

ESTUDO DA COMPLEMENTARIEDADE DA GERAÇÃO DE ENERGIA ENTRE AS FONTES SOLAR E HIDRÁULICA

Cristiano Andrade de Alencar – calencar@alunos.utfpr.edu.br

Rafael Stedile – rafael_eletro@yahoo.com.br

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Sistemas de Energia - PPGSE

Resumo. A busca para se atender ao compromisso da redução de gases do efeito estufa visando minimizar os efeitos das alterações climáticas passa por soluções como o aumento da demanda por consumo de energia a partir de fontes renováveis. Este aumento cada vez mais significativo traz consequências para a confiabilidade e estabilidade da operação do sistema elétrico de potência. A sustentabilidade da geração de energia a partir das fontes renováveis passa pela tratativa e busca de soluções para se lidar com a característica intrínseca de intermitência e não-despachabilidade destas fontes. Uma solução interessante é a integração das fontes solar e hidráulica, opção que merece destaque principalmente no Brasil que possui uma matriz energética formada em sua maioria por usinas hidrelétricas e ao mesmo tempo tem como características altos índices de irradiação solar em praticamente todo o território. Assim o armazenamento da geração fotovoltaica é feito em forma de conservação da energia potencial hidráulica presente no reservatório da usina hidrelétrica. Além de proporcionar uma geração fotovoltaica mais estável e confiável, a complementariedade destas fontes permite também um ganho de armazenamento de água em períodos críticos de estiagem onde a geração hidráulica pode ficar comprometida. O estudo proposto com o reservatório de Sobradinho busca mostrar uma estimativa do ganho em termos de volume do reservatório.

Palavras-chave: Parques híbridos, Complementariedade de fontes intermitentes, Planta hidro/fotovoltaico.

1. INTRODUÇÃO

Com a expansão cada vez mais acelerada e acentuada das fontes renováveis em larga escala, com o objetivo de atender a demanda crescente de energia de uma forma sustentável, surge a preocupação de garantir a confiabilidade, segurança e despachabilidade destas fontes intermitentes, que quando operam de forma individual não são consideradas energia firme que garantam o despacho requerido exigindo portanto quantidades equivalentes à sua potência instalada de reservas girantes para garantir a operação confiável do sistema o que eleva o custo de operação destas fontes (Fang *et al.*, 2017).

A energia fotovoltaica tem como característica seu comportamento intermitente de geração devido a principalmente fatores como instabilidades meteorológicas e o ciclo natural dia/noite. No Brasil a energia solar é abundante em diversas regiões do país, relativamente constante e com uma média de irradiação alta ao longo do ano. Caso a energia fotovoltaica venha a ser conectada diretamente na rede interligada alguns fatores como, controle de pico de demanda e estabilidade de rede podem ser dificultados (An *et al.* 2015). Alguns estudos são propostos para diminuir estes efeitos como a integração da fonte solar com outras fontes, como por exemplo com a eólica e hídrica, aumentando assim o fator de capacidade global do complexo de geração de energia. Exemplos destas propostas que podem ser enunciados são usinas que integram fonte solar e eólica, usinas hidrelétricas reversíveis, usinas hidrelétricas integradas com parques solares, usinas de fontes renováveis que integram com fontes como diesel, gás natural; dentre outros.

Estes estudos podem partir da otimização desde a sua concepção de projeto ou da modernização e expansão de um parque já existente de fonte única que teria como objetivo adaptar uma segunda fonte de geração. A escolha de uma determinada solução passa pela análise de diversos critérios técnicos, econômico-financeiros, sociais e ambientais.

Um dos grandes desafios das fontes de energias renováveis é tornar o fornecimento de energia possível de ser despachável a partir do seu armazenamento. Conforme preconizado por Margeta e Glasnovic (2011), apesar das fontes renováveis terem por característica intrínseca a intermitência de geração, não permitindo assim que a mesma seja considerada confiável, firme e despachável do ponto de visto de operação do sistema elétrico de potência; seu balanço de energia ao longo de um período completo, anual por exemplo, mostra que a disponibilidade total destas fontes é competente para o atendimento da demanda.

A solução de parques híbridos permite trazer maior previsibilidade e prolongar a geração de energia a partir, por exemplo, ou da economia de águas nos reservatórios de acumulação no caso de parques solar-hídrico, ou a partir da complementariedade em função do perfil de geração de diferentes fontes, como solar-eólico.

Usinas hidrelétricas trazem grandes vantagens para o controle de geração de energia uma vez que permitem retomadas e retiradas rápidas de carga e ajustes de geração flexíveis durante todo o tempo. Ao se integrar uma fonte solar, por exemplo, aumenta-se a qualidade de geração solar e se permite garantir por mais tempo os níveis operacionais dos reservatórios de acumulação.

Um exemplo prático desta aplicação referente a integração da fonte hidráulica com a fonte solar pode ser visto em Longyangxia, na China a partir de uma usina solar de 320 MW acoplada em paralelo a quatro turbinas hidráulicas da usina hidrelétrica (An *et al.* 2015). Assim a intermitência da fonte solar pode ser amenizada e estabilizada a partir do controle de vazão das turbinas compensando as variações constantes e inerentes da geração fotovoltaica. A curva de geração do parque solar que tem como característica inúmeros picos e vales ao longo do dia pode ser suavizada a partir destas compensações com as turbinas hidráulicas.

Sendo assim a complementariedade destas fontes possibilita que a energia hidráulica compense a intermitência da fonte solar. Por outro lado, a fonte solar permite compensar em certo nível a escassez de água em períodos secos a partir da preservação dos níveis dos reservatórios durante a geração de energia fotovoltaica.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DE PARQUES HÍBRIDOS

Conforme ilustram os relatórios do IRENA (2016), a fonte solar fotovoltaica tem se tornado uma fonte cada vez mais competitiva tendo reduzido 58% de seus custos desde 2010 até 2015 e com uma tendência de continuar esta redução em adicionais 57% para o período de 2015 a 2025. A demanda por energias renováveis vem aumentando com o decorrer dos anos indicando um potencial global de geração de energia por fontes renováveis de 11,941 EJ/ano em 2050 (REN 21, 2017). Dentro do contexto Brasil, a expansão de renováveis prevista até 2026 será em torno de 23,5 GW de capacidade instalada (MME e EPE, 2017). Muito desta expansão está baseada na necessidade de se atender as exigências globais referente às mudanças climáticas em função do consumo de combustíveis fósseis, que tende cada vez mais a diminuir com o intuito de se reduzir a emissão de gases do efeito estufa.

Conforme descrito por Li e Qui (2015), os estudos realizados até o presente, além de terem sido feitos em pequena escala e para sistemas isolados, sempre focaram na integração de uma fonte intermitente com outra firme gerada a partir da queima de combustível fóssil, com a utilização de geradores diesel. Outros estudos que contemplam a integração de fontes renováveis foram feitos para o atendimento de demandas em sistemas isolados, para viabilizar a eletrificação em ambientes rurais, ou ainda para abastecimento e irrigação de água com a utilização de sistema de bombeamento alimentado por fontes intermitentes. Mais recentemente estudos referentes a complementariedade de geração entre parques eólicos com parques solares em larga escala têm despertado o interesse de diversos pesquisadores, porém ainda não é visto de forma significativa estudos referentes a integração de parques solares e hidrelétricas.

Alguns destes estudos que propõe metodologias para avaliação da complementariedade entre as fontes solar e eólica, visando inclusive estudos de otimização para o sistema de transmissão, indicam a criação de produtos de leilão de energia específicos para a contratação de usinas híbridas; tentando de alguma forma contornar as restrições de escoamento para as fontes eólica e fotovoltaica (EPE, 2017).

A grande maioria dos estudos feitos até hoje fazem referência a estratégias de operação a curto prazo em pequena escala ou sistemas isolados, em que a qualidade da energia fornecida não é um fator preponderante. Estimativas de longo prazo de geração híbrida em uma base horária são problemas mais complexos de resolução, de características não lineares onde a existência de plataformas que auxiliam nestes estudos é escassa ou inexistente (Li e Qui, 2015).

A operação integrada, de uma fonte solar com uma hidráulica, por exemplo, deverá buscar maximizar a geração de energia, e consequentemente a receita gerada, a partir da mínima utilização possível de água do reservatório buscando também a estabilidade de geração ao se minimizar as flutuações de potência presentes na geração fotovoltaica. Toda vazão de água necessária a geração hidráulica de uma turbina corresponde a geração fotovoltaica será armazenada em forma de energia potencial no próprio reservatório.

A opção de armazenamento de energia mais amplamente estudada faz referência ao uso de baterias, que requerem a necessidade de um controle específico do gerenciamento de carga (Wang *et al.* 2015). Dentro do contexto da aplicação em larga escala constituem um alto investimento tanto de implantação quanto de manutenção, possuem vida útil relativamente curta, entre 3 a 5 anos, possuem perdas por conversão e a necessidade de acondicionamento restrito devido a presença de componentes explosivos e de poluentes que podem ser prejudiciais quando em contato com o meio ambiente (Glasnovic e Margeta, 2009). Outras opções de armazenamento são possíveis como a utilização de reservatórios de água, que armazenam energia potencial seja em reservatórios secundários ou com a utilização de usinas reversíveis; reservatórios de ar comprimido, hidrogênio, gás natural sintético ou ainda volantes de inércia.

A integração entre fontes intermitentes permite que se dispense o uso de bancos de baterias em larga escala bem como a necessidade de grandes montantes de reservas girantes (Fang *et al.*, 2017), em que deve-se levar em consideração um determinado valor como reserva girante, por exemplo 10% da geração, indicando assim que o sistema possui capacidade para absorver um aumento instantâneo de demanda de até 10% da geração de momento (Kougias *et al.* 2016).

As soluções, entretanto, existentes até o momento e utilizadas em maior abrangência possuem complicadores que podem limitar sua aplicação, como o alto custo ou ainda o fato de não serem soluções livres de emissões de gases poluentes (Kougias *et al.* 2016). Além da utilização dos bancos de baterias conforme mencionado, estas soluções dizem respeito a integração de uma fonte intermitente com outra fonte considerada firme, como carvão, gás ou nuclear, porém poluente.

Destaca-se ainda que dentre os estudos feitos até o momento sobre geração híbrida, 90% destes foram realizados em termos de análise econômicas e de viabilidade, sendo muito poucos relacionados ao controle e operação. Esta quantidade fica ainda mais reduzida quando se faz referência a usinas híbridas de larga escala (Desmukh e Desmukh 2008).

Sendo assim, o contexto de uma inserção cada vez maior na matriz energética traz a necessidade do desenvolvimento de outras soluções, mais viáveis tanto economicamente quanto tecnicamente. O estudo destas soluções, como o complemento entre si de diferentes fontes intermitentes, se torna peça fundamental para o futuro sustentável dos sistemas de energia.

Dentro destas soluções, a complementariedade entre eólica e solar foi a que mais teve destaque até o presente momento; havendo assim uma lacuna em análises similares com outras fontes renováveis, como a integração da energia hidráulica e solar, por exemplo.

3. UTILIZAÇÃO DA COMPLEMENTARIEDADE SOLAR/HIDRÁULICA

Segundo Fang *et al.* (2017), fatores como o aumento populacional, o desenvolvimento industrial e as mudanças climáticas contribuem ainda mais para a necessidade da otimização da utilização dos recursos hídricos. Dada a importância destes recursos para a sociedade estudos cada vez mais frequentes tem trazido a atenção de pesquisadores e agências regulatórias de todo o mundo. Dentro deste contexto, o estudo da operação ou projeto de um parque híbrido solar/hidráulico permite uma utilização otimizada destes recursos hídricos, seja a partir do dimensionamento de um reservatório otimizado ou do consumo mais reduzido da água de um reservatório já construído onde se incorpora um parque solar.

Conforme descrito por Li e Qui (2015), o complemento de geração a partir de hidrelétricas pode se tornar uma opção muito interessante tendo em vista a possibilidade de rápido ajuste da potência gerada e da estabilidade de geração proporcionada pela operação conjunta com as turbinas hidráulicas.

A geração fotovoltaica tem por característica ser intermitente devido a sua dependência de geração com as condições climáticas que são variáveis a todo instante. Sua fonte é relativamente permanente e abrangente, porém convive com a intermitência devido a variabilidade com que a energia solar atinge a superfície do solo. O aparecimento de nuvens, o ciclo de dia e noite afeta de forma direta sua geração.

De forma global, conforme citado por An *et al.* (2015), a inserção tanto de usinas solares quanto de usinas eólicas conectadas diretamente ao sistema interligado tem aumentado de forma gradativa em função da inserção cada vez maior de energias renováveis na matriz energética. Sendo assim, estas usinas operando de forma individual, exigem reservas girantes que aumentam proporcionalmente ao aumento da inserção destas fontes na matriz energética, encarecendo a operação do sistema interligado.

Se a geração fotovoltaica está diretamente interligada na rede, estas variações de geração podem impactar na estabilidade de geração do sistema, dificultando a regulação de picos de carga e necessitando assim de uma significativa reserva girante para garantir o atendimento a todo instante da demanda (An *et al.* 2015).

Em comparação com a energia fotovoltaica, a energia hidráulica promove uma energia confiável, despachável e flexível. Sua geração, entretanto, depende da disponibilidade de água nos reservatórios e por consequência, da ocorrência de períodos chuvosos recorrentes que permita o reestabelecimento dos níveis normais de operação destes reservatórios. Estes reservatórios são muitas vezes utilizados para outras aplicações além da geração de energia como, por exemplo, de irrigação, abastecimento urbano, navegação, consumo industrial, dentre outros. Isto torna a importância ainda maior da constante disponibilidade de água no reservatório a partir da correta utilização deste recurso em suas diferentes aplicações e da economia de água quando integrada sua operação à outra fonte complementar.

As usinas hidrelétricas possuem vantagens operacionais como uma rápida partida e parada, especialmente quando operam como compensadores síncronos, e grande flexibilidade de ajuste da curva de saída de geração. Isto proporciona um papel fundamental na regulação dos picos de carga podendo assim ser considerada uma energia despachável de alta confiabilidade. Se uma usina hidrelétrica está localizada próxima a uma usina fotovoltaica, estas fontes tem a possibilidade de operar de forma combinada, aumentando assim a qualidade de geração como um todo, em que estas características de complementariedade de fontes e flexibilidade de operação proporcionam vantagens competitivas entre as outras fontes intermitentes.

Os reservatórios de acumulação servem para atender as diferentes condições de operação mesmo com variações diárias e sazonais de disponibilidade do recurso hídrico e da demanda de carga. Esta forma de armazenamento de energia soluciona alguns destes complicadores descritos anteriormente referente a utilização da energia fotovoltaica em larga escala, dando condições assim para a continuidade da expansão e do crescimento da tecnologia, além de se evitar a adição de um impacto ambiental negativo se fosse escolhida a implementação de bateria em vez da utilização dos próprios reservatórios (Glasnovic e Margeta, 2009).

Uma usina fotovoltaica com potência similar a uma unidade geradora de uma usina hidráulica pode operar em paralelo com esta compartilhando a estrutura de interligação na rede e contribuindo assim para atender a demanda de forma estável, despachável e confiável; permitindo tanto uma economia de água do reservatório quanto a estabilização da curva de geração fotovoltaica a partir da atuação rápida das turbinas hidráulicas (An *et al.* 2015).

Conforme descrito por An *et al.* (2015), a compensação de energia fotovoltaica a partir da energia hidráulica pode ser caracterizada em duas fases:

- Em um primeiro momento a partir de uma regulação rápida e em menor escala das palhetas do distribuidor. A unidade geradora hidráulica permite suavizar a curva em forma de “dente de serra” da geração fotovoltaica amenizando estas variações bruscas inerentes da energia solar.

- Em um segundo momento, a partir da quantidade de energia potencial armazenada em reservatório e da flexibilidade da geração hidráulica. Esta permite tornar a geração fotovoltaica despachável a partir de uma geração

constante que complementa os períodos em que não se produz energia fotovoltaica devido a ausência de irradiância solar.

A partir da compensação pode-se reduzir para valores bem menores a quantidade de reserva girante que estaria prevista para atender, a princípio, igualmente a mesma quantidade da capacidade instalada de fontes intermitentes, permitindo assim uma operação mais otimizada e de menor custo.

Baseado na disponibilidade hídrica pode-se avaliar o balanço entre a demanda de carga e a energia gerada para um determinado período, a relação de distribuição de carga entre a hidrelétrica e a usina fotovoltaica, a capacidade da hidrelétrica compensar a usina fotovoltaica e a capacidade do parque híbrido de regular os picos de demanda.

Deve-se levar em consideração não somente os níveis mínimos e máximos do reservatório da usina hidrelétrica, bem como a vazão mínima necessária para se garantir a vazão natural do rio.

A geração de energia hidráulica depende da quantidade de água nos reservatórios, em que assim turbinas hidráulicas possuem uma maior disponibilidade durante períodos úmidos e, conseqüentemente, uma restrição maior de geração durante períodos secos. Em contrapartida, a geração fotovoltaica é privilegiada em períodos secos devido a ausência de nuvens proporcionando períodos maiores de irradiância contínua. Em períodos chuvosos, em que a tendência da geração solar é menor, a geração hidráulica durante este período é privilegiada permitindo assim, na teoria, uma complementariedade em diferentes estações ao longo do ano entre estas fontes.

A geração solar durante o dia permite a economia de água nos reservatórios para assim ser utilizada durante o período noturno e em horários de pico ao final do dia permitindo assim o atendimento aos picos de demanda e conseqüentemente reduzindo o consumo de água para tal.

Neste sentido a complementariedade das fontes pode ser considerada bi-direcional podendo ser avaliada tanto da perspectiva de geração fotovoltaica quanto da perspectiva da geração hidráulica. A curto prazo a energia hidráulica auxilia na compensação da geração intermitente e variável da energia fotovoltaica. A médio e longo prazo quando há economia de água do reservatório em função da geração fotovoltaica durante o dia para permitir o atendimento aos picos de demanda de forma mais planejada.

Em tese, quanto maior a contribuição da energia fotovoltaica no sistema híbrido, menor a contribuição da energia

hidráulica e assim maior a energia armazenada nos reservatórios. Da mesma forma, quando a geração fotovoltaica diminui em função da intermitência a energia hidráulica pode rapidamente compensar a geração fotovoltaica, em que assim esta complementariedade de geração permite uma geração final relativamente constante, confiável e despachável.

Uma desvantagem a ser destacada referente a energia fotovoltaica quando opera de forma individual se encontra na intermitência e na instabilidade da fonte, onde segundo Li e Qui (2015), este fato se torna ainda mais relevante quando existe a necessidade da transmissão de grandes potência em longas distâncias por meio das linhas de transmissão, em que mudanças bruscas no fluxo de potência dificultam ainda mais o controle de tensão e frequência da rede interligada gerando instabilidade de geração.

A matriz energética do Brasil é constituída em sua grande maioria, cerca de 63% (ANEEL, 2017), de usinas hidrelétricas presentes em todas as regiões do país sendo interligadas em um complexo sistema interligado de transmissão de aproximadamente 120.000 km de extensão (ONS, 2017).

Sabe-se que a construção de grandes usinas hidrelétricas tem diminuído consideravelmente nos últimos anos, e que no Brasil a grande maioria dos parques de fontes renováveis, principalmente eólico e solar, se concentram na região Nordeste, em que em contrapartida, a maior demanda de carga está localizada da região Sudeste (ONS, 2017). Sendo assim longas distâncias e alta capacidade de transmissão são soluções indispensáveis para acomodar grandes montantes de potências geradas a partir de usinas de fontes renováveis e assim, uma transmissão relativamente constante desta energia se faz necessária.

Dentro deste contexto de expansão das energias renováveis, principalmente quando se trata de grandes usinas, seu fornecimento em longas distâncias deverá ser feito de forma estável, constante e com a qualidade necessária; em que isto pode ser obtido a partir da geração coordenada de diferentes fontes, como por exemplo, solar e hidráulica (An *et al.* 2015). Quando a energia fotovoltaica é interconectada à rede, as variações de carga devem ser compensadas pela energia hidráulica a fim de atender os picos e flutuações de demanda compensando assim a geração renovável do tipo fotovoltaica e se tornando um papel fundamental na estratégia de operação do sistema nacional.

An *et al.* (2015), sugere que, a partir da perspectiva do sistema elétrico de potência, a usina fotovoltaica deverá possuir a mesma potência de uma turbina hidráulica, buscando assim atender ao despacho de energia exigido de toda a usina hidrelétrica. Toda energia possível de ser compensada pela planta fotovoltaica será armazenada em forma de energia potencial no reservatório. A usina solar pode ser considerada, portanto, como uma “turbina hidráulica virtual”. A energia intermitente e não despachável da fonte fotovoltaica quando operada de forma individual é, portanto, convertida em uma energia estável, constante e despachável quando integrada com a usina hidrelétrica; em que esta por sua vez pode armazenar mais energia para utilização durante períodos críticos de estiagem e aumentar a produção energética do parque, aumentando conseqüentemente a receita de geração a partir de um custo de investimento minimizado em função do aproveitamento de toda a infraestrutura já existente da usina hidrelétrica, tanto em termos de conexão quanto de instalação do próprio parque solar.

No caso de construção de novas usinas hidrelétricas incorporadas com usinas fotovoltaicas, deve-se levar em consideração o dimensionamento do reservatório em função da quantidade de vazão vertida necessária para se garantir a segurança da barragem. Este cálculo, que influencia de forma determinante na viabilidade econômica do projeto de uma usina hidrelétrica, será influenciado diretamente a partir da inserção de uma planta solar integrada na geração

hidráulica, permitindo assim uma redução destes custos a partir da diminuição de tamanho do reservatório e da área alagada, diminuindo portanto, os impactos ambientais associados.

Conforme sugerido por Fang et al. (2017), uma solução alternativa seria a construção de um reservatório secundário de menor capacidade que podia ser utilizado tanto para realimentar o reservatório principal quanto para servir de forma separada às outras aplicações necessárias como irrigação, abastecimento e etc. Uma outra solução proposta para integração seria a instalação de módulos fotovoltaicos sobre estruturas flutuantes ou ainda aproveitando a própria área disponível da barragem (Teixeira et al. 2015).

Destaca-se que devido ao alto investimento e ao longo prazo de implantação necessário para a construção de usinas hidrelétricas, somado ao fato de que o Brasil possui uma grande abundância de recursos hídricos em exploração ao longo dos anos por meio de hidrelétricas, a aplicação mais viável seria a incorporação destas usinas fotovoltaicas em plantas hidrelétricas já existentes.

Isto também se justifica com a exploração de recursos hídricos cada vez mais limitada e com restrições ambientais mais rigorosas. A construção de novas usinas hidrelétricas de grande porte com reservatórios de ampla capacidade de armazenamento será cada vez mais difícil (Canales e Beluco, 2015).

Fatores como o contexto acima, bem como o gargalo visto nos últimos anos referente a margem de escoamento do sistema de transmissão para novas usinas de diversas fontes, indicam um cenário atual que aponta para investimentos em expansões e modernizações de usinas hidrelétricas já existentes.

4. ESTUDO DE CASO – UHE SOBRADINHO INTEGRADA VIRTUALMENTE A UMA PLANTA SOLAR

Conforme dito por Beluco et al. (2012) a máxima disponibilidade de recursos hídricos e solar existente é considerada como aquela insensível a períodos de estiagem extremas ou de variações bruscas oriundos de eventos atípicos, resultando em disponibilidade excessiva ou escassas às médias destes valores.

Mais recentemente, por volta dos últimos 10 anos, pôde-se observar no Brasil períodos de estiagem mais rigorosos e duradouros; principalmente na região Nordeste. Fato que compromete o nível de alguns reservatórios de acumulação como é o caso de Sobradinho, ilustrado na Figura 1 que mostra o histórico de operação da última década relativo ao volume útil do reservatório.

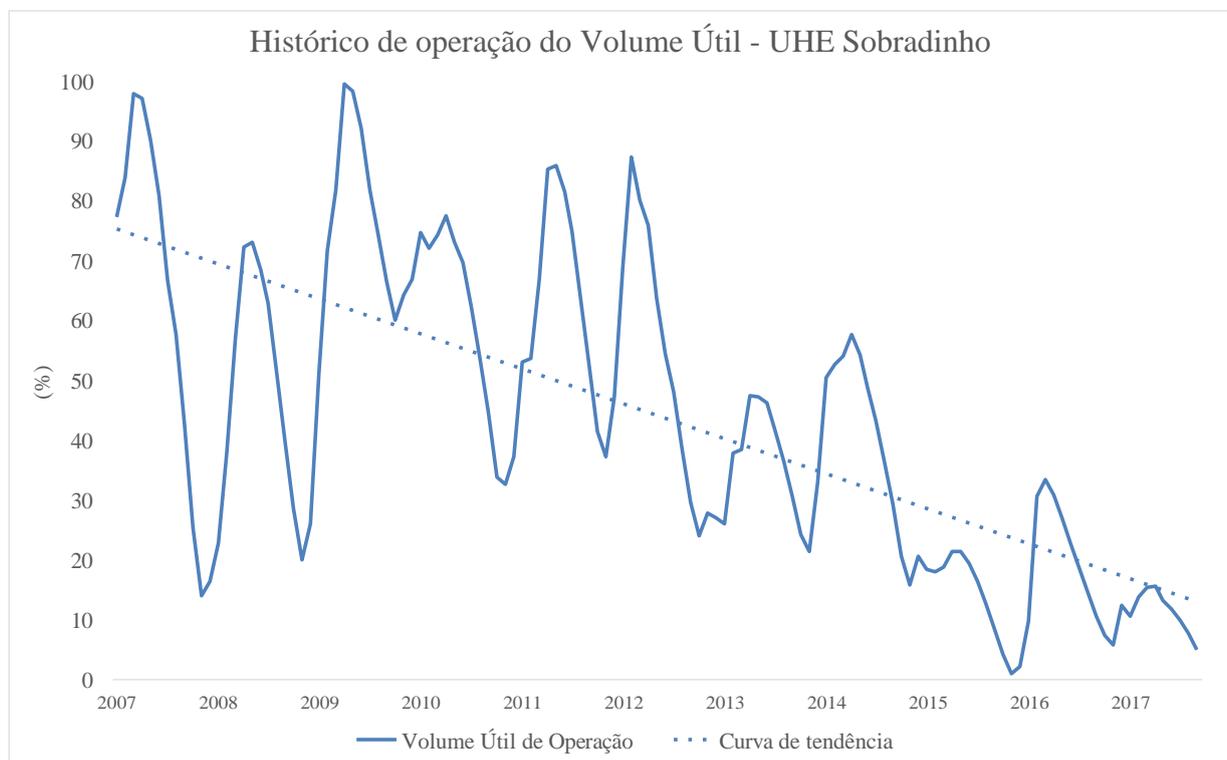


Figura 1. Histórico da última década de operação do reservatório de Sobradinho

Ao se analisar históricos de operação desde 2013, é possível verificar que os índices pluviométricos estão cada vez mais abaixo das médias históricas para esta região. No final deste ano de 2017 o reservatório de Sobradinho chegará pela primeira vez ao seu volume morto, o que pode significar a interrupção completa de geração de energia elétrica da usina, conforme informado pela operadora da usina, CHESF.

A mudança climática prevista deverá influenciar de forma abrangente os índices de precipitação de chuva e a hidrologia. Ainda que estes impactos possam variar de local para local, de forma geral, a expectativa é que ocorram períodos curtos de chuvas intensas alternados por períodos de longas estiagens, em que assim a mudança climática afeta

por consequência a disponibilidade de água e de energia; sendo ainda mais importante e necessário o armazenamento de água (World Energy Council, 2016).

É previsto para os próximos anos, conforme dito pela Agência Nacional de Águas (2017), que os períodos de índices máximos e mínimos vão de acentuar e que a variabilidade será cada vez menos regular, dificultando uma maior previsibilidade dos recursos e consequentemente um planejamento a médio e longo prazo para o melhor aproveitamento deste recurso.

Diversas pesquisas indicam que o Nordeste será uma das regiões mais afetadas com a falta de disponibilidade hídrica em consequência das mudanças climáticas. Alguns modelos de circulação geral feitos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas, que tem como função simular o clima em escala global, apontam para esta escassez em função tanto do aumento da temperatura global quanto da redução dos níveis de precipitação.

Atualmente, a situação referente ao abastecimento energético na região não tem um cenário mais dramático em função do papel fundamental que as usinas eólicas e térmicas têm feito na região, em que dados do Operador Nacional do Sistema (ONS) mostram que estas duas fontes correspondem a 85% da geração do Nordeste no momento atual. O governo tem destacado a geração térmica fora da ordem de mérito para preservação do nível dos reservatórios, ainda que isto signifique um aumento na tarifa de energia elétrica; o que poderia ser ainda mais agravado caso o contexto econômico atual do Brasil não fosse de estagnação da economia em função do conturbado momento político vivenciado pelo país.

O vasto recurso hídrico presente no Brasil permitiu ao longo dos anos a construção de diversas usinas hidrelétricas, e muitas delas com reservatórios para armazenamento de energia significativamente grandes, como é o caso da UHE Sobradinho.

O aproveitamento hidrelétrico de Sobradinho está situado no estado da Bahia, a aproximadamente 40 km das cidades de Juazeiro na Bahia e de Petrolina em Pernambuco. A usina está instalada no rio São Francisco, principal rio da região nordestina, com uma bacia hidrográfica da ordem de 630.000 km² e extensão de 3.200 km. Possui a função não somente de geração de energia, como também de regularização de recursos hídricos da região, promove o abastecimento de água para a população, fornece água para irrigação, agropecuária e de navegação a partir de uma eclusa de grande porte instalada na barragem.

O reservatório de Sobradinho é dito de acumulação possuindo cerca de 320 km de extensão e uma área superficial de 4.214 km². Sua capacidade de armazenamento gira em torno de 34 bilhões de metros cúbicos ao se considerar sua cota nominal de 392,50 metros. A casa de força compreende 6 (seis) unidades geradoras acionadas por turbinas tipo Kaplan com potência unitária de 175 MW, totalizando 1.050 MW. A vazão turbinada de cada turbina corresponde a 710 m³/s considerando a queda líquida nominal de cada máquina igual a 27,2 metros.

O estudo de caso propõe avaliar o armazenamento adicional possível de ser realizado ao se incorporar à usina hidrelétrica uma planta solar de igual potência da turbina Kaplan correspondente a 175 MW. Assim a aplicação do complemento das fontes solar e hidráulica se traduz no conceito de tornar a geração fotovoltaica uma vazão adicional ao reservatório. Este complemento irá depender de fatores como a variação interanual dos recursos, o regime de operação da usina hidrelétrica, a disponibilidade operacional da unidade geradora, do despacho requerido, dentre outros (Margeta e Glasnovic, 2011).



Figura 2. Usina hidrelétrica de Sobradinho e Usina FV Virtual

Os dados reais de geração consolidados, que contemplam estas variáveis, foram obtidos do histórico de operação da usina disponibilizados pelo ONS e tratados para serem analisados. Sendo assim foi obtida a média mensal da capacidade útil do volume do reservatório desde 1999 até 2017 e comparou-se com a disponibilidade de irradiação na mesma região, conforme ilustrado no gráfico da Figura 3, em que assim se observa uma possível complementariedade em relação a disponibilidade útil do reservatório em função da variação dos índices de irradiação.

Nos meses em que, historicamente, a disponibilidade de água diminui a valores mínimos o índice de irradiação atinge valores máximos indicando assim que este recurso pode ser utilizado para armazenar o recurso hídrico em

períodos críticos quando se faz mais necessário. Em contrapartida, em meses chuvosos onde o reservatório possui sua maior disponibilidade de água é quando os índices de irradiação diminuem justamente devido aos maiores índices pluviométricos registrados para este período.

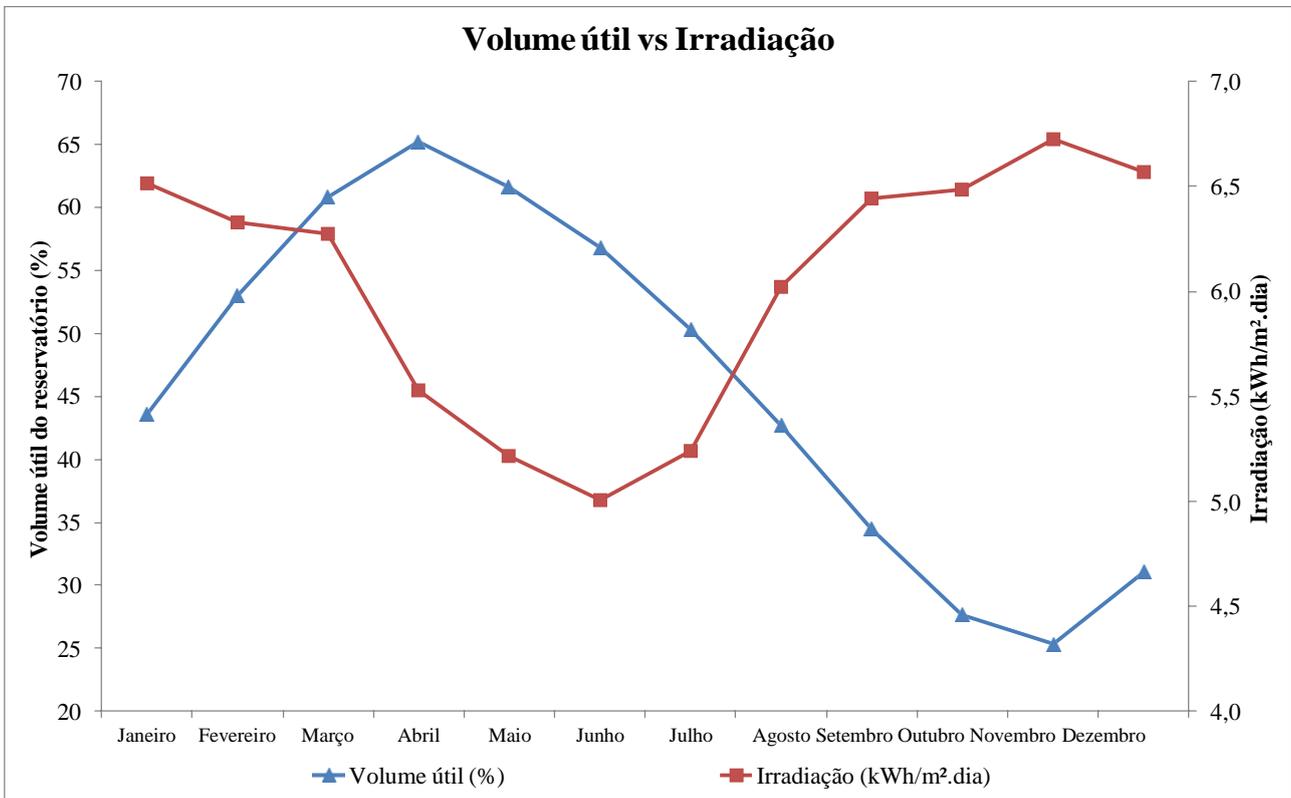


Figura 3. Relação do volume útil do reservatório e da irradiação solar

A área estimada para a implantação da usina virtual fotovoltaica com 175 MW de potência foi de aproximadamente 350 ha. Com dados de irradiação solar do local obtidos a partir do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição foi possível obter uma estimativa média de geração fotovoltaica mensal (Pereira *et al.* 2017). Os dados de geração hidráulica da usina de Sobradinho foram obtidos a partir do histórico de operação de 10 anos da hidrelétrica disponibilizado pelo ONS, bem como demais dados de vazão afluente, defluente, turbinada e vertida.

A formulação do problema foi feita considerando o balanço de volumes da usina, em que:

Se a Vazão Afluente > Vazão Defluente, logo o Volume útil aumenta;

Se a Vazão Afluente = Vazão Defluente, logo o Volume útil permanece constante;

Se a Vazão Afluente < Vazão Defluente, logo o Volume útil diminui.

Sendo assim a partir do balanço de volumes é possível estabelecer uma relação da geração fotovoltaica que correspondente ao volume acrescido referente a vazão turbinada que uma turbina hidráulica deveria consumir durante o período de geração considerado. O acréscimo percentual calculado ao volume útil considerando as médias históricas mensais pode ser observado no gráfico da Figura 4 onde ilustra-se a curva do volume útil real do reservatório em comparação com o volume útil estimado a partir do armazenamento adicional de água em função da geração fotovoltaica integrada a usina hidrelétrica.

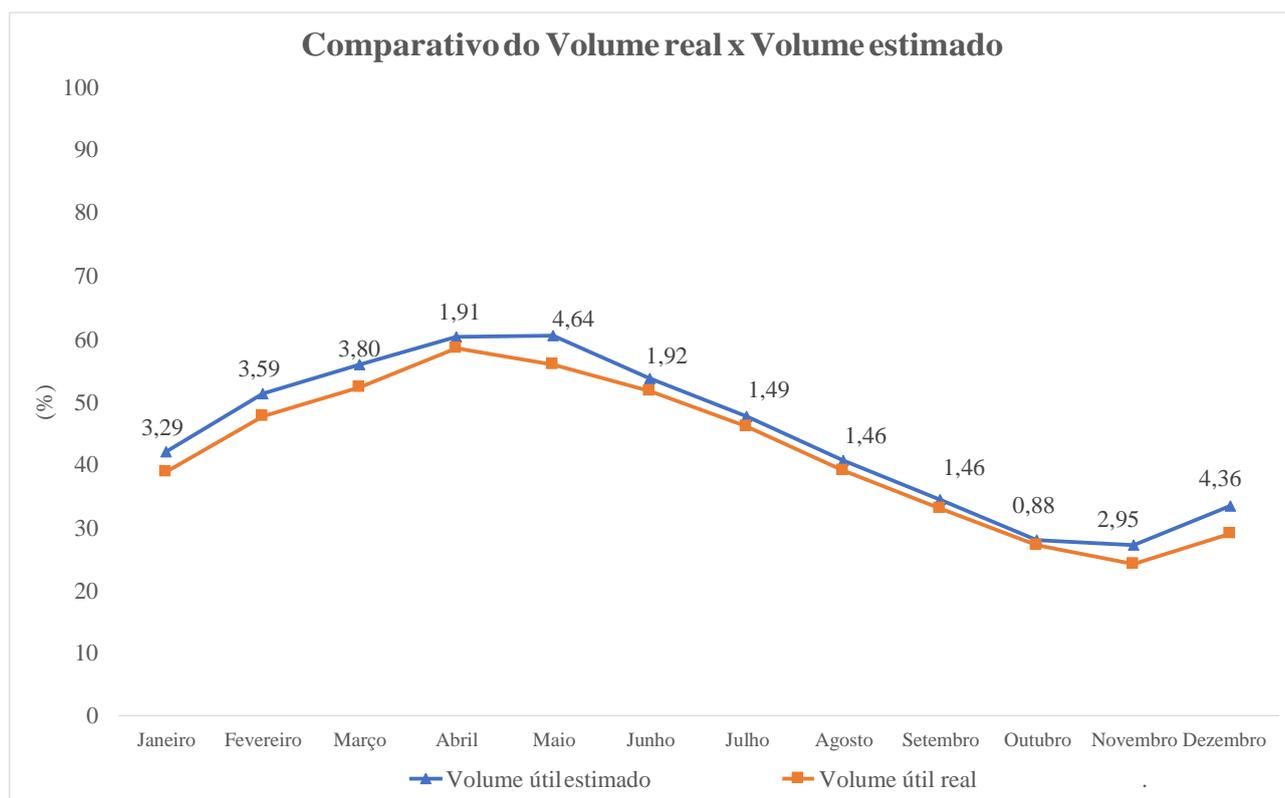


Figura 4. Gráfico comparativo do volume real x volume estimado

A Tabela 1 indica os valores consolidados, referente ao volume útil estimado a partir da consideração da geração fotovoltaica integrada a usina hidrelétrica em relação ao volume útil real, obtidos ilustrados gráfico da Figura 4.

Tabela 1. Dados de volume útil estimado e volume útil real

Mês	Volume estimado (%)	Volume Real (%)
Janeiro	41,95	38,66
Fevereiro	51,22	47,63
Março	55,92	52,12
Abril	60,34	58,43
Mai	60,43	55,79
Junho	53,54	51,62
Julho	47,50	46,01
Agosto	40,48	39,02
Setembro	34,30	32,83
Outubro	27,95	27,07
Novembro	27,06	24,11
Dezembro	33,32	28,97

Do resultado obtido destaca-se que os dados de vazão vertida para todo o período analisado mostram que a característica de operação do reservatório é de não possuir energia excedente, ou seja, o reservatório não repõe por completo seu volume, onde assim toda água acumulada pode ser aproveitada para a geração de energia; uma premissa importante para a estimativa realizada. De toda a última década analisada a partir dos dados obtidos do ONS somente os meses de abril e maio de 2009 indicaram uma pequena vazão vertida igual a 222 e 151 m³/s, respectivamente; o que pode ser considerado desprezível dentro dos volumes considerados na análise. Do gráfico da Figura 4 os percentuais destacados referentes ao aumento do volume útil, apesar de se mostrarem relativamente pequenos, fazem referência ao volume de todo o reservatório de Sobradinho; considerado de grande acumulação com capacidade de mais de 34 bilhões

de metros cúbicos de água; em que assim mesmo percentuais pequenos representam quantidades significativas de armazenamento adicional de água.

Ressalta-se que foi escolhida uma potência para a planta fotovoltaica igual a potência de uma das seis turbinas hidráulicas, em que um estudo com uma planta fotovoltaica de potência maior sugere uma economia ainda maior de água de acumulação. A definição deste ponto ótimo pode ser obtida ao se completar o estudo com uma análise econômico financeira (Kittner *et al* 2016), o que não é o foco do presente trabalho.

5. CONCLUSÕES

A operação conjunta permite uma redução do consumo de água do reservatório quando a geração fotovoltaica está disponível, podendo então o recurso hidráulico ter seu armazenamento aumentado buscando assim ser melhor aproveitado para atender, por exemplo, os picos de demanda de energia; trazendo maior estabilidade e confiança para o atendimento do despacho necessário.

Esta capacidade da complementariedade entre a energia fotovoltaica e a geração hidráulica irá variar em função da disponibilidade do recurso solar em determinados períodos, se secos, se nublados ou se chuvosos. Dentro os benefícios possíveis de se obter podem-se destacar:

- A compensação a curto prazo a partir da geração hidráulica complementar buscando a suavização das flutuações (curva “dente de serra”) da geração fotovoltaica;
- Permitir a geração complementar durante os picos de demanda e horários noturnos buscando a despachabilidade da geração conjunta fotovoltaica/hidráulica;
- Compensação da geração hidráulica a partir de geração fotovoltaica com o intuito de contribuir com o armazenamento de energia potencial em forma de água no reservatório para ser utilizado durante períodos de seca e estiagem.

A integração de fontes intermitentes em larga escala surge como uma solução viável e tem sido estudada mais recentemente por diversos segmentos do setor e pesquisadores. Em particular, a complementariedade das fontes solar e hidráulica traz um potencial significativo para permitir o controle de geração a partir da possibilidade de rápido ajuste da energia em função da demanda de carga e do aumento da capacidade de geração por mais tempo trazendo uma maior segurança e confiabilidade para a operação do sistema elétrico.

Destaca-se que políticas públicas, em função do atendimento as exigências ambientais e metas relacionadas as alterações climáticas, que promovam e favoreçam ao desenvolvimento e implantação das fontes renováveis em larga escala se tornam um fator fundamental para o crescimento destas fontes uma vez que seu custo de implantação ainda é superior quando comparado com as outras fontes. Vale ressaltar que a implantação de uma usina fotovoltaica que se incorpora em uma usina hidrelétrica já existente é uma solução interessante que contribui com a diminuição destes custos.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas (ANA). Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em 20/10/2017
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 06/10/2017
- An, Y., Fang, W., Ming, B., Huang, Q., 2015. Theories and methodology of complementary hydro/photovoltaic operation: Applications to short-term scheduling, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, 063133, pp. 1-13.
- Beluco, A., Souza P. K., Krenzinger, A. 2012. A method to evaluate the effect of complementarity in time between hydro and solar Energy on the performance of hybrid hydro PV generating plants, *Renewable Energy*, vol. 45, pp. 24-30.
- Canales F. A., Beluco, A., Mendes C. A. B., 2015. A comparative study of a wind hydro hybrid system with water storage capacity: conventional reservoir or pumped storage plant?, *Journal of Energy Storage*, vol. 4, pp. 95-105.
- Desmukh, M. K., Desmukh, S. S., 2008. Modeling of hybrid renewable energy systems, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 235-249.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Estudos de Planejamento da Expansão da Geração – Avaliação da Geração de Usinas Híbridas Eólico-Fotovoltaicas – Proposta Metodológica e Estudos de Caso, EPE-DEE-NT-025/2017-r0, p. 36, 24 de Abril de 2017.
- Fang, W., Huang, Q., Huang, S., Yang, J., Meng, E., Li, Y., 2017. Optimal sizing of utility-scale photovoltaic power generation complementarily operating with hydropower: A case study of the world’s largest hydro-photovoltaic plant, *Energy Conversion and Management*, vol. 136, pp. 161-172.
- Glasnovic, Z., Margeta, J., 2009. The features of sustainable Solar Hydroelectric Power Plant, *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1742-1751.
- International Renewable Energy Agency (IRENA), 2016. The power to change: Solar and Wind cost reduction potential to 2025, ISBN 978-92-95111-97-4, p. 98.
- Kittner, N., Gheewala, S. H., Kammen, D. M., 2016. Energy return on investment (EROI) of mini-hydro and solar PV systems designed for a mini-grid, *Renewable Energy*, vol. 99, pp. 410-419.

- Kougias, I., Szabó, S., Monforti-Ferrario, F., Huld, T., Bódis, K., 2016. A methodology for optimization of the complementary between small-hydropower plants and solar PV systems, *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 1023-1030
- Li, F. F., Qui, J., 2015. Multi objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system, *Applied Energy*, pp. 1-08.
- Margeta, J., Glasnovic, Z., 2011. Exploitation of temporary water flow by hybrid PV-hydroelectric plant, *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 36, pp. 2268-2277.
- Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2017. Plano Decenal de Expansão de Energia 2026. Operador Nacional do Sistema (ONS). Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>>. Acesso em 20/10/2017
- Pereira, E. B., Martins F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Rüther, R., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª Edição, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, p. 80.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN 21), 2017. *Renewables Global Futures Report: Great debates towards 100% renewable energy*, ISBN 978-3-9818107-4-5, p. 98.
- Risso, A., Beluco, A., 2017. Bases for a methodology assessing time complementary in space, *Energy and Power Engineering*, vol. 09, pp. 527-540.
- Seeling-Hochmuth, G. C., 1997. A combined optimisation concept for the design and operation strategy of hybrid-pv Energy systems, *Solar Energy*, vol. 61, No 2, pp. 77-87.
- Teixeira, L E., Caux J., Beluco, A., Bertoldo, I., Louzada, J. A. S., Eifler, R. C., 2015. Feasibility Study of a Hydro PV Hybrid System Operating at a Dam for Water Supply in Southern of Brazil, *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 3, pp. 70-83.
- Wang, G., Ciobotaru M., Agelidis, V. G., 2015. Dispatch performance analysis of PV power plants using various energy storage capacities, 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 01-06.
- World Energy Council, 2016. *World Energy Resources – Hydropower*, p. 53.

THE STUDY OF COMPLEMENTARY ENERGY GENERATION BETWEEN SOLAR AND HYDRAULIC SOURCES

Abstract. *The aim to meet the commitment of reducing greenhouse gases to minimize the effects of climate change goes through solutions such as the consumption of energy from renewable sources. This significant increase of demand brings consequences for the reliability and stability of the electric power system operation. The sustainability of power generation from renewable sources goes through handling and search for solutions to deal with the intrinsic characteristic of intermittence and non-dispatchable of these sources. An interesting solution is the integration of solar and hydraulic sources, mainly in Brazil that has, in your energy matrix, mostly hydroelectric plants and at the same time has high levels of solar radiation in practically the entire territory. Therefore the storage of photovoltaic generation is done in the form of conservation of energy in the reservoir present as hydraulic potential energy for the hydroelectric power plant. In addition to providing a more stable and reliable photovoltaic generation, the complementarity of these sources also allows a gain of water storage in critical periods of drought where the hydraulic generation can be compromised. The study proposed with the Sobradinho reservoir aimed the estimation of gain in terms of volume of the reservoir.*

Key words: *Hybrid parks, Complementary of intermittent energy sources, Hydro/photovoltaic power plant*