

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO UTILIZANDO A VAZÃO SANITÁRIA DA PCH XAVANTINA¹

Pablo Valdocir Favaretto²

Rodrigo Konrath³

Paulo Vicari⁴

RESUMO

O estudo de análise de viabilidade técnica tem por objetivo geral o aproveitamento máximo de recursos disponibilizados pelo empreendimento para um aumento na demanda energética fornecida pela PCH Xavantina. A busca pela eficiência total de um projeto de geração energética, faz com que as Pequenas Centrais Hidrelétricas utilizem todos os seus recursos possíveis e disponíveis para realizar o aproveitamento ótimo da vazão do rio. A vazão sanitária disposta na PCH para manter o trecho de vazão reduzida abre uma possibilidade de usufruir desse sistema como forma de geração de energia, com isso foi verificado a possibilidade de instalação de uma unidade geradora para aproveitamento energético, tendo em vista uma vazão fixada e já instalada junto a barragem. Através dos cálculos foi obtido um valor de potência de 380 kW para o conjunto turbina/gerador, e com esse valor de geração foi possível realizar o levantamento de custos dos equipamentos e comprovar a viabilidade de instalação de um novo sistema. As vantagens dessa melhoria visam a viabilidade de uma melhora no controle operacional do reservatório e o aumento na demanda de geração de energia. A implantação de novos sistemas com esse formato é aceitável junto aos órgãos ambientais pelo baixo impacto ambiental e pela Agência Nacional de Energia Elétrica, apoiando no fornecimento de energia na região a ser aplicado.

Palavras-chave: Geração. PCH. Vazão sanitária. Viabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tem um papel fundamental para o desenvolvimento de setores como transporte, telecomunicações, água e é uma das infraestruturas obrigatórias para o desenvolvimento do ser humano. Trata-se de um assunto de suma importância para a busca de um desenvolvimento sustentável (REIS, 2011).

A geração de energia elétrica como forma de aproveitamento do recurso hídrico ainda é muito utilizada em vários países, principalmente no Brasil devido a existência de uma grande abundância de água.

No Brasil há vários setores de geração de energia renovável e não-renovável totalizando 7.853 projetos já em operação e um total de 166.688.040 kW de potência

¹ Pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

² UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica. E-mail: pablo.favaretto@hotmail.com.br

³ UCEFF Faculdades. Docente do Curso de Engenharia Elétrica. E-mail: konrath@uceff.edu.br

⁴ Professor orientador Esp. Engenharia de Segurança do Trabalho. E-mail paulo.vicari@uceff.edu.br.

instalada. Sendo deste montante, 3,14 % de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) já em operação e 4,38 % (28 projetos) em construção (BRASIL, 2019).

A Pequena Central Hidrelétrica Xavantina, é considerada um empreendimento novo, pois entrou em operação em agosto de 2015. Está localizada na linha Manjolinho, interior de Xanxerê e faz divisa com o município de Xavantina no Oeste de Santa Catarina, possuindo uma potência instalada de 6.075 *Megawatts* (MW).

A vazão sanitária é o escoamento de água livre estipulada pelos órgãos ambientais, existentes em Centrais Geradoras de Energia (CGH's) e PCH's, que visa manter a sobrevivência do meio ambiente compreendido em meio a barragem e o canal de fuga da usina. Essa vazão é calculada em comparação a valores diários e anuais, podendo também ser menor ou maior dependendo da análise a ser feita das condições locais (RHAMA,2011).

A PCH Xavantina possui uma vazão sanitária controlada para manter o escoamento de água no referido trecho entre o vertedouro e o canal de fuga. Devido a mesma possuir Casa de Força na base da barragem o trecho sem afluência é de pequena proporção, sendo a vazão sanitária somente liberada em casos de total falta de defluência das unidades geradoras.

Desta forma, perante ao exposto, **há possibilidade de aproveitamento energético utilizando a vazão sanitária da PCH Xavantina?**

O objetivo geral deste artigo é fazer uma análise de viabilidade técnica para utilizar a vazão sanitária da PCH Xavantina como aproveitamento energético. Para que se possa realizar tal análise, os objetivos específicos são: analisar a estrutura física do local de implantação, verificar a estrutura dos equipamentos já existentes, calcular potência do conjunto turbina/gerador e fazer um levantamento de custos destes equipamentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Há várias formas de geração de energia no mundo, sendo uma delas através de usinas hidrelétricas, que realizam o aproveitamento da água dos rios desviando o seu curso natural através de reservatórios represados por barragens e demais estruturas necessárias.

O desnível da água criado pela barragem direciona a afluência da água do rio para a tomada d'água, assim, através dos condutos (tubulações) um fluxo de água constante provoca uma força mecânica na turbina (rotação), criando a energia mecânica, onde essa acoplada a um gerador através de um eixo, gera a energia elétrica (BRASIL, 2008; CERAN, 2018).

2.1 USINAS HIDRELÉTRICAS

A energia é considerada um ingrediente fundamental para a sociedade nos dias atuais e seu fornecimento impacta diretamente no crescimento econômico e social de toda a humanidade. O aumento econômico e a grande demanda no consumo de energia estão relativamente interligados (ARRIAGA; RUDNICK; ABBAD, 2015).

Para o cenário nacional a busca pela produção de geração de energia na área hidráulica é proporcionada não somente pelas grandes usinas hidrelétricas, mas também pelas Pequenas Centrais hidrelétricas (PCH's) e pelas Centrais Geradoras Hidráulicas (CGH's).

