

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ALEXANDRE RODRIGUES RIBAS

**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DA PÁ DE UMA TURBINA
HIDRÁULICA DO TIPO PELTON EM RELAÇÃO À POTÊNCIA MECÂNICA NO
EIXO**

**Bagé
2015**

ALEXANDRE RODRIGUES RIBAS

**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DA PÁ DE UMA TURBINA
HIDRÁULICA DO TIPO PELTON EM RELAÇÃO À POTÊNCIA MECÂNICA NO
EIXO**

Trabalho de conclusão de curso II apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Prof Dr Marcelo Romero de Moraes

**Bagé
2015**

ALEXANDRE RODRIGUES RIBAS

**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DA PÁ DE UMA TURBINA
HIDRÁULICA DO TIPO PELTON EM RELAÇÃO À POTÊNCIA MECÂNICA NO
EIXO**

Trabalho de conclusão de curso II apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Prof Dr Marcelo Romero de Moraes

Trabalho de Conclusão de Curso II defendido e aprovado em: 14/12/2015.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes
Orientador/UNIPAMPA

Prof^a. Dr^a. Sabrina Neves da Silva
Membro da banca examinadora/UNIPAMPA

Prof. Dr. Helvio Rech
Membro da banca examinadora/UNIPAMPA

R482a Ribas, Alexandre Rodrigues

Avaliação da alteração do ângulo da pá de uma turbina hidráulica do tipo Pelton em relação à potência mecânica no eixo / Alexandre Rodrigues Ribas.

68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E AMBIENTE, 2015.

"Orientação: Marcelo Romero de Moraes".

1. Pá. 2. Ângulo. 3. Potência. 4. Turbina Pelton. I. Título.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia hidrelétrica entre 1988 até 2013 em Mtoe.	16
Figura 2 - Matriz energética brasileira.	18
Figura 3 - Diagramas esquemáticos de turbinas hidráulicas típicas.	24
Figura 4 - Turbina Francis.	26
Figura 5 - Turbina Kaplan.	27
Figura 6 - Turbina Pelton.	29
Figura 7 - Projeto de uma pá de turbina tipo Pelton.	31
Figura 8 - Perfil da pá de uma turbina Pelton.	31
Figura 9 - Pá de uma turbina Pelton.	32
Figura 10 - Diagrama de velocidade em uma pá de turbina Pelton.	34
Figura 11 - Sistema Injetor com defletor inoperante.	36
Figura 12 - Sistema Injetor – Defletor operante.	37
Figura 13 - Microcontrolador Arduino Uno.	38
Figura 14 - Fluxograma do processo realizado no presente trabalho.	41
Figura 15 – Pá projetada no SolidWorks.	45
Figura 16 - Pá - Vista Superior.	45
Figura 17 - Pá - Vista Lateral.	46
Figura 18 - Pá - Vista Inferior - com as conchas flexionadas.	46
Figura 19 - Pá - Vista Inferior.	47
Figura 20 - Algoritmo de movimentação do motor de passo comentado.	47
Figura 21 - Esquema de ligação motor de passo/microcontrolador Arduino/driver.	50
Figura 22 - Sistema eletromecânico projetado.	50
Figura 23 - Sistema eletromecânico conectado na pá.	51
Figura 24 - Retirada das pás para uso do rotor.	52
Figura 25 - Rotor imobilizado conectado ao conjunto rolamento/placa de inox.	53
Figura 26 - Conjunto eixo/pá conectado ao rotor imobilizado.	53
Figura 27 - Sistema manual.	54
Figura 28 - Sistema manual - Vista superior.	54
Figura 29 - Pá com parafusos adicionados para regulagem de inclinação das conchas.	56
Figura 30 - Rotina em <i>software</i> Matlab para obtenção das potências e plotagem de gráficos.	58
Figura 31 - Relação entre rotação do eixo da pá e ângulo de inclinação de cada concha da pá referente aos ensaios 1 e 2.	60
Figura 32 - Relação entre rotação do eixo e ângulo de inclinação de cada concha da pá, referente as velocidades médias.	60
Figura 33 - Relação entre potência mecânica do eixo e ângulo de inclinação de cada concha da pá, referente aos ensaios 1 e 2.	61
Figura 34 - Relação entre potência mecânica do eixo e ângulo de inclinação de cada concha da pá, referente às potências médias.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz Energética Brasileira subdividida por empreendimentos em operação.	18
Tabela 2 - Cinco países com maiores potências instaladas em energia hidrelétrica do mundo.	19
Tabela 3 - Classificação das centrais hidrelétricas quanto à potência e quanto à queda de projeto.	21
Tabela 4 – Cinco pequenas centrais hidrelétricas com maior potência instalada no Rio Grande do Sul.	22
Tabela 5 - Modelos de Placa Arduino.	39
Tabela 6 – Especificações do Arduino Uno.	40
Tabela 7 - Lista de componentes e equipamentos utilizados.	42
Tabela 8 - Resultado da pesquisa de preço dos materiais do projeto	43
Tabela 9 - Dimensões da pá projetada.	57
Tabela 10 - Rotação obtida com sistema manual em relação à alteração do ângulo de cada concha da pá, em graus.	58
Tabela 11 – Potência mecânica obtida com sistema manual em relação à alteração do ângulo de cada concha da pá, em graus.	59

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
BP	-	<i>British Petroleum</i>
CGH	-	Central de Geração Hidrelétrica
CW	-	Sentido horário (<i>Clockwise</i>)
CCC	-	Conta de Consumo de Combustíveis Fósseis
EOL	-	Central de Geração Eólica
ELETROBRAS	-	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
NOS	-	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	-	Pequena Central Hidrelétrica
PIB	-	Produto Interno Bruto
PWM	-	Modulação por Largura de Pulso
UFV	-	Unidade Geradora Fotovoltaica
UHE	-	Usina Hidrelétrica
UTE	-	Usina Termelétrica
UTN	-	Usina Termonuclear

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	14
1.1.1 Objetivo Geral.....	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
1.2 Justificativa.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Energia Hidrelétrica.....	15
2.2 Hidrelétricas: O Brasil no cenário mundial.....	16
2.3 Pequenas e Micro Centrais Hidrelétricas.....	19
2.3.1 Pequenas Centrais Hidrelétricas no Rio Grande do Sul.....	21
2.4 Máquinas de Fluido.....	22
2.4.1 Tipos principais.....	23
2.5 Turbinas hidráulicas.....	24
2.5.1 Turbinas Francis.....	25
2.5.2 Turbinas Kaplan.....	26
2.6 Turbina Hidráulica do Tipo Pelton.....	27
2.6.1 Partes componentes de uma turbina Pelton.....	29
2.6.1.1 Rotor.....	29
2.6.1.2 Análise das Pás de Turbina Pelton.....	30
2.6.1.3 Diagrama de velocidade da concha.....	33
2.6.1.4 Sistema Injetor.....	35
2.7 Microcontrolador Arduino.....	37
3 METODOLOGIA.....	41
3.1 Início do Projeto.....	41
3.2 Escolha do lugar para realização do estudo, montagem e ensaios.....	42
3.3 Listagem de equipamentos e materiais a serem utilizados.....	42
3.4 Pesquisa de preço dos equipamentos e materiais.....	43
3.5 Compra dos equipamentos e materiais.....	43
3.6 Projeto e Construção da Pá.....	44
3.7 Implementação e teste do algoritmo.....	47
3.8 Montagem do sistema eletromecânico.....	49

3.9 Fixação do sistema eletromecânico na pá.....	51
3.10 Ensaios.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
5 CONCLUSÃO.....	64
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

RESUMO

Em Pequenas Centrais Hidrelétricas, a turbina hidráulica do tipo Pelton é amplamente utilizada quando se trata de conversão de energia. Por isso, é de grande valia toda e qualquer melhoria da turbina visando o aumento da extração de potência, facilitando assim o acesso à conversão de energia com o mesmo investimento. O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência da variação do ângulo das conchas da pá de uma turbina Pelton em relação à potência no eixo que a pá está conectado. Alguns aspectos relevantes foram abordados para a realização deste projeto, tais como *design* diferenciado da pá, pesquisa de preço visando menor preço de produção, projeto de um sistema eletrônico para variação do ângulo das conchas da pá e a utilização de dispositivos eletrônicos de fácil acesso. Foram apresentadas todas as etapas do processo, desde a escolha do melhor lugar para a construção, projeto da pá, projeto do sistema eletrônico até a geração de potência final da turbina utilizando a pá projetada aliada ao sistema eletrônico. Após a realização dos ensaios, pôde ser observado que a variação da inclinação das conchas da pá implica na variação da potência mecânica resultante do eixo da pá, tendo como ângulo ótimo 15° de inclinação, em cada pá referente à potência mecânica média de 0,27805 W. Com base nisso, entende-se que a variação do ângulo das conchas da pá de turbinas hidráulicas do tipo Pelton vem a ser uma boa alternativa para obtenção de maior potência mecânica no eixo, mantendo a mesma vazão e torque.

Palavras-chave: Pá. Ângulo. Potência. Turbina Pelton.

ABSTRACT

In small hydro power plants, Pelton hydraulic turbine is largely used to energy conversion. Therefore, it is very significant any improve of this turbine to obtain more power, increasing the access to energy conversion with the same investment. The main objective of this study is shows the influence of angle variation of blade's buckets to mechanic power extracted from blade's pivot. Some interesting aspects was studied to conclude this project, as a blade's different design, price research to find the lower cost to production, project of an electronic system to blade angle variation and uses largest access electronics devices of largest access. All steps of process can be seen in this study, since the choice of the best place to make and project this kind of Pelton's blade until the final power generation. All tests show that changes blades angle results in mechanical power variation. Using an angle near to 15° was it possible measure 0.27805 W, relative to mechanical power. Therefore, it is possible to realize that blades angle variation in hydraulics turbines Pelton can be an alternative to obtain more mechanical power using the same torque and water flow rate.

Keywords: Blade. Angle. Power. Pelton Turbine.

1 INTRODUÇÃO

As turbinas hidráulicas do tipo Pelton tem grande importância na obtenção de energia, utilizando como fonte primária um fluido. Energia esta que pode ser convertida em energia elétrica ou aproveitada como trabalho em um sistema mecânico. Por conta disso, um estudo visando o aumento da obtenção de potência da pá de uma turbina hidráulica do tipo Pelton se torna necessário a fim de obter-se cada vez mais energia e reduzir as perdas (ALDABÓ, 2002).

Com o aumento na obtenção de potência sem um aumento considerável do custo, os sistemas que dependem de energia oriunda de turbinas hidráulicas do tipo Pelton, tais como Grandes, Médias, Pequenas e Micro Centrais Hidrelétricas, terão aumento da obtenção de energia com o mesmo fluxo de água na entrada das turbinas, acarretando em maior aproveitamento da água confinada em uma barragem ou água corrente de um rio.

A análise de variação de velocidade e potência da pá de uma turbina Pelton em relação ao ângulo de inclinação das conchas da pá se faz necessário e não é apresentado na grande maioria dos estudos. Com a melhoria na pá, haverá uma melhoria na turbina e no sistema como um todo, aumentando assim a potência mecânica da turbina e reduzindo os custos para o empreendedor.

O presente trabalho foi subdividido em seis capítulos: O Capítulo 1 apresenta a Introdução, onde serão expostos de forma mais abrangente o que é proposto pelo trabalho e os motivos pelos quais este tema foi escolhido, bem como o objetivo geral, os objetivos específicos e a justificativa.

O Capítulo 2 trata do Referencial Teórico. Nele serão apresentados tópicos relacionados ao tema que serão subdivididos em seis (6) tópicos: Energia Hidrelétrica; Hidrelétricas: O Brasil no cenário mundial; Pequenas e Micro Centrais Hidrelétricas; Turbinas Hidráulicas, Turbina Pelton e Microcontrolador Arduino. O Capítulo 3 tem como objetivo a construção do sistema eletromecânico. Serão explicitadas as etapas de funcionamento e montagem do sistema eletromecânico, bem como o algoritmo implementado para interação dos componentes.

No Capítulo 4 estão expostos os resultados obtidos, onde foram descritos os resultados dos ensaios, evidenciando a variação de potência mecânica e da velocidade da pá, ambos em relação à alteração do ângulo das conchas da pá. Os resultados foram discutidos, através da análise dos perfis de velocidade e potência obtidos indicando as razões que levaram a estes

resultados. Serão também abordadas as possíveis fontes de erro presente na obtenção dos resultados e nos sistemas eletrônico e manual.

No Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões e no Capítulo 6 serão abordadas sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema deste trabalho.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a variação de velocidade e potência no eixo conectado a pá em relação a alteração do ângulo de cada concha da pá e projetar um sistema eletromecânico que tem por finalidade alterar o ângulo da pá de uma turbina hidráulica do tipo Pelton.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Utilizar um algoritmo em Arduino para o projeto do sistema eletromecânico;
- b) Projetar o novo *design* da pá;
- c) Pesquisa de preços de produção.

1.2 Justificativa

A grande capacidade hidrelétrica brasileira tem sido bastante explorada principalmente nos últimos 30 anos. A matriz energética brasileira é bastante ampla, havendo um predomínio do uso de energia hidrelétrica devido ao seu estudo altamente desenvolvido e grande obtenção de energia elétrica. Objetivando a obtenção de energia hidráulica para, posteriormente, obter energia elétrica são utilizadas turbinas hidráulicas. Estas turbinas são usadas em larga escala e sua aplicação varia desde uma grande usina hidrelétrica, que pode ter potência instalada maior de 50 MW, até uma microcentral hidrelétrica com até 100 kW de potência instalada. As turbinas hidráulicas mais utilizadas são do tipo Pelton, do tipo Francis e do tipo Kaplan. Com melhorias nas pás da turbina Pelton em relação a potência mecânica, poderemos obter maior produção de energia elétrica com a mesma usina hidrelétrica já instalada mas com alterações nos componentes elétricos da mesma. Com as melhorias nas pás, as turbinas podem obter um rendimento maior, menor custo de manutenção, tornando assim, o uso da energia renovável acessível para todos que as utilizam direta e/ou indiretamente (ELETROBRAS, 2008).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a revisão teórica do trabalho, onde serão abordados os seguintes tópicos:

- Energia Hidrelétrica;
- Hidrelétricas: O Brasil no cenário mundial;
- Pequenas e Micro Centrais Hidrelétricas;
- Turbinas Hidráulicas;
- Análise de uma Pá de Turbina Pelton;
- Microcontrolador Arduino.

