

LUÍS EDUARDO PACHECO TOMAS

**ANÁLISE DE SUBSTITUIÇÃO DA TURBINA  
INSTALADA NA CENTRAL GERADORA  
HIDRELÉTRICA IVO SILVEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Departamento de  
Engenharia Elétrica e Eletrônica  
da Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia  
Elétrica/Eletrônica.

Orientador: Prof. Erlon Cristian  
Finardi, Dr.

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do  
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da  
UFSC.

Tomas, Luís Eduardo Pacheco

Análise de substituição da turbina instalada na central geradora Ivo  
Silveira / Luís Eduardo Pacheco Tomas ; orientador, Erlon Cristian  
Finardi, 2018. 55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,  
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

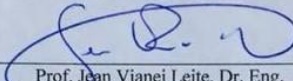
1. Engenharia Elétrica. 2. Central geradora hidrelétrica. 3. Turbina  
hidráulicas. 4. Turbina Pelton. I. Finardi, Erlon Cristian. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica.

Luís Eduardo Pacheco Tomas

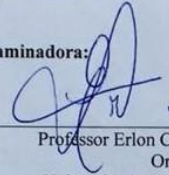
**ANÁLISE DE SUBSTITUIÇÃO DA TURBINA  
INSTALADA NA CENTRAL GERADORA  
HIDRELÉTRICA IVO SILVEIRA**

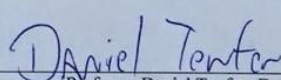
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para  
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia  
Elétrica/Eletrônica e aprovado em sua forma final pela Banca  
Examinadora.

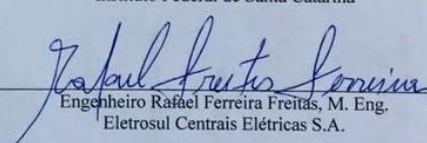
Florianópolis, 06 de setembro de 2018.

  
Prof. Jean Viane Leite, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**

  
Professor Erlon Cristian Finardi, D. Eng.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

  
Professor Daniel Tenfen, D. Eng.  
Instituto Federal de Santa Catarina

  
Engenheiro Rafael Ferreira Freitas, M. Eng.  
Eletrosul Centrais Elétricas S.A.

Este trabalho é dedicado  
aos meus amados pais e  
irmão.

## RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresenta uma análise sobre a possível substituição da turbina hidráulica Francis instalada na CGH Ivo Silveira. Partindo do pressuposto que a instalação de um outro tipo de turbina no empreendimento, possibilitaria em um acréscimo significativo na potência elétrica gerada, e conseqüentemente, em consideráveis ganhos no faturamento. Para dar sustentação e contextualizar o tema, foi realizada uma revisão bibliográfica e apresentados os principais conceitos envolvidos: usinas hidrelétricas, turbinas hidráulicas, expressão matemática de geração de energia, análise da vazão do rio Santa Cruz e características sobre a usina em estudo.

**Palavras-chave:** Usina hidrelétrica, turbinas hidráulicas, CGH Ivo Silveira, Turbina Francis.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|       |   |
|-------|---|
| CGH   | Central de geração hidrelétrica               |
| PCH   | Pequena central hidrelétrica                  |
| UHE   | Usina hidrelétrica de energia                 |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica          |
| EPE   | Empresa de Pesquisa Energética                |
| CCEE  | Câmara de Comercialização de Energia Elétrica |
| SIN   | Sistema Integrado Nacional                    |
| MRE   | Mecanismo de Realocação de Energia            |
| PLD   | Preço de Liquidação das Diferenças            |
| DPOM  | Departamento de Operação e Manutenção         |
| DVOP  | Divisão de Operação                           |
| COG   | Centro de Operação da Geração                 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Localização aproximada da CGH Ivo Silveira. ....                                  | 16 |
| Figura 2 - Vista aérea CGH Ivo Silveira.....   | 18 |
| Figura 3 - Casa de máquinas.....   | 18 |
| Figura 4 – Usina Hidrelétrica de Itaipu.....   | 22 |
| Figura 5 - Esquema de uma UHE. ....  | 23 |
| Figura 6 - Desenho esquema de funcionamento de uma turbina Francis.....                      | 31 |
| Figura 7 – Imagem Turbina Pelton. ....   | 32 |
| Figura 8 – Curva Colina de uma unidade hidrelétrica. ....                                    | 34 |
| Figura 9 - Gráfico dos rendimentos dos diferentes tipos de turbinas com queda constante..... | 35 |
| Figura 10 - Variação da vazão do Rio Lajeado de Santa Cruz...38                              |    |
| Figura 11 - Curva de Permanência do Rio Lajeado de Santa Cruz. ....                          | 39 |
| Figura 12 - Gráfico dos preços do PLD médio mensal.....                                      | 45 |
| Figura 13 - Faturamento mensal (R\$).....  | 46 |

## **LISTA QUADROS E TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Características da CGH Ivo Silveira. .... | 19 |
| Tabela 2 – Coeficientes de perdas hidráulicas. ....  | 28 |
| Tabela 3 - Potência elétrica produzida caso 1.....   | 41 |
| Tabela 4 - Potência elétrica produzida caso 2.....   | 42 |
| Tabela 5 - Potência elétrica produzida caso 3.....   | 43 |



## SUMÁRIO

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | INTRODUÇÃO.....   | 11 |
| 1.1 | Objetivo e motivação .....  | 13 |
| 1.2 | Estrutura do trabalho .....   | 14 |
| 2   | A EMPRESA E CGH IVO SILVEIRA .....                                      | 15 |
| 3   | NOTAS SOBRE USINAS HIDRELÉTRICAS.....                                   | 21 |
| 3.1 | Descrição dos componentes .....   | 22 |
| 3.2 | Características das Usinas Hidrelétricas.....                           | 23 |
| 3.3 | Expressão matemática da geração de energia .....                        | 24 |
| 3.4 | Perda no sistema de adução.....   | 28 |
| 4   | NOTAS SOBRE TURBINAS HIDRÁULICAS .....                                  | 29 |
| 4.1 | Turbina Francis .....   | 29 |
| 4.2 | Turbina Pelton.....   | 31 |
| 4.3 | Rendimento da turbina .....   | 32 |
| 5   | ESTUDO DE CASO.....   | 37 |
| 5.1 | Análise da vazão do Rio Santa Cruz .....                                | 37 |
| 5.2 | Cálculo do rendimento da Turbina Francis com queda útil constante ..... | 40 |
| 5.3 | Análise da potência utilizando Turbina Pelton com queda constante ..... | 41 |
| 5.4 | Potência gerada na condição de vazão / vazão max igual a 0,8.....       | 42 |
| 5.5 | Análise de custo da repotenciação .....                                 | 44 |
| 6   | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 49 |
| 7   | REFERÊNCIAS .....   | 51 |
|     | Anexo A: – Tabela do preço médio da CCEE .....                          | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Anexo B: – Orçamento Turbina Francis ..... | 55 |
|--|----|

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda por energia elétrica nas últimas décadas, têm sido inevitáveis novos investimentos em geração e transmissão de energia elétrica. Segundo estudo divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014), o consumo brasileiro vai triplicar até 2050, chegando a 1.624 TWh, direcionando para que a demanda brasileira seja similar ao que se verifica na União Europeia hoje, ou seja, cerca de 7 GWh por habitante a cada ano.

Para suprir o elevado consumo, o Brasil tem utilizado a energia hídrica como sua maior fonte de energia, especialmente por dispor de abundantes bacias hidrográficas em seu território. Morais (2015) retrata que o potencial hidráulico brasileiro está entre os cinco maiores do mundo, favorecendo para que a matriz energética brasileira continue predominantemente hídrica, e que as usinas hidrelétricas (UHEs) permaneçam assumindo um papel fundamental na geração de energia. Entretanto, no momento atual, investimentos em novas UHEs vêm se tornando cada vez mais complexos, principalmente devido a questões socioambientais que aumentam os custos de implantação, e, também, pela necessidade de serem construídas cada vez mais afastadas dos centros de consumo.

Uma vez que a construção de novas usinas vem se transformando em projetos mais burocráticos, se tornou imprescindível à busca por métodos alternativos para aumentar a geração de energia elétrica das UHEs existentes. Uma dessas alternativas, por exemplo, é a substituição de equipamentos já instalados por outros mais modernos, visando aumentar sua eficiência e diminuir seu tempo de manutenção. Soares e Salmazo (1997) evidenciam que um dos principais fatores pelo desempenho da geração de energia de uma UHE, é a eficiência do conjunto turbina-gerador, ou seja, o aprimoramento desses

equipamentos fornece ganhos significativos na geração de energia. As inovações tecnológicas conseguem hoje fazer com que os equipamentos dessa natureza possam chegar a níveis de eficiência de até 95%, sendo uma alternativa para gerar mais sem que seja necessária a construção de um novo parque gerador.

