

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALISON BAENA DE OLIVEIRA MONTEIRO  
RICARDO RIBEIRO DOS SANTOS**

**ESTUDO DE APLICAÇÃO DA TURBINA DE TESLA COMO  
MICROGERADOR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2019**

**ALISON BAENA DE OLIVEIRA MONTEIRO  
RICARDO RIBEIRO DOS SANTOS**

**ESTUDO DE APLICAÇÃO DA TURBINA DE TESLA COMO  
MICROGERADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELT), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Elói Rufato Junior

**CURITIBA**

**2019**

Alison Baena de Oliveira Monteiro  
Ricardo Ribeiro dos Santos

## Estudo de Aplicação da Turbina de Tesla como Microgerador

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 02 de julho de 2019.

---

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Dr  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### **ORIENTAÇÃO**

---

Elói Rufato Junior, Dr  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Cesar Eduardo F. Castañeda, Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Roberto Candido, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dedico este trabalho à minha família, especialmente ao cerne e amálgama, que nos ensinou união, honra, ética, simplicidade, respeito e caridade, à Lazara Remer Baena, minha querida avó, que sempre se faz presente em nossos corações.

Alison Baena de Oliveira Monteiro

Dedico este trabalho à minha família, pela sabedoria compartilhada para seguir nesta empreitada.

Ricardo Ribeiro dos Santos

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por estar sempre presente em minha vida, iluminar meus pensamentos, caminho e ações, e por abençoar minha vida com uma família tão peculiar e unida, que tanto amo e respeito. Meus pais, meus irmãos, sou grato por tê-los sempre comigo e terem me proporcionado concluir essa linda etapa da minha vida.

Agradeço aos professores orientadores Antônio Ivan Bastos Sobrinho e Elói Rufato Junior, por nos acolher como seus orientandos, e com muita dedicação e paciência entregaram dias e madrugadas, nos direcionando, para a construção deste trabalho.

Agradeço à minha noiva por sua paciência, carinho, dedicação e amor. E à meus sogros, por desde o princípio terem me acolhido como mais um filho em sua casa.

Agradeço, também, aos amigos e colegas Eng. César Ricardo Hübsch, Eng. Erison Carlos Oliveira, Eng. Matheus Brati Rossetto, Téc. Albari Soares Mendes e Gabriel Remes pela amizade, envolvimento, por todo apoio técnico e suporte prestado.

E, por fim, agradeço aos incontáveis amigos que de perto, e de longe, me estenderam as mãos nas dificuldades, com sábios conselhos trouxeram luz.

Todos vocês foram fundamentais para minha conquista do meu sonho, meus mais sinceros agradecimentos.

Alison Baena de Oliveira Monteiro

Agradeço a Deus por acompanhar em todos os momentos e dar forças. Aos meus pais pelo amor e todo apoio, entre outros familiares e amigos, por sua companhia e compreensão.

Agradeço a Professores orientadores Antônio Ivan e Elói Rufato por sua dedicação e conhecimento fornecido ao longo do trabalho. E a todos os outros professores que contribuíram na formação profissional.

Agradecimento em especial a todos que contribuíram direto e indiretamente nesta jornada. Obrigado!

Ricardo Ribeiro dos Santos

Em todo o espaço há energia... é (só) uma questão de tempo até que os homens tenham êxito em associar seus mecanismos ao aproveitamento desta energia.

(TESLA, Nikola, 1856 -1943)

