

A sustentabilidade como perspectiva para repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas no Brasil: método para estimativas

Marcos André de Oliveira ^I
Márcio Santos Sepúlvia de Oliveira ^{II}
Anna Karolyne Souza Miranda ^{III}

Resumo: A repotenciação é uma opção sustentável para hidrelétricas relativamente antigas. Contudo, ainda encontra-se em um processo de desenvolvimento dos seus aspectos técnicos, socioambientais e regulatórios, no Brasil. Além disso, existem poucos trabalhos disponíveis na literatura sobre o tema. Uma lacuna da área é a falta de metodologias que direcionem a mensuração dos benefícios nos empreendimentos aptos, para priorização dos mais oportunos, redução dos riscos e incentivo dessa prática no âmbito nacional, regional e dos agentes. Neste trabalho apresenta-se uma discussão teórica das práticas atualmente empregadas e propõe-se um método acessível (simples, rápido e de baixo custo) para suporte à tomada de decisão quanto à aplicabilidade da repotenciação em pequenas centrais hidrelétricas. Os resultados explicitam a sustentabilidade ambiental da prática frente às limitações e desafios que envolvem a construção de grandes hidrelétricas, atualmente.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Repotenciação, Pequenas Centrais Hidrelétricas, Ganho Máximo Teórico, Aproveitamento ótimo, Reforma, Aumento de capacidade, Recursos renováveis.

^I Laboratório de Hidráulica, Departamento de Eng. Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, TO, Brasil.

^{II} Laboratório de Hidráulica, Departamento de Eng. Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, TO, Brasil.

^{III} Programa de Pós-Graduação em Comunicação e Sociedade, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, TO, Brasil.

São Paulo. Vol. 25, 2022

Artigo Original

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200069r1vu2022L3AO>

1 Introdução

É bem conhecido que a matriz elétrica brasileira é dependente majoritariamente da fonte hídrica. Em 2019 o país esteve em primeiro lugar entre os dez principais com maiores aumentos individuais de capacidade instalada (IHA, 2020). No mesmo ano, 64,9% da oferta interna foi suprida por hidrelétricas e, considerando as demais fontes renováveis, esse valor sobe para 83,0% (EPE, 2020).

A repotenciação de hidrelétricas, em todo mundo, tem sido impulsionada pela falta de energia perene e pelo ritmo lento dos novos programas de acréscimo de energia hidrelétrica (RAHI; CHANDEL, 2015). Ademais, há a necessidade de atendimento de metas globais de eficiência, segurança e socioambientais. Além disso, as fontes alternativas de energia elétrica renovável (fotovoltaica, biomassa, eólica, energia das marés e etc.), introduzidas como opções alternativas ou complementares às tradicionais (VASCO et al., 2019), são mais restritivas por serem intermitentes (RAHI; CHANDEL, 2015).

A repotenciação tem sido reportada razoavelmente na literatura, como opção estratégica e competitiva (QUARANTA et al., 2021); abordando as atividades de investigação e experiência prática (ROMERO-AÑAZCO et al., 2020; OLIVEIRA, 2018; AJAO et al. 2016; RAHI; CHANDEL, 2015); nos aspectos para análise de custos (KISHORE et al. 2021; OLIVEIRA, 2017; OGAYAR et al., 2009); e, principalmente, no âmbito da adição, melhoria ou substituição de turbinas e geradores (SILVA et al., 2021; MAGALHAES et al., 2020; KUCHINSKAYA; NOVOZHILOV, 2011; ANEEL, 2011; GÓMEZ et al., 2008; WWF-BRASIL, 2006).

Recentemente, Queiroz et al. (2019) destacou a repotenciação como ação para mitigar as consequências negativas do clima futuro nos sistemas de geração brasileiros. Assim, considerando as especificidades do setor elétrico brasileiro, o presente artigo reflexiona sobre o que constitui a repotenciação enquanto prática sustentável, e como avançar no debate a partir de proposições práticas.

Os aproveitamentos hidrelétricos brasileiros são classificados por potência, em Usina Hidrelétrica – UHE (superior a 30 MW), Pequena Central Hidrelétrica – PCH (superior a 5 MW e igual ou inferior a 30 MW) ou Central Geradora Hidrelétrica – CGH (igual ou inferior a 5 MW), cujos limites e condições foram atualizados recentemente pela Resolução Normativa nº 875 de 2020. As duas últimas classes, de menores dimensões, são de particular interesse para este trabalho e foram nomeadas genericamente de Centrais Hidrelétricas – CH no texto.

Neste cenário, a repotenciação de CH é uma ferramenta oportuna. Isso porque o aumento de energia é acompanhado por mínimos impactos ambientais negativos incrementais (QUARANTA et al., 2021; GOMES, 2013; GYORI, 2007; WWF-BRASIL, 2004), pela garantia de melhor aproveitamento dos recursos hídricos, por um custo reduzido se comparado ao da implantação de novas hidrelétricas e pela possibilidade de interconexão com outros interesses socioambientais locais.

A técnica de repotenciação hidrelétrica é definida como sendo uma intervenção ou conjunto de intervenções nas estruturas, sistemas hidráulicos e equipamentos eletro-

mecânicos envolvidos no processo de conversão energética de um empreendimento já construído, com ganho simultâneo de potência e rendimento (OLIVEIRA, 2018, 2017).

Nacionalmente, esta técnica tem sido considerada para CH com, pelo menos, 20 anos de operação. Sob este critério, 9% das PCH e 35% das CGH em operação no país em 2019 estariam susceptíveis a esta possibilidade. Segundo Oliveira (2018), em torno de 56% da capacidade instalada brasileira no final do ano de 2017 já estava em operação antes de 1997. Assim sendo, a repotenciação também é uma solução para enfrentar o envelhecimento do parque hidrelétrico nacional (EPE, 2021, 2019; OLIVEIRA, 2012).

Atualmente, tão importante quanto o estímulo governamental para adoção generalizada e consciente da repotenciação como prática contínua em prol da sustentabilidade, é a adoção de uma abordagem sistêmica para avaliação dos seus benefícios socioambientais. A avaliação multidimensional da sustentabilidade da energia hidrelétrica é um tema de discussão atual (TANG et al., 2018).

O suprimento da demanda por energia elétrica no país, que vai crescer aproximadamente 3,1% ao ano entre 2019 e 2030 (EPE, 2021), é reconhecidamente de interesse público. As vantagens da implantação de uma grande usina hidrelétrica (UHE) no Brasil se alicerçam, historicamente, na importância da reserva estratégica em seu reservatório de acumulação, no seu custo competitivo, no seu alto fator de capacidade frente às outras fontes renováveis, e na sua capacidade de atendimento na ponta do consumo. Por outro lado, existem as desvantagens da multiplicidade de impactos ambientais negativos que se consolidam durante o ciclo de vida desse empreendimento. Estes dois aspectos antagônicos constituem debates e controvérsias históricas no planejamento energético brasileiro.

Por muito tempo as vantagens econômicas se sobrepuseram aos demais interesses envolvidos. No entanto, com as crescentes limitações ambientais que estão sendo estabelecidas para proteger a resiliência ecossistêmica e sociocultural dos locais já afetados ou a serem afetados pela construção de empreendimentos hidrelétricos (MORETTO et al., 2012), estas disputas têm se intensificado.

