

FONTES RENOVÁVEIS: ANÁLISE DINÂMICA DE SISTEMAS APLICADA À MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL

DOI: 10.19177/rgsa.v9e32020438-459

Gilson Aparecido Sampaio¹

Wanyr Romero Ferreira²

Eduardo Trindade Bahia³

Jairo Afonso Henkes⁴

RESUMO

O Brasil possui a uma das matrizes energética mais limpa do mundo industrializado com uma crescente contribuição na produção energética oriunda de fontes renováveis, em especial no setor elétrico. Entretanto, no final de 2014 e início de 2015 o país investiu na ativação de usinas termoelétricas movidas a carvão, óleo e gás. Estes combustíveis, principalmente o carvão, provocam impactos ambientais nos solos, na atmosfera e nos recursos hídricos. Este cenário aponta para a necessidade de se identificar fontes de energia que representem uma estratégia de desenvolvimento sustentável. O presente trabalho simula o comportamento da geração e da demanda de energias renováveis no Brasil no período entre 2000 e 2030. Um modelo de dinâmica de sistemas foi construído para se analisar a matriz energética e compreender a interdependência das fontes geradoras de energia. Os resultados da simulação para a capacidade de geração no período de 2000 a 2015 foram comparados com dados de fonte oficial. A diferença foi menor que 1%. Para o período de 2016 a 2030 utilizaram-se a provisão de investimentos na geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Obteve-se uma previsão de geração de 1.555.376 GW para 2030. O modelo permite acrescentar variáveis como incentivos políticos e crises hídricas. Observou-se uma tendência de crescimento da demanda de energia elétrica, resultado do crescimento sustentado do PIB e do crescimento demográfico e um pequeno crescimento anual da capacidade de geração devido à provisão de investimentos a partir de fontes renováveis.

Palavras-chave: Fontes Renováveis. Dinâmica de sistemas. Matriz energética. Geração de energia elétrica.

¹ Engenheiro Mecânico e de segurança de trabalho, Simulação de sistema e processos. Centro Universitário Una. <http://orcid.org/0000-0003-0335-9556> E-mail: gilsonsampas@yahoo.com.br

² Diretora de Pesquisa do Ietec - Instituto de Educação Tecnológica e coordenadora do Mestrado em Engenharia e Gestão de Processos e Sistemas. E-mail: wanyr@terra.com.br

³ Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1979), mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (1985) e doutorado em Ciências del Mar - Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech (1997). E-mail: etbahia@gmail.com

³ Doutorando em Geografia (UMinho, 2019). Mestre em Agroecossistemas (UFSC, 2006). Especialista em Administração Rural (UNOESC, 1997). Engenheiro Agrônomo (UDESC, 1986). Professor dos Cursos de Ciências Aeronáuticas, Administração, Engenharia Ambiental, do CST em Gestão Ambiental e do Programa de Pós Graduação em Gestão Ambiental da Unisul. E-mail: jairohenkes333@gmail.com

RENEWABLE SOURCES: DYNAMIC ANALYSIS OF SYSTEMS APPLIED TO THE ENERGY MATRIX OF BRAZIL

ABSTRACT

Brazil has one of the cleanest energy matrices in the industrialized world with an increasing contribution to energy production from renewable sources, especially in the electricity sector. However, in late 2014 and early 2015, the country invested in activating coal, oil and gas thermoelectric plants. These fuels, mainly coal, cause environmental impacts on soils, the atmosphere and water resources. This scenario points to the need to identify sources of energy that represent a sustainable development strategy. This study simulates the behavior of generation and demand for renewable energy in Brazil between 2000 and 2030. A system dynamics model was built to analyze the energy matrix and understand the interdependence of energy sources. The results obtained in the simulation for the generation capacity between 2000 and 2015 were compared with data official source. The difference was less than 1%. The results of the period 2016 to 2030 were obtained by the budget of investment in electricity generation from renewable sources. It was obtained a forecast of generation of 1,555,376 GW for 2030. The model allows adding variables such as political incentives and water crises. The results showed a demand growth trend (consumption) of electricity in Brazil, due to the sustained growth of GDP and population growth and a small increase in capacity of electricity generation over the analyzed period due to provision of investment the generation of electricity from renewable sources.

Keywords: Renewable Sources. System dynamics. Energy matrix. Energy generation.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda de energia e os problemas causados pelas mudanças climáticas globais são motivos para um crescente interesse em opções de aplicação de energias renováveis (BLUMBERGA *et al.*, 2011). A tendência de crescimento na substituição da energia de origem fóssil por fontes de energia renováveis é justificada não apenas pela busca por novas fontes de energia, mas também por minimizar os efeitos negativos causados ao meio ambiente pelo uso excessivo dos combustíveis fósseis. A busca pelo desenvolvimento sustentável, nos

âmbitos social e ambiental, motiva e incentiva a elaboração de várias pesquisas e projetos, investigando mecanismos de seleção e gerenciamento para o adequado uso das formas alternativas e principalmente renováveis de geração de energia (BARIN *et al.*,2010).

Para se identificar quais fontes de energia devem ser priorizadas em nível de investimentos, é necessário que se conheçam as demandas de energia e a capacidade de geração e, assim, compreender a interdependência das fontes geradoras de energia.

A dinâmica de sistema possibilita projetar um cenário para avaliar a viabilidade de investimentos em outras fontes geradoras renováveis para reduzir a dependência do setor das usinas hidrelétricas uma vez que não há mais a disponibilidade de outrora. Assim, o presente trabalho objetiva apresentar o comportamento da matriz energética no Brasil entre 2000 e 2030, por meio de um modelo de dinâmica de sistemas visando aumentar a participação de fontes alternativas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O Brasil é rico em rios com excelentes potenciais hidrelétricos, e, diferente da maioria dos países centrais e periféricos, não sustenta a base da geração de sua energia elétrica na utilização de fontes primárias não renováveis como derivados do petróleo (DOROCHE; ANSCHAU, 2015). Essa característica faz com que o Brasil tenha presença marcante da energia hidráulica em sua matriz energética, como pode ser observado na Tabela 1.

Gomes (2014) afirma que, quanto mais obras de repotenciação forem realizadas, mais se posterga a necessidade de construção de algumas novas usinas. Logo, o Brasil poderia ganhar a capacidade de produzir mais 11.000 MW de potência elétrica sem construir uma única nova usina, apenas reformando e aproveitando espaços já existentes em hidrelétricas já instaladas.



