

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Suelem Aparecida de Oliveira Cursino dos Santos

**TURBINA FRANCIS: ESTUDO DE CASO DE MELHORIA NO
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CAIXA ESPIRAL**

Taubaté – SP

2017

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Suelem Aparecida de Oliveira Cursino dos Santos

**TURBINA FRANCIS: ESTUDO DE CASO DE MELHORIA NO
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CAIXA ESPIRAL**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientadora: Profa. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren

Co-orientador: Prof. Paulo Cesar Corrêa Lindgren

Taubaté – SP

2017

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / Unitau - Biblioteca das Engenharias**

S237t

Santos, Suelem Aparecida de Oliveira Cursino dos
Turbina Francis: estudo de caso de melhoria no processo
de fabricação de caixa espiral. / Suelem Aparecida de Oliveira
Cursino dos Santos. - 2017.

45f. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) –
Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia
Mecânica e Elétrica, 2017

Orientador: Profa. Ma. Maria Regina Hidalgo de Oliveira
Lindgren,

Coorientador: Prof. Me. Paulo Cesar Corrêa Lindgren
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.

1. Otimização. 2. Melhoria. 3. Turbina Francis. 4. Turbinas
hidráulicas. I. Título.

Suelem Aparecida de Oliveira Cursino dos Santos

**TURBINA FRANCIS: ESTUDO DE CASO DE MELHORIA NO PROCESSO DE
FABRICAÇÃO DA CAIXA ESPIRAL**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica do Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade de
Taubaté.

Data: 27/10/2017

Resultado: Aprovada (10,0)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Paulo Cesar Corrêa Lindgren

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Luiz Ricardo Prieto Hercos

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Dedico este trabalho a todos os meus familiares
e amigos que sempre estiveram ao meu lado,
me apoiando em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me guiado e nunca ter me deixado desistir durante as dificuldades.

À minha mãe Maria Divina por estar sempre ao meu lado, me apoiando e me ajudando nesta empreitada.

À minha orientadora Profa. Regina e ao meu co-orientador Prof. Paulo, por todo o empenho e dedicação que eles tem por nós alunos.

Agradeço especialmente ao meu noivo Flávio, a pessoa que mais me apoiou e mais acreditou em mim durante esses longos 5 anos.

RESUMO

As turbinas hidráulicas são máquinas que transformam a energia potencial das águas em energia mecânica, elas são definidas e fabricadas de acordo com as necessidades e as especificações para as quais foram projetadas. São diversos os modelos de turbinas utilizados no mundo, destacando-se entre eles a turbina Francis. Devido ao aumento no número de fabricantes e a concorrência com o mercado globalizado, é possível observar um aumento considerável na busca por melhorias nos processos de fabricação, sendo assim, o objetivo principal deste trabalho de graduação (TG) é o de detalhar o funcionamento e os componentes das turbinas, bem como apresentar um estudo de caso onde foi implementada uma melhoria no processo de fabricação de um componente da Turbina Francis, simplificando e otimizando o método de trabalho com obtenção de um ganho significativo nas horas de processo da fabricação da caixa espiral: um componente que tem o formato de um caracol e a função de distribuir a água igualmente na turbina.

Palavras-chave: Otimização. Melhoria. Turbina Francis. Turbinas Hidráulicas.

ABSTRACT

Hydraulic turbines are machines that transform the potential energy of water into mechanical energy. They are defined and manufactured according to the needs and specifications for which they were designed. There are several models of turbines used in the world, among them the Francis turbine. Due to the increase in the number of manufacturers and the competition with the globalized market, it is possible to observe a considerable increase in the search for improvements in the manufacturing processes, being, therefore, the main objective of this graduation work (TG) is to detail the operation and the components of the turbines, as well as to present a case study where an improvement was made in the manufacturing process of a Francis Turbine component, simplifying and optimizing the work method and obtaining a significant gain in the manufacturing hours of the spiral case, an equipment that has the shape of a snail and the function of distributing water equally in the turbine.

Keywords: Optimization. Improvements. Francis Turbine. Hydraulic Turbines.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Turbinas Francis instaladas no Brasil	20
Tabela 2 - Turbinas Kaplan instaladas no Brasil	22
Tabela 3 - Turbinas Pelton instaladas no Brasil	23
Tabela 4 - Variações de raio.....	39
Tabela 5 - Processo antes da melhoria.....	40
Tabela 6 - Processo pós melhoria.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte.....	15
Figura 2 - Evolução do parque hidrelétrico por região geográfica.....	16
Figura 3 - Expansões decenais do parque hidrelétrico por classe de potência.....	17
Figura 4 - Campo de aplicação de turbinas hidráulicas.....	18
Figura 5 - Turbina Francis.....	20
Figura 6 - Turbina Kaplan.....	21
Figura 7 - Sistema utilizando uma turbina Pelton.....	23
Figura 8 - Caixa Espiral.....	25
Figura 9 - Pré-distribuidor.....	25
Figura 10 - Distribuidor.....	26
Figura 11 - Rotor Francis.....	27
Figura 12 - Esquema de montagem – Turbina Francis.....	28
Figura 13 - Calandras de grandes dimensões.....	29
Figura 14 - Posicionamento da chapa metálica na calandra.....	32
Figura 15 - Verificação do raio da virola com a chapelona.....	33
Figura 16 - Virola posicionada sobre calços nivelados.....	34
Figura 17 - Caldeireira realizando a calibragem dos setores da virola.....	35
Figura 18 - Setores da virola após Calibragem.....	35
Figura 19 - Desalinhamento entre os setores das virolas.....	36
Figura 20 - Protocolo de controle de cordas e diagonais.....	37
Figura 21 - Instalação de um laser na calandra.....	37
Figura 22 - Virola seis posicionada sobre base plana.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivos.....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos.....	13
1.2	Delimitação do Estudo.....	13
1.3	Relevância do Estudo.....	13
1.4	Organização do Trabalho.....	13
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1	Energia.....	15
2.2	Breve História da Geração de Energia Elétrica.....	16
2.3	Turbinas Hidráulicas.....	18
2.3.1	Turbina Francis.....	19
2.3.2	Turbina Kaplan.....	21
2.3.3	Turbina Pelton.....	22
2.3.4	Fabricantes Globais.....	23
2.4	Detalhamento dos Componentes das Turbinas Francis.....	24
2.4.1	Caixa Espiral.....	24
2.4.2	Pré-Distribuidor.....	25
2.4.3	Distribuidor.....	26
2.4.4	Rotor Francis.....	27
2.4.5	Tubo de Sucção.....	28
2.5	Curvamento Mecânico das Chapas – Calandragem.....	29
3	METODOLOGIA.....	30
4	ESTUDO DE CASO ÚNICO.....	32
4.1	Detalhes Construtivos da Caixa Espiral.....	32
4.1.1	Calandragem.....	32
4.1.2	Traçagem e Nivelamento.....	33
4.1.3	Calibragem.....	34
4.2	Problemas Ocorridos no Processo.....	36
4.3	Determinação das Causas Raízes dos Problemas.....	36
4.4	Proposta e implementação das Melhorias.....	37

4.5	Validação do Processo.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
6	CONCLUSÕES.....	42
	REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade tornou-se indispensável para a vida humana, as necessidades durante o processo de desenvolvimento das civilizações, levaram ao grande avanço na geração de energia elétrica.

A energia hidráulica é até hoje uma das fontes de energia limpa e renovável muito utilizada no mundo. Uma das primeiras formas de geração de energia utilizando-se das águas foram as rodas d'água, as quais foram desenvolvidas para auxiliar no trabalho do campo e nas pequenas oficinas.

