

# Retrofit em Sistema de Geração Distribuída por Fonte Hídrica Utilizando Motor Assíncrono

Odimar Zanela dos Santos, Alessandro Rodrigues

**Resumo** – Este artigo apresenta o retrofit em uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH), localizada no município de São Ludgero, conectada ao sistema interligado nacional como geração distribuída, a qual possui instalado um alternador síncrono, equipamento usualmente empregado nestas situações, que por suas características necessitava de manutenções rotineiras. Para mitigar as manutenções foi substituído o alternador síncrono por um motor de indução que passou a operar como gerador. Instalou-se também um relé com proteção secundária para proteger contra o fluxo de potência reversa, dentre outras proteções necessárias para o perfeito funcionamento do sistema de geração elétrica distribuída. Neste estudo de caso, foi desenvolvida uma análise experimental com o objetivo de avaliar. Foram avaliados os resultados da alteração do gerador proposta apresentados quanto a geração de potência ativa, reativa, desempenho, velocidade de rotação. Os resultados mostraram que a geração de energia permaneceu dentro dos mesmos patamares da solução convencional, porém as paradas para manutenção foram eliminadas. Em termos de geração de energia e retorno financeiro a proposta atendeu os interesses do empreendedor.

**Palavras-chave** – Central Geradora Hidrelétrica, Assíncrono, Geração Distribuída.

**Abstract** – This article presents the retrofit in a Hydroelectric Power Plant (HPP), located in the county of São Ludgero, connected to the national interconnected system as distributed generation, which has a synchronous alternator installed, equipment usually used in these situations, which for its features required routine maintenance. To mitigate maintenance, the synchronous alternator was replaced by an induction motor that started to operate as a generator. A relay with secondary protection was also installed to protect against reverse power flow, among other protections necessary for the perfect functioning of the distributed electrical generation system. In this study case, an experimental analysis was developed with the aim of evaluating. The results of the alteration of the proposed generator presented regarding the generation of active and reactive power, performance, rotational speed were evaluated. The results showed that the power generation remained within the same levels as the conventional solution, but the maintenance stops were eliminated. In terms of energy generation and financial return, the proposal served the interests of the entrepreneur.

**Keywords** – Hydroelectric Power Plant (HPP), Asynchronous, Distributed Generation.

## I. INTRODUÇÃO

---

Artigo apresentado como requisito parcial para a conclusão do curso de Pós-graduação em Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL. Ano 2021. Orientador: Prof. Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, Mestre Engenheiro.

A água é um bem de extrema importância para o uso em diversas demandas tais como: consumo, irrigação e também como fonte de energia. Para este último tem-se registro do primeiro uso na China durante a dinastia de Han que se deu entre os anos de 202 a.C e 9 d.C. Sabe-se também que os gregos já utilizavam o força da água para moinhos de grãos há cerca de 2000 anos. Já nos anos 1800, a população começou a utilizar a fonte energia hídrica para mover rodas giratórias (rodas d'água) que, por sua vez, moviam máquinas de tecelagem, bem como, máquinas em serrarias, dentre outras aplicações. [1].

A primeira Usina Hidrelétrica construída no rio Fox, em Appleton, Wisconsin no ano de 1882. Um proprietário de moinhos de papel, ligou uma turbina de água a um gerador de energia. [2]. Esta, produziu cerca de 12,5KW de potência, que alimentou os dois moinhos de papel e a casa do proprietário. Foi no ano de 1888 que o engenheiro Nikola Tesla (1856-1943) desenvolveu o motor de indução, este abriu o caminho para o uso das fontes de corrente alternada, o mesmo inventou ainda o transformador conhecido bobina de Tesla. Já em 1901, a transmissão da eletricidade por longas distâncias se tornou economicamente viável nos EUA após a instalação de máquina de corrente alternada na UHE Niagara Falls, no Estado de Nova York, por George Westinghouse, que possibilitou a expansão do uso das usinas hidrelétricas. Nos anos 1930, a capacidade de potência das turbinas hidráulicas tornou-se maior, coincidentemente com o aumento da demanda do uso da energia elétrica [3].

No Brasil temos uma matriz energética que coloca a fonte hídrica como principal, tendo 61,93% da participação total no tocante a potência instalada contra 38,07% da soma das demais como a térmica, eólica, solar e demais fontes, embora estas venham aumentando a sua participação [4]. Basicamente podemos classificar a geração de energia por meio de fonte hídrica em 3 tipos a depender da sua potência e características. Central Geradora Hidrelétrica com Capacidade Instalada Reduzida (CGH) é aquela cuja potência instalada é inferior a 5MW, Pequena Central Hidrelétrica (PCH) é aquela que possui potência instalado entre 5MW e 30MW, porém com reservatório inferior a 13Km<sup>2</sup>, já Usina Hidrelétrica (UHE) possuem potência instalada superior a 5MW desde que não classificada como PCH [5].

Este Artigo foi baseado em um projeto de retrofit que fora executado a fim de diminuir as manutenções de rotina que o sistema antigo necessitava, e que ocasionava paradas indesejadas na CGH Stang. Desta forma foram realizadas mensurações, inspeções, coleta de dados para a devida avaliação dos

Pós-graduando em Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica pela Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL. E-mail: odimar@zaneliengenharia.com.br, alessandro@flexmatic.com.br

resultados, conforme está apresentado no decorrer deste artigo.

## II. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA HIDRELÉTRICA

Antes mesmo de se tornar energia elétrica, a energia potencial gravitacional hidráulica deve ser convertida em energia cinética. O dispositivo que realiza essa conversão de energia é a turbina. Esta consiste basicamente em uma roda com várias pás, que gira em torno do seu próprio eixo ao receber a vazão de água. Na ponta dessa cadeia de conversões é o gerador, que converte a energia cinética da turbina em eletricidade. A instalação de uma usina hidroelétrica em um rio antevê a construção de uma barragem para represá-lo, formando um lago artificial que possui duas funções: acumular água para quando o rio estiver com a sua vazão diminuída e ainda promover um desnível para a queda da água, aumentando assim a energia potencial e consequentemente a energia gerada [6]. A figura 1 exemplifica uma usina hidroelétrica.