Tabela 1 - Empreendimentos em operação no Brasil em 2016

Fonte Geradora	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	Participação na geração de energia [%]
Central Geradora Hidrelétrica	563	443.931	446.012	0,30
Central Geradora Eólica	386	9.489.008	9.414.630	6,37
Pequena Central Hidrelétrica	446	4.875.554	4.848.790	3,28
Usina Fotovoltaica	40	26.962	22.962	0,02
Usina Hidrelétrica de Energia	220	101.108.356	90.465.984	61,19
Usina Termelétrica de Energia	2.923	42.389.560	40.666.856	27,50
Usina Termonuclear	2	1.990.000	1.990.000	1,35
Total	4.580	160.323.371	147.855.234	100,00

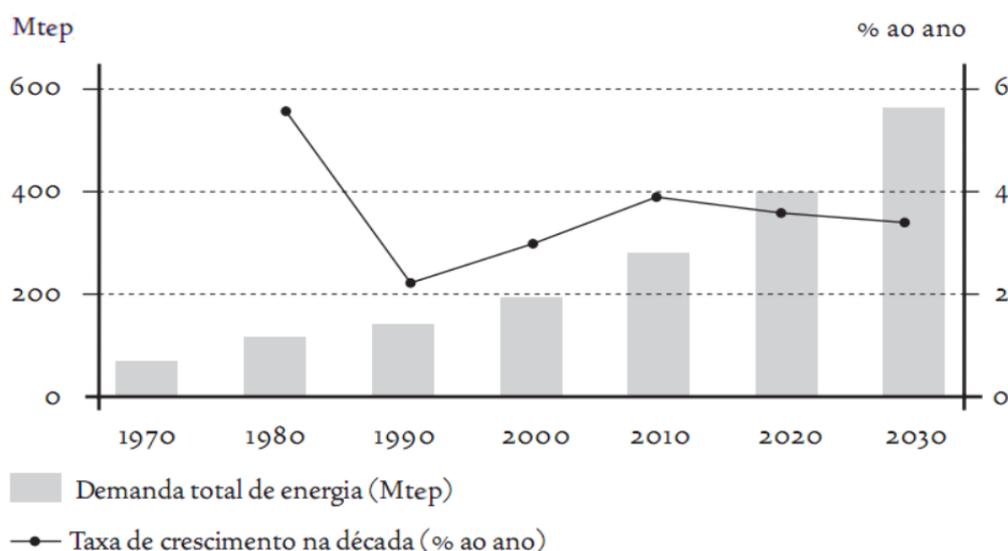
Fonte: Adaptado do BIG, 2016.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), na sigla em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, dentre suas conclusões dos relatórios, ressaltou que há 90% de certeza de que são as atividades humanas as responsáveis pelo aumento da temperatura média do planeta. Neste contexto, torna-se necessário uma postura proativa por parte do setor industrial, assim como de toda a sociedade, em relação à diminuição das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) e à intensificação das propostas de medidas mitigadoras (AGUIAR; FORTES; MARTINS,2016).

Para enfrentar esse desafio e aproveitar essa oportunidade, Tolmasquim *et al.* (2007) afirmam que é necessário orientar e catalisar esforços de investidores, empreendedores e consumidores do setor energético, visando uma adequada interação entre esses atores. Nesse sentido, é fundamental a contribuição das instituições e equipes responsáveis pelo planejamento energético nacional, antecipando as situações, mapeando as alternativas, sugerindo estratégias, enfim, norteando as decisões. As necessárias transformações no setor energético nacional nos próximos anos compreendem capacitação tecnológica, capacidade de gestão e inovação, viabilização de recursos para os investimentos e capacidade de articulação institucional, entre outras ações.

O Gráfico 1 apresenta a evolução da demanda de energia e da taxa de crescimento econômico no Brasil no período 1970-2030 (TOLMASQUIM *et al.*, 2007).

Gráfico 1 - Demanda de energia e da taxa de crescimento

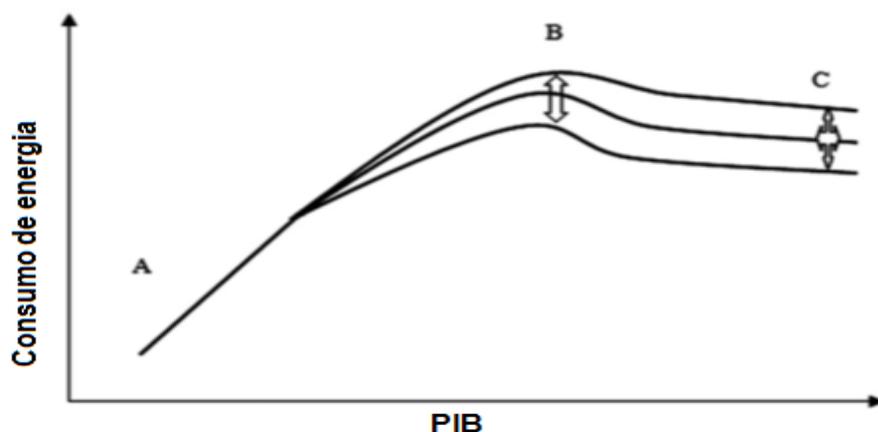


Fonte: Adaptado de Tolmasquimet *al.*, 2007.

*Mtep – Mega tonelada equivalente de petróleo.

Para Tao (2009) é relativamente fácil estimar a relação entre o consumo de energia e o PIB. Como mostrado na Figura 1, na Fase A o consumo de energia está associado ao aumento do PIB. No entanto, à medida que o consumo de energia aumenta a relação entre o PIB e a produção industrial se torna mais fraca até que achata e chega ao ponto de pico, que é a Fase B. Após o pico, a produção industrial e o consumo de energia diminuem lentamente e podem chegar a um valor constante ou um declive suave, diminuindo no estágio C. Por causa da melhoria da infraestrutura industrial e do progresso tecnológico, a produção industrial e o consumo de energia não irão continuar a aumentar com o aumento do PIB por mais tempo. Pelo contrário, eles começam a diminuir com o aumento do PIB. A relação entre o consumo de energia e o PIB é determinada por vários efeitos que aparecem em diferentes fases, com fatores que podem levar a relações em forma de U invertido. Hoje em dia, os Estados Unidos e alguns outros países industrialmente avançados estão na fase B ou C, mas a maioria dos países periféricos ainda está na fase de A.

Figura 1 - A possível relação entre o consumo de energia e PIB



Fonte: Adaptado de Tao, 2009.

O preço da energia elétrica é formado pelos custos desde a geração até a sua disponibilização aos consumidores, logo não se paga apenas pelo que se consome mas também pela disponibilidade. Além destes custos do sistema ainda existem encargos e impostos (ABRADEE, 2016). A Figura 2 mostra a composição tarifária dos custos da energia.



