Aporte para a Matriz Elétrica do Brasil em 2050 - Descentralizada, mais Limpa, Eficiente e Renovável

WITTMANN, D. [a*]

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

** dwit@usp.br*

Resumo

Há um cenário de agrave na produção de energia elétrica no Brasil, por escassez de energia afluente 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. Um modelo que não se alinha com a busca de desenvolvimento sustentável. O objetivo deste trabalho é 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. É sintetizada tese de doutoramento do autor, esta sistematizada a partir de dados e informações de documentos nacionais e internacionais, e dos planos governamentais de expansão da produção de energia elétrica. A partir do referencial teórico metodológico adotado, os resultados obtidos demonstram que é possível estabelecer um planejamento de longo prazo baseado no uso renovável dos recursos de que o país dispõe, com menores pressões socioambientais, consumos de fósseis, e emissões de gases de efeito estufa, por unidade de energia produzida. São obtidas maiores participações de fontes renováveis com menor participação da fonte hídrica, e menores participações de emissões de gases de efeito estufa e de consumo de óleo combustível. Sem incorrer em aumento nos custos de produção. Resulta 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.

Palavras-chave: *energias renováveis; desenvolvimento sustentável; planejamento energético; eficiência energética; emissões de gases de efeito estufa.*

1. Introdução e Objetivo

Vêm se intensificado, nos últimos anos, os debates globais sobre o aumento da demanda de energia, bem como das formas de obtê-la. O escopo dessas discussões considera as problemáticas das explotações fósseis, das emissões de gases de efeito estufa – GEEs, e das alterações climáticas. Projeções futuras indicam necessidade de transição para um modelo mais sustentável. Estas projeções necessitam considerar as especificidades de cada país e região.

No tocante ao Brasil, e à sua produção de energia elétrica, há um cenário de agrave, por escassez de energia afluente 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.

O objetivo deste trabalho é 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.

2. Métodos e Sistematização

Na análise e tratamento dos dados levantados, são utilizados o Pensamento e Abordagem Sistêmicos. O método advem da Teoria de Sistemas - TS. (MAXIMIANO, 2006). A TS é aplicada nas análises tanto qualitativas como quantitativas dos assuntos tratados. Literalmente, 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.

No alcance do objetivo proposto, o método utilizado consiste na aplicação de cinco indicadores eleitos durante a investigação (Wittmann, 2014) (1 a 5): (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_2 / Energia elétrica produzida; (5) Participação da autoprodução, coprodução e geração distribuída / Energia elétrica total produzida.

Não é projetado um cenário futuro mais provável; e sim prospectado um cenário um futuro idealizado a partir da sistematização de dados no presente existentes.

2.1. Sistematização do conhecimento acumulado

Em 2007, a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, publicou estudo de planejamento energético integrado de longo prazo, o Plano Nacional de Energia - PNE 2030. Ele (EPE-PNE, 2007). O PNE 2030 vem sendo utilizado como referência na edição, de Planos Decenais de Energia – PDEs, em edições anuais. São aqui utilizados dados do PDE 2022. (EPE-PDE, 2013). A EPE vem trabalhando no planejamento de cenário futuro mais longínquo, na elaboração de um Planpo Nacional de Energia para 2050 – PNE 2050. Até a edição deste trabalho não houve a publicação do PNE 2050. De cinco documentos previstos para compor o PNE 2050, duas Notas Técnicas foram publicadas (1 e 2): (1) Cenário Econômico (EPE-CE, 2014); e (2) Demanda de Energia (EPE-DE, 2014). Estas duas Notas Técnicas foram elaboradas por meio de análise do cenário presente, econômico-energético – nacional e internacional, e projetando o futuro por meio da técnica de Cenários Futuros Alternativos. Além de estudos próprios, a EPE baseou-se, também, em dados globais, analíticos, estatísticos e probabilísticos, da *International Energy Agency* – IEA (Agência Internacional de Energia), do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* – IEEE (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos), da Exxon Mobil Corporation, e da Price Water House & Coopers – PWC. Às duas Notas Técnicas da EPE, são aqui promovidas alterações de critérios visando ganho de rendimento e diminuição da carga resultante na rede de energia elétrica, no cenário, aqui, prospectado para 2050.