2.1 Energia Hidrelétrica

A geração de energia hidrelétrica desempenha importante papel no mundo, sendo considerada a energia gerada por um potencial hidráulico de rios, ou queda de água artificial ou natural, que promove o movimento das águas. Durante muitos anos, a força da água tem sido utilizada para afazeres como moer grãos, serrar madeira e etc. Rodas d'água já eram utilizados pelos gregos em 80 a.C.. A água e o vento eram as fontes de energia mecânica disponível até o surgimento do motor a vapor no século XIX (AGAR; RASI, 2008; ALDABÓ, 2002; HINRICHS *et al.*, 2011; SANTOS, 2011).

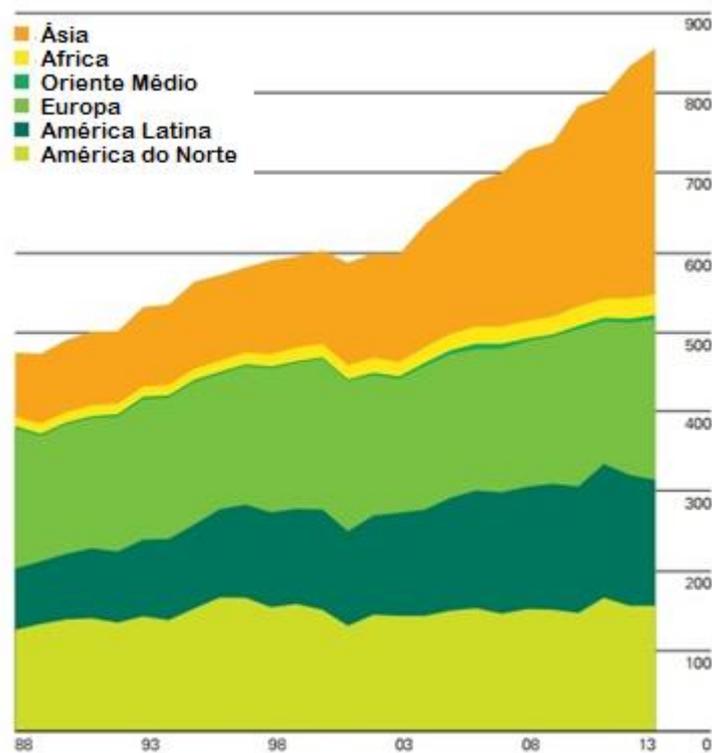
O século XIX foi marcado por outra grande descoberta: o gerador elétrico, sendo a energia das águas utilizada para alimentar estes geradores. A energia hidráulica converte energia potencial em energia cinética, devido às mudanças de elevação. Quando o rio não apresenta uma grande diferença de elevação é comumente usado em barragens ou represas, ajustando-se facilmente a vazão para atender as necessidades do homem (ALDABÓ, 2002; HINRICHS *et al.*, 2011).

A primeira usina hidrelétrica construída nos Estados Unidos localizava-se em Appleton, Wisconsin, em 1882. O gerador produziu, basicamente, corrente contínua para as indústrias locais. A maior usina hidrelétrica atualmente em operação no mundo é a Represa das Três Gargantas na China, localizada no Rio Yangtzé, com uma capacidade de 18.600

MW. Esta represa tem 2,3 km de largura, 185 m de altura e tem um reservatório com 625 km de comprimento (ALDABÓ, 2002; FOX, 2006; HENN, 2012).

De acordo com dados levantados (Figura 1), o consumo de energia elétrica, dado em Mtoe (equivalente a 1 milhão de toneladas de óleo) proveniente de hidrelétricas cresceu em todo o mundo desde 1988. O mesmo estudo revela que enquanto a América do Norte manteve seu consumo praticamente estável, a Ásia cresceu seu consumo em, aproximadamente, 150%. Isso se deve, em especial, a China com suas grandes hidrelétricas aliadas ao seu crescimento no produto interno bruto (PIB) e sua população que hoje é de aproximadamente 1,36 bilhão de habitantes.

Figura 1 - Consumo de energia hidrelétrica entre 1988 até 2013 em Mtoe.



Fonte: BP (2014).

2.2 Hidrelétricas: O Brasil no cenário mundial

O Brasil tem uma diversidade em sua matriz energética. Nela estão inseridas as energias renováveis que apresentam vantagens como a disponibilidade de recursos, a aproveitamento de forma fácil além de que os recursos não tem um prazo para se extinguirem.

De todas as fontes deste tipo, a energia hidrelétrica representa na produção mundial de energia cerca de 16% da eletricidade total (ANA, 2013; ANEEL, 2014; BP, 2014; SANTOS, 2011).

No Brasil, a energia hidrelétrica tem, historicamente, sido grande colaboradora do desenvolvimento econômico além de desempenhar uma grande função como a integração e o desenvolvimento de regiões distantes dos centros urbanos e industriais. O país apresenta vantagem neste ponto em relação a outros países que utilizam, para geração de energia elétrica, combustíveis fósseis e centrais nucleares (SANTOS, 2011).

As características do Brasil, a respeito de energia hidráulica, são consideradas fator muito importante. O país possui 12% da água doce superficial existente no planeta e condições apropriadas para seu uso e exploração. Tem como potencial hidrelétrico estimado em 260 GW, sendo que mais de 40% se encontra na Bacia Hidrográfica do Amazonas, 23% na Bacia do Paraná, 10,6% na Bacia do Tocantins e 10% na Bacia do São Francisco. Entretanto, existem muitos outros lugares para se levantar dados sobre potencial elétrico que não foram ainda catalogados/ inventariados, principalmente no norte do país. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), aproximadamente 66% da energia elétrica consumida pelo Brasil vem de hidrelétricas.

Atualmente, existem usinas em processo de licitação ou em obras na Amazônia. Estas vão participar da lista das dez maiores do Brasil: Belo Monte (com potência instalada de 11.233 MW), São Luiz do Tapajós (8.381 MW), Jirau (3.750 MW) e Santo Antônio (3.150MW). Entre as maiores em funcionamento estão Itaipu Binacional (14 mil MW, ou 16,4% da energia consumida em todo o Brasil), Tucuruí (8.730 MW), Ilha Solteira (3.444 MW), Xingó (3.162 MW) e Paulo Afonso IV (2.462 MW) (ONS, 2009).

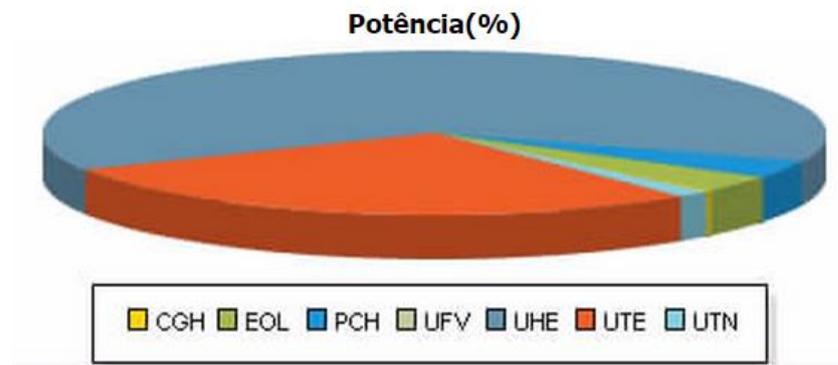
Segundo ANEEL, os empreendimentos em operações que compõe a matriz energética brasileira estão dispostas na Tabela 1 e Figura 2.

Tabela 1 - Matriz Energética Brasileira subdividida por empreendimentos em operação.

Tipo	Quantidade	Potência Gerada (kW)	%
CGH	483	300.461	0,23
EOL	207	4.363.604	3,29
PCH	470	4.712.632	3,55
UFV	289	14.990	0,01
UHE	200	83.730.698	63,11
UTE	1.884	37.563.875	28,31
UTN	2	1.990.000	1,5
Total	3.535	132.676.260	100

Fonte: ANEEL (2014).

Figura 2 - Matriz energética brasileira.



Fonte: ANEEL (2014).

No ranking mundial da energia hidrelétrica (Figura 3), o Brasil perdeu uma posição ocupando a 3ª colocação, perdendo para a China e para o Canadá. Isto se deve especialmente a escassez de chuvas que o país está passando. Reduzindo as chuvas, há também uma redução na geração de energia hidrelétrica, pois muitos rios estão muito abaixo do nível desejado para a obtenção de energia (ANEEL, 2014; BP, 2014).

A China segue possuindo o título de país com maior potência instalada em energia hidrelétrica do mundo. Sua produção em 2013 foi de 906.400 GWh, 2,3 vezes maior que a

produção brasileira no mesmo ano (382.800 GWh). O segundo maior produtor é o Canadá com 389.840 GWh. É muito claro o predomínio destes três países quando se fala sobre energia hidrelétrica. A Rússia, atual 4º colocado no ranking, produziu em 2013 180.400 GWh, ou seja, menos da metade do Brasil (BP, 2014).

Em outras nações, o uso de energia hidrelétrica é menor por uma grande variedade de fatores, dentre eles é possível citar o baixo volume dos rios quando comparados aos dos países que mais produzem energia pela forma hidráulica, a ausência da necessidade de uma produção de energia maior e a opção de usarem outras formas de obtenção de energia com custo mais baixo (ANEEL, 2014).

Os cinco países com maiores potências instaladas em energia hidrelétrica no mundo estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 - Cinco países com maiores potências instaladas em energia hidrelétrica do mundo.

Posição	País	Consumo em Mtoe
1	China	206,3
2	Canadá	88,5
3	Brasil	87,2
4	Estados Unidos	61,5
5	Russia	41,0

Fonte: BP (2014).

2.3 Pequenas e Micro Centrais Hidrelétricas

De acordo com a resolução No. 394 -04/12/1998 da ANEEL, PCH (Pequena Central Hidrelétrica) é toda usina hidrelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada seja superior a 1 MW e inferior a 30 MW cuja área do reservatório não deve ultrapassar 3 km².

Em geral, uma PCH opera a fio d'água, isto é, o reservatório não permite a regularização do fluxo d'água. Devido a isso, a possibilidade de ociosidade das turbinas se faz presente em ocasiões de estiagem, pois a vazão disponível se torna insuficiente para o funcionamento das turbinas (ELETROBRAS, 2008; FLÓREZ, 2014; MOLIN, 2007).

Em situações opostas a de estiagem, as vazões podem ser maiores que a capacidade de engolimento das máquinas, permitindo a passagem da água pelo vertedor (ANEEL, 2014; ELETROBRAS, 2014). Em razão disto, o custo da energia elétrica gerada pelas PCHs é superior ao de uma usina hidrelétrica de grande porte (UHE-Usina Hidrelétrica de Energia), onde o reservatório pode ser operado de forma a diminuir a ociosidade ou desperdícios de água (ELETROBRAS, 2008). No entanto as PCHs são instalações que ocasionam impactos ambientais reduzidos e podem compor um sistema de geração descentralizada.

No passado, as PCHs foram responsáveis por grande parte da geração de energia. Entretanto, foram desativadas ao longo das últimas décadas dando lugar a grandes instalações elétricas devido à economia de escala que tais empreendimentos oferecem. Porém, o sistema elétrico brasileiro tem mostrado uma tendência de reativação, construção e modernização de PCHs, com o objetivo de elevar o suprimento de energia de forma rápida e com baixos custos financeiros e ambientais (ANEEL, 2014; ELETROBRAS, 2008; FLÓREZ, 2014).

As resoluções elaboradas pela ANEEL possibilitam ao empreendedor que a energia gerada pelas PCHs entre no sistema elétrico sem que haja necessidade do pagamento de taxas referentes ao uso da rede de transmissão e distribuição. Esse incentivo vigora somente para PCHs que entraram em operação até 2003. As PCHs são isentas de remunerar municípios e estados pelo uso dos recursos hídricos. Se forem implantadas no sistema isolado da Região Norte, podem ainda receber incentivo do Fundo formado com recursos da Conta Consumo de Combustíveis Fósseis (CCC) para financiar os empreendimentos, caso possam substituir as usinas termelétricas a óleo diesel nos sistemas isolados da Região Norte (ANEEL, 2014).

Os empreendimentos hidrelétricos de menor porte são classificados devido a sua capacidade de geração de energia, em kW , e sua queda de projeto, em m , conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação das centrais hidrelétricas quanto à potência e quanto à queda de projeto.

CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS	POTÊNCIA – P (kW)	QUEDA DE PROJETO - H_d (m)		
		BAIXA	MÉDIA	ALTA
MICRO	$P < 100$	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
MINI	$100 < P < 1.000$	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
PEQUENAS	$1.000 < P < 30.000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

Fonte: ELETROBRAS (2008).

As micro e mini-centrais hidrelétricas tem como principal objetivo suprir a demanda local de energia, como em uma propriedade rural ou comunidade, o que não deixa de representar uma contribuição à geração de energia total do sistema. Esses empreendimentos são úteis para a diminuição dos índices de exclusão no acesso à energia elétrica, que hoje beiram, no Brasil, cerca de 10 milhões de pessoas (ELETROBRAS, 2008; FLÓREZ, 2014).

Além disso, o impacto ambiental das atividades agrícolas é reduzido, visto que os geradores de energia convencionais, que utilizam combustíveis fósseis, podem ser desativados (ANEEL, 2014; ELETROBRAS, 2008).

2.3.1 Pequenas Centrais Hidrelétricas no Rio Grande do Sul

O Rio Grande do Sul possui um total de 86 rios. A maior parte da água doce, que fica localizada no lado leste do estado, que é a Lagoa dos Patos. A hidrografia gaúcha é dividida em função do lugar onde se desembocam: os que correm para o Atlântico e os que correm para o Rio Uruguai. Embora as nascentes dos Rios Taquari e Jacuí originam-se nessa região, todos se apresentam encaixados com corredeiras e quedas da água, possuindo elevado potencial e energético, que em grande parte já é utilizado (JUSTUS *et. al.*, 1990).

As pequenas centrais hidrelétricas instaladas em rios gaúchos fornecem ao sistema elétrico 557.143 MW, obtidos mediante operação de quarenta e nove (49) usinas situadas em

várias regiões do estado. A Tabela 4 mostra as cinco pequenas centrais hidrelétricas com maior potência instalada.

Tabela 4 – Cinco pequenas centrais hidrelétricas com maior potência instalada no Rio Grande do Sul.