Devido ao enorme crescimento da população e ao desenvolvimento tecnológico, foi possível desenvolver grandes centrais hidrelétricas, as quais são capazes de abastecer uma parcela significativa do território ao redor de onde são instaladas.

Na atualidade a maior preocupação mundial tem sido desenvolver e melhorar os processos de produção que possam impactar diretamente tanto no desenvolvimento da sociedade, quanto na utilização responsável dos bens naturais e de toda matéria prima.

Contudo, este trabalho foi desenvolvido para apresentar um estudo de caso onde foi implementada uma melhoria no processo de fabricação de um componente de extrema importância para o funcionamento e o desempenho das turbinas hidráulicas, a caixa espiral, um componente que tem o formato de um caracol e a função de distribuir a água igualmente na turbina.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Ampliar o conhecimento dos leitores sobre turbinas hidrelétricas, seu fornecimento e seu processo de fabricação.

1.1.2 Objetivos Específicos

Apresentar detalhes do processo de fabricação de uma turbina Francis, e ilustrar a melhoria aplicada em uma etapa do processo de fabricação com os resultados em termos de “savings” de horas-homem.

1.2 Delimitação do Estudo

Este trabalho de graduação abordará os três tipos usuais de turbinas no Brasil, que são eles: Francis, Kaplan e Pelton. Porém o foco da otimização e melhoria foi aplicado na fabricação das Virolas que compõem a Caixa Espiral, componente da turbina Francis.

1.3 Relevância do Estudo

A relevância deste trabalho reside no compartilhamento de um conhecimento muito específico, referentes aos processos de fabricação de turbinas hidrelétricas, bem como na demonstração de aplicação de métodos relativamente simples e de baixo custo, que possam obter ganhos bastante significativos em termos de “savings” de horas-homem.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, conforme descrição abaixo:

Capítulo 1 – Apresenta a introdução ao tema abordado, o problema, o objetivo geral, específico, delimitação e relevância do estudo;

Capítulo 2 – Apresenta a Revisão Bibliográfica, que aborda os conceitos utilizados no desenvolvimento do trabalho;

Capítulo 3 – Neste capítulo aborda-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento do tema;

Capítulo 4 – Capítulo destinado ao estudo de caso da melhoria implementada;

Capítulo 5 – Apresenta os resultados obtidos e as discussões referentes ao assunto abordado;

Capítulo 6 – Conclusão desta monografia.

2 REVISÃO DA LITERATURA

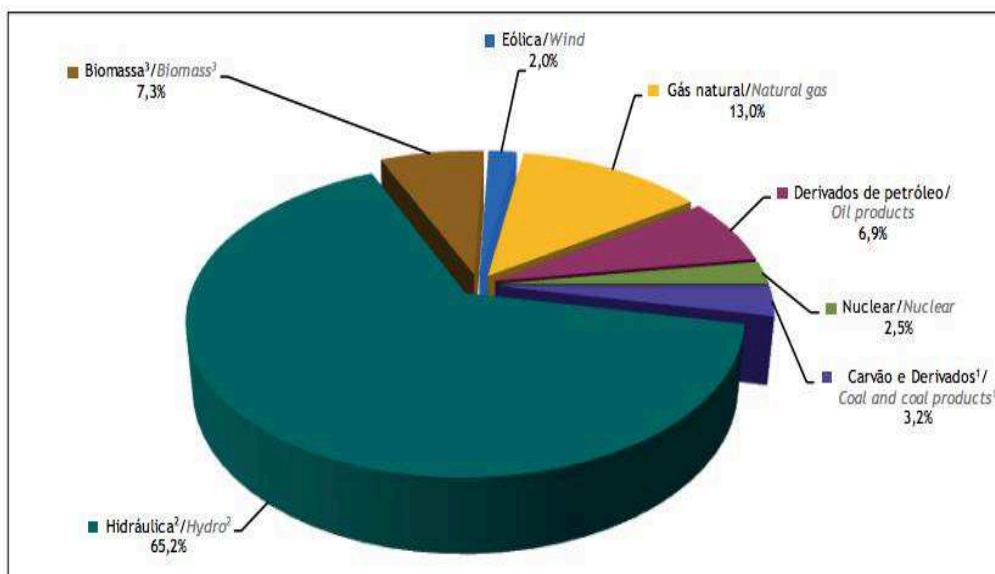
2.1 Energia

A energia tornou-se indispensável a sobrevivência da espécie humana, quando falamos em energia, a eletricidade é uma das suas formas mais versáteis, pois a mesma está sempre em evolução, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países e regiões. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2002, p.1).

De acordo com a EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2016), as fontes de energia se dividem em, fontes de energias renováveis e as não renováveis. Onde as renováveis são as inesgotáveis, pode-se citar a solar e eólica, e as não renováveis são as classificadas como limitadas, como exemplo os combustíveis fósseis.

Embora tenha apresentado uma pequena queda de 3,8% em relação ao ano anterior, a principal fonte de energia elétrica no Brasil continua sendo a hidráulica (BEM, 2016, p.16), como mostra a Figura 1 abaixo:

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte



Fonte: BEM, 2016, p.16

A geração da energia hidráulica é obtida através da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, onde a água é condensada e precipitada sobre a superfície da terra, decorrente da energia do sol e da força da gravidade. O seu potencial energético é consequência do desnível entre volumes de água (queda) o qual é proporcionado pelo relevo da superfície terrestre. (EPE, 2016, p.61)

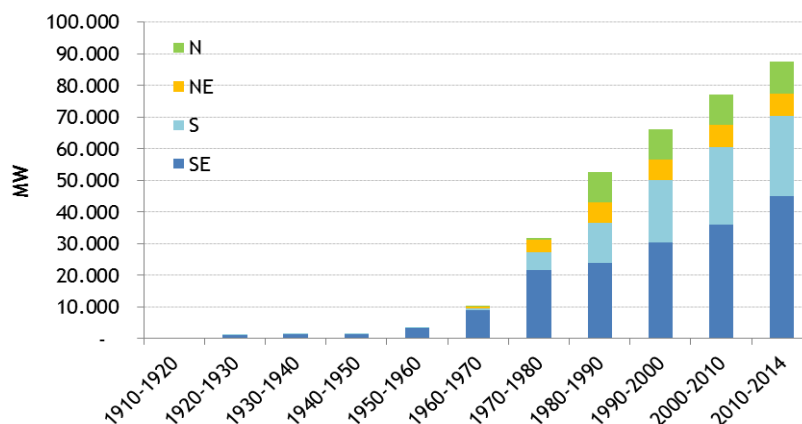
2.2 Breve História da Geração de Energia Hidrelétrica

A geração de energia hidrelétrica tem sido a principal fonte de geração do sistema elétrica brasileiro por várias décadas, isso se dá tanto pela sua competitividade econômica, quanto pela abundância em que encontramos esse recurso disponível a nível nacional e tem a vantagem por ser uma fonte de geração renovável. (EPE, 2016, p.38)

Segundo a ANEEL (2008, p. 53) a primeira usina hidrelétrica do mundo foi construída junto as quedas d'água das Cataratas da Niágara no final do século XIX. Foi nessa mesma época que o Brasil construiu a sua primeira hidrelétrica, em Diamantina, com a potência de 0,5 MW (megawatt) e dois quilômetros de transmissão, utilizando as águas do Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha.

De acordo com a EPE (2016, p.50) as expansões das hidrelétricas ocorreram a partir da década de 1950, conforme Figura 2, quando o governo brasileiro tomou a decisão estratégica de explorar o vasto potencial hidrelétrico do país.