## RESUMO

Monteiro, Alison B. de O.; Santos, Ricardo R. dos. **Estudo De Aplicação Da Turbina De Tesla Como Microgerador**. 2019. 106 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado e Licenciatura em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A busca e utilização de fontes de energias renováveis tem apresentado grande crescimento nos últimos anos, e tal desenvolvimento trouxe consigo a microgeração distribuída e seus desafios. Sob este viés, o presente trabalho traz a proposta de mais uma fonte renovável a ser aproveitada, com o emprego de uma turbina pouco usual na geração de energia elétrica. Aqui serão apresentados os estudos que abordam o projeto e avaliação de uma Turbina de Tesla aplicada à microgeração distribuída. Para tal, primeiramente foi pesquisado a tendência de crescimento da demanda energética e a contribuição de fontes renováveis, sendo a microgeração a maior representante destas fontes. Foram abordados os aspectos construtivos dos modelos de turbinas consagradas, para efetuar um paralelo com a Turbina de Tesla e destacar suas diferenças estruturais e dinâmicas. Diferentes autores vêm estudando a Turbina de Tesla, e destacando várias características relevantes como a facilidade de montagem, a versatilidade de aplicação e o baixo custo de produção e manutenção da turbina. Os aspectos citados são de grande importância para atender as demandas de sistemas de microgeração, bem como para o desenvolvimento de um produto para este público. Para projetar a turbina buscou-se um parâmetro inicial, um valor de vazão média, expresso em litros por minuto. Esta informação foi obtida por meio do levantamento de consumo de água de dois condomínios residenciais. A partir da metodologia empregada por diferentes autores, foi projetada e montada uma Turbina de Tesla para a execução de ensaios e levantamento de dados empiricamente. Os ensaios ocorreram com a aplicação dos valores médios de vazão, simulando os valores oriundos da pesquisa de consumo, para a avaliação de desempenho da Turbina tendo um gerador de ímãs permanentes acoplado a ela. Foi obtida uma baixa potência de geração sobre as cargas analisadas, 14 W sobre o resistor de 5 Ohms, e 20 W para o resistor de 50 Ohms, mas podendo ser elevada ao contornar as dificuldades apontadas. Desta forma, a inovação apresentada neste trabalho consiste na abertura de exploração de fontes de força motriz disponível no sistema de abastecimento de água, e outros sistemas hídricos que forneçam vazão suficiente para a geração em pequeno potencial. Os ensaios ocorreram na cidade de Curitiba, Paraná, no ano de 2019.

**Palavras-chave:** Turbina de Tesla. Microgeração distribuída. Hidro turbina. Fontes renováveis. PMSM (*Permanent magnet synchronous motor*).

## SUMMARY

Monteiro, Alison B. de O.; Santos, Ricardo R. dos. **Tesla Turbine Application Study As A Micro Generator**. 2019. 106 pages. Bachelor's degree in Electrical Engineering - Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2019.

The search for and use of renewable energy sources has shown a great growth in recent years, and the development of a distributed microgeneration and its challenges. On this bias, the present work brings a proposal of a renewable source to be used, with the use of a more unusual turbine in an electric power generation. Here will be presented the studies that addressed the project and evaluation of a Tesla turbine applied to the distributed microgeneration. It was first investigated the trend of growth in energy demand and the contribution of renewable sources, with microgeneration being the largest representative of these sources. The constructive aspects of established turbine models were addressed, to make a parallel with the Tesla Turbine and highlight their structural and dynamic differences. Different authors have been studying the Tesla Turbine for several relevant features such as ease of assembly, application versatility, and low turbine production and maintenance costs. These aspects are of great importance to meet the demands of microgeneration systems, as well as for the development of a product for this public. To design the turbine, an average flow value, expressed in liters per minute was used as an initial parameter. This information was obtained through the survey of water consumption of two residential condominiums. Based on the methodology used by different authors, a Tesla Turbine was designed and assembled for the execution of tests and empirical data collection. The experiments were carried out with the application of the mean values of flow, simulating the values from the research of consumption. To evaluate the performance of the Turbine, a permanent magnet generator was coupled to it. The innovation presented in this work consists of the exploration of sources of driving force available in the water supply system, and other water systems that provide sufficient flow for a small potential generation. The tests were carried out in the city of Curitiba, Paraná, in the year 2019.

**Keywords:** Tesla Turbine. Distributed microgeneration. Hydro turbine. Renewable sources. PMSM (*Permanent magnet synchronous motor*).