Figura 2 - Composição tarifária



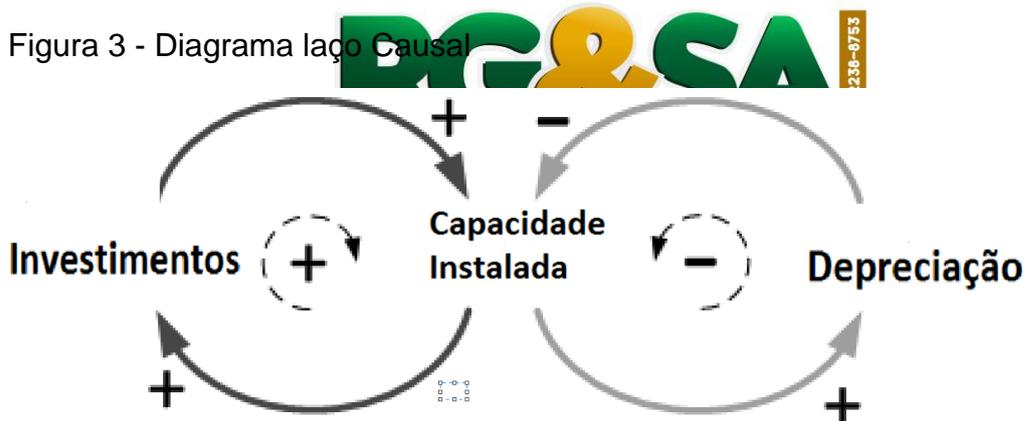
Fonte: ABRADEE, 2016.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A técnica de Dinâmica de Sistemas foi escolhida para o desenvolvimento deste estudo. Meadows (1991) afirma que dinâmica de sistema é um conjunto de técnicas de pensamento e modelagem que ajuda o usuário a compreender os sistemas

complexos, tais como o corpo humano, a economia nacional e o clima da Terra, e a manter o controle de várias interligações, além de permitir uma visualização global do sistema.

Para desenvolvimento do modelo, assume-se que a capacidade instalada das usinas hidrelétricas (em termos de geração) é influenciada por dois fatores: o investimento e a depreciação da fonte ao longo do tempo em função de sua capacidade de geração. Portanto, cada um dos estoques está ligado a dois fluxos: um influxo (fluxo para dentro no sentido anti-horário) e um fluxo para fora (no sentido horário), como ilustrado na Figura 3 (BLUMBERGA *et al.*, 2011). O fluxo representa investimentos destinados a aumentar a capacidade de geração de energia elétrica instalada. O influxo representa a depreciação da instalação de geração de energia elétrica, reduzindo assim o valor da capacidade de geração instalada. A conversão do diagrama de fluxo de estoque em um diagrama de circuito causal, como representado pela Figura 3, permite uma melhor compreensão da natureza da interação entre a capacidade instalada e os fluxos de investimento e de depreciação.



Fonte: Adaptado de Blumberga *et al.*, 2011.

Blumberga *et al.* (2011) explicam que um diagrama de laço causal mostra o caminho a partir do qual o modelo funciona. A capacidade instalada total dos empreendimentos (qualquer um dos tipos de fontes de energia renováveis) aumenta se o fluxo de investimento aumenta. Quanto maior a capacidade instalada, maior será o fluxo de investimento. Assim, a interação entre o fluxo de investimento e da capacidade instalada forma um *loop* de reforço positivo que caracteriza uma estrutura de sistemas em crescimento exponencial. Mas também quanto maior for a

capacidade, maior será o fluxo de depreciação. Entretanto, se o fluxo de depreciação aumenta, o valor da capacidade total diminui. A interação entre a capacidade instalada e o fluxo de depreciação forma uma curva de equilíbrio negativo que caracteriza uma estrutura de sistema de busca de objetivos. A combinação de uma interação positiva e uma negativa forma um laço do comportamento dos sistemas em forma de S, que poderá ser observado nos resultados de modelagem. Tal estrutura de fluxo é usada para modelar a mudança dinâmica da capacidade instalada dos diversos tipos de empreendimentos de geração.

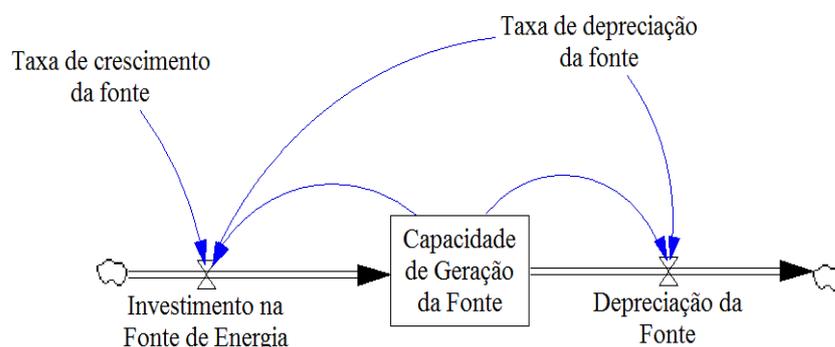
A Figura 4 apresenta o diagrama de laço causal das fontes renováveis mostrando as inter-relações entre capacidade de geração e os respectivos investimentos.

Os sete *loops* causais menores representam a capacidade geradora de energia produzida a partir de cada tipo de fonte de renovável (Central Geradora Elétrica, Central Geradora Eólica, Pequena Central Hidrelétrica, Usina Fotovoltaica, Usina Hidrelétrica de Energia, Usina Termoelétrica de Energia e Usina Termonuclear). Pode-se observar que quanto maior for o investimento destinado a aumentar a capacidade de uma das fontes renováveis, maior será a proporção desta fonte na matriz energética. E quanto maior for a proporção desta fonte na matriz, maior será o investimento destinado a aumentar sua capacidade geradora e menor será a soma das proporções das demais fontes.

A simulação do comportamento da matriz energética no Brasil entre 2000 e 2030 é feita usando o *software* de modelagem dinâmica de sistemas Vensim PLE (VENTANA SYSTEMS, 2015).



Figura 5 - Dependência da capacidade instalada de geração da fonte



A taxa de crescimento da fonte corresponde a quanto a fonte irá aumentar sua capacidade de geração ano a ano em percentual. A taxa de depreciação corresponde a quanto a fonte tende a reduzir na sua capacidade de geração em percentual caso não haja investimentos na manutenção de sua capacidade. Logo o investimento na fonte em percentual deve ser igual à taxa de crescimento mais a taxa de depreciação.

Matematicamente a capacidade de geração da fonte (CGF) se relaciona com as outras variáveis na forma:



$$CGF = CGF_{Inicial} + IF - DF \quad (1)$$

$$IF = CGF_{Inicial} * (TC + TD) \quad (2)$$

$$DF = CGF_{Inicial} * TD \quad (3)$$

em que:

$CGF_{Inicial}$ = Capacidade de Geração da Fonte [GW] no início da simulação;

IF = Investimento na fonte [GW];

DF = Depreciação da fonte [GW];

TC = Taxa de crescimento [%];

TD = Taxa de depreciação [%].

A Tabela 2 contém os valores da capacidade de geração inicial, taxa de crescimento e taxa de depreciação por fonte de energia utilizados na simulação da capacidade de geração da fonte de energia e suas respectivas referências.