Também em 2007, o Greenpeace Internacional e o Conselho Europeu de Energia Renovável – EREC, apresentaram estudo de projeção futura, visando uma matriz de energia global mais limpa e renovável. Uma atualização foi apresentada em 2010, com foco no Brasil. Com relação à energia elétrica, o estudo parte do estudo anterior, do cenário presente em 2007 e da projeção futura do PDE 2019, com este projetando um cenário, que o estudo chama de "Referência 2050". Por meio de propostas, é construído um segundo cenário, que o estudo chama de "Revolução Energética 2050". Em 2013, o Greenpeace, o EREC e o Conselho Internacional de Energia Eólica – GWEC, apresentaram uma terceira edição do estudo (TESKE, 2013). O estudo reforça as propostas de aumento de investimento em fontes renováveis. Em 2014, foi apresentada outra atualização dos estudos anteriores – uma síntese com atualização dos dados principais. A esse conjunto é aqui feita uma análise crítica – qualitativa e quantitativa, em subsídio à obtenção do cenário aqui, prospectado para 2050.

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

3. Resultados e Discussão

Para fixação da necessidade de oferta de energia elétrica, em 2050, os dados são apurados na forma de um balanço de carga. Apresenta-se, a seguir, os dados que montam o balanço (1 a 7): (1) População. Dados da projeção da população do Brasil, do IBGE, revisão 2013, apontando 226,35 milhões de habitantes em 2050. Mesma estimativa de valor é utilizada pela EPE (EPE-CE, 2014) em sua projeção, também baseada no IBGE. (2) Intensidade elétrica per capita - IEE. Dados do EPE-DE (2014), baseados em estimativas de desenvolvimento social, econômico e tecnológico do país, tendências de alteração de uso de tipos de energia, e ponderação da participação setorial da economia, elegendo 7,182 MWh / habitante / ano. (3) Demanda resultante = (1) x (2). (4) Oferta mínima necessária = (3). (5) Perdas técnicas. Dados do EPE-DE (2014), baseados em estimativas de redução de perdas por melhorias operacionais apontam 13,7%. As perdas técnicas consolidadas em 2012 pelo EPE-BEN (2013) foram de 15,9%; e em 2013 pelo EPE-BEN (2014) foram de 15,3%. O que indica estimativa, por parte da EPE, com avanço pouco significativo, para o longo período de hoje a 2050, e ainda distantes de médias atuais internacionais consideradas eficientes, em torno de 8%. Por outro lado, a expansão a ser aqui prospectada busca promover descentralização da produção, o que torna os centros de carga mais próximos da produção, ou seja, menores perdas no percurso da transmissão/distribuição. Daí, adota-se, aqui, valor estimado como mais realista, na ordem de 10% da oferta. (6) Ganhos de eficiência. Dados da EPE-DE (2014), baseados em avanços tecnológicos esperados, ponderada a participação setorial da economia, projetam os ganhos com eficiência em 18,3% da demanda para 2050. Dados de Teske et al (2010) indicam um potencial, substancialmente maior, de 415 TWh / ano, a ser obtido com implantação de medidas de otimização da produção de energia elétrica e de seus usos finais. Elege-se, aqui, um valor mais otimista que o da EPE-DE (2014), estimando-o, com zelo de não incorrer em excesso, na ordem de 20%. (7) Autoprodução. Dados do EPE-DE (2014), baseados na estimativa de tendência do setor industrial e ponderação de sua participação setorial na economia, apontam, para 2050, autoprodução de 8% da oferta. Em 2012 e em 2013, a autoprodução representou na ordem de 14% da geração total. Considerando que a expansão a ser aqui prospectada busca promover descentralização da produção, adota-se aqui, valor mais realista, na ordem de 10%. A tabela 1 apresenta o balanço prospectado:

Tabela 1. Balanço de carga prospectado para o cenário de 2050.

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

3.1. Prospecção das Formas de Obtenção da Oferta frente à Demanda

A prospecção consiste, conforme Wittmann (2014), em (1 a 5): 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. Autoprodução, perdas técnicas, e ganhos de eficiência, não são aqui contemplados, para evitar contabilização dupla. Esses componentes já foram contabilizados no balanço de carga obtido na tabela 1. As fontes físicas possíveis de obtenção de energia elétrica, aqui consideradas, para a expansão da produção, na alimentação da rede pública –

SIN e dos sistemas ainda (em 2014) isolados, são listadas na fig. 1 a seguir; as siglas das fontes referenciam: UHE = usina hidroelétrica; PCH = pequena central hidroelétrica; UTE = usina termoelétrica; UTN = usina termonuclear; EOL = central eólica; SOL = central solar; MAR = usina hidroelétrica maremotriz:

