

5<sup>th</sup> International Workshop - Advances in Cleaner Production

São Paulo - Brazil - 22<sup>th</sup> to 24<sup>nd</sup>, May, 2015

**Aporte para a matriz elétrica do Brasil em 2050 - descentralizada,  
mais limpa, eficiente e renovável**

**Douglas Wittmann, Prof. Dr.**

Instituto de Energia e Ambiente – IEE da Universidade de São Paulo – USP

[dwit@usp.br](mailto:dwit@usp.br)

Academic Work

### QUESTÃO

No Brasil, na produção de energia elétrica, há um cenário de agrave, por escassez de energia afluyente na produção hídrica, exigindo maior acionamento térmico.

Para o futuro, usinas predominantemente a fio d'água, que estão sendo inseridas, estarão pronunciando ainda mais essa necessidade.

Por força da estruturação térmica, sobrarão mais emissões de GEEs e consumo de recursos fósseis por unidade de energia elétrica produzida.

- **É possível promover alinhamento da Industria de Energia Elétrica no Brasil com busca de desenvolvimento sustentável para o país? Como?**

### OBJETIVO

- **Apresentar um cenário futuro alternativo, eleito 2050, de fornecimento de energia elétrica, balizado na aceleração do uso das fontes renováveis, premissa postulada como alinhamento à busca de desenvolvimento sustentável para o país.**



### MÉTODOS DO ESTUDO

Na elaboração geral do estudo:

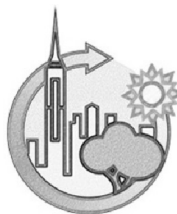
- **Pesquisa; Análise; e Síntese;** a partir da exploração, em caráter **dedutivo**, de dados secundários, com base bibliográfica – livros, documentos, artigos, eventos e entrevistas publicadas;

Na análise e tratamento dos dados levantados:

- **Pensamento e Abordagem Sistêmicos.** O método advem da **Teoria de Sistemas – TS** (MAXIMIANO, 2006). A aplicação de **pensamento sistêmico** trata cada assunto complexo pelo entendimento do mecanismo de inter-relação das diferentes partes que o compoem; e **abordagem sistêmica** trata o assunto fazendo uso das diferentes disciplinas que ao assunto estão relacionadas e necessárias. Aplica-se, aqui, o método, em caráter **dedutivo** na sistematização de dados secundários, e **indutivo** na sistematização de dados próprios obtidos.

No alcance dos objetivos propostos, o método utilizado consiste na aplicação de **cinco indicadores** eleitos durante a investigação (WITTMANN, 2014):

- (1) **Participação das fontes renováveis na Oferta de energia elétrica: Energia renovável / Energia total;**
- (2) **Eficiência na Oferta: Energia útil / Energia total do sistema elétrico;**
- (3) **Perdas técnicas: Energia elétrica consumida / Energia elétrica produzida;**
- (4) **Emissões de GEEs: tCO<sub>2</sub> / Energia elétrica produzida;**
- (5) **Participação da autoprodução, coprodução e geração distribuída / Energia elétrica total produzida.**



### SISTEMATIZAÇÃO DO CONHECIMENTO

#### Cenário presente:

- Dados levantados do **Balço Energético Nacional 2013** (EPE-BEN, 2013).
- A esse balanço são incorporados, a partir de levantamento no **Plano Decenal de Energia de 2022** (EPE-PDE, 2013), acréscimos referentes aos empreendimentos contratados e em implantação, os quais representam acréscimos assumidos até por volta de 2018. Esse acréscimo significa a parte da expansão já definida.

A somatória, da capacidade existente, com a expansão já contratada e em expansão, dá, então, origem à matriz que serve de base de referência para a expansão, a seguir, projetada neste estudo.

**Significa que a expansão, a seguir proposta, não interfere com o sistema existente, nem com o escopo de construção em andamento e o contratado,** referentes ao ano 2012 e com extensão até por volta de 2018.

#### Cenário futuro:

Como base de dados futuros são utilizadas duas Notas Técnicas da Empresa de Pesquisa Energética - EPE:

- **Cenário Econômico** (EPE-CE, 2014) e **Demanda de Energia** (EPE-DE, 2014); dois dos cinco documentos previstos, pela EPE para compor o Plano Nacional de Energia 2050 em definitivo.