Sabe-se que estas disputas se dão, principalmente, por causa do território. Segundo Zhouri e Oliveira (2007) o território é entendido como propriedade pelo setor elétrico, que atribui uma valoração econômica a este, como qualquer outra mercadoria. Considerando diferentes olhares dentro da geografia, Vargas (2014) faz exposições de significados atribuídos ao território e evidencia sua complexidade e diversidade de conteúdos. Contudo, conclui que, independentemente da vertente teórica de abordagem, é possível dizer que o território é concreto na medida em que está constituído por uma materialidade reconhecível de elementos da natureza e de objetos criados pelo homem, mas também abstrato, porque remete a construções subjetivas, significações e representações que se constituem em referentes simbólicos.

Interpretado como um processo social de apropriação e transformação do espaço, o território, dentro das características que permitem diferenciá-lo do seu entorno, é uma interação dinâmica de natureza (meio físico e biótico) e práticas sociais (meio antrópico). Neste sentido, a teoria de abordagens integradas para o gerenciamento dos usos múltiplos da água passou a reger a governança da energia hidrelétrica desde o nível local até

o internacional (LINDSTRÖM; RUUD, 2017), promovendo não só o desenvolvimento e a gestão coordenados da água, mas do território e dos recursos relacionados (JONES et al., 2006).

Os motivos que colocam a repotenciação de hidrelétricas como sendo uma opção sustentável são: a dinamicidade dos recursos naturais que exige atualizações constantes nas condições de contorno que regem o dimensionamento ou a operação de usinas hidrelétricas; a mudança nos critérios de avaliação ou percepção das interações socioambientais de um projeto; os avanços tecnológicos; e a crescente demanda por energia. Além da sua contribuição para compensar o envelhecimento do parque hidrelétrico brasileiro.

Contudo, a quantificação realista do incremento de energia a ser gerada por meio da repotenciação de hidrelétricas, no domínio regional ou nacional, está atrelada à avaliação individualizada desses ativos, ou passivos no caso de usinas desativadas (OLIVEIRA, 2018). Portanto, este trabalho justifica-se, pois além da discussão teórica das práticas atualmente empregadas e de uma abordagem da repotenciação de CH pela perspectiva da sustentabilidade, propõe uma solução concreta para suporte à tomada de decisão quanto à sua aplicabilidade.

As principais contribuições deste trabalho são novos insights sobre os aspectos sustentáveis da repotenciação de CH e a explicitação do Método do Ganho Máximo Teórico – MGMT. O MGMT compõe-se de análises dimensionais destes aproveitamentos e de técnicas para definir a modalidade de repotenciação. A CGH Bagagem, localizada no estado do Tocantins, foi escolhida para demonstrar a aplicação do método proposto. A escolha se deve ao conhecimento prévio sobre as especificidades do empreendimento e proximidade espacial dos autores; à disponibilidade suficiente de dados (cedidos pelo órgão ambiental estadual); e por se localizar na Amazônia legal, onde os desafios para ampliação da oferta sustentável de energia elétrica são maximizados.

2 Desafios para implantação e repotenciação de hidrelétricas no Brasil

A implantação de novos empreendimentos hidrelétricos, principalmente de grande porte, está sendo cada vez mais limitada, sobretudo por questões socioambientais (OLIVEIRA, 2017; GOMES, 2013; GYORI, 2007; EPE, 2007), ao passo que a maior parte do potencial hidrelétrico a ser explorado (concentrado nas regiões Norte e Centro-Oeste) está localizada nos biomas da Amazônia e do Cerrado (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2021; EPE 2007), que têm notoriamente grande valor ambiental para o país (MORAN, 2020). Este assunto está bem discutido e sintetizado em Oliveira (2018).

Interessantemente, Corà *et al.* (2019) sumariza cinco desafios para projetos hidrelétricos a partir da perspectiva ambiental: continuidade ecológica, ou seja, migração de peixes e transporte de sedimentos; qualidade da água; vazão ecológica; pico de vazões a jusante, que podem afetar negativamente a seção hidromorfológica do rio e os organismos aquáticos (mortalidade por encalhe, modificação do habitat, qualidade da água, etc.); e a hierarquia de mitigação para a biodiversidade.

Os impactos ambientais provocados pela implantação de uma hidrelétrica, nos meios

físico, biótico e antrópico, relacionam-se, principalmente, com a sua localização geográfica e as características do seu reservatório (área alagada, área alagável, volume útil, tempo de retenção, capacidade de amortecimento de cheias, e etc.). Porém, estes impactos são sentidos e ponderados de formas diferentes pelos diversos atores sociais envolvidos e uma visão holística sobre o tema envolve a integração dos enfoques técnico e participativo.

Do ponto de vista dos afetados por hidrelétricas em bacias hidrográficas da Amazônia, Utsunomiya *et al.* (2020) chamam a atenção, por exemplo, para o desafio de uma avaliação sistêmica dos impactos ambientais ao se tratar de povos indígenas e comunidades tradicionais, em oposição a usual fragmentação dos estudos em meio biótico, físico e socioeconômico.

Sobre os impactos cumulativos decorrentes de hidrelétricas, Athayde *et al.* (2020) ponderam a mudança de foco do projeto hidrelétrico em si para o sistema socioecológico local e regional afetado por diversas ações ou projetos no território, tais como outras barragens, mudanças climáticas, mudanças demográficas, dentre outros, como uma direção resiliente e sustentável para a Amazônia brasileira. Assim sendo, Perius e Carregaro (2012) defendem a conveniência do fortalecimento das CH, como energia renovável, ambientalmente menos impactante e socialmente mais adequada.

Além disso, Castilho (2017) destaca o agravamento de conflitos de usos múltiplos da água, sendo um desses usos a geração de energia, se considerados os interesses relacionados à terra e à água por diferentes atores e as contradições que demandarão novas formas de produção de energia. E, acertadamente, Castilho (2019) chama a atenção para ampliação do debate e defesa da diversificação da matriz energética brasileira, com alícerces na eficiência, descentralização, fortalecimento da produção local, responsabilidade ambiental, equidade e respeito aos povos.

Os avanços para efetiva repotenciação de hidrelétricas no Brasil têm-se intensificado para grandes usinas hidrelétricas, UHE, principalmente para adição de grupos geradores nas que dispõem de poços vazios (EPE, 2019, 2012; LEMOS, 2014). Pelo contrário, ainda não é conhecido o potencial integral para repotenciação de CH.

Para conhecimento do potencial a repotenciar de CH é de fundamental importância o desenvolvimento de metodologias para identificação e quantificação de seus benefícios, bem como a criação de mecanismos regulatórios de reconhecimento e remuneração da energia incremental disponibilizada. Isso corrobora a pertinência do presente trabalho, porque muitos agentes geradores não podem ou não querem correr riscos com a repotenciação, o que inclui o gasto com os estudos e levantamentos complementares para diagnóstico do aproveitamento hidrelétrico, subsequente estudo de viabilidade e projeto de repotenciação.

Proposições regulatórias para incentivar a disseminação da repotenciação de CH passam pela dispensa da revisão dos inventários; definição de prazos para aprovação e obtenção de autorizações; cenário de competição pelos aproveitamentos; definição quanto à prorrogação da concessão; alteração do regime de concessão/autorização (BARROSO, 2009); e uso da potência incremental da repotenciação como Reserva de Potência Operativa - RPO (EPE, 2019; ANEEL, 2011).

Outro ponto importante sobre o aspecto regulatório da repotenciação relaciona-se com a necessidade de simplificação do licenciamento ambiental que, geralmente, segue as mesmas diretrizes de um empreendimento novo. Mas, exceto casos onde há aumento do nível operativo do reservatório, ou seja, aumento da área alagada, ou casos excepcionais, não se verifica impedimentos ambientais para repotenciação de CH, muito pelo contrário, os benefícios são inúmeros (OLIVEIRA, 2012) para o uso estratégico e ambientalmente viável dos recursos naturais em uma área já impactada.