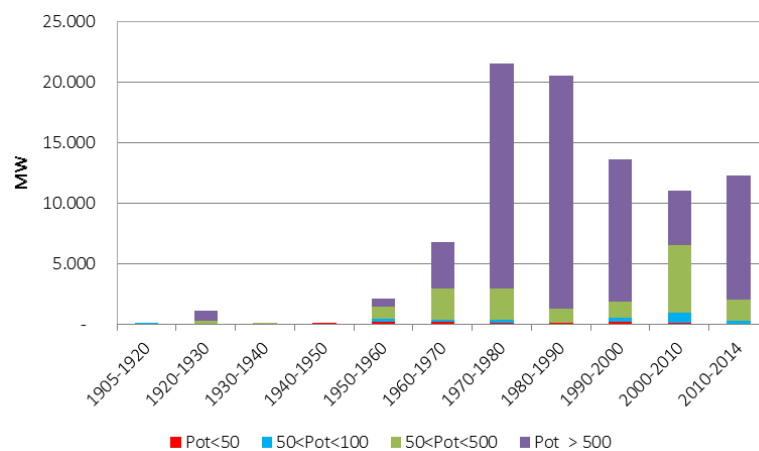
Figura 2 - Evolução do parque hidrelétrico por região geográfica



Fonte: Elaboração EPE, com base em ANEEL (2016) e EPE (2015c)

Estas expansões foram muito significativas na década de 1980, decorrentes dos choques no preço do petróleo, o qual ocorreu na década de 1970, período em que grandes indústrias começaram a se instalar no país. O início da exploração do potencial hidrelétrico da região Norte foi significativo a partir da década de 1980. Estas duas décadas, de grandes expansões, foram marcadas pela construção de usinas hidrelétricas de grande porte, como pode ser observado na Figura 3 (EPE, 2016, p.50).

Figura 3 - Expansões decenais do parque hidrelétrico por classe de potência



Fonte: Elaboração EPE, com base em ANEEL (2016) e EPE (2015c).

Em 2004 foi implementado um novo modelo para o setor hidrelétrico (Leis nº 10.847 e 10.848), com o objetivo de garantir o abastecimento de energia elétrica do país. Onde foi atribuído ao estado o papel de coordenar e introduzir o conceito de leilões competitivos, onde são negociados contratos de compra e venda de energia. Após a implementação deste novo modelo foi possível expandir o parque gerador brasileiro, como a construção de usinas hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau, no rio Madeira, e a usina de Belo Monte, no rio Xingu (a qual encontra-se em fase final de construção). (EPE, 2016, p. 52)

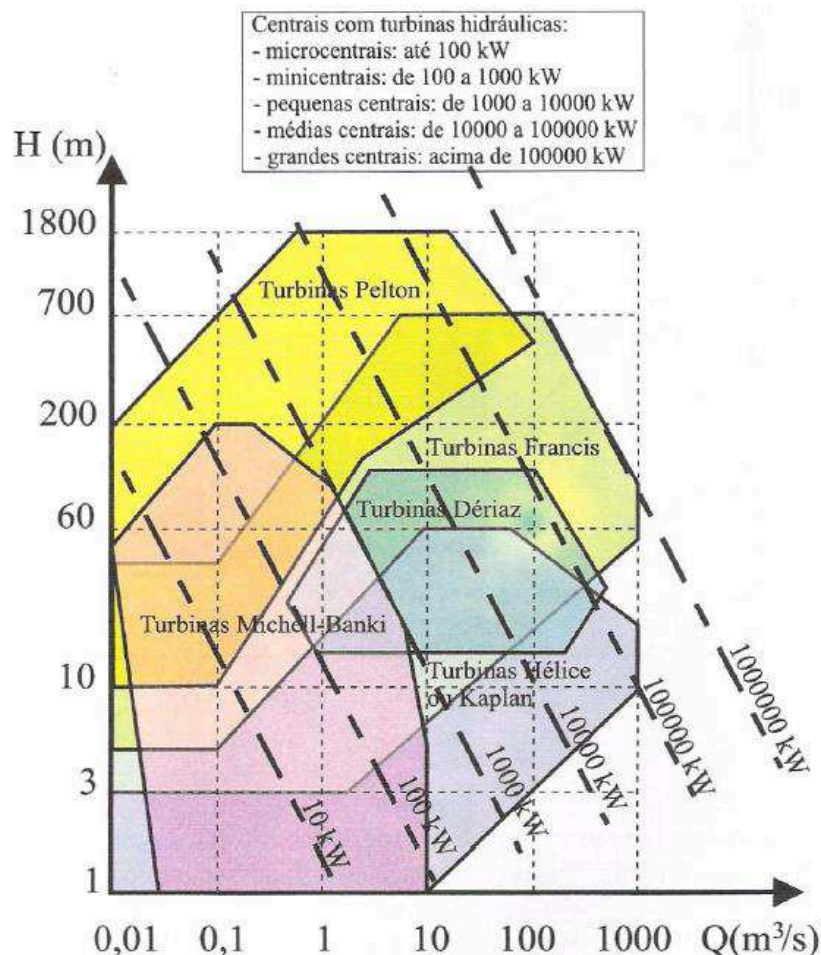
Hoje a maior hidrelétrica em operação do mundo é a binacional Itaipu, construída em parceria entre o Brasil e o Paraguai, a qual apresenta uma potência instalada que pode chegar a 14 mil MW. (ANEEL, 2008, p.53).

2.3 Turbinas Hidráulicas

As turbinas hidráulicas são equipamentos desenvolvidos para transformar a energia de escoamento das águas em trabalho mecânico. Existem diversos modelos de turbinas e cada um deles apresenta um diferencial que o torna aplicável a cada projeto.

Para se determinar o modelo mais adequado de turbina para a instalação, deve se levar em conta os fatores de queda, a vazão e a velocidade de rotação. (HENN, 2006, p. 32), como mostrado à Figura 4:

Figura 4 - Campo de aplicação de turbinas hidráulicas



Fonte: HENN, 2006, p.32

Segundo FUCHS (1983, p. 149, *apud* MUNHOZ e MARQUES, 2015, p. 33) as turbinas hidráulicas podem ser classificadas em:

- Turbinas de ação: são as turbinas que apresentam o sistema rotativo hidromecânico (rotor), onde o trabalho mecânico é obtido através da transformação da energia cinética da água em escoamento. São turbinas do tipo Pelton, as quais podem apresentar eixo vertical ou horizontal e podem ter um ou mais rotores e injetores. É caracterizado pelo fato de o rotor não trabalhar afogado (imerso em água).

- Turbinas de reação: são as turbinas que apresentam o sistema rotativo hidromecânico (rotor), onde o trabalho mecânico é obtido através da transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento. São turbinas do tipo Francis e Kaplan, podem ser de eixo vertical, horizontal ou inclinado, podem ter um ou mais rotores, ser em caixa aberta ou fechada e apresentar o tubo de sucção cônico reto, ou cônico em cotovelo. Neste tipo de turbina o rotor trabalha afogado (imerso na água).

2.3.1 Turbina Francis

A turbina Francis é caracterizada por ser uma turbina de reação, na qual o escoamento se processa a uma pressão inferior a pressão atmosférica. (GOMES, 2010, p. 75).