Tabela 2 - Capacidade de geração inicial, taxa de crescimento e taxa de depreciação por fonte de energia

Fonte Geradora	Capacidade Geração Inicial [GW]	Fonte	Taxa de crescimento [%]	Fonte	Taxa de depreciação [%]	Fonte
CGH	$1,03 \times 10^{-1}$		10,0		3,38	ANEEL, 2000
Eólica	$1,68 \times 10^{-2}$		10,0		4,75	ANEEL, 2013
Fotovoltaica	$8,50 \times 10^{-1}$		1,0		4,00	ANEEL, 2013
Hidrelétrica	$6,31 \times 10^1$	ANEEL, 2005	1,4 a 3,6	BRASIL, 2015	3,55	ANEEL, 2012
PCH	$1,16 \times 10^2$		10,0		2,66	ANEEL, 2009
Termoelétrica	$2,94 \times 10^1$		2,3		3,95	ANEEL, 2014
Termonuclear	$1,35 \times 10^0$		3,6		3,63	ELETROBRAS, 2005

A capacidade total de geração é dependente da geração das fontes de energia e é representada na Figura 6. Esta dependência pode ser expressa da seguinte forma:

$$CTG = CGH + CGE + PCH + UFE + UHE + UTE + UTN \quad (4)$$

em que:

CTG = Capacidade Total de Geração [GW];

CGH= Central Geradora Hidrelétrica [GW];

CGE = Central Geradora Eólica [GW];

PCH = Pequena Central Hidrelétrica [GW];

UFE = Usina Fotovoltaica de Energia [GW];

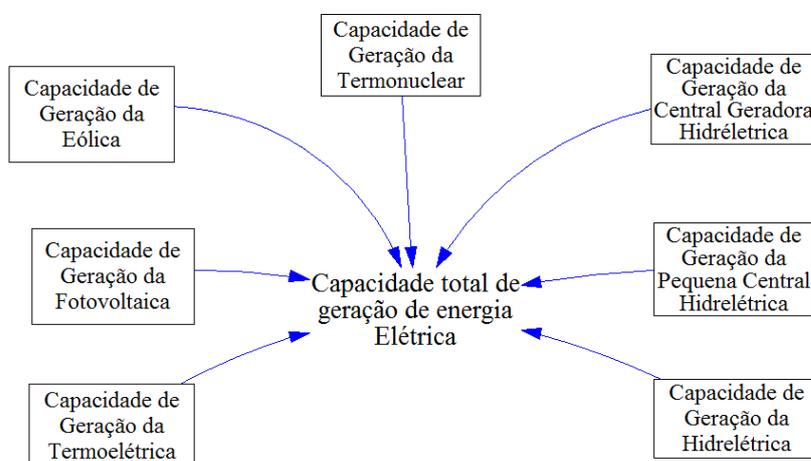
UHE = Usina Hidrelétrica de Energia [GW];

UTE = Usina Termoelétrica de Energia [GW];

UTN = Usina Termonuclear [GW].



Figura 6 - Dependência da Capacidade Total de Geração

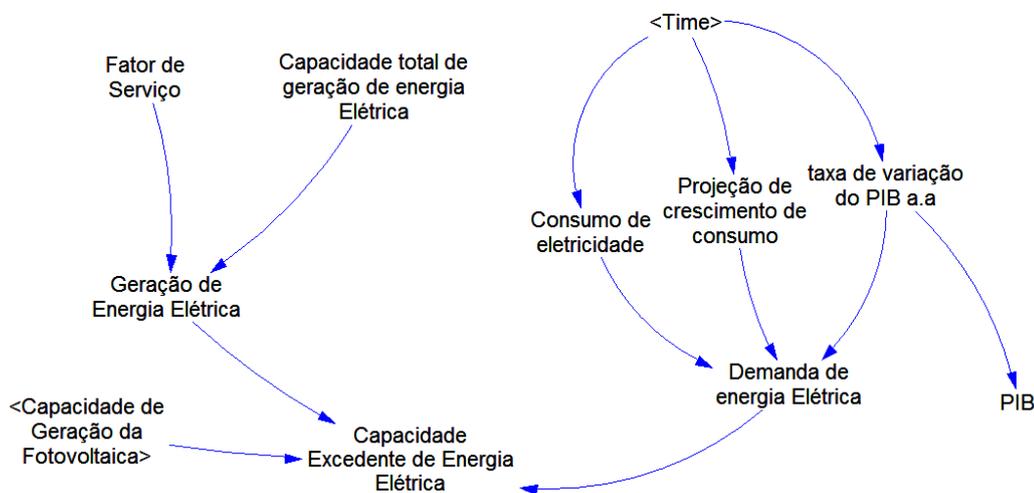


A potência instalada é a capacidade máxima de produção de uma usina, ou seja, é a quantidade máxima de energia que pode ser produzida pela fonte de energia, em uma determinada unidade de tempo. Do ponto de vista da eficiência, deve-se ter a máxima produção de energia determinada pela potência instalada. Analisar a quantidade de energia produzida de acordo com a potência instalada é verificar se a capacidade produtiva de uma hidrelétrica está sendo usada. Se uma usina tem uma determinada capacidade instalada ociosa, ela não está sendo eficiente no uso de seu potencial (SAMPAIO; RAMOS; SAMPAIO, 2005).

Para geração de energia elétrica pelas fontes de energia renováveis utilizou-se como referência a capacidade de geração (potência instalada) com fator de serviço de 80% referente a geração, transmissão e distribuição, um regime de trabalho de 24 horas por dia, com exceção da fonte fotovoltaica para a qual utilizou-se 10 horas por dia (período médio diário de irradiação solar) e 365 dias por ano.

A capacidade excedente de geração de energia é dependente da geração de energia elétrica e do consumo de energia, que variam em função do tempo (Time), a Figura 7 representa esta dependência.

Figura 7 - Dependência da Capacidade Excedente de Geração



A capacidade excedente de geração de energia elétrica é a quantidade de energia possível de gerar superior à demanda de energia elétrica, ou seja, a energia possível de gerar que não é consumida.

Matematicamente a dependência da capacidade excedente de geração é expressa como:

$$GEE = (((CTG - UFE) * 24) + (UFE * 10)) * FS * 365 \quad (5)$$

$$CEG = GEE - DEE \quad (6)$$

$$DEE = CE * (1 + PCC + TVP) \quad (7)$$

$$PIB = PIB_{Inicial} * TVP \quad (8)$$

em que:

GEE= Geração de energia Elétrica [GW no ano];

UFE = Usina Fotovoltaica de Energia [GWh];

CTG = Capacidade total de Geração da Fonte [GWh];

CEG = Capacidade Excedente de Geração da Fonte [GW no ano];

FS = Fator de serviço

DEE = Demanda de energia elétrica [GW no ano];

CE = Consumo de Eletricidade [GW no ano];

PCC = Projeção de crescimento de consumo [%];

TVP = Taxa de variação do PIB ano a ano [%].

