

Complementaridade entre Fontes Renováveis para Diversificação da Matriz Energética Mineira

Wilson pereira Barbosa Filho

Fundação Estadual do Meio Ambiente – Brasil
Universidade Federal de Minas Gerais – Brasil
wilson.filho@meioambiente.mg.gov.br

Lívia Maria Leite da Silva

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Brasil
livia.silva@meioambiente.mg.gov.br

ABSTRACT

This work has as scope an evaluation of the potential of complementarity between solar photovoltaic, wind and hydraulic sources in regions where there are already plants of the latter type - small hydroelectric plants (SHPs) and Hydroelectric power plants (HPPs) - in operation in the state of Minas Gerais. The main objective is to make an assessment of the localities that have hydroelectric plants in operation and whose available solar and wind potential allow the installation of power plants based on these sources, aiming at the seasonal stabilization of supply. There was a greater potential for complementarity between SHPs, which, due to their lower installed capacity, are better suited to wind and solar sources, which are less energetic.

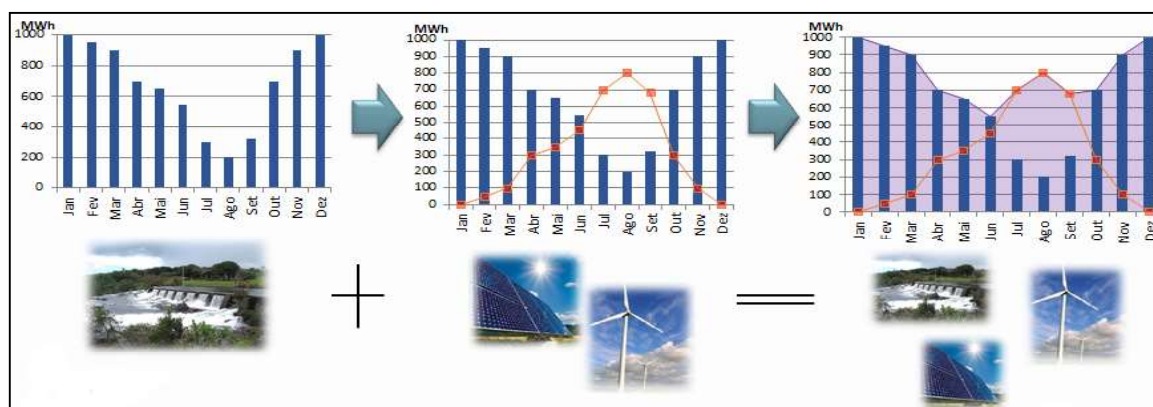
Keywords: Energy security; Matrix Diversification; Energy Complementarity; Renewable energy

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) está evoluindo de uma base hidroelétrica, com parque gerador térmico operando como reserva, para um sistema hidrotérmico, onde o parque térmico terá que despachar na base, durante não somente o período seco, mas durante situações emergenciais, como a de escassez de chuvas. As consequências advindas desse quadro não são somente econômicas - por efeito do mais elevado custo de despacho das térmicas - mas também ambientais, devido ao maior caráter poluidor desta última fonte. Assim, é importante prover mecanismos capazes de garantir o aumento da segurança energética com os menores impactos ambientais associados possíveis. A segurança energética se refere à segurança do abastecimento da energia necessária ao desenvolvimento econômico e ao bem-estar de um país ou região. É importante ressaltar que problemas no abastecimento energético afetam não apenas a população de um país através da restrição no uso de energia, mas também implicam em perdas para os diversos setores da economia responsáveis por manter o crescimento e o desenvolvimento econômico. Eficiência energética e garantia de acesso aos suprimentos energéticos são dois pilares da segurança energética que se traduzem nas preocupações quanto à matriz energética de cada país, os tipos de fontes e formas de energia. A garantia de acesso aos suprimentos energéticos está ligada a matriz energética, que diz respeito ao conjunto e modo como são utilizados os recursos energéticos de dada sociedade, na qual são consideradas desde as fontes de energia, primária ou secundária, o tipo de tecnologia usada na geração de energia, assim como as