Segundo Mello Jr (2000), as turbinas hidráulicas modernas apresentam um rendimento acima de 92%; todavia, para aquelas que foram construídas entre 1930 e 1950 o rendimento não chega a 85%. Por conseguinte, pode-se deduzir que em uma UHE construída a mais de 50 anos atrás, se houver a substituição da turbina hidráulica instalada por outra mais moderna, é possível obter ganhos consideráveis na geração de energia. Vale a pena salientar ainda que, devido à escala de grandeza ser na faixa de MW, quando se trata de construções de grande porte ou até mesmo em pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), ao considerar o acréscimo de 1%, isto significa em um considerável aumento na sua produção. Com isso, percebe-se a importância de alcançar a melhor performance dos equipamentos nos empreendimentos geradores.

Considerando a hipótese de que é possível aumentar a capacidade máxima gerada de algumas UHEs por intermédio da substituição de equipamentos, este trabalho de conclusão de curso (TCC) tem a intenção analisar a substituição da turbina Francis horizontal instalada atualmente na CGH Ivo Silveira, por uma turbina Pelton, estimando os ganhos na potência gerada quando impostas as mesmas condições de operação (turbinamento e queda). Adicionalmente, este trabalho também considera a suposta substituição da turbina Francis atual por outra mais moderna da mesma modalidade, devido ao empreendimento ter sido construído na década de 60.

## 1.1 Objetivo e motivação

O questionamento que trouxe a motivação para realização deste trabalho foi que a CGH Ivo Silveira, da empresa Celesc Geração S.A., supostamente tem condições de gerar uma potência elétrica maior do que aquela apresentada atualmente em seu projeto. No seu projeto básico do ano de 1967, para extrair a máxima potência da usina, foi instalada uma turbina Francis horizontal. Entretanto em estudos recentes e analisando as características particulares da CGH, observa-se que a turbina hidráulica instalada pode não ser a melhor opção para a operação. A CGH Ivo Silveira apresenta uma queda nominal de 146,70 m e uma vazão máxima turbinável de 2,59 m<sup>3</sup>/s. É visto em alguns trabalhos que a instalação de uma turbina Pelton nessas condições de operação pode apresentar um desempenho superior ao aferido pela turbina instalada atualmente.

Este TCC tem como objetivo investigar a diferença de potência total gerada na CGH Ivo Silveira, mediante a substituição da atual turbina hidráulica por uma turbina Pelton. Para tanto, considera-se que as duas turbinas operam nas mesmas condições de projeto e aflúncias mensais, procurando extrair os limites máximos das turbinas e a melhor utilização da água disponível. Também se propõe a substituição da turbina Francis atual por uma Francis mais moderna, na qual provavelmente ofereceria ganhos na produção devido as turbinas mais novas apresentarem um rendimento superior. Por fim, procura-se demonstrar o faturamento anual, simulando os custos de implantação e o tempo de retorno do capital investido quando é considerado a suposta repotenciação da usina.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Este TCC é estruturado em seis capítulos. No capítulo 2, é apresentada brevemente a história da empresa Celesc Geração S.A., bem como detalhes referentes à CGH Ivo Silveira, que é a usina pertencente a empresa e utilizada como referência no estudo de caso.

Posteriormente, no capítulo 3, serão retratadas algumas notas sobre UHE, como por exemplo, o sistema de geração, seus principais componentes, a transformação da energia hidráulica em elétrica, etc. Já no capítulo 4, é exposto um pequeno referencial teórico sobre os dois tipos de turbinas que serão abordadas no estudo de caso, que são as Francis e as Pelton.

No capítulo 5, é apresentado o estudo de caso. Por fim, no capítulo 6 são feitas as considerações finais do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

## **2 A EMPRESA E CGH IVO SILVEIRA**

A empresa Celesc Geração foi criada em 2006 com a desverticalização das atividades de geração e distribuição de energia elétrica exercida pela Celesc - Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A, em atendimento ao novo marco regulatório do Setor Elétrico Brasileiro. Assim, começou a operar no formato de holding, com duas subsidiárias integrais: a Celesc Geração S.A. e a Celesc Distribuição S.A.

Exercendo serviços na geração de energia, atualmente a empresa é proprietária do seu próprio parque gerador. Com grande potencial energético provindo de usinas hidrelétricas, a empresa vem investindo cada vez mais em novos empreendimentos através de capital provindo de parcerias com empresas privadas. No momento atual, a operação das usinas é de responsabilidade da DPOM/DVOP (Departamento de Operação e Manutenção/Divisão de Operação), e os serviços de tempo real, pré-operação e pós-operação são administrados através do COG (Centro de Operação da Geração).

A operação em tempo real é responsável pelas atividades diretas da operação, tendo como funções de manter as usinas operando permanentemente e autonomia para interferir em qualquer irregularidade, como por exemplo, controle de tensão, controle de intervenções, monitoramento de carga e frequência, entre outras funções. Essas irregularidades ocorridas durante o tempo real são reportadas para divisão de manutenção, que tem como responsabilidade pela conservação das usinas.

A pré-operação tem a função de verificar e liberar as programações de intervenção para realização das manutenções, para que estas sejam executadas no melhor período de tempo possível. Ainda, também deve fornecer suporte aos operadores em tempo real, tendo com o objetivo de garantir a precisão das

manobras e minimizar o risco, aumentando a confiabilidade da operação do sistema.

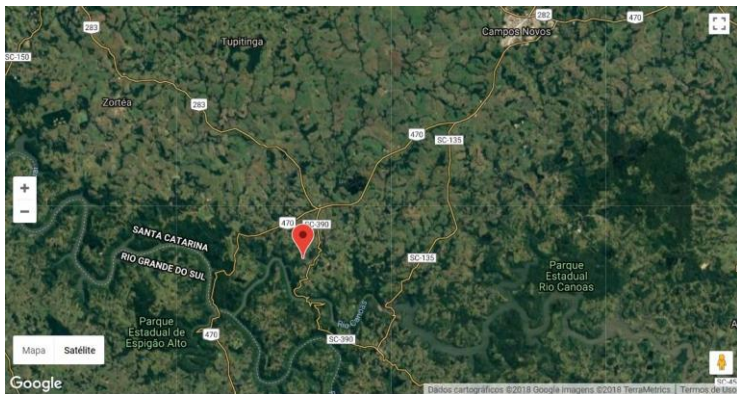
Já a pós-operação tem como trabalho a análise da operação, sendo atribuída à realização de relatórios mensais de geração, de ocorrências e indisponibilidades. Por fim, a divisão de manutenção é responsável pelo restabelecimento dos equipamentos elétricos, mecânicos e estruturas civis. Nas duas divisões, os trabalhos são realizados por equipes próprias e terceirizados através de contratos por demanda ou contratos anuais.

Atualmente, a Celesc Geração é responsável pela administração, operação e manutenção de 12 empreendimentos de geração hidrelétrica, que totalizam uma capacidade instalada de 106,75 MW. O parque gerador é inteiramente formado por usinas de baixo impacto ambiental, e mesmo abrigando usinas antigas, as mesmas possuem tecnologia moderna. Dentre as doze usinas, destaca-se a CGH Ivo Silveira que é a usina utilizada no estudo de caso deste trabalho.

A CGH Ivo Silveira teve seu início de operação em 14/10/1967, localizada no rio Lajeado Santa Cruz, no município de Campos Novos, Santa Catarina. A Figura 1 mostra a localização aproximada do empreendimento.

Figura 1 – Localização aproximada da CGH Ivo Silveira.





Fonte: Google Earth.

Apresentando uma queda bruta de 146,70 m e uma vazão máxima turbinável de 2,59 m<sup>3</sup>/s, a mesma dispõe de uma comporta de fundo para descargas de emergência. Encontra-se instalada no empreendimento uma turbina Francis horizontal e um gerador. Nas figuras mostradas a seguir é possível observar o conduto forçado e a turbina na CGH.

Figura 2 - Vista aérea CGH Ivo Silveira.



Fonte: Arquivo Celesc.

Figura 3 - Casa de máquinas.