PIB = Produto Interno Bruto

PIB^{Inicial} = Produto Interno Bruto inicial



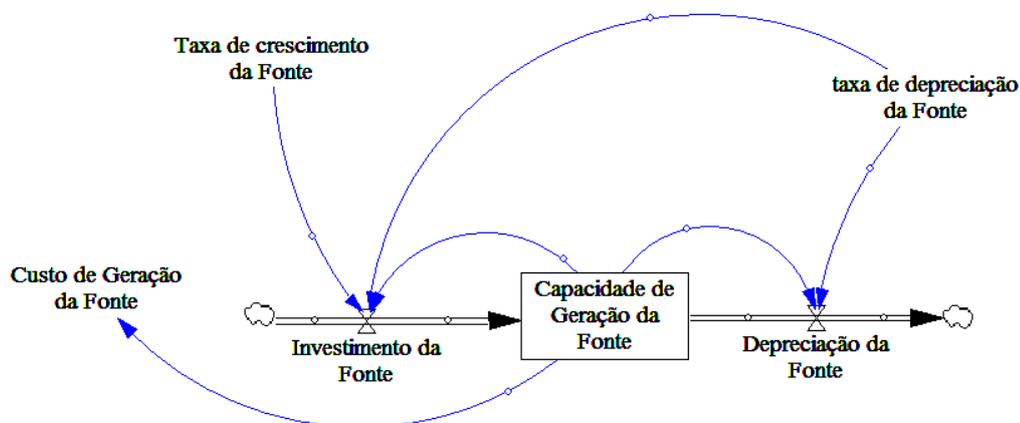
A Tabela 3 contém os dados utilizados na simulação da Capacidade excedente de Geração de energia e suas respectivas fontes.

Tabela3 - Consumo de energia elétrica, taxa de projeção de crescimento de consumo e taxa de variação do PIB ano a ano

Variável	Valor utilizado	Referências
Consumo de energia elétrica [GW]	307.528,7 a 838.049,8	ANEEL, 2005;
Projeção de crescimento de consumo [%]	2,2 a 3,3	BRASIL, 2007; BRASIL, 2015;
Taxa de variação do PIB ano a ano [%]	-3,8 a 6,2	IBGE, 2015

A Figura 8 ilustra a dependência do custo de geração da fonte com a capacidade de geração da fonte.

Figura 8 - Dependência do custo de geração da fonte



Matematicamente a dependência é expressa como:

$$\$CGF = \$CGFUNITÁRIA * 1000 * CTG \quad (9)$$

em que:

$\$CGF$ = Custo de geração da fonte [Reais]

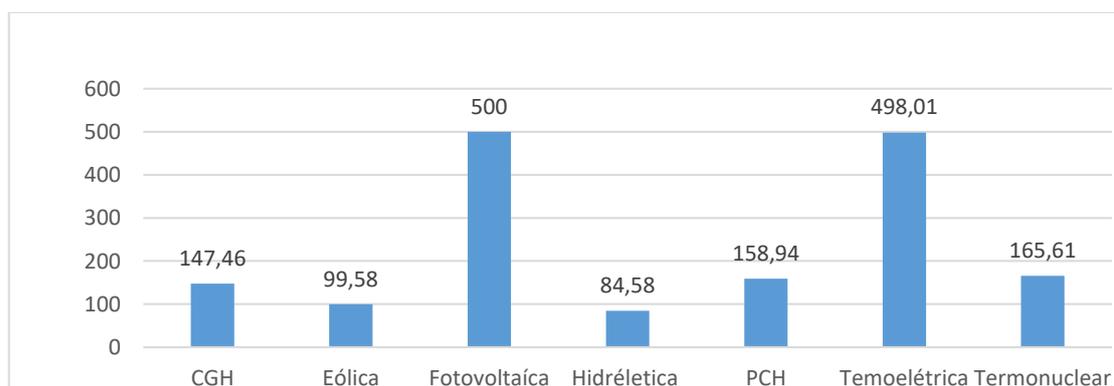
$\$CGFUNITÁRIA$ = Custo de geração da fonte unitária [Reais/MWh]

CTG = Capacidade total de Geração da Fonte [GWh];



Os custos unitários de geração por fonte geradora estão apresentados no Gráfico 2.

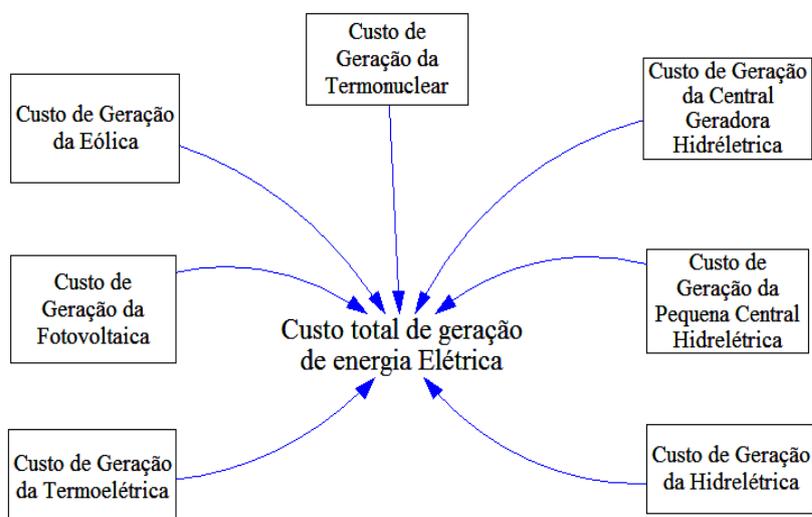
Gráfico 2 - Custo de Geração por fonte de energia, R\$/MWh



Fonte: FARIA; MONTALVÃO; ABBUD, 2012.

O custo total de geração de energia elétrica é dependente do custo da geração das fontes de energia, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9– Dependência do Custo Total de Geração



A dependência do custo total (R\$) de Geração de Energia Elétrica pode ser expressa da seguinte forma:

$$\text{\$CTG} = \text{\$CGH} + \text{\$CGE} + \text{\$PCH} + \text{\$UFE} + \text{\$UHE} + \text{\$UTE} + \text{\$UTN} \quad (10)$$

em que:

\\$CTG = Custo Total de Geração;

\\$CGH= Custoda Central Geradora Hidrelétrica;

\\$CGE = Custoda Central Geradora Eólica;

\\$PCH = Custoda Pequena Central Hidrelétrica;

\\$UFE = Custoda Usina Fotovoltaica de Energia;

