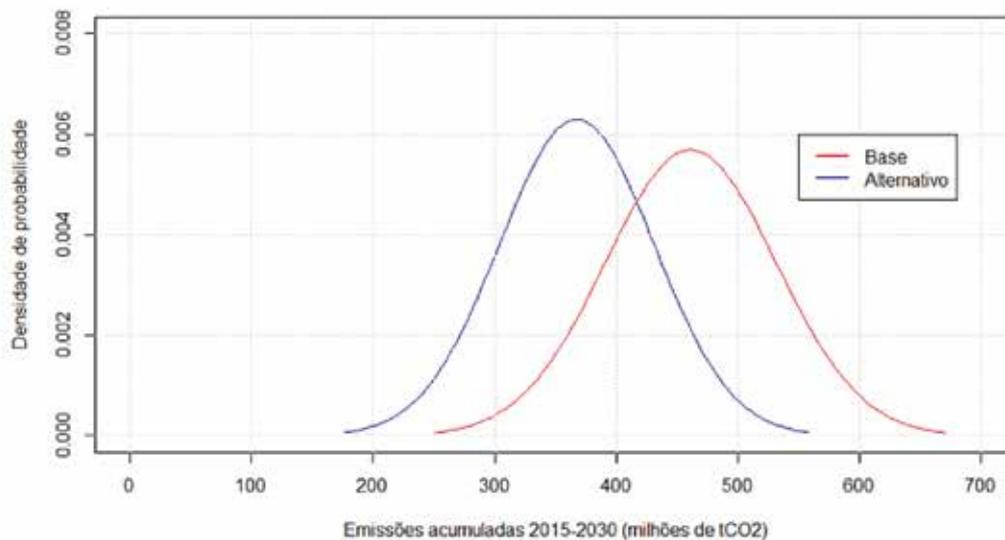
De acordo com a regulação do setor elétrico brasileiro, a redução da demanda nesse cenário tem que ser acompanhada pela correspondente redução da oferta, o que nesse cenário foi feito pelo cancelamento das hidrelétricas e térmicas a gás natural posteriores a 2020. A implementação do caso alternativo no modelo SDDP resultou em um novo quadro de CMO e, como esperado, em redução de emissões de GEE.

A distribuição de probabilidades das emissões de GEE mostra emissões anuais menores que 30 MtCO<sub>2</sub>, valor menor não somente que no caso de baixa hidrologia mas também que no caso de referência.

Isto se deve ao fato de que não foi desenvolvida uma metodologia “reversa” que partisse do nível de emissões acumuladas desejado para o período – nesse contexto as emissões acumuladas do caso de referência – visando atingir este mesmo nível no caso de baixa hidrologia, através de um conjunto otimizado de medidas de redução das emissões. O caso alternativo apresentou resultados melhores do que o objetivo desejado de zerar o aumento das emissões.

Ao se comparar as emissões acumuladas de ambos os cenários, a redução é de aproximadamente 20% em relação ao caso de referência, demonstrando que a racionalização do consumo e a inserção de geração distribuída têm grande potencial para reduzir as emissões de GEE do SIN (Figura 2020): a racionalização do consumo reduz a demanda e a disseminação da geração distribuída reduz o despacho de plantas mais poluidoras, reduzindo as emissões totais.





**FIGURA 20 - Distribuição de probabilidades das emissões acumuladas (2015-2030)**

Para o caso alternativo, os resultados de CMO são mais elevados no início do período (2015-2016), como consequência das baixas vazões em 2013 e 2014 e devido a problemas estruturais. Todavia, estes CMOs são levemente menores do que no caso de referência (em torno de R\$455/MWh ao invés de R\$470/MWh em 2015 e R\$115/MWh ao invés de R\$225/MWh em 2016). De 2017 em diante, os valores de CMO se reduzem porque as usinas com cronograma atrasado e a nova oferta contratada são incluídas no horizonte de simulação. De 2019 a 2023, o CMO médio é 80 R\$/MWh, aumentando para 100 R\$/MWh no longo prazo, ou seja, também menor do que no caso de referência inicial (em torno de R\$140/MWh no longo prazo).

O cenário alternativo aparece assim como um cenário “sem arrependimento”, ou seja providenciando uma oferta de energia ao mesmo tempo mais limpa e mais barata.