Usina	Potência (kW)	Município	Rio
Passo do Meio	30000	Bom Jesus – São Francisco de Paula	Rio das Antas
Serra dos Cavalinhos II	29000	Monte Alegre dos Campos – São Francisco de Paula	Rio das Antas
Jararaca	28000	Nova Roma do Sul – Veranópolis	Rio da Prata
Da Ilha	26000	Antônio Prado – Veranópolis	Rio da Prata
Palanquinho	24165	Caxias do Sul – São Francisco de Paula	Lajeado Grande

Fonte ANEEL (2014).

2.4 Máquinas de Fluido

Máquinas de fluido são equipamentos que promovem a troca de energia entre um sistema mecânico e um fluido. Em resumo, são utilizadas ou para obter energia proveniente do fluido, como a turbina Pelton, ou acrescentam energia ao fluido, como os ventiladores e sopradores (HENN, 2012; FOX, 2006)

2.4.1 Tipos principais

Segundo Henn (2012), as máquinas de fluido podem ser subdivididas em dois tipos principais: as máquinas de deslocamento positivo (*positive displacement machines*) e as máquinas de fluxo (*turbomachines*).

Nas máquinas de deslocamento positivo, também chamado de estático, o fluido de trabalho é confinado durante sua passagem através da máquina e é sujeito a trocas de pressão devido à variação no volume do recipiente em que se encontra contido, ou seja, o fluido é forçado pelo deslocamento de uma fronteira em movimento a mudar o seu estado energético (FOX, 2006; HENN, 2012).

Nas máquinas de fluxo, também denominadas máquinas dinâmicas, o fluido não é confinado. O fluxo do fluido é contínuo através da máquina e submetido à troca de energia em razão dos efeitos dinâmicos. Desconsiderando-se a troca de calor com o meio ambiente e possíveis folgas entre partes fixas e móveis, quando uma máquina de deslocamento positivo para de funcionar, o fluido de trabalho no seu interior permanecerá no estado em que se encontrava no momento em que o movimento cessou e este poderá ser completamente diferente das condições do ambiente externo. Na mesma situação, o fluido de trabalho de uma máquina de fluxo assumirá, imediatamente, as condições ambientais, quando ela deixar de operar (FOX, 2006; HENN, 2012).

Podemos citar como exemplos típicos de máquinas de deslocamento positivo as máquinas rotativas (*rotary machines*), como a bomba de engrenagens, e as máquinas alternativas (*reciprocating machines*), como o compressor de pistão. As turbinas hidráulicas e os ventiladores centrífugos são exemplos de máquinas de fluxo (SANTOS, 2007).

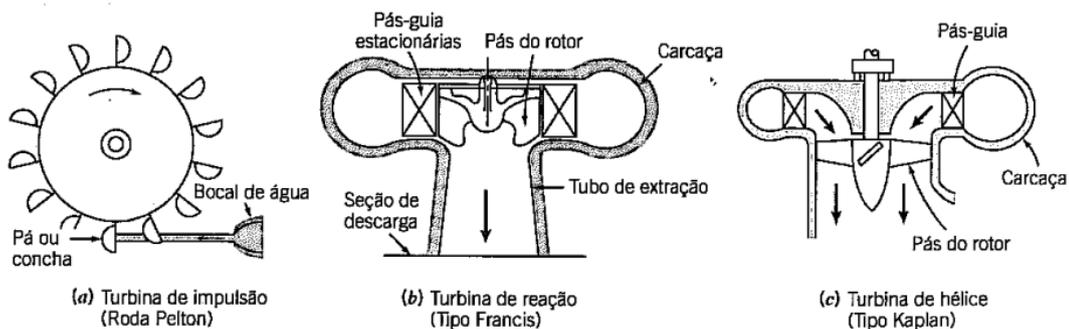
2.5 Turbinas hidráulicas

As máquinas que extraem energia do fluido na forma de trabalho (ou potência) são chamadas turbinas. O conjunto de pás, lâminas ou conchas, fixadas ao eixo da turbina, é chamado rotor, roda ou corredor. Nas turbinas hidráulicas, o fluido de trabalho é água, de modo que o escoamento é incompressível. Nas turbinas a gás e nas turbinas a vapor, a massa específica do fluido de trabalho pode variar significativamente (FOX, 2006; HENN, 2012; MACINTYRE, 2012; VIANA, 2012).

As duas classificações de turbinas são de ação e de reação. As turbinas de ação são acionadas por um ou mais jatos livres de alta velocidade. Cada jato é acelerado em um bocal externo à roda da turbina. Se o atrito e a gravidade forem desprezados, nem a pressão, nem a velocidade relativa ao rotor mudam enquanto o fluido passa sobre as conchas da turbina. Desse modo, numa turbina de impulsão, a aceleração do fluido e a queda de pressão ocorrem em bocais externos às pás, e o rotor não trabalha cheio de fluido (FOX, 2006; MACINTYRE, 2012; VIANA, 2012).

Diversas turbinas hidráulicas típicas são mostradas esquematicamente na Figura 3.

Figura 3 - Diagramas esquemáticos de turbinas hidráulicas típicas.



Fonte: Fox *et al.* (2006).

O diagrama mostrado na Figura 3 (a) apresenta uma turbina de ação acionado por um único jato, que fina no plano do rotor da turbina. A água do jato atinge cada concha em sucessão, é defletida, e sai da concha com velocidade relativa aproximadamente oposta àquela com a qual entrou (FOX *et al.*, 2006).

Nas turbinas de reação, parte da variação de pressão do fluido ocorre externamente e a outra parte dentro das pás móveis. Ocorre aceleração externa e o escoamento é defletido para

entrar no rotor na direção apropriada, à medida que passa por bocais ou pás estacionárias chamadas de pás-guia ou de pás diretrizes. Uma aceleração adicional do fluido relativa ao rotor ocorre dentro das pás móveis, de modo que tanto a velocidade relativa quanto a pressão da corrente mudam através do rotor. Como as turbinas de reação trabalham cheias de fluido, elas podem, em geral, produzir mais potência para um dado tamanho total do que as turbinas de ação (FOX *et al.*, 2006).

Uma turbina de reação do tipo Francis é mostrada na Figura 3 (b). A água que entra escoia circunferencialmente através da carcaça da turbina, entra na periferia das pás-guias estacionárias e escoia em direção ao rotor. A água entra no rotor quase radialmente e é defletida para baixo para sair aproximadamente na direção axial, saindo do rotor escoia através de um difusor conhecido como tubo de extração antes de entrar no coletor (FOX *et al.*, 2006).

O diagrama na Figura 3 (c) mostra uma turbina de hélice do tipo Kaplan. A entrada de água é similar à da turbina Francis. Contudo, ela é defletida para escoar quase axialmente antes de encontrar o rotor da turbina. O escoamento saindo do rotor pode passar através de um tubo de extração (FOX *et al.*, 2006).

Desse modo, as turbinas abrangem de simples moinhos de vento a turbinas complexas a vapor ou a gás, com muitos estágios de pás cuidadosamente projetados (VIANA, 2012).

2.5.1 Turbinas Francis

As turbinas Francis (Figura 4) são denominadas turbinas de reação, cuja característica é a pressão do escoamento na zona da roda, que é inferior a pressão atmosférica. Esta turbina pode ser reconhecida por ter uma roda formada por uma coroa de aletas fixas, que constituem uma série de canais hidráulicos que recebem a água radialmente e a orientam para a saída do rotor numa direção axial (FOX, 2006; HENN, 2012; MACINTYRE, 2012; VIANA, 2012).

A câmara de entrada (que pode ser aberta ou fechada com uma forma espiral), o distribuidor composto por uma roda de aletas fixas ou móveis (que regulam o caudal) e o tubo de saída da água são outros componentes desta turbina. (FOX, 2006; HENN, 2012; MACINTYRE, 2012; VIANA, 2012).

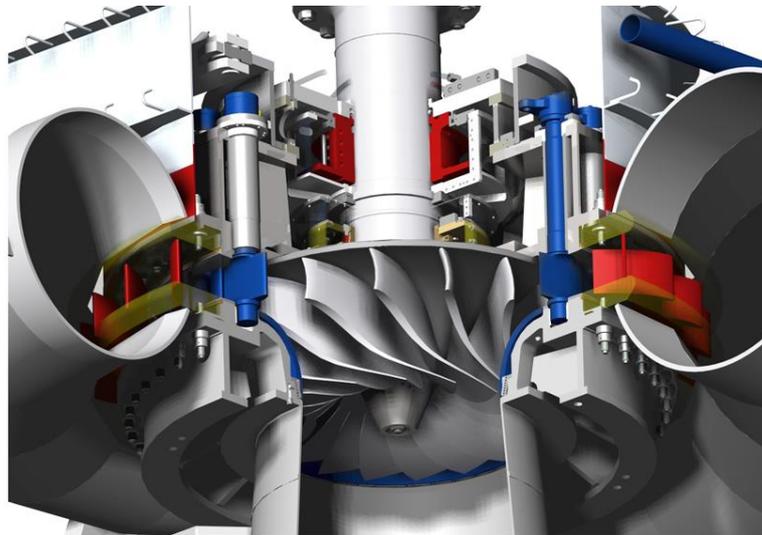
A turbina Francis tem uma grande facilidade de adaptação a diferentes quedas e caudais. É comumente utilizada para quedas úteis superiores a vinte metros (20 m). Para valores inferiores da queda utilizam-se turbinas de caixa aberta. As variações de queda útil e o

caudal podem variar de 60% a 125% e de 40% a 105%, respectivamente, do valor nominal (MACINTYRE, 2012; VIANA, 2012).

O distribuidor permite o controle da entrada da água na turbina e ajuste da potência, mantendo a velocidade constante; permite também interromper a entrada de água numa paragem da central. Nas pequenas e micro-centrais hidrelétricas é comum a instalação de turbinas Francis de eixo horizontal para um mais fácil acoplamento à geradores com construção normalizada (MACINTYRE, 2012; VIANA, 2012).

A Usina Hidrelétrica de Itaipu, localizada no Paraná, funciona com turbinas tipo Francis com cerca de 100 m de queda de água (ALDABÓ, 2002).

Figura 4 - Turbina Francis.



Fonte: Voith, (2014).

2.5.2 Turbinas Kaplan

Adaptadas às quedas fracas e aos caudais elevados, estas turbinas de reação são compostas, basicamente, de uma câmara de entrada (aberta ou fechada), de um distribuidor, uma roda com quatro ou cinco pás em forma de hélice. As pás desta turbina irão definir o seu tipo. Sendo as do tipo Hélice com pás fixas e do tipo Kaplan com pás móveis, na qual pode-se variar o ângulo de ataque. Se as pás são fixas a turbina é do tipo hélice. Se as pás são móveis que permite variar o seu ângulo de ataque, a turbina é do tipo Kaplan (FOX *et al.*, 2006; HENN, 2012; MACINTYRE, 2012).

A turbina Kaplan, mostrada na Figura 5, pode ser regulada através da ação do distribuidor, mas também com o auxílio da variação do ângulo de ataque das pás do rotor, o que oferece ao usuário um alto grau de regulação (SANTOS, 2007).

É utilizada para pequenas quedas, inferiores a trinta metros (30 m). A queda útil pode ter grandes variações de 60% a 140% e o caudal também pode variar de 15% a 110% do valor nominal. Por ter grande adaptabilidade, isso implica diretamente no custo da turbina Kaplan. As turbinas hélice e Kaplan têm geralmente o eixo vertical, mas existem outras variedades construtivas com o eixo horizontal, com escoamento axial, como as turbinas do tipo bulbo (FOX *et al.*, 2006; HENN, 2012; MACINTYRE, 2012; VIANA, 2012).

O rendimento das turbinas Kaplan é considerável bom em uma ampla faixa de operação e a curva de rendimento tem um perfil “plano” (FOX *et al.*, 2006; HENN, 2012; MACINTYRE, 2012; VIANA, 2012). A usina hidrelétrica de Três Marias, em Minas Gerais, funciona com turbinas Kaplan (ALDABÓ, 2002).

Figura 5 - Turbina Kaplan.



Fonte: Voith, (2014).

2.6 Turbina Hidráulica do Tipo Pelton

A turbina Pelton, ilustrada na Figura 6, é uma das turbinas de água mais eficientes. Utiliza a velocidade do fluxo de água para provocar o movimento de rotação e extrair energia a partir de um jato de água. São constituídas por um disco circular (roda) que possui, acoplados, ao longo de sua periferia conchas ou copos, sobre as quais incide, tangencialmente,

um jato de água, dirigido por um ou mais injetores uniformemente distribuídos na periferia da roda (FERREÑO *et al.*, 2011; FOX *et al.*, 2006; HENN, 2012; MACINTYRE, 2012; VIANA, 2012).

Pode ser de eixo horizontal ou vertical, tem grande aplicabilidade em aproveitamentos com caudais pequenos e altura de queda útil elevada. Nos pequenos aproveitamentos hidroelétricos costuma-se utilizar turbinas de eixo horizontal, porque assim utiliza-se um gerador de eixo horizontal (os mais comuns) que tem um custo menor (FOX *et al.*, 2006; HENN, 2012; MACINTYRE, 2012; VIANA, 2012).

Já em grandes aproveitamentos, este tipo de turbinas só é considerado para quedas superiores a 150 m. Uma turbina Pelton de diâmetro pequeno com alta velocidade de rotação é capaz de produzir 1 kW num aproveitamento com uma queda inferior a 20 m (FOX *et al.*, 2006).

A turbina do tipo Pelton tem se mostrado eficiente em relação a segurança de sistemas hidráulicos. Na necessidade de uma paragem de emergência da turbina, a válvula de agulha nos injetores, pode ser então fechada, muito lentamente, de modo que o aumento de pressão seja mantido dentro de níveis aceitáveis, tendo-se como valor de referência, um máximo de 1,15 vezes a pressão estática (FOX *et al.*, 2006; HENN, 2012).

O acoplamento do rotor da turbina Pelton é, normalmente, direto ao veio do gerador e deve ser mantido acima do nível de jusante. A eficiência de uma turbina Pelton com um injetor é melhor que para múltiplos jatos. Com um injetor temos uma eficiência em um caudal de 30 a 100% do caudal máximo, enquanto para uma de jatos múltiplos, já é eficiente a partir dos 10% (FOX *et al.*, 2006; HENN, 2012; MACINTYRE, 2012; SANTOS, 2007; VIANA, 2012).

A Usina Hidrelétrica Parigot de Souza, no Paraná, tem 4 turbinas tipo Pelton de 65 MW, com queda bruta normal de 754 m (ALDABÓ, 2002).