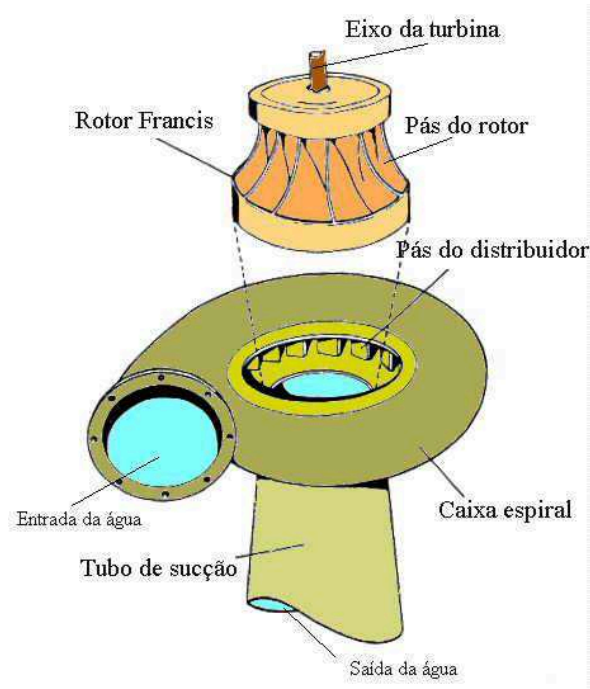
Foi desenvolvida no ano de 1849 por James Bicheno Francis (1815-1892), a sua transformação de energia cinética em mecânica se dá quando o rotor da mesma recebe a água sob pressão na direção radial e a descarrega na direção axial. (MUNHOZ e MARQUES, 2015, p.33). São utilizadas onde se encontram vazões e quedas médias.

São turbinas que podem ser aplicadas em aproveitamentos com quedas entre 600 e 20 m. Nesta turbina, o acionamento é feito pela água aduzida ao rotor através de uma caixa espiral. O fluxo d'água é orientado na direção radial e distribuído igualmente na entrada do rotor, saindo na direção axial. Na caixa espiral tem-se o distribuidor, cuja função é controlar a descarga d'água no rotor. As aletas do distribuidor possuem eixos passantes pela tampa da turbina e ao final destes estão fixadas manivelas ligadas por meio de hastes ao anel do distribuidor, que por sua vez recebe o comando para a regulação do fluxo d'água. É interessante observar que entre as pás são formados

canais d'água em movimento. A água turbinada sai do rotor e passa pelo tubo de sucção, onde tem sua velocidade reduzida a até 2,0 m/s, e depois é restituída ao leito do rio. (HOLDER, 2005, p. 23).

A Figura 5, a seguir, apresenta um sistema utilizando uma turbina Francis:

Figura 5 - Turbina Francis



Fonte: GOMES, 2010, p. 84

Em uma análise sucinta pode-se mensurar as instalações de turbinas Francis no Brasil, conforme Tabela 1:

Tabela 1 - Turbinas Francis instaladas no Brasil

Instalação	H (m)	Q (m ³ /s)	N (CV)	n (rpm)
Itaipu- Rio Paraná	50,8	660	971000	92,3
Furnas- Rio Grande	88,9	190	210000	150
Tucuruí- Rio Tocantins	60,8	576	430000	84

Fonte: SOARES JÚNIOR, 2013, p.14.

2.3.2 Turbina Kaplan

Após estudos teóricos e experimentais, o engenheiro austríaco Victor Kaplan desenvolveu em 1912 um novo conceito de turbina axial, onde o seu rotor apresenta uma forma em Hélice, e possui em suas pás, um sistema de orientação que possibilita uma regulação independente (SANTOS, 2012, p. 35).

Segundo Soares Júnior, 2013, p.12:

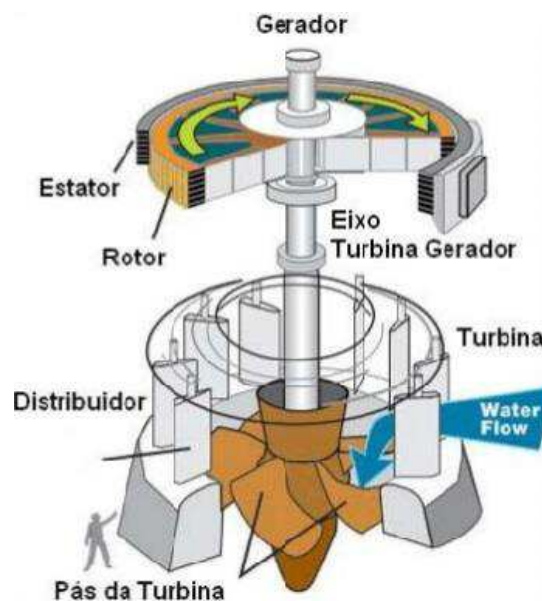
O mecanismo que permite regular o ângulo de inclinação da pá conforme a descarga, sem que ocorra uma variação considerável do rendimento, fica alojado num peça com o formato de uma ogiva e é comandado por um regulador automático de velocidade. Os principais componentes de uma turbina Kaplan são: o distribuidor, suas pás são chamadas de diretrizes, rotor, tubo de sucção e caixa espiral.

As turbinas Kaplan são muito eficientes em aplicações de baixas e medias quedas e com grandes volumes, seu rendimento pode superar 93% (HACKER, 2012).

É considerada uma turbina de reação, instalada em locais de grandes vazões e baixa queda, geralmente apresenta um eixo vertical, porém também pode ter um eixo horizontal (GOMES, 2010, p.77).

A Figura 6, a seguir, apresenta um sistema utilizando uma turbina Kaplan:

Figura 6 - Turbina Kaplan



Fonte: CARVALHO, 2015, p.6

Em uma análise sucinta pode-se mensurar as instalações de turbinas Kaplan no Brasil conforme Tabela 2:

Tabela 2 - Turbinas Kaplan instaladas no Brasil

Instalação	H (m)	Q (m ³ /s)	N (CV)	n (rpm)
Sobradinho- Rio São Francisco	27,2	715	242000	75
Jupiá- Rio Paraná	23	462	140000	78
Cachoeira Dourada- Rio Paranaíba	33,5	307	115490	82
Volta Grande- Rio Grande	26,2	430	140038	85,7

Fonte: SOARES JÚNIOR, 2013, p.13

2.3.3 Turbina Pelton

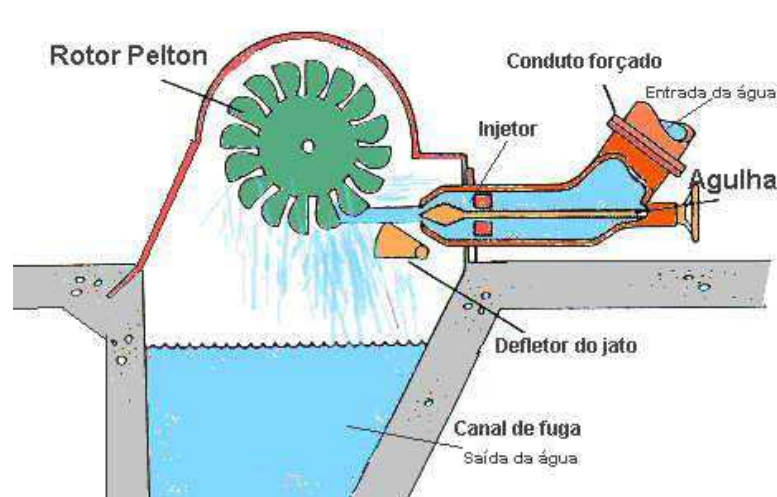
As turbinas Pelton foram desenvolvidas por Lester Allan Pelton, em 1889, e são utilizadas em aproveitamentos que apresentem grandes quedas (100 a 500 m) e baixas vazões, gerando potência de 500 a 12.500kW (INVENTORS, 2004, p. 39, *apud* HOLDER, 2005).

De acordo com Gomes, 2010, p. 82:

São turbinas de ação porque utilizam a velocidade do fluxo de água para provocar o movimento de rotação. Consiste em uma roda circular que na sua periferia possui um conjunto de copos ou concha sobre os quais incide, tangencialmente, o jato de água dirigido por um ou mais injetores distribuídos de forma uniforme na periferia da roda. A potência mecânica fornecida por essas turbinas é regulada pela atuação nas válvulas de agulha dos injetores.