preocupações quanto ao consumo. A eficiência baseia-se em utilizar tecnologias mais modernas que permitam reduzir o consumo de combustíveis fósseis, ao passo que o correspondente energético gerado por esses combustíveis não fosse alterado, ou seja, a diminuição do consumo de combustíveis fósseis se daria no consumo de energia final, sem que a energia útil fosse alterada. Neste sentido, surge como alternativa a diversificação da matriz por meio da inserção de novas fontes de energia renovável. Um sistema energético que utiliza dois ou mais tipos diferentes de fontes renováveis é chamado Sistema de Energia Renovável Híbrido (YLMAZ e SELIM, 2013). Tais sistemas utilizam as fontes de forma integrada, provendo um suprimento mais econômico e ambientalmente adequado do que os sistemas que utilizam uma única. Sistemas de energia híbridos podem operar interligados ao sistema elétrico tanto para garantir uma demanda estipulada quanto para, ocasionalmente, alimentar a rede com qualquer excedente de energia. Neste contexto, este trabalho realiza uma avaliação do potencial de complementaridade entre as fontes solar fotovoltaica, eólica e hidráulica em regiões onde já existem usinas deste último tipo – Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e Usinas Hidrelétricas de Energia (UHEs) - em operação, no estado de Minas Gerais. O objetivo principal é fazer uma avaliação das localidades que possuem usinas hidráulicas em funcionamento e cujos potenciais solar e eólico disponíveis permitam a instalação de usinas baseadas nestas fontes, visando à estabilização sazonal da oferta. Na figura 1 ilustra-se a complementaridade hidro, eólico e solar.

Figura 1: Complementaridade hidro, eólico e solar



Fonte: FEAM, 2017

2. ESTADO DA ARTE

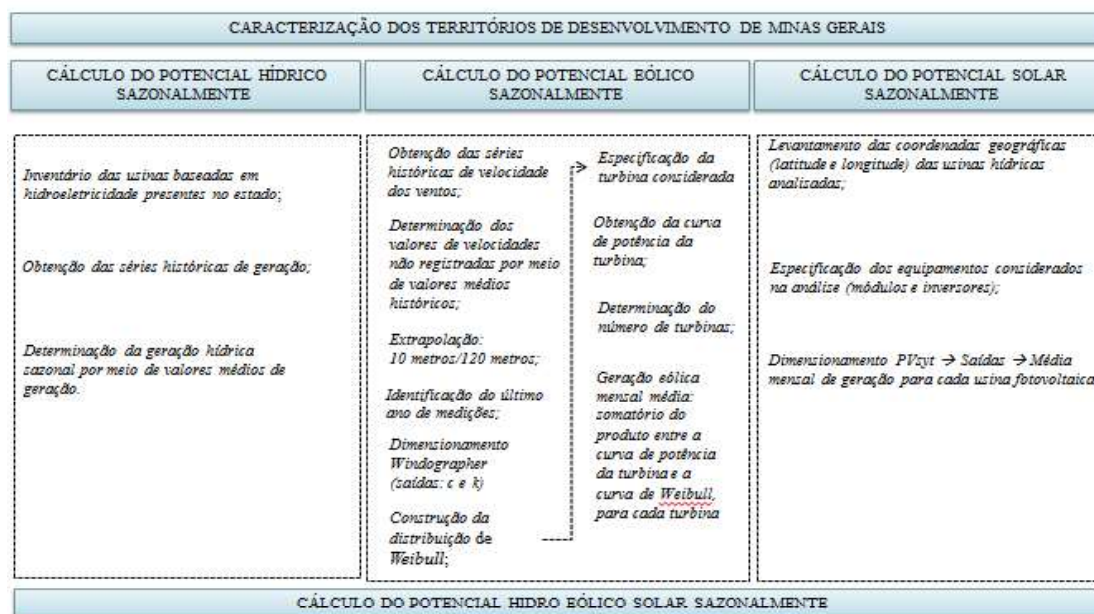
O Estado de Minas Gerais localiza-se na região sudeste do Brasil, possui 853 municípios, um total de 665 empreendimentos de geração elétrica em operação, gerando 15.648.090 kW de potência (ANEEL, 2015). Minas Gerais é dividido em 17 Territórios de Desenvolvimento. O potencial eólico de Minas Gerais é de 10,6 GW, 24,7 GW e 39,0 GW, nas alturas de 50m, 75m e 100m, respectivamente (CEMIG, 2010). A maior capacidade de geração encontra-se em áreas pertencentes do Triângulo Mineiro e da Serra do Espinhaço. Contudo, devido ao fato de estar relacionado à ocorrência de fenômenos naturais, o recurso eólico é variável e a capacidade de geração também. Portanto, para determinar-se a produção anual de energia, deve-se analisar uma distribuição probabilística que possa representar, da maneira mais fiel possível, o comportamento do regime de ventos numa região. No caso da fonte solar, em Minas Gerais, a radiação solar global diária média anual varia de 4,5 a 6,5 kWh/m², onde os valores máximos ocorrem na região Norte de Minas Gerais e os mínimos na região

Sudeste, onde se encontram as áreas de maior altitude (Serra do Caparaó e Mantiqueira) (CEMIG, 2012). Logo, tendo em vista essa disponibilidade, a utilização conjunta dessas fontes em sistemas híbridos pode ser capaz de representar uma estratégia potencialmente eficaz em termos de aumento da confiabilidade do sistema.