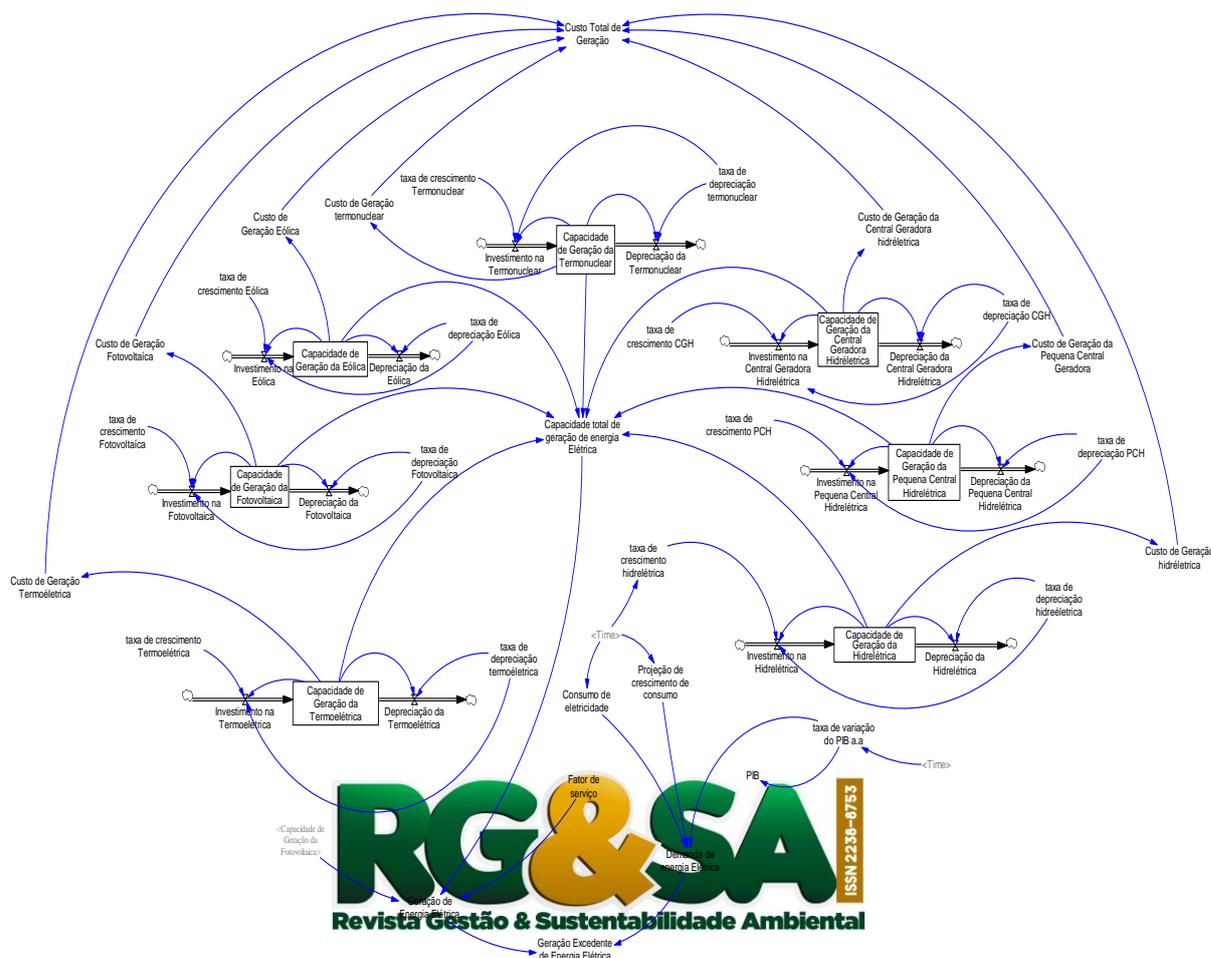
\\$UHE = Custoda Usina Hidrelétrica de Energia;

\\$UTE =Custoda Usina Termoelétrica de Energia;

\\$UTN = Custoda Usina Termonuclear.

A Figura 10 representa o modelo construído no Vensim que reúne os elementos da geração de energia, da demanda, da reserva de energia elétrica e de custo de geração das fontes renováveis de energia e suas dependências. Entende-se como reserva de energia elétrica a capacidade excedente de geração de energia elétrica, ou seja, a quantidade de energia que poderia ser produzida a mais que a demanda de energia elétrica.

Figura 10 - Modelo da Geração de energia por Fontes Renováveis



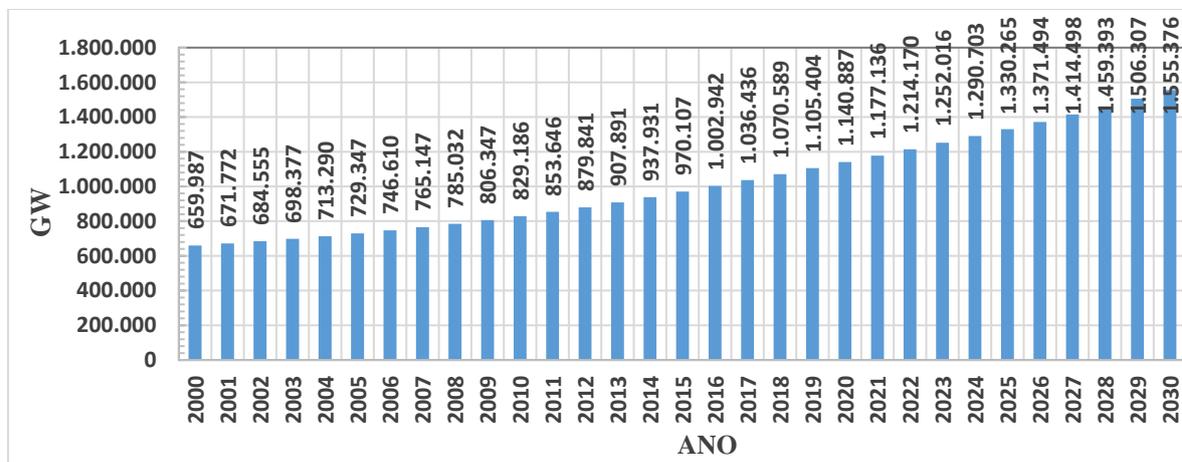
Fonte: Adaptado de Aslani, Wong, 2014.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A geração de energia elétrica parte da premissa que todas as usinas das diversas fontes de energia elétrica trabalham com sua capacidade máxima com o fator de serviço de 80% em todo o período. Os resultados obtidos com a simulação para a capacidade instalada utilizando os parâmetros taxa de crescimento e de depreciação, no período de 2000 a 2015, foram comparados com os valores divulgados pelo Departamento Brasileiro de monitoramento de energia elétrica. A diferença entre eles é inferior a 1%. Já os resultados do período de 2016 a 2030 foram obtidos segundo a provisão de investimentos na geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis que resultam em um pequeno crescimento da capacidade de geração de energia elétrica ano a ano. A simulação resultou na geração de 659.987 GW no ano de 2000

e 970.107 GW em 2015 e projetou a geração de 1.555.376 GW para 2030. O Gráfico 3 apresenta o comportamento do crescimento da geração ano a ano do período.

Gráfico 3 - Geração de Energia Elétrica



O modelo apresentou um crescimento da demanda (consumo) de energia elétrica no Brasil, resultado do crescimento do PIB (apesar de alguns anos apresentarem crescimento tímido ou recuo, a tendência de crescimento é positiva), do aumento populacional em conjunto com o crescimento das redes de distribuição que abrangem um número cada vez maior de usuários e também do aprimoramento tecnológico, que com intuito de gerar equipamentos cada vez mais potentes acabam por consumir mais energia em pesquisas, testes e processos.