Fonte: Arquivo Celesc.

Registrando uma potência instalada de 2,50 MW, a CGH não possui reservatório de armazenamento, sendo considerada a fio d'água, isto é, necessariamente deve turbinar ou verter todo fluxo de água que chega a barragem. Seu despacho de geração é

feito pela própria Celesc Geração de acordo com o monitoramento do nível deste reservatório.

A usina dispõe de uma área de drenagem de 275 km<sup>2</sup> e uma garantia física de 2,03 MW, que de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), corresponde ao limite máximo empregado na contratação de energia.

Pode-se observar as características mencionadas da usina na Tabela 1.

Tabela 1 - Características da CGH Ivo Silveira.

| <b>CGH Ivo Silveira</b>               |                        |
|---------------------------------------|------------------------|
| Potência Instalada                    | 2,50 MW                |
| Garantia Física                       | 2,03 MW                |
| Nível d'água máximo normal a montante | 640,78 m               |
| Nível d'água mínimo normal a montante | 638,58 m               |
| Queda Bruta                           | 146,70 m               |
| Área de drenagem                      | 275 km <sup>2</sup>    |
| Vazão máxima turbinável               | 2,59 m <sup>3</sup> /s |
| Rio                                   | Lajeado Santa Cruz     |



### 3 NOTAS SOBRE USINAS HIDRELÉTRICAS

A energia proveniente da força da água é verificada desde civilizações muito antigas, quando se utilizavam as chamadas “noras”, ou rodas de água do tipo horizontal, para produzir energia mecânica através da ação direta de uma queda de água. Logo, o físico e matemático suíço Leonhard Paul Euler, com intuito de melhorar a qualidade de vida da população, elaborou a “equação turbina”, que descreve a correlação entre o fluxo de água e o desempenho da turbina (Miranda, 2009).

Existem dois fatores cruciais para a geração de energia, o primeiro é a altura da queda d’água e o segundo é o volume de água disponível. Segundo Conalco (2011) a energia está diretamente relacionada com a queda de água, ou seja, a diferença entre as cotas de montante e jusante do rio, sendo possível existir uma variação conforme a vazão afluente e defluente durante o dia. Além disso, através da água captada pela barragem, é possível controlar a vazão em cada turbina e também o vertimento pelas comportas do reservatório. Portanto, mediante os desníveis de água e a vazão estipulada é possível transformar a potência hidráulica em potência mecânica, utilizando a água que passa pela turbina produza um torque no eixo do gerador, que no fim, se converte a potência mecânica em potência elétrica. A Figura 4 a seguir mostra o maior empreendimento gerador do Brasil.

Figura 4 – Usina Hidrelétrica de Itaipu.



Fonte: Itaipu Binacional.

### 3.1 Descrição dos componentes

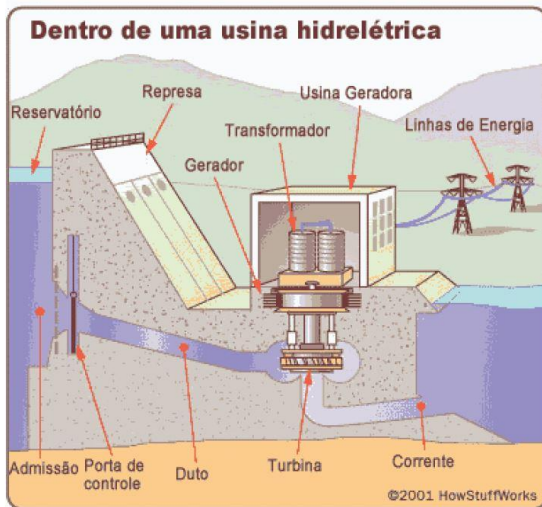
A Eletrobrás define que uma usina hidrelétrica deve ser composta basicamente por uma barragem, sistemas de captação e adução de água, casa de força e sistemas de restituição de água ao leito natural do rio. As definições de alguns componentes são:

- i. Reservatório: A função é acumular água para regularizar a vazão do rio e garantir um volume mínimo a ser turbinado. Vale evidenciar que o nível do reservatório é uma função não linear do volume de água armazenado no reservatório e a unidade normalmente adotada é o hectômetro cúbico ( $\text{hm}^3$ ).
- ii. Vertedouro: Regula o nível do reservatório, descarregando o excesso de água do reservatório, galgar a barragem.
- iii. Barragem: Retêm água para formação do reservatório, criando um desnível e aumenta a energia potencial da água.

- iv. Sistema de captação e adução de água: Conduz à água do reservatório da tomada de água através do conduto forçado até a casa de máquinas.
- v. Casa de máquinas: Local que abriga as turbinas e geradores.

A Figura 5 ilustra alguns dos principais componentes de uma UHE.

Figura 5 - Esquema de uma UHE.



Fonte: Miranda, 2009.

### 3.2 Características das Usinas Hidrelétricas

No Brasil, existe uma divisão entre pequenas centrais e grandes centrais hidrelétricas, dada como base a potência instalada e área de reservatório. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015), as usinas podem ser classificadas como:

- i. CGH: Capacidade de produção inferior a 3 MW;

- ii. PCH: Capacidade de produção superior a 3 MW e inferior a 30 MW;
- iii. UHE: Capacidade de produção superior a 30 MW;

Também pode-se classificar as usinas conforme seu tipo de reservatório: acumulação ou a fio d'água. Reservatórios de acumulação podem reter uma grande quantidade de água, sendo possível armazenar a vazão afluente em períodos de chuva para operar essa reserva energética durante os períodos de estiagem. Já os reservatórios a fio d'água, não possuem reservatórios com grande capacidade armazenamento, sendo que a barragem de contenção tem como objetivo armazenar volume de água para a regularização de apenas algumas horas ou dias e fornecer condições mínimas de queda e vazão.

### 3.3 Expressão matemática da geração de energia

Como abordado anteriormente, a geração de energia elétrica é a transformação da energia potencial da água armazenada no reservatório em energia mecânica através da turbina, que, por conseguinte, é transformada em energia elétrica pelo gerador. Após essa conversão, utilizando uma subestação elevadora de tensão, a potência é injetada no sistema de transmissão para que seja entregue ao centro de consumo.

Segunda Encina (2006) a dedução da expressão matemática que representa a geração de energia, pode ser representada conforme equacionamento a seguir. Inicialmente, tem-se:

$$de_p = dm.g.h \quad (1)$$

em que:

$de_p$  é a variação incremental na energia potencial (J);



$dm$  é a variação incremental da massa de água armazenada no reservatório (kg);

$g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$h$  é a altura de queda bruta (m), definida como a diferença entre os níveis a montante e jusante da usina.

A variação da massa d'água é convertida em variação de volume, levando em conta o peso específico d'água, como visto a seguir:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

em que:

$\rho$  é o peso específico da água ( $kg/m^3$ );

$m$  é a massa (kg);

$v$  é o volume ( $m^3$ ).

Da equação (2), pode ser obter:

$$dm = \rho \cdot dv \quad (3)$$

Substituindo (3) em (1), tem-se:

$$de_p = \rho \cdot dv \cdot g \cdot h \quad (4)$$

Considerando a energia potencial variando em um intervalo infinitesimal, a equação (4) pode ser reescrita como:

$$\frac{de_p}{dt} = \rho \cdot \frac{dv}{dt} \cdot g \cdot h \quad (5)$$

$$q = \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

$$p = \frac{de_p}{dt} \quad (7)$$

Substituindo (6) e (7) em (5), tem-se:

$$P_b = \rho \cdot q \cdot g \cdot h \quad (8)$$

A equação (8) representa a potência bruta ( $P_b$ ) relacionada com uma determinada vazão turbinada  $q$  considerando uma altura de queda bruta  $h$ . Por existir à fricção d'água nos sistemas de adução, existem perdas expressas em termos de altura de queda.

Assim, definimos queda líquida como a diferença entre a queda bruta e a perda hidráulica existente, sendo representada pela seguinte equação:

$$h_l = h - h_p \quad (9)$$

em que:

$h_l$  é altura de queda líquida (m);

$h_p$  é a perda hidráulica (m).

Para o cálculo da perda hidráulica consideram-se as perdas por atrito devido à passagem de água pelo conduto forçado, aos quais dependem do comprimento dos condutos, diâmetro e rugosidade das paredes internas do conduto forçado e da caixa espiral. Pode ser representada pela função quadrática a seguir:

$$h_p = k \cdot q^2 \quad (10)$$

em que:

$k$  é a constante característica do sistema de adução ( $s^2/m^5$ );

$q$  é a vazão turbinada ( $m^3/s$ ).