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - "World Primary Energy Use" .....	25
Figura 2 - Turbina Pelton (quedas d'água de 30 a 120 m). .....	32
Figura 3 - Turbina Pelton, alocação Vertical.....	32
Figura 4 - Central Hidrelétrica (turbina Pelton). .....	33
Figura 5 - Turbina Francis. ....	34
Figura 6 - Turbina Kaplan.....	35
Figura 7 - Turbina Bulbo.....	36
Figura 8 – Máquina Síncrona Trifásico 2 polos. ....	38
Figura 9 - Gerador, 2 Polos Liso. ....	39
Figura 10 – Gerador - 2 polos Salientes.....	39
Figura 11 - Rotor CA Assíncrono. ....	40
Figura 12 - Gerador CA Assíncrono anéis.....	40
Figura 13 - Detalhes Construtivos dos Rotor.....	41
Figura 14 – Detalhes Construtivos dos Estator. ....	41
Figura 15 – Diagrama de Ligação de Campo.....	42
Figura 16 – Diagrama da Máquina CC e Curva de Magnetização. ....	43
Figura 17 - Turbina de Tesla. ....	44
Figura 18 - Turbina de Tesla (corte lateral). ....	45
Figura 19 - Turbina de Tesla (corte frontal). ....	45
Figura 20 - Trajetória do fluido na turbina de Tesla.....	48
Figura 21 - Protótipo de turbina de Tesla. ....	49
Figura 22 - Turbina Tesla-Pelton (1). ....	50
Figura 23 - Turbina Tesla-Pelton (2). ....	50
Figura 24 - Discos (Defasagem de -30°). ....	50
Figura 25 - Discos (Defasagem de +30°). ....	50
Figura 26 - Servo Motor Electro-Craft PN0650.00-020. ....	53
Figura 27 - Servo Motor Maxon Motor Pn.: 2260.88-54. ....	53
Figura 28 - Dados de Placa: Bomba KSB MA-404.....	58
Figura 29 - Dados de Placa: Motor WEG 3.0 kW. ....	58
Figura 30 - Conjunto Moto bomba.....	58
Figura 31 – Hidrómetro. ....	58
Figura 32 - Diagrama do conjunto de equipamentos.....	59
Figura 33 - Vista explodida da Turbina de Tesla. ....	69
Figura 34 - Detalhe bico de injeção e involucro.....	70
Figura 35 - Discos com defasagem de 30°. ....	71
Figura 36 - Disco, vista lateral. ....	71
Figura 37 - Componentes da turbina. ....	71

Figura 38 - Turbina (vista lateral). .....	72
Figura 39 - Turbina (vista frontal). .....	72
Figura 40 - Setup de teste (vista superior). .....	72
Figura 41 - Setup de teste (vista frontal). .....	72
Figura 42 - Torque medido. ....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perdas do sistema (regulatórias e reais).....	19
Tabela 2 - Montante de perdas .....	21
Tabela 3 - Comparativo de geração entre máquinas elétricas. ....	54
Tabela 4 - Consumo de água condomínio 1.....	55
Tabela 5 - Consumo mensal médio (cond. 2 / medidor 1).....	55
Tabela 6 - Consumo mensal médio (cond. 2 /medidor 2).....	56
Tabela 7 - Consumo mensal médio (cond. 2 /medidor 3).....	56
Tabela 8 - Consumo mensal médio (cond. 2 /medidor 4).....	56
Tabela 9 - Consumo mensal médio (cond. 2 /medidor 5).....	57
Tabela 10 - Médias de consumo. ....	57
Tabela 11 - Dados de ensaio: a vazio. ....	74
Tabela 12 - Dados de ensaio: carga 50 $\Omega$ .....	77
Tabela 13 - Dados de ensaio: carga 5 $\Omega$ .....	80
Tabela 14 - CAPACIDADE INSTALADA DA ALEMANHA (GW).....	103
Tabela 15 - GERAÇÃO LIQUIDA ALEMANHA (TWh). ....	103
Tabela 16 - CAPACIDADE INSTALADA DA FRANÇA (GW).....	103
Tabela 17 - GERAÇÃO LIQUIDA FRANÇA (TWh). ....	104
Tabela 18 - CAPACIDADE INSTALADA DA REINO UNIDO (GW).....	104
Tabela 19 - GERAÇÃO LIQUIDA DO REINO UNIDO (TWh).....	104
Tabela 20 - CAPACIDADE INSTALADA DA ARGENTINA (GW).....	104
Tabela 21 - GERAÇÃO LIQUIDA DA ARGENTINA (TWh). ....	105
Tabela 22 - CAPACIDADE INSTALADA DO MÉXICO (GW).....	105
Tabela 23 - GERAÇÃO LIQUIDA DO MÉXICO (TWh).....	105
Tabela 24 - CAPACIDADE INSTALADA DO JAPÃO (GW).....	105
Tabela 25 - GERAÇÃO LIQUIDA DO JAPÃO (TWh) .....	106

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### LISTA DE ABREVIATURAS

TT	Turbina de Tesla.
CC	Corrente Contínua.
CA	Corrente Alternada.
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas.
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas.
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia.
TCC	Trabalho De Conclusão De Curso.
APEB	Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.
CAD	Computer-aided design.
FEM	Força Eletromotriz.
FMM	Força Magneto motriz.