-----  
\* A pesquisa se embasou também na análise da bibliografia existente sobre o binômio energia e sustentabilidade – diferentes tipos de documentos elaborados por autores e organizações nacionais e internacionais, em forma de publicações, resoluções, relatórios e eventos. Relação completa em Wittmann, 2014.



**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

**PROSPECÇÃO DE UM CENÁRIO FUTURO MAIS SUSTENTÁVEL – ELEITO 2050**



**BALANÇO DE CARGA****Tabela 1.** Balanço de carga prospectado para o cenário de 2050.

#	Dados fixados	Valor	Unidade	Referência
<b>No lado da demanda</b>				
1	População	<b>2,2635</b>	x 10 <sup>7</sup> habitante	IBGE (2014)
2	Intensidade	<b>7,182</b>	MWh / habitante / ano	EPE-DE (2014)
3	Demanda prevista	<b>1.625,65</b>	TWh / ano	= #1 x #2
<b>No lado da oferta</b>				
4	Oferta necessária	<b>1.625,65</b>	TWh / ano	= #3
5	Perdas técnicas	<b>10</b>	% (de # 4)	Atribuído, a partir de EPE-DE (2014)
6	Ganhos de eficiência	<b>20</b>	% (de # 4)	Atribuído, a partir de EPE-DE (2014)
7	Autoprodução	<b>10</b>	% (de # 4)	Atribuído, a partir de EPE-DE (2014)
8	Oferta prevista	<b>1.300,52</b>	TWh / ano	= #4 + #5 – #6 – #7

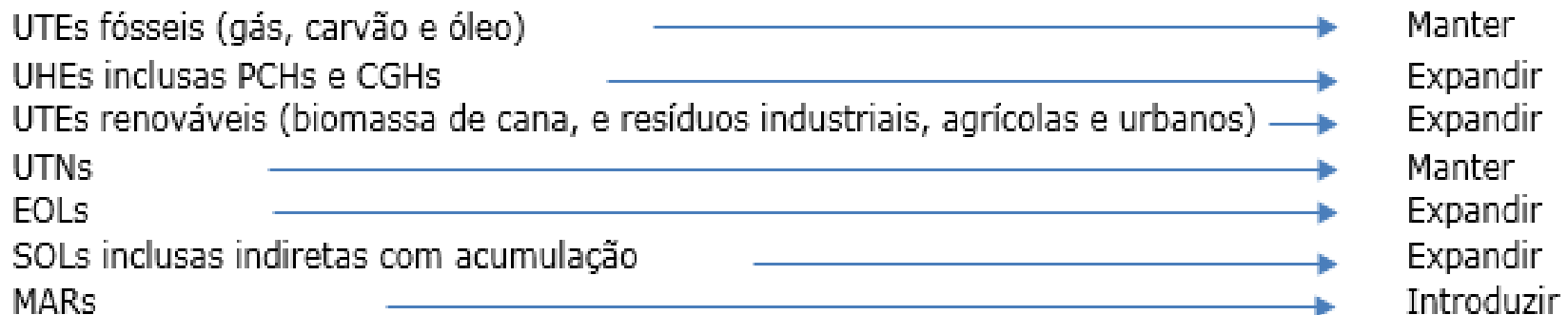
Tem-se da tabela 1 o valor de referência projetado para equilíbrio, em 2050, entre oferta e demanda de energia elétrica, em 1.300,52 TWh.



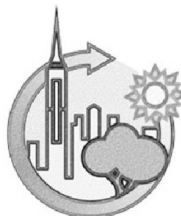
## PROSPECÇÃO DAS FORMAS DE OBTENÇÃO DA OFERTA FRENTE À DEMANDA

A prospecção consiste, conforme Wittmann (2014) em:

- 1) acelerar a participação das fontes renováveis – R;
- 2) obter eficiência termodinâmica por melhoria entre energia útil e energia total do sistema elétrico;
- 3) reduzir perdas técnicas;
- 4) evitar emissões de GEEs; e
- 5) descentralizar a oferta a partir de auto produção, coprodução e geração distribuída.