3 METODOLOGIA

O presente estudo iniciou-se com o cálculo dos potenciais das fontes envolvidas, que foram determinados mediante metodologias específicas. A determinação do potencial hídrico partiu do inventário de todas as usinas baseadas em hidroeletricidade e de sua localização dentro do contexto dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais. Atualmente existem 267 usinas deste tipo, sendo 126 CGHs, 97 PCHs, 44 UHEs (ANEEL, 2015). Primeiramente, optou-se por desconsiderar as Centrais Geradoras hidrelétricas (CGHs) neste estudo, visando à diminuição do volume de dados. Em seguida, realizou-se o levantamento das séries históricas de geração das usinas junto aos órgãos competentes como Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e também mediante contato com proprietários. Algumas usinas não possuíam registros de sua geração, portanto, também precisaram ser excluídas da análise. No total, as simulações foram realizadas para 119 usinas. O valor do potencial hídrico foi considerado como sendo a média mensal dos valores medidos nas séries históricas. Para cálculo das gerações solar fotovoltaica e eólica, adotou-se a premissa, para a complementaridade ou repotencialização, de que a potência destas usinas corresponderia a 100% da potência da hidroelétrica analisada. A metodologia utilizada neste estudo possui as etapas gerais descritas pela Figura 2.

Figura 2: Diagrama Metodológico



Fonte: FEAM, 2016

Para a estimativa do potencial de geração garantido pela energia solar fotovoltaica, realizou-se o dimensionamento das usinas solares por meio do software *PVsyst Photovoltaic* (PPS, 2015). Esse software possui um banco de dados de radiação solar do *Meteonorm 6.1*. Foram fornecidas como

entradas as latitudes e longitudes das hidrelétricas analisadas e a potência definida a partir da premissa já citada. Os equipamentos escolhidos para simulação foram os módulos policristalinos da *Kyocera*, e os inversores da *GE Power Conversion* e da *Power Electronics*. Realizadas as simulações obteve-se, a partir do software, uma média mensal de geração de energia elétrica para cada usina fotovoltaica. Para cálculo da geração eólica, utilizaram-se dados de velocidade de vento registrados pelas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas nas proximidades das usinas hidrelétricas analisadas. Os dados obtidos apresentam as medições realizadas diariamente e a cada hora do dia, nos últimos oito anos – podendo apresentar algumas variações neste período de acordo com a estação. Tais dados necessitaram passar por um pré-tratamento devido às seguintes particularidades: ocorrência de valores não medidos de velocidade de vento e medições realizadas a 10 metros de altura, onde não se realiza aproveitamento energético para os sistemas considerados. A distribuição de *Weibull*, $f(v)$, dada pela equação 1 é classificada como a mais adequada para descrever o regime dos ventos de um local e representar as frequências mensais de sua velocidade (SANSIGOLO, 2005).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Onde:

- v é a velocidade do vento registrada em m/s; c é o fator de escala em m/s; e k é o fator de forma (adimensional).

Uma vez que a distribuição de frequências de velocidade do vento tenha sido estipulada, pode-se calcular a produção anual de energia de acordo com a curva de potência da turbina eólica considerada. Desta forma, primeiramente, realizou-se a substituição dos valores não medidos pela média entre os valores medidos no mesmo dia e na mesma hora, durante todos os anos da série histórica, desconsiderando valores iguais a zero. Em seguida, realizou-se uma extrapolação das velocidades de vento para uma altura adequada ao aproveitamento energético, no caso, de 120 metros. Para o cálculo da velocidade do vento para uma altura de 120 metros, utilizou-se a Lei da Potência ou Lei de Hellmann, dada pela equação 2 (GUARTIERI e SECCI, 2012). Dentre as várias metodologias existentes, é a mais utilizada para estudos de caráter mais abrangente, sendo caracterizada por uma expressão simples capaz de fornecer resultados satisfatórios (BANÑUELOS-RUEDAS, ANGELES-CAMACHO, RIOS-MARCUELLO, 2010):

$$V_z = V_r \cdot \left(\frac{z}{z_r}\right)^n \quad (1)$$

Onde:

- V_z é a velocidade para a altura z ; z é a altura a ser extrapolada; V_r é a velocidade medida na altura de referência; z_r é a altura de referência; n é o coeficiente de rugosidade do solo (SANSIGOLO, 2005).

Considerou-se um coeficiente de rugosidade do solo igual a 0,19 (classe de rugosidade média). Utilizou-se o software *Windographer*® (2015) para tratamento dos dados de velocidade do vento. Este

software fornece como saídas os parâmetros k e c (mensais) relacionados à distribuição de *Weibull*. De posse de tais valores é possível construir a distribuição de frequências conforme a equação 1, que expressa a probabilidade de ocorrência de cada valor de velocidade de vento. O próximo passo é dado pela especificação dos equipamentos considerados na análise e pelo levantamento da curva de potência da turbina utilizada. A turbina escolhida para simulação foi a E115 da Enercon, com o diâmetro do rotor de 110 metros e potência nominal de 3.050 W. Para o cálculo do número de turbinas necessário em cada usina eólica utilizou-se a equação 3.

$$N_{TURB} = \frac{P_{INST}}{P_{NE115}} \quad (2)$$

Onde:

- N_{TURB} é o número de turbinas necessário; P_{INST} é a potência instalada da usina eólica; P_{NE115} é a potência nominal da turbina *E115*.