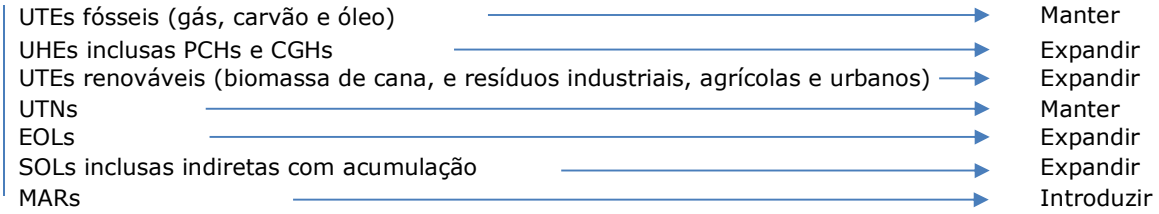


Fig. 2. Árvore de decisões utilizada no gerenciamento da expansão da oferta.

A lógica operacional adotada é de obter um sistema com funcionamento híbrido (hídrico, térmico, eólico, solar e maremotriz), onde as UHEs operem 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. A seguir a fig. 2 ilustra o diagrama unifilar simplificado:

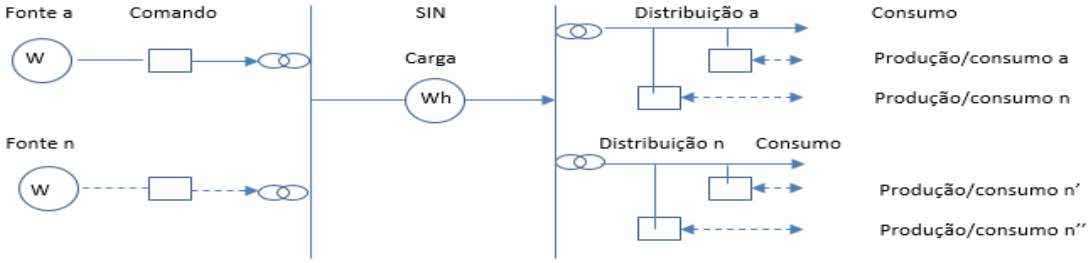


Fig. 3. Diagrama unifilar simplificado.

Para poder estudar as fontes individualmente, faz-se necessário estabelecer, frente à oferta resultada da tabela 1, os valores de potência instalada – W, que satisfaçam o equilíbrio das cargas – Wh, ilustrado no diagrama da fig. 3, o que implica em fixar fatores médios de capacidade – FCs, aplicáveis a cada fonte. Os FCs aqui adotados são médios e foram levantados da literatura, referentes a dados históricos ocorridos. Para as UTEs fósseis utiliza-se relação levantada do EPE-BEN (2012) entre capacidade instalada e energia produzida, no ano de 2011, período anterior à necessidade de aumento de complementação térmica pela anômala diminuição de índices pluviométricos verificada nos anos seguintes. Para a fonte maremotriz é utilizado valor específico para o litoral brasileiro, calculado do projeto da MAR Bacanga. A tabela 2, a seguir, apresenta os FCs fixados.

Tabela 2. Fatores de capacidade fixados.

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

Estabelecidos os FCs médios, por fonte, parte-se para o projeto da capacidade instalada da matriz de produção para 2050. Faz-se uso de dados – de capacidade instalada, levantados do balanço da EPE consolidado em 2012 (EPE-BEN, 2013). Esses dados significam a capacidade instalada fisicamente existente nesse ano. A esse balanço, de 2012, são incorporados, a partir de levantamento no PDE 2022 (EPE-PDE, 2014), 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 que já está 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 aqui projetada. A reunião dessa base de dados é apresentada, a seguir, por meio da tabela 3.

Tabela 3. Base de dados de referência para o projeto da expansão até 2050.

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

Obs.: Geral: dados levantados de EPE-PDE (2013). (A) Os projetos de produção com concessão já outorgada, referentes às UHEs Couto Magalhães (150 MW), Santa Isabel (1.087 MW) e Pai Querê (292 MW), não foram considerados na presente adição, por apresentarem entraves específicos – jurídicos e ou ambientais, passíveis de culminar em seus cancelamentos. (B) Não inclui autoprodução, inclui importação. (C) Inclui 0,35 MW existentes, em 2012, em sistemas isolados, não computados pela EPE.