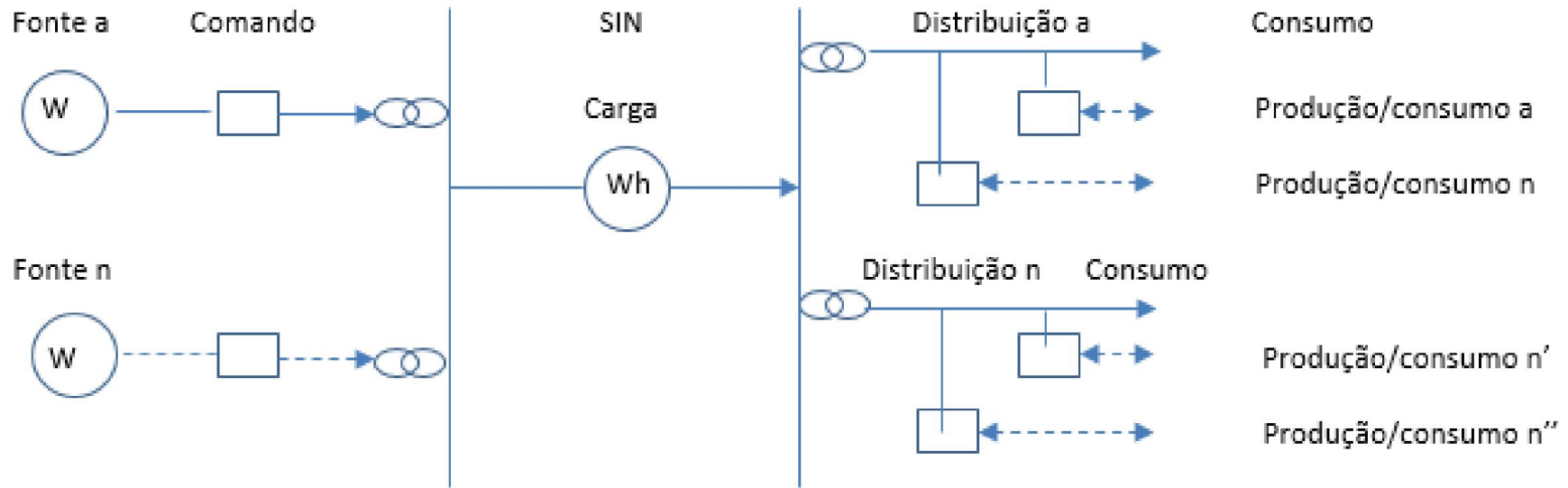


**Figura 1.** Árvore de decisões utilizada no gerenciamento da expansão da oferta.



## LÓGICA OPERACIONAL

Sistema híbrido (hídrico, térmico, eólico, solar e maremotriz), com as UHEs operando em regime regulado pelas demais fontes, com comando tanto em função da sazonalidade anual, como da diária temporal – horários com concentração de maior demanda instantânea:



**Figura 2.** Diagrama unifilar simplificado.





**FATORES DE CAPACIDADE- FCs**

Frente à oferta resultada da tabela 1, faz-se necessário estabelecer os valores de potência instalada – W, que satisfaçam o equilíbrio das cargas – Wh, ilustrado no diagrama da figura 2, o que implica em fixar valores médios de FCs, aplicáveis a cada fonte:

**Tabela 2.** Fatores de capacidade fixados

#	Fonte de produção	Fator de capacidade FC	Referência
1	UHEs	<b>0,55</b>	EPE-BEN (2014)
2	PCHs e CGHs	<b>0,57</b>	EPE-BEN (2014)
3	UTES fósseis (gás, carvão e óleo)	<b>0,14</b>	EPE-BEN (2012)
4	UTES a biomassa (cana de açúcar e resíduos industriais, agrícolas e urbanos)	<b>0,60</b>	Carvalho (2009)
5	UTNs	<b>0,85</b>	EPE-PNE (2007)
6	EOLs existentes até 2013	<b>0,32</b>	EPE-BEN (2014)
7	EOLs futuras	<b>0,47</b>	ONS (2014)
8	SOLs diretas	<b>0,18</b>	EPE-GS (2012)
9	SOLs indiretas (com acumulação)	<b>0,70</b>	Teske et al (2010)
10	MARs	<b>0,20</b>	Calculado