Em 1997 as usinas hidrelétricas foram classificadas devido a sua potência instalada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Sendo Centrais Geradoras Hidráulicas (CGH's) até 5MW, Pequenas Centrais Hidráulicas (PCH's) entre 5 e 30MW e Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE's) acima de 30MW (BRASIL, 2016).

Os valores máximos de potência instalada nas usinas hidrelétricas citados acima são valores que tiveram alterações em 2015, pela nova resolução normativa publicada pela ANEEL de n.º673/2015.

2.2 PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS (PCH's)

As Pequenas Centrais Hidrelétricas são empreendimentos com potencial energético teoricamente reduzido, conforme classificação da ANEEL. Porém, mesmo carregando o nome de “pequenas” são responsáveis por uma porcentagem da potência energética do Sistema Interligado Nacional (SIN) (BRASIL, 2016).

As PCH's tiveram seu início dentro do território brasileiro no ano de 1997. Devido a extinção do monopólio do setor elétrico, vários recursos para estudos e projetos de novos empreendimentos de geração renovável foram aplicados por diversas empresas. De 1997 até o ano de 2016 várias empresas do setor privado realizaram investimentos de grande porte, totalizando mais de R\$ 1 bilhão em projetos e licenciamento ambiental, chegando a mais de 9000 MW protocolados pela ANEEL, mas cerca de 7000 MW estão em análise aguardando aprovação, ficando entre as principais fontes de energia do país (BRASIL, 2016).

São empreendimentos que resultam em baixos impactos ambientais, o que é de grande importância para o meio ambiente e realizam uma geração descentralizada. Ajudam a proteger as margens dos rios contra erosões, também auxiliam na captação de água para abastecimento

dos municípios, piscicultura, irrigação. O potencial hídrico dessas hidrelétricas é proveniente de pequenos e médios rios, que possuem desníveis favoráveis à sua geração hidráulica para prover giro mecânico em turbinas (FREITAS, 2012; BRASIL, 2016).

Segundo a ANEEL (2019), no Brasil 3,14 % dos empreendimentos relacionados a Pequenas Centrais Hidrelétricas estão em operação com potência fiscalizada, 4,39 % dos empreendimentos estão em construção e 9,53 % dos empreendimentos que não iniciaram, ou seja, se encontram na fase de documentação.

Tipicamente as PCH's operam a fio d'água, ou seja, realizam o controle do reservatório conforme a afluência momentânea. Esse controle tem variações dependendo do período úmido entre os meses de dezembro a abril, onde o volume de água proveniente das chuvas excede o normal. No período chuvoso a afluência do reservatório se torna elevada e consequentemente a geração de energia elétrica do empreendimento chega a sua nominal, caso esse volume de água não seja consumido totalmente pelas unidades geradoras a água excedente é direcionada para o vertedouro. Já para o período seco, entre os meses de maio a novembro há uma geração reduzida devido baixa afluência.

As PCH's possuem algumas vantagens em sua implantação em relação as UHE's, como adaptabilidade a pequenos e médios cursos d'água, devido a suas características menores e simples, prazos de implantação dos projetos, menores impactos ambientais e sua construção e operação dependem exclusivamente da liberação e autorização dos órgãos ambientais e da ANEEL (ALBARELLO, 2014).

A Agência Nacional das Águas (ANA), elaborou um manual com intuito de padronizar os estudos de disponibilidade hídrica, para fins de outorga em uso da água em caráter de aproveitamentos hidrelétricos.

Este *Manual* tem como objetivo orientar a ANEEL e a EPE e, também, o empreendedor para a elaboração dos Estudos de Disponibilidade Hídrica – EDH, necessários para instruir os processos para a obtenção da Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica e da outorga de direito de uso de recursos hídricos para aproveitamentos hidrelétricos.

Os procedimentos recomendados neste *Manual* têm caráter geral, independentemente do tipo de pessoa jurídica (empresa estatal, privada, etc.) que receber a autorização ou concessão para a exploração de aproveitamentos hidrelétricos, do porte da usina hidrelétrica (PCH ou UHE) e da destinação de energia a ser gerada pelo aproveitamento hidrelétrico (autoprodução, produção independente ou serviço público) (BRASIL, 2010, p.9).

Para a implantação de uma PCH é necessário realizar os estudos para o inventário hidrelétrico. Esse é definido pela engenharia determinando o potencial hidrelétrico da região hidrográfica analisada. Os estudos visam o melhor aproveitamento do potencial hídrico, para

uma elevada geração energética, buscando os menores custos de implementação e principalmente o menor impacto ambiental. Contudo, a ANEEL junto aos órgãos ambientais é responsável por autorizar e validar toda documentação necessária para o andamento do estudo para a implantação de uma planta energética (ALBARELLO, 2014).

Para um controle dos empreendimentos em relação a impactos ambientais relacionados a projetos hídricos, conforme a resolução n° 237 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), artigo 8 de 1997 incisos I, II e III, o poder público expedirá as seguintes licenças ambientais:

- I - Licença Prévia (LP) - concedida na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade aprovando sua localização e concepção, atestando a viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de sua implementação;
- II - Licença de Instalação (LI) - autoriza a instalação do empreendimento ou atividade de acordo com as especificações constantes dos planos, programas e projetos aprovados, incluindo as medidas de controle ambiental e demais condicionantes, da qual constituem motivo determinante;
- III - Licença de Operação (LO) - autoriza a operação da atividade ou empreendimento, após a verificação do efetivo cumprimento do que consta das licenças anteriores, com as medidas de controle ambiental e condicionantes determinados para a operação (BRASIL, 1997, p.3)

Para Santa Catarina compete ao Instituto do Meio Ambiente (IMA) conceder as licenças citadas acima, necessárias para o andamento dos projetos hídricos, conforme instrução normativa IN 44 para produção de energia hidrelétrica (BRASIL, 2019).