De posse do balanço de equilíbrio de oferta e demanda, projetado para 2050, apresentado na tabela 1; e de posse da base de dados de referência para o projeto da expansão, apresentada na tabela 3; a seguir dirige-se a atenção em prospectar a expansão do conjunto das fontes de produção.

Lógica do sistema. No lado da demanda, tem-se como variável central a sazonalidade diária temporal – horários de maior demanda instantânea. No lado da oferta, tem-se que a principal fonte, a hídrica, opera com sazonalidade anual, em razão de variação do regime pluviométrico; e as demais fontes operam em regimes sazonais cíclicos, em razão de variações de regime de vento, luz e safra. A lógica operacional, como já citado, é obter um sistema com funcionamento híbrido – hídrico, térmico, eólico, solar e maremotriz – onde a fonte principal – as UHEs – opere interligada em regime regulado com as demais fontes, com comando acionado tanto em função da sazonalidade anual, como da diária temporal.

3.3. Expansão do Conjunto das Fontes de Produção (1 a 8)

(1) Repotenciação de UHEs. Vários pesquisadores têm apresentado estudos propondo repotenciação de UHEs. O assunto tem sido discutido, tanto sobre o tamanho do benefício potencial, como do ponto de vista de resultado sistêmico. Resultados abrangentes, de Bermann (2004), referentes a 34.374,70 MW passíveis de serem retrabalhados por meio de reabilitação em 67 usinas existentes acima de 30 MW e com mais de 20 anos de operação, e estimados em 3.437,47 MW para repotenciação média, passíveis de serem obtidos, são fixados na tabela 4, a seguir, e passam a compor o item 1 da expansão obtida.

Tabela 4. Repotenciação de 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)

(2) Expansão de novas UHEs. Em 1992 a Eletrobrás realizou um levantamento do potencial hidroelétrico no território do país, representando 251.490 MW. Mais recentemente, por meio de levantamentos do Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT, em 243.361 MW, referentes a 2010. Subtraindo deste valor a parcela referente às UHEs e PCHs existentes em operação, construção e contratadas (104.317 + 5.955 = 110.272 MW), obtém-se um potencial disponível de 133.089 MW. Há estudos que apontam que potenciais hidroelétricos não são utilizados em sua totalidade, em razão de fatores restritivos, de caráter socioambiental. Há também, aqui, o objetivo de aliviar a, já citada, pressão socioambiental provocada pela expansão de UHEs. Há estudos apontando que 66,2% do potencial disponível nacional, apresentam algum tipo de restrições socioambientais. Dessa subtração (133.089 MW – 66,2%), resulta um potencial que pode ser considerado sem – ou digam-se menores – restrições, representado por 44.984,08 MW. Esse resultado, representando 33,8% (100 – 66,2) do potencial disponível, é fixado, a seguir, na tabela 5, passando a compor o item 2 da expansão obtida neste estudo.

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

(3) Pequenas Centrais Hidroelétricas - PCHs. O potencial de aproveitamento para PCHs, no Brasil, é informado por EPE-PNE (2008) em 17.500 MW. Deste valor, 5.955 MW já se encontram em operação, contratados e em construção. Resulta daí, a disponibilidade de 11.545 MW. Atribuindo-se a essa disponibilidade uma exploração da ordem de 60%, até 2050, obtém-se o valor de 6.927 MW. Resultado que passa a compor o item 3 da expansão obtida neste estudo e fixado na tabela 6 a seguir.

Tabela 6. Expansão de 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

(4) UTEs fósseis. Entende-se que há casos específicos, como a dependência socioeconômica da exploração de minas de carvão mineral, a exemplo do complexo termoelétrico de Candiota, às populações locais, que sob esse prisma justificam, no presente, a continuidade das operações com uso de carvão. Entende-se também, que em termos do conjunto total do parque termoelétrico existente, cabe ao longo do tempo ampliar a substituição do óleo por gás, apontado como mais eficiente e menos poluente, em regime de fornecimento flexível às usinas; de forma a estas poderem ser despachadas, em complementação, nos espaços de tempo de pico de carga do SIN. Duas questões atuais, frente a essa ampliação, são, na operação de UTEs a gás, a necessidade de água na operação, e a melhoria da cadeia logística do gás. 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 aqui contempladas com expansão.