**BASE DE DADOS DE REFERÊNCIA PARA A EXPANSÃO ATÉ 2050**

A somatória, da capacidade existente, com a expansão já contratada e em expansão, dá, então, origem à matriz que serve de base de referência para a expansão projetada neste estudo:

**Tabela 3.** Reunião da base de dados de referência para o projeto da expansão até 2050.

Fonte	Capacidade				
	Instalada			Produção	
	Existente até 31.12. 2012 (MW)	até Adicional contratado e em implantação (MW) (A)	Total resultante até por volta de 2018 (MW)	FC	Produção (TWh / ano)
UHEs (B)	84.833	19.484	<b>104.317</b>	0,55	<b>502,5993</b>
PCHs	4.899	1.056	<b>5.955</b>	0,57	<b>29,7345</b>
UTES fósseis	17.373	3.766	<b>21.139</b>	0,14	<b>25,9249</b>
UTES renováveis	8.617	1.801	<b>10.418</b>	0,60	<b>54,7570</b>
UTNs	2.007	1.405	<b>3.412</b>	0,85	<b>25,4058</b>
EOLs existentes	1.805	-	<b>1.805</b>	0,32	<b>5,0598</b>
EOLs futuras	-	13.059	<b>13.059</b>	0,47	<b>53,7665</b>
SOLs diretas (C)	1,35	0	<b>1,35</b>	0,18	<b>0,0021</b>
SOLs de acumulação	-	0	-	0,70	<b>0</b>
MARs	0	0	<b>0</b>	0,20	<b>0</b>
<b>Total</b>	<b>119.535,35</b>	<b>40.571</b>	<b>160.106,35</b>	<b>0,50 (D)</b>	<b>697,2499</b>



**PROSPECÇÃO DAS FONTES DE OBTENÇÃO DA OFERTA FRENTE À DEMANDA (itens 1 a 8):****Tabela 4.** Repotenciação de usinas hidroelétricas - UHEs, item 1 considerado na expansão.

Quantidade de UHEs	Acréscimo de potência instalada	FC médio	Acréscimo de produção resultante
67 reabilitáveis	3.473,47 (MW)	0,55	16,7352 (TWh / ano)

**Tabela 5.** Expansão de UHEs, item 2 considerado na expansão.

Acréscimo total de potência instalada (MW)	FC médio	Acréscimo total de produção resultante (TWh/ano)
44.984,08	0,55	216,7333

**Tabela 6.** Expansão de pequenas centrais hidroelétricas - PCHs, item 3 considerado na expansão.

Acréscimo total de potência instalada (MW)	FC médio	Acréscimo total de produção resultante (TWh/ano)
6.927	0,57	34,5879

**Usinas termoelétricas – UTEs, fósseis, item 4 a ser considerado na expansão:**

Com vistas ao objetivo de minimização de consumo de reservas fósseis e de emissões de calor e de GEEs, as UTEs movidas por fontes fósseis não são contempladas com expansão neste estudo.



**PROSPECÇÃO... (itens 1 a 8)...****Tabela 7** – Expansão de UTEs renováveis, item 5 considerado na expansão.

Acréscimo total de potência instalada (MW)	FC médio	Acréscimo total de produção resultante (TWh/ano)
36.000	0,60	189,2160

**Usinas termonucleares** – UTNs, item 6 a ser considerado na expansão:

Em razão da polêmica entre estudiosos; dos riscos associados; e dos problemas ainda não resolvidos quanto ao decaimento e ao destino dos rejeitos radiativos; as UTNs não são contempladas com expansão neste estudo.

**Tabela 8** – Expansão de centrais eólicas – EOLs, item 7 a ser considerado na expansão.

Acréscimo total de potência instalada (MW)	FC médio	Acréscimo total de produção resultante (TWh/ano)
28.000	0,47	115,2816



**PROSPECÇÃO... (itens 1 a 8)...****Tabela 9** – Expansão de centrais solares – SOLs, itens 8 e 9 a serem considerados na expansão.