A Figura 7, a seguir, apresenta um sistema utilizando uma turbina Pelton:

Figura 7 - Sistema utilizando uma turbina Pelton



Fonte: GOMES,2010, p.83

Em uma análise sucinta pode-se mensurar as instalações de turbinas Pelton no Brasil conforme Tabela 3:

Tabela 3 - Turbinas Pelton instaladas no Brasil

Instalação	H (m)	Q (m ³ /s)	N (CV)	n (rpm)
Parigot de Souza - Rio Capivari	714,3	10	87200	514
Macabu - Rio Macabu	317	1,3	4480	722
Canastra - Rio Santa Cruz	314,6	10,8	33100	450

Fonte: SOARES JÚNIOR, 2013, p.16:

2.3.4 Fabricantes Globais

Dentre as maiores fabricantes de turbinas hidráulicas no mundo, destacam-se duas que estão inseridas no mercado a mais de um século e ainda continuam contribuindo para o desenvolvimento e crescimento das cidades, sendo elas:

A empresa multinacional Voith (2017):

Há 150 anos que as tecnologias da Voith vêm inspirando clientes, parceiros de negócios e colaboradores no mundo inteiro. Fundada em 1867, a Voith atualmente tem cerca de 19.000 colaboradores, gera €

4,3 bilhões em vendas e opera filiais em mais de 60 países no mundo inteiro, o que a coloca entre as maiores empresas familiares da Europa. Como líder tecnológica, a Voith estabelece padrões nos mercados de energia, petróleo & gás, papel, matérias-primas e transporte & automotivo.

E a também multinacional Alstom (2017):

Alstom é um grupo industrial francês que atua na área de infraestrutura de energia e transporte, presente em dois segmentos: indústria de materiais ferroviários e produção de energia. Presente no Brasil há 60 anos, a Alstom chegou a um momento de transformação em sua estratégia de negócios. A empresa já atuou com geração e transmissão de energia, participando de grandes projetos.

2.4 Detalhamento dos Componentes das Turbinas Francis

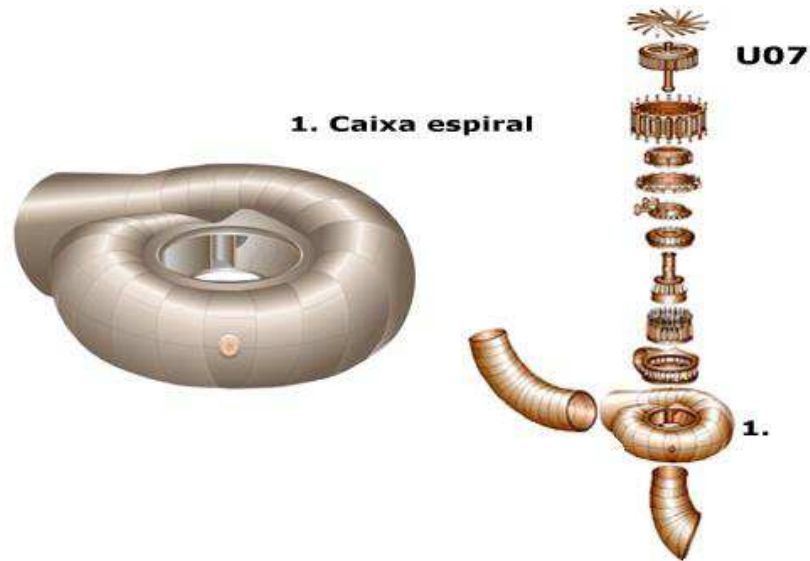
Os principais componentes das Turbinas Francis são: caixa espiral, pré-distribuidor, distribuidor, rotor Francis e tubo de sucção.

2.4.1 Caixa Espiral

A caixa espiral, conforme mostra a Figura 8,

[...] tem um formato de caracol e serve para conduzir a água que chega do sistema de adução para as palhetas fixas do pré-distribuidor e depois para o distribuidor, fluindo de forma contínua para o rotor. O seu formato é tal que conduza o fluxo d'água de forma radial centrípeta e circunferencial para ser convenientemente aproveitado pelo rotor. (SANTOS, 2012, p. 26)

Figura 8 - Caixa Espiral



Fonte: ITAIPÚ, 2017

2.4.2 Pré-Distribuidor

O pré-distribuidor, ilustrado à Figura 9, é empregado em grandes e médias turbinas, sendo soldado à caixa espiral e tendo a função de pré-guiar o escoamento até que ele passe definitivamente pelo distribuidor. (SANTOS, 2012, p. 28)

Figura 9 - Pré-distribuidor

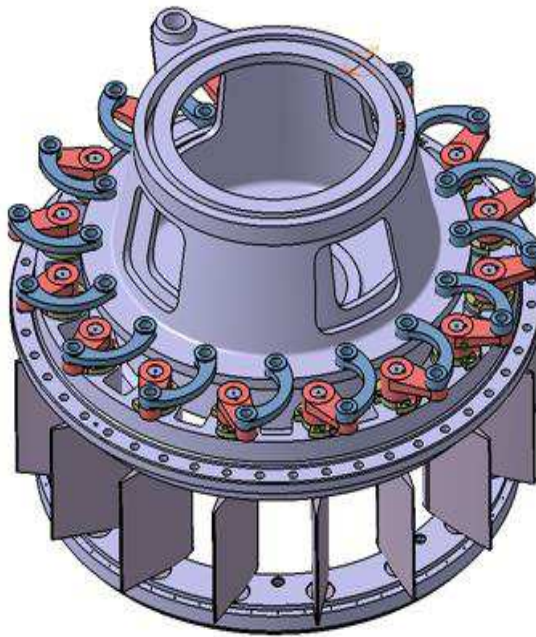


Fonte: NORTE ENERGIA, 2017

2.4.3 Distribuidor

O Distribuidor das turbinas é formado por um conjunto de pás móveis, as quais estão distribuídas em volta do rotor, conforme Figura 10:

Figura 10 - Distribuidor



Fonte: HIDROMONT, 2017

A finalidade do distribuidor é acelerar e direcionar o escoamento de forma conveniente para ser aproveitado pelo rotor. Ele gera o momento angular adequado para girar o rotor. O distribuidor também regula o fluxo d'água ou vazão que passa pelo rotor, e conseqüentemente controla a potência mecânica. No projeto, a posição e perfil das palhetas diretrizes do distribuidor é tal que a incidência do fluxo d'água cause as menores perdas hidráulicas possíveis, aumentando o rendimento da turbina. (SANTOS, 2012, p. 28)

2.4.4 Rotor Francis

O rotor Francis, ilustrado à Figura 11, assim como os demais rotores, é o principal componente das turbinas de mesmo nome. Ele é instalado no centro delas e rodeado pelos outros equipamentos, que existem para auxiliar no seu bom funcionamento.