Finalmente, calcula-se a geração mensal de energia eólica por meio do cruzamento entre a curva de potência da turbina e a distribuição de *Weibull* gerada para cada localidade. Utilizou-se a equação 4.

$$G_{ME} = [\sum(W(v) \cdot P(v))] \times 720 \times n \quad (3)$$

Onde:

- G_{ME} é a geração média mensal de energia; v é a velocidade do vento em m/s; $W(v)$ é a distribuição de *Weibull* para cada velocidade do vento; $P(v)$ é a potência gerada pela turbina para cada velocidade do vento; 720 é o número de horas consideradas no mês; n é o número de turbinas (VIAJANTE, CAMACHO e ANDRADE, 2014).

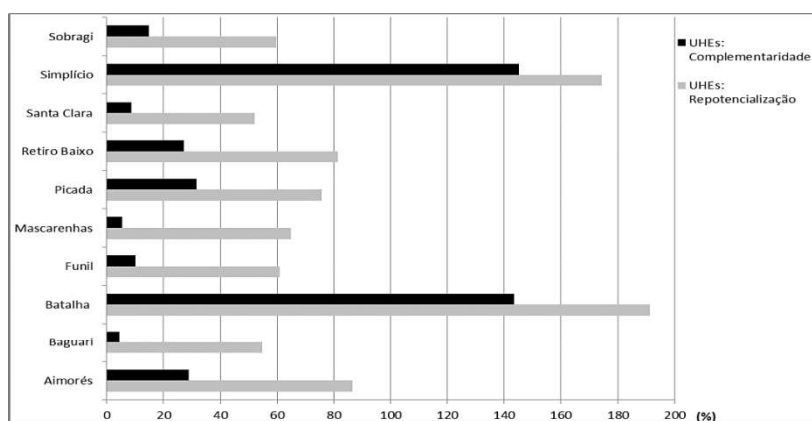
Após a determinação dos potenciais, os resultados foram traçados e comparados graficamente para cada usina. Considerou-se que a fonte híbrida complementa a geração, quando, nos meses em que a geração da fonte principal (hídrica) encontra-se com valor abaixo da média, a fonte híbrida for capaz de garantir a geração, impedindo o máximo possível que a energia firme diminua. Nos casos em que não se verifica a complementaridade conforme exposto, verifica-se a repotencialização das usinas, que corresponde a um acréscimo na energia gerada. Considerou-se que a repotencialização de cada usina é dada pela parcela em valor percentual que a energia gerada pela fonte híbrida – a área abaixo da curva de geração desta fonte – representa com relação à energia gerada pela fonte hídrica. Já a complementaridade é dada pelo produto entre a repotencialização e a razão entre os meses em que se verificou complementaridade e o total de meses do ano.

3 RESULTADOS

As simulações foram realizadas para todas as usinas do tipo UHE e PCH de Minas Gerais, cujos dados históricos de geração puderam ser levantados. No total, foram avaliadas 119 usinas, sendo que, destas, 41 são UHEs e 78 são PCHs. Os resultados mostram que, dentre as UHEs, 10 usinas, cerca de 24,39%, apresentaram valor de complementaridade acima de zero. No caso das PCHs, este número foi