Acréscimo total de potência instalada (MW)	FC médio	Acréscimo total de produção resultante (TWh / ano)
Item 8; SOLs diretas – PFs 98.000	0,18	154,5264
Item 9; SOLs indiretas – PAs 2.800	0,70	17,1696

**Tabela 10** – Expansão de UHEs maremotrizes – MARs, item 10 a ser considerado na expansão:

Acréscimo total de potência instalada (MW)	FC médio	Acréscimo total de produção resultante (TWh / ano)
34	0,20	0,0596



## REUNIÃO DOS DADOS OBTIDOS

O escopo da expansão (tabelas 4 a 10) é reunido e adicionado aos valores existentes, contratados e em construção (tabela 3), resultando na oferta total prospectada:

**Tabela 11** - Somatória da oferta existente, com a expansão prospectada para 2050.

#	Fonte	R/ N	Potência instalada existente (MW)	Acréscimo potência instalada (MW)	Total potência instalada (MW)	Produção existente (TWh)	Acréscimo produção (TWh / ano)	Total oferta de produção (TWh / ano)
1	Repotenciação de UHEs	R	-	3.437,47	<b>3.437,47</b>	-	16,7352	<b>16,7352</b>
2	Expansão de UHEs	R	104.317	44.984,08	<b>149.301,08</b>	502,5993	216,7333	<b>719,3326</b>
3	Expansão de PCHs	R	5.955	6.927	<b>12.882</b>	29,7345	34,5879	<b>64,3224</b>
4	Manutenção de UTEs fósseis	N	21.139	0	<b>21.139</b>	25,9249	0	<b>25,9249</b>
5	Expansão de UTEs renováveis	R	10.418	36.000	<b>46.418</b>	54,7570	189,2160	<b>243,9730</b>
6	Manutenção de UTNs	N	3.412	0	<b>3.412</b>	25,4058	0	<b>25,4058</b>
7	Expansão de EOLs	R	14.864	28.000	<b>42.864</b>	58,8263	115,2816	<b>174,1079</b>
8	Expansão de SOLs Diretas - PFs	R	1,35	98.000	<b>98.001,35</b>	0,0021	154,5264	<b>154,5285</b>
9	Introdução de SOLs Indiretas – PAs	R	-	2.800	<b>2.800</b>	-	17,1696	<b>17,1696</b>
10	Introdução de MARs	R	-	34	<b>34</b>	-	0,0596	<b>0,0596</b>
	Totais		160.106,35	220.182,55	<b>380.288,90</b>	697,2499	744,3096	<b>1.441,5595</b>

## **AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS**

A oferta prospectada (1.441,5595 TWh/ano; tabela 11) atende o valor mínimo necessário à demanda (1.300,52 TWh/ano; tabela 1).

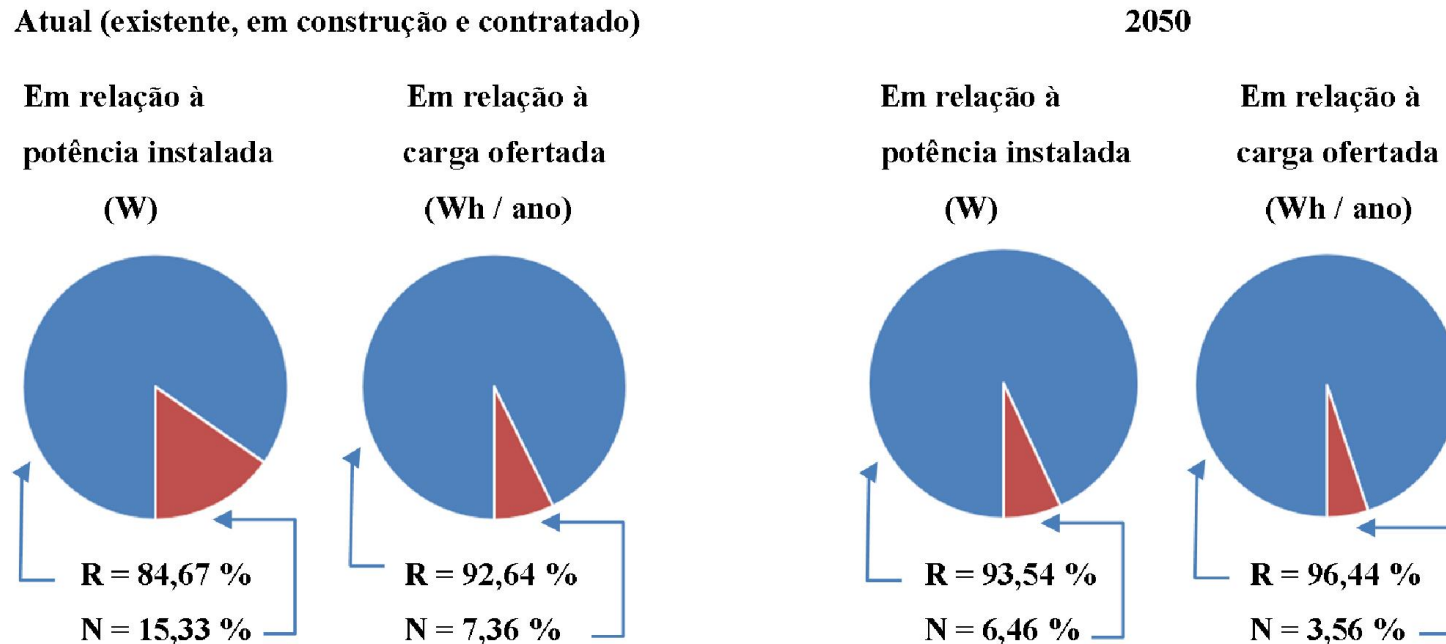
Valores maiores ou menores poderiam ter resultado, em função de diferentes correções de critérios que fossem utilizadas, frente aos adotados na pesquisa.