Figura 6 - Turbina Pelton.



Fonte: Voith, (2014).

2.6.1 Partes componentes de uma turbina Pelton

Uma turbina hidráulica do tipo Pelton é composta, basicamente, por 3 partes fundamentais: o rotor, a pá e o sistema injetor.

2.6.1.1 Rotor

O rotor de uma turbina Pelton é composto de uma roda, cuja finalidade fixar as pás, e um eixo. O rotor é utilizado para transformar energia hidráulica, proveniente do jato de água de entrada, em energia mecânica. A energia mecânica, que é utilizada posteriormente na obtenção de energia elétrica, é obtida na saída do eixo do rotor. Essa energia mecânica pode ser conhecida também como Potência de Saída (Potência de Eixo). No caso da turbina Pelton, a potência de saída está em função do torque no rotor e a velocidade (ou frequência) de rotação da turbina. O torque (N.m) pode ser calculado através da Equação 1 e a potência de saída (W) através da Equação 2 (OLESKOWICZ *et.al*, 2011).

$$T = RxF \quad (1)$$

$$P = \frac{2\pi TN}{60} \quad (2)$$

Onde:

R = Raio da roda, em m;

F = Força sofrida pelo rotor, em N;

N = Velocidade de rotação do eixo da turbina, em RPM;

T = Torque do eixo da turbina, em N.m;

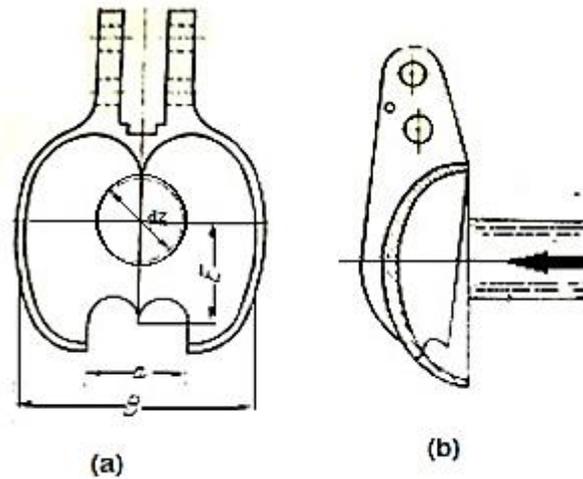
P = Potência no eixo da turbina, em W.

2.6.1.2 Análise das Pás de Turbina Pelton

As pás da turbina Pelton são partes fundamentais da estrutura de uma turbina Pelton, exigindo o máximo de atenção no projeto e execução. Um bom funcionamento e um bom rendimento da turbina dependem diretamente das pás (OST *et al.*, 2013).

A pá possui duas partes côncavas, lugar onde há a transformação da energia cinética proveniente do jato d'água em trabalho mecânico. Conforme Figura 7, no centro da pá dz existe uma saliência que separa a concha em duas partes côncavas. Essa saliência tem de receber a água sem choque, dividindo o jato em duas partes iguais. A parte superior da saliência nunca deve ser atingida pelo jato (b). Na extremidade da pá temos um corte (a) que impede que qualquer partícula tenha sua trajetória relativa fora da superfície côncava da pá (OST *et al.*, 2013).

Figura 7 - Projeto de uma pá de turbina tipo Pelton.

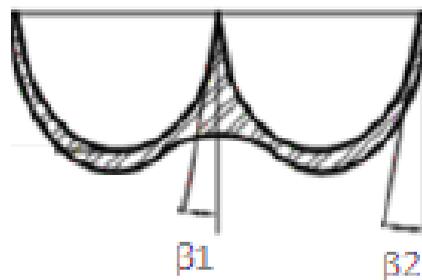


Fonte: Ost *et al.*, (2013).

A superfície das pás deve ser posicionada para a direção radial do jato de entrada. As pás precisam ser projetadas de maneira que ao longo de toda a aresta de saída elíptica exista um ângulo da pá β_1 (Figura 8) relativamente pequeno. Deve-se adotar sempre o valor mais próximo possível do limite, que está entre 4° e 7° . Este valor foi definido devido ao fato de que o jato existente na carga total não deve alcançar a pá seguinte (OST *et al.*, 2013).

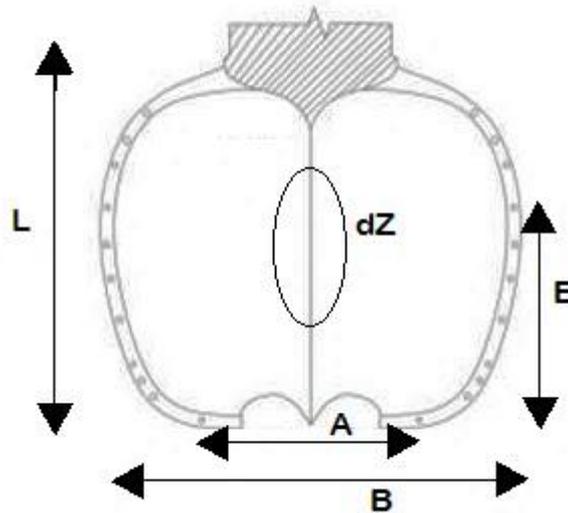
O perfil de uma pá de turbina Pelton pode ser visualizado na Figura 8. Na Figura 9 é possível observar uma vista superior da pá da turbina.

Figura 8 - Perfil da pá de uma turbina Pelton.



Fonte: Ost *et al.* (2013).

Figura 9 - Pá de uma turbina Pelton.



Fonte: Ku (2012).

Para obtermos o rendimento máximo a carga total, devemos definir B como a Equação 3:

$$B = (3,5 \text{ a } 4) \cdot d_{jato} \quad (3)$$

onde d_{jato} = diâmetro máximo do jato.

No plano mais longitudinal do rotor (perpendicular ao eixo do jato), é colocado o ponto mais interno da aresta de entrada junto ao limite do jato e o ponto mais externo a uma distância “E”. Esta medida é chamada de “excesso” e é obtida através da Equação 4.

$$E = (0,9 \text{ a } 1,2) \cdot d_{jato} \quad (4)$$

Um corte na extremidade da pá (α) tem como finalidade determinar que o jato de entrada não alcance a pá prematuramente, sendo definido por Pfeleiderer (1979) conforme Equação 5:

$$\alpha = 1,2 \cdot d_{jato} + 5 \quad (5)$$

Para o cálculo das dimensões principais restantes, aconselha-se a modelagem a partir da Equação 6 e Equação 7 (OST *et al.*, 2013).

$$L = (2,5 \text{ a } 2,8) \cdot d_{jato} \quad (6)$$

$$T = (0,8 \text{ a } 1,0) \cdot d_{jato} \quad (7)$$

Onde:

L = comprimento da pá (m);

t = espessura da pá (m).

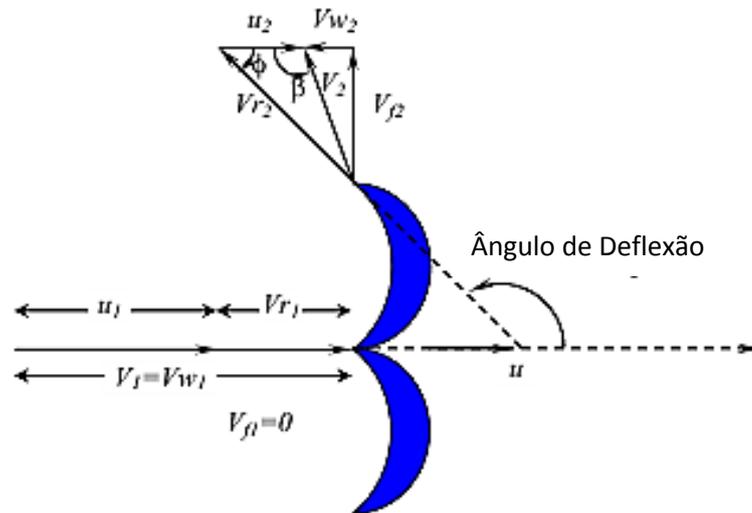
2.6.1.3 Diagrama de velocidade da concha

A aplicação do diagrama de velocidade na concha, é utilizado para estimar a produção de trabalho e a eficiência na roda da turbina Pelton. Tais equações ajudam os projetistas a dimensionar estas máquinas de fluxo, conhecendo assim o comportamento da turbina antes mesmo dela ser construída (SINGAL,2009).

Os chamados triângulos de velocidade são formas geométricas de expressar a equação vetorial, que relaciona o movimento relativo com o movimento absoluto das partículas de fluido que percorre o rotor de uma máquina de fluxo (HENN, 2012)

A Figura 10 apresenta o diagrama de velocidades em uma pá de uma turbina Pelton.

Figura 10 - Diagrama de velocidade em uma pá de turbina Pelton



Fonte: Prakash (2004).

Com base no diagrama, podemos definir as equações 8 e 9:

$$V_{r2} = V_1 - U_1 \quad (8)$$

$$V_{w2} = U_1 - V_{r2} \cos \varphi \quad (9)$$

Onde:

V_1 = velocidade do jato, em m/s;

V_2 = velocidade absoluta da água, em m/s;

V_f = velocidade de fluxo, em m/s;

$U_1=U_2$ = velocidade da roda, em m/s;

V_{r2} = velocidade relativa, em m/s;

V_{w2} = velocidade de giro, em m/s;

φ = ângulo das pás da turbina, em graus.

STREETER (1982) defende que o ângulo das pás da turbina esta compreendido usualmente entre 173° e 176° . PRAKASH (2004) defende que o ângulo deve ser próximo à 165° .

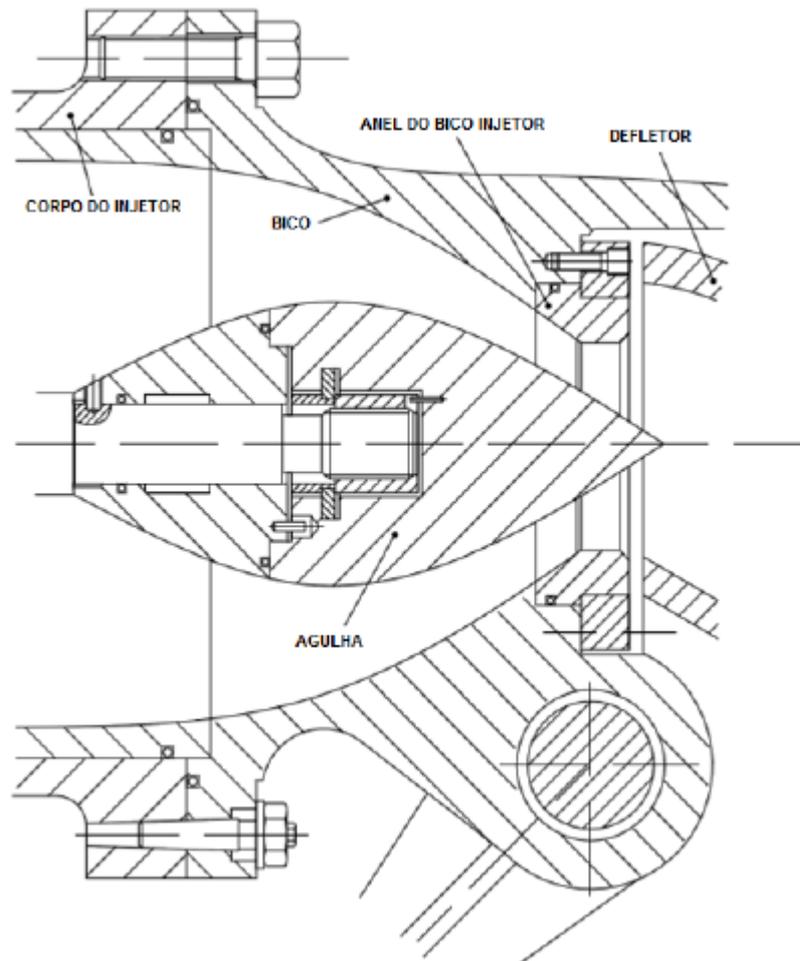
2.6.1.4 Sistema Injetor

O sistema injetor é o elemento mecânico cuja função é dirigir e regular o jato de água. É formado por basicamente por dois componentes: o bico e a agulha. O bico tem como objetivo projetar e dirigir o jato de água tangencialmente à extremidade da roda, formando assim um ângulo com a pá de 90° (MONSALVE, 2011).

A agulha se localiza centralizada no interior do bico. É guiada por rolamentos e tem movimentação livre de deslocamento longitudinal em dois sentidos diferentes. As extremidades da agulha possuem funções distintas entre as mesmas. Enquanto uma das extremidades tem como objetivo a regulagem do fluxo de água que flui através do bico, a outra é utilizada para interromper o fluxo de água na turbina fechando o buraco do bocal de entrada além de regular a posição do jato de água (MONSALVE, 2011).

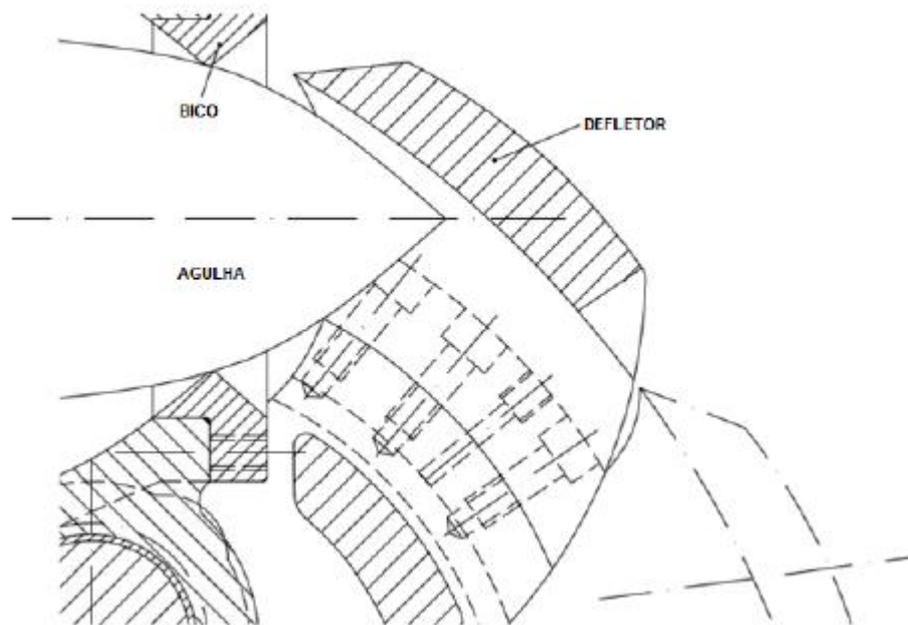
Além desses componentes, a adição de defletores em um sistema injetor se torna uma opção para determinadas aplicações. O defletor tem como objetivo alterar a trajetória do jato d'água. Ele é inserido geralmente entre o bico e a turbina. Na Figura 11 pode ser visto o sistema injetor com o defletor inoperante. Na Figura 12 tem-se novamente o sistema injetor, porém com o defletor operando, alterando a trajetória do fluxo de saída de água do bico.

