

# **AS BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS – ESTUDO DE CASO DA CGH SAGRADO CORAÇÃO DE JESUS**

**Autor<sup>1</sup>, Augusto Nelson Carvalho Viana**

**Autor<sup>2</sup>, Flavio Leite**

**Autor<sup>3</sup>, Ison Flessak**

<sup>1</sup>SOESCO Ensaios Ltda/Empresa Privada, Av. Padre Lourenço da Costa, 415, Bairro São Vicente, CEP-37502-003, Itajubá, Minas Gerais.

<sup>2</sup>HYDRAULIC DESIGN Ltda/Empresa Privada, Rua Pedro Viriato Parigot de Souza, 3565, Sala 608, Curitiba, Paraná.

<sup>3</sup>FLESSAK Geração de Energia, Empresa Privada, Av. Duque de Caxias, 282, Bairro Marrecas, CEP-85601-190, Francisco Beltrão, Paraná.

## **RESUMO**

As Centrais de Geração Hidráulica (CGH) e as Pequenas Centrais Hidrelétricas estão classificadas, respectivamente, abaixo de 5 [MW] e 50 [MW]. Muitas dessas centrais possuem na sua hidrologia, vertimento de água em vários meses do ano. Em outros casos, existem centrais mau dimensionadas, principalmente no projeto das turbinas, que por sua vez não produzem a energia hidráulica prevista e necessária.

Uma das soluções para aumentar a potência ou realizar uma repotenciação é manter o grupo gerador (ou grupos geradores) e selecionar um novo grupo (ou novos grupos), com a utilização das Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs), em substituição das turbinas convencionais do tipo Pelton, Francis e Kaplan, que possuem custos maiores, com potências até 500 [kW].

Este trabalho apresenta um estudo de caso na CGH Sagrado Coração de Jesus em Ponte Serrada-SC, onde o projeto da repotenciação apresenta dois grupos com BFT acionando geradores síncronos. A potência de cada grupo gerador é de 125 [kW].

Palavras Chave: Geração Hidráulica, BFT, CGH

## **1. INTRODUÇÃO**

A utilização das Bombas Funcionando como Turbinas iniciou-se no Brasil através de trabalhos de pesquisas na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), estado de Minas Gerais, no Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas, Viana [1], onde através de testes experimentais realizados e resultados de outros autores propôs uma metodologia de seleção das BFTs baseados em coeficientes de correção de altura e de vazão, escolhendo-se as bombas centrífugas no mercado nacional, com potências até 100 [kW].

Em 2006 e 2007, através de recursos do Ministério de Minas e Energia foram estudados dois aproveitamentos hidroenergéticos e aplicados a tecnologia com BFTs acionando geradores assíncronos, utilizando procedimentos de Viana [1] e Chappalaz [2]. O primeiro aproveitamento ocorreu na Fazenda Boa Esperança, Delfim Moreira, Minas Gerais, com a geração de um grupo de 40[KW] e o segundo com geração de 6[kW], no Parque Estadual da Ilha Anchieta, em Ubatuba, estado de São Paulo. Ambos os projetos foram concebidos em sistemas isolados e distantes da rede elétrica do sistema interligado do país.

Com a Resolução 482/2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica que estabeleceu as condições gerais para a microgeração e minigeração de energia elétrica ter acesso a rede de distribuição, a geração de baixa potência passou a ser interessante no país.

A geração hidráulica começou a ficar interessante, mas ainda com poucos projetos em função dos custos da obra civil e dos equipamentos eletro e hidromecânicos. Entretanto em muitas PCHs e CGHs em operação existem na maior parte do tempo no ano vertimento de água, que pode ser utilizado para gerar potências até 500[kW], investindo no grupo gerador, no painel de controle e proteção e aproveitando a obra civil e condutos forçados existentes. Com o custo alto de turbinas convencionais como Francis, Kaplan e Pelton, uma solução econômica é a utilização da BFT acionando um gerador de indução ou um gerador síncrono, conforme o caso a ser estudado.