## 7 APÊNDICE 1: IMPACTO DO CRESCIMENTO DA IRRIGAÇÃO SOBRE AS EMISSÕES DE GEE DO SETOR ELÉTRICO NO CASO DE UMA HIDROLOGIA SECA

Considerando que se observa uma competição crescente entre os diferentes usos da água, o estudo busca ainda investigar os impactos indiretos provocados por disputas pelos usos deste recurso. Esta questão é extremamente relevante em países com menor disponibilidade hídrica como Austrália, China e norte da África, sujeitos a restrições para a construção de novas usinas térmicas e operação das existentes pela baixa disponibilidade hídrica<sup>15</sup>. No Brasil, em bacias como a do São Francisco, o aumento de vazões de usuários com demandas para irrigação de lavouras, sobretudo a jusante do reservatório de Sobradinho, pode contribuir para o agravamento do suprimento de energia elétrica em períodos de escassez hídrica, com impactos sobre custos operativos ao setor elétrico e aumento de emissões de GEE. Assim, este trabalho complementar analisa, a título exploratório, a evolução das retiradas de água nos reservatórios, principalmente para irrigação. O estudo foca em particular sobre três áreas de conflitos recentes no biênio 2013/2014 na bacia do Cantareira, na bacia do rio Paraíba do Sul e na bacia do rio São Francisco, e utiliza dados das evoluções das práticas de irrigações observadas pelos Censos Agropecuários nas cinco regiões do País (regiões Norte, Nordeste, Sudeste, Centro-Oeste e Sul). Assim, o estudo simula o impacto do crescimento da irrigação sobre o setor elétrico e as suas emissões de GEE.

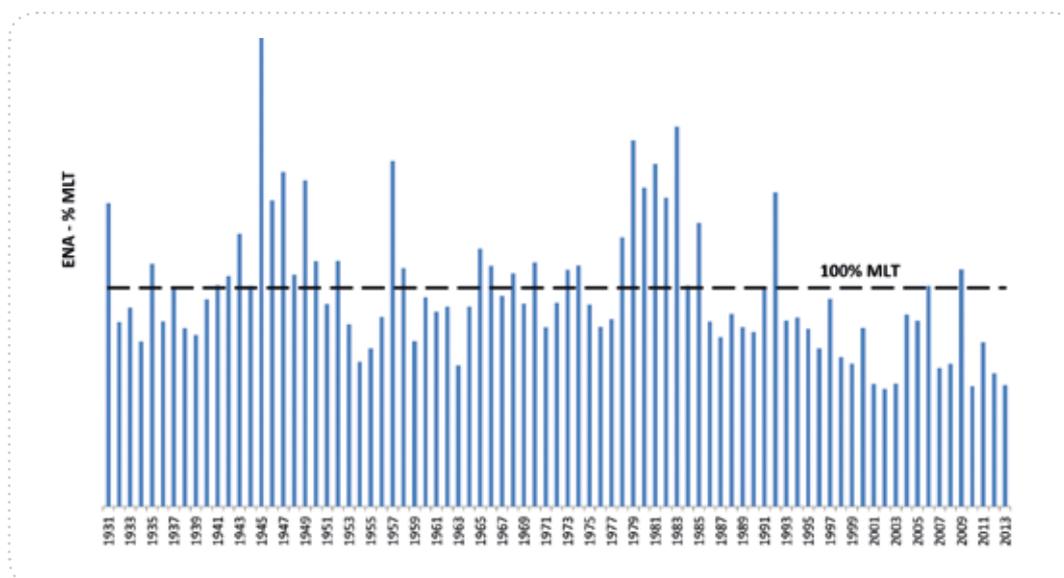
Busca-se assim medir efeitos de segunda ordem associados à hidrologia seca, quando a geração hidrelétrica pode ser “duplamente” penalizada pela hidrologia desfavorável e pela maior retirada de água nos reservatórios, sobretudo para a irrigação de cultivos. As retiradas de água - assumidas constantes nos casos de referência, de hidrologia seca e alternativo - são reavaliadas através de um estudo específico. O estudo quantifica este impacto, em especial sobre as emissões de GEE.