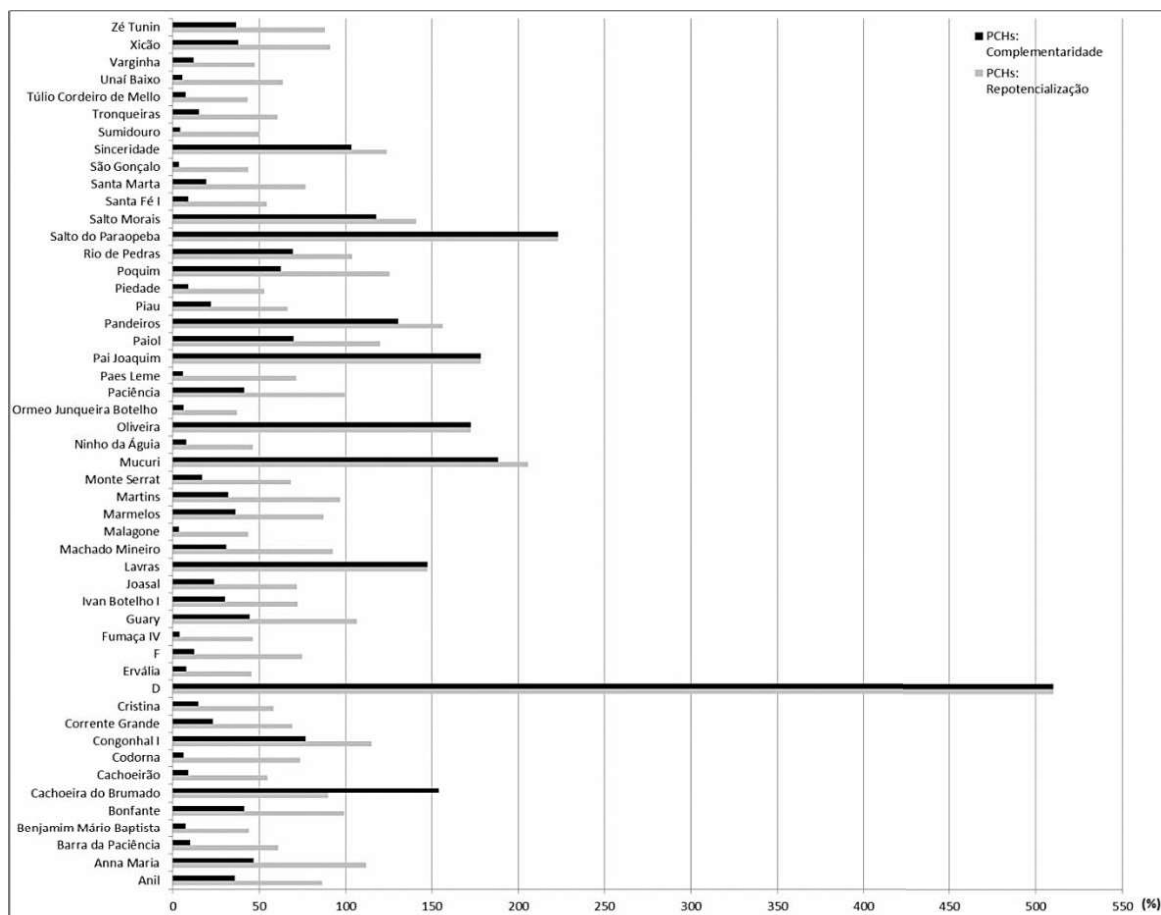
igual a 50, cerca de 64,10%. Desta forma, do total de usinas avaliadas, 60 delas, ou seja, cerca de 50,42% do total, apresentaram valor de complementaridade diferente de zero. As usinas que apresentaram potencial de complementaridade são apresentadas nas Figura 3 e 4, para UHEs e PCHs, respectivamente.

Figura 3: Complementaridade e repotencialização – Resultados UHEs



Fonte: FEAM, 2016

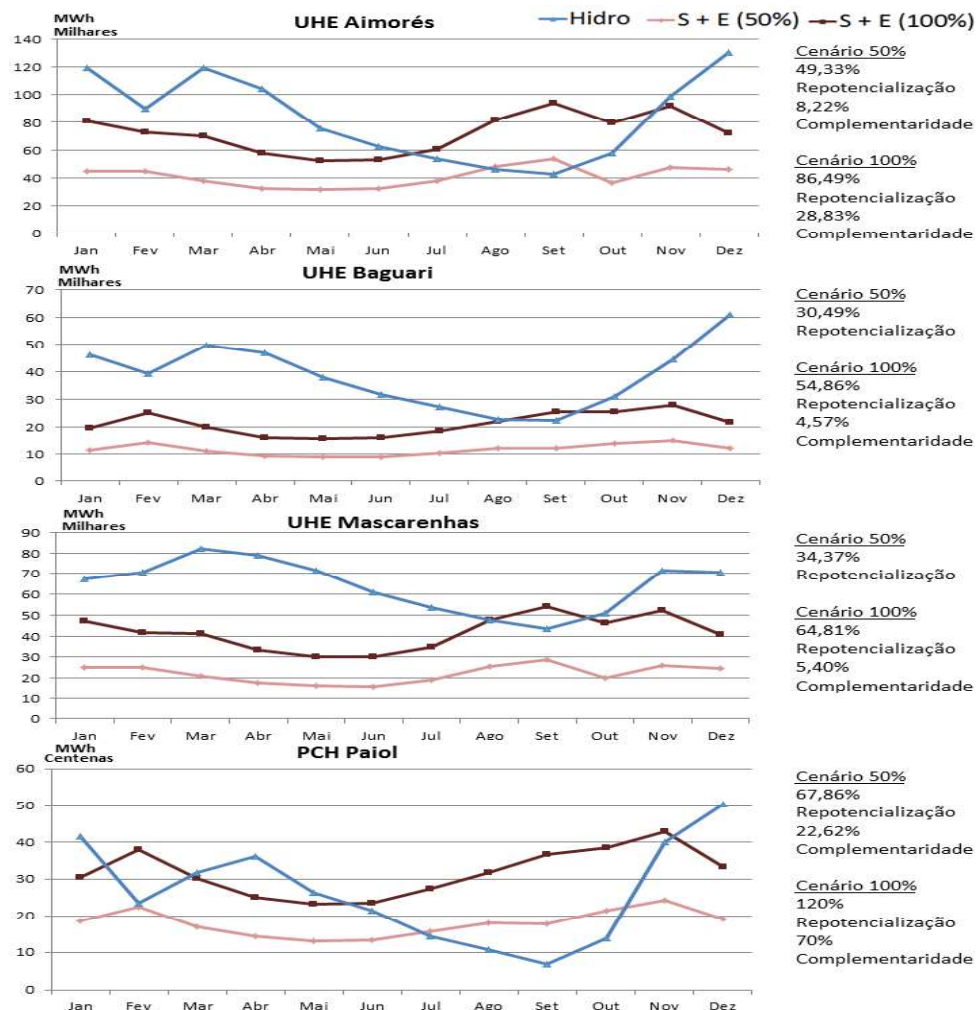
Figura 4: Complementaridade e repotencialização – Resultados PCHs