A turbina tem como função a transformação da potência hidráulica em mecânica, a qual depende da vazão turbinada, altura da queda líquida e da eficiência da própria turbina ( $\eta_t$ ). Assim é possível obter a expressão matemática para a potência mecânica desenvolvida pela turbina como sendo:

$$p_m = \rho \cdot g \cdot q \cdot h_l \cdot \eta_t \quad (11)$$

Para a transformação de potência mecânica em elétrica, o eixo da turbina fica acoplado com o gerador. Dessa forma, também temos a influência do rendimento do gerador, isto é:

$$p = \eta_g \cdot p_m \quad (12)$$

Acima  $\eta_g$  é o rendimento do gerador. Substituindo (11) em (12), obtém-se a seguinte expressão:

$$p = \rho \cdot g \cdot q \cdot h_l \cdot \eta_t \cdot \eta_g \quad (13)$$

Considerando o peso específico d'água igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ , a aceleração da gravidade  $9,81 \text{ m/s}^2$  e multiplicando por  $10^{-6}$  para obter a expressão em MW, obtêm-se:

$$p = 9,81 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot h_l \cdot q \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

### 3.4 Perda no sistema de adução

Visto na seção anterior, a perda hidráulica é a energia potencial transformada em outros tipos de energia durante a passagem da água pelo conduto. Isto decorre devido ao atrito com as paredes do tubo e a viscosidade do líquido em escoamento. Como apresentado na equação (10), esta perda é resultante da constante característica do sistema de adução e do quadrado da vazão turbinada. Sendo assim, para obter-se a potência gerada nas usinas, é necessário ter conhecimento do valor desta constante característica e da vazão disponível.

Analisando a equação (14), nota-se que ao aumentar a vazão turbinada, proporcionalmente também se aumenta a energia produzida. Todavia, da mesma forma, este aumento gera uma maior perda hidráulica no conduto. Então, conclui-se que não necessariamente quando se turбина a máxima vazão disponível, se obtém a melhor eficiência da turbina.

É importante salientar também, que quanto maior for queda bruta, ou seja, maior o comprimento do conduto forçado, isto provoca maiores perdas por atrito no sistema de adução. Assim, é relevante saber o valor da constante  $k$ , como também o diâmetro e material do conduto. Na tabela 2 pode-se verificar os valores das perdas hidráulicas para algumas usinas hidrelétricas.

Tabela 2 – Coeficientes de perdas hidráulicas.

| <b>Usina</b>  | <b>Coeficiente <math>k</math> (<math>s^2/m^5</math>)</b> |
|---------------|--|
| Itaipu        | $2,0 \times 10^{-6}$                                     |
| Ilha Solteira | $4,7 \times 10^{-6}$                                     |
| Rosana        | $1,4 \times 10^{-6}$                                     |
| Salto Grande  | $3,0 \times 10^{-5}$                                     |

## **4 NOTAS SOBRE TURBINAS HIDRÁULICAS**

Segundo Mello Jr (2000), a aplicação de turbinas hidráulicas é conhecida desde os tempos do surgimento das primeiras civilizações agrícolas, por meio de esquemas hidráulicos na Mesopotâmia e no Império Egípcio desde 3000 anos A.C. Atualmente, com cada vez mais desafios nas construções de grande porte, pesquisas em inovações tecnológicas têm assumido um papel importante para desenvolvimento de equipamentos mais sofisticados e com maior eficiência. Hoje o desenvolvimento é tão notável, que é possível realizar simulações em softwares para mostrar os esforços críticos nos equipamentos em operação, e também, simular comportamentos hidráulicos do fluxo de água.

Cada UHE possui particularidades que a difere das outras. Assim, a cada novo empreendimento é inevitável à realização de um estudo levantando as características da usina, principalmente para a seleção do tipo de turbina hidráulica que será instalada. Existem diversos tipos de turbinas disponíveis, e dependendo das especificações encontradas, uma turbina se emprega melhor que a outra. Neste capítulo são apresentados dois tipos de turbinas hidráulicas muito utilizadas no Brasil, a Francis, que é o tipo instalada hoje na CGH Ivo Silveira, e a Pelton que supostamente se substituir a Francis pode apresentar um ganho na potência elétrica gerada.

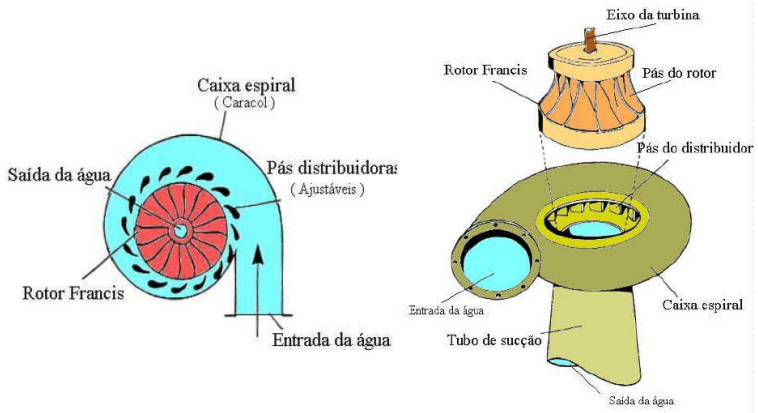
### **4.1 Turbina Francis**

Sendo capaz de ser empregada tanto para grandes e pequenas hidrelétricas, a turbina Francis atua por diferença de pressão entre os dois lados do rotor. Segundo Mello Jr (2000) este é o tipo mais utilizado de turbina no Brasil, principalmente por

cobrirem um grande campo de rotação específica. Considerada uma turbina de reação, a mesma pode ser projetada tanto com eixo na horizontal, bem como na vertical. Sendo usualmente construída na horizontal, a turbina é apoiada em mancais de deslizamentos radiais e dispensa o emprego de mancais de guias. Em grandes empreendimentos sua potência unitária pode chegar até 750 MW e um rendimento acima de 92%; todavia, aquelas turbinas que foram construídas entre 1930 e 1950 não possuem seu rendimento maior que 85%. Vale a pena lembrar que a usina deste TCC é de 1967, ou seja, é possível encontrar o rendimento da atual turbina instalada com valores bem próximos destes mencionados anteriormente.

De acordo com Miranda (2009) a turbina Francis compõe em uma série de canais hidráulicos que ao receberem água radialmente, exercem trabalho sobre as aletas fazendo a turbina e o gerador rodarem, e no fim, libera a água pelo tubo de sucção numa direção axial. Sua aplicação é para um volume de água determinado, apesar de ter componentes para controle de vazão, há uma acentuada perda de desempenho para variações de vazões. Outra característica é a pouca flexibilidade a variações de queda de água, na qual a turbina deve operar a pequenas variações de queda. Apesar destas imperfeições, ela ainda assim é muito aplicada no Brasil, podendo operar em quedas de até 600 metros e também para grandes ou pequenas vazões. Na Figura 6 é visto o esquema de uma turbina Francis.

Figura 6 - Desenho esquema de funcionamento de uma turbina Francis.



Fonte: Mello JR, 2000.

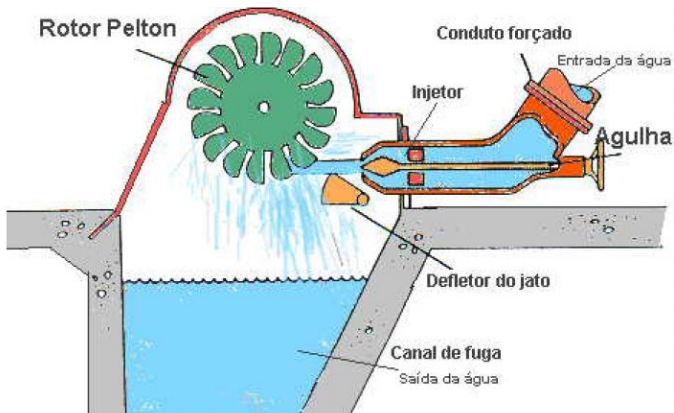
## 4.2 Turbina Pelton

A turbina Pelton também conhecida como turbina de jato livre, possui um rotor com pás em formato de conchas e uma tubulação de adução que alimenta um ou mais injetores. Essa turbina é do tipo de ação. Para o autor Mello Jr (2000), a principal característica da Pelton é a velocidade do jato na saída do bocal, que pode chegar até 180 m/s e admissão parcial na turbina. Idealizada em 1880 pelo americano Lester Allan Pelton, que concedeu seu próprio nome, ela é projetada para operar em altas quedas e baixas vazões. Mello Jr (2000) também relata que para um melhor rendimento devem ser consideradas alturas superiores a 150 metros, as quais podem chegar até 2000 metros. No caso de mini e micro aplicações a turbina de jato livre pode ser usada para baixas quedas, podendo chegar a alturas menores que 20 metros.