**O ponto central reside na avaliação de que é possível estabelecer-se uma meta de expansão da oferta de energia elétrica baseada em fontes renováveis e menores emissões de GEEs.**



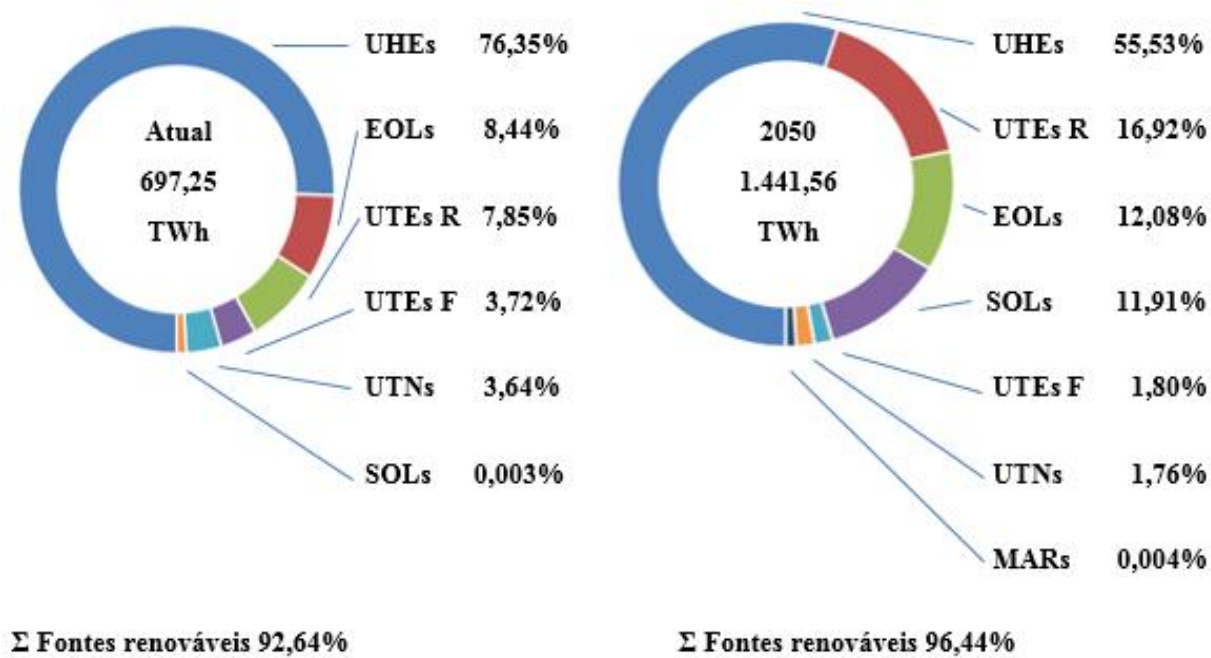
**AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS...**