Em um cenário de escassez de água, os conflitos entre os usos da água são mais evidentes, mesmo em países com grande disponibilidade de água como o Brasil. No período 2013/2014, três bacias hidrográficas brasileiras passaram por notáveis conflitos pelo uso da água: (i) a bacia do Rio São Francisco no Nordeste; (ii) as bacias do sistema Cantareira de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo; e (iii) a bacia do Rio Paraíba do Sul na divisa dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro.

**BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO:** Os principais usos não elétricos da água são a irrigação a montante do reservatório de Sobradinho e o abastecimento de água para consumo humano, devido à posição da estrutura de captação.

A análise do histórico de vazões da região Nordeste, que tem o Rio São Francisco como principal curso d'água, indica um viés de vazões abaixo da média histórica a partir de 1993, conforme Figura . Em 20 dos últimos 21 anos analisados, as vazões do Nordeste foram inferiores à média histórica.

<sup>15</sup> As usinas térmicas requerem água para seu resfriamento.



**FIGURA 21 - Histórico de vazões do Nordeste**

Várias análises, em particular da ANA<sup>16</sup> mostram que é provável que tenha havido uma mudança estrutural nas vazões do São Francisco. A aplicação do teste estatístico, *Kolmogorov-Smirnov*, utilizado para verificar se as vazões dos dois períodos pertencem à mesma distribuição de probabilidade, indicou que a probabilidade dos registros pós-1993 pertencerem à mesma distribuição dos registros pré-1993 é de somente 0,4%.

As vazões podem estar diminuindo por três razões: (i) mudança no regime de chuvas (um possível sinal de impacto de mudança climática); (ii) aumento não registrado no uso consuntivo da água, devido por exemplo a ligações não contabilizadas para irrigação; ou (iii) o desmatamento que causa o desaparecimento de nascentes, em particular no oeste da Bahia.

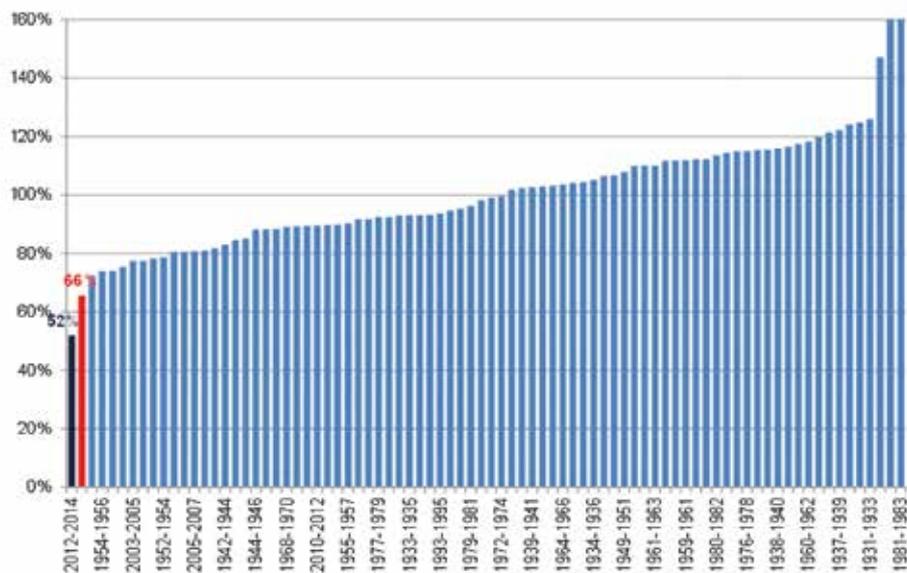
Uma das conclusões da ANA sobre o rio São Francisco é que *a precipitação sozinha não explicaria a redução na série de vazões*, o que reforça a hipótese de que há causas adicionais.

**BACIAS DO SISTEMA CANTAREIRA:** O ano de 2014 e o triênio 2011-2014 foram os períodos mais secos já registrados no histórico. Dado que o principal uso nessas bacias é o consumo humano, como a demanda não mudou consideravelmente, a crise se deveu à hidrologia ruim.