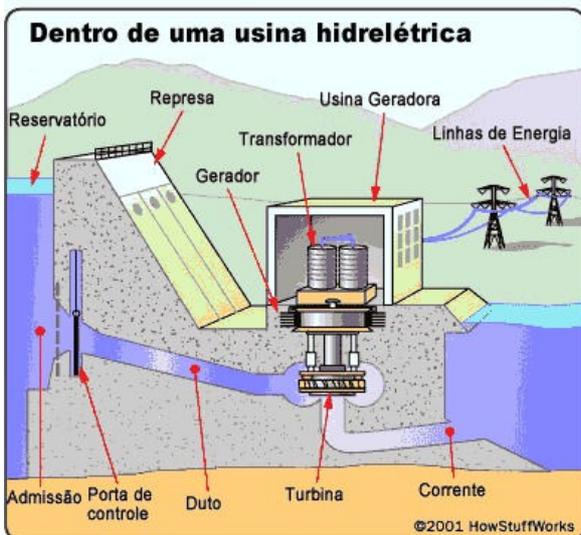


Figura 1: Exemplo de célula usina hidroelétrica.  
Fonte: [7]

O gerador/alternador assíncrono utiliza o mesmo princípio de funcionamento dos motores assíncronos ou motores de indução para gerar energia elétrica. Quando esta máquina é usada como motor, a energia elétrica é transformada em energia mecânica/cinética, fazendo o rotor girar em torno do seu próprio eixo. A velocidade de rotação depende das características do motor, geralmente definida pelo número de polos, mas sempre será abaixo da chamada “frequência de sincronismo”. Já quando a máquina assíncrona é usada como gerador/alternador, o rotor deve ser girado acima dessa frequência de sincronismo para realizar a conversão de energia mecânica/cinética em energia elétrica.

Dentre as vantagens de um gerador assíncrono são sua instalação/montagem simplória e muito robusta, a não utilização de contatos mecânicos no rotor que causa a redução de manutenções por desgastes, e a ausência de sincronismo com a velocidade do rotor, o que faz ser amplamente usada em aplicações como usinas eólicas e hídricas de pequeno porte.

A desvantagem deste tipo de gerador é que além de necessitar de “energia reativa” para poder gerar “energia ativa”. Isso facilmente pode ser resolvido com o emprego de um banco de capacitores ligados ao gerador, ou ligar em paralelo com o Sistema Interligado Nacional (SIN). Outra desvantagem é o difícil controle de frequência e tensão, que é solucionado também quando sistemas de pequeno porte que usam máquinas assíncronas se conectam em paralelo a um sistema grande [8].

## III. TECNOLOGIA DE TURBINAS

Dentre a vasta gama de tecnologias de turbinas podemos elencar como as principais as que seguem:

- Francis;
- Pelton;
- Kaplan ou Bulbo.

### A. Turbina Francis

Francis criou a turbina que leva o seu nome no ano de 1849, porém foi somente em 1873 que a empresa J.M. Voith construiu o primeiro exemplar deste modelo de turbina, passando desde então por melhorias frequentes, como por exemplo o uso das pás diretrizes, também conhecidas como pás Fink [9].

As turbinas Francis podem ser aplicadas com eficiência para uma vasta faixa de queda, bem como, vazão. Porém na atualidade são comumente utilizadas para grandes aproveitamentos, sendo que estas podem ultrapassar a potência unitária de 750 MW, a título de exemplo da usabilidade deste tipo de máquina temos na usina de Itaipu constituída por 20 turbinas Francis de 715MW. As turbinas mais antigas possuem rendimentos inferiores a 85%, já as mais novas podem ultrapassar os 92% para grandes máquinas. [9] [10] [11].

As turbinas Francis funcionam com diferença de pressão entre os lados do rotor, por isso é comumente chamada de turbina de reação. As pás do rotor são “desenhadas” de uma maneira abstrusa em uma caixa espiral, distribuindo a água ao redor do rotor. Em funcionamento, a água entra no rotor pela periferia, em seguida passa por entre as pás diretrizes, guiando assim a água em um ângulo propício para a entrada nas pás do rotor, deixando-a axialmente em relação ao eixo [9] [11]. A figura 2, mostra uma Turbina Francis.

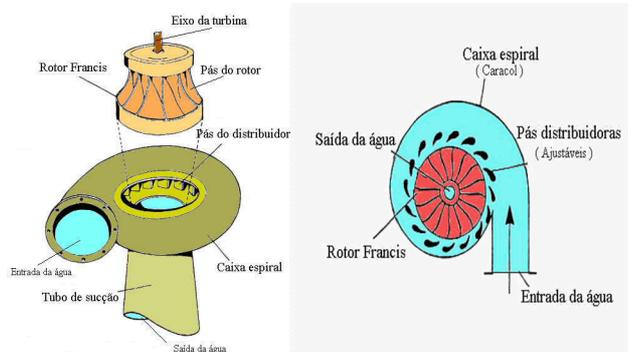


Figura 2: Turbina Francis.  
Fonte: [9]

As turbinas Francis são utilizadas no Brasil em diversos setores até mesmo em pequenas, mini e micro centrais hidrelétricas sendo uma das mais utilizadas para esse sistema. Uma das poucas desvantagens dessa turbina é a variação da curva de rendimento com a vazão.

### B. Pelton

Lester Allan Pelton, carpinteiro e inventor americano, criou a turbina que leva o seu nome no ano de 1879. As turbinas do tipo Pelton são turbinas de ação, tendo como a sua principal característica a velocidade do jato na de saída do bocal, que dependendo da queda pode chegar de 150 a 180 m/s. Neste tipo de turbina, o torque é provocado pela ação de um jato d'água sobre a dupla concha do rotor [9].