## LISTA DE SIGLAS

$b$	Espaço entre os disco (m).
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido ( $m^2/s$ ).
$\omega$	Velocidade angular do rotor (rad/s).
$n$	Coefficiente de vazão (Adimensional).
$N$	Número de discos (Adimensional).
$\rho$	Massa específica do fluido ( $kg/m^3$ ).
$V$	Velocidade relativa do escoamento (m/s).
$\mu$	Coefficiente de viscosidade dinâmica (Pa/s).
$d$	Diâmetro do duto (m).
$a$	Distância de separação dos disco (m).
$\delta$	Espaçamento entre disco e encapsulamento (m).
$D_{\delta máx}$	Distância máxima (m).
$r_0$	Raio interno fictício (m).
$Re$	Número de Reynolds (Adimensional).
$D$	Diâmetro do Disco (m).
$A$	Área ( $m^2$ ).
$Q_v$	Vazão volumétrica ( $m^3/s$ ).
$\dot{m}$	Vazão mássica (kg/s).
$T_0$	Torque fornecido (N.m).
$T_T$	Torque total (N.m).
$P$	Potência ativa (W).
$\eta$	Rendimento (Adimensional).
$P_{G50\Omega}$	Potência gerada com resistor de $50 \Omega$ (W).
$P_{G5\Omega}$	Potência gerada com resistor de $5 \Omega$ (W).

## LISTA DE ACRÔNIMOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
COPEL	Companhia Paranaense de Energia.
CCEE	Câmara De Comercialização De Energia Elétrica.
ABRACEELI	Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia.
SI	Sistema Internacional.

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Ganho de rotação para comparação da defasagem dos orifícios.....	51
Gráfico 2 - Curva de Tensão a vazio.....	75
Gráfico 3 - Relação Vazão (l/min) x Rotação (rpm) – carga 50 $\Omega$ .....	78
Gráfico 4 - Relação Tensão (V) x Rotação (rpm) – carga 50 $\Omega$ .....	78
Gráfico 5 - Relação Corrente (mA) x Rotação (rpm) – carga 50 $\Omega$ .....	79
Gráfico 6 - Relação Tensão (V) x Vazão (l/min) – carga 50 $\Omega$ .....	79
Gráfico 7 - Curva de potência - carga 5 $\Omega$ .....	81
Gráfico 8 - Curva de corrente - carga 5 $\Omega$ .....	81
Gráfico 9 - Relação Tensão (V) x Rotação (rpm) - carga 5 $\Omega$ .....	82

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	17
1.1.1 Delimitação do tema .....	18
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS .....	19
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.3.1 Objetivo geral.....	22
1.3.1.1 Objetivos específicos. ....	22
1.4 JUSTIFICATIVA.....	23
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	24
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	24
<b>2 REVISÃO LITERÁRIA.....</b>	<b>25</b>
2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA .....	25
2.1.1 Processos de geração de energia elétrica.....	26
2.1.2 Mudanças da Geração Elétrica.....	27
2.1.3 Microgeração .....	29
2.2 GERAÇÃO HIDROELÉTRICA .....	30
2.2.1 Características Comuns às Turbinas .....	30
2.2.2 Modelos de Turbinas .....	31
2.2.2.1 Turbinas Pelton .....	31
2.2.2.2 Turbina Francis .....	33
2.2.2.3 Turbina Kaplan.....	34
2.2.2.4 Turbina Bulbo.....	35
2.2.2.5 Conclusão parcial.....	36
2.2.3 Máquinas Elétricas Girantes .....	36
2.2.3.1 Gerador de corrente alternada síncrono .....	38
2.2.3.2 Gerador de corrente alternada assíncrono .....	39
2.2.3.3 Geradores de corrente contínua .....	40
2.3 TURBINA DE TESLA.....	43
2.3.1 História.....	44
2.3.2 Características construtivas .....	45
2.3.3 Funcionamento .....	47
2.3.4 Estado da Arte .....	48
2.4 CONCLUSÃO PARCIAL.....	51
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
3.1 ESCOLHA DO TIPO DE GERADOR .....	53
3.2 PESQUISA DE PERFIL DE CONSUMO HÍDRICO .....	54
3.3 CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS DE ENSAIO .....	57



3.4 CONCLUSÃO PARCIAL