Relações entre uso de fontes renováveis e não renováveis:

**Figura 3.** Relações percentuais entre o uso de fontes renováveis – R, e não renováveis – N



**AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS...**



**Figura 4.** Comparativo entre a matriz de produção (Wh) atual e de 2050.



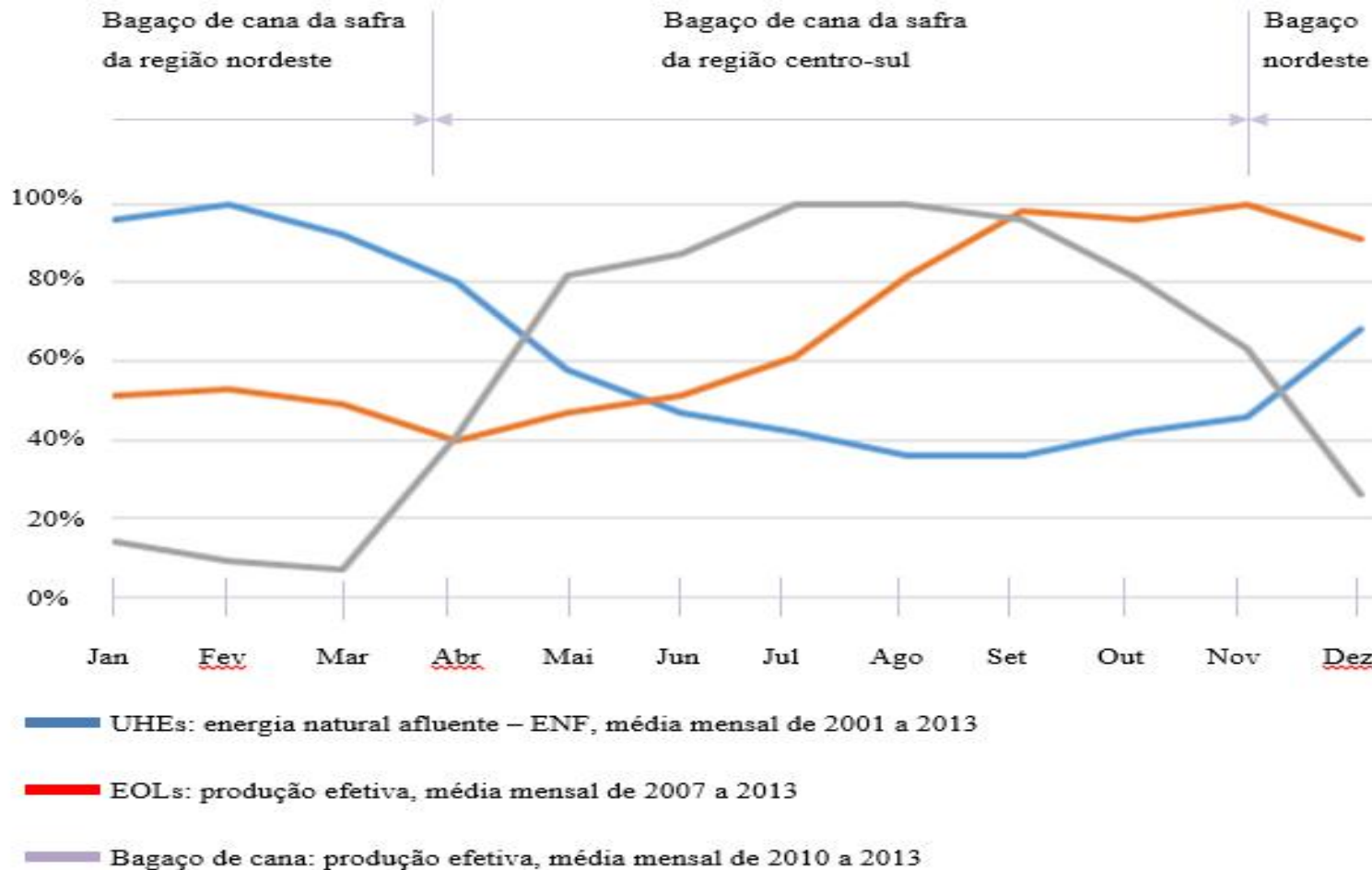
## RELAÇÕES ENTRE CUSTOS

Tabela 12 – Relações entre custos de produção atuais e resultantes em 2050

Fonte	R/N	Custo médio de produção	Matriz de produção atual		Matriz de produção prospectada para 2050	
			Participa// na matriz de produção	Custo médio ponderado resultante	Participa// na matriz de produção	Custo médio ponderado resultante
		(R\$ / MWh)	(%)	(R\$ / MWh)	(%)	(R\$ / MWh)
UHEs	R	118,40	76,35	90,40	55,53	65,75
UTES fósseis	N	245,35	3,72	9,13	1,80	4,42
UTES renováveis	R	101,75	7,85	7,99	16,92	17,22
UTNs	N	138,75	3,64	5,05	1,76	2,44
EOLs	R	137,00	8,44	11,56	12,08	16,55
SOLs	R	137,00	0,003	0,0041	11,91	16,32
MARs	R	118,40	0	0	0,004	0,005
<b>Totais resultantes</b>	-	-	100	<b>124,13</b>	100	<b>122,70</b>

**ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA**

Obtida da complementação sazonal entre afluência de energia natural hídrica, de produção eólica, e de períodos de safras de cana de açúcar:



**Figura 5.** Curvas entre energia afluyente (UHES), produção efetiva de EOLs, e de bagaço de cana.



### CONCLUSÃO

A prospecção, aqui realizada, apresenta possível obter um cenário futuro, 2050, com maiores participações de fontes renováveis, menor participação da fonte hídrica, e menores participações de emissões de gases de efeito estufa e de consumo de óleo combustível.

Sem necessariamente incorrer em aumento nos custos de produção.

Um sistema descentralizado, híbrido, com maior expansão das fontes térmicas renováveis, eólica e solar, maior participação de produção independente – cogeração, autoprodução, e geração distribuída – e menor carga na rede de transmissão, comparativamente ao cenário atual.

Ganho de desenvolvimento, qualidade de vida e saúde para a sociedade.

Mas, para atingir-se o idealizado, esse melhor futuro depende de que estratégias de transição sejam traçadas e implementadas desde agora.