Figura 11 - Sistema Injetor com defletor inoperante.



Fonte: Oleskowicz *et.al* (2011).

Figura 12 - Sistema Injetor – Defletor operante.



Fonte: Oleskowicz *et.al* (2011).

2.7 Microcontrolador Arduino

O microcontrolador Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica, projetada com um processador Atmel AVR com entrada/saída embutido e tem uma linguagem de programação padrão semelhante ao C/C++. Este microcontrolador foi projetado para a interação de objetos e tem como público-alvo usuários sem muita experiência e que desejam um microcontrolador de baixo custo (ARDUINO, 2015).

Uma típica placa Arduino é composta por um controlador, algumas linhas de E/S digital e analógica, além de uma interface serial ou USB utilizada para a conexão com um computador sendo utilizado tanto para alimentação quanto para programação. Em geral, o microcontrolador não tem nenhuma conexão de rede, entretanto combinada com componentes complementares conhecidos como *Shields* podem ter essa capacidade. A interface é simples, podendo ser escrita em várias linguagens. A mais popular é a *Processing*, mas outras que podem comunicar-se com a conexão serial são: *Max/MSP*, *JAVA*, *SuperCollider*, *ActionScript* e *Pure Data* (ARDUINO, 2015).

Sua placa consiste em um processador Atmel AVR de 8 bits, associada a componentes complementares cuja função é facilitar a programação e incorporação para outros circuitos. Os Arduinos originais utilizam a série de chips mega AVR, dentre eles o ATmega8, ATmega168, ATmega328 e ATmega1280 (ARDUINO, 2015).

O microcontrolador utilizado no trabalho é o Arduino Uno, que pode ser visualizado na Figura 13, foi adquirido através da compra em lojas do ramo de eletrônicos.

Figura 13 - Microcontrolador Arduino Uno.



Fonte: Arduino (2015).

A família Arduino tem grande gama devido a cada um dos microcontroladores terem sido projetados para determinados fins de projetos. A Tabela 5 informa alguns dos modelos fornecidos por Arduino fabricados até o presente momento.

Tabela 5 - Modelos de Placa Arduino.

Modelo	Clock (MHz)	E/S Digital	E/S Analógico	Alimentação	Flash (kb)
Due	84	54	12	7 - 12V	512
Leonardo	16	20	12	7 - 12V	32
Uno	16	14	6	7 - 12V	32
Duemilanove	16	14	6	7 - 12V	32
Pro	8	14	6	3.3 – 12V	32
Mega	16	54	16	7 - 12V	256
Mini 05	16	14	6	7 – 9V	32
Fio	8	14	8	3.3 – 12V	32
LilyPad	8	14	6	2.7 – 5.5V	32

Fonte: Bentes (2013).

A placa Arduino Uno é baseada no microcontrolador ATmega328, possuindo 14 pinos de entrada/saída digitais (dos quais 6 podem ser utilizados como saída PWM), 6 entradas analógicas, cristal de cerâmica com 16 MHz de clock que define a frequência de operação do microcontrolador, conexão USB, pino de alimentação externa e botão de reset. A placa possui todos os circuitos auxiliares para o funcionamento do microcontrolador, bastando ao usuário conectá-la a um computador via cabo USB para começar a utilizá-la, além disso o processo de gravação de rotinas é facilitado por haver um *bootloader* que automatiza este passo (BENTES, 2013).

A Tabela 6 mostra algumas especificações do Arduino Uno.

Tabela 6 – Especificações do Arduino Uno.

Microcontrolador/Processador	ATmega328
Tensão recomendada de operação	7 – 12 V
Tensão limite de operação	6 – 20 V
Pinos E/S Digitais	14 (6 PWM)
Pinos de entrada analógicos	6
Corrente CC por pino E/S	40 mA
Corrente CC para o pino 3.3V	50 mA
Armazenamento em Flash	32 kb
Memória RAM	2 kb
Memória EEPROM	1 kb
Frequência de Clock	16 MHz

Fonte: Arduino (2015).

3 METODOLOGIA

A elaboração do sistema eletrônico para alteração do ângulo das conchas da pá seguiu certas diretrizes visando à realização do objetivo, ou seja, a alteração precisa e controlada do ângulo de uma pá de turbina hidráulica do tipo Pelton com o objetivo de obter maior potência, além de levar em consideração fatores como a facilidade de manutenção e montagem, custo do sistema eletromecânico e facilidade na obtenção dos componentes utilizados na montagem do sistema. Também foi esquematizado, por meio de um fluxograma, as etapas para produção do sistema eletrônico de forma clara e organizada, otimizando assim, o tempo e o custo de produção. O fluxograma do processo pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma do processo realizado no presente trabalho.



Fonte: O autor (2015).

3.1 Início do Projeto

O início do projeto teve como foco principal a busca de conhecimento, em especial sobre máquinas de fluxo e turbinas hidráulicas do tipo Pelton. Também foram estudados aspectos que influenciam a extração de potência da turbina, obtidos através da literatura.

3.2 Escolha do lugar para realização do estudo, montagem e ensaios.

Pelo fato de ser necessário suporte mecânico e eletrônico, foram definidos os lugares para estudo, montagem e ensaios. Neste caso, foram utilizados três laboratórios da Universidade Federal do Pampa - Campus Bagé: Laboratório de Eletrônica e Automação (2204), Laboratório de Biocombustíveis e Sistema de Fluidos (2105) e Laboratório de Hidrogênio (1104). Ambos dispõem de equipamentos necessários para que seja possível a realização do objetivo principal como: tacômetro ótico, rotor de uma turbina Pelton, entre outros.

3.3 Listagem de equipamentos e materiais a serem utilizados.

Após estudos aprofundados foram enumerados equipamentos e componentes para a elaboração do sistema, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Lista de componentes e equipamentos utilizados.

Equipamento/Componente	Quantidade
Microcontrolador Arduino Uno	1
Motor de passo 28BYJ-48	1
Driver ULN2003	1
Pá da turbina Pelton	1
Cabos	10
Rotor de turbina Pelton	1
Tacômetro ótico	1
Eixo de Alumínio 6mm	1
Rolamentos	2
Borrachas para vedação	2
Placas de inox	2

Fonte: O autor (2015).

O motor de passo 28BYJ-48 é amplamente utilizado em sistemas que são controlados por um microcontrolador Arduino. Possui ótimo torque, unipolar, alimentação de 5 V e redução de 1/64, isto significa que é possível dar uma volta completa com 4096 passos, ou

seja, apenas $\sim 0,088^\circ$ por passo. A precisão deste motor foi um dos grandes motivadores para a escolha deste modelo para confecção do sistema eletromecânico (ROBOCRAFT, 2013).

O driver ULN2003 é um driver de corrente que tem como principal função permitir que o microcontrolador Arduino possa controlar motores com correntes superiores a 50 mA, neste caso controlar o motor de passo 28BYJ-48. Tem como faixa de operação as tensões de 5-12V (TEXAS INSTRUMENTS, 2010).

3.4 Pesquisa de preço dos equipamentos e materiais.

Para que se obter um baixo custo na implantação deste sistema, foi realizada uma pesquisa de preço dos materiais necessários. A pesquisa de preço foi realizada durante o mês de dezembro de 2014 à novembro/2015. De acordo com a Tabela 8 que apresenta os valores mínimos e máximos para os equipamentos necessários.

Tabela 8 - Resultado da pesquisa de preço dos materiais do projeto

Materiais	Preço Mínimo (R\$)	Preço Máximo (R\$)
Arduino	39,00	75,00
Motor de Passo+Driver	10,99	19,99
Confecção da pá	60,00	1500,00
TOTAL	119,99	1619,99

Fonte: O autor (2015).

3.5 Compra dos equipamentos e materiais

Para a compra dos produtos foram levados em considerações alguns aspectos como confiabilidade do vendedor, já que não havia nenhum componente eletrônico na cidade de Bagé/RS, sendo comprado então via internet, preço do transporte até a cidade e material

utilizado. Os vendedores mais confiáveis e de menor distância da cidade foram escolhidos, visando assim um custo mais baixo devido ao transporte das peças.

A pá foi confeccionada na cidade de Bagé. Os valores para uma única peça de metal variavam entre R\$ 1.200,00 e R\$ 1.500,00, valor este referente a pesquisa realizada em dezembro de 2014. Então, utilizou-se madeira como material da pá, rebaixando o custo para R\$ 60,00.

3.6 Projeto e Construção da Pá

O projeto da pá partiu do valor de diâmetro do jato, característica que se torna primordial nesta parte do projeto. Inicialmente, foi utilizado o bico injetor e a bomba hidráulica responsável pela injeção de água na pá. Entretanto, se tornam difíceis de calcular as partes da pá quando o diâmetro de jato for aproximadamente 0,5 cm. As equações não possuem um limite mínimo para diâmetro de jato. Ao realizar os cálculos referentes ao projeto da pá, inicialmente foi utilizado o valor de diâmetro de jato referente ao módulo didático presente no laboratório, onde foi realizado o projeto, ou seja, 0,5 cm. Com esse valor de diâmetro de jato, a pá não pôde ser projetada, pois a parte “ α ” da pá se torna maior que a espessura da pá “E”, tornando assim inviável o projeto, pois a região “ α ” é inferior ao valor da espessura “E”. Por isso, foi alterado o diâmetro de jato do bico injetor de 0,5 cm para 2 cm.

O *design* da pá sofreu alterações visando uma maior zona para o impacto da água e para que fosse possível a alteração do ângulo da mesma. A pá foi projetada utilizando o *Software SolidWorks 2013*, conforme Figura 15. Na pá foram adaptadas duas dobradiças metálicas que possibilitaram a alteração do ângulo da pá, conforme Figuras 16, 17, 18 e 19 a seguir. Com a implantação de dobradiças metálicas para variação do ângulo de cada concha, houve um incremento na saliência dZ da pá. Com isso, o valor de dz para esta pá é de 1 cm. Além dessa alteração, o corte α foi suprimido para aumentar a região de ataque da água e para melhor fixação das dobradiças metálicas.

Figura 15 – Pá projetada no SolidWorks.



Fonte: O autor (2015).

Figura 16 - Pá - Vista Superior.



Fonte: O autor (2015).

Figura 17 - Pá - Vista Lateral.



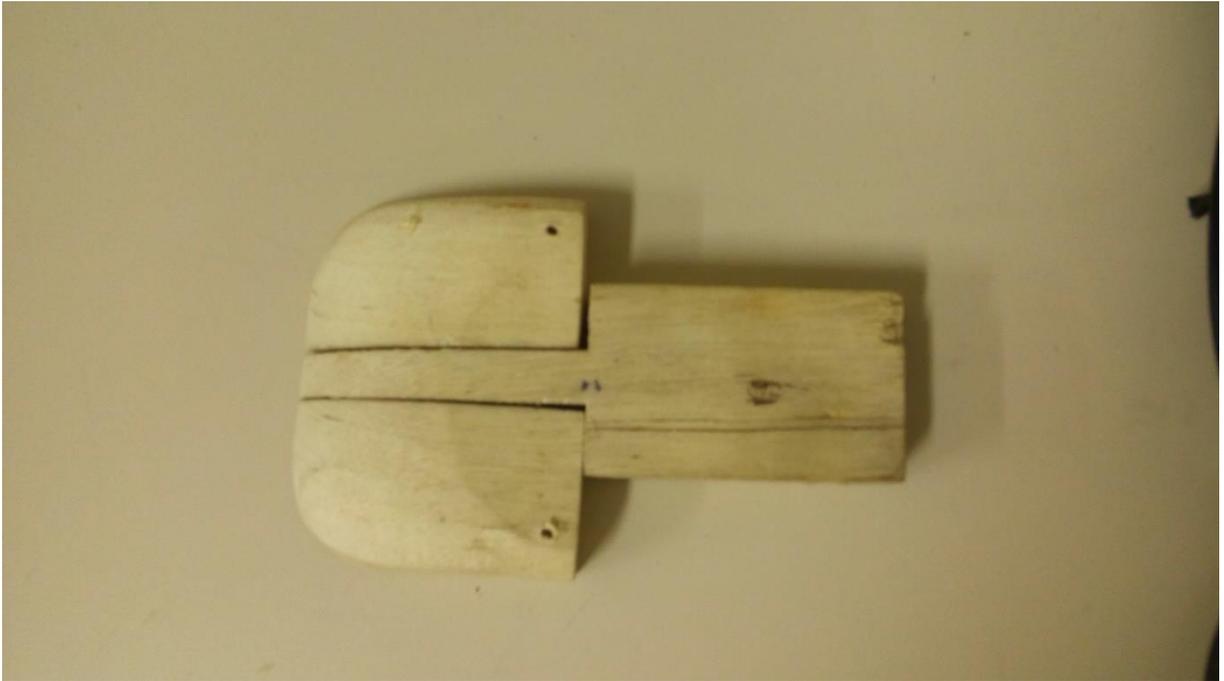
Fonte: O autor (2015).

Figura 18 - Pá - Vista Inferior - com as conchas flexionadas.



Fonte: O autor (2015).

Figura 19 - Pá - Vista Inferior.



Fonte: O autor (2015).

3.7 Implementação e teste do algoritmo

Primeiramente, foi obtido o algoritmo necessário para a o movimento e controle do motor de passo. Este algoritmo funciona movimentando o motor, conforme a escolha do usuário. Neste caso, foi projetado para movimentação de 2° a cada 2 minutos. O algoritmo na plataforma Arduino pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20 - Algoritmo de movimentação do motor de passo comentado.

```

// Programa : Controle motor de passo 28BYJ-48 - Angulo

#include <CustomStepper.h>

//Define os parametros iniciais de ligacao do motor de passo
CustomStepper stepper(8, 9, 10, 11, (byte[]){8, B1000, B1100, B0100,
B0110, B0010, B0011, B0001, B1001}, 4075.7728395, 12, CW);

void setup()
{
  //Define a velocidade do motor
  stepper.setRPM(12);
  //Define o numero de passos por rotacao
  stepper.setSPR(4075.7728395);
}

void loop()
{
  if (stepper.isDone())
  {
    //Intervalo entre acionamentos
    delay(20000);
    //Define o sentido de rotacao (CW = Horario)

    stepper.setDirection(CW);
    //Define o angulo de rotacao
    stepper.rotateDegrees(2);
  }

  stepper.run();
}

```

Fonte: Arduino e Cia (2014).