(5) UTEs renováveis. São aqui consideradas as centrais a biomassa de cana, resíduos agrícolas, industriais e urbanos. O potencial, em cenário presente, de biomassa aproveitável para produção de energia elétrica, do país é estimado na ordem de 28.000 MW (Teske et al, 2010). Adicionando-se a esse montante, valores referentes às expectativas de crescimento da economia e da exploração dos resíduos urbanos, ter-se-ia um valor possivelmente da ordem do triplo, do atual, em cenário de 2050. Fazendo uso de uma projeção não tão otimista, utiliza-se aqui um potencial de 36.000 MW para o ano 2050, valor que é fixado a seguir na tabela 7 e que passa a compor o item 5 da expansão obtida neste estudo.

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

(6) UTNs. As vantagens, desvantagens, riscos associados - este o aspecto principal a considerar, e também problemas ainda não resolvidos quanto ao decaimento e ao destino dos resíduos radiativos das UTNs, são entendidas como questões que não se restringem aos graus de segurança na operação, mas sim às consequências de possíveis acidentes, estas, incomensuráveis, em termos de previsões. Pelo exposto, as UTNs não são contempladas com expansão neste estudo. Não se trata de assumir posição contrária à tecnologia termonuclear; trata-se de pelo princípio da precaução, reservar a expansão dessa tecnologia para um futuro no qual as atuais questões estejam melhor solvidas.

(7) Expansão de EOLs. Em 2001, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL realizou estudo do potencial eólico brasileiro, estimando-o em 143.400 MW. Estudos mais recentes, realizados pela EPE, apontam para um montante superior a 280.000 MW (CARVALHO; SAUER, 2012). Valor mais aproximado foi obtido[1] como representando 285.760 MW. O World Energy Council – WEC estima que, em 2050, a capacidade instalada de produção de energia elétrica, a parir de EOLs, será de 1.854 GW (WEC, 2013). Traçando a relação percentual entre a capacidade instalada atual do Brasil frente ao mundo, tem-se 2,2184% (Brasil 112,4 GW, mundo 5.066,8 GW, em 2010 (EPE-AE, 2013)). De ambas estimativas obtém-se que se o Brasil se situasse no mesmo patamar relativo mundial, teria 41,1291 GW, de potência a partir de EOLs, instalados. Fazendo uso dessa premissa, atribui-se para o potencial nacional obtido disponível (285.760 MW), expansão com utilização na ordem de 15% para o cenário de 2050, o que vem representar 42.864 MW de capacidade instalada. Subtraindo desse montante, os 1.805 MW existentes instalados, e os 13.059 MW em construção e contratados, obtém-se 28.000 MW para a expansão da fonte eólica. Este valor é fixado tabela 8, a seguir, passando a compor o item 7 da expansão.

Tabela 8. Expansão de EOLs, item 7 considerado na expansão.

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

(8) SOLs. O Brasil apresenta índices de irradiação solar, entre 1.500 a 2.500 kWh / ano; e área de 8,5 milhões de km^2. A WEC estima, a nível mundial, a expansão da fonte solar, entre 2010 e 2050, em gigantesca ordem de 22.000% (de 34 TWh / ano em 2010; para 7.741 TWh / ano em 2050 (WEC, 2013)). Utilizando a relação percentual entre a capacidade instalada atual do Brasil frente ao mundo, levantada em 2,2184%, obtém-se para a expansão solar no Brasil, em mesmo progresso que o cenário internacional, o valor de 171,7 TWh / ano. Considerando que 10% dessa expansão seja representada por centrais indiretas (painéis de acumulação, estes ainda não praticados em nosso país, mas com tecnologia desenvolvida internacionalmente e resultados de FC mais eficientes, resulta-se no valor de 98.000 MW para centrais diretas, e 2.800 MW para centrais indiretas. Esses resultados são fixados na tabela 9, a seguir, passando a compor os itens 8 e 9 da expansão obtida neste estudo.

Tabela 9. Expansão de SOLs, itens 8 e 9 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

(9) MARs. Um projeto pioneiro – usina hidroelétrica maremotriz de Bacanga, no Maranhão, teve obras interrompidas em 1973, por razões não apuradas. Dimensionava duas alternativas de motorização, a mais viável representando 34,02 MW de potência instalada e produção de 59.600 MWh / ano, de acordo com diferentes fontes consultadas, não oficiais mas confrontadas entre si, valores que conduzem a um FC, aqui, calculado em 0,2. Os valores referentes a Bacanga, por falta de outros

[1] Informações obtidas no IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético – CBPE. Florianópolis, 2014.

melhores, passam a compor o item 10 da expansão a ser obtida neste estudo, fixados na tabela 10 a seguir.