Relacionado também a projetos energéticos, a resolução normativa n°673/2015 que estabelece os requisitos para outorga de exploração dos recursos hidráulicos em caráter de PCH, teve uma revisão em abril de 2019 intitulada “Análise de Impacto Regulatório Revisão da Resolução Normativa n°673/2015” buscando avaliar aspectos dos últimos quatro anos, aonde há necessidade de melhorar a sistemática no processo de aquisição de outorga de autorização e implantação dos empreendimentos. É importante frisar que a ANEEL é responsável junto aos órgãos ambientais pelas análises e aprovações seguindo os processos da resolução n°673/2015.

O Decreto n° 4.932, de 23 de dezembro de 2003, delegou à ANEEL a competência para a emissão das outorgas de autorização de PCH prevista no art. 26 da Lei n° 9.427/1996. Em vista disto a ANEEL tem editado regulamentos com o objetivo de disciplinar os requisitos para a obtenção da outorga, bem como estabelecer os procedimentos.

Desse modo, o rito administrativo para a obtenção da outorga e implantação de uma PCH poderá ser iniciado após a aprovação dos estudos de inventário que identificaram determinado empreendimento e seguirá os termos da Resolução Normativa n° 673, de 4 de agosto de 2015 (REN 673/2015) (BRASIL, 2019, p.6-7).

O escopo dos projetos hidráulicos em geral é basicamente igual para UHE's, PCH's e para as CGH's, tendo as maiores diferenças relacionadas principalmente em proporções do seu volume estrutural e de equipamentos. A composição de uma usina hidrelétrica é baseada em barragem, vertedouro, tomada d'água, casa de força e subestação.

2.2.1 Barragem

As barragens são barreiras artificiais que na maioria das vezes são feitas pelo homem e têm por finalidade a contenção do escoamento de água proveniente de rios, gerando acúmulos de água chamados reservatórios, podendo ser de pequeno ou grande porte dependendo do cálculo volumétrico suportável estimado nas cheias futuras de menor a pior criticidade. As barragens com seus reservatórios têm várias finalidades para a humanidade, irrigação, captação de água e para aproveitamento energético, sendo que neste último caso a maioria das barragens trabalha a fio d'água onde a intenção é não acumular a água. São divididas em três tipos: Terra, Enrocamento e Concreto (PEREIRA, 2015).

2.2.2 Vertedouro

O vertedouro é projetado como uma segurança que tem por finalidade dissipar o volume de água em excesso que chega em determinada cota calculada, sendo o início de um volume acima do normal de operação do reservatório. Eles podem conter comportas tipo seguimento para controle da afluência do reservatório ou simplesmente degraus em seu corpo estrutural que fazem o amortecimento da vazão volumétrica de água.

Segundo ELETROBRAS (2000), o vertedouro será projetado dependendo do porte da obra, sendo que para as Pequenas Centrais Hidrelétrica (PCH's) ele possui três tipos básico para uma melhor dissipação do volume de água excedente: canal lateral, pelo corpo da barragem ou pela combinação dos dois. A melhor solução adotada será através das condições topográficas e geológicas do local, assim, definindo o arranjo geral da obra e a vazão de projeto do vertedouro.

2.2.3 Tomada D'água

A tomada d'água é projetada para realizar a captação de água direcionada para as turbinas através de condutos. Devido a queda de projeto, a mesma tem um diferencial de altura superior comparado a localização da casa de força onde se encontram os equipamentos eletromecânicos.

A estrutura da tomada d'água geralmente é localizada as margens da barragem ou próxima as mesmas, através de um canal de adução ao longo de trechos retos. Sendo em trechos curvos do leito do rio onde está localizada a barragem, ela deve ser instalada no lado côncavo, devido a esse lado ser de maior profundidade e os sedimentos levados por arraste se depositarão ao fundo do leito, e pelo fato da maior parte dos sedimentos transportados pela afluência do rio se depositarem no lado convexo (ELETROBRÁS, 2000).

2.2.4 Casa de Força

A casa de força é a estrutura na qual estão instalados quase todos os equipamentos elétricos e mecânicos para geração de energia, o arranjo típico dependerá principalmente das dimensões dos equipamentos turbina/gerador, como os demais agregados: painéis, sala de comando, centrais de óleo dinâmicas, equipamentos auxiliares em geral e incluindo uma área destinada a montagem e carga/descarga de equipamentos. Elas podem ser classificadas como casa de força: abrigada, desabrigada e subterrânea, onde essa última quase não é utilizada para pequenas centrais (ELETROBRÁS, 2000; PEREIRA, 2015).

2.2.4.1 Turbina

As turbinas hidráulicas são equipamentos que fazem a captação da água proveniente da tomada d'água, através de condutos forçados metálicos ou de fibra, transformando a energia cinética (hidráulica) em energia mecânica, ou seja, realiza a movimentação ou rotação de um eixo através de um rotor.

Segundo HIDROENERGIA (2018), há vários tipos de turbinas hidráulicas, porém, os principais modelos que podem ser aplicados em diversos cenários são: Pelton, Kaplan, Francis.