Esse trabalho apresenta um estudo de caso em andamento de uma CGH em operação próxima a cidade de Ponte Serrada-SC, aproveitando o excesso de água em grande parte do ano e a estrutura da central para geração de 250[kW], utilizando duas BFTs acionando geradores síncronos, proporcionando uma repotenciação interessante.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

## 2.1. Aproveitamento Existente

A CGH Sagrado Coração de Jesus está a 2 [km] da cidade de Ponte Serrada-SC e atualmente a opera com um grupo gerador com turbina Francis de simples sucção, com potência do gerador 765 [kW]. Existe um grupo gerador desativado com turbina Pelton, de dois jatos, com potência do gerador 136 [kW], Figura 1.



Grupo gerador com turbina Francis, 765[kW]



Grupo gerador com turbina Pelton, 136[kW]

Fig. 1 – Grupos geradores da CGH Sagrado Coração de Jesus

## 2.2. Estudos Realizados

Dentro dos estudos realizados na CGH em 28 e 29 de agosto de 2018, destacam-se as medições de vazão no conduto forçado da turbina Francis através de um medidor do tipo ultrassom tempo de trânsito e sensores não intrusivos, além do levantamento da queda líquida da turbina Francis. Através de uma estação foi levantada a altura de queda bruta da turbina Pelton e através de cálculo analítico das perdas de carga desde a tomada d'água até a entrada da turbina, obteve-se à altura de queda líquida. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados levantados em campo das turbinas

TURBINA FRANCIS			TURBINA PELTON		
Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	P <sub>el</sub> [kW]	H <sub>b</sub> [m]	H <sub>p</sub> [m]	H [m]
Ultrassom	Líquida	Supervisório	Estação total	Perdas	Líquida
0,8158	63,7	421,6	63,1	1,2	61,9

Pelos resultados da tabela 1, a vazão da turbina ficou muito abaixo do valor nominal devido a data da medida, ou seja, época das secas e portanto uma geração abaixo da potência normal.

Assim, pesquisando a curva de permanência retirada do estudo hidrológico, Figura 2, verifica-se que a vazão turbinada medida representa 30 [%] do tempo.