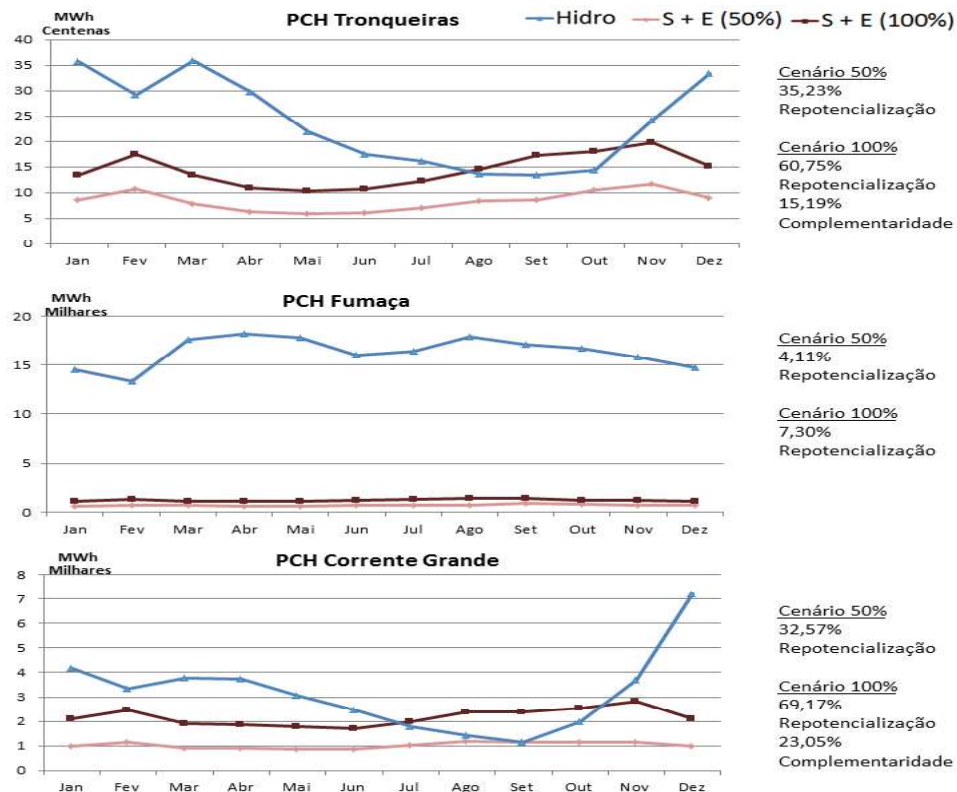


Fonte: FEAM, 2016

Observa-se que o maior número de usinas que apresentaram complementaridade em seu perfil de geração foram as PCHs, em detrimento das UHEs. A predominância de usinas do primeiro tipo aponta para o fato de que as fontes renováveis, por possuírem menor densidade energética em comparação às fontes tradicionalmente utilizadas na geração centralizada - notadamente hidroeletricidade e combustíveis fósseis – são mais compatíveis com as PCHs, devido às suas menores potências instaladas, da ordem de 3 a 30 MW. Observa-se também que existe um acréscimo significativo no que diz respeito à potência gerada pelas usinas, ou seja, sua repotencialização. Em muitos casos, não se observa ganho expressivo no que diz respeito à complementaridade (conforme definição adotada neste trabalho), contudo os ganhos em termos de aumento de potência gerada são expressivos. Na Figura 5 são apresentados os resultados das usinas analisadas no território do Vale do Rio Doce. Para efeito desse estudo, as usinas eólicas e solares devem ser implantadas no entorno das usinas, com as seguintes localizações: UHE Aimorés (19°29'53,966"S; 41°1'24,828"W), UHE Baguari (19°1'17,678"S; 42°7'29,637"W), PCH Paiol (18°35'59,715"S; 41°50'54,06"W), PCH Tronqueiras (18°43'8,401"S; 42°15'46,336"W), PCH Fumaça (18°44'16"S; 42°18'10"W), PCH Corrente grande (18°24'0"S; 42°9'0"W).