No Gráfico 4 observa-se que, entre os anos de 2011 e de 2015, houve um recuo da demanda devido à crise hídrica e recessão econômica. A crise hídrica aumenta o custo de geração que é repassado para os consumidores que são forçados a reduzir o consumo para permanecer dentro do orçamento familiar. A recessão econômica reduz a demanda interna de alguns produtos acarretando a redução da produção industrial e, como consequência, a redução do consumo de energia elétrica. Após 2015 não são previstos eventos que alterem o comportamento da demanda de energia elétrica.

A geração excedente de energia elétrica é quanto de energia elétrica seria possível produzir a mais que a demanda, se todas as usinas de todas as fontes estivessem operando durante todo o ano respeitando a capacidade instalada e o fator de serviço de cada uma. Logo, com o aumento da capacidade e da demanda, haverá um crescimento da capacidade excedente pois as usinas não trabalham em sua

capacidade instalada em todo o período. Por exemplo, as usinas fotovoltaicas não geram a sua capacidade em dias chuvosos. No Gráfico 5 nota-se que, no período estudado, a capacidade excedente tem um crescimento significativo variando de 326.318GW em 2000 para 670.395 GW em 2030.

Gráfico 4 - Demanda de energia elétrica no período de 2000 a 2030.

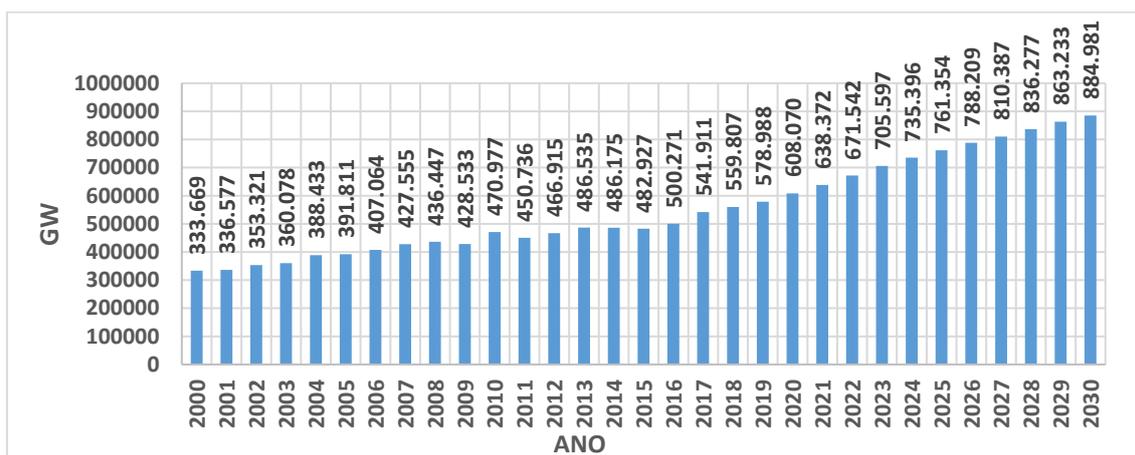
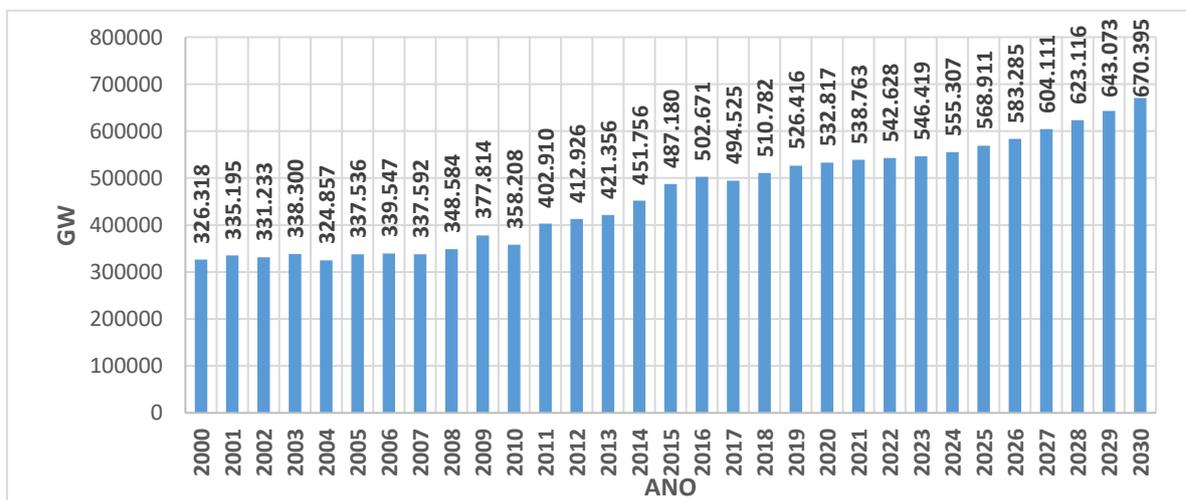
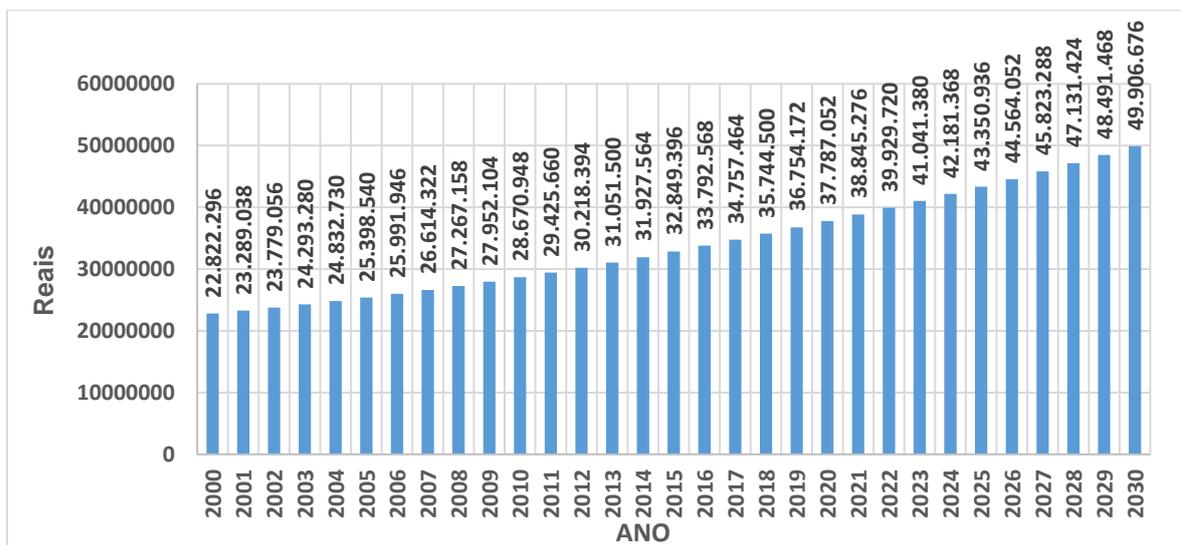


Gráfico 5 – Geração excedente de energia elétrica



O custo total de geração de energia elétrica é dependente da matriz energética, quanto mais energia gerada maior será o custo total de geração. O Gráfico 6 apresenta o custo total de geração de energia elétrica baseado na capacidade de geração.

