



**Oferta e Demanda de Energia – o papel da tecnologia da  
informação na integração dos recursos  
26 a 28 de setembro de 2016  
Gramado – RS**

## **Potencial Sazonal de Fontes Renováveis para a Matriz Elétrica Mineira: Uma Análise Territorial**

Lívia Maria Leite da Silva - liviamariasilva@hotmail.com;  
Wilson Pereira Barbosa Filho - wilson.filho@meioambiente.mg.gov.br;  
Rafaela Garcia Diniz de Souza - rafaela.garcia@globo.com  
Wemerson Rocha Ferreira - wemerson.ferreira@meioambiente.mg.gov.br;  
Abílio César Soares de Azevedo – abilio.azevedo@meioambiente.mg.gov.br  
Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM)  
Antonella Lombardi Costa - antonella@nuclear.ufmg.br  
Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Nuclear.

### **RESUMO**

A geração de eletricidade no Brasil desenvolveu-se fortemente apoiada na hidroeletricidade, contudo, apesar das vantagens proporcionadas pelo aproveitamento desta fonte, o país vem enfrentando alguns desafios ligados ao seu suprimento energético, devido, entre outros, a disponibilidade de chuvas. Frente a isso, a complementaridade da geração assume um papel importante, tornando-se um mecanismo de aumento da confiabilidade de abastecimento. Assim, o presente trabalho realiza uma avaliação do potencial de complementaridade entre as fontes hidráulica, eólica e solar existente em Minas Gerais, analisando os potenciais eólico e solar disponíveis em regiões onde já existem usinas hidráulicas em funcionamento. Tal análise é baseada na proposição de cenários e os resultados apontam para um considerável potencial de complementaridade no Estado.

**Palavras-chave:** Complementaridade, hidroeletricidade, energia eólica, energia solar.

## ABSTRACT

The electricity generation in Brazil developed itself strongly supported in hydroelectricity; however, despite the benefits of the use of this source, the country has faced some challenges related to their energy supply, due, among others, the availability of rainfall. In view of this, the complementarity of the generation plays an important role, becoming a mechanism of increase of the supply reliability. Thus, this paper carries out an assessment of the potential for complementarity between the hydraulic, wind, solar sources existing in Minas Gerais, analyzing the wind and solar potentials available in regions where there are already hydraulic power plants in operation. This analysis is based on the proposition of scenarios and the results point to a considerable potential for complementarity in the state.

**Keywords:** Complementarity, hydroelectricity, wind energy, solar energy.

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de eletricidade no Brasil desenvolveu-se fortemente apoiada na hidroeletricidade, contudo, apesar da *expertise* brasileira no que diz respeito a tal tecnologia, o país vem enfrentando algumas dificuldades em seu cenário energético. Dentre elas, podem-se destacar as restrições físicas e ambientais que dificultam a construção de grandes reservatórios e fazem com que a capacidade de regularização de vazões/geração torne-se menor (Barbosa Filho et al, 2013) e a diminuição do regime de chuvas, o que pode ser verificado pela crise hídrica que se abateu, principalmente, sobre o sudeste do país, no final do período úmido do biênio 2014/2015 (Cerqueira et al, 2015). Este quadro trouxe inúmeras consequências adversas, evidenciando que o suprimento, quando apoiado em uma única fonte, pode sofrer complicações relacionadas à sua confiabilidade. Verifica-se, portanto, a necessidade de se inserirem mecanismos que possam garantir o aumento da oferta de energia elétrica aliada à estabilidade e qualidade desta energia ao longo do tempo. Neste sentido, a possibilidade da complementaridade da geração hidráulica por meio da inserção de fontes renováveis, representadas aqui pelas fontes eólica e solar, torna-se uma alternativa pertinente. Um sistema energético que utiliza dois ou mais tipos diferentes de fontes renováveis é chamado Sistema de Energia Renovável Híbrido (YILMAZ; SELIM, 2013). Tais sistemas utilizam as fontes de forma integrada provendo um suprimento mais econômico e ambientalmente seguro do que os sistemas que utilizam uma única fonte (DALTON; LOCKINGTON; BALDOCK, 2009). Sistemas de energia híbridos podem operar interligados ao

sistema tanto para garantir uma demanda estipulada quanto para, ocasionalmente, alimentar a rede com qualquer excedente de energia (LUNA-RUBIO et al., 2012).

Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial eólico e solar de regiões do Estado de Minas Gerais que já possuem usinas hidráulicas em funcionamento (UHEs e PCHs) e a capacidade de tais regiões em gerar energia de forma complementar à hidroeletricidade. Tal avaliação foi realizada por meio do dimensionamento de usinas eólicas e solares, levando-se em consideração valores de potencial solar e séries históricas de velocidades dos ventos dos locais analisados. Os resultados foram gerados para dois cenários de análise: o cenário 1, é aquele onde, para cada usina hidráulica, foram dimensionadas usinas eólica e solar, cada uma com 50% da potência da usina hidráulica analisada; já o cenário 2, é aquele onde, para cada usina hidráulica analisada, as usinas eólica e solar foram dimensionadas com 100% da sua potência instalada. Os resultados foram gerados para cada usina em cada cenário analisado, e o perfil de geração mensal obtido permite analisar a complementaridade entre as fontes. Num segundo momento, os valores de geração foram agrupados de acordo com o território de desenvolvimento de Minas Gerais, fornecendo perfis de complementaridade por região e possibilitando uma análise de resultados territorial.

## **2. METODOLOGIA**

A metodologia utilizada neste trabalho é descrita de forma mais detalhada em FEAM (2015). Inicialmente foram caracterizados os Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais, apresentados na figura 4. Em seguida, foi realizado o cálculo dos potenciais energéticos.

O cálculo do potencial hidráulico partiu do inventário das usinas mineiras baseadas nesta fonte e do levantamento de suas séries históricas de geração. O potencial hidráulico sazonal foi considerado como sendo os valores médios mensais de geração verificada.

Para a estimativa do potencial de geração solar fotovoltaica, realizou-se o dimensionamento das usinas solares por meio do software *PVsyst Photovoltaic*. Foram fornecidas como entradas as latitudes e longitudes das hidrelétricas analisadas e a potência da usina solar, definida a partir de uma premissa do cenário dimensionado (50 ou 100% da potência da hidroelétrica considerada). Os equipamentos utilizados na 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, 2014), localizadas nas proximidades das usinas hidrelétricas analisadas. A partir da latitude e longitude das usinas hidrelétricas e das estações meteorológicas, identificou-se, por meio do *Google Earth*, a estação mais próxima de cada usina hidrelétrica e, conseqüentemente, das usinas eólicas dimensionadas. Os dados históricos obtidos de velocidades dos ventos apresentam as medições realizadas diariamente e a cada hora do dia, nos últimos oito anos. Foi verificada a ocorrência de valores de velocidade não registrados, que foram substituídos 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. As medições foram ainda, realizadas a uma altura de 10 metros, inadequada ao aproveitamento energético, assim, esses valores foram extrapolados para a altura de 120 metros por meio da Lei da Potência ou *Lei de Hellmann* (ĐURISIC; MIKULOVIC, 2012); (GUALTIERI; SECCI, 2012). O ano mais recente de medições foi considerado como ano típico, e serviu de base para o dimensionamento das usinas eólicas. Utilizou-se o *software Windographer®* para tratamento dos dados de velocidade do vento. Do tratamento dos dados obtêm-se parâmetros estatísticos para a definição do regime de ventos e do potencial eólico do local. (VIAJANTE; CAMACHO; ANDRADE, 2014). Para determinar-se a produção anual de energia, utilizou-se a distribuição de *Weibull*, classificada como a mais adequada para descrever o regime dos ventos de um local e representar as frequências mensais de sua velocidade (SANSIGOLO, 2014). O *Windographer®* 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, 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. O número de turbinas foi obtido pela divisão entre a potência instalada da usina e a potência da turbina. A geração mensal de energia é obtida pela soma do produto entre a distribuição de *Weibull* e a curva de potência do aerogerador, levando-se em conta o número de

horas mensais de operação, adotadas com 720, e o número de turbinas (VIAJANTE; CAMACHO; ANDRADE, 2014).

A metodologia apresentada foi utilizada para o cenário 1 onde, para cada usina hidráulica, foram dimensionadas usinas eólica e solar, cada uma com 50% da potência da usina hidráulica analisada; e para o cenário 2, que é aquele onde, para cada usina hidráulica analisada, as usinas eólica e solar foram dimensionadas com 100% da sua potência instalada. Na figura 1 ilustra-se as abordagens de cenários utilizada.