Figura 5: Usinas analisadas no território do Vale do Rio Doce



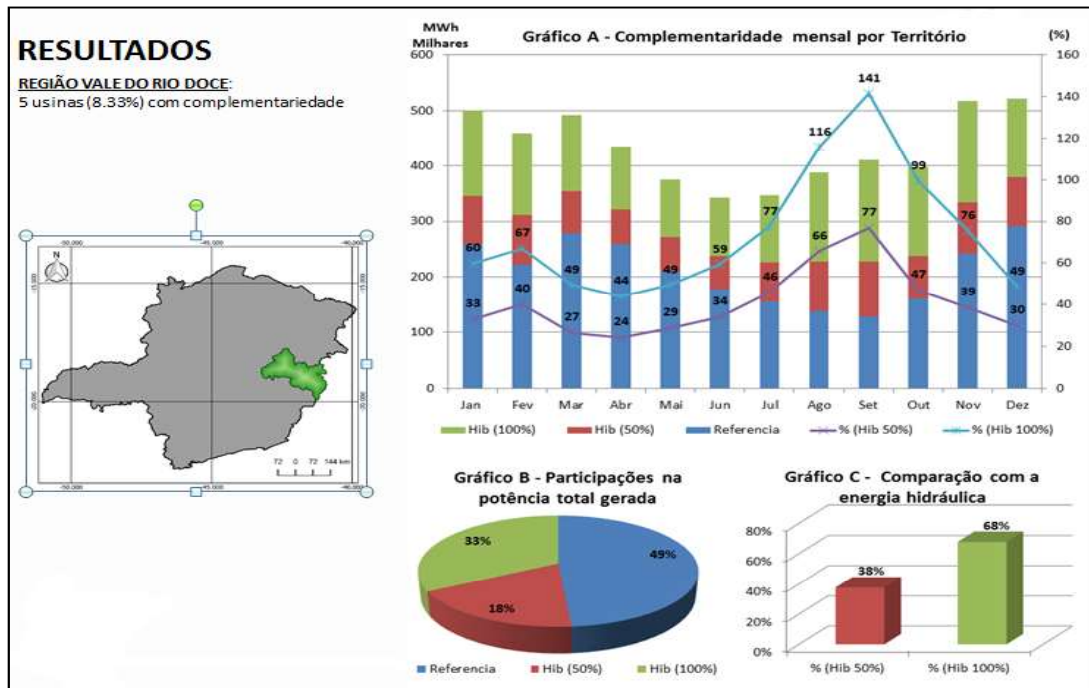


Fonte: FEAM, 2016

Os resultados são discutidos e apresentados por meio da representação gráfica, organizada nos Gráficos A, B e C (Figura 8). O Gráfico A apresenta, em seu eixo esquerdo, os valores da geração, em MWh, para a fonte hidráulica (referência) e para a fonte híbrida (eólica + solar) nos cenários de 50% e 100% (Hib 100% e Hib 50%). Estes valores de geração são caracterizados pelo somatório da geração de todas as usinas hidráulicas analisadas e das usinas híbridas dimensionadas presentes no Território de Desenvolvimento. No eixo direito, são apresentados, para cada cenário (Hib 50% e Hib 100%), o aumento percentual da energia gerada por meio da inserção da geração híbrida, tomando-se a fonte hidráulica como referência. Ou seja, o Gráfico A caracteriza o perfil de geração dos Territórios e, de forma geral, pode-se verificar a ocorrência de complementaridade de forma bastante clara nos perfis obtidos. Os meses de julho até outubro apresentam os menores valores da geração hidráulica e, em contrapartida, os maiores valores de geração híbrida, notadamente no cenário de 100%, onde em alguns casos, a energia híbrida gerada é superior a energia hidráulica. O Gráfico B mostra a participação percentual das fontes no montante de energia gerada em todo o Território. Tal gráfico permite notar que, de forma geral, a maior parcela da energia gerada no Território está relacionada a geração hidráulica, o que é um resultado esperado, uma vez que este tipo de geração apresenta fatores de capacidades superiores aos das fontes solar e eólica, ou seja, a fonte é capaz de gerar energia durante maiores períodos anuais. Contudo, a capacidade da fonte hídrica em atingir valores próximos ao da geração hidráulica evidencia a potencialidade da região para a geração renovável. O Gráfico C ilustra o acréscimo anual percentual que a geração híbrida representa com relação a geração hidráulica, em cada cenário analisado. No Território do Vale do Rio Doce foram analisadas 7 usinas, onde 6 apresentaram valor de complementaridade (mínimo de 4,57% e máximo 70%) e uma

repotencialização (mínimo 7,30% e máximo 120%). O caso mais promissor foi da PCH Paiol com 70% de complementaridade e 120% de repotencialização. (Figura 6).