As turbinas Pelton podem ser aplicadas com eficiência para quedas d'água com alturas que variam entre 150m e 1400m, podendo chegar a 2000m, sendo que para alturas menores que 250m pode-se tornar mais vantajoso o uso das turbinas Francis [9] [10] [12].

*“Para mini e micro aplicações, entretanto, a turbina Pelton pode ser usada para baixas quedas em alguns casos até menos de 20m” (HARVEY, Adam; e outros, 1998).*

Para viabilizar a aplicação deste tipo de turbina em casos onde a vazão é grande e a queda é pequena a roda da turbina torna-se muito grande em relação a potência; neste caso aplica-se uma das duas soluções a seguir:

- Uma das soluções é aumentar a quantidade de jatos, sendo comumente utilizados até 6 jatos, desta forma admite-se um diâmetro menor do rotor para uma mesma vazão;
- Outra solução seria utilizar rotores gêmeos. Dois rotores usados lado a lado montados no mesmo eixo ou um em cada lado do gerador ambos sobre o mesmo eixo. Essa solução só é utilizada quando não existe maneiras de viabilizar o emprego de maior número de jatos [9]. A figura 3, mostra uma Turbina Pelton.

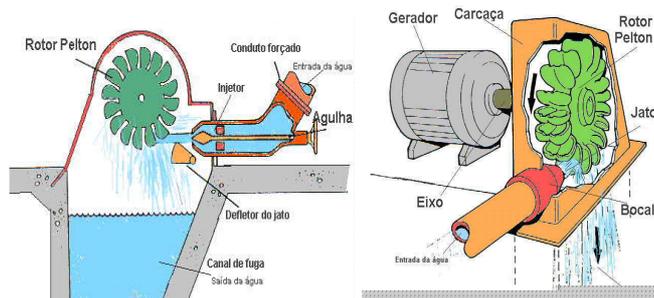


Figura 3: Turbina Pelton  
Fonte: [9]

O gerador geralmente é acoplado diretamente ao eixo da turbina, por meio de acoplamentos rígidos, mas para alguns casos a fim de ajustar a velocidade de rotação necessita a aplicação de transmissão mecânica por correias ou redutores. Quando aplicado o sistema de transmissão por correias, para potências menores dá-se preferência as correias em V, as quais são mais baratas e encontra-se com mais facilidade no mercado que as correias planas, utilizadas para potências maiores.

Basicamente a turbina consiste das seguintes partes consideradas principais: o rotor, o bocal e a caixa. Seu modo de operar assemelha-se ao da roda clássica dos antigos moinhos, no entanto fora modificada para aumentar sua eficiência: a água é levada para a tubulação, que ao final tem um bico, um tipo de gargalo que faz com que a velocidade da água aumente e seja direcionada. O jato sai do bico e atinge as pás do impulsor, que têm formato de côncavo.

A fabricação das conchas do rotor é bastante difícil, por conta de sua forma geométrica, é um processo complicado principalmente sua conclusão. Utiliza-se para fabricar as conchas o aço fundido com adição de 13% de cromo. A concha deve possuir a capacidade de absorver a energia cinética que sai pela ação do jato do bocal e concomitantemente distribuí-la no seu em torno, sem interferir com a próxima pá.

O bocal é uma peça cônica que fica no extremo da tubulação, quando a água passa por ele sua pressão transforma-se em velocidade. Por sofrerem grandes desgastes o material utilizado para confeccionamento deve ser de alta qualidade, normalmente um aço com manganês, o qual possui alta resistência mecânica [9] [10] [12].

Um exemplo prático de uso desse tipo de turbina é a Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza localizada no município de Antonina. Seu reservatório está localizado na Rodovia BR-116 (trecho Curitiba – São Paulo), no município de Campina Grande do Sul, a 50 km de Curitiba. Possuindo uma barragem de terra de 58 m de altura e 370 m de comprimento com capacidade de geração de 260MW [13].

### C. Kaplan ou Bulbo

O professor austríaco Viktor Kaplan em 1913 projetou a Turbina Kaplan ou turbina bulbo, é uma turbina do tipo axial: onde é o fluxo de água que faz com que as hélices girem em direção axial em relação ao seu eixo. Utiliza-se em pequenas diferenças de altura, mas com grande vazão de água sendo elas superiores a 200m<sup>3</sup>/s [12].

Assemelhando-se a forma construtiva as hélices de um navio, as Turbinas Kaplan são máquinas de eixo vertical ou horizontal projetadas com rotor que possui pás móveis, permitindo assim sua regulação com a vazão do distribuidor. É empregada em sua maioria para aproveitamentos de baixa queda e quase sempre a fio d'água. Sua forma construtiva por ser compacta faz-se reduzir consideravelmente o tamanho das obras civis, tornando-a assim de baixo custo. Porém, em contrapartida o custo do equipamento, é maior que os das outras turbinas.

Seu funcionamento assemelha-se à turbina Francis, pois possui um anel de palhetas guia fixas na entrada da turbina, no entanto as Turbinas Kaplan possuem as palhetas de guia na periferia do rotor. Há uma passagem entre as palhetas de guia e o rotor, essa passagem direciona o radial que é forçado a fluir na direção axial. As pás do rotor estão ligadas ao eixo central da turbina. As lâminas estão conectadas ao eixo com juntas móveis, deste modo podem ser giradas de acordo com o caudal e a cabeça de água disponíveis. As lâminas da turbina Kaplan são projetadas com torção ao longo do comprimento, permitindo o fluxo de arrasto na entrada e o fluxo axial na saída [14]. A figura 4, mostra uma Turbina Kaplan.

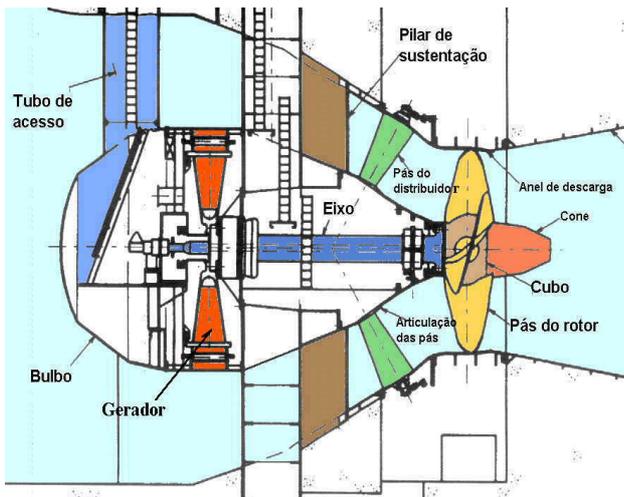


Figura 4: Turbina Kaplan ou Bulbo.  
Fonte: [9]

Um exemplo prático de uso desse tipo de turbina é a Usina Hidrelétrica de Igarapava está localizada no Rio Grande, entre os municípios de Igarapava e Rifaina em São Paulo. Desenvolvida por 5 unidades geradoras, com capacidade instalada total de 210 MW, o objetivo foi o aproveitamento de baixas quedas na geração de energia elétrica fazendo de forma técnica e economicamente viável. A usina foi primeira no Brasil na utilização dos grupos turbogeradores tipo "Bulbo" [15].

A figura 5, mostra a diferença dos três tipos de Turbinas, na foto é possível ver as diferenças nas Pás do rotor.



Figura 5: As Três Turbinas (Francis, Pelton, Kaplan)  
Fonte: [12]

#### IV. TECNOLOGIA DE ALTERNADORES OU GERADORES

Podemos destacar como os principais tipos de alternadores/geradores os seguintes:

- Síncrono
- Assíncrono

##### A. MÁQUINA SÍNCRONA

O Gerador Síncrono é composto pelo estator e pelo rotor, no estator é o local que aloja um enrolamento monofásico, bifásico ou trifásico e onde será induzida tensão pela rotação do rotor. Ao ser produzida uma tensão alternada sobre o

enrolamento do estator, ele gerará também uma corrente igualmente alternada ao aplicar carga no mesmo. Já o rotor é composto por um enrolamento de campo que sua alimentação dar-se-á por corrente contínua e tem por objetivo criar o campo magnético principal na máquina.

O alternador assemelha-se ao funcionamento de uma máquina de corrente contínua. Quando houver movimento relativo entre um condutor e um campo magnético sempre terá uma tensão induzida no condutor. Nas máquinas síncronas os condutores são fixados na armadura fazendo com que campo magnético empurre a máquina primária e ela se mova. A máquina primária por sua vez é acoplada mecanicamente ao rotor onde os pólos estão alojados e fornece a eles uma força fazendo-os girar. A tensão nos terminais dos geradores é fornecida pelo movimento rotativo entre campo e condutor. Ao ser conectada uma carga nos terminais do gerador/alternador este por sua vez faz com que a tensão induzida no estator provoque a circulação de corrente entre eles. Dessa forma a potência mecânica fornecida pela máquina primária é transformada em energia elétrica (suprimidas as perdas). Alojado nos pólos o enrolamento de campo deverá ser alimentado por uma fonte de corrente contínua através de escovas.

Em alternadores mais moderno é possível alimentar o enrolamento de campo sem o uso de escovas, dessa forma a tensão necessária para excitar o enrolamento de campo é fornecida através de um sistema estático (brushless), o qual é formado por uma ou mais excitatrizes instaladas no eixo e por dispositivos a base de semicondutores. O alternador síncrono gera uma tensão do tipo alternada senoidal (geralmente de 50 ou 60Hz), este pode ser do tipo monofásico ou trifásico. Uma máquina síncrona é formada por uma série de condutores ligados em série, logo a potência convertida é multiplicada pelo número de condutores [17]. Na figura 6 ilustra o esquema funcional de um gerador síncrono.

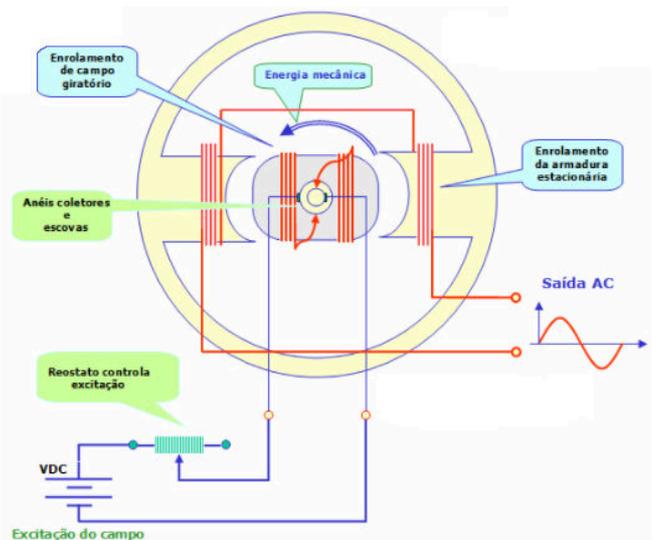


Figura 6: Esquema ilustrativo do Gerador síncrono  
Fonte: [18]

##### B. MÁQUINA ASSÍNCRONA

A máquina assíncrona é composta pelo estator e pelo rotor, o estator é formado por chapas de ferro-silício laminado, com ranhuras espaçadas de maneira uniforme, nele ficam os condutores de um enrolamento polifásico (em geral trifásico),

semelhante ao de uma máquina síncrona. Normalmente esta parte é fixa, podendo ser livre para girar em alguns casos especiais. O rotor também é feito de chapas de ferro-silício laminado, com ranhuras espaçadas de maneira uniforme, nele ficam os condutores do enrolamento do rotor (conhecido também de enrolamento rotórico). São dois os tipos de enrolamentos rotóricos, motor de indução de gaiola, e motor de indução de anéis.

No motor de indução de gaiola é o mais comum entre as máquinas assíncronas perfazendo cerca de 95% das máquinas, é feito de barras de material condutor, normalmente alumínio, que preenchem as ranhuras do rotor em toda a sua extensão. As barras em suas extremidades são curto-circuitadas por um anel condutor, por isso convencionalmente denominado de gaiola de esquilo. O motor de indução de anéis é formado por enrolamento rotórico e consiste em posicionar-se nas ranhuras rotóricas um enrolamento polifásico (em geral trifásico) semelhante ao do estator e com o mesmo número de polos. Por esta razão, são colocados anéis deslizantes na extremidade do seu eixo, conectados ao enrolamento rotórico, para que através de escovas estes sejam acessados externamente [19].

A Figura 7, mostra uma curva típica de uma máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo. Sua motorização conjuntamente com a faixa de operação da máquina de indução trifásica somada à condição de geração, normalmente representa a parte mais importante de sua curva característica completa. Nessa curva podemos observar o ponto em que a máquina deixa de operar como motor e passa a operar como gerador. Quando a velocidade do rotor ultrapassa a velocidade síncrona da máquina, essa mudança acontece e consequentemente o escorregamento(s) passa a ser negativo [16].

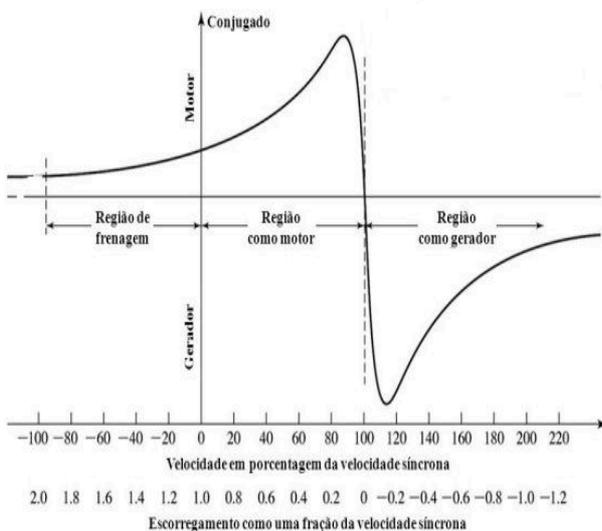


Figura 7: Curva do conjugado pelo escorregamento da máquina assíncrona

Fonte: [16]

No momento em que a máquina de indução está operando como gerador, esta manda à rede elétrica a energia recebida em forma de energia mecânica fornecida por sua máquina motriz, turbina, hélices ou de uma outra máquina funcionando como motor, formando, nesse caso, um grupo motor-gerador. Nesse sistema ocorrem perdas semelhante a quando está funcionando como motor tal qual as perdas no cobre,

perdas magnéticas no estator e no rotor e as perdas por atrito e ventilação também acontece quando estiver em operação como gerador [16].

O gerador de indução não necessariamente precisa operar ilhado, este pode também operar conectado ao SIN (Sistema Interligado Nacional). Para a excitação dos geradores trabalhando de forma ilhada é necessário o uso de capacitores conectados em paralelo com a máquina. Já no caso do gerador ser paralelo ao sistema elétrico, a rede é quem irá fornecer a potência reativa para a excitação do mesmo. Para conectar o gerador de indução com a rede elétrica não é necessário que este esteja sincronizado (em fase, mesma frequência, magnitude de tensão) com a rede. Porém, são necessárias algumas considerações para a conexão com a rede.

Para a conexão do gerador ao sistema, deve-se obedecer a algumas regras: Com ele desligado da rede elétrica, deve aumentar a velocidade até atingir a velocidade síncrona. Desta forma, ao aplicar tensão no estator não circulará corrente elétrica, uma vez que o escorregamento é zero. Logo, evita-se que grandes correntes circulem no instante da conexão; porém, mesmo o gerador estando em rotação síncrona, há presença de um pico de corrente, geralmente chamada de *IN-RUSH*, nos terminais da máquina. Esta corrente é ocasionada pelo ato da magnetização dos enrolamentos, e não ocasionará problemas para o gerador ou para rede; após a conexão da máquina com velocidade síncrona, é necessário aumentar a velocidade de rotação para que esta opere como gerador respeitando a corrente nominal da máquina; já para a desconexão da máquina deve-se diminuir a velocidade de rotação até a velocidade síncrona (quando o escorregamento for zero), o gerador poderá ser desligado de forma segura.[16] A Figura 8 ilustra uma máquina assíncrona aberta.

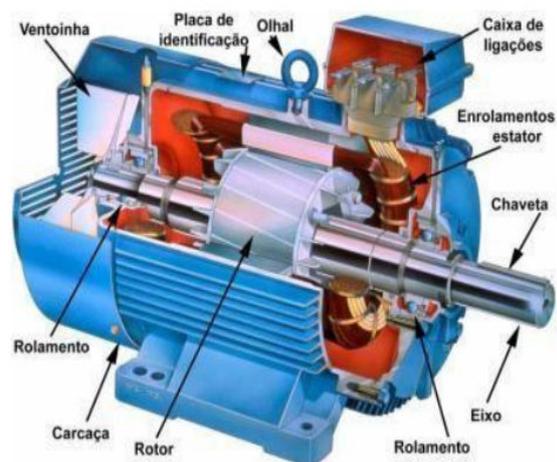


Figura 8: Máquina Assíncrona

Fonte: [20]

## V. CGH STANG

Construída no ano de 2006, a CGH STANG foi constituída de uma turbina Pelton de 115CV, e por um alternador síncrono de 100KVA, 380V, 60Hz, abastecida pelas águas de um dos afluentes do Rio Braço do Norte, localizada no município de São Ludgero.

Formada por uma pequena barragem de cerca de 5 metros de altura por 10 metros de largura. Onde existe no seu interior a captação da água que é conduzida até a turbina por meio de

uma tubulação de aço carbono de diâmetro de 450mm, a água após passar pela turbina desagua novamente no riacho, possuindo baixíssimo impacto ambiental. A turbina conecta-se ao gerador através de um conjunto de polias e correias, sendo que a turbina possui rotação nominal de 900rpm e o gerador de 1800rpm tendo uma relação de transmissão de 2 pra 1. Sendo que a polia da turbina é de 335mm e a polia do gerador é de 167,5mm. A Figura 9 mostra a CGH STANG.



Figura 9: CGH STANG.  
Fonte: do Autor.

Esta CGH conta com um ponto de conexão com a concessionária local de energia elétrica (CEGERO) em média tensão, por meio de um transformador refrigerado a óleo mineral com uma potência de 112,5KVA, com a tensão primária de 380V (ligado em estrela) e tensão secundária de 13800V (ligado em delta) sendo que este está operando como um transformador elevador. Possui proteção em média tensão por meio de elos fusíveis 15kv de 6K, proteção na baixa tensão por um disjuntor caixa moldada de 150A. Trata-se de uma microgeração distribuída.

## VI. RETROFIT NA GERAÇÃO STANG

Como a geração por meio de alternador síncrono no local deste estudo apresentava muita manutenção, como exemplo a substituição de escovas, dentre outras manutenções. Foi pesquisado junto as normas de geração distribuída da concessionária de energia local (CEGERO) e segundo a norma FECOG-03 é permitido o uso de geradores assíncronos de até 300KW. Sendo assim fora sugerido aos proprietários do empreendimento a substituição do alternador síncrono por um motor de indução que necessitaria operar como gerador, visto que o gerador original necessitaria ser substituído.

Após aprovação dos proprietários fora realizados testes com um motor de indução de 60CV, 4 pólos, 380V, que eles mesmos já possuíam, desta forma minimizando os custos do projeto. Posteriormente a instalação do motor/gerador verificou-se um cálculo para maior aproveitamento da máquina como gerador por meio do seu rpm, ou seja, para funcionamento como gerador a máquina deve operar acima da velocidade síncrona que no caso é 1800rpm por ser um motor de 4 pólos. A Figura 10 mostra o motor de indução conectado a turbina.



Figura 10: Gerador assíncrono conectado a turbina.  
Fonte: do Autor.

. Foram realizados testes com diversos diâmetros para a polia do gerador, com o propósito de maximizar o seu desempenho. Inicialmente fora aproveitada a polia existente do gerador antigo e em seguida foi-se reduzindo o tamanho dela, conforme medições realizadas e estas estão apresentadas na Tabela I abaixo.

Tabela I: Tamanhos diversos de polias para o gerador

Diâmetro da polia secundária	Rpm da turbina	Rpm do gerador	Região de operação (gerador ou motor)
167,5mm	899rpm	1798rpm	Neutra
156mm	847rpm	1891rpm	Gerador
142mm	795rpm	1902rpm	Gerador
125mm	750rpm	2010rpm	Gerador

A partir dos dados obtidos das mensurações efetuadas no local, verificou-se que conforme reduziu-se a polia do gerador também se reduziu a rotação da turbina, porém a rotação do gerador obteve aumento. Constatou-se que a polia de 125mm foi a que mais obteve êxito, uma vez que com esta torna-se mais fácil o aproveitamento da queda d'água com baixas vazões (maior parte do tempo).

A fim de proteger a geração contra consumo direto, seja pelo entupimento da tomada d'água, seja pelo simples fato de que a vazão de saída esteja maior que a vazão da entrada d'água fora instalado um relé de proteção secundária com a função ANSI 32 (fluxo de potência reversa) que desliga o sistema. Primeiramente desconectando a parte elétrica por meio de um contator de 185A e a posteriori fechando a entrada d'água na turbina por meio de um servo motor operado por um banco de bateria de 24V, este faz com que cesse o fluxo d'água pela tubulação e conseqüentemente pela turbina, privando-a de sobre velocidade quando é desconectada da parte elétrica.

Este relé possui ainda as funções 50,51,27 e 59 que foram habilitadas, as quais tem por objetivo respectivamente proteger o sistema contra: curto circuito; sobrecarga; subtensão e sobretensão. A Figura 11 mostra o relé de proteção secundária.

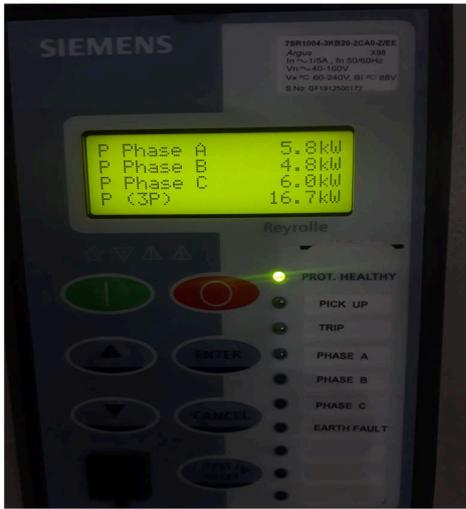


Figura 11: Relé de proteção secundária.  
Fonte: do Autor.

A partir das melhorias realizadas, a CGH STANG, atualmente apresenta níveis satisfatórios e qualitativos em sua geração, não necessitando de manutenções regulares. As Figuras 12 e 13, bem como a Tabela II apresentam os dados da geração do último ano, ou seja, desde outubro de 2020 até setembro de 2021.

Dados de energia e demanda reversa (geração)

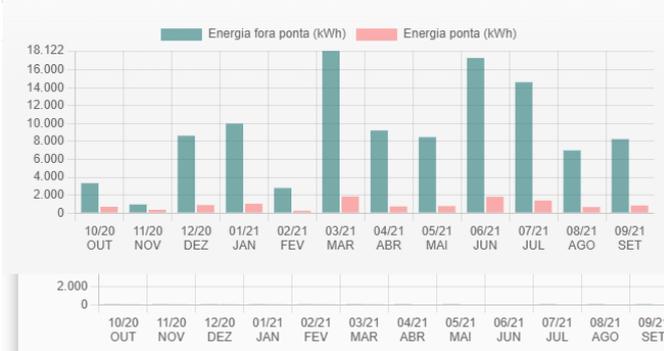


Figura 12: Energia gerada entre 10/2020 e 09/2021.  
Fonte: do Autor.

Tabela II: Geração Mensal KWh

Geração Mensal KWh	F.Ponta	Ponta	Total	FC
out-2020	3.345,80	709,00	4.054,80	12,51%
nov-2020	959,00	360,10	1.319,10	4,07%
dez-2020	8.639,60	888,10	9.527,70	29,41%
jan-2021	9.995,10	1.039,80	11.034,90	34,06%
fev-2021	2.800,60	260,20	3.060,80	9,45%
mar-2021	18.121,70	1.855,60	19.977,30	61,66%
abr-2021	9.231,70	741,00	9.972,70	30,78%
mai-2021	8.488,30	774,50	9.262,80	28,59%
jun-2021	17.335,20	1.821,10	19.156,30	59,12%
jul-2021	14.628,20	1.401,00	16.029,20	49,47%
ago-2021	7.004,40	671,60	7.676,00	23,69%
set-2021	9.007,60	942,30	9.949,90	30,71%
<b>Total</b>	<b>109.557,20</b>	<b>11.464,30</b>	<b>121.021,50</b>	<b>31,13%</b>

Conforme dados da Figura 12 e evidenciados na Tabela II, é notório que o mês de maior geração fora março de 2021,

somando 19,98MWh gerados neste mês, já o mês de menor geração fora novembro de 2020 que foi de 1,32 MWh. Tal discrepância ocorre pelo fato de que no mês de menor geração a usina ficou praticamente desligada para testes com as polias distintas, já no mês que a usina mais gerou ela trabalhou intensamente e ainda, este fora um mês chuvoso. A geração total dos últimos doze meses foi de 121,02MWh. Com relação ao fator de capacidade este apresentou em março de 2021 61,66%, sendo o melhor mês dos últimos doze, o mês com menor fator de capacidade foi novembro de 2020 com 4,07%, contudo obteve média de 31,13% no ano.

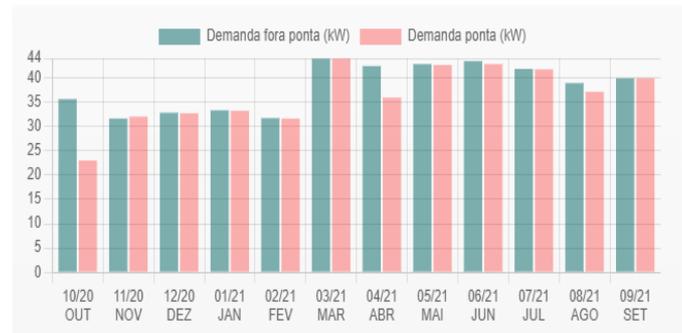


Figura 13: Gráfico da demanda máxima mensal.  
Fonte: do Autor.

Conforme a Figura 13 observa-se que o mês de menor demanda registrada fora outubro de 2020 com 23KW, sendo esta na ponta e o mês que apresentou maior demanda foi março de 2020 com 43,9KW tanto para fora ponta quanto para a ponta.

A Figura 14 apresenta dados de geração de dois dias distintos e que ocorreram mudanças na quantidade de energia gerada no decorrer do dia. No dia 11 de agosto de 2021 por volta das 8h da manhã houve um aumento na geração, saindo de cerca de 10KW para 40KW, o que sugere um aumento do fluxo d'água proveniente de chuvas. Já no dia 30 de setembro de 2021 por volta das 4h da manhã ocorreu um desligamento total da usina, a qual estava gerando cerca de 22KW. Tal desligamento ocorrera certamente por falta d'água para manter o fluxo, visto que é notório no gráfico que a potência gerada sofreu um pequeno decréscimo ao longo do tempo, isto nos relata que a barragem está esvaziando, ou seja, a cota entre a lâmina d'água e a turbina estava diminuindo.

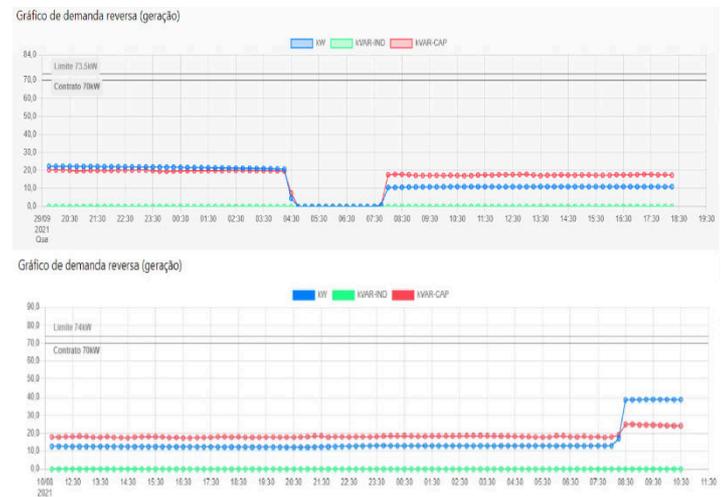


Figura 14: Energia gerada nos dias 29 e 30/09/2021 e 10 e 11/08/2021  
Fonte: do Autor.

Por termos instalado um relé de fluxo de potência reversa este certamente entrou em operação desligando totalmente a geração a fim de não motorizar o sistema e ainda poder consumir energia da rede. A turbina fora religada novamente manualmente por volta das 8h da manhã do mesmo dia, passando a gerar cerca de 10KW, o que reforça a ideia de diminuição do fluxo d'água.

Quanto a energia reativa as medições revelam que o gerador a fornece para a rede da concessionária, desta maneira encontra-se no terceiro quadrante fornecendo tanto energia ativa quanto energia reativa, que no caso é capacitiva, para melhor funcionamento do sistema pode-se instalar capacitores a fim de consumir a energia reativa gerada, tornando assim o fator de potência menos defasado.

## VII. CONCLUSÕES

Após a execução do retrofit, o qual fora substituído o alternador síncrono pelo motor de indução e através das verificações dos resultados observou-se que em relação a eficiência do sistema não houve grandes mudanças, ou seja, a quantidade de energia gerada praticamente não se alterou, no entanto até o presente momento não fora necessária nenhuma manutenção, o que por si só já significa um grande avanço. Desta maneira se conseguiu reduzir custos com mão de obra de terceiros para manutenções e mitigar o tempo com a usina parada, o que obviamente já traria prejuízos.

Ainda podemos afirmar que em momentos críticos de seca com baixa vazão d'água o novo sistema ficou ligeiramente mais produtivo. Desta forma aproveitando ao máximo as baixas vazões, visto que no momento da autoria deste artigo o país passa por uma das suas maiores secas, relatada como a maior dos últimos 90 anos, desta forma qualquer esforço no aumento da produtividade energética, principalmente de fontes hídricas é bem-vindo.

## VIII. AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, amigos e ao professor orientador pelo apoio durante a elaboração deste artigo e sobretudo a Deus.

## IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MOURA, Ailson P. de. **Engenharia de sistemas de potência: geração hidroelétrica e eolioelétrica**. Fortaleza: Edições UFC, 2019.
- [2] MARCOLIN, Neldson. **Rotas da Eletricidade**. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/rotas-da-eletricidade>. Acesso em: 10 set 2021
- [3] PEREIRA, Geraldo Magela. **projeto de USINAS HIDRELÉTRICAS**. Disponível em: [http://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/Projeto-de-Usinas-Hidreletricas\\_DEG.pdf](http://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/Projeto-de-Usinas-Hidreletricas_DEG.pdf). Acesso em: 10 set 2021
- [4] ANEL. **Matriz energética cresce 383,66 MW em março e 682,61 MW no primeiro trimestre de 2021**. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/id/21866628](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/id/21866628). Acesso em: 11 set 2021
- [5] BRASIL. Resolução normativa nº 875, de 10 de março de 2020. **Diário Oficial da União**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-normativa-n-875-de-10-de-marco-de-2020-248070610>. Acesso em: 12 set 2021
- [6] ITAIPU BINACIONAL. **Energia Hidráulica**. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/energia/energia-hidraulica>. Acesso em: 12 set 2021
- [7] AZEHEB, IW. **Como é gerada a energia hidrelétrica?** Disponível em: <https://azeheb.com.br/blog/como-e-gerada-a-energia-hidreletrica/>. Acesso em: 21 out 2021
- [8] TECNOGERA. **Quais as diferenças entre um gerador síncrono e assíncrono?** Disponível em: <https://www.tecnogera.com.br/blog/quais-as-diferencas-entre-um-gerador-sincrono-e-assincrono>. Acesso em: 12 set 2021
- [9] HARVEY, Adam. **Tipos de turbinas hidráulicas aplicadas às pequenas, mini e microcentrais hidráulicas**. Disponível em: <http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas%20Hidr%E1ulicas/CAP%CDTULO%203REV.htm>. Acesso em: 12 set 2021
- [10] WEG. **Turbinas hidráulicas**. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Turbinas-Hidr%C3%A1ulicas/Turbinas-Hidr%C3%A1ulicas/p/MKT\\_HISA\\_HYDRAULIC\\_TURBINES](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Turbinas-Hidr%C3%A1ulicas/Turbinas-Hidr%C3%A1ulicas/p/MKT_HISA_HYDRAULIC_TURBINES). Acesso em: 12 set 2021
- [11] ITAIPU BINACIONAL. **Unidades Geradoras**. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/energia/unidades-geradoras>. Acesso em: 12 set 2021
- [12] ENEL GREENPOWER. **Turbina Hidrelétrica**. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-hidraulica/turbina-hidreletrica>. Acesso em: 12 set 2021
- [13] COPEL. **Usina Parigot de Souza**. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcweb/copel-geracao/usina-parigot-de-souza/>. Acesso em: 13 set 2021
- [14] MECANICA INDUSTRIAL. **Turbina Hidráulica Kaplan**. Disponível em: <https://www.mecanicaindustrial.com.br/turbina-hidraulica-kaplan/>. Acesso em: 13 set 2021
- [15] UHE IGARAPAVA. **A empresa**. Disponível em: <https://uhe-igarapava.com.br/empresa.php>. Acesso em: 14 set 2021
- [16] TEIXEIRA, Lucas Gaudereto Teixeira. **Comportamento de um gerador trifásico autoexcitado**. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufjf.br/monografias/monopoli10023377.pdf>. Acesso em: 14 set 2021
- [17] ESTT. **Introdução à Máquina Síncrona**. Disponível em: [http://www.estt.ipt.pt/download/docente/256\\_apostila\\_ms.pdf](http://www.estt.ipt.pt/download/docente/256_apostila_ms.pdf). Acesso em: 15 set 2021
- [18] SILVA, Clodoaldo. **Geradores AC**. Disponível em: <https://docplayer.com.br/2735168-Geradores-de-corrente-alternada.html>. Acesso em: 15 set 2021
- [19] USP. **Máquinas assíncronas teoria**. Disponível em: [https://disciplinas.usp.br/pluginfile.php/31672/mod\\_resource/content/1/Teoria.pdf](https://disciplinas.usp.br/pluginfile.php/31672/mod_resource/content/1/Teoria.pdf). Acesso em: 15 set 2021
- [20] CUPERTINO, Allan Fagner. **Maquinas Elétricas**. Disponível em: <https://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula-12-Aspectos-construtivos-MIT.pdf>. Acesso em: 15 set 2021