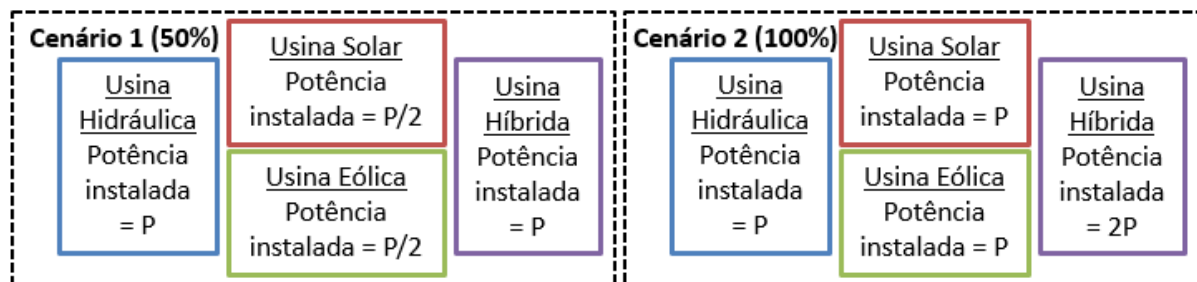


Figura 1 – Cenários de análise

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 (hidráulica) encontra-se com valores reduzidos, a fonte híbrida é capaz de garantir a geração, impedindo o máximo possível que a energia total disponibilizada 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 ( $E_{HIBRIDA}$ ) – a área abaixo da curva de geração desta fonte – representa com relação à energia gerada pela fonte hídrica ( $E_{HIDRICA}$ ).

$$Repotencialização = \frac{E_{HIBRIDA}}{E_{HIDRICA}} \cdot 100$$

Equação 1

Já a complementaridade é dada pelo produto entre a repotencialização e a razão entre os meses em que se verificou complementaridade ( $n_{COMP}$ ) e o total de meses do ano.

$$Complementaridade = \left( \frac{E_{HIBRIDA}}{E_{HIDRICA}} \cdot 100 \right) \cdot \frac{n_{COMP}}{12}$$

Equação 2

Para a realização da análise territorial, os valores de geração foram agregados por território, levando em consideração cada fonte analisada. Foram agregados, por território, os valores de geração da parcela hídrica, solar e eólica, o que possibilitou avaliar o acréscimo de energia gerada que a geração híbrida (eólica + solar) é capaz de oferecer.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O número total de empreendimentos em operação no Estado de Minas Gerais, de acordo com dados da ANEEL (2015a), é de cerca de 260, considerando CGHs, PCHs e UHEs. De modo a diminuir o volume de dados analisados, optou-se por desconsiderar as CGHs do presente estudo. De posse do total de UHEs e PCHs em operação em Minas Gerais, realizou-se o levantamento das séries históricas de geração de energia elétrica destas usinas. Este levantamento foi realizado mediante contato com os proprietários e de acordo com dados disponibilizados por órgãos oficiais. Contudo, algumas usinas não puderam ter estes dados levantados, devido a não realização de medições. Desta forma, a análise foi realizada para 119 usinas, 41 UHEs e 78 PCHs, que puderam ter seus dados históricos de geração hidroelétrica determinados.

No Cenário 1 (50%), dentre as usinas avaliadas, 23 usinas apresentaram complementaridade em seu perfil de geração, dentre essas, 17 são do tipo PCH e 6 do tipo UHE. No Cenário 2 (100%), 60 usinas apresentaram valores de complementaridade diferente de zero, 50 do tipo PCH e 10 UHEs, de acordo com a abordagem aqui proposta. Mesmo as usinas que não apresentaram valores de complementaridade expressivos, tiveram ganhos importantes em termos de repotencialização. Na figura 2 reúnem-se os principais resultados.