### REFERÊNCIAS CITADAS

CARVALHO, J. F. O Declínio da Era do Petróleo e a Transição da Matriz Energética Brasileira para um Modelo Sustentável. Tese (Doutorado em Energia). Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

EPE-PNE, 2007. Plano Nacional de Energia 2030. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE.

\_\_\_\_\_-GS, 2012. Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira. Empresa de Pesquisa energética. Rio de Janeiro: EPE

\_\_\_\_\_-BEN, 2012. Balanço Energético Nacional 2012: ano base 2011. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE.

\_\_\_\_\_-BEN, 2013. Balanço Energético Nacional 2013: ano base 2012. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE.

\_\_\_\_\_-PDE, 2013. Plano Decenal de Expansão de Energia 2022 / Ministério de Minas e Energia. (PDE) (Relatório Final). Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE.

\_\_\_\_\_-BEN, 2014. Balanço Energético Nacional 2014: ano base 2013. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE.

\_\_\_\_\_-CE, 2014. Cenário Econômico 2050. Rio de Janeiro: EPE.

\_\_\_\_\_-DE, 2014. Demanda de energia 2050. Rio de Janeiro: EPE

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores, População, Economia. 2014. Disponível em <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em 20.04.2014.

MAXIMIANO, A. C. A., 2006. Teoria Geral da Administração: da Revolução Urbana à Revolução Digital. São Paulo: Atlas.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Portal. <[www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)>. Acesso em 21.07.2014.

TESKE, S.; ZERVOS, A.; LINS, C. MUTH, J, 2010. Revolução Energética – a caminho do desenvolvimento limpo. Edição brasileira, Ricardo Baitelo, coordenador. São Caetano do Sul: Pigma, 2010.

WITTMANN, D., 2014. A indústria de energia elétrica no Brasil e o desenvolvimento sustentável: uma proposta para o horizonte 2050 à luz da teoria de sistemas. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo.



**Obrigado!**

**Douglas Wittmann**

**[dwit@usp.br](mailto:dwit@usp.br)**