Segundo Encina (2006) a turbina de ação transforma a pressão do jato d'água, fornecido pelos bicos injetores, em energia

cinética às conchas, que transforma está em trabalho mecânico, desenvolvendo velocidades rotativas até 1.300 rpm. O bocal é composto de uma peça fixada ao extremo da tubulação e uma agulha interna que regula o fluxo de saída de água. Através de acoplamentos rígidos, o gerador pode ser acoplado diretamente ao eixo da turbina, sendo feitos ajustes de velocidade por meio de correias ou redutores de engrenagens. Basicamente, percebe-se que a turbina é constituída por duas partes principais: o rotor e o bocal (injetor). Ambos podem ser observados na Figura 7.

Figura 7 – Imagem Turbina Pelton.



Fonte: Mello JR, 2000.

### 4.3 Rendimento da turbina

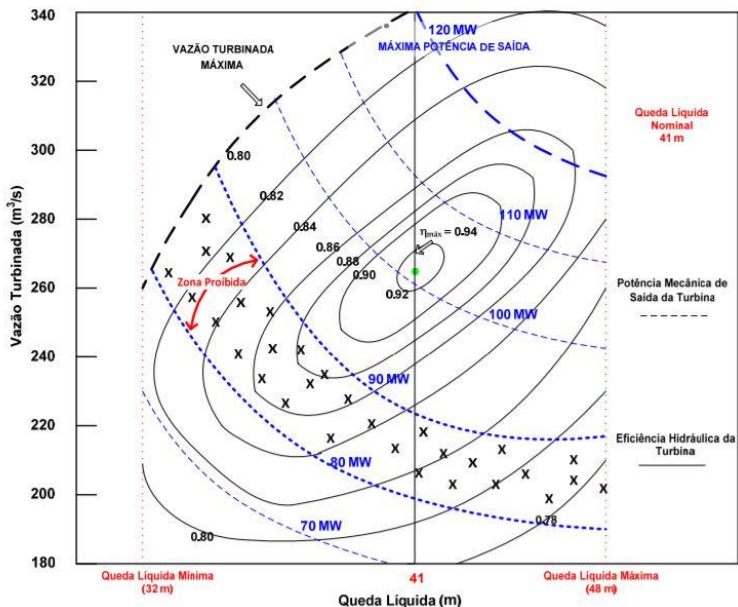
Nos tópicos anteriores foram apresentadas as características básicas das duas turbinas hidráulicas referentes a este trabalho. Por conseguinte, nesta seção, será elaborada uma análise em um mesmo contexto para se perceber o diferencial técnico dos dois tipos de turbinas que serão utilizadas.



O rendimento hidráulico da turbina é a eficiência com que é transferida a potência disponível na água que flui através da turbina para o eixo do rotor. Logo, podemos analisar que uma parte da potência disponível no eixo da turbina hidráulica é dissipada em perdas, e assim, para diferentes condições de operação, a turbina irá apresentar uma diferente quantidade de perda. Em termos percentuais, é observado que o rendimento das turbinas hidráulicas se dá na faixa de  $88 \leq \eta_r \leq 96$ .

Para melhor compreensão, é apresentada a Figura 8, onde é possível observar o rendimento hidráulico de uma turbina, conhecida como curva colina. Pode-se verificar que, o rendimento depende da altura de queda líquida e da vazão turbinada, sendo que para uma queda constante e variando a vazão turbinada de seu mínimo até seu máximo, notam-se os diferentes pontos de atuação e seu respectivo rendimento. Também é válido citar as zonas proibidas, as quais são dadas por pontos de operação em que a turbina não deve operar, por motivos de segurança e conservação da máquina. Nestas zonas onde a turbina apresenta uma baixa eficiência e vibrações mecânicas de graves consequências para a turbina.

Figura 8 – Curva Colina de uma unidade hidrelétrica.

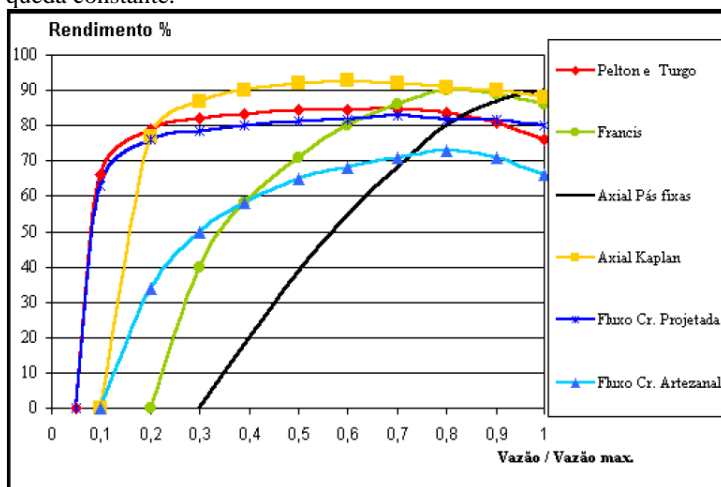


Fonte: Ismael, 2011.

Já na Figura 9, são comparados os desempenhos de algumas turbinas hidráulicas utilizadas no sistema brasileiro. Nota-se que a curva em verde é a da turbina Francis instalada hoje na CHG Ivo Silveira, enquanto a curva em vermelho é a turbina hidráulica proposta para substituição.

É importante salientar que baseado neste gráfico que serão feitas as considerações de rendimento das turbinas hidráulicas no estudo de caso deste trabalho, ou seja, será considerado a queda constante e uma vazão fixa por todo período de tempo, com isso será possível obter o ponto da vazão turbinada ( $q$ ) dividida pela vazão turbinada máxima ( $q_{max}$ ), e assim encontrar o rendimento da turbina de acordo com a curva da turbina desejada.

Figura 9 - Gráfico dos rendimentos dos diferentes tipos de turbinas com queda constante.



Fonte: Miranda, 2009.

Observa-se também na Figura 9 que as eficiências das turbinas são relativamente próximas, quando comparadas em um mesmo ponto. Nota-se também que quando a  $Vazão / Vazão\ max.$  é igual a 0,8, temos a máxima eficiência da turbina Francis, e a medida em que variamos deste ponto temos uma acentuada perda de rendimento. Já na turbina Pelton, o seu ponto máximo de rendimento encontra-se em 0,7, observando que o rendimento se mantém alto em uma ampla faixa de variação de carga.



## 5 ESTUDO DE CASO

Neste estudo de caso será avaliado a possível alteração da turbina Francis instalada atualmente na CGH Ivo Silveira através de três hipóteses. A primeira hipótese, consiste em analisar a diferença de potência elétrica gerada ao substituir a turbina Francis instalada atualmente por uma turbina mais moderna, supondo as mesmas condições de operação.

Já a segunda hipótese, compreende em avaliar a suposta potência produzida com a substituição da turbina já está instalada por uma Pelton.

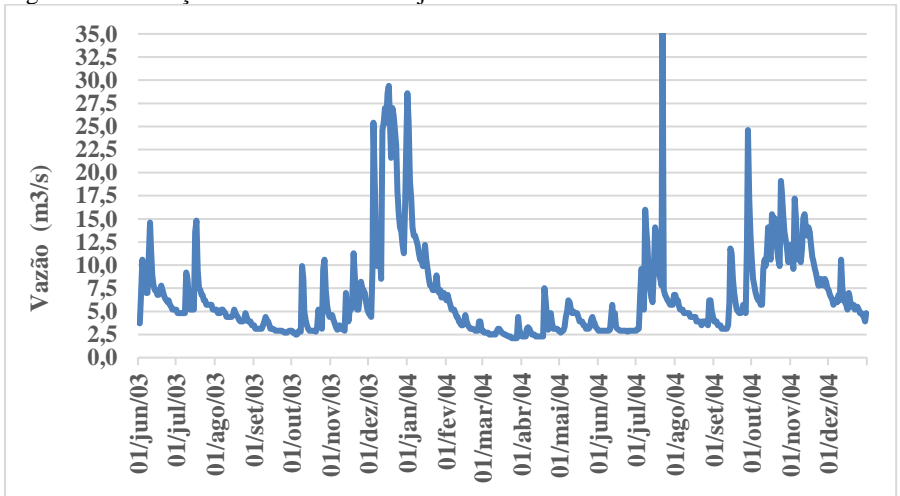
Por fim, será analisado uma terceira hipótese. Conforme verificado na Figura 9, a turbina Francis apresenta um maior rendimento quando a vazão / vazão máx é igual a 0,8. Assim, também será feita uma comparação entre as duas turbinas analisando este ponto específico.