Uma avaliação da curva de permanência de vazões desse sistema mostra que:

- ▶ 2014 foi o pior ano de hidrologia registrado, com somente 25% da média histórica. Como comparação, a afluência da pior seca registrada até então, em 1955, foi de 56% da média (mais que o dobro do evento de 2014).
- ▶ O triênio 2012-2014 é igualmente o mais seco registrado, o anterior sendo o período 1953-1955 (Figura 22).

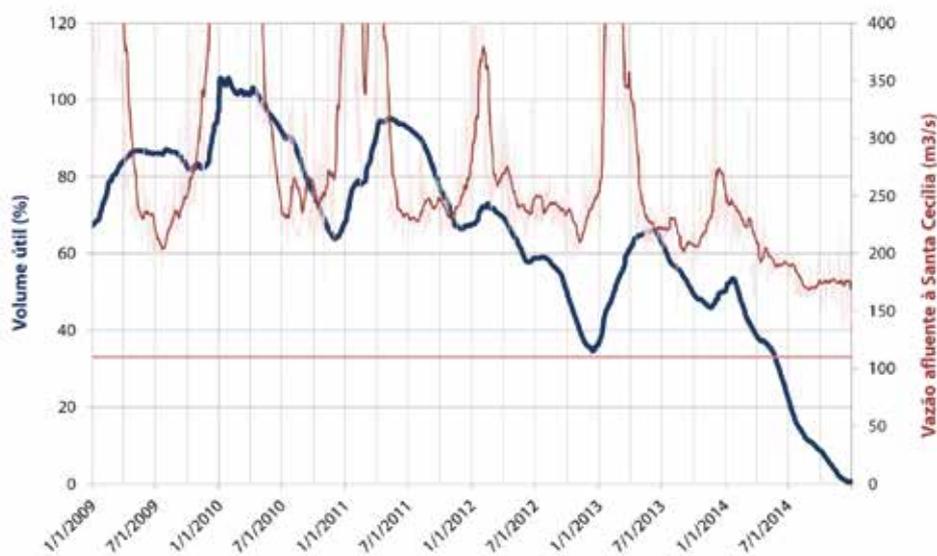
<sup>16</sup> Alexandre A. Araújo, Saulo A. de Souza e Flavio H. Tröger, *Análise de estacionariedade das séries de estações hidrometeorológicas localizadas na bacia do rio São Francisco*, XX Simpósio da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Bento Gonçalves, 17-22 de novembro de 2013.



**FIGURA 22 - Curva de permanência de vazões do Cantareira**

**BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL:** Assim como nos casos anteriores, os reservatórios das UHEs Jaguari e Paraibuna-Paraitinga do Paraíba do Sul também atingiram volume mínimo ao final de 2014 (veja Figura ). Entretanto, nesse caso a hidrologia não foi tão desfavorável, conforme mostra a curva de vazão afluente (curva vermelha), apesar de ser um ano de baixas vazões e precipitações. A explicação é que os reservatórios foram usados prioritariamente para gerar energia por inexistência de regra operativa capaz de preservar volumes e garantir o abastecimento da demanda para consumo humano nos casos de reservatórios para usos múltiplos.

Algumas cidades da bacia correram risco de desabastecimento, não tanto pela quantidade de água a ser captada, mas por restrição de nível de água dos sistemas de bombeamento. Pelas baixas vazões em trânsito na calha fluvial, as tomadas d'água desses sistemas ficaram sem a submergência necessária, e até mesmo a captação de água do bombeamento da elevatória de Santa Cecília, que permite o abastecimento da cidade do Rio de Janeiro, teve sua vazão de captação limitada.



**FIGURA 23 - Armazenamento em Paraibuna x Vazão afluente à Santa Cecília**

As crises em diversas bacias brasileiras pelo uso da água evidenciam a necessidade de maior controle sobre as retiradas de águas em algumas bacias. Dentro desse contexto torna-se importante avaliar as demandas de água e como podem afetar a operação do SIN em momentos de escassez, com consequente aumento de emissões de GEE.

Pela quantidade de água que retira das bacias, e pelo recente crescimento de áreas irrigadas, foi priorizada neste estudo a avaliação da alteração provocada pela agricultura, e suas consequências para a geração hidrelétrica. Não apenas porque a irrigação representa a maior retirada de água, mas também porque é o uso com menor taxa de retorno de água para o curso d'água. Essa demanda tende a ser maior nas regiões mais secas como o Nordeste semiárido.