Figura 11 - Rotor Francis



Fonte: SANTOS, 2012, p. 52

De acordo com Santos (2012, p. 31)

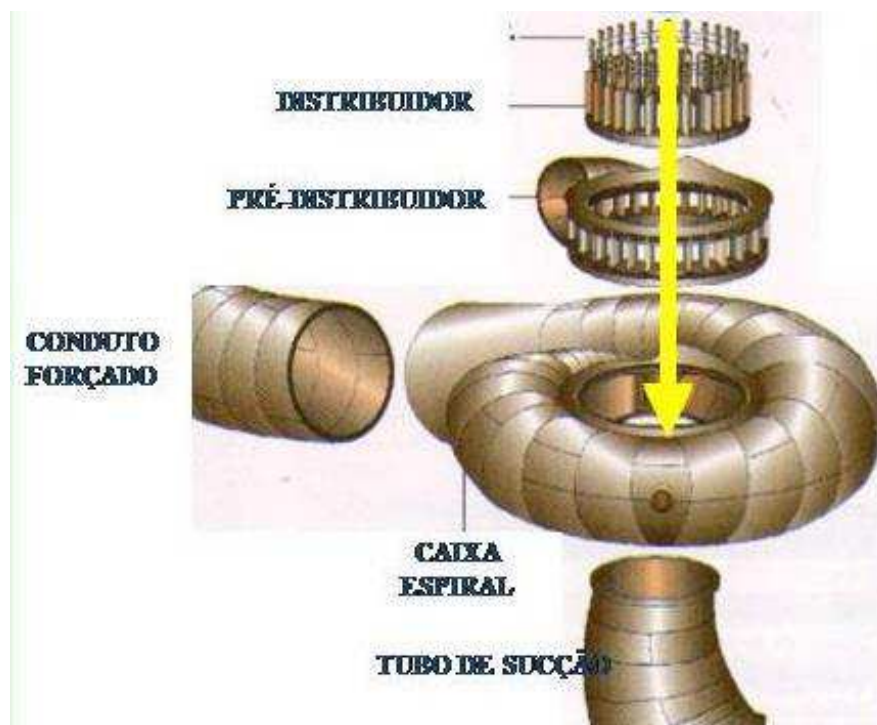
No rotor, o fluxo d'água é defletido pelas suas pás girantes, passando da direção radial diagonal para a direção axial. No distribuidor, parte da energia potencial da água é convertida em energia cinética (gerando a componente de giro). No rotor Francis, assim como nos de outras turbinas de reação, há a continuação dessa conversão de energia potencial em energia cinética para, finalmente, transformar a energia cinética em trabalho mecânico, ou seja, em potência de eixo.

2.4.5 Tubo de Sucção

A função do tubo de sucção, ilustrado à Figura 12, é fazer com que o fluido escoe de forma contínua ao ser liberado para a atmosfera, após passar pelas pás do rotor. Considerando as perdas, sabe-se que nem toda a energia cinética é transformada em mecânica pelo rotor.

O tubo de sucção gera um ganho de potência mecânica, quando recupera parte da energia cinética (não transformada) do fluido para diminuir a pressão estática na saída do rotor. Dessa forma, ele aumenta a diferença de pressão que é operada pela turbina, aumentando assim a sua queda líquida. (SANTOS, 2012, p. 33)

Figura 12 - Esquema de montagem – Turbina Francis



Fonte: USINA HIDRELETRICA TUCURUÍ, 2017

2.5 Curvamento mecânico das chapas – Calandragem

A calandragem é um processo de fabricação por conformação plástica pelo qual se dá forma as chapas de metal, passando-as entre rolos, obtendo assim a curvatura desejada, mantendo a espessura constante e obtendo um acabamento de qualidade. As máquinas utilizadas para realizar essa conformação são chamadas de calandras e as peças que passam por esse processo de transformação chamam-se virolas. (PEREIRA, 2012, p.2)

O tipo de calandra utilizado durante a operação será definido de acordo com o produto que se deseja obter.

Segundo Pereira (2012, p.4), as calandras utilizadas para o curvamento de chapas de grandes dimensões “Têm geralmente três ou quatro rolos. As de três rolos são as mais usadas na indústria e nelas os rolos estão dispostos em formação de pirâmide[...]”, conforme mostrado na Figura 13:

Figura 13 - Calandras de grandes dimensões



Fonte: CALDEMA, 2017

3 METODOLOGIA

As pesquisas exploratórias têm como principal objetivo familiarizar o leitor com o problema, tornando-o mais explícito.

Para Gil (2002, p. 41)

Pode-se dizer que estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. Seu planejamento é, portanto, bastante flexível, de modo que possibilite a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado.

O estudo de caso consiste em um estudo profundo e exaustivo, podendo ser de um ou pouco objetos, para que seja possível obter um amplo e detalhado conhecimento (GIL,2002, p.54)

Segundo Yin (2001, p.42) tem-se cinco componentes de um projeto de pesquisa que são importantes para o estudo de caso:

1. as questões de um estudo;
2. suas proposições, se houver;
3. sua(s) unidade(s) de análise;
4. a lógica que une os dados às proposições; e
5. os critérios para se interpretar as descobertas.

O estudo de caso único segundo Yin (2001, p.62), deriva de três situações:

- representa o caso decisivo, com teorias bem-formuladas, as quais especificam um conjunto claro de proposições e as circunstâncias em que acredita-se que elas sejam verdadeiras.
- representa um caso raro ou extremo, que apresenta uma situação extremamente rara, ocorrida e que ainda não se tem base de dados para comparações.
- representa um caso revelador, situação onde o pesquisador tem a oportunidade de observar e analisar um fenômeno previamente inacessível à investigação científica.

Quanto à sua abordagem, este trabalho apresenta uma pesquisa mista, qualitativa e quantitativa, onde os dados foram coletados durante o processo, para então serem analisados. Do ponto de vista de seus objetivos, trata-se de uma pesquisa exploratória, onde buscou-se explorar o problema então apresentado, na busca por ideias e hipóteses que possam possibilitar um estudo ainda mais detalhado sobre o tema. E o procedimento técnico utilizado foi um estudo de caso único, realizado para esclarecer decisões que foram tomadas durante um processo de fabricação e apresentar os resultados obtidos em termos de *savings* (economias) de horas-homem.

Para validação do processo foram realizadas, após a calandragem, em média, 88 medições equidistantes em todo o perímetro da virola seis, uma peça cujo diâmetro é de cerca de 4m, com a mesma posicionada sobre base plana, para verificar se os raios de entrada e saída atendem as especificações do projeto, o qual exigia uma variação de raio individual de ± 15 mm e raio médio ± 5 mm. Após a validação, foi criada uma tabela com definição de métodos de medições de controle em calandra (cordas para perímetro e cordas para diagonais), utilizando trena e esquadro de raio, com tolerância de ± 7 mm, que asseguram os requisitos dimensionais do projeto, gerando assim o protocolo de controle e registro das dimensões, especificadas para cada virola que compõem o equipamento, apresentadas sobre base plana.

4 ESTUDO DE CASO ÚNICO

4.1 Detalhes construtivos da Caixa Espiral

O processo construtivo da caixa espiral, antes da implementação da melhoria, seguia as seguintes etapas de fabricação: Calandragem, Traçagem e Nivelamento, Calibragem e Inspeção.

4.1.1 Calandragem

No processo de calandragem o operador posiciona a chapa metálica, ainda reta, entre os rolos da calandra e com o auxílio apenas de uma trena ele verifica se a mesma está posicionada corretamente, mantendo o seu alinhamento, conforme Figura 14.

Figura 14 - Posicionamento da chapa metálica na calandra



Fonte: Elaborada pela autora

Após o posicionamento ele inicia-se a calandragem, conformando assim a chapa metálica de acordo com o raio especificado pelo projeto.

Para conferencia deste raio o operador utiliza-se de uma Chapelona, que é um gabarito de raio em chapa metálica, que auxilia o operador, para saber se a curvatura desejada foi atingida, como pode-se observar na Figura 15.

Figura 15 - Verificação do raio da virola com a chapelona



Fonte: Elaborada pela autora

Cada chapelona atende a uma faixa de curvatura, e não um raio específico, o que impossibilita o operador conseguir atingir uma medida de raio ideal durante o processo.

Finalizada a calandragem, o operador retira a virola da calandra, sem realizar qualquer outro método de verificação de raio, e a envia para o setor de caldeiraria onde serão realizadas as próximas etapas de fabricação da mesma.