Tabela 10. MAR, item 10 considerado na expansão.

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

3.4. Reunião dos Dados Obtidos

O escopo da expansão, apurada nas tabelas 4 a 10, é a seguir reunido e adicionado aos valores existentes, contratados e em construção (tabela 3. Base de dados de referência para o projeto da expansão até 2050), resultando na oferta total prospectada, apresentada na tabela 11 a seguir.

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 produção (TWh/ano)
1	Repotenciação de UHEs	R	-	3.437,47	3.437,47	-	16,7352	16,7352
2	Expansão de UHEs	R	104.317	44.984,08	149.301,08	502,5993	216,7333	719,3326
3	Expansão de PCHs	R	5.955	6.927	12.882	29,7345	34,5879	64,3224
4	UTEs Fósseis	N	21.139	0	21.139	25,9249	0	25,9249
5	Expansão de UTEs Ren.	R	10.418	36.000	46.418	54,7570	189,2160	243,9730
6	UTNs	N	3.412	0	3.412	25,4058	0	25,4058
7	Expansão de EOLs	R	14.864	28.000	42.864	58,8263	115,2816	174,1079
8	Expansão de SOLs Dir.	R	1,35	98.000	98.001,35	0,0021	154,5264	154,5285
9	Introdução de SOLs Ind.	R	-	2.800	2.800	-	17,1696	17,1696
10	Introdução de MARs	R	-	34	34	-	0,0596	0,0596
	Totais		160.106,35	220.182,55	380.288,90	697,2499	744,3096	1.441,5595

3.5. Avaliação dos Resultados

Verifica-se que a oferta prospectada (1.441,5595 TWh/ano; tabela 12) atende o valor mínimo necessário à demanda (1.300,52 TWh/ano; tabela 1). 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. A seguir a fig. 3 apresenta o comparativo obtido da redução dos percentuais ente uso de fontes renováveis – R, e não renováveis – N, atuais e futuros; e a fig. 4 apresenta o comparativo obtido por fonte de composição da matriz de produção.

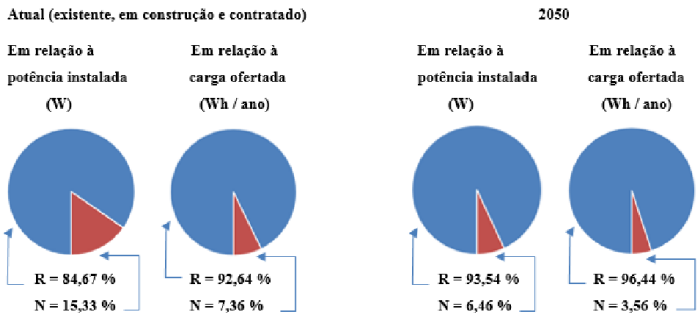


Fig. 3. Relações percentuais entre o uso de fontes renováveis – R, e não renováveis – N

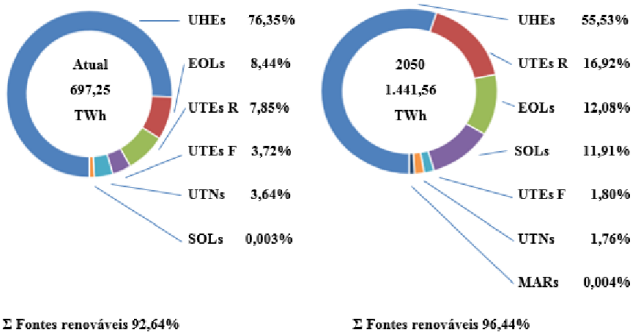


Fig. 4. Comparativo entre a matriz de produção (Wh) atual e de 2050.

As figs. 3 e 4 permitem observar ganho de renováveis – R em ambas comparações, atingindo-se, em 2050, participação de 93,54 % de R em relação à potência instalada (W), e 96,44 % em relação à carga ofertada (Wh).