Gráfico 6 - Custo total de geração de energia elétrica



O custo total de geração de energia elétrica é dependente da matriz energética, ou seja, quanto mais se utilizam fontes de maior valor maior será o custo total de geração.

5 CONCLUSÃO

Desenvolveu-se um modelo de dinâmica de sistemas para representar o comportamento da matriz energética no Brasil entre 2000 e 2030. O modelo permitiu compreender a influência de medidas políticas e fatores econômicos sobre o investimento nas fontes de energias renováveis, assim como a influência que as medidas políticas têm sobre as tarifas de energia elétrica.

As simulações mostram que a matriz energética brasileira é capaz de atender a demanda de energia do Brasil sem a utilização de toda sua capacidade de geração, visto que algumas fontes não operam todo ano, mas apenas quando as demais não geram o suficiente para atender a demanda.

O custo total de geração de energia elétrica depende da matriz energética, pois quanto maior a energia gerada de fontes de menor custo, menor será o custo total de geração. Quando o nível dos reservatórios está baixo, as hidrelétricas que possuem menor custo de geração têm sua capacidade de geração reduzida, sendo necessário

gerar ou aumentar o uso de uma ou mais fontes de maior custo, que geralmente é a termoelétrica.

Políticas de incentivos a investimentos nas fontes de energia renováveis poderiam reduzir o custo de geração e a emissão de CO₂ na atmosfera, melhorando as condições climáticas e descentralizando a geração de energia elétrica de modo a reduzir perdas de distribuição e transmissão a longas distâncias. Isenções fiscais e reduções, empréstimos, descontos e financiamentos específicos são exemplos de incentivos.

A Dinâmica de Sistemas mostrou-se uma ferramenta adequada para o estudo da matriz de geração de energia elétrica. O modelo permite simular cenários diferentes, alterando os valores dos investimentos, da taxa de crescimento, da demanda, do fator de serviço e de outras variáveis. Permite acrescentar variáveis como por exemplo incentivos políticos e crises hídricas. Futuros estudos podem levar em conta outros fatores como, por exemplo, a repotenciação de usinas hidrelétricas que podem aumentar a capacidade de geração e, em consequência, a taxa de crescimento.



REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatórios:** 2000, 2005, 2009, 2013 e 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 15 ago.2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 378/2012 e 2014-SRE/ANEEL.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 15 set. 2015.

AGUIAR, Lídia Vaz; FORTES, Júlio Domingos Nunes; MARTINS, Eduardo. Neutralização compensatória de carbono: estudo de caso: indústria do setor metal mecânico, Rio de Janeiro (RJ). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 197-205, Mar. 2016.

ASLANI, Alireza; WONG, Kau-Fui V. Analysis of renewable energy development to power generation in the United States. **Renewable Energy**, v.63, p. 153-161, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tarifas de energia.** Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>>. Acesso em: 11 out. 2016.

BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO. **Capacidade de Geração do Brasil**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

BARIN, Alexandre; CANHA, Luciane Neves; MAGNAGO, Karine Faverzani; ABAIDE, Alzenira da Rosa. Seleção de fontes alternativas de geração distribuída utilizando uma análise multicriterial baseada no método AHP e na lógica fuzzy. **SbaControle&Automação**, Campinas, v.21, n.5, p.477-486, 2010.

BLUMBERGA, D.; DZENE, I.; ROŠĀ, M.; DAVIDSEN, P., MOXNES, E. System Dynamic Analysis for Development of Renewable Energy Resources in Country. In: *Proceedings of the 29th International Conference of the System Dynamics Society*, United States of America, Washington, 24-28 July, 2011. Washington: **The System Dynamics Society**, 2011, p.36-36. Disponível em: <<https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/10568-System+Dynamic+Analysis+for+Development+of+Renewable+Energy+Resources+in+Country>>. Acesso em: 05 set. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Brasília, Distrito Federal: MME/EPE, 2015. 467p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília, Distrito Federal: MME/EPE, 2007.407 p.



DOROCHE, Marcos Roberto; ANSCHAU, Cleusa Teresinha. Oferta de energia elétrica no Brasil. **Revista Científica Tecnológica**, Chapecó, v.2, n. 1, p.402-414, 2015.

ELETROBRÁS TERMONUCLEAR. **Eletronuclear Demonstrações Financeiras**. Postado em 31 de setembro 2005. Disponível em: <<https://www.eletronuclear.com.br/ELB/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID=%7B94D69171-3564-4EC6-9E0D-B55B0491F9BC%7D&ServiceInstUID=%7B1582D8B6-7F75-4425-8965-F35D5858D588%7D>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

FARIA, Ivan Dutra; MONTALVÃO, Edmundo; ABBUD, Omar Alves. **Ambiente e energia: crença e ciência no licenciamento ambiental: Parte IV: A opção de geração hidroelétrica no Brasil**. [Brasília]: Núcleo de Estudos e Pesquisas do Senado, 2012. 52 p. (Textos para Discussão,107). Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td-107-ambiente-e-energia-crenca-e-ciencia-no-licenciamento-ambiental.-parte-iv-a-opcao-de-geracao-hidroeletrica-no-brasil>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

GOMES, Elisa de Podestá. Potencial de repotenciação de usinas hidrelétricas no Brasil e sua viabilização. **Jornal da UNICAMP**, Campinas, p. 1, mar.2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Series Estatísticas**.2015.Disponível em:

458

<https://www.serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?t=pib&vcodigo=scn5_4>. Acesso em: 20 mar. 2016.

MEADOWS, Donella H., System Dynamics Meets the Press, The Global Citizen, **Island Press**, Washington, v.1, n.1, p. 1-12, nov. 1991. Disponível em: <<http://web.mit.edu/sysdyn/road-maps/D-4143-1.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2016.

PENSAMENTO VERDE. **Tudo sobre a crise energética brasileira e mundial**. Publicado em 3 de março de 2014. Disponível em: <<http://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/tudo-sobre-crise-energetica-brasileira-e-mundial/>>. Acesso em: 22 maio 2015.

SAMPAIO, Luciano Menezes Bezerra; RAMOS, Francisco S.; SAMPAIO, Yony. Privatização e eficiência das usinas hidrelétricas brasileiras. **Economia Aplicada**, Ribeirão Preto, v. 9, n. 3, p. 465-480, 2005.

TAO, Zaipu. Scenarios of China's oil consumption per capita (OCPC) using a hybrid Factor Decomposition–System Dynamics (SD) simulation. **Energy**, Shenyang City, v. 35, iss. 1, p. 168-180. Sept. 2009.

TOLMASQUIM, Mauricio T.; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo. Matriz energética brasileira: uma perspectiva. **Novos estudos - CEBRAP**, São Paulo, n. 79, p. 47-69, nov. 2007.

VENTANA SYSTEMS. **Ventana Software**, 2015. Disponível em: <<http://vensim.com/vensim-software/#ple>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