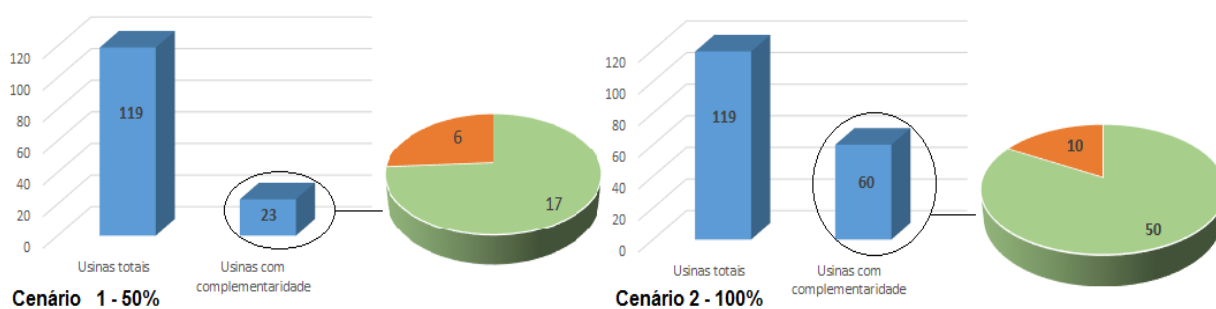


Figura 2 – Resultados

Verificou-se que os melhores resultados em termos de complementaridade foram alcançados pelas PCHs. Tais usinas caracterizam-se por possuírem menores potências instaladas, e portanto, possuem um perfil de geração mais compatível com as fontes solar e eólica, que são fontes menos 'densas' energeticamente quando comparadas a fonte hidráulica, devido a sua ocorrência estar ligada a fatores naturais dificilmente controlados pelo homem, como a ocorrência de ventos e radiação solar, ao passo que, as usinas hidráulicas podem dispor de estruturas de armazenamento de água, os reservatórios.

### **3.1 Resultados por usinas analisadas**

Na figura 3 é apresentado o perfil de duas usinas analisadas. A PCH Cachoeira do Brumado apresenta um perfil de geração com complementaridade entre as fontes, de acordo com as definições adotadas neste estudo. Pode-se perceber que, nos meses em que a geração da fonte principal (hidráulica) encontra-se em baixa, a geração proveniente da fonte complementar (eólica e solar) encontra-se em alta. Os ganhos obtidos com a complementaridade, calculados por meio da Equação 2, são de 44% no Cenário 1 e de 89,9% no Cenário 2. Os ganhos com a repotencialização, ou seja, com o aumento da energia gerada, calculados por meio da Equação 2, são, nos dois cenários superiores a 100%. Trata-se, portanto, de uma usina localizada em uma área com potenciais solar e eólico bastante promissores para a complementaridade da geração. Na figura 3 é apresentado, ainda, o perfil de geração da usina UHE Glória, que não apresenta complementaridade entre as fontes analisadas, apenas ganhos em termos de repotencialização. Tal ganho, no Cenário 1 é de 16,55% e de 29,13% no Cenário 2. Os ganhos gerados para esta usina são inferiores quando comparados à primeira, possivelmente devido ao fato de se tratar de uma UHE com maior potência instalada e maiores valores de geração, logo, a contribuição das fontes solar e eólica fica comprometida devido ao caráter intermitente destas fontes, aliado às características da região.