Três fatores podem alterar significativamente a demanda de irrigação: o aumento da área irrigada, a alteração do mercado e dos cultivos desenvolvidos e uma mudança do regime de chuvas devido a uma estiagem prolongada.

Com base nas estimativas feitas pela ANA/ONS, os usos consuntivos para a irrigação foram avaliados, corrigindo-se as taxas de crescimento inicialmente estimadas em 2003, com base no censo agropecuário de 1996. Os dados de áreas irrigadas por município do Censo Agropecuário de 2006 também foram usados para estabelecer com maior precisão as taxas de crescimento das áreas irrigadas.<sup>17</sup>

Para avaliar as mudanças que poderiam ser provocadas por uma estiagem prolongada, foi calculado o uso consuntivo da irrigação no período de uma estiagem recente. Assim foi selecionado o período de 1999-2003 para estimar o uso consuntivo ou balanço hídrico numa estiagem severa, a mesma que definiu o racionamento de energia no Brasil.

Para capturar o efeito sobre as emissões de GEE da competição pelo uso da água em situações de hidrologia desfavorável (seca), foi realizada uma análise de sensibilidade considerando a majoração das retiradas por irrigação, seguindo a metodologia apresentada acima. A simulação com o modelo SDDP foi feita e as emissões do sistema elétrico nacional foram reavaliadas.

O resultado desta simulação é que o aumento de irrigação levaria a uma variação insignificante nas emissões totais de CO<sub>2</sub> do sistema nacional elétrico integrado.

A primeira vista, este resultado pode parecer surpreendente devido à gravidade das consequências recentemente observadas das crises locais mencionadas acima.

Várias razões concorrem para este impacto mínimo nas emissões futuras do sistema nacional como um todo. Primeiro, é importante sinalizar que no caso das bacias mais sensíveis, como no Nordeste, o efeito do crescimento das retiradas de água devido à irrigação já foi internalizado nas séries passadas. Conforme mencionado acima, em 20 dos últimos 21 anos analisados, as vazões do Nordeste foram inferiores à média histórica.

Para eliminar este viés, a PSR realizou uma calibração manual das séries históricas somente para o caso do rio São Francisco, de maneira a representar, a média das vazões pós 1993. Assim, para efeitos de ENA, foi considerada uma redução de cerca de 15%, já que nem toda a água esperada chega às turbinas, sendo consumida sem registro no caminho.

Além disso, as bacias onde o conflito com a irrigação é mais severo não são necessariamente as mais relevantes sob ponto de vista energético. Assim, a ENA do Nordeste responde por apenas 10% da ENA brasileira. Em consequência, o efeito para o SIN da correção manual na ENA operada para o Nordeste é apenas de cerca de 1,5%.