2.2.4.1.1 Turbina tipo Hélice

Turbinas hidráulicas do tipo Hélice foram criadas em 1908, a necessidade de equipamentos para baixas quedas entre 8 m e 30 m, velocidades consideradas elevadas e pequena variação na hidrologia. O rotor tem a forma de uma hélice de propulsão, por isso o nome característico, o distribuidor é idêntico ao das turbinas Francis, diferenciando somente a distância entre o rotor e o distribuidor que é maior. Esse modelo de máquina pode operar com eixo tanto na vertical como na horizontal, sendo que na vertical reduz custos de obras civis devido ao espaço utilizado, e dependendo o local de sua instalação pode-se utilizar gerador assíncrono, devido sua alta rotação e a dificuldade para a regulação, também podendo ficar exposto ao tempo por ter um alto grau de proteção IP68. Foi a partir deste modelo de turbina que surgiram as turbinas Kaplan, com maior variação e controle de geração (VERKA, 2019; SOUZA, 2011).

2.2.4.2 Gerador Elétrico Síncrono

O gerador é um equipamento que transforma a energia mecânica em energia elétrica, através de um fenômeno conhecido como indução eletromagnética. A lei base para indução eletromagnética é a Lei de Faraday combinada com a Lei de Ampère expressas pelas 3ª e 4ª equações de Maxwell. Os geradores possuem um rotor que tem seu eixo acoplado ao eixo do rotor da turbina, gerando o movimento (rotação). O mesmo é excitado através de ímãs permanentes acoplados ao eixo principal ou através de um transformador auxiliar injetando corrente por escovas acopladas ao eixo principal, gerando um campo magnético através do rotor que por sua vez irá induzir tensão senoidal trifásicas no estator onde no fim do processo irá transmiti-las através de seus terminais (ALMEIDA, 2015).

2.2.4.3 Gerador Elétrico Assíncrono

Os geradores assíncronos têm o mesmo princípio dos motores de indução, porém, geram energia. Para que essa energia seja gerada, a velocidade do gerador deve se encontrar acima da velocidade de sincronismo, caso esteja abaixo ele se caracteriza como motor. O rotor de um gerador assíncrono não trabalha em sincronismo com as tensões do sistema, esse tipo de gerador é utilizado em locais onde não se pode ter um controle fino do motor principal, como por exemplo turbina eólicas e turbinas tipo hélice (ALUGAGERA, 2019).

2.2.5 Subestação

A subestação é um sistema de proteção, controle, distribuição e transmissão de energia elétrica, com potências e tensões variadas recebidas das unidades geradoras e entregue as unidades consumidoras através das Linhas de Transmissão (LT). É composta por diversos equipamentos de transformação, proteção, seccionamento e medição (BRASIL, 2000).

2.2.5.1 Transformador

Equipamento que realiza a transformação da energia elétrica através da elevação ou redução da tensão aplicada em seu primário, ou seja, fornece um fluxo magnético variável que irá induzir em seu enrolamento secundário uma tensão elétrica. Em seu secundário a quantidade de espiras é muito superior ao primário, desta forma caracteriza-se como transformador elevador e inversamente, abaixador. Igualmente à muitos outros equipamentos o transformador consome parte da potência transferida por ele. O mesmo também possui perdas, uma das perdas mais conhecidas é a perda por histerese (ATHOS, 2015).

2.3 VAZÃO SANITÁRIA

Um projeto de geração de energia busca uma maior eficiência pela ótica da legislação do setor energético, como pela legislação ambiental. Caso tenha determinação pelo órgão ambiental que seja mantida uma vazão ecológica para manter as condições mínimas da fauna e flora no trecho de vazão reduzida, busca-se alternativas para o aproveitamento deste volume de água na geração de energia e atingir o máximo da vazão do rio, sendo que a mesma deve estar legalmente aceita pelos órgãos, não podendo gerar danos as especificações ambientais (BONAMIGO, 2004).

A vazão sanitária tem a função de manter as condições ideais de sustentabilidade da fauna e flora que compõem o trecho, por exemplo, a mata ciliar. Partindo destas definições e buscando soluções mitigatórias, chega-se a um valor volumétrico de escoamento de água que permita o equilíbrio do sistema impactado. A responsabilidade, dos valores estipulados para as vazões sanitárias são dos órgãos ambientais, que irão variar dependendo das características dos projetos apresentados ou pelas vazões mínimas e médias do curso d'água em alguns casos (BONAMIGO, 2004).

Segundo BONAMIGO (2004), as normas de nº 1 e 4 são especificamente para o setor elétrico, ambas registradas em 1984 pelo extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). A primeira, estipula para vazão sanitária um valor de 80 % da vazão mínima média mensal histórica registrada para o trecho em questão. A segunda, usa parâmetros relacionados diretamente a PCH's, onde a vazão sanitária não deverá ser inferior à média mensal anual registrada para o trecho do rio. Porém, estas normas estão em desuso pela ANEEL, utilizando para questões ambientais o Manual de PCH's da Eletrobrás e em sua própria resolução 395, artigo 12 de 1998 nos incisos III e IV.

Atualmente, a escassez de potenciais com quedas elevadas, está sendo feito aproveitamento de baixas e baixíssimas quedas com arranjos diferenciados comparado aos tradicionais relacionados a PCH's. Os novos arranjos estão similares as grandes usinas hidrelétricas, com casa de força ao pé da barragem, eliminando quase que totalmente o trecho de desvio, por esse motivo os projetistas estão considerando a vazão sanitária nula e desta forma podendo ter um aproveitamento maior do potencial instalado e podendo-se aumentar a energia assegurada. O órgão ambiental pode aceitar tal proposta, não sendo uma via de regra, mas deverá ser apresentado formas de continuidade do fluxo de água em caso de estanqueidade por falta de produção energética (BONAMIGO, 2004).