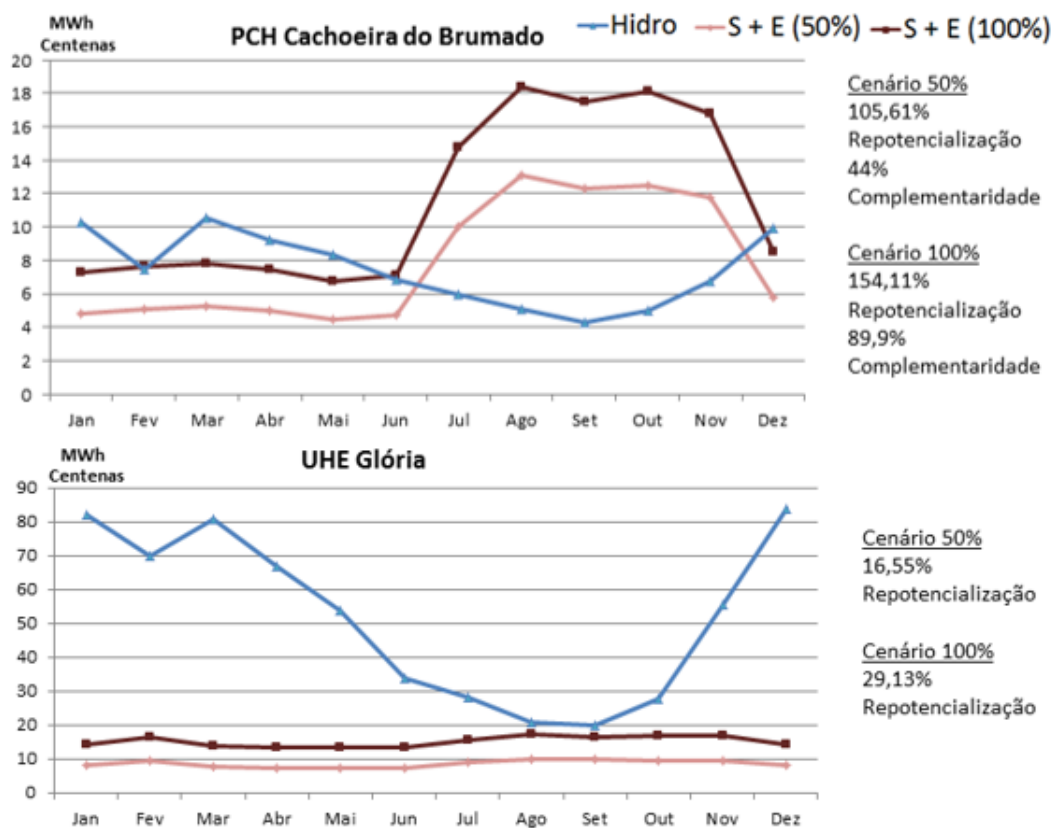


Figura 3 – Perfis de usinas analisadas

### 3.2 Por Território de Desenvolvimento

Na figura 2 são apresentados os Territórios de Desenvolvimento do Estado.

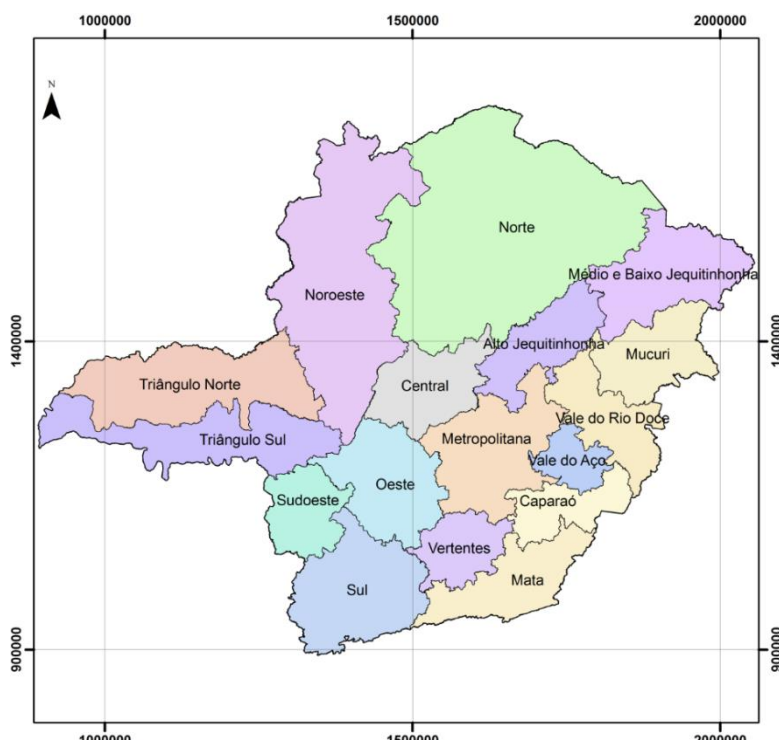


Figura 4 – Territórios de Desenvolvimento

Nas figuras 5a-b e 6a-b são apresentados os resultados por Cenário e Território de Desenvolvimento. As curvas representam o acréscimo, em valores percentuais, que a geração proveniente da fonte híbrida, representa com relação à energia hidráulica total gerada em cada território. A energia híbrida total gerada é caracterizada pela soma da energia gerada por todas as usinas eólicas e solares dimensionadas, em cada cenário analisado. A energia hidráulica total é caracterizada pela soma da energia gerada em cada uma das UHEs e PCHs analisadas. Nas figuras 5a-b são apresentados os acréscimos produzidos pela inserção da geração híbrida no Cenário 1. De uma forma geral, é possível perceber que a geração híbrida possui o comportamento desejado para fontes complementares à geração hidráulica, uma vez que, os meses de maior disponibilidade desta fonte, julho-agosto-setembro-outubro, são os meses com menores ocorrências de chuvas durante o ano, ou seja, são os meses críticos para a geração hidráulica. Os Territórios com os maiores acréscimos verificados são: Norte, Mucuri e Vale do Rio Doce. O Território Norte é o caso mais promissor, onde pode-se perceber que em alguns meses do ano, o acréscimo na geração proporcionado pela energia complementar é superior a 100%, ou seja, é maior que a energia total gerada pela fonte principal.