Redução relativa de emissões de GEEs. A partir dos dados tabulados obtidos, a não expansão relativa das UTEs fósseis (relação atual de 3,7182 % reduzida para 1,7984 %) resulta em uma massa anual da ordem *de* 24,9 milhões de toneladas de CE evitadas de se emitir à atmosfera no ano (0,9 x 27,6749 x 10^8 / 1.000), no ano base 2050.

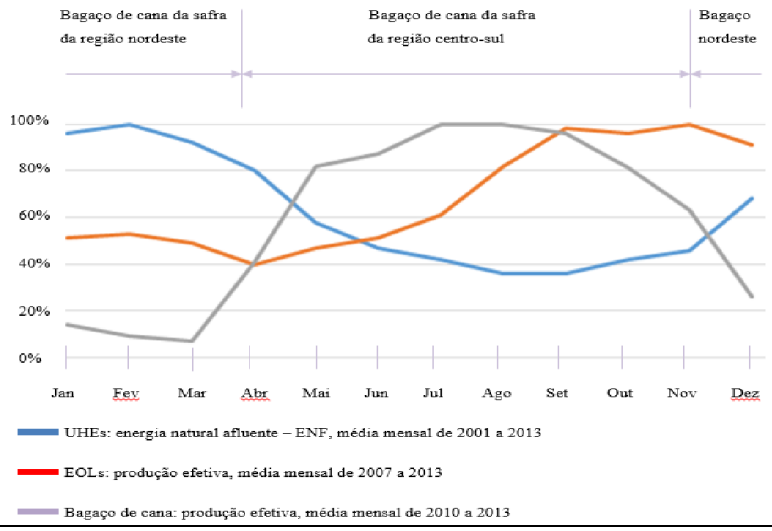
Redução relativa de consumo de fósseis. Por outro lado, resulta dessa não expansão de UTEs um volume da ordem de 2,5 milhões de m^3 de óleo combustível evitados do consumo (0,38 x 0,23876 x 27,6749 x 10^5), equivalentes a 237.961 toneladas equivalentes de petróleo – TEPs (27,6749 / 11,63 x 10^{-6}) no ano base 2050. Montante anual que para o planejamento integrado dos recursos energéticos do país, por inteiro, passaria a estar disponível para aplicação no suprimento de outros segmentos.

Custos de produção. A tabela 12, a seguir, apresenta comparativo de resultados, indicando que é possível prospectar uma matriz elétrica futura calcada na não ampliação das fontes fósseis e das fontes potencialmente emissoras de GEEs, sem se incorrer em aumentos nos custos de produção (R$ 124,13 / MWh médio ponderado em 2014; contra R$ 122,70 / MWh para o cenário base 2050).

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

Fonte	R/N	Custo médio produção	Matriz de produção atual		Matriz de produção prospectada para 2050	
		(R$ / MWh)	Participa// na matriz de produção (%)	Custo médio ponderado resultante (R$ / MWh)	Participa// na matriz de produção (%)	Custo médio ponderado resultante (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
Totais	-	-	100	124,13	100	122,70

Estruturação do sistema. A fig. 5, a seguir, apresenta a estruturação 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 afluente (UHES), produção efetiva de EOLs, e de bagaço de cana.

4. 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 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

BERMANN, C., 2004. A Repotenciação de Usinas Hidrelétricas como Alternativa para o Aumento da Oferta de Energia no Brasil com Proteção Ambiental. Veiga, J. R. C.; Rocha, G. S. consultores. Bermann, C. coordenador. WWF-Brasil: São Paulo.

_____. J.; SAUER, I. L., 2012. Um sistema interligado hidroeólico para o Brasil. Valor Econômico, 01.11.2012. < //professorildosauer.wordpress.com/2012/11/04/um-sistema-interligado-hidroeolico-para-o-brasil-joaquim-f-de-carvalho-e-ildo-l-sauer/ >. Acesso em 04.03.2013.

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

_____-PDE, 2011. Plano Decenal de Expansão de Energia 2020 / Ministério de Minas e Energia. (PDE) (Relatório Final). Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE.

_____ -BEN, 2012. Balanço Energético Nacional 2012: ano base 2011. 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.

_____-PDE, 2014. Plano Decenal de Expansão de Energia 2023 / Ministério de Minas e Energia. (PDE) (Relatório Final). Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE.

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

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

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>. 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.

WEC- World Energy Council, 2013. Les Scénarios Mondiaux de l'Énergie à l'horizon 2050 - Mise en musique des futurs de l'énergie. Paris: Conseil Français de l'Énergie.

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.