A PCH Xavantina se enquadra na topologia acima citada, casa de força ao pé da barragem com um trecho de desvio extremamente curto, tendo uma vazão sanitária de 2,33 m³/s automatizada, ou seja, esse escoamento terá continuidade somente em caso de total parada do fluxo de água direcionado pelas unidades geradoras alocadas dentro da casa de força.

Segundo IMA (2019), as atividades de geração de energia até 500 kW que não necessitam de reservatório ou fazem o aproveitamento de barramentos já consolidados (ex: barragens de CGH's e PCH's) são dispensadas de apresentar estudo ambiental, mas não eximem os projetos de apresentarem as demais obrigatoriedades ambientais.

O projeto aqui apresentado demonstra a viabilidade de uma vazão que atende a legislação ambiental e que seu volume de água mesmo sendo utilizado restritamente pode ser relativamente aproveitado na geração de energia elétrica, mantendo assim, o ecossistema sem nenhuma alteração prejudicial.

2.4 ASPECTOS TÉCNICOS: EQUAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO

Para se ter uma base inicial de cálculos, será utilizado todos os dados possíveis obtidos para se iniciar a visão previa do sistema a ser implantado.

Devido a vazão sanitária já se encontrar totalmente montada, calculada e aprovada pela ANEEL e pelos órgãos ambientais, será necessário trabalhar com um valor fixado de escoamento em m^3/s .

Como a vazão sanitária esta implementada junto a barragem, a uma queda líquida entre a tubulação da vazão sanitária e o canal de fuga onde deverá ser instalada a unidade geradora, será considerado para fins de cálculo o nível de queda desde o nível mínimo operacional do lago até o canal de fuga.

Segundo Bonamigo (2004) para se obter os aspectos técnicos do grupo turbina/gerador é necessário utilizar-se de equações adequadas. Para calcular a potência gerada por uma turbina, utiliza-se a seguinte equação:

$$P_{\text{turbina}} = (9,81 \times H_{\text{liq}} \times Q \times \eta) \quad (1)$$

Onde:

P_{turbina} - (Potência da turbina)

H_{liq} - (Queda líquida proporcionada pelo desnível)

Q - (Vazão de escoamento)

η - (Rendimento da turbina)

Já para calcular a potência elétrica adquirida no gerador, usamos a seguinte equação:

$$P_{\text{elétrica}} = (P_{\text{turbina}} \times \eta_{\text{gerador}}) \quad (2)$$

Onde:

$P_{\text{elétrica}}$ - (Potência do gerador)

P_{turbina} - (Potência da turbina)

η_{gerador} - (Rendimento do gerador)

Desta forma obtendo um valor médio de potência a ser utilizado para usufruir do potencial hidráulico da vazão sanitária, buscando-se a melhor eficiência possível calculada para o grupo turbina/gerador.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A PCH Xavantina possui um potencial energético de 6.075 MW, contendo duas unidades geradoras tipo Kaplan “S” montante, com vazão nominal individual de 17,72 m^3/s em uma queda líquida de 19,42 m. A casa de força é ao pé da barragem, desta forma o trecho

de vazão reduzida é considerado nulo perante aos órgãos ambientais e ANEEL, assim, não necessitando de uma vazão sanitária com escoamento constante, somente em casos de parada total das duas unidades geradoras em caso de distúrbios no sistema ou por motivos de baixa afluência. Não sendo impeditivo transformar uma vazão controlada em uma vazão constante para aproveitamento energético. A Figura 1 demonstra a planta de situação da PCH.

Figura 1- PCH Xavantina



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Uma nova unidade geradora seria complementar ao sistema de geração atual, ou seja, a PCH acrescentaria ao seu portfólio o valor da nova geração, devido a mesma ser implementada dentro do escopo do projeto usufruindo da vazão sanitária para geração de energia. Essa potência em somatória com a atual teria que ser homologada junto a ANEEL e aos órgãos responsáveis.

Em análise da escolha do ponto de instalação da nova unidade geradora, sinalizado na Figura 2, visando ser dentro do canal de fuga do vertedouro da barragem, local no qual se encontra instalada a tubulação da vazão sanitária, elevada concentração de umidade, alta coluna de água ocasionada pelo vertimento nos períodos chuvosos e o pouco espaço para instalação do equipamento, limitou a escolha do tipo e modelo do conjunto turbina/gerador.

Figura 2- Canal de fuga lateral em período de vertimento



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Sendo assim, o equipamento que melhor se enquadraria através da pesquisa para instalação dentro do canal de fuga é a **turbina tipo hélice** (Figura 3) acoplada a um gerador assíncrono, por motivos de baixa possibilidade de regulação e controle, sendo sua potência determinada dentro dos cálculos realizados através das equações (1) e (2).

A turbina tipo hélice permite que o conjunto turbina/gerador permaneça submerso por períodos indeterminados sem que isso afete seus componentes internos, pois possuem alto sistema de vedação (IP68) em conjunto com um sistema de injeção de nitrogênio para contrapressão interna. Não há necessidade de ser abrigada, com isso otimizando e reduzindo espaço ocupado pela mesma no seu ponto de instalação.