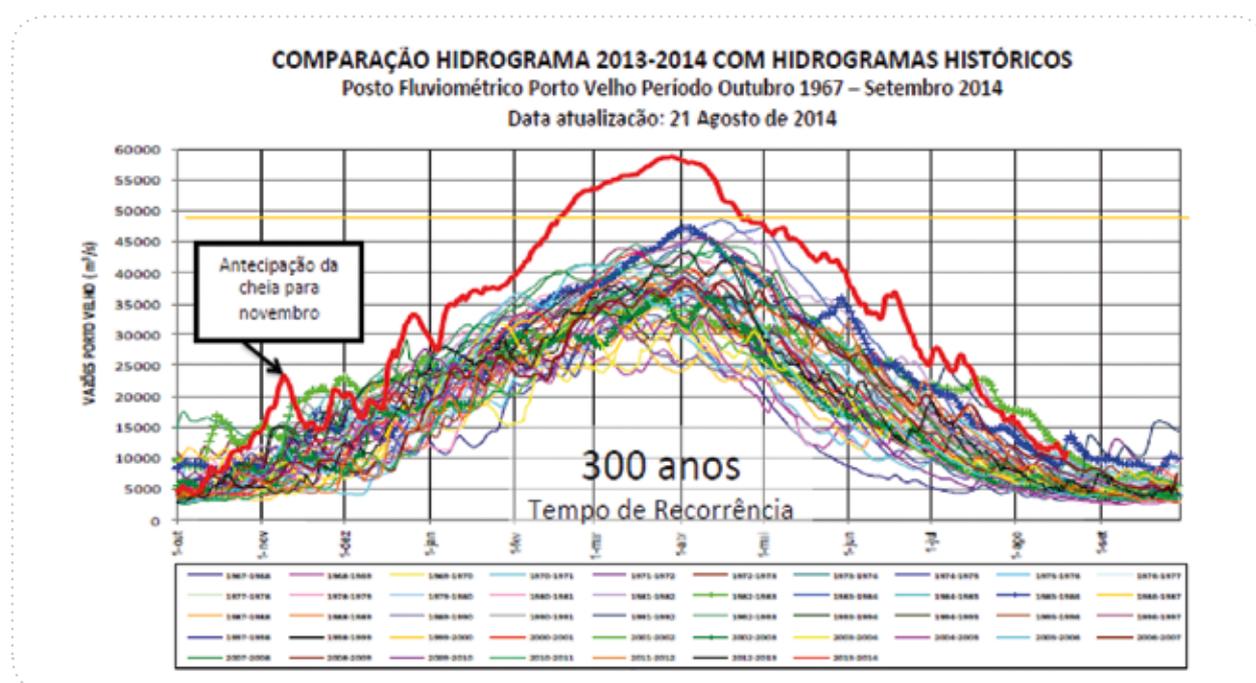
<sup>17</sup> Se tratando de dados já antigos, esta estimativa é necessariamente muito frágil; trabalhos adicionais utilizando dados mais novos são necessários para aprofundar esta parte ainda muito exploratória do estudo. Em particular, os dados do "Atlas da Irrigação" produzido pela FAO o MAPA poderão ser utilizados. Ver: "Panorama dos Recursos Hídricos no Brasil 2015" editado pela ANA e o "Atlas da Irrigação", editado pela FAO e MAPA

Nas outras grandes bacias, apesar do grande aumento percentual das áreas e das vazões de irrigação, o impacto nas séries de vazões afluentes ainda é e deve continuar muito pequeno no horizonte do estudo (15 anos) em comparação às disponibilidades de água, mesmo nos cenários de baixa hidrologia. Todavia, esta conclusão precisaria ser reavaliada utilizando dados espaciais mais precisos, em particular para testar hipótese de coincidência da possível fronteira de expansão hidrelétrica (Norte e Centro-oeste) com a possível fronteira de expansão da agricultura irrigada (Centro-oeste).

Para bacias menores, com pequenas hidrelétricas, a situação é diferente: a expansão da agricultura irrigada a montante pode prejudicar a capacidade de geração elétrica.

É também importante mencionar que, em razão do tamanho continental do país, episódios de secas severas em certas regiões podem ser concomitantes a episódios de cheias excepcionais. Assim, no mesmo período da severa seca multianual observada no Sudeste e no Nordeste, inclusive as piores do histórico para as bacias do Cantareira e São Francisco, aconteceram pelo menos quatro cheias extremas nos rios a seguir:

- ▶ Madeira (2013/2014 - 300 anos de recorrência) (Figura 24);
- ▶ Iguaçu (2014/2015 – 260 anos de recorrência);
- ▶ Teles Pires (2011/2012 – 150 anos de recorrência); e
- ▶ Piabanha (2010/2011-500 anos de recorrência).



**FIGURA 24 - Cheia do rio Madeira 2013/2014 (em vermelho)**

Todavia, vale a pena mencionar que na ausência de reservatórios de armazenamento suficientes e em razão de restrições nas linhas de transmissão, o efeito de compensação das secas observadas em certas bacias pelas enchentes observadas em outras bacias se encontra parcialmente perdido, pois o excesso de água acaba sendo vertido.

Mesmo assim, enquanto os efeitos locais da baixa hidrologia podem ser muito severos, o fato de o Brasil ter dimensões continentais e ser eletricamente interligado pelas linhas de transmissão dilui estes fenômenos locais, o que explica – a princípio – o quase desprezível aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> resultantes do incremento dos usos concorrentes da água, em particular irrigação.



**THE WORLD BANK**  
IBRD • IDA | WORLD BANK GROUP