4.1.2 Traçagem e nivelamento

No setor de caldeiraria os funcionários realizam diversas operações para finalizar e liberar as virolas da caixa espiral, uma a uma.

A primeira etapa é a traçagem da épura, que é a representação gráfica do diâmetro de cada virola, que é realizada no piso do setor. Após essa traçagem é necessário realizar o nivelamento do piso, o qual é feito com a utilização de um Nível a Laser e calços de 50mm, onde os mesmos são posicionados de forma equidistantes para servirem como base dos setores da virola.

Feito isso os setores são posicionados sobre os calços, formando assim as virolas, conforme ilustrado à Figura 16.

Figura16 - Virola posicionada sobre calços nivelados



Fonte: Elaborada pela autora

4.1.3 Calibragem

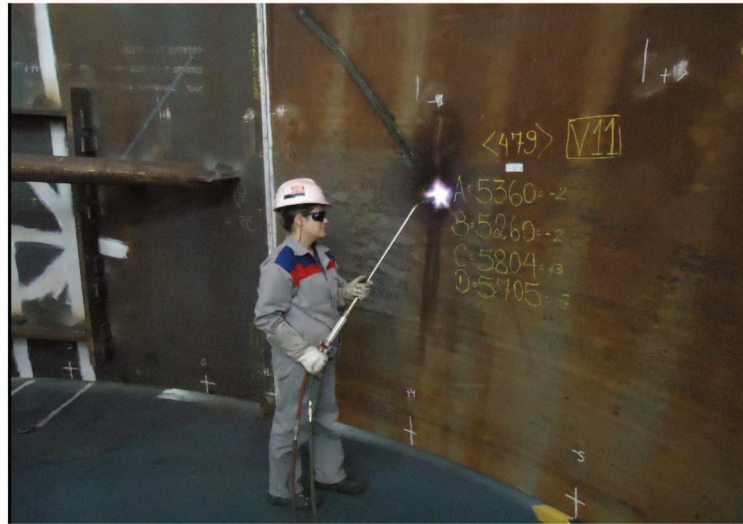
A calibragem de virolas, é uma operação realizada nas indústrias de caldeirarias, e referem-se a conformação a quente das chapas metálicas.

Essa conformação realizada nos setores das virolas da caixa espiral eram necessárias devido à grande deformação das mesmas durante o processo de calandragem, as quais eram enviadas para o setor de caldeiraria com as mediadas de seus raios fora das tolerâncias especificadas de projeto, sendo assim necessário mais esta operação para conseguir atingir as medidas desejadas.

Com isso, após posicionadas sobre os calços, realizava-se a medição dos raios de entrada e saída das peças, onde a entrada refere-se a base da virola, e a saída é a borda superior da mesma.

Após essa medição, era possível o Caldeireiro identificar os piores desvios nos raios, definindo assim a região em que seria necessário realizar a calibragem, como mostrado às Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Caldeireiro realizando a calibragem dos setores da virola



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 18 - Setores da virola após Calibragem



Fonte: Elaborada pela autora

4.2 Problemas Ocorridos no Processo

Os maiores problemas ocorridos no processo são as grandes deformação e torção das chapas após a calandragem, fazendo com que não sejam atingidas as tolerâncias de raios especificadas pelo projeto.

Os mesmos geravam um grande desalinhamento entre os setores das virolas, durante a sua montagem (Figura 19), necessitando assim de muitas horas de calibragem para se corrigir estes problemas e atender as medidas de raios desejadas.

Figura 19 - Desalinhamento entre os setores das virolas



Fonte: Elaborada pela autora

4.3 Determinação das Causas-Raízes dos Problemas

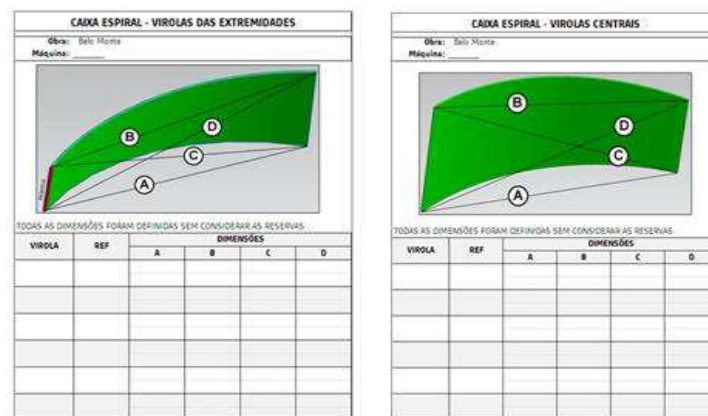
O desalinhamento da chapa durante o processo de calandragem foi identificado como a maior causa da deformação e da torção das mesmas, visto que durante a calandragem elas deslizavam entre os rolos, e não era possível o operador identificar se elas ainda estavam posicionadas corretamente.

Além disso, havia a falta de métodos de medições mais eficientes, que possibilitassem a obtenção e a conferência das medidas exatas.

4.4 Proposta e Implantação das Melhorias

Para melhorar o processo foram desenvolvidos protocolos de controle de cordas e diagonais, ilustrados à Figura 20, que apresentam as cotas determinadas para cada setor das virolas, que possibilitaram a medição e um maior controle durante a calandragem.

Figura 20 - Protocolo de Controle de Cordas e Diagonais



Fonte: Elaborada pela autora

Para garantir o alinhamento da chapa durante a calandragem foi instalado um apontador a laser na base da calandra, conforme Figura 21.

Figura 21 - Instalação de um laser na Calandra



Fonte: Elaborada pela autora

4.5 Validação do Processo

Para validação do processo, após a calandragem realizada com o auxílio do apontador laser, e após as medições das cordas e diagonais, onde foi possível identificar que o raio da peça estava conforme o projeto, os setores da virola seis, peça cujo diâmetro mede cerca de quatro metros, foram enviados à caldeiraria. A mesma foi posicionada em sua éपुरa, nivelada, e montada, onde realizaram-se, em média, 88 medições equidistantes em todo o seu perímetro, como ilustrado à Figura 22.

As medições foram realizadas para verificar e confirmar se os raios de entrada e saída da virola atendiam as especificações do projeto, o qual exigia uma variação de raio individual de ± 15 mm e raio médio ± 5 mm.

Figura 22 - Virola seis posicionada sobre base plana



Fonte: Elaborada pela autora

Após a montagem, foi realizada uma análise técnica entre operadores, inspetores de qualidade e diretoria da empresa, onde o resultado foi apresentado e as medidas foram registradas em uma tabela de variação do raio, ilustrada à Figura 23, a qual foi apresentada para o cliente da obra, para aprovação do processo.

Esse procedimento se repetiu nas cinco virolas seguintes, fabricadas posteriormente a esta, onde foi possível comprovar a eficiência do processo e então o mesmo foi validado, eliminando-se, conseqüentemente, a fase de montagem das virolas da caixa espiral, que era realizada no setor de caldeiraria, limitando-o apenas aos processos de calandragem e inspeção.

Tabela 4 - Variações de raio

VARIAÇÕES DO RAIOS (REAL x TEÓRICO)											
RAIO MIN	RAIO MÁX	Entrada					Saída				
		451	452	453	454	455	451	452	453	454	455
-15	12	0	-2	-3	9	7	2	0	12	-9	-15
		4	-7	-4	7	10	7	-5	-1	-9	-9
		6	-8	-6	9	10	9	-3	-7	-9	-3
		3	-8	0	11	11	9	-2	-10	-6	-1
		5	-4	-5	-1	11	8	2	-9	-11	-8
		3	-2	-7	-7	11	-1	4	-9	-13	-12
		0	-2	-2	-3	10	-8	3	-4	-7	-15
		-2	-2				-14	1	5	3	
			-4					1			
				2,38	-4,33	-3,86	3,57	10,00	1,50	0,11	-2,88
RAIO MÉDIO		1,26					-3,35				

Fonte: Elaborada pela autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A melhoria implementada no processo de fabricação da caixa espiral permitiu, após as medições, que as 32 virolas que integram este componente não fossem mais pré-montadas em fábrica, reduzindo-se significativamente o tempo (*lead time*) de produção.