O algoritmo foi testado e configurado conforme as necessidades do sistema. Na plataforma Arduino, os comentários são incluídos utilizando “//”. Esses comentários têm como objetivo a definição das rotinas necessárias para cada ação no motor de passo. Na rotina apresentada na Figura 20, é possível perceber qual a finalidade de cada bloco de comando. Primeiramente, foi utilizada a biblioteca *CustomStepper.h*. Essa biblioteca possibilita a utilização de funções necessárias para o controle do motor de passo utilizado. Logo após foram inseridos os parâmetros iniciais de ligação do motor de passo. Em síntese, define as entradas e saídas para portas analógicas e digitais, número de passos por rotação, velocidade das rotações e sentido das rotações. Em seguida, foi definida a velocidade motor em RPM e o número de passos por rotação que correspondem a 12 e 4075.7728395. Com essas configurações realizadas, é necessário definir as variáveis mais importantes do projeto:

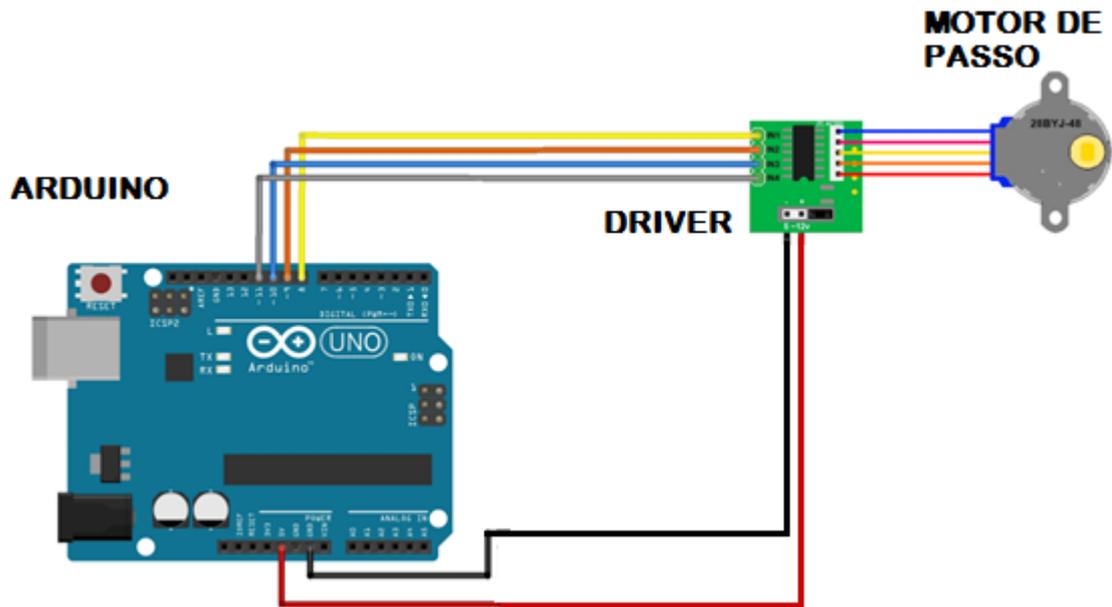
Intervalo de acionamento, sentido de rotação e ângulo de rotação do motor. De acordo com a ideia inicial, o intervalo de acionamento foi definido como 2 minutos. O sentido de rotação foi definido como horário (CW), devido ao posicionamento do motor na pá. O ângulo de rotação é o ângulo desejado para alteração do ângulo das conchas da pá e foi definido como 2° . Em suma, o sistema acionará o motor de passo que irá realizar uma rotação de 2° e ficará 2 minutos inativo. Após este tempo inativo, o motor realiza outra rotação de 2° e volta a ficar inativo por mais 2 minutos. Essa rotina é realizada até o somatório da variação dos ângulos ser de 60° , realizada em 30 minutos. Após os testes de operação do motor não conectado a pá, foram acopladas ao eixo do motor de passo duas placas metálicas que servem para a movimentação das pás da turbina. Em resumo, o eixo do motor de passo gira e as placas entram em contato com a pá, alterando o ângulo da pá conforme a configuração do algoritmo.

3.8 Montagem do sistema eletromecânico

O sistema eletromecânico é formado por um microcontrolador Arduino, um driver ULN2003, um motor de passo 28byj-48 e a pá projetada.

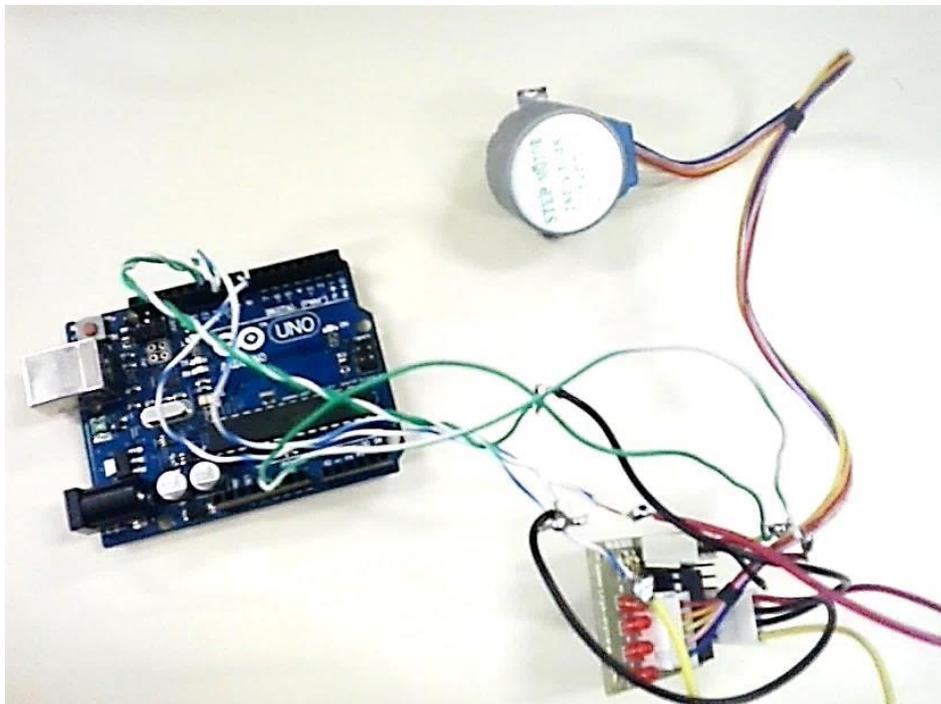
Primeiramente, foi conectado o microcontrolador Arduino em um computador. O aplicativo Arduino foi acessado e adicionado o algoritmo explicitado na Figura 20. Logo foi compilado o algoritmo e a função desejada foi executada pelo microcontrolador. Após, foi conectado o microcontrolador, o driver e o motor de passo conforme Figuras 21 e 22.

Figura 21 - Esquema de ligação motor de passo/microcontrolador Arduino/driver.



Fonte: Arduino e Cia (2014).

Figura 22 - Sistema eletromecânico projetado.

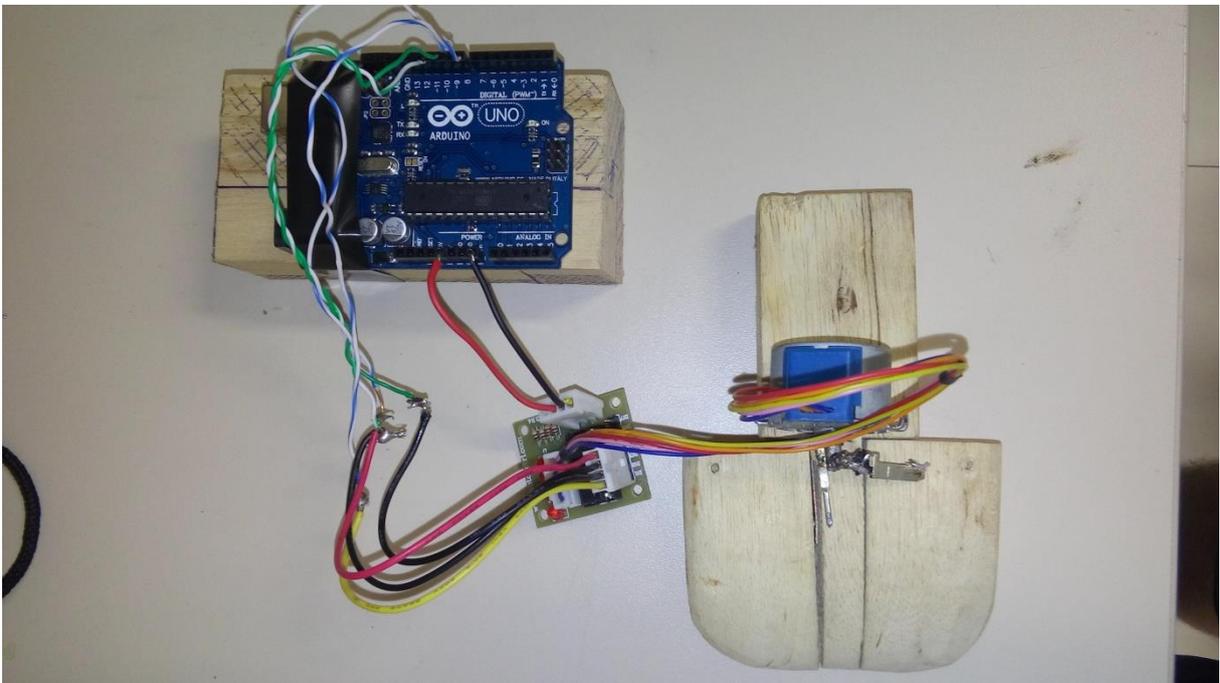


Fonte: O autor (2015).

3.9 Fixação do sistema eletromecânico na pá

Após este esquema de ligação ser realizado, foi fixado o motor de passo na parte traseira da pá, deixando as placas metálicas adicionadas no eixo do motor de passo em contato com as conchas da pá, conforme Figura 23. As placas metálicas devem ser posicionadas da seguinte forma: uma placa em contato com a parte externa da concha e a outra na parte interna da outra concha. Deve-se ter atenção na rotação do motor (anti-horário ou horário) e na posição das placas, pois são elas que proporcionam o movimento das pás.

Figura 23 - Sistema eletromecânico conectado na pá.



Fonte: O autor (2015).

O motor de passo conectado a pá foi posicionado na região oposta à região de ataque da água. Essa localização possibilita ao eixo do motor de passo girar quantos graus forem necessários e diminuir o impacto da água no motor de passo.

Para a fixação da pá em um eixo para teste foram utilizados, além da pá, uma barra de alumínio de 6 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento, dois rolamentos 6 mm x 22 mm, parafusos e peças de inox utilizadas para fixação da composição eixo/pá/rolamento em um módulo de testes existente nas dependências da Universidade Federal do Pampa – Campus Bagé, na sala 2105. Como o módulo é composto por um rotor e as pás, foi necessária a

retirada das pás e a imobilização do rotor, conforme Figura 24. Como o estudo é referente a variação de potência mecânica em relação a alteração do ângulo das conchas, o módulo tem como utilidade principal a fixação da pá projetada e o anteparo para evitar que a água que colide com a pá seja expulsa para fora do módulo. No rotor do módulo de testes, que possui 140 mm de diâmetro, foi conectado um rolamento fixado em uma placa de inox, conforme Figura 25, para fixação de uma das extremidades do eixo com a pá para estudo, de acordo com a Figura 26. Na outra extremidade do eixo, outro rolamento foi conectado e fixado em peças de inox, visando à estabilidade do eixo que, posteriormente, foram retiradas, pois a placa de inox aplicava uma carga não desejada no eixo. Logo, optou-se por conectar o eixo em um furo de 10 mm de diâmetro na cobertura de acrílico, reduzindo a carga no eixo. As peças de inox foram retiradas de sucatas eletrônicas e fixadas na carcaça do módulo de testes. Em cada extremidade do eixo foi adicionado borrachas para vedação. A montagem completa está representada na Figura 27. A Figura 28 mostra a vista superior do sistema montado.

Figura 24 - Retirada das pás para uso do rotor.



Fonte: O autor (2015).

Figura 25 - Rotor imobilizado conectado ao conjunto rolamento/placa de inox.



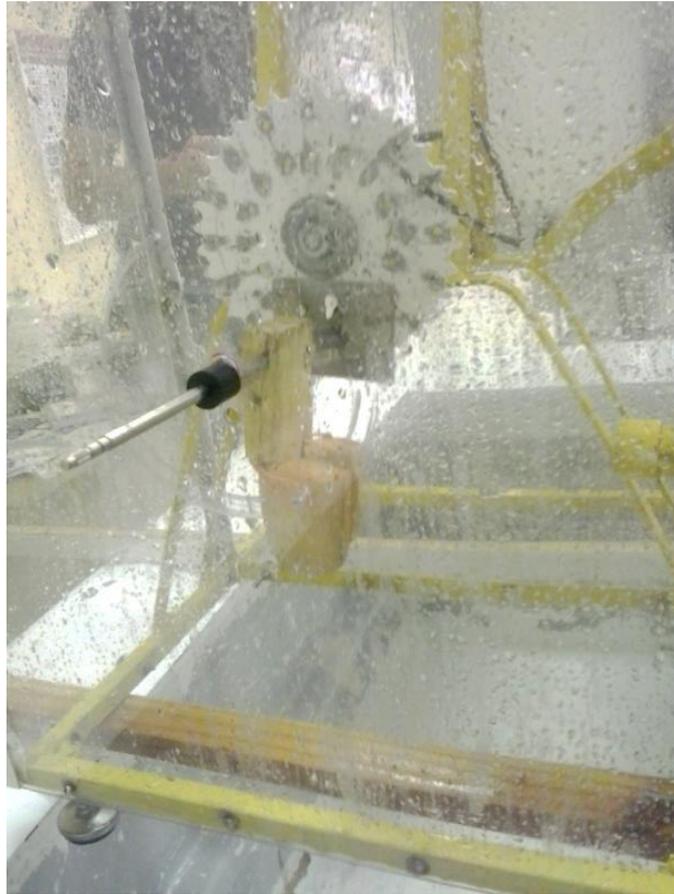
Fonte: O autor (2015).