Figura 6: Resultados de complementaridade do Território do Vale do Rio Doce



Fonte: FEAM, 2016

CONCLUSÃO

Este estudo procurou identificar usinas hidrelétricas de Minas Gerais - PCHs e UHEs - cujos potenciais eólico e solar das localidades onde estas se encontram, permitam a instalação de usinas fotovoltaicas e eólicas visando à estabilização sazonal da oferta de energia. Foi verificado um maior potencial de complementaridade entre as PCHs, que, por possuírem menores potências instaladas, se adequam melhor às fontes eólica e solar, energeticamente menos densas. Também é observado que a geração solar fotovoltaica, devido aos altos valores de potencial disponíveis no estado, apresenta pouca variação ao longo do ano, cumprindo, portanto, um papel ligado à repotencialização das usinas. Já a geração eólica apresenta maior variação anual, ou seja, nos meses em que a geração híbrida está em baixa a geração eólica está em alta, cumprindo assim um papel ligado à estabilização sazonal da oferta. Constatou-se que os melhores resultados em termos de complementaridade entre essas fontes foram observados entre as usinas do tipo PCH, devido a sua menor potência instalada. Mesmo nos casos em que não se observou a complementaridade entre as fontes, houve um ganho significativo em termos de repotencialização da usina avaliada. O presente trabalho buscou chamar a atenção para as vantagens estratégicas advindas da diversificação da matriz estadual – e até mesmo nacional – por meio da inserção de fontes renováveis. Tais vantagens estão representadas: pelo aproveitamento de um vasto potencial disponível, pelo ganho em termos de segurança do suprimento, sobretudo em momentos em que o país passe por um período de crise

hídrica, pelo pioneirismo ambiental, representado pela manutenção da geração baseada em fontes limpas, e pelo ganho econômico, dada a possibilidade de construção de novas usinas que possam utilizar de forma conjunta com aquelas pré-existentes, estruturas de infraestrutura de transmissão já em operação.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015. *Banco de Informações de Geração*. [Online]. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil-/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 27 junho 2015.

BANÑUELOS-RUEDAS, F; ANGELES-CAMACHO, C.; RIOS-MARCUELLO, S. *Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V 14. p. 2383–2391. 2010.

CASTRO, N. J, MARTINI,S., BRANDÃO, R., DANTAS, G. A., TIMPONI, R. R. 2009. *A Importância das Fontes Alternativas e Renováveis na Evolução da Matriz Elétrica Brasileira*. In V Seminário de Geração e Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro, Brasil, pp. 19-29.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2010. Atlas Eólico de Minas Gerais. Belo Horizonte: CEMIG.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012. Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Belo Horizonte: CEMIG.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Estimativa do Potencial de Complementaridade Hidro Eólico Solar para a Matriz Elétrica de Minas Gerais. Relatório2. Belo Horizonte. 2016.

GUALTIERI, G; SAURO, S. *Comparing methods to calculate atmospheric stability-dependent wind speed profiles: A case study on coastal location*. *Renewable Energy*. V 36. p. 2189 - 2204. 2011

MARINHO, M. H. N. *Oferta de Energia através da Complementaridade sazonal Hidro-eólica no estado de Pernambuco* [Online]. Disponível em:<http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CD8QFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.poli.br%2Findex.php%3Foption%3Dcom_phocadownload%26view%3Dcategory%26download%3D7812%3Aartigo%26id%3D24%3Ainstitucional&ei=taoPUs29F4PP2wWK0YH4Aw&sg=AFQjCNGxYVt_1RI9VQhbu8S-7r-izLrVug> Acesso nov. 2014.

PVsyst Photovoltaic Software 6.2.6. <http://www.pvsyst.com/en/>

SANSIGOLO, C. A. (2005). *Distribuições de Probabilidade de Velocidade e Potência do vento*. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v.20, n.2, 207-214, 2005

VIAJANTE, G. P; CAMACHO, J.R.; ANDRADE, D.A. *Estimativa de obtenção de energia a partir do vento em uma dada área* [Online]. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em <file:///C:/Users/x16130461/Downloads/IX_CEEL_013.pdf>. Acesso abr. 2014

Windographer - Windographer® Software. <https://www.windographer.com/>

YILMAZ, S.; SELIM, H. *A review on the methods for biomass to energy conversion systems design*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 420–430, 2013.