No processo anterior eram empregadas 100 horas por virola, totalizando 3.200 horas destinadas à pré-montagem, realizada por três operadores, totalizando um custo de R\$ 565.120,00. Conforme mostra a Figura 24:

Tabela 5: Processo antes da Melhoria

PROCESSO ANTES DA MELHORIA	
Número de Virolas:	32
Horas/Virola	100
Total de Horas - Montagem	3.200
Número de Operadores	3
Custo Total - Horas Homem	R\$ 565.120,00

Fonte: Elaborada pela autora

Após a melhoria, eliminou-se a pré-montagem e passou-se a empregar 13,5 horas por virola, totalizando 624 horas destinadas apenas ao controle dimensional, o qual passou a ser realizado somente por dois operadores, com um custo de R\$ 110.198,40. Figura 25:

Tabela 6: Processo pós Melhoria

PROCESSO PÓS MELHORIA	
Número de Virolas:	32
Horas/Virola	13,5
Total de Horas - Controle Dimensional	624
Número de Operadores	2
Custo Total - Horas Homem	R\$ 110.198,40

Fonte: Elaborada pela autora

Foi registrado um ganho de aproximadamente 80,5% em horas x custos de produção, com uma economia de R\$ 454.921,60 por máquina.

A melhoria foi replicada para as quatro obras fabricadas posteriormente à esta, o que gerou um ganho total de R\$ 1.819.686,40, reduzindo-se o tempo de fabricação das caixas espirais de 24 para 10 meses.

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que a correta tomada de decisão pode atender a um objetivo de grande importância, como produtividade x custos, em um processo de fabricação.

A integração entre operadores, inspetores de qualidade e coordenadores foi de suma importância para a identificação da causa raiz dos problemas durante o processo de fabricação, bem como para a determinação do plano de ação e conseqüentemente para a obtenção dos resultados.

Observou-se que um ganho operacional independe do investimento realizado, onde se é possível, com o comprometimento e empenho de toda a equipe, atingir um lucro representativo para a organização, oriundo de uma simples mudança no processo, a qual não demandou investimentos expressivos.

A definição do Plano de Ação baseou-se em análises qualitativas e quantitativas no atendimento das metas, contemplando assim a melhoria na conformação das virolas da caixa espiral.

Além de significativa redução dos custos e do *lead time*, um dos impactos mais importantes observados foi a mudança do fluxo do processo após a implementação das mudanças operacionais, onde não há mais a necessidade de montagem e calibragem do conjunto sobre o traçado que era feito no piso do setor de caldeiraria, implicando em inúmeras melhorias, tais como, de deslocamento e segurança dos operadores durante o transporte das peças de um setor para o outro, disponibilidade de um espaço físico representativo para a empresa, onde a mesma pode fabricar outros componentes em paralelo a este e também disponibilidade de mão de obra para a realização de outras atividades dentro da organização.

Contudo pode-se observar a grande importância de se estudar e analisar os processos de produção, os quais muitas vezes são arcaicos e não acompanharam a evolução da tecnologia. E de implementar melhorias dentro das empresas, para que as mesmas consigam se manter neste mercado globalizado e se tornarem cada vez mais competitivas e lucrativas.

REFERÊNCIAS

- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2002. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>> Acesso em: 17 de abril de 2017.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008. 233 p
- BEM – BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório Final**. 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>> Acesso em: 17 de abril de 2017.
- CALDEMA, **Calandras de grandes dimensões**. Disponível em: <www.caldema.com.br>. Aceso em 22 de Maio de 2017, 20:30.
- CARVALHO, Paulo. **Estudo técnico e econômico comparativo entre a utilização de hidrogeradores verticais acionados por turbinas kaplan e hidrogeradores acoplados a turbina kaplan bulbo**. 2015. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2015. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/caioribeiro188/seminrio-produo-de-energ-tipos-de-turbinas-kaplan>>. Acesso em: 18 ago. 2017.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Energia renovável hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. 2016 Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>> Acesso em: 23 de abril de 2017
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisas**. São Paulo: Atlas, 2002.
- GOMES, Carla da Gama Soares. **Noções de geração de energia utilizando algumas fontes de baixo impacto ambiental**. 2010. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenheiro Eletricista, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2010. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000781.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2017.
- GRUPO ALSTOM. Disponível em: <<http://www.alstom.com/pt/brazil/>> Acesso em: 20 ago. 2017.
- HACKER. **Turbinas Hidráulicas: Turbinas Kaplan**. 2012. Disponível em: <http://www.hacker.ind.br/produtos_turbinas_kaplan_turbinas.php>. Acesso em: 20 ago. 2017
- HENN, Érico Lopes. **Máquinas de fluido**. 2ª. ed. Santa Maria: UFSM, 2006. 474p
- HIDROMONTE. Disponível em: <<http://hidromont.es/c-h-aguilar-palencia/>> Acesso em: 20 ago. 2017.

HOLDER, Robinson Percy. **Grupos Geradores Utilizando Bomba Funcionando Como Turbina: Um Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica.** 2005. 140 f. Monografia (Especialização) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/464M.PDF>>. Acesso em: 25 jun. 2017.

ITAIPÚ. Disponível em: <<http://jie.itaipu.gov.br/node/39047>> Acesso em: 20 ago. 2017.

MERIGUE, Rafael; SILVA, Ricardo Salomé. **Estudo de turbinas para hidrelétrica de Roncador – Bocaiúva do Sul.** 2013. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2013. Disponível em: <http://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2011_2_25/2011_2_25_proposta.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2017.

MUNHOZ, Guilherme Pawlak; MARQUES, Thiago. **Estudo de turbina para implantação em uma central hidrelétrica.** 2015. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Elétrica - Ênfase Eletrotécnica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3891/1/CT_COELE_2014_2_16.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2017.

NORTE ENERGIA. Disponível em: <<http://norteenergiasa.com.br/site/2015/06/12/-pre-distribuidor-na-5a-unidade-geradora/pre-distribuidor/>> Acesso em: 20 ago. 2017.

PEREIRA, Alexandre Miguel Ramos. **Processo de Fabricação Calandragem.** 2012. 14 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Industrial, Instituto Superior Dom Dinis, Marinha Grande, 2012. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/100064762/Calandragem>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

SANTOS, Marcell Silva Carvalho dos. **Modelagem Dinâmica de Turbinas Hidráulicas Axiais de Dupla Regulagem para Estudos de Estabilidade Angular Transitória em Sistemas Elétricos de Potência.** 2012. 192 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0041513.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2017.

SOARES JÚNIOR, Ricardo Luiz. **Projeto conceitual de uma turbina hidráulica a ser utilizada na usina hidrelétrica externa de Henry Borden.** 2013. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005429.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

USINA HIDRELETRICA TUCURUI. Disponível em: <http://cidadedetucurui.com/inicio/usina_hidreletrica_tucurui/USINA_HIDRELETRICA_TUCURUI.htm> Acesso em: 20 ago. 2017.

VOITH. Disponível em: <<http://voith.com/br/o-grupo-90.html>> Acesso em: 20 ago. 2017.

YIN, Robert K. Estudo de caso: Planejamento e Métodos. Trad. Daniel Grassi. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.