Figura 26 - Conjunto eixo/pá conectado ao rotor imobilizado.



Fonte: O autor (2015).

Figura 27 - Sistema manual.



Fonte: O autor (2015).

Figura 28 - Sistema manual - Vista superior.



Fonte: O autor (2015).

3.10 Ensaios

Foram realizados dois ensaios visando obter o perfil de velocidade e a potência mecânica correspondente a cada alteração no ângulo das conchas da pá. Fatores como torque e vazão não foram levados em consideração, pois os ensaios se dão com as mesmas condições de torque, pressão e vazão. O torque foi definido em 0.003N.m, pressão de 2200 psi e vazão de $8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Os ensaios seriam realizados utilizando o sistema completo acoplado ao rotor. Porém, devido ao mau funcionamento do motor de passo resultante de problemas de vedação, o sistema completo teve suas funções comprometidas e somente os passos 1 e 2 do ensaio foi realizado. Os ensaios seriam realizados da seguinte maneira:

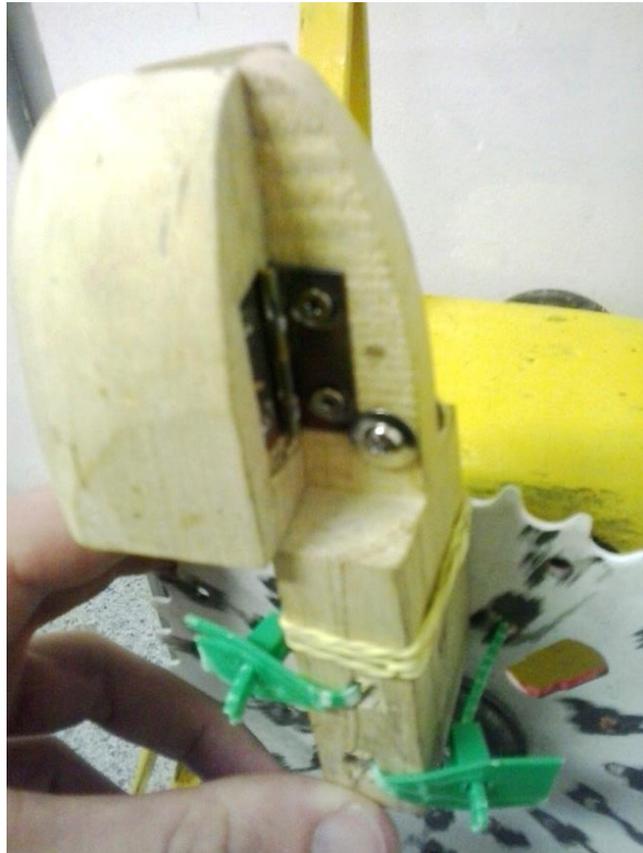
1. O motor de passo é conectado ao driver e plataforma Arduino;
2. O injetor é aberto, lançando água em direção as conchas da pá;
3. A plataforma Arduino deve ser conectada ao computador para controle;
4. Utilizar um Tacômetro Estroboscópico Digital para obtenção das rotações do eixo de alumínio;
5. A cada 2 minutos, o ângulo de inclinação das conchas da pá sofre incremento de 2 graus em cada concha. O monitor serial do Arduino mostrará em qual ângulo está inclinada as conchas da pá;
6. Os valores da rotação do eixo devem ser coletados para cada ângulo de inclinação;
7. O ensaio é finalizado quando o ângulo variado de cada concha for igual a 60 graus.

Com o sistema eletrônico inoperante, foi necessária a implantação de um sistema manual para realização dos ensaios. A utilização de um sistema manual, composto por parafusos, para auxiliar na abertura e fechamento das conchas da pá se fez necessário pelo baixo custo e fácil instalação. Entretanto, a precisão na abertura das conchas, em relação ao sistema eletrônico, é inferior devido a erros do operador e limitação do sistema mecânico. Além disso, a abertura e fechamento das conchas ocorreram de maneira totalmente manual. Logo, os ensaios foram realizados da seguinte maneira:

1. Foram inseridos parafusos entre as conchas e a região *dz*, na parte traseira da pá conforme Figura 29;

2. Conforme os parafusos foram desenroscados, as conchas sofreram variação no ângulo de abertura;
3. Com o uso de um transferidor, foi fixado o ângulo desejado para cada ensaio;
4. Foi definida uma variação de 5° no ângulo das conchas da pá;
5. Cada ensaio foi finalizado quando o ângulo variado das conchas da pá estivesse em 60° .

Figura 29 - Pá com parafusos adicionados para regulagem de inclinação das conchas.



Fonte: O autor (2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, o *design* da pá foi obtido mediante a definição do diâmetro do jato do bico injetor. Com o diâmetro definido como 2 cm, a pá foi projetada de acordo com as Equações 3, 4, 6 e 7. Os cálculos para obtenção do *design* da pá foram realizados utilizando o *software* MATLAB 7.6. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Dimensões da pá projetada.

Região da pá	Comprimento, em m, para $d_{\text{jato}} = 0,020$ m
E para 3,5	0,018
E para 4,0	0,024
L para 2,5	0,050
L para 2,8	0,056
t para 0,8	0,016
t para 1	0,020
B para 3,5	0,070
B para 4,0	0,080

Fonte: O autor (2015).

Para confecção da pá foram utilizados os valores máximos encontrados para as regiões *E*, *L*, *T* e *B*.

A Tabela 10 contém os resultados relacionados ao ensaio com sistema manual, mostrando os valores obtidos para velocidade em relação ao ângulo de inclinação das conchas da pá.

Tabela 10 - Rotação obtida com sistema manual em relação à alteração do ângulo de cada concha da pá, em graus.

Ângulo de inclinação de cada concha da pá, em graus	Rotação, em RPM		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
5	798	774	786 ± 12
10	818	782	800 ± 18
15	853	917	885 ± 32
20	774	718	746 ± 28
25	833	822	826 ± 6
30	807	823	815 ± 8
35	819	835	827 ± 8
40	788	779	784 ± 5
45	777	750	764 ± 14
50	750	781	766 ± 16
55	738	680	709 ± 29
60	610	623	617 ± 7

Fonte: O autor (2015).

Com base nos dados de velocidade em função da variação do ângulo em cada concha da pá, foi realizada a rotina para obtenção da potência mecânica dos ensaios (Figura 30) utilizando as Equações 1 e 2 (Seção 2.6.1.1) através do *software* MATLAB 7.6. Como o rotor foi imobilizado e somente o eixo com a pá possuiu velocidade angular, o valor utilizado como raio do rotor foi de 3 mm, que corresponde ao valor do raio do eixo. Os valores referentes à potência mecânica em relação ao ângulo de inclinação da concha de uma pá podem ser observados na Tabela 11.

Figura 30 - Rotina em *software* Matlab para obtenção das potências e plotagem de gráficos.

```

1 %Rotina para obtenção de potência mecânica
2 - r= 0.003 %raio do eixo
3 - Torque= r*1 %Torque
4 - ang= [5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60] %Ângulo de variação para cada concha da pá
5 - N1= [798 818 853 774 833 807 819 788 777 750 738 610] %Rotações referentes ao Ensaio 1
6 - N2= [774 782 917 718 822 821 835 779 750 781 680 623] %Rotações referentes ao Ensaio 2
7 - Nmedio= [786 800 885 746 828 815 827 784 764 766 709 617] %Média das rotações nos Ensaios 1 e 2
8
9 - P1= (2*pi*Torque*N1)/60 %Cálculo para potência mecânica referente ao Ensaio 1
10 - P2= (2*pi*Torque*N2)/60 %Cálculo para potência mecânica referente ao Ensaio 2
11 - Pmedio= (2*pi*Torque*Nmedio)/60 %Cálculo para potência mecânica referente a média dos Ensaios 1 e 2
12
13 - plot(ang,Pmedio)
14 - xlabel('Ângulo de inclinação de cada concha da pá, em graus')
15 - ylabel('Potência mecânica no eixo, em W')
16
17

```

Fonte: O autor (2015).

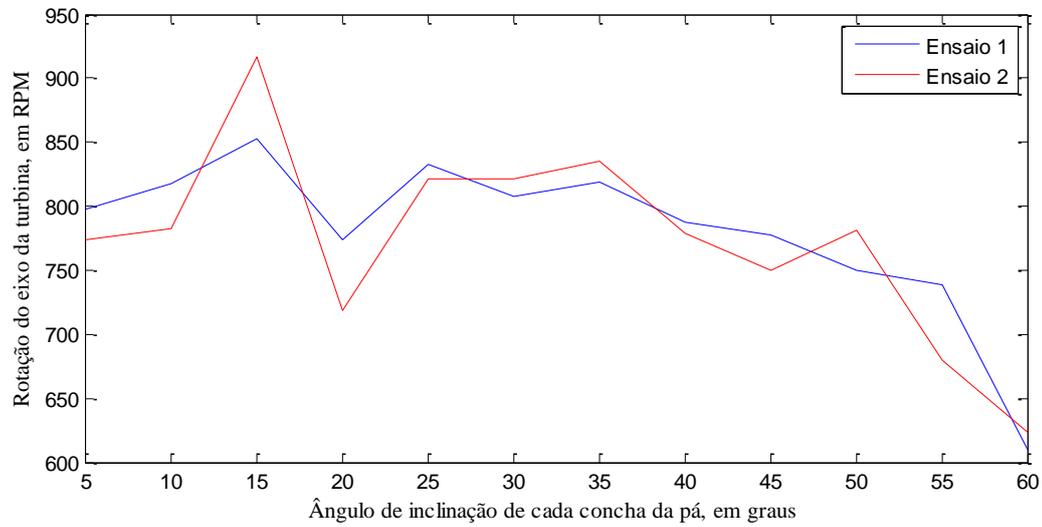
Tabela 11 – Potência mecânica obtida com sistema manual em relação à alteração do ângulo de cada concha da pá, em graus.

Ângulo de inclinação de cada concha da pá, em graus	Potência mecânica, em W		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
5	0,2507	0,2432	0,24695 ± 0,0038
10	0,2570	0,2457	0,25135 ± 0,0056
15	0,2680	0,2881	0,27805 ± 0,0100
20	0,2432	0,2256	0,2344 ± 0,0088
25	0,2617	0,2582	0,25995 ± 0,0017
30	0,2535	0,2579	0,2557 ± 0,0022
35	0,2573	0,2623	0,2598 ± 0,0025
40	0,2476	0,2447	0,24615 ± 0,0014
45	0,2441	0,2356	0,23985 ± 0,0042
50	0,2356	0,2454	0,2405 ± 0,0049
55	0,2318	0,2136	0,2227 ± 0,0091
60	0,1916	0,1957	0,19365 ± 0,0020

Fonte: O autor (2015).

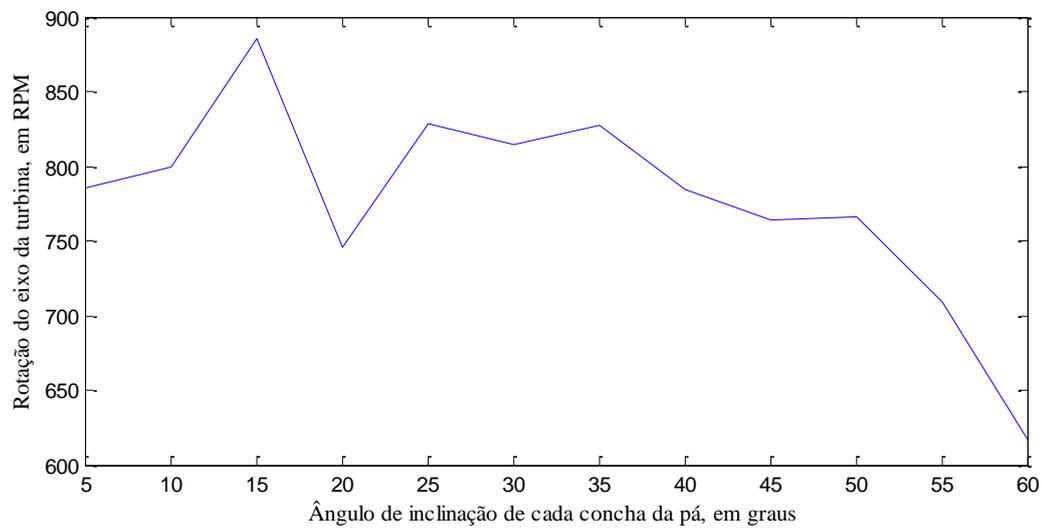
Foram obtidos gráficos que mostram o comportamento da velocidade da pá em relação à variação do ângulo em cada concha da pá para os ensaios 1 e 2 (Figura 31). A Figura 32 mostra a curva contendo as velocidades médias entre os ensaios para cada ângulo de inclinação. A variação de potência mecânica para os ensaios 1 e 2 podem ser visualizadas na Figura 33 e para a potência média dos ensaios na Figura 34.

Figura 31 - Relação entre rotação do eixo da pá e ângulo de inclinação de cada concha da pá referente aos ensaios 1 e 2.



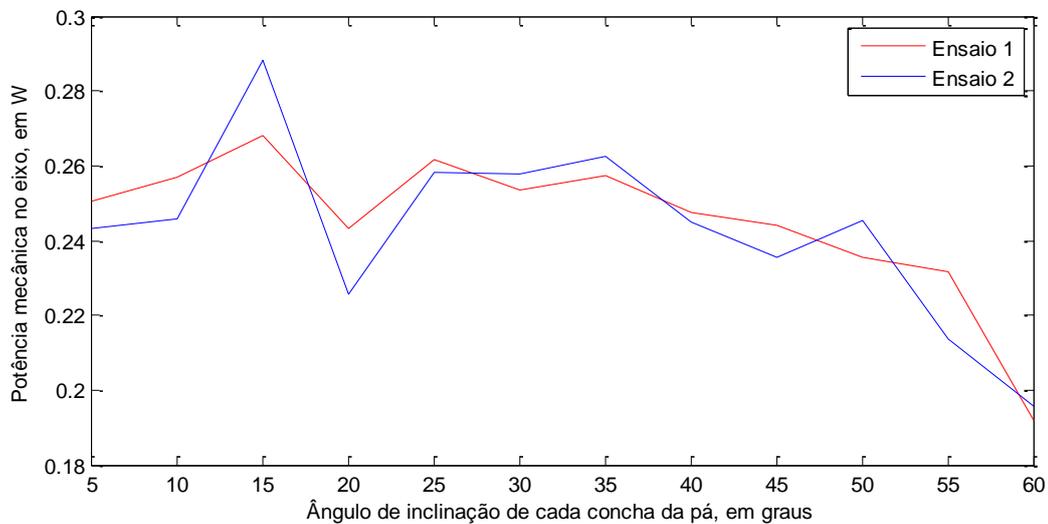
Fonte: O autor (2015).