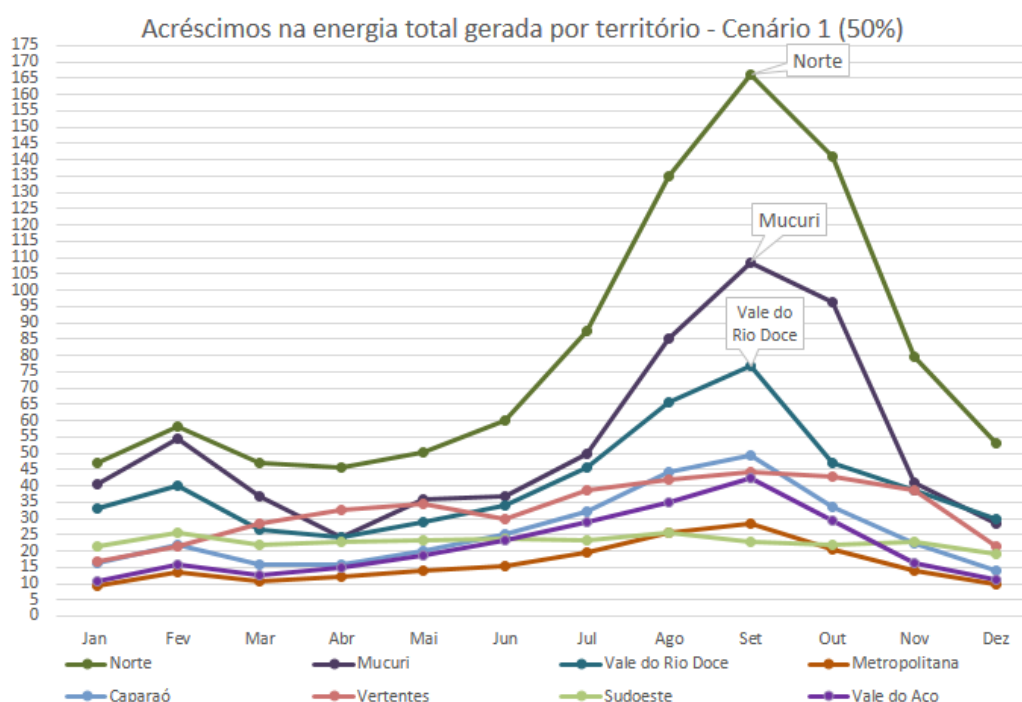


Figura 5a – Perfis territoriais – Cenário 1

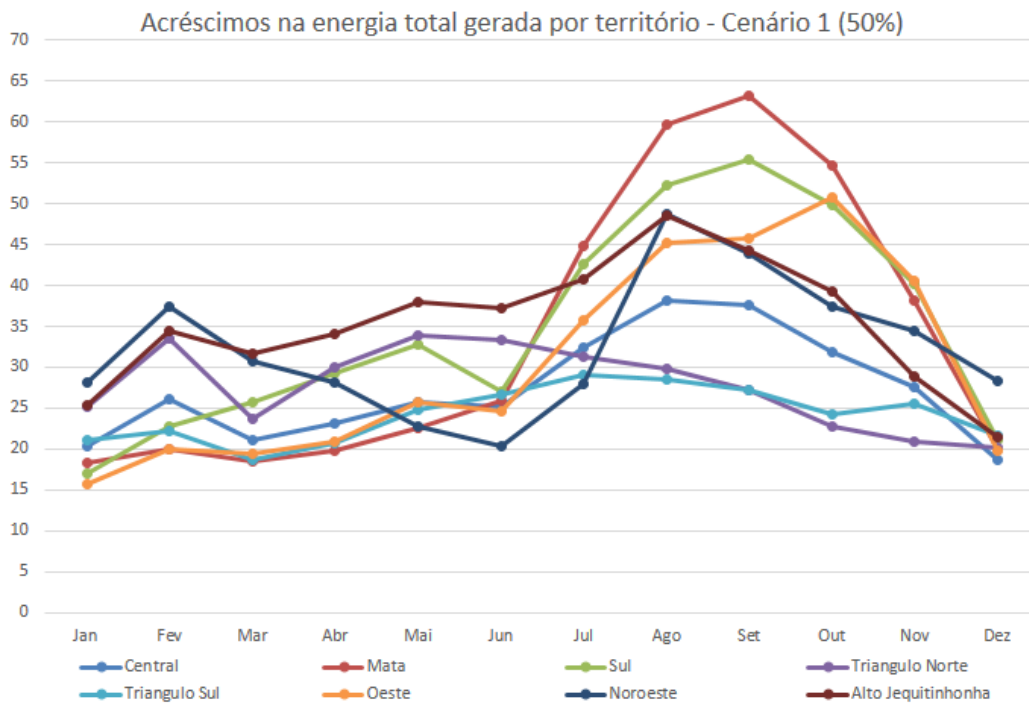


Figura 5b – Perfis territoriais – Cenário 1

Nas figuras 6a-b são apresentados os acréscimos produzidos pela inserção da geração híbrida no Cenário 2. De uma forma geral, os perfis são semelhantes aos apresentados nas figuras 5a-b, contudo com valores mais expressivos. Novamente, destacam-se as regiões Norte, Mucuri e Vale do Rio Doce. O Território Norte chega a apresentar valores de geração superiores a 200%, o que evidencia seu alto potencial para a geração renovável.