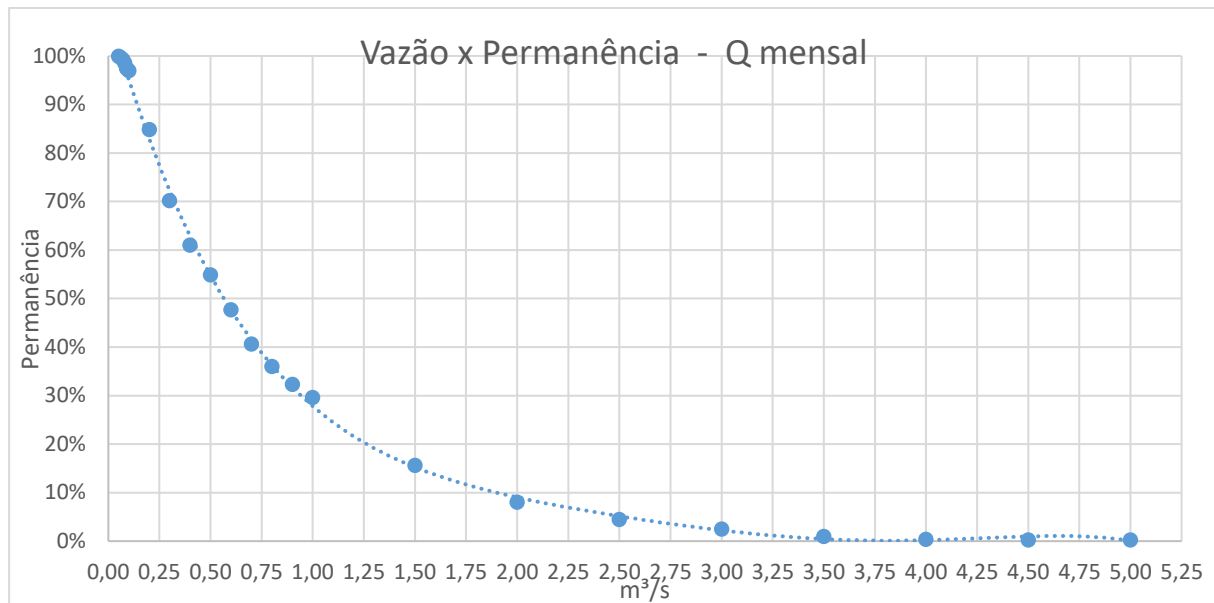


Figura 2 – Curva de permanência da CGH Sagrado Coração de Jesus

Para a geração nominal de 765 [kW], na altura de queda líquida da central, o engolimento da turbina deveria ser 1,477 [m³/s], sendo o tempo de permanência aproximadamente de 17 [%]. Isso mostra que a turbina e consequentemente o gerador estão superdimensionados e essa geração bastante prejudicada.

Conclui-se que a turbina está operando com uma eficiência baixa e poderá ser substituída, projetando-se um novo rotor para uma vazão inferior, com mais eficiência e mantendo a mesma caixa espiral, distribuidor e gerador.

O estudo do novo rotor não faz parte desse trabalho. Assim, enquanto estuda-se o novo rotor com uma vazão menor, mas eficiência melhor, se comparada com a atual turbina, propõe-se um projeto de uma nova geração de 250 [kW], no local da turbina Pelton, utilizando bombas funcionando como turbinas (BFTs). Desta forma, o projeto sendo executado e entrando em operação, poder-se-á executar a reforma na turbina Francis com menos prejuízo durante a parada da máquina principal.

Posteriormente, com o grupo gerador da turbina Francis recuperado, a CGH terá 700 [kW] de potência instalada incluindo dois grupos geradores com tecnologia de bomba funcionando como turbina.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Porque a Escolha da BFT

As razões da escolha da utilização das BFTs para aproveitamentos inferiores a 500 [kW] são:

- As bombas têm um custo muito menor que as turbinas, uma vez que seu mercado consumidor é muito amplo, ocorrendo, portanto, produção em massa, o que não acontece com turbinas;
- No Brasil a disponibilidade de bombas e suas peças de reposição é muito maior do que de turbinas;
- As bombas são simples e robustas, não exigindo conhecimento técnico altamente qualificado para sua manutenção;
- As bombas apresentam uma ampla faixa de tamanhos e potências, atendendo aos mais diversos tipos de aproveitamento hidrelétrico;
- O tempo de entrega de bombas é menor que o de turbinas.

#### 3.2. A Seleção da BFT

##### 3.2.1. Dados do aproveitamento

O local escolhido para a instalação das BFTs é a casa de máquinas da turbina Pelton. Como a turbina Pelton tem uma altura de queda líquida de 61,8[m], pois a mesma não possui tubo de sucção, a colocação das BFTs, haverá tubo de sucção. Portanto haverá um ganho de altura. Utilizando os estudos topográficos determina-se à altura de queda bruta e com os cálculos das perdas obtém-se a altura de queda líquida do aproveitamento.

Define-se a vazão total desse aproveitamento 0,500 [m<sup>3</sup>/s], que representa 55% do tempo de permanência, Figura 2. A Tabela 2 ilustra os dados do aproveitamento estudado.

**Tabela 2 – Dados do aproveitamento**

H <sub>b</sub> [m]	H <sub>perdas</sub> [m]	H [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	P <sub>gerada</sub> [kW]
Altura de queda bruta	Perdas de carga no sistema de adução	Altura de queda líquida	Vazão total turbinada	Potência gerada
64,5	1,5	63	0,500	250

##### 3.2.2. Seleção da BFT

Com os dados do aproveitamento escolheu-se duas BFTs de  $Q_t = 0,250 \text{ [m}^3/\text{s]}$  e a altura de queda líquida  $H_t = 63 \text{ [m]}$ , haverá permanência de 75% do tempo. Realizando uma pré-seleção da BFT na Figura 3, Viana (2012), têm-se a seleção de duas possibilidades de BFTs. A primeira do tipo bomba bipartida de dupla entrada (rotor gêmeo) e a segunda de rotor simples, um estágio, fluxo radial e simples sucção, sendo ambas de eixo horizontal.

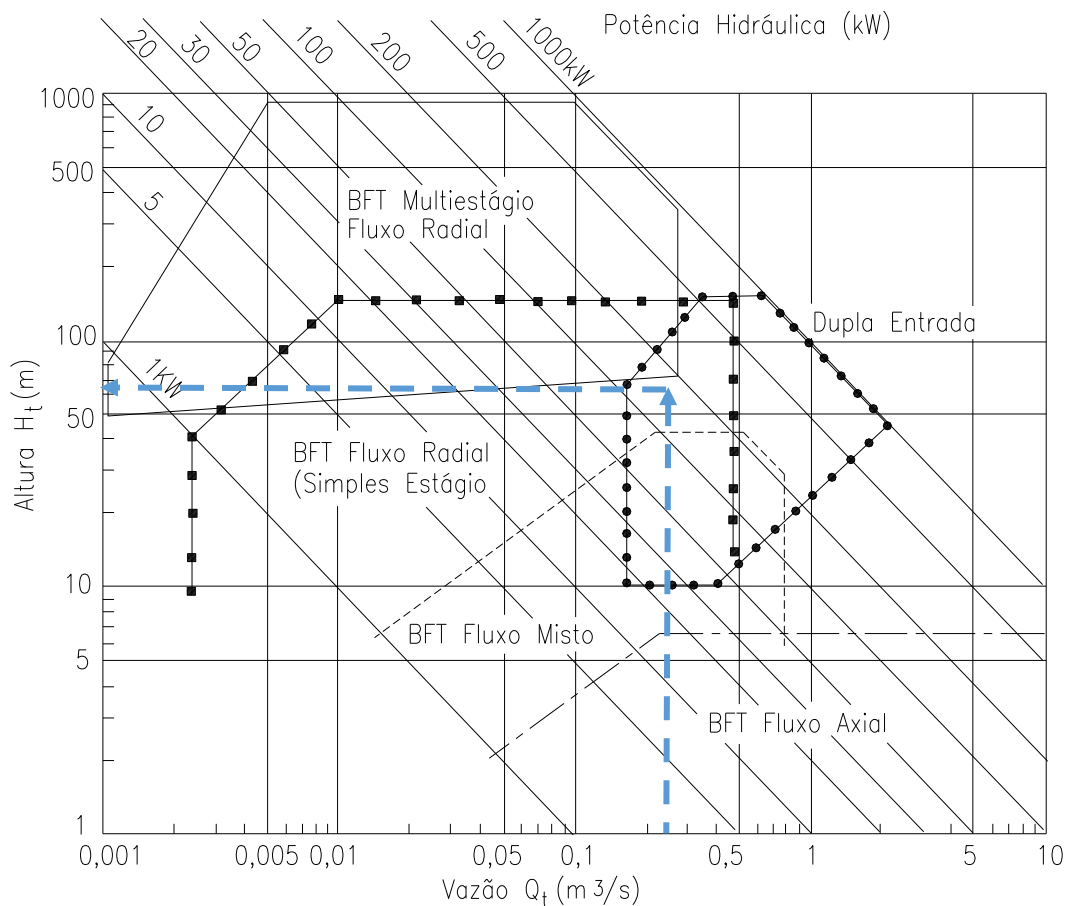


Figura 3 – Gráfico de pré-seleção vazão da turbina versus altura de queda líquida, Viana (2012)

A seleção da BFT é baseada em resultados experimentais de bombas operando como bombas e como turbinas de vários autores. A seleção é realizada a partir dos dados do aproveitamento, ou seja, da vazão turbinada  $Q_t$  e da altura de queda líquida  $H_t$ . Em função da inversão do fluxo há necessidade de corrigir a altura e vazão como turbina para altura e vazão como bomba. Utilizando o método de Chapallaz (1992), apresentado por Viana (2012) tem-se a correção da vazão com coeficientes experimentais  $k_q$  e da altura  $k_a$ . A vazão e altura como bomba são calculados pela equação 1. Esses coeficientes experimentais foram obtidos na faixa de rotação específica da bomba de 0 a 110.

$$Q_b = \frac{Q_t}{k_q}; \quad H_b = \frac{H_t}{k_a} \quad (1)$$

A Tabela 3 mostra os resultados pelo método de Chapallaz (1992), apresentados por Viana (2012).

**Tabela 3 – Dados calculados**

Dados de entrada: $n_t = 1800$ [rpm]; $Q_t = 0,250$ [m <sup>3</sup> /s]; $H_t = 63$ [m]						
$n_{qt} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{H_t^{0,75}}$	$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89}$	$Q_{nb} = \frac{Q_t}{1,3}$	$k_q$ [1]	$k_a$ [1]	$Q_b$ [m <sup>3</sup> /h]	$H_b$ [m]
Curvas de Chapallaz				$n_b = 1750$ [rpm]		
1ª Opção: Bomba bipartida, rotor duplo, eixo horizontal						
28,5	32	0,192	1,225	1,276	714,2	46,7
2ª Opção: Bomba de fluxo radial, rotor simples, simples sucção						
40,3	45,2	0,192	1,229	1,249	712,8	47,7

Com os dados de rotação  $n_b$  [rpm], de vazão  $Q_b$  [m<sup>3</sup>/h] e de altura  $H_b$  [m] da bomba, nos catálogos de fabricantes procura-se se existem as bombas da Tabela 3 e qual o rendimento das mesmas. É importante salientar que na procura da bomba, o rendimento da bomba é fundamental, pois o rendimento como turbina vai ser o mesmo, Viana (1987). A Tabela 4 ilustra os resultados da seleção das possíveis bombas.

**Tabela 4 – Seleção das opções de bombas**

$Q_b$ [m <sup>3</sup> /h]	$H_b$ [m]	$n_b$ [rpm]	$\eta_b$ [%]	Tipo	Fabricante
714,2	46,7	1750	87	Bipartida axial, rotor duplo, eixo horizontal	WILO DO BRASIL
$Q_b$ [m <sup>3</sup> /h]	$H_b$ [m]	$n_b$ [rpm]	$\eta_b$ [%]	Tipo	Fabricante
712,0	47,7	1750	56	Partida radial, rotor radial simples, simples sucção e eixo horizontal	WILO DO BRASIL

Pela Tabela 4, a melhor bomba selecionada é a bipartida, pois possui eficiência de 87%, enquanto a bomba de rotor simples apresenta um rendimento de 56%. Assim, fica selecionada a primeira opção.

### 3.2.3. Determinação da altura geométrica de sucção da BFT

A altura geométrica de sucção é determinada pela equação 2, Viana (2012).

$$H_{sm\acute{a}x} = 10 - 0,0122 \cdot A - \sigma \cdot H_t \quad (2)$$

Os dados da altitude  $A$  [m], altura de queda líquida  $H_t$  [m] estão na Tabela 5. O coeficiente de cavitação de Thoma  $\sigma$  é determinado pelos dados experimentais retirados de Chapallaz (1992), adaptados por Viana (2012), equação 3.

$$\sigma = 7 \cdot 10^{-6} \cdot n_{qt}^2 + 0,0037 \cdot n_{qt} - 0,0459 \quad (3)$$

A Tabela 5 mostra os resultados da determinação da altura geométrica de sucção, enquanto a Figura 3 ilustra essa altura na BFT. A Figura 3 mostra a altura geométrica de sucção das duas BFTs e o valor é máximo, início de cavitação, ou seja deverá ser menos do que 4,8 [m].

**Tabela 5 – Coeficiente de cavitação e altura máxima geométrica de sucção**

A [m]	$H_t$ [m]	$n_{qt}$	$\sigma$ [1]	$H_{sm\acute{a}x}$ [m]
905	63	28,5	0,065	4,8

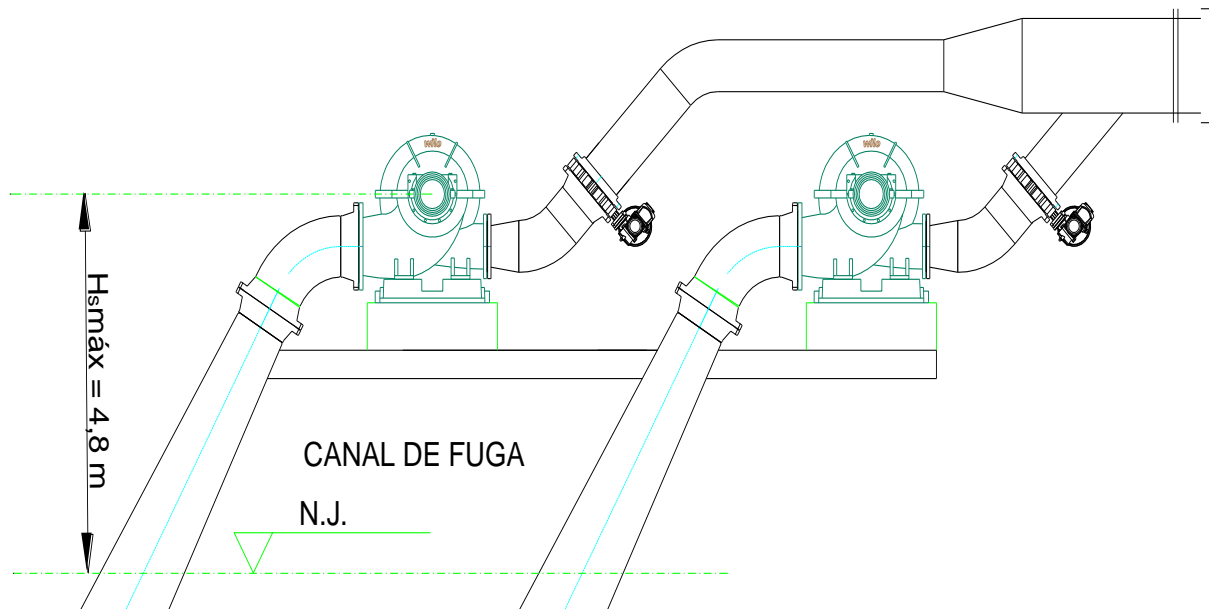


Figura 3 – Altura geométrica de sucção

### 3.3. Arranjo Básico

O arranjo básico da casa de força está ilustrado na Figura 4. Basicamente cada grupo gerador possui uma válvula automatizada na entrada de cada turbina.



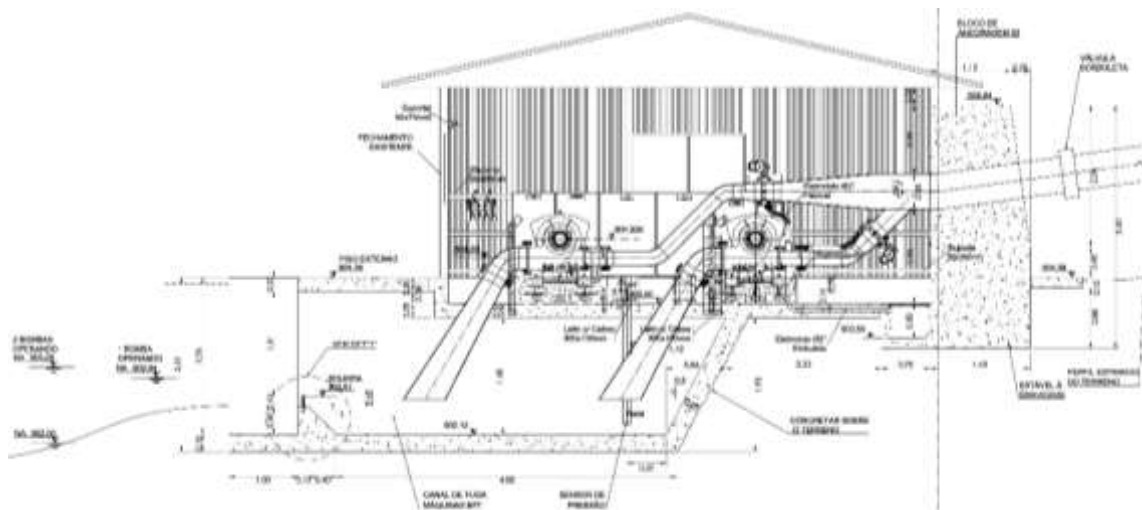


Figura 4 – Arranjo da casa de força

Na entrada de cada turbina, após a válvula, existe uma tomada de pressão para a medida da mesma. O canal de fuga munido de um vertedor que tem a função de manter o seu nível e também medir a vazão através da crista água que passa pelo mesmo, utilizando-se um transdutor de nível. Com essas medidas é possível obter-se à altura de queda líquida da BFT.

### 3.4. Quadro Elétrico e Sistema de Controle

O sistema de controle consiste um arranjo típico utilizados em CGH, composto de um controlador programável (CLP), um regulador de velocidade (RV) e um regulador de tensão (RT), associados a um sistema de proteção (SP) e sincronismo (SS). O Velocidade é adquirida por meio de encoders mecanicamente acoplados eixo do gerador e as grandezas elétricas por meio de um conjunto de transformadores de instrumento (TI) instalado no painel de controle.

Cada máquina possui um sistema de controle independente, por exceção do SP todos os demais controles foram desenvolvidos para atender às características específicas do projeto, levando em consideração os níveis de tensão, corrente, velocidade nominal, regulação de velocidade e características dinâmicas do gerador e da BFT. O arranjo de controle pode ser visto na Figura 5.

O sistema de controle realiza a aquisição dos sensores de pressão e nível, grandezas elétricas e temperaturas dos conjuntos. O controle é realizado na válvula de controle de fluxo e no sistema de excitação a fim de controlar a potência reativa e ativa do gerador.

As medições dos instrumentos monitorados serão armazenados em bancos de dados locais e remotos para avaliação de comportamento do sistema.

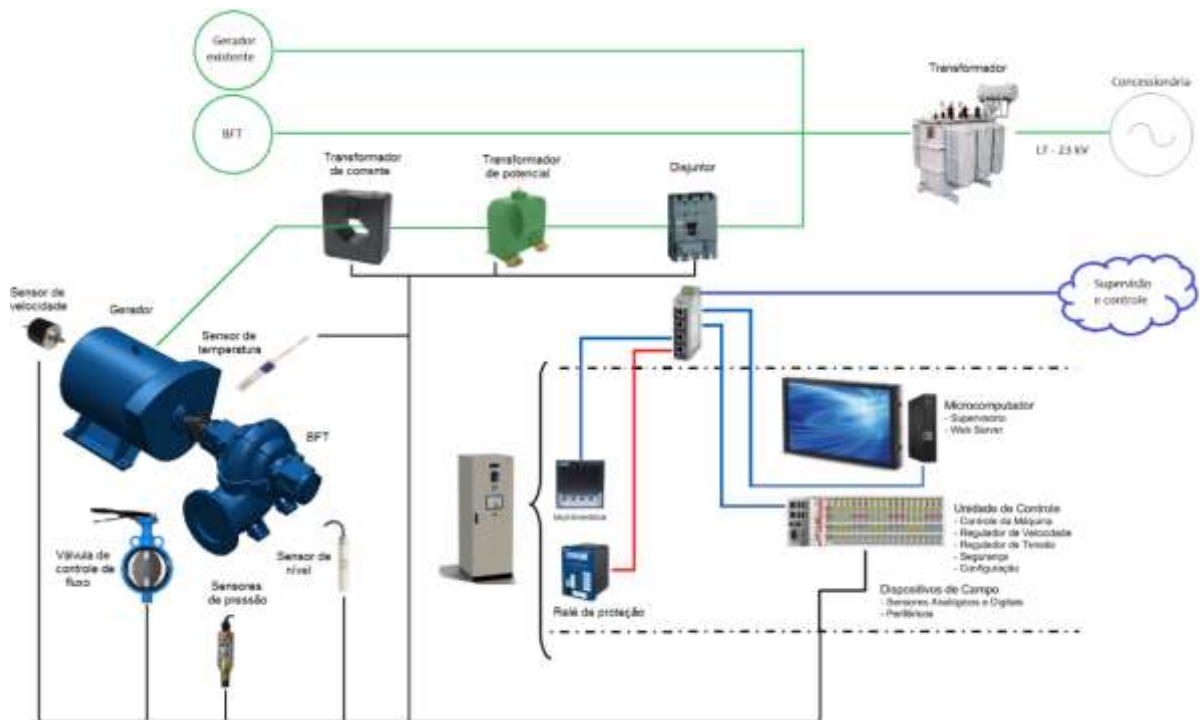


Figura 5 – Topologia do sistema de controle e instrumentação

### 3.5.Custos

Para esse trabalho os custos apresentados serão de duas BFTs, de 125 [kW] cada uma, comparadas com uma turbina convencional do tipo Francis de 250 [kW].

Tabela 6 – Custos das turbinas

Tipo de Turbina	Descrição Simplificada do Fornecimento	Custo [R\$]
01 Turbina Francis de 250 [kW]	Com caixa espiral, pré-distribuidor, sistema de pás diretrizes, UHRV e rotor simples ( $\phi 290$ )	250.000,00
02 BFTs de 125 [kW]	Bipartida, rotor duplo, eixo horizontal, acoplamento, protetor de acoplamento, revestimento no rotor e carcaça, e certificado de teste de rendimento.	60.000,00

## 4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

É importante salientar que os custos apresentados são somente sobre a comparação das máquinas hidráulicas, pois o restante da instalação é praticamente a mesma para os dois casos, ou seja, o gerador e seu controle, a tubulação e seus componentes.

As Bombas Funcionando como Turbinas se bem selecionadas são uma grande alternativa para as potências abaixo de 500 [kW], pois além de operarem com um bom rendimento, mostram-se viáveis economicamente. Veja o estudo de caso apresentado nesse trabalho, onde as BFTs possuem um rendimento de 87 [%] e um custo 4 vezes menor que a turbina Francis.

Para essa potência de 250 [kW], o custo da turbina Francis provavelmente inviabilizaria o projeto, em função do tamanho da máquina e a sua dificuldade de construção.

A operação da CGH Sagrado Coração de Jesus está prevista para Setembro de 2019 e os ensaios dos grupos geradores serão realizados. Desta forma, ter-se-á resultados para a comprovação do procedimento de seleção da BFT, bem como o sistema de controle da central.

## **5. REFERÊNCIAS**

Viana, A.N.C., “Comportamento de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas” Dissertação de Mestrado, EFEI, Itajubá-MG, Dezembro. 1987.

J.M. Chappalaz, J.M., Eichenberger, P., and Fischer, G., “Manual on Pumps Used as Turbines”, Vol. 11, MHPG Series, 1992.

Viana, A.N.C., “Bombas Funcionando como Turbinas”, Editora Acta, Itajubá-MG, 2012.

\_\_\_\_\_, Relatório da CGH Sagrado Coração de Jesus, Agosto de 2018.