Figura 32 - Relação entre rotação do eixo e ângulo de inclinação de cada concha da pá, referente às velocidades médias.



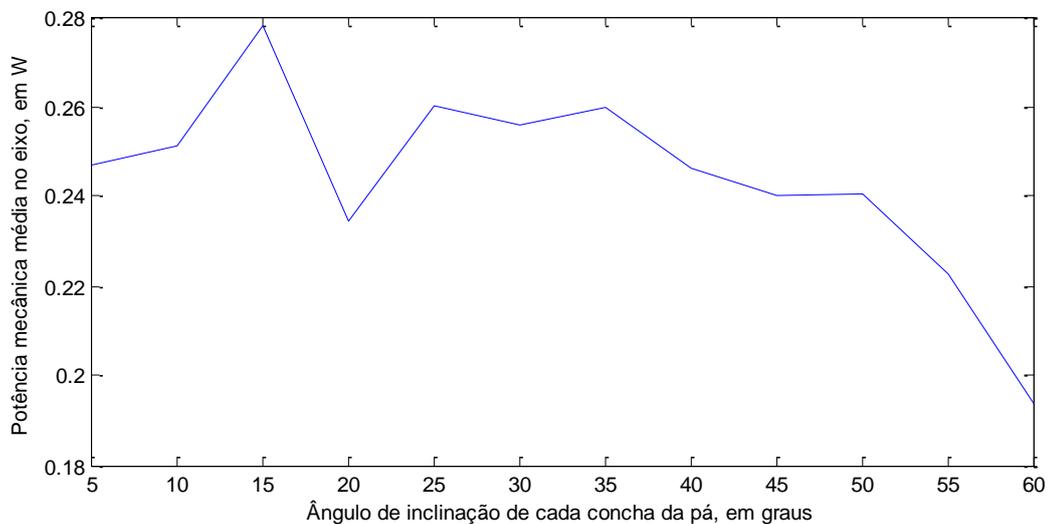
Fonte: O autor (2015).

Figura 33 - Relação entre potência mecânica do eixo e ângulo de inclinação de cada concha da pá, referente aos ensaios 1 e 2.



Fonte: O autor (2015).

Figura 34 - Relação entre potência mecânica do eixo e ângulo de inclinação de cada concha da pá, referente às potências médias.



Fonte: O autor (2015).

Toda e qualquer melhoria em um sistema de geração de energia hidrelétrica é válida. Nos dias atuais, com a baixa no regime das chuvas e a seca em várias represas, melhorias para obter-se mais potência na saída da turbina utilizando-se o mesmo fluxo de entrada, se torna essencial para evitar períodos de racionamento de energia elétrica.

A alteração no ângulo das conchas da pá teve efeito direto na obtenção da potência mecânica da eixo. Esta potência é diretamente proporcional à carga aplicada no eixo e a

velocidade de rotação do eixo. A análise da potência mecânica foi realizada com a carga constante no eixo da pá observando-se a variação da velocidade. Em resumo, a alteração do ângulo implicou na alteração da velocidade do eixo da pá, que sofreu um acréscimo, aumentando a potência do eixo.

Mesmo apresentando baixo custo, o sistema se mostrou estável e confiável do ponto de vista de projeto, pois respondeu positivamente a todas as variações de ângulo, velocidade, tempo de inatividade e sentido de rotação para o qual foi testado na pá não operando na água. Entretanto, foi falho em operação na água devido a problemas estruturais em um dos componentes. O motor de passo mostrou-se ineficaz quando submetido a pressão de água devido há problemas na carcaça, havendo entrada de água no motor e danificando o mesmo. A utilização dos equipamentos pelo usuário implica em erros de medição comuns aos projetos. O uso do tacômetro estroboscópico podem propiciar erros na medição devido à presença de harmônicas. A inclinação do jato d'água, oriundo do sistema injetor, teve de ser alterado devido a adequação de uma bomba d'água de maior potência, sendo uma possível fonte de erro.

Como a pá foi confeccionada em madeira, ocorreu absorção de água aumentando a massa da pá. Logo, essa é outra possível fonte de erro devido ao fato que a massa da pá variou durante os ensaios. Pás metálicas tendem a ser impermeáveis, não havendo incremento na massa da pá. Entretanto, o preço médio de uma pá metálica está em torno de R\$1.500,00. Devido ao alto custo não foi implementado este material na pá.

Em geral, o ângulo das conchas das pás utilizado em turbinas Pelton está entre 0° e 5° . Porém, por meio dos ensaios propostos, foi obtida para 5° de inclinação das conchas da pá as velocidades máximas de 0,2507 rpm e 0,2432 rpm para os ensaios 1 e 2 respectivamente, conforme Figura 31, e velocidade média de 0,24695 rpm, conforme Figura 32. A potência média de 0,24695 W foi encontrada para o ângulo de 5° , como pode ser visto na Figura 33. O valor para 5° não representa o valor médio máximo. Isso se deve ao fato de que a água, ao colidir com a pá, transfere energia e escoar para fora da pá com pouca dificuldade. Entretanto, no momento da colisão da água com a pá a energia transferida não é máxima, devido ao ângulo de incidência da água na inclinação da concha da pá.

De acordo com os dados obtidos, o valor para 5° representa uma potência mecânica 10,3% abaixo da potência máxima obtida. A potência máxima foi de 0,27805 W, obtida com ângulo de cada concha de 15° , conforme pode ser visto na Figura 33. Isso implica que a inclinação das conchas da pá possui influência na potência mecânica devido especialmente a saída da água da pá. Ou seja, a água colidindo em um ângulo de 15° é escoada para fora da pá

com maior facilidade em relação aos outros ângulos. Antes de ser escoado, o jato d'água transferiu grande parte da sua energia para a pá.

Se o ângulo das conchas da pá é próximo a 60° , implica que a água colide na pá, transfere energia para a mesma e, ao invés de escoar com facilidade para fora da pá, é direcionada novamente para outra região da concha, mas em sentido contrário, reduzindo a velocidade do eixo e sua potência.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, podemos afirmar que o melhor ângulo de inclinação para as conchas da pá de turbina Pelton, dentro destas condições de vazão e torque, é de 15° , cuja rotação média correspondente é de 885 rpm. O acréscimo de velocidade em relação ao ângulo de 5° , que é o menor ângulo de cada concha da pá, foi de aproximadamente 99 rpm. Em relação a potência mecânica, para 15° , foi obtido valor máximo de 0,2881 W. O valor máximo de potência mecânica média foi de 0,27805 W, equivalente ao acréscimo de 10,8% em comparação ao ângulo de 5° .

A flutuação de valores obtidos nos ensaios se deve a erros do usuário, readequações realizadas de componentes do sistema injetor e variação de massa da pá devido a absorção de água pela mesma.

A segunda etapa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC II) apresentou grande funcionalidade, resultados satisfatórios e baixo custo, tornando uma alternativa rentável para aplicação em grandes instalações hidrelétricas, salvo o incremento de materiais de maior resistência para mover pás de massa maior e implementação de motores maiores e com blindagem eficaz. O uso de sistema manual possibilitou a realização dos ensaios, porém com uma precisão inferior ao ensaio com sistema eletrônico. Entretanto, foi possível avaliar o impacto do incremento no ângulo das conchas da pá, porém com um erro sistemático aplicado em todos os ensaios.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A implementação de um sistema eletromecânico possui uma maior precisão no ajuste do ângulo das conchas da pá, além de ser de fácil configuração para a variação de ângulo necessária. A obtenção de materiais de melhor confiabilidade é fator fundamental para a implementação de um sistema como esse, especialmente em usinas hidrelétricas onde uma parada emergencial resulta em prejuízo financeiro, movimentação de efetivo e não suprimento da demanda de energia da qual foi designada. A alteração no ângulo das conchas de uma pá resultou em aumento da potência mecânica. Um estudo sobre um sistema eletromecânico responsável pelo controle de todas as pás, de maneira integrada, de baixo custo, sendo possível a alteração do ângulo da pá de acordo com a vazão em tempo real, proporcionando o acréscimo de potência no eixo, proporcionaria aos fabricantes de turbinas e componentes de controle de usinas hidrelétricas uma oportunidade de termos usinas eficientes, gerando maior potência com o mesmo impacto ambiental. O aumento da produção das usinas hidrelétricas corresponderia a não necessidade de construção de outras tantas usinas hidrelétricas ou termelétricas. Isso reduziria os gastos públicos e evitaria o impacto ambiental na instalação e operação de uma usina. Esse sistema eletromecânico pode ser aplicado tanto em turbinas Pelton como Francis, Kaplan, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDABÓ, Ricardo Lopez. **Energia Eólica**. 1. ed., São Paulo:Artliber, 2002.

AGAR D., RASI M. On the use of a laboratory-scale Pelton wheel water turbine in renewable energy education. **Renewable Energy**, v. 33 p. 1517-1522, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA), **Atlas Brasil: Abastecimento de água no Brasil**. Brasília. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), **Atlas da Energia Elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro. 2014.

ARDUINO, **Arduino Uno**. Disponível em: <<http://www.arduino.cc>> Acesso em 20 jan 2015, 03:14:09.

ARDUINO E CIA, **Esquema de montagem**. Disponível em: <<http://www.arduinoocia.com.br/2014/04/controlando-motor-de-passo-28byj-48.html>> . Acesso em 2 jan 2015, 13:13:12.

_____. **Algoritmo de motor de passo**. Disponível em: <<http://www.arduinoocia.com.br/2014/04/controlando-motor-de-passo-28byj-48.html>>. Acesso em 2 jan 2015, 13:13:12.

BENTES, Leandro M. A., **Sistema de Segurança Veicular com Uso de GPS Baseado em Arduino**, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2013.

BP, Group. **Statistical Review of World Energy**, 64. ed.UK. Pureprint Group Limited, 2014.

ELETROBRAS, **Diretrizes para Projeto de PCH**. Rio de Janeiro. 2008.

FERREÑO, D., ÁLVAREZ, J.A. RUIZ, E., MÉNDEZ D., RODRÍGUEZ, L., HERNÁNDEZ, D. Failure analysis of a Pelton turbine manufactured in soft martensitic stainless steel casting. **Engineering Failure Analysis**, v.18, p. 256-270, 2011.

FOX, Robert W. *et al.*. **Introdução à Mecânica de Fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro. LTC. 2006.

FLÓREZ, Ramiro Ortiz. **Pequenas Centrais Hidrelétricas**. 1. ed. São Paulo. Oficina de Textos. 2014.

HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de Fluido**. 3. ed. Santa Maria. Editora UFSM, 2012.

HINRICHS, Roger A. Kleinbach *et. al.*... **Energia e Meio Ambiente**. 1. ed. São Paulo. 2011.

JUSTUS, J. O. Machado *et. al.*. **Geomorfologia – Levantamento de Recursos Naturais**, Rio De Janeiro, IBGE, 199.

KU, **Pelton Blade**, Disponível em: <<http://www.ku.edu.np/>> Acesso em 11 fev 2015, 12:16:11.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2. ed. São Paulo. LTC. 1987.

MOLIN, A. D. **Anteprojeto de pequena central hidrelétrica para o rio toropi**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

MONSALVE, Ismael Suescún. **Turbinas hidráulicas**. Disponível em: <<http://www.actiweb.es/jlriveras/centraleshidroelectricas.html>> Acesso em 11 fev 2015, 15:02:45.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), **Operação do Sistema Interligado Nacional**. Rio de Janeiro. 2009.

OLESKOWICZ, Bruno Alexandre *et. al.*, **Utilização de Controle Numérico Computadorizado para Fabricação de Turbinas Pelton de Baixas Potências**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

OST, Ana Paula *et. al.*. **Dimensionamento e Modelagem de um Rotor de Turbina Pelton para ser Aplicado em uma Bancada Didática**. Faculdade Horizontina. 2013.

POWER ALTONA. **Concha Rotor Pelton**. Disponível em: <http://www.power.altona.com.br/uploads/produtos/139/Concha_Rotor_Pelton_-_132k_copy.png>. Acesso em: 03 jan. 2015, 02:58:43.

PRAKASHI, Shesha, **Hydraulics and Hydraulics Machines**. Disponível em: <http://elearning.vtu.ac.in/P6/enotes/CV44/Pel_Whe-MNSP.pdf> . Acesso em: 18 dez. 2015, 11:11:10.

ROBOCRAFT. **Datasheet 28BYJ-48**. Disponível em: <<http://robocraft.ru/files/datasheet/28BYJ-48.pdf>> . Acesso em: 03 jan 2015, 14:23:10.

SANTOS, Sergio Lopes dos, **Bombas e Instalações Hidráulicas**. 1. ed. São Paulo. LCTE. 2007.

SANTOS, A. I. C. **Análise dos procedimentos para implantação de pequenas centrais hidrelétricas no estado do Tocantins: estudo de caso na bacia do rio palmeiras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

STREETER, Victor L.; E. Benjamin Wylie. **Mecânica dos Fluídos: máquinas de fluxo**. São Paulo. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1982

SINGAL, R. K. Muridul; Rishi Singal. **Hydraulic Machines**. International Publishing Hause. India, 2009

TECQUIPMENT. **Pelton Wheel H19 Datasheet**. UK.2008.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet ULN2003**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2003a.pdf>>. Acesso em 01 jan 2015, 18:12:10.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho, **Bombas Funcionando Como Turbinas**. 1. ed. ACTA, Itajubá. 2012.

VOITH. **Kaplan Turbines**. Disponível em <http://www.voith.com/en/2013-05-27_voith_kaplan_turbines.pdf>. Acesso em: 03 jan 2015, 02:40:20.

_____. **Francis Turbines**. Disponível em <http://voith.com/en/2013-05-27_voith_francis_turbines.pdf>. Acesso em: 03 jan 2015, 02:45:10.

_____. **Pelton Turbines.** Disponível em < http://voith.com/en/2013-05-27_voith_pelton_turbines.pdf>. Acesso em: 03 jan 2015, 02:50:55.