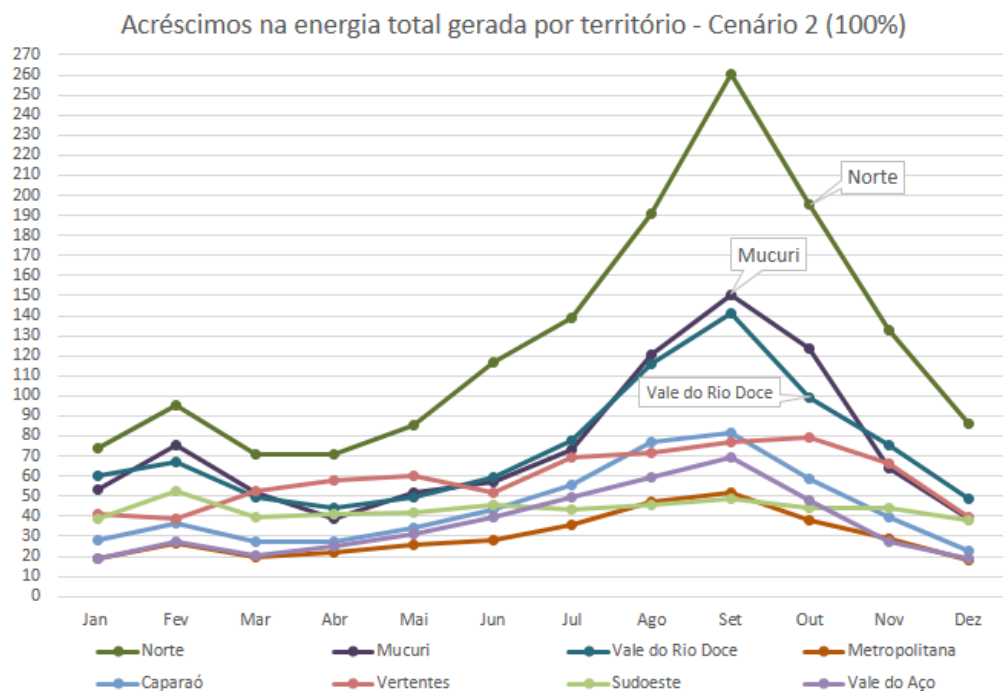


Figura 6a – Perfis territoriais – Cenário 2

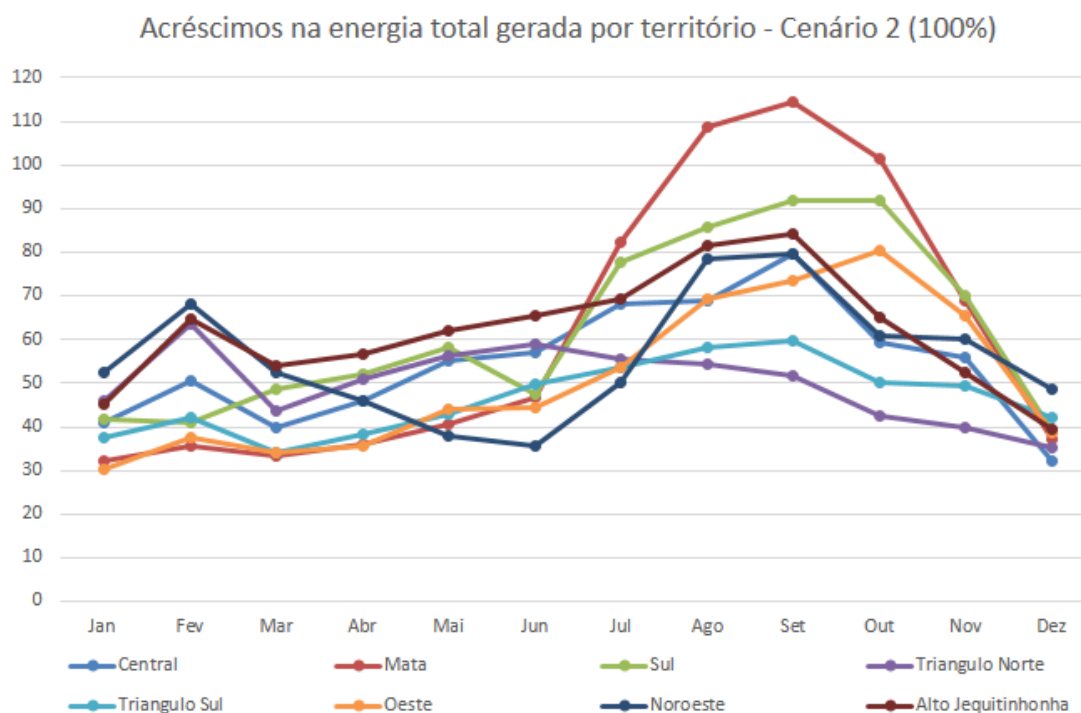


Figura 6b – Perfis territoriais – Cenário 2

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho procurou chamar a atenção para a importância estratégica que podem representar os chamados Sistemas de Energia Renovável Híbridos para a segurança do suprimento energético do Estado ou mesmo do país. Avaliou-se o potencial existente para a geração eólica-solar em regiões onde já existem PCHs e UHEs em funcionamento e, foi possível verificar que os melhores desempenhos em termos de complementaridade foram alcançados pelas usinas do tipo PCH, que, por possuírem menores potências instaladas, são mais compatíveis com a geração renovável, menos densa energeticamente com relação à hidroeletricidade. As usinas que não apresentaram valor de complementaridade apresentaram acréscimos em sua geração, ou seja, uma repotencialização. O cenário com melhor desempenho foi o cenário 2. A análise territorial permite avaliar claros perfis de complementaridade, onde a quantidade de energia acrescida atingiu valores até mesmo superiores a 100% da energia hidráulica gerada, no período de agosto a outubro. O presente trabalho serve como um instrumento norteador da tomada de decisões em projetos de geração renovável, indicando regiões em que a geração hidráulica já desempenha papel importante para o país e é ainda potencialmente apta a recepção da geração renovável complementar.