Figura 03- Turbinas tipo Hélice



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Estando a PCH totalmente pronta, dimensionada e em operação, aumentaria consideravelmente o custo para repotencializar o transformador principal de 6750 kVA, como também instalar um novo painel de proteção e controle dentro da casa de força junto aos demais, considerando distancia, espaço para alocação e custos excedentes com quantidade de materiais. O novo sistema poderia assim, por análise de viabilidade técnica, ser conectado diretamente a rede de transmissão de energia da PCH, com tensão de distribuição em 23,1 kV.

Visando a redução de custos em relação a equipamentos/materiais em aproveitamento a estrutura já instalada, a melhor opção seria a locação do painel de proteção e controle da minicentral na sala da tomada d'água o mais próximo do sistema.

Verificado localmente que a sala possui espaço suficiente para comportar um novo painel sem que haja qualquer redução do ambiente útil ou deficiência para realizar as manutenções.

Inevitável a aquisição de um transformador trifásico para compor o novo sistema, devido à elevação de tensão para conexão junto a LT 23,1 kV, sendo considerada média tensão. A PCH se enquadra como geração distribuída, pois é conectada diretamente ao sistema de distribuição da cidade de Xanxerê/SC junto ao alimentador 02 da concessionária

Iguaçu Energia. Esse transformador poderia ser colocado na área externa, atrás da sala da tomada d'água pelo amplo espaço aberto que a localização possui conforme inspeção local.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O intuito desse estudo é fazer uma análise técnica para aproveitamento energético afim de resolver o problema da vazão sanitária (Figura 4) que é utilizada somente como recurso hídrico para manter o trecho de vazão reduzida.

Figura 4 - Vazão Sanitária PCH Xavantina



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Os dados coletados de geração total e média mensal (Tabela 1) dos meses entre janeiro e março de 2019 foram fornecidos pelo empreendimento. Esses dados mensais demonstram que, baseado em uma perspectiva total a somatória de geração das duas unidades geradoras não chega ao montante da energia instalada para o empreendimento, mas sempre se encontra acima da garantia física de 3,54 (MW) estipulada pelo Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Analiticamente os dados coletados favorecem a viabilidade de instalação de uma unidade geradora em aproveitamento da vazão sanitária do empreendimento.

Tabela 01- Dados informativos de geração e consumo mensais da PCH

Item	Janeiro	Fevereiro	Março
Geração Bruta	3.119,99 (MWh)	2.604,61 (MWh)	3.775,39 (MWh)
Geração Líquida	3.060,51 (MWh)	2.557,58 (MWh)	3.701,73 (MWh)
Consumo Interno	10,91 (MWh)	9,39 (MWh)	10,85 (MWh)
Geração Média Líquida	4,11 (MW)	3,81 (MW)	4,98 (MW)

Consumo Médio	0,01 (MW)	0,01 (MW)	0,01 (MW)
Garantia Física	2.633,76 (MWh)	2.378,88 (MWh)	2.633,76 (MWh)

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Segundo ANEEL (2013) cada item da tabela 01 pode ser melhor esclarecido dentro do sistema de geração de energia como:

- Geração Bruta- Total de energia elétrica produzida por um sistema de geração energia em um determinado período, medição feita nos terminais de saída dos geradores.
- Geração Líquida- Total de energia elétrica medida nos terminais no ponto de conexão entre sistema de geração de energia e concessionária, em um determinado período, descontando o consumo de energia interno da usina e todas as perdas elétricas entre o trecho da usina até o ponto de conexão.
- Consumo Interno- Total de energia utilizada para suprir as necessidades dos equipamentos eletromecânicos da usina em um determinado período.
- Geração Média- É a variação de potência elétrica produzida pela usina.
- Consumo médio- É a variação máxima e mínima de potência elétrica consumida pelos equipamentos internos da usina.
- Garantia Física- No caso das usinas hidrelétricas determina a geração média de energia que pode ser comprovada para atender as cargas de um sistema ou para comercialização, tendo como base para os cálculos, as características do projeto básico. Para comercializar dentro do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE) sua cota mínima de participação é definida pela garantia física estipulada para o projeto.

Com os dados do projeto geral já definidos, foi possível avaliar a viabilidade de concepção de um aproveitamento energético utilizando a vazão sanitária sem aumentar o impacto ambiental caso venha a ser turbinada. Estando totalmente dentro das normas e com suas devidas responsabilidades aprovadas junto aos órgãos, sendo aceitável e passível de integração junto ao projeto original.

Este novo sistema deverá se manter 100% em funcionamento, corroborando para o controle operacional do reservatório em conjunto com as demais unidades geradoras.

Utilizando-se das equações (1) e (2) e aplicando os dados coletados da pesquisa que são eles: queda líquida de 19 m, vazão de 2,33 m³/s e um diâmetro de tubulação com 900 mm e complementando com os dados fornecidos por empresa fabricante do conjunto

turbina/gerador, eficiência da turbina em 92 % e a eficiência do gerador em 95%, tem-se os valores de potência obtidos para o aproveitamento energético:

$$P_{\text{turbina}} = (9,81 \times 19 \times 2,33 \times 0,92) = 399,55 \text{ kW}$$

$$P_{\text{elétrica}} = (399,55 \times 0,95) = 380 \text{ kW}$$

O empreendedor agregando esse valor de energia a sua demanda total, estará dando uma sobriedade ou um acréscimo ao seu projeto, onde essa vazão era considerada custo por ser um volume de escoamento livre sem utilização, passará a ser utilizado e desta forma o empreendimento encontrar-se-á ocupando a afluência total proveniente do rio. A implantação deste sistema não trará somente proveito em um retorno individual para a empresa, mas também estará beneficiando a sociedade, onde ambos sentirão o reflexo positivo através da nova geração (BONAMIGO, 2004).

Com o valor do conjunto turbina/gerador pré-definido com uma potência de 380 kW, tensão 220/380 V, pode-se também estipular o valor da potência que o transformador elevador deverá obter, sendo esse valor comercial de 500 KVA, 380 V/23,1 kV.

Suas conexões de saída para baixa tensão devem conter cabos isolados em canaletas até o disjuntor dentro do painel de proteção e controle. As conexões de alta tensão deverão ser aéreas com cabos nus diretamente conectados a Linha de Transmissão, próxima a sala, como pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5 - Sala da Tomada D'água e LT 23,1kV



Fonte: Autor (2019)

Em caso de instalação real deste projeto, deverá ser feito uma análise técnica em relação ao estudo de seletividade das proteções da LT 23,1 kV pois mesmo sendo adicionados valores muito baixos, a análise deverá ser considerada para ajustes nas proteções se necessário. Em relação aos cabos da linha de transmissão, os mesmos foram superdimensionados visando futuras projeções, conforme análise da pesquisa e informações coletadas no empreendimento. Os cabos utilizados são de alumínio nu MCM 477 (240mm²) com capacidade de condução em 646 A.

Para uma análise comparativa de retorno do investimento da nova geração de energia, pode-se realizar uma simulação, onde a energia gerada pode ser comercializada no mercado livre de energia.

O Mercado Livre de Energia é um ambiente de comercialização de energia elétrica, onde vários setores ou agentes podem vender ou comprar energia a curto ou a longo prazo. O preço do MWh é determinado semanalmente pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), denominado como Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) através de cálculos matemáticos por modelos de sistemas computacionais, sendo esses valores diferenciados entre si pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em 4 submercados: Norte, Sul, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste. A variação de valores por submercado é devido ao volume de chuvas para cada região, preço dos combustíveis para as usinas térmicas, demanda de energia, entrada de novos projetos ao sistema, disponibilidade das linhas de transmissão e dos agentes de geração (ENGIE, 2018).

Seguindo a precificação semanal pelo PLD, pode ser comercializada energia gerada pela nova unidade geradora por contratação de curto prazo ou uma contratação a longo prazo, levando em conta os valores semanais para uma melhor negociação, estando tudo dentro das regras de comercialização.

Foram analisados através de pesquisas, os preços do MWh dos três últimos anos, buscando os valores médios para uma base analítica conforme Tabela 2, onde pode-se ter uma estimativa aproximada do tempo de retorno do investimento em caso de a energia hipoteticamente ser comercializada no Mercado Livre de Energia.

Tabela 2- PLD médio anual

Ano Base	Preço médio anual (MWh)
09/2016 a 08/2017	R\$ 227,54
09/2017 a 08/2018	R\$ 351,67
09/2018 a 08/2019	R\$ 219,55

Fonte: CCEE (2019).

Para base do retorno financeiro foi realizado pesquisa de mercado, onde duas empresas “A” e “B” retornaram à solicitação de orçamentos (Tabela 3) relacionados a equipamentos.

Tabela 03- Valores obtidos com Equipamentos

Fornecedor	Equipamentos	Características Técnicas	Custo
Empresa A	- Turbina; - Gerador; - Painel de controle e proteção; - Conduto Forçado; - Talha elétrica.	TURBINA: - Tipo_ hélice simples submersível; - Potência_406 (kW); - Rotação_720 (rpm); - Velocidade de disparo_1800 (rpm) GERADOR: - Tipo_ assíncrono; - Potência_ 385 (kW); - Polos_ 10 polos; - Tensão_ 380 (V); - Ligação_ triângulo.	R\$ 1.265.300,00
Empresa B	- Transformador	Transformador de Força -Potência_ 500 (kVA) -Tensão_ 380 (V) / 23,1 (kV)	R\$ 21.000,00
Total			R\$ 1.286.300,00

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

A geração anual deduzindo os valores de indisponibilidade por paradas forçadas e programadas, possuirá um percentual de disponibilidade equivalente a 95%, totalizando um montante de 3.158,85 MWh. Considerando o preço do MWh médio do último ano para realizar a simulação financeira, o valor da receita para o empreendimento seria em torno de R\$ 693.524,42.

O retorno financeiro hipotético do investimento levará em torno de 22 meses e 8 dias, comercializando a energia dentro do Mercado Livre. Considerando somente os custos de equipamentos conforme tabela 03, desconsiderando custos com estruturas civis ou metálicas necessárias para alocação do conjunto turbina/gerador dentro do canal de fuga. Podendo também o empreendedor realizar outras formas de negociação para sua geração de energia, como diretamente a um consumidor final a um preço menor ou maior ao apresentado através do PLD, contrato fixo de curto ou longo prazo, assim, variando a receita final e o tempo de retorno do investimento.

O sistema dimensionado possui todas as condições de se tornar um empreendimento totalmente viável para o projeto da PCH Xavantina, ocasionando com isso um melhor

aproveitamento do escoamento do rio, apresentando uma geração de energia elétrica com baixo custo, sem causar prejuízos ao meio ambiente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia elétrica apoia o desenvolvimento social e pessoal. Principalmente quando satisfaz o empreendedor e a sociedade gerando eletricidade através de recursos que tenham pequenos impactos ambientais e proporcionem o equilíbrio entre geração de energia e meio ambiente.

O objetivo geral foi alcançado, pois todos os dados coletados e análises realizadas favoreceram para apresentar a ideia inicial de geração de energia em aproveitamento do escoamento de água da vazão sanitária, onde pode-se realizar a instalação de uma unidade geradora com total ênfase no consumo ótimo da afluência do rio.

A PCH Xavantina demonstra um grande potencial para utilização de todo seu sítio hídrico, podendo fazer com a instalação da nova unidade geradora o melhor controle possível da variação de água do seu reservatório e transformá-la em energia elétrica, em conjunto com as demais unidades geradoras.

A unidade geradora será conectada diretamente a LT 23,1 kV, com todo sistema automatizado para controle e monitoramento, podendo ser controlada remotamente via sala de controle da usina ou de qualquer centro de operação instalado em qualquer localização nacional, como já é realizado com todo sistema da usina.

REFERÊNCIAS

ALBARELLO, Leonardo. **Guia para a implantação de Pequenas Centrais Hidrelétricas-PCH's**. Panambi: UFSM/RS, 2014. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética.

ALMEIDA, Tamires. **Como funciona um grupo gerador de energia**. 2015. Disponível em: <<https://industriaohje.com.br/como-funciona-um-grupo-gerador-de-energia>>. Acesso em: 01 mai. 2019.

ALUGAGERA. Locação de Equipamentos. **Gerador Síncrono e Assíncrono/Quais diferenças? Como funciona?** 2019. Disponível em: <<https://alugagera.com.br/noticias/diferenca-gerador-sincrono-assincrono>>. Acesso em: 21 jul. 2019.

ARRIAGA, I.; RUDNICK, H.; ABBAD, M. **Sistemas de Energia Elétrica- Análise e Operação**. [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2015.

ATHOS ELECTRONICS. **Transformador**. 2015. Disponível em: <<https://athoselectronics.com/transformador/>>. Acesso em: 07 mai. 2019.

BRASIL. Associação Brasileira de PCHS e CGHS - ABRAPCH (Brasil) (Org.). **PCHs | O que são PCHs e CGHS**. 2016. Disponível em: <<http://www.abrapch.org.br/pchs/o-que-sao-pchs-e-cghs>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

BRASIL. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5460/2000. **Sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: ABNT 2000.

BRASIL. Agência Nacional das Águas – ANA. (Org.). **Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos**. Brasília, 2010.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (Org.). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil: Energia Hidráulica**. 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (Org.). **BIG - Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração do Brasil**. 2019. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 14 ago. 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (Org.). **Análise de Impacto Regulatório Revisão da Resolução Normativa nº 673/2015**. 05 de abril de 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (Org.). **Resolução normativa ANEEL nº 583**. 2013. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/home?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2F>. Acesso em: 14 dez. 2019.

BRASIL. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE. (Org.). **Preço médio da CCEE (MWh)**. 2019. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o_quefazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?>. Acesso em 15 de set. 2019.

BRASIL. Conselho nacional do meio ambiente – CONAMA. (Org.). **Resolução nº 237**. 1997. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res97/res23797.html>>. Acesso em: 25 ago. 2019.

BRASIL. Instituto do meio ambiente – IMA. (Org.). **Instruções Normativas**. 2019. Disponível em: <<http://www.ima.sc.gov.br/index.php/licenciamento/instrucoes-normativas>>. Acesso em: 31 ago. 2019.

BONAMIGO, Marlon Roberto. **O aproveitamento econômico da vazão remanescente como forma de otimizar a relação impacto ambiental-geração de energia elétrica de**

pequenas centrais hidrelétricas. Santa Maria: UFSM/RS, 2004. Monografia (Pós-Graduação em Gestores Regionais de Recursos Hídricos).

CERAN – Cia Energética Rio Das Antas (Florianópolis). **Geração de Energia.** Disponível em: <http://www.ceran.com.br/session/viewPage/pageId/64/language/pt_BR>. Acesso em: 26 mar. 2019.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas.** 2000. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>>. Acesso em: 01 mai. 2019.

ENGIE. Geração e comercialização de Energia Elétrica. **Você sabe o que é o PLD e como ele impacta o Mercado Livre de Energia?** 2018. Disponível em: <<https://minhaenergialivre.com.br/como-o-pld-impacta-o-mercado-livre-de-energia/>>. Acesso em: 15 set. 2019.

FREITAS, John Maikel Corrêa. **A Importância das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) na economia do Rio Grande do Sul.** Florianópolis: UFSC/SC, 2012. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas).

HIDROENERGIA. **Tipos de Turbinas hidráulicas.** 2018. Disponível em: <<https://www.hidroenergia.com.br/tipos-de-turbinas-hidraulicas/>>. Acesso em: 01 mai. 2019.

PEREIRA, Geraldo Magela. **Projeto de Usinas Hidrelétricas passo a passo.** São Paulo: Oficinas de Textos, 2015.

REIS, Lineu Bélico. **Geração de Energia Elétrica.** --2. ed. rev. e atual. – Barueri, SP: Manole, 2011.

RHAMA, Consultoria Ambiental. **Meio ambiente- vazão sanitária- remanescente ou ambiental.** 2011. Disponível em: <<http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/vazao-sanitaria-remanescente-ou-ambiental/>>. Acesso em: 16 mar. 2019.

SOUZA, Zulcy. **Projeto de máquinas de fluxo: tomo IV, turbinas hidráulicas com rotores tipo axiais.** --1. ed. – Rio de Janeiro: Interciência: Minas Gerais, 2011.

VERKA ENERGY. **Alta tecnologia em sistemas e equipamentos de geração de energia.** 2019. Disponível em: <<http://www.verka.com.br/>>. Acesso em 01 out. 2019.