### 5.1 Análise da vazão do Rio Santa Cruz

Para conseguir estimar a produção média de energia da usina, primeiramente é necessário conhecer a vazão do rio em que a mesma está instalada. Como visto anteriormente, para usar a equação (14), é fundamental conhecer os dados da vazão disponível do rio ao longo dos anos, para ser possível determinar qual a vazão disponível a ser turbinada em cada período de tempo. Portanto, através de medidas realizadas pela empresa com a auxílio de um flutuador, que é um equipamento que estima a velocidade média do fluxo e da estimativa da área da seção transversal, foi possível obter os dados necessários para a construção de um gráfico estimado da vazão do Rio Lajeado Santa Cruz no período de um ano e meio. A Figura 10 mostra o gráfico da variação de vazão ao longo do período de junho de 2003 até

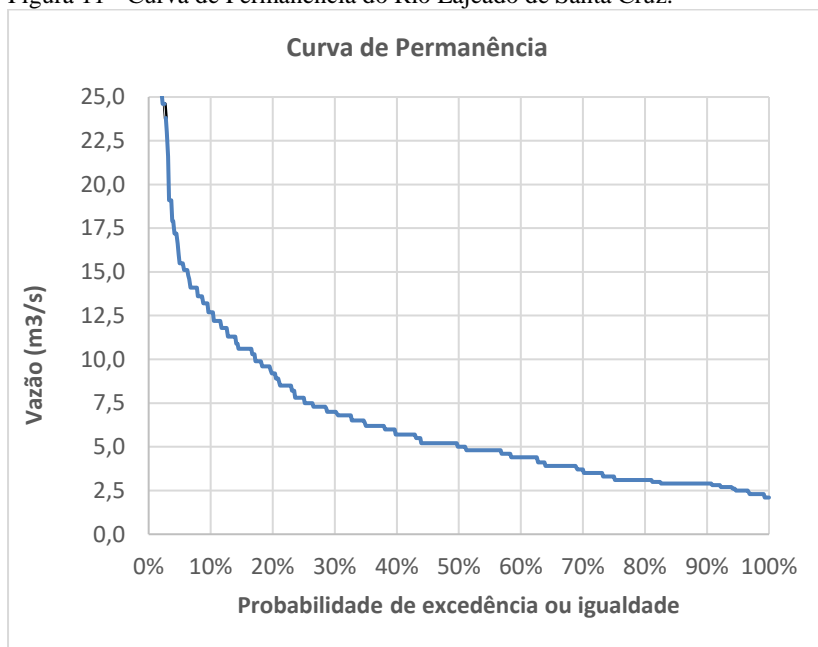
dezembro de 2004, sendo importante salientar que a vazão mínima encontrada neste tempo foi de  $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figura 10 - Variação da vazão do Rio Lajeado de Santa Cruz.



Através das medidas mostradas na Figura 10, é possível produzir a curva de permanência do Rio Santa Cruz, ou seja, podemos obter a relação entre a vazão e frequência com que está vazão é igualada ou superada. O gráfico da curva de permanência obtido pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Curva de Permanência do Rio Lajeado de Santa Cruz.



Analisando a frequência acumulada das vazões a longo prazo, consegue-se perceber que em 94,48% do tempo o rio é capaz de garantir a vazão de 2,6 m<sup>3</sup>/s.

Desta forma, concluímos que a vazão firme do rio ao longo deste período, é aproximadamente a vazão máxima turbinável, ou seja, praticamente em todo instante de tempo a turbina dispõe da água necessária para turbinar em seu limite. Sendo assim, para realizar o cálculo da potência elétrica gerada pela usina neste trabalho, será considerado que em todo instante de tempo a vazão turbinada é igual a 2,59 m<sup>3</sup>/s.

## 5.2 Cálculo do rendimento da Turbina Francis com queda útil constante

Para realizar o cálculo do rendimento da turbina Francis instalada atualmente, serão feitas algumas considerações já abordadas nos tópicos anteriores. Segundo Encina (2006), os geradores modernos apresentam rendimentos da ordem de  $90\% \leq \eta_g \leq 99\%$ . Apesar da CGH Ivo Silveira ser uma usina antiga, será considerado que o gerador apresenta a pior das hipóteses de um gerador moderno, ou seja, uma eficiência igual a 0,9. Nota-se que as máquinas construídas na década de 60, se fossem analisadas hoje, provavelmente apresentariam um rendimento ainda menor, principalmente por apresentarem seus componentes em imperfeitas condições de operação.

Como visto na seção 3.4, a perda hidráulica depende tanto da vazão turbinada, como também da constante característica do sistema de adução. Para este trabalho, não foi possível obter valor da constante  $k$  da usina em estudo, então será feito uma suposição do seu valor de acordo com dados obtidos de outras usinas. Será empregue o valor equivalente ao da Usina Itaipu, devido a mesma apresentar uma queda nominal de 118,40 metros, um valor de queda próximo ao da CGH Ivo Silveira.

Por conseguinte, dado que a constante do sistema de adução é um número extremamente pequeno, na ordem de grandeza de  $10^{-6}$ , e a vazão também se denota em um valor pequeno, será considerado que a perda hidráulica do citado problema será aproximadamente zero. Desta forma, a altura da queda líquida será mantida constante e de valor aproximado ao da queda bruta visto anteriormente nas características da usina.

Portanto, para que o cálculo do rendimento da Turbina Francis seja satisfeito, as seguintes considerações foram feitas:

- O rendimento do gerador é constante e igual a 0,9;
- A vazão é igual a  $2,59 \text{ m}^3/\text{s}$ , para todo período de tempo;



- A queda útil é mantida constante e igual a 146,70 m;
- A perda hidráulica é considerada aproximadamente zero;
- A potência elétrica produzida quando a turbina está operando com a vazão máxima turbinável é igual a 2,5 MW, a mesma relatada na outorga do projeto básico.
- Os valores citados anteriormente são os mesmos tanto na análise da turbina Francis quanto da turbina Pelton;

Portanto, utilizando a equação (14) e com base nas considerações acima, verifica-se que o rendimento da turbina Francis instalada atualmente é de aproximadamente 74,52%.

É importante notar que, de acordo com a Figura 9, quando utilizado a Vazão / Vazão máx com o valor igual a 1 para uma turbina Francis, era previsto se obter um rendimento aproximado de 85%. Assim, pode-se concluir que o rendimento da turbina Francis instalada hoje indica em um valor em torno de 10,48% abaixo do esperado.

Além disso, é importante ressaltar que se fosse pressuposto que o rendimento da turbina hidráulica fosse igual a 85%, conforme a Figura 9, e assumindo as mesmas condições já retratadas, a potência elétrica produzida pela usina seria de 2,851 MW, ou seja, 0,351 MW maior que a produzida atualmente.

Tabela 3 - Potência elétrica produzida caso 1.

| <b>Potência elétrica produzida</b> |          |
|------------------------------------|----------|
| Turbina Francis (atual)            | 2,500 MW |
| Turbina Francis (moderna)          | 2,851 MW |

### **5.3 Análise da potência utilizando Turbina Pelton com queda constante**

Nesta seção, para analisar a potência gerada utilizando uma turbina Pelton, será utilizada as mesmas condições previamente mencionadas na seção 5.2. Além disso, também será utilizado como referência a Figura 9 analisada na seção 4.3, deste gráfico será suposto o possível rendimento de uma turbina Pelton para as circunstâncias deste trabalho.

Supondo que a vazão firme do problema deste estudo é igual a vazão máxima turbinável, ou seja, que vazão / vazão máx é igual a 1, isto implica que o rendimento de uma turbina Pelton é aproximadamente de 76%.

Por conseguinte, considerando as mesmas condições anteriores denotadas de queda útil, vazão turbinada, e rendimento do gerador, ao aplicar a equação (14) encontramos uma potência elétrica gerada de aproximadamente 2,549 MW.