## X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA FILHO, W. P.; AZEVEDO, A. C. S.; XAVIER, M. V. E. “*Study of complementarity between wind and hydropower schemes for the state of Minas Gerais*”. 2013.

CERQUEIRA, G. A. et al. “*A Crise Hídrica e suas Consequências*”. 2015

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. “*Estimativa do Potencial de Complementaridade Hidro Eólico Solar para a Matriz Elétrica de Minas Gerais (2015 – 2050)*”. 2015

YILMAZ, S.; SELIM, H. “*A review on the methods for biomass to energy conversion systems design*”. 2013

DALTON, G. J.; LOCKINGTON, D. A.; BALDOCK, T. E. “*Case study feasibility of renewable energy supply options for small to medium size tourist accommodations*”. 2009.

LUNA-RUBIO, R. et al. “*Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies*”. 2012.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. “*Dados Meteorológicos*”. CD-Room. 2014.

ĐURISIC, Z; MIKULOVIC, J. “*A model for vertical wind speed data extrapolation for improving wind resource assessment using WAsP.*” 2012.

GUALTIERI, G.; SECCI, S. “*Methods to extrapolate wind resource to the turbine hub height based on power law: A 1-h wind speed vs. Weibull distribution extrapolation comparison*”.2012.

VIAJANTE, G. P; CAMACHO, J.R.; ANDRADE, D.A. “*Estimativa de obtenção de energia a partir do vento em uma dada área*”.2014.