Desse modo, é imperativo o estímulo à repotenciação de CH, que vai de encontro ao interesse de toda sociedade no desenvolvimento de soluções para geração descentralizada de energia elétrica, através de fontes renováveis, e do desenvolvimento contínuo das práticas sustentáveis. As contribuições sustentáveis da implantação criteriosa de CH e da repotenciação das existentes, o que inclui as desativadas, devem constar no centro das discussões sobre os desafios e as limitações que envolvem a construção de novas UHE no Brasil.

3 Abrangência dos benefícios da repotenciação de centrais hidrelétricas

O fato dos aproveitamentos hidrelétricos serem geralmente de grande porte e complexos não justifica qualquer negligência com os aspectos de sustentabilidade associados (LIU *et al.*, 2013). A dificuldade reside na mensuração de questões socioambientais tratadas ainda hoje como externalidades, quando se verificam conflitos e contradições de interesse mesmo em tópicos que deveriam estar bem delimitados já no licenciamento ambiental brasileiro.

A sustentabilidade é um conceito multifacetado, pois envolve o meio ambiente, a economia e a sociedade (HAYASHI *et al.*, 2014). Várias definições de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, com algumas pequenas variações, estão disponíveis na literatura (LIU *et al.*, 2013). O desenvolvimento sustentável é o conceito central (ZHANG, 2017), e foi apresentado no Relatório *Brundtland* de 1987: “o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades” (WCED, 1987, p.15). O termo sustentabilidade já é um desenvolvimento desse conceito inicial e, na essência, significa que o que se está fazendo não é à custa das gerações futuras (LIU *et al.*, 2013; WCED, 1987).

Dessa forma, a repotenciação de CH tem uma contribuição relevante, mais no sentido da sustentabilidade da prática do que no sentido quantitativo de acréscimo de potência.

A repotenciação para CH pode ser concebida em três modalidades: reabilitação, revitalização ou ampliação (OLIVEIRA, 2017). São os chamados fatores de defasagem temporal que indicam a possibilidade de repotenciação de hidrelétricas. Estes fatores estão relacionados, dentre outros, ao desgaste das estruturas, obsolescência do dimensionamento e defasagem tecnológica de um empreendimento; e são responsáveis pela consolidação dos principais ganhos energéticos com a repotenciação: ganhos de vazão, ganhos de queda, ganhos de rendimento e ganhos operacionais (EPE, 2019; OLIVEIRA; BORTONI, 2012).

Esta permite o aproveitamento ótimo (ver OLIVEIRA, 2012, p. 34) em empreendimentos já construídos, muitas das vezes subdimensionados, com as seguintes vantagens: área com impactos já consolidados devido à implantação e operação do projeto; minimização dos impactos ambientais negativos incrementais; maximização dos impactos ambientais positivos incrementais; implantação em curto prazo; acréscimo de potência dentro de realidades locais; custos menores quando comparados com a construção de um novo empreendimento; além da possibilidade de compensação em créditos de carbono, adquiridos em função da substituição de energia térmica por energia hidrelétrica no sistema de potência.

No que se refere à atratividade para o investidor, Gomes (2013) estima de 4 a 5 anos para retorno do capital. Concordante com Gyori (2007), que estimou um tempo de retorno de 4,8 anos, e com Oliveira (2012), que estimou um tempo de retorno médio de 5,2 anos. Isso, frente ao tempo de retorno do investimento para novas CH, que é em torno de 10 a 20 anos em média.

Alguns estudos de repotenciação de CH foram realizados no Brasil. A CGH Lajeado, estado do Tocantins, teve sua solução de repotenciação apresentada por Oliveira e Bortoni (2012), com potência instalada passando de 1,8 MW para 8 MW, a um custo final de 3.668 R\$/kW; resultado alcançado sem nenhuma alteração no nível do seu reservatório. Colferai (2017), por exemplo, constatou subaproveitamento de vazões na CGH Salto São Luiz, estado do Paraná.

Estudos realizados no estado de São Paulo ressaltaram casos com possibilidade de quadruplicação da potência instalada originalmente, onde Bianchi e Souza (2003) estimaram simplificadamente a adição de 117 MW com a repotenciação de 90 centrais hidrelétricas, em sua maioria, com idade média de 100 anos na época. Veiga e Bermann (2002) relataram ganhos de potência instalada entre 21% e 33% para duas CH desativadas. Incrementos de 75% na PCH Sodré e a inclusão da comercialização de créditos de carbono para redução da amortização do investimento foram comunicados por Gyori (2007). Por outro lado, a repotenciação de CH desativadas nas regiões do Vale do Paraíba e Serra da Mantiqueira, para promover o ecoturismo e a educação ambiental, adicionalmente ao benefício energético, foi abordada por Santos (2007).

Interessantemente, experiências internacionais recentes confirmam a repotenciação como sendo um caminho para sustentabilidade ambiental. Na Itália, por exemplo, a sua contribuição para a independência energética de comunidades locais, aproveitamento do potencial não utilizado e preservação do patrimônio industrial histórico foi destacada (GAGLIANO *et al.*, 2014). Na América Latina, há relatos de casos, como o da PCH El Amarillo, na região sul do Equador, cuja análise da reativação/repotenciação culminou em uma capacidade de 3,3 MW contra os 675 kW, com viabilidade econômica, contribuição para o desenvolvimento local e redução de emissões de CO₂ (ROMERO-AÑAZCO *et al.*, 2020).

A partir do exposto, infere-se que a preservação do patrimônio industrial histórico e a promoção do ecoturismo ou da educação ambiental ainda são externalidades na mensuração dos benefícios ambientais da repotenciação de CH que podem ser reativadas.

Outra externalidade é a falta de estudos e discussões sobre a aplicação de tecnologias ambientalmente amigáveis como, por exemplo, de turbinas amigáveis para peixes (OLBERTZ *et al.*, 2021; SCHWEVERS; ADAM, 2020; HOGAN *et al.*, 2014), no âmbito da repotenciação/reativação de pequenos aproveitamentos de baixa queda. Porém, tais considerações, entre outras, deveriam constituir uma abordagem mais holística compatível com a sustentabilidade hidrelétrica.

Ademais, até onde é de conhecimento dos presentes autores, CH têm sido usadas com fins socioambientais, para além da geração de energia no estado de Minas Gerais, por exemplo. A CGH Luiz Dias foi amplamente usada para ensino e extensão pela Universidade Federal de Itajubá. A CGH NR auxilia no beneficiamento de pescado da empresa Trutas NR. A CGH Fazenda Boa Esperança, após repotenciação, passou a dar suporte às atividades agroecológicas e ao turismo local na serra da Mantiqueira.

Em síntese, todos os benefícios da repotenciação estão contidos nas dimensões da sustentabilidade (ambiental, social e econômica). Todavia é necessário atentar-se para internalização de aspectos ainda tratados como externalidades. Isso pode ser realizado com o mapeamento das interações que a incorporação de um pequeno aproveitamento hidrelétrico pode promover localmente, sem desconsiderar a diversidade de perspectivas e atores sociais envolvidos. Essas interconexões, que são dinâmicas temporalmente, podem ser identificadas e transformadas em oportunidades, devido à menor complexidade desses empreendimentos se comparados com grandes usinas hidrelétricas.

4 O Método do Ganho Máximo Teórico para estimativas

Estudos integrais de viabilidade da repotenciação podem ser impeditivos para proprietários de empreendimentos modestos frente ao risco de não aplicabilidade. Por causa dos custos envolvidos nos levantamentos, estudos e projetos de repotenciação hidrelétrica, uma análise teórica dos benefícios energéticos pode então ser efetuada. Assim, o método proposto originalmente por Oliveira (2012) e desenvolvido no presente trabalho, por ser simples, rápido e de baixo custo, é oportuno para estimativas locais e regionais, para os avanços de estímulo que se fazem indispensáveis.

O MGMT consiste nesta primeira abordagem para estimativas, utilizando-se de dados já disponíveis e tendo como hipóteses simplificadoras a possibilidade de alcance do rendimento máximo teórico para os grupos geradores e/ou o aproveitamento ótimo das vazões afluentes e quedas disponíveis.

Na Figura 1 é apresentado um modelo sintético para aplicação do método. São de interesse para primeira etapa do método as seguintes informações: hidrologia local (vazões características); topografia (queda); curvas de comportamento ou dados de placa dos grupos geradores; dados dimensionais do sistema de adução; série histórica de operação da CH (potência, rendimento, níveis d'água, geração, fator de disponibilidade, etc.). O conhecimento do estado dos equipamentos e das suas vidas úteis remanescentes é desejável neste ponto. Na ausência de algumas dessas informações, dados de literatura ou hipóteses simplificadoras podem ser usados.

Figura 1 – Etapas para aplicação do MGMT



Fonte: Elaboração dos autores.

A segunda etapa consiste na execução de simulações computacionais, que incluem o pré-dimensionamento de alternativas. Os custos também são estimados nessa etapa. A função objetivo é o aproveitamento ótimo do potencial hidrelétrico e as condições de contorno são compostas, dentre outros parâmetros, pelas limitações de ordem técnica e ambiental para as intervenções. As restrições ambientais podem ser impeditivas somente se houver aumento do nível do reservatório; para CH, normalmente dimensionadas a fio d'água, a partir de uma simples derivação do rio, impedimentos ambientais dessa natureza seriam a exceção.

A potência de dimensionamento de uma CH é dada pela equação

$$P = \eta_{ap} \delta Q_p H_B \quad (1)$$

onde, P é a potência instalada (W); η_{ap} é o rendimento global do aproveitamento (adimensional); δ é o peso específico da água (N/m^3); Q_p é a vazão de projeto (m^3/s); e H_B é a queda bruta (m).

Os resultados obtidos indicarão a conveniência da repotenciação e a modalidade mais adequada para sua materialização, que segundo Oliveira (2018, 2017, 2012) pode ser de três tipos: reabilitação, revitalização ou ampliação. A partir daí, pode-se prosseguir ou não com um estudo completo de viabilidade técnica, econômica e ambiental, com a definição dos levantamentos, testes e estudos especializados complementares, necessários para subsidiá-lo. Os estudos ambientais integrais são desenvolvidos nessa etapa subsequente. Se a repotenciação não for factível, as opções são a manutenção e prosseguimento

operacional, a reconstrução ou a desativação, a depender do caso. Portanto, o método proposto dá suporte à tomada de decisão.

5 Resultados e Discussões

5.1 Descrição da CGH Bagagem

A CGH Bagagem encontra-se em operação no rio Bagagem, na sub-bacia 22, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Tocantins, nas coordenadas 11°22'17" Sul e 47°34'32" Oeste, no município de Natividade – TO. A área da bacia hidrográfica do rio Bagagem totaliza 158,5 km² e a área de drenagem contribuinte ao aproveitamento é de 130 km². Teve sua construção iniciada em 1970 e finalizada no ano de 1977. A sua potência de concessão é de 480 kW e encontra-se interligada, através de sua subestação, a uma linha de transmissão de 34,5 kV. O arranjo geral da CGH Bagagem está representado na Figura 2.

Figura 2 – Foto aérea da CGH Bagagem



Fonte: Naturatins (2010).

5.2 O Método do Ganho Máximo Teórico aplicado à CGH Bagagem

Nesta seção são explicitadas as estratégias e as técnicas utilizadas para indicação do aproveitamento ótimo para repotenciação da CGH Bagagem. De destaque têm-se: os critérios de análise dimensional e definição da capacidade máxima dos componentes do sistema de adução atual; o uso do fator de capacidade médio de centrais hidrelétricas em

operação no Brasil; e o uso da vazão média de longo termo para estimativa do potencial teórico máximo, na ausência da curva de permanência de vazões.

Cabe ressaltar que, por indisponibilidade de informações, não foi possível estabelecer completamente as condições de contorno relacionadas ao dimensionamento original do empreendimento. Isto foi contornado pelo uso de dados de interesse público declarados pela proprietária à ANEEL e ao órgão ambiental do estado do Tocantins, pelo conhecimento prévio do local, e pelo uso de Sistemas de Informações Geográficas – SIG, além de estimativas conservadoras frente à literatura especializada.

O conhecimento das consequências dos fatores de defasagem temporal sobre o empreendimento e da confiabilidade limitada dos dados disponíveis, ensejaram a adoção de valores conservadores para as avaliações. A simulação do ganho máximo teórico foi realizada através da aplicação das equações dimensionais clássicas envolvidas. O software Excel foi utilizado para as quantificações dimensionais e variação dos dados de entrada – vazão de projeto, queda e perdas energéticas.

Foram dimensionadas três alternativas de repotenciação. Chegou-se então nas potências incrementais para cada novo arranjo. A projeção dos custos foi realizada por meio de curvas de custos disponíveis na literatura, atualizadas economicamente. Na sequência gerou-se um fluxo de caixa para cada alternativa, para um horizonte de 20 anos, culminando no cálculo do tempo de retorno do investimento. Por fim, estimou-se os ganhos e pôde-se definir os estudos e levantamentos necessários para próxima etapa, que delineará a repotenciação de forma ampla.

5.2.1 Etapa 1: Diagnósticos e Avaliações Preliminares

Encontrava-se disponível apenas o histórico parcial das vazões para o aproveitamento, incluindo a vazão média de longo termo, $Q_{MLT} = 3,77 \text{ m}^3/\text{s}$, e a vazão média, $Q_{media} = 5,30 \text{ m}^3/\text{s}$ (NATURATINS, 2010). Na indisponibilidade da topografia local, o conhecimento expedido da área do empreendimento permitiu a conjectura de traçados realistas. O aproveitamento possui uma pequena barragem, construída em concreto armado, com soleira vertente, apenas para derivação da água. Esta estrutura tem altura máxima e comprimento iguais a 1,34 m e 20,60 m, respectivamente. O seu sistema de adução é constituído por tomada d'água, canal de adução, câmara de carga e conduto forçado.

A casa de máquinas abriga uma turbina Francis de 330 kW e um gerador elétrico de 600 kW. A potência máxima de geração atual é da ordem de 200 kW médios (NATURATINS, 2010) e, comparada à potência de concessão, 480 kW, constata-se um subaproveitamento de 58,33%, principalmente, devido à capacidade restritiva da turbina.

As análises dimensionais do sistema de adução original revelaram uma vazão máxima admissível de $3,08 \text{ m}^3/\text{s}$ para o canal e de $2,90 \text{ m}^3/\text{s}$ para o conduto forçado, respectivamente. O canal é de seção retangular em concreto armado e o conduto forçado é de aço com seção circular. Conclui-se que tanto o canal como o conduto não são restritivos para alcance da potência de concessão, porém, o conduto não apresenta folga para aumento da vazão aduzida. A câmara de carga (para maiores informações ver OLIVEIRA, 2012) não

pôde ter sua capacidade confirmada por falta de dados e, assim, tomou-se como hipótese simplificadora que esta se encontra dimensionada adequadamente.

5.2.2 Etapa 2: Simulação do Ganho Máximo Teórico

Novo aproveitamento hidrelétrico: definição de alternativas

Devido à indisponibilidade da curva de permanência de vazões e da inaplicabilidade da execução de um estudo hidrológico neste estudo de caso específico, foi considerada nos cálculos a Q_{MLT} para estimativa conservadora da nova potência instalada. Como o conduto forçado está subdimensionado ($2,90 \text{ m}^3/\text{s}$) frente às vazões afluentes, vislumbra-se um ganho de vazão, no mínimo, da ordem de $0,87 \text{ m}^3/\text{s}$ tomando-se a Q_{MLT} como referência. A vazão remanescente de 25% da Q_{90} , definida pela Portaria Naturatins n° 904 de 2008, deverá ser considerada posteriormente no estudo de viabilidade e ser mantida a jusante do empreendimento durante todo o tempo.

A queda bruta, H_B , originalmente aproveitada é 28,14 m. Sendo a queda bruta definida como a diferença de cotas entre o nível máximo normal de montante e o nível normal de jusante, a partir do conhecimento prévio do local do empreendimento, verificou-se um possível ganho da ordem de 4,55 m. Assim, uma nova queda bruta de 32,69 m pode ser aproveitada para arranjos de repotenciação.

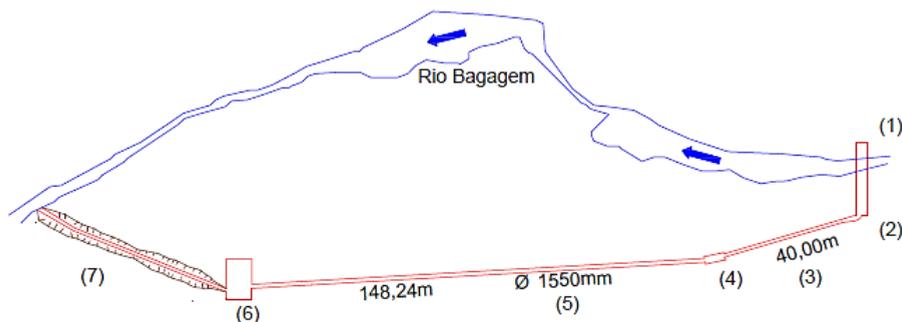
No dimensionamento energético adotou-se inicialmente um fator de capacidade, FC, condizente com os normalmente desempenhados por CH em operação no Brasil. O fator de capacidade é definido como sendo a razão entre a potência média e a potência instalada. Em posse da Q_{MLT} utilizou-se um $FC = 0,65$ para definição da potência instalada máxima teórica, com respectiva vazão de projeto, Q_p , da ordem de $5,80 \text{ m}^3/\text{s}$. Para presente aplicação foram estabelecidas três alternativas, detalhadas a seguir.

Alternativa 1 - Aproveitamento total da queda e vazão existentes

Esta alternativa, na modalidade ampliação, consolida-se com a implantação de novo arranjo, que substitui completamente o atual. Inclui a implantação de uma barragem (a montante da atual), um sistema de adução (tomada d'água, canal, câmara de carga e conduto forçado), uma casa de máquinas e um canal de restituição, conforme apresentado na Figura 3. Para aproveitamento integral do potencial hidráulico disponível, isto é, $H_B = 32,69 \text{ m}$ e $Q_p = 5,80 \text{ m}^3/\text{s}$, não é verificada restrição para o dimensionamento.

Figura 3 – Planta esquemática da Alternativa 1

Componentes	Arranjo 1
Barragem	(1)
Tomada d' água	(2)
Canal de adução	(3)
Câmara de carga	(4)
Conduto forçado	(5)
Casa de máquinas	(6)
Canal de fuga	(7)



Fonte: Elaboração dos autores.

A nova barragem projetada é do tipo soleira vertente, ao passo que as características locais favorecerem sua construção, por exemplo, a presença de um vale estreito e o leito de rochas. Esta é moldada em concreto com 24 m de comprimento e 1,80 m de altura. A vazão de cheia encontrada para um tempo de retorno de 100 anos é 22 m³/s. O que resultou em uma lâmina vertente máxima de 0,59 m. Por ser uma CH de derivação, não há reservatório e mesmo a área alagável está restrita à calha do rio. A potência instalada desta alternativa totaliza 1.535 kW.

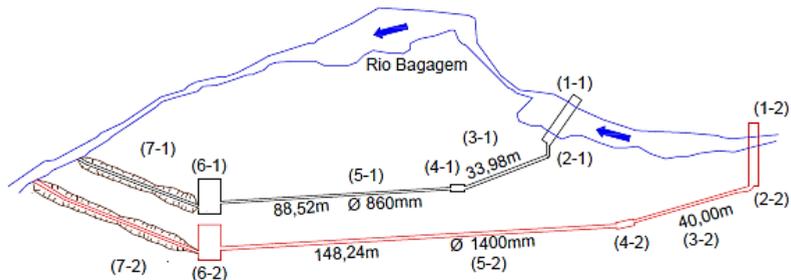
Alternativa 2 - Manutenção do arranjo atual com a inserção de um novo sistema hidráulico

A alternativa 2, também na modalidade ampliação, é estabelecida mantendo-se a queda bruta atual de 28,14 m e conservando o sistema de adução e a casa de máquinas existentes; ao mesmo tempo em que será construído um sistema de adução e uma casa de máquinas adicionais, para o aproveitamento da nova queda bruta de 32,69 m. Prevê-se então a construção de uma barragem a montante da atual com as mesmas dimensões da alternativa 1, para adução da vazão de projeto remanescente.

À medida que a vazão turbinada atualmente é de apenas 1,23 m³/s, a vazão remanescente de 4,57 m³/s foi alocada para o novo sistema de adução e para casa de máquinas adicional. Chegou-se então a uma potência instalada incremental de 1.208 kW. O arranjo desta alternativa está explicitado na Figura 4.

Figura 4 – Planta esquemática da Alternativa 2

Componentes	Arranjo 1	Arranjo 2
Barragem	(1-1)	(1-2)
Tomada d' água	(2-1)	(2-2)
Canal de adução	(3-1)	(3-2)
Câmara de carga	(4-1)	(4-2)
Conduto forçado	(5-1)	(5-2)
Casa de máquinas	(6-1)	(6-2)
Canal de fuga	(7-1)	(7-2)



Fonte: Elaboração dos autores.

Alternativa 3 - Manutenção do arranjo atual com substituição completa do grupo gerador

A constatação da subutilização da vazão máxima admissível ($2,90 \text{ m}^3/\text{s}$) no sistema hidráulico existente e a comprovação de que a turbina hidráulica é restritiva indicaram a oportunidade de avaliação da substituição do grupo gerador em operação. Esta alternativa de repotenciação é na modalidade revitalização, pois consiste na substituição completa do grupo gerador, conservando a barragem, o sistema de adução e a casa de máquinas existentes, e levando a uma condição superior ao limite de potência de concessão (480 kW). Assim, com $Q_p = 2,90 \text{ m}^3/\text{s}$ e $H_b = 28,14 \text{ m}$ chegou-se a uma potência instalada de 615 kW.

Análise econômica preliminar

A análise econômica é simplificada no âmbito do MGMT. Se esta valoração inicial indicar a conveniência da repotenciação, na hierarquização das análises, o próximo passo será o estudo de viabilidade com uma avaliação econômica refinada.

No caso analisado, a projeção inicial dos custos, relativos à aquisição de materiais, equipamentos e serviços das obras, foi realizada através de equações (SOUZA *et al.*, 1999). Por consequência, os custos para o conduto forçado, grupo gerador e casa de máquinas foram estimados através das equações desenvolvidas por Magalhães (2009); o custo para pequena barragem foi determinado por meio da equação de Martinez (1994); e, por fim, foram utilizadas de forma complementar as equações propostas por Souza *et al.* (1999).

Ao passo que estas equações são para os anos base 2008, 1994 e 1998, respectivamente, a atualização econômica para o ano de 2019 foi realizada com suporte do Índice Nacional da Construção Civil - INCC.

A receita bruta anual foi prevista por meio da seguinte equação

$$RA = \delta Q_p H_B \eta_{ap} FC t T 10^{-3} \text{ (R\$)} \quad (2)$$

onde, RA é a receita bruta (R\$); t é o tempo considerado (h); e T é o preço da energia elétrica (R\$/kWh).

Tomou-se o preço de venda da energia de 0,32 R\$/kWh, aplicado para região Norte do país, no período considerado. Adotou-se um período de indisponibilidade anual de 48 horas para as alternativas 1 e 2 e de 96 horas para a alternativa 3, após as obras de acréscimo de potência. Posteriormente foi elaborado um fluxo de caixa para cada alternativa, com entradas e saídas econômicas anuais, considerando somente os custos e receitas incrementais originários da repotenciação (OLIVEIRA, 2012).

Executados os cálculos das parcelas de entrada e saída anuais, foi quantificado o benefício líquido anual, BA, que é dado pela seguinte relação: $BA = RA - CA$. Sendo CA o custo anual. Logo, para se quantificar o ganho no horizonte de projeto, fez-se o somatório dos benefícios anuais excluindo os custos com tributos, seguro e depreciação para um horizonte de projeto de 20 anos.

Assim sendo, o tempo de retorno simples (TR) foi adotado para quantificar o período de recuperação do investimento, o qual pode ser expresso pela seguinte relação $TR = I/BA$, onde I é o investimento total (sem juros). Na Tabela 1 estão sintetizados os resultados da estimativa econômica e pode-se constatar que a alternativa 3 é a mais viável economicamente.

Tabela 1 – Resumo dos resultados da análise econômica preliminar

Alternativas	Investimento (R\$)	TR (anos)
1	10.502.200,64	6,79
2	7.374.825,56	6,93
3	3.220.485,05	3,45

Fonte: Elaboração dos autores.

Definição da modalidade de repotenciação e tomada de decisão

As três alternativas consideradas apresentam vantagens e desvantagens que devem ser ponderadas para indicação da melhor alternativa. As alternativas 1 e 2 são na modalidade ampliação e a alternativa 3 é na modalidade revitalização. Interessantemente não haverá indisponibilidade da CH durante o período de construção da parte ampliada nas alternativas 1 e 2. Isso, em consequência da possibilidade de construção da nova barragem sem corte do fornecimento para o sistema hidráulico existente, possibilitado

por um simples desvio do rio.

Os impactos ambientais negativos das alternativas 1 e 2 são mínimos, pois a nova barragem é apenas para derivação da água do rio (inexistência de reservatório). Haverá ainda a necessidade de supressão de parte da vegetação no traçado da parte ampliada, com correspondente compensação. Contudo, esta área já se encontra com os impactos ambientais consolidados pela presença do empreendimento subdimensionado e os diversos benefícios econômicos e socioambientais da repotenciação, já apresentados neste texto, são maiores.

Dentre as vantagens da alternativa 3 destacam-se o menor tempo de indisponibilidade futura da CH, já que a substituição do grupo gerador reduzirá a necessidade de paradas; aumento da vida útil; redução de custos de operação e manutenção do grupo gerador; mínimos impactos ambientais negativos, os quais seriam resultantes apenas das modificações na casa de máquinas. Por outro lado, a necessidade de integração dos novos equipamentos ao sistema atual resultaria em indisponibilidade da CH.

Acrescenta-se que, para além da conclusão estritamente econômica de que a alternativa 3 é a mais atrativa, o MGMT revelou que a repotenciação da CGH Bagagem é viável e justifica o investimento para um estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental, e que todas as três alternativas devem ser rigorosamente avaliadas nesta segunda fase.

Os estudos e levantamentos complementares necessários para o estudo de viabilidade integral são os seguintes: estudo hidrológico atualizado; levantamento topográfico da área, para ampliação; estudo ambiental; e estudos geológicos e geotécnicos. Ademais, deve ser definida a capacidade da subestação a ser implantada e a necessidade ou não de ampliação da capacidade da linha de transmissão de alta tensão associada. E, por fim, todas as alternativas exigem regularização junto a ANEEL, por causa da alteração da potência instalada de concessão.

6 Conclusões

Embora se fale em ganhos técnicos, econômicos e ambientais para tomada de decisão sobre a repotenciação de uma central hidrelétrica, todos estes benefícios são de caráter ambiental, nos seus aspectos físicos, bióticos e socioeconômicos. Em razão das particulares relações de um aproveitamento hidrelétrico com o meio que se insere, muito mais do que uma visão ambiental estratégica, é preciso abordar a repotenciação em termos das dimensões da sustentabilidade. Neste sentido, embora todos os benefícios da repotenciação estejam contidos nestas dimensões, tanto do ponto de vista do empreendedor (*Triple Bottom Line*) quanto do ponto de vista do interesse temporal da coletividade (desenvolvimento sustentável), é indispensável a adoção de abordagens sistêmicas para a internalização de aspectos ainda tratados como externalidades.

O Método do Ganho Máximo Teórico, desenvolvido neste trabalho, permite estimar os benefícios da repotenciação de uma central hidrelétrica de forma rápida, simples e com baixo custo. E, por consequência, possibilita a projeção de estimativas regionais de conjuntos de empreendimentos, para subsequente priorização das melhores oportuni-

dades. Avanços neste sentido têm por finalidade a maximização da sustentabilidade na inserção dessas centrais hidrelétricas no contexto socioambiental do seu entorno, que, contemporaneamente, deve ser pautada pelas dimensões ambiental, social e econômica em detrimento da visão exclusivamente econômica. Especialmente devido à urgência de novos posicionamentos diante da crise climática global.

A aplicação do método na CGH Bagagem permitiu estabelecer alternativas realistas de repotenciação e, para uma primeira abordagem econômica, mesmo com as simplificações adotadas, a alternativa 3 se mostrou mais atrativa pelo menor tempo de retorno do investimento. Todavia, se considerados os demais benefícios, infere-se que todas as alternativas são viáveis se comparadas com a opção de implantação de novos aproveitamentos hidrelétricos, e devem ser consideradas no estudo de viabilidade integral, que é o próximo passo das avaliações hierárquicas.

Portanto, os benefícios da repotenciação em comparação com a instalação de novos empreendimentos são indiscutíveis. Cabe ressaltar que o maior benefício é que a repotenciação garante o aproveitamento ótimo dos recursos naturais ante à dinamicidade temporal dos sistemas envolvidos e é um instrumento concreto para sustentabilidade e, em consequência, deveria ter um caráter mais impositivo, ao invés de depender exclusivamente das decisões de oportunidade de empreendedores. Porém, para isso, são imprescindíveis estímulos governamentais, principalmente no que se refere às garantias de reconhecimento da energia adicionada e à solução da lacuna regulatória existente no Brasil.

7 Referências

- AJAO, K.R.; OGUNMOKUN, A.A.; NANGOLO, F.; SHAANIKA, S.; BALOGUN, O.S. Assessment of electro-mechanical components of bakolori small hydropower plant for refurbishment and modernization. *ATBU, Journal of Science, Technology & Education (JOSTE)*, v. 4 (2), 2016.
- ANEEL. Nota Técnica nº 026/2011 SRG/ANEEL: Repotenciação de unidades geradoras que possam trazer ganhos na operação energética e agregar disponibilidade de potência horária no SIN – 2011.
- ATHAYDE, S. *et al.* Mapeando pesquisas sobre energia hidráulica e sustentabilidade na Amazônia brasileira: avanços, lacunas de conhecimento e rumos futuros. In: Laufer, J. *et al.* (Org.). **Rios, Terras e Culturas: Aprendendo com o Sistema Socioecológico do Tocantins**. Porto Alegre: Editora Fi, 2020. p. 711-765.
- BARROSO, S. **Pequenas Centrais Hidrelétricas: Como conciliar interesses**. In: Apresentação em Debate Público na Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2009, Belo Horizonte - MG.
- BIANCHI, I.; SOUZA, T.M. Recapacitation and re-powering small hidro power plants out off use or in use in the São Paulo state. In: SILVEIRA, J. L. (Org.). **Book of Abstracts and Proceedings of 5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission**. Garatinguetá, 2003. B-200.
- CASTILHO, D. **Dilemas e contradições da eletrificação no Brasil**. In: ZAAR, M.H.; VASCONCELOS, P.J.M.; CAPEL, H. (Eds.). *La electricidad y el territorio. Historia y futuro*. Barcelona: Geocrítica, 2017. p. 1-21.
- CASTILHO, D. Hidrelétricas na Amazônia brasileira: da expansão à espoliação. In: CAPEL, H.; ZAAR, M. (Eds.). **La electricidad y la transformación de la vida urbana y social**. Barcelona: Geocrítica, 2019. p. 68-87.
- COLFERAI, G. G. **Estudo de viabilidade técnica de repotenciação de central geradora hidroelétrica**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.
- CORÀ, E.; FRY, J.J.; BACHHIESL, M.; SCHLEISS, A. **Hydropower Technologies: the state-of-the-art**. 2019. Disponível em: <https://hydropower-europe.eu/uploads/news/media/The%20state%20of%20the%20art%20of%20hydropower%20industry-1600164483.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2020: relatório síntese/ano base 2019**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2020.
- EPE. **Estudos para a licitação da expansão da geração: estudos de ampliação de usinas hidrelétricas restrições operativas e viabilidade técnica e econômica**. Rio de Janeiro, 2012.
- EPE. **Expansão da geração: repotenciação e modernização de usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro,

ro: MME/EPE, 2019.

EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2030**. Brasília: MME/EPE, 2021.

EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME/EPE, 2007.

GAGLIANO, A.; TINA, G.M.; NOCERA, F.; PATANIA, F. Technical and Economic Perspective for Repowering of Micro Hydro Power Plants: A Case Study of an Early XX Century Power Plant. **Energy Procedia**, v. 62, p. 512-521, 2014.

GOMES, E.P. **Potencial de repotenciação de usinas hidrelétricas no Brasil e sua viabilização**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

GÓMEZ, V.; BUENROSTRO, F.; GOJON, O.; ACOSTA, J. Upgrading Stators of Large Hydro Generators. **HydroVision**, Paper nº 073, 2008.

GYORI, D.F.S. **Análise de Viabilidade Técnica-Econômica de Repotenciação de PCHs com Inserção de Benefícios Ambientais: Estudo de Caso**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

HAYASHI, T.; LERLAND, E.C.V.; ZHU, X. A holistic sustainability assessment tool for bioenergy using the Global Bioenergy Partnership (GBEP) sustainability indicators. **Biomass Bioenergy**, v. 66, p. 70-80, 2014.

HOGAN, T.W.; CADA, G.E.; AMARAL, S.V. The status of environmentally enhanced hydropower turbines. **Fisheries Magazine**, 39(4), p. 164-172, 2014.

IHA. **2020 Hydropower Status Report: Sector trends and insights**. Disponível em: <https://www.hydropower.org/publications/2020-hydropower-status-report>. Acesso em 24. mar. 2021.

JONES, T.; NEWBORNE, P.; PHILLIPS, B. Applying the principles of integrated water resource and river basin management-an introduction. **WWF-UK**, p. 1-35, jun. 2006.

KISHORE, T.S.; PATRO, E.R.; HARISH, V.S.K.V.; HAGHIGHI, A.T. A Comprehensive Study on the Recent Progress and Trends in Development of Small Hydropower Projects. **Energies**, 14(10): 2882, 2021.

KUCHINSKAYA, Z.; NOVOZHILOV, V. **OJSC Power Machines: Experience on Hydrogenerators Reconstruction in Russia**. Rússia, 2011.

LEMOS, H. F. **Estudos de Repotenciação de Usinas Hidrelétricas por meio da Motorização de Poços Vazios Existentes**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

LINDSTRÖM, A.; RUUD, A. Whose Hydropower? From Conflictual Management into an Era of Reconciling Environmental Concerns; a Retake of Hydropower Governance towards Win-Win Solutions? **Sustainability**, v. 9, n. 1262, p. 1-18, jul. 2017.

LIU, J.; ZUO, J.; SUN, Z.; ZILLANTE, G.; CHEN, X. Sustainability in hydropower development - A case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.19, p. 230-237, mar. 2013.

MAGALHAES, A.S.; BULHOES, J.S.; REIS, M.R.C.; *et. al.* Experimental study of induction generator as a repowering solution. **Int Trans Electr Energ Syst**, 2020.

MAGALHÃES, R.N. **Estimação de custos para projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

MARTINEZ, C.B. **Interações entre o planejamento e o projeto de UHE's. O caso das pequenas centrais hidrelétricas no Brasil**. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

MORAN, E.F. Changing how we build hydropower infrastructure for the common good: lessons from the Brazilian Amazon. **Civitas**, v. 20, n. 1, p. 5-15, 2020.

MORETTO, E.M.; GOMES, C.S.; ROQUETTI, D.R., JORDÃO, C.O. Histórico, tendências e perspectivas no planejamento espacial de usinas hidrelétricas brasileiras: a antiga e atual fronteira Amazônica. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 141-164, dec. 2012.

NATURATINS. Instituto Natureza do Tocantins: Relatório Ambiental Simplificado da CGH Bagagem, 2010.

OGAYAR, B.; VIDAL, P.G.; HERNANDEZ, J.C. Analysis of the cost for the refurbishment of small hydropower plants. **Renewable Energy**, 34, p. 2501-2509, 2009.

OLBERTZ, Niklas. Sustainable hydro-power plants with focus on sh-friendly turbine design. **EGU Journal of Renewable Energy Short Reviews**, p. 67-71, 2021.

OLIVEIRA, M.A. Ganhos Viabilizados pela Repotenciação de Pequenas Centrais Hidrelétricas: Conceitos e Definições. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético – CBPE, 8, 2012, Curitiba. **Anais Energia para o Século XXI: Sociedade e Desenvolvimento**. Curitiba, PR, 2012. p. 1-19.

OLIVEIRA, M.A. Modelo para análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental da repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas. **Hidro & Hydro - News SHP**, v. 74, n. 3, p. 5-10, jul/set. 2017.

OLIVEIRA, M.A. Technical and economic evaluations for decision-making on the repowering of small hydropower plants and the optimum exploit of existing plants in Brazil. **American Journal of Hydropower, Water and Environment Systems**, v. 6, n. 16, p. 16-24, jan. 2018.

OLIVEIRA, M.A., **Repotenciação de Pequenas Centrais Hidrelétricas: Avaliação Técnica e Econômica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

OLIVEIRA, M.A.; OLIVEIRA, M.S. Operational characterization of Luis Eduardo Magalhães

hydroelectric power plant and the use of water resources of the Tocantins river for energy generation. **Brazilian Journal of Development**, 2021.

PERIUS, M.R.; CARREGARO, J.B. Pequenas centrais hidrelétricas como forma de redução de impactos ambientais e crises energéticas. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 16, n. 2, p. 135-150, out. 2012.

QUARANTA, E.; AGGIDIS, G.; ROBERT M.; BOES, R.M.; *et. al.* Assessing the energy potential of modernizing the European hydropower fleet. **Energy Conversion and Management**, v. 246, 2021.

QUEIROZ, A.R.; FARIA, V.A.D.; LIMA, L.M.M.; LIMA, J.W.M. Hydropower Revenues under the Threat of climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 133, p. 873-882, 2019.

RAHI, O.P.; CHANDEL, A.K. Refurbishment and uprating of hydro power plants: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 726-737, 2015.

ROMERO-AÑAZCO, B.; SIGUENZA-MALDONADO, A.; BARRAGÁN-ESCANDÓN, A.; SERRANO-GUERRERO, X. Methodology to evaluate the repowering of small hydroelectric power plants: Case study El Amarillo in Portovelo, Ecuador. Published in 2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), **IEEE Xplore**, 2020. p. 1-6.

SANTOS, J.C. **Análise da revitalização de pequenas centrais hidrelétricas para a geração de energia, promoção do ecoturismo e da educação ambiental na região do Vale do Paraíba e Serra da Mantiqueira**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Formas Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

SCHWEVERS, U.; ADAM, B. Fish-Friendly Turbines. **Fish Protection Technologies and Fish Ways for Downstream Migration**, p. 203-210, 2020.

SILVA, A.H.F.; MAGALHAES, A.S.; BULHOES, J.S.; *et. al.* Parametric Regression Applied for Determination of Electrical Parameters of Synchronous and Induction Generators Operating in Parallel on the Electrical Energy Repowering System. **Energies**, 14, 2021.

SOUZA, Z.; BORTONI, E.C.; SANTOS, A.H.M. **Estudos para Implantação de Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Edição ELETROBRÁS, 1999.

TANG, W.; LI, Z.; TU, Y. Sustainability Risk Evaluation for Large-Scale Hydropower Projects with Hybrid Uncertainty. **Sustainability**, v. 10, n. 138, p. 1-19, jan 2018.

UTSUNOMIYA, R. *et al.* Povos indígenas e hidrelétricas na Amazônia: percepções e avaliação de impactos a partir de abordagem transdisciplinar e participativa. In: Senhoras, E. M. (Org.). **A produção do conhecimento interdisciplinar nas ciências ambientais**. Atena Editora, 2020. p. 99-110.

VARGAS, G.M. Território. In: FERRARO JUNIOR, L. A. (Org) **Encontros e Caminhos: Formação de Educadoras(es) Ambientais e Coletivos Educadores**. Brasília: MMA/DEA, 2013. p. 305-314.

VASCO, G.; SILVA, J.S.; BELUCO, A.; ROSSINI, E.G.; SOUZA, J.A. Hydro PV Hybrid System as a New Concept for an Abandoned Dam in Southern Brazil. **Computational Water, Energy, and Environmental Engineering**, 8, p. 41-56, 2019.

VEIGA, J.R.C.; BERMANN, C. Repotenciação de usinas hidrelétricas: uma avaliação a partir de três estudos de caso. **Revista Brasileira de Energia**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 1-9, jan. 2002.

WCED. Our common future. Report of the World Commission on Environment and Development. 1987. Disponível em: [https://sustainabledevelopment.un.org/content/](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-commonfuture.pdf)

[documents/5987our-commonfuture.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-commonfuture.pdf). Acesso em: 24 fev. 2021.

WWF-BRASIL. A Repotenciação de Usinas Hidrelétricas como Alternativa para o Aumento da Oferta de Energia no Brasil com Proteção Ambiental, 2004.

WWF-BRASIL. **Agenda Elétrica Sustentável 2020: Estudo de Cenários para um Setor Elétrico Brasileiro Eficiente, Seguro e Competitivo**. Brasília - DF, série técnica v. 12, 2006. 80p.

ZHANG, Y. Accelerating Sustainability by Hydropower Development in China: The Story of HydroLancang. **Sustainability**, v. 9, n. 1305, p. 1-28, jul. 2017.

ZHOURI, A.; OLIVEIRA, R. Desenvolvimento, conflitos sociais e violência no Brasil rural: o caso das usinas hidrelétricas. **Ambiente & Sociedade**, v. 10, n. 2, p. 119-135, dec. 2007.

Marcos André de Oliveira

✉ marcos.oliveira@uft.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1722-9181>

Submetido em: 13/05/2021

Aceito em: 14/02/2022

2022;25:e00691

Márcio Santos Sepúlvia de Oliveira

✉ marciosepulvia11@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4183-2327>

Anna Karolyne Souza Miranda

✉ annaksmiranda@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1204-7837>

La sostenibilidad como perspectiva para la repotenciación de pequeñas centrales hidroeléctricas en Brasil: método para estimaciones

Marcos André de Oliveira
Márcio Santos Sepúlvia de Oliveira
Anna Karolyne Souza Miranda

Resumen: La repotenciación es una opción sostenible para centrales hidroeléctricas relativamente antiguas. Sin embargo, aún está en proceso de desarrollar sus aspectos técnicos, socioambientales y regulatorios en Brasil. Además, hay pocos trabajos disponibles en la literatura sobre el tema. Una brecha en el área es la falta de metodologías que orienten la medición de beneficios en emprendimientos adecuados, para priorizar los más oportunos, reducir riesgos y fomentar esta práctica a nivel nacional, regional y de agentes. Este artículo presenta una discusión teórica de las prácticas actualmente empleadas y propone un método accesible (simple, rápido y de bajo costo) para apoyar la toma de decisiones sobre la aplicabilidad de la repotenciación en pequeñas centrales hidroeléctricas. Los resultados demuestran la sostenibilidad ambiental de la práctica ante las limitaciones y desafíos que implica la construcción de grandes centrales hidroeléctricas, actualmente.

São Paulo. Vol. 25, 2022

Artículo original

Palabras-clave: Sostenibilidad, Repotenciación, Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, Máxima Ganancia Teórica, Aprovechamiento óptimo, Remodelación, Aumento de capacidad, Recursos renovables.

Sustainability as a perspective for the repowering of small hydroelectric plants in Brazil: estimation method

Marcos André de Oliveira
Márcio Santos Sepúlvia de Oliveira
Anna Karolyne Souza Miranda

Abstract: Repowering is a sustainable option for relatively old hydroelectric plants. However, it is still in the process of developing its technical, socio-environmental and regulatory aspects in Brazil. Moreover, there are few papers available in the literature on the subject. A gap in the area is the lack of methodologies that direct the measurement of benefits in suitable enterprises, to prioritize the most opportune ones, reduce risks, and encourage this practice nationally, regionally, and among agents. This paper presents a theoretical discussion of the practices currently employed and proposes an accessible method (simple, fast and low cost) to support decision making regarding the applicability of repowering in small hydroelectric plants. The results show the environmental sustainability of the practice given the limitations and challenges that currently involve the construction of large hydroelectric plants.

São Paulo. Vol. 25, 2022
Original Article

Keywords: Sustainability, Repowering, Small Hydroelectric Power Plants, Maximum Theoretical Gain, Optimum use, Refurbishment, Uprate, Renewable resources.