Tabela 4 - Potência elétrica produzida caso 2.

| <b>Potência elétrica produzida</b> |          |
|------------------------------------|----------|
| Turbina Francis (atual)            | 2,500 MW |
| Turbina Pelton                     | 2,549 MW |

Assim, observa-se que a suposta substituição da turbina atual por uma turbina Pelton, apresenta em um ganho de 0,049 MW. Então, conclui-se que é viável a repotenciação da usina caso a intenção fosse em aumentar a potência gerada.

#### **5.4 Potência gerada na condição de vazão / vazão max igual a 0,8**

Por motivos didáticos, neste tópico será feito uma terceira suposição. De acordo com a Figura 9, a turbina Francis apresenta um rendimento maior quando a vazão / vazão máx é igual a 0,8, isto é, um rendimento de 90%. Desta forma, é pressuposto de que com uma eficiência superior, maior será a potência elétrica gerada

ao longo do tempo. De mesmo modo, para a turbina Pelton, que quando a vazão / vazão máx é igual a 0,8, mostra uma eficiência de 84%. Consequentemente, leva-se a interpretação de que uma comparação entre as duas turbinas neste ponto específico conduziria há uma comparação mais adequada do que a realizada anteriormente.

Entretanto, vale recordar que a CGH Ivo Silveira possui um reservatório a fio d'água, então não dispõe de um reservatório para armazenamento de água, ou seja, devem turbinar ou verter todo fluxo de água que chega a barragem. Sendo assim, a medida em que se despreza uma parte da água disponível do rio para turbinamento, ou seja, vertendo uma parcela de água para alcançar uma melhor eficiência das turbinas, no fim, isto resulta em um desperdício de energia pelo fato desta água não ser armazenada, mas sim vertida.

Todavia, mesmo sabendo que não é viável considerar esta hipótese devido as características da usina, contudo será levado em consideração para uma possível comparação entre as turbinas. Posto isso, a vazão a ser turbinada para se obter o ponto mencionado anteriormente é de 2,072 m<sup>3</sup>/s.

Assim, atendendo as mesmas condições do tópico 5.2, as potências elétricas geradas podem ser observadas no Tabela 5.

Tabela 5 - Potência elétrica produzida caso 3.

| <b>Potência elétrica produzida</b> |          |
|------------------------------------|----------|
| Turbina Francis (atual)            | 2,134 MW |
| Turbina Pelton                     | 2,227 MW |

Por fim, nota-se que a potência gerada utilizando uma turbina Pelton ainda foi superior do que quando utilizado a turbina Francis atual, apresentando um ganho de 0,093 MW.

Sendo assim, concluímos que se a intenção fosse em aumentar a potência elétrica produzida na usina e se a mesma dispusesse de um reservatório de armazenamento, seria viável a sua substituição.

## **5.5 Análise de custo da repotenciação**

Nesta seção será abordada uma análise de custo sobre a suposta repotenciação da CGH Ivo Silveira.

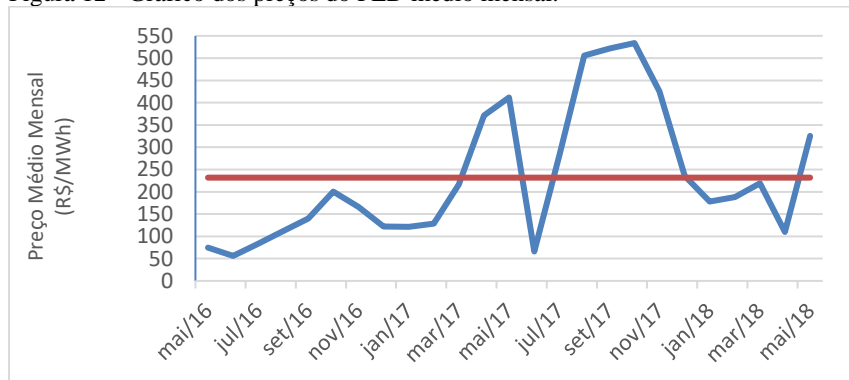
Nos tópicos abordados anteriormente, foi visto que a substituição da turbina Francis instalada atualmente por outra mais moderna, se torna mais vantajosa a medida em que se consegue gerar uma maior potência. Assim, conclui-se que a substituição mais plausível no empreendimento se torna esta opção.

Para realizar o cálculo do preço do MWh será considerado o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), que é o preço que a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) utiliza para valorar as diferenças de energia contabilizadas no mercado de curto de prazo. Vale salientar que a intenção deste trabalho não é buscar o preço exato que seria viável da venda deste ativo, mas sim, estimar um preço considerável do montante de energia produzido a cada ano.

Desta forma, o preço do megawatt-hora será definido pelos preços mensais do submercado sul, calculados pela CCEE durante o período de dois anos, desde maio de 2016 até maio de 2018. Vale constatar que foi utilizado o submercado sul pelo fato de a usina se localizar na região de Santa Catarina.

Os preços calculados pela CCEE estão no Anexo A deste trabalho e podem ser observados na Figura 12.

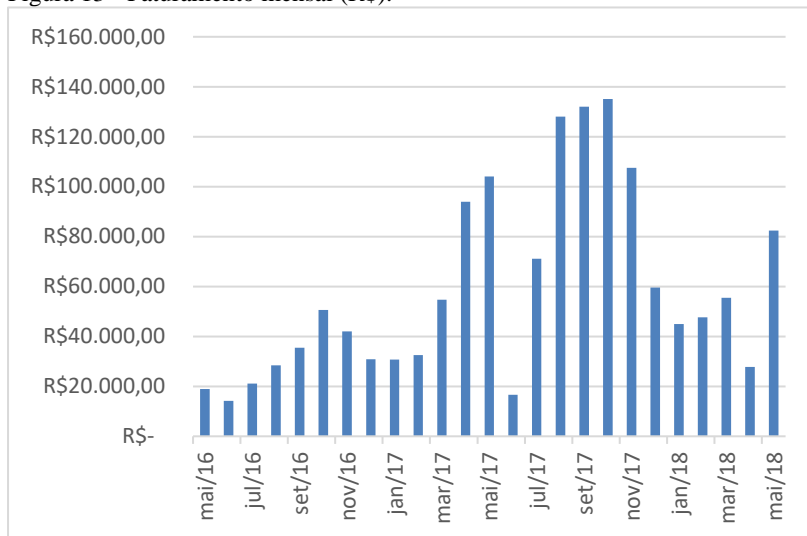
Figura 12 - Gráfico dos preços do PLD médio mensal.



Fonte: CCEE, 2018.

Assim, com o preço do MWh estabelecido a cada mês, se torna viável encontrar a renda gerada pelo suposto excedente de energia produzido mensalmente. Como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Faturamento mensal (R\$).



Observa-se na Figura 13 o faturamento com a venda do ativo a cada mês, totalizando um valor total de R\$ 1.464.320,33 em dois anos. Vale a pena salientar, que este valor é estipulado para a venda do ativo no mercado livre de energia e também não está sendo considerado nenhuma pausa para manutenção das máquinas ou qualquer tipo de interrupção. Em comparação, caso os mesmos preços mensais fossem utilizados na venda da energia excedente gerada pela turbina Pelton, o faturamento total seria de R\$ 204.420,79.

Estipulado o possível ganho com a venda do ativo excedente ao instalar uma turbina Francis atual, se torna interessante avaliar o provável tempo de retorno do capital investido no empreendimento. Desta forma, com intuito de aprimorar o trabalho, foi realizado um orçamento com a empresa TecHydro Brasil, localizada no estado de São Paulo, onde foi estipulado o provável preço para aquisição de uma turbina Francis com as características exatas para instalação na CGH Ivo Silveira.

O orçamento foi realizado no dia 25/06/2018 e encontra-se no Anexo B no final deste trabalho.

Por fim, estabelecido que o valor de uma nova turbina Francis seria de R\$ 1.556.571,84, conclui-se que o retorno do capital investido ocorreria em aproximadamente 2 anos.





## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi em analisar a possibilidade da substituição da turbina Francis instalada atualmente na CGH Ivo Silveira. A primeira suposição, era que a instalação de uma turbina Pelton, nas mesmas condições de operação, seria capaz de trazer ganhos significativos na potência elétrica gerada. Todavia, também se abrangeu a um segundo pressuposto, se a substituição da turbina Francis atual, simplesmente por outra mais moderna, levaria também a ganhos plausíveis. Então o trabalho englobou: (i) uma breve apresentação sobre a CGH Ivo Silveira e a empresa (ii) análise metodológica sobre usinas hidrelétricas e também aos dois tipos de turbinas mencionados; (iii) análise da vazão do Rio Santa Cruz; (iv) cálculo do possível rendimento da turbina atual com queda constante; (v) análise da potência gerada utilizando uma turbina Francis mais moderna com queda constante (vi) análise da potência gerada utilizando uma turbina Pelton com queda constante; (vii) análise de custo avaliando a viável repotenciação da usina e tempo de retorno do capital investido.

Comparando os resultados encontrados através da análise teórica apresentada, em conjunto com os dados adquiridos, concluiu-se que a suposta substituição da turbina Francis por uma turbina Pelton levou ao um modesto aumento na potência elétrica gerada. Por conseguinte, foi constatado que não seria vantajoso realizar essa substituição, posto que, se teria um ganho superior na potência produzida na substituição da turbina Francis atual por outra mais moderna.

Assim, mediante as características apresentada pela CGH Ivo Silveira, verifica-se que há uma melhora significativa na eficiência ao se empregar uma turbina Francis de última geração. Desta forma, considera-se favorável a repotenciação da usina,

visto que se tem um notável acréscimo na geração de energia e o retorno do investimento seria relativamente rápido.

Por fim, como sugestões para continuidade deste trabalho sugerem-se:

- 1) Avaliar o rendimento da turbina Francis instalada atualmente sem considerar a queda constante.
- 2) Analisar a vazão do Rio Santa Cruz com uma quantidade maior de dados e estes serem mais recentes.
- 3) Buscar aperfeiçoar os cálculos de forma há minimizar os erros, como por exemplo, considerar a perda hidráulica do sistema e verificar a rendimento exato do gerador.
- 4) Verificar a suposta substituição por outros tipos de turbina, como Turgo ou de Fluxo Cruzado.

## 7 REFERÊNCIAS

ENCINA, Anastacio Sebatían Arce. **“Despacho Ótimo de Unidades Geradoras em Sistemas Hidrelétricos Via Heurística Baseada em Relaxação Langrangeana e Programação Dinâmica”**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2006.

MELLO JR, Antonio Gonçalves. **“A Turbina de Fluxo Cruzado como opção para centrais hidráulicas de pequeno porte”**. Pós Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2000.

ELETROBRAS. **“Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Elétricas Brasileiras”**. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (2000).

CONALGO, Glauber Renato. **“Contribuição para a otimização de turbinas em usinas hidrelétricas: especificação e operação”**. Tese de Doutorado de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.

PASSOS, Ismael Oliveira. **“Metodologia de Obtenção de Curvas de Colina Usando Redes Neurais para Geração Hidroelétrica”**. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

MIRANDA, Roberto Lobo. **“Regulação Técnica Para Se Obter Melhor Eficiência Na Motorização de Pequenas Centrais Hidrelétricas No Brasil”**. Tese de Mestrado de Regulação da Indústria de Energia. Universidade de Salvador. Salvador, 2009.

CARVALHO JUNIOR, Davi Monteiro. **“Análise comparativa entre a influência do ICMS dos Equipamentos Elétricos, Mecânicos, Hidromecânicos e de Geração, nos Custos de Implantação de pequenas centrais Hidrelétricas e Usinas Eólicas”**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

ELETROBRAS. **Centrais Elétricas Brasileiras S.A.** Disponível em: <[http://www.furnas.com.br/hotsites/sistema/furnas/usina\\_hidr\\_funciona.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistema/furnas/usina_hidr_funciona.asp)>. Acesso em: 03/04/2018

SOARES, S., SALMAZO, C. **“Minimum Loss Predispatch Model for Hydroelectric Power Systems”**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, n° 3, pp. 1220- 1228, August 1997.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **“Banco de Informações de Geração: BIG”**. Disponível em: <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em: 03/04/2018.

SCHREIBER, G. P., **“Usinas hidrelétrica”**, São Paulo: Edgar Blücher, 1980.

MORAIS, Luciano C. **“Estudo Sobre o Panorama da Energia Elétrica no Brasil e Tendências Futuras”**. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Estadual Paulista, UNESP. São Paulo, 2015.

CERPCHC - Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. **“Fontes Renováveis: Hidráulica”**. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/hidraulica.php>>. Acesso em: 09/04/2018.

VOITH. “**Pelton Turbine**”. Disponível em: <http://voith.com/en/products-services/hydro-power/turbines/pelton-turbines-563.html>. Acesso em: 09/04/2018.

STANO JR, A.; FILHO, G. L. T. “**Série Energias renováveis: energias renováveis**”. Itajubá, MG: FAPEPE, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 673, de 4 de agosto de 2015:** Estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de outorga de autorização para exploração de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequenas Centrais Hidrelétrica.


## ANEXO A: – TABELA DO PREÇO MÉDIO DA CCEE

Tabela A1 -Tabela do preço médio da CCEE.

| <b>Mês/Ano</b> | <b>Preço médio (R\$/MWh)</b> |
|----------------|------------------------------|
| mai/18         | 325,46                       |
| abr/18         | 109,71                       |
| mar/18         | 219,23                       |
| fev/18         | 188,54                       |
| jan/18         | 177,82                       |
| dez/17         | 235,29                       |
| nov/17         | 425,17                       |
| out/17         | 533,82                       |
| set/17         | 521,83                       |
| ago/17         | 505,95                       |
| jul/17         | 280,81                       |
| jun/17         | 65,91                        |
| mai/17         | 411,49                       |
| abr/17         | 371,47                       |
| mar/17         | 216,24                       |
| fev/17         | 128,43                       |
| jan/17         | 121,44                       |
| dez/16         | 122,19                       |
| nov/16         | 166,05                       |
| out/16         | 200,21                       |
| set/16         | 140,35                       |
| ago/16         | 112,36                       |
| jul/16         | 83,43                        |
| jun/16         | 56,13                        |
| mai/16         | 74,91                        |

## ANEXO B: – ORÇAMENTO TURBINA FRANCIS

Figura B1 - Orçamento turbina Francis.

|   |   |                                  |                   |
|---|---|----------------------------------|-------------------|
|    | <b>PROPOSTA COMERCIAL</b><br><b>EQP.CM- 332.18.R0</b> | Piracicaba-SP, <b>25/06/2018</b> |                   |
| À: <b>Particular</b><br>At. Sr(s): <b>Luis Eduardo</b><br>Usina:  |   |                                  |                   |
| Município: <b>Campos Novos</b><br>Estado: <b>SC</b>   |   |                                  |                   |
| É com satisfação que apresentamos aos senhores nossa proposta <b>comercial</b> para fornecimento de equipamentos para geração de energia elétrica referentes à Usina acima especificada |   |                                  |                   |
| <b>1. ESCOPO DO FORNECIMENTO:</b>   | Qtde: <b>1</b>  | Unidade(s)                       |                   |
| <b>1) Turbina Hidráulica</b>  | <b>CHF-900-650</b>                                    | Tipo: <b>T.Francis</b>           |                   |
| Potencia no eixo:   | 3430 kW   |                                  |                   |
| Queda Líquida:  | 146,7 mca   |                                  |                   |
| Vazão de Projeto:   | 2,59 m3/seg   |                                  |                   |
| Rotação Turbina   | 900 rpm   |                                  |                   |
| Rendimento da Turbina:  | —   |                                  |                   |
| Cota Máx.(Hs):  | 3,30 m  |                                  |                   |
| Peso Estimado do Conjunto:  | 18,4 Ton.   |                                  |                   |
| <b>2) Itens inclusos no preço do Conjunto:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unidade Hidráulica</li> <li>▪ Valvula Borboleta</li> </ul>                                      |   |                                  |                   |
| <b>3) Serviços de Campo e Transporte</b>  |   |                                  |                   |
| <b>2. PREÇOS:</b>   | Preço Unitário (R\$)                                  | Qtde.                            | Preço Total (R\$) |
| (1 e 2) Conjunto:   | 1.419.743,27  | 1                                | 1.419.743,27      |
| (4) Equipamentos Faturamento Direto   | -   | -                                | -                 |
| (5) Outros Itens:   |   |                                  | -                 |
| (3) Serviços de Campo / Transp. (Descritos abaixo - Item 4):  |   |                                  | 136.828,57        |
| <b>OBS: Descarga dos Equipamentos por conta do Cliente.</b>   |   | <b>Total:</b>                    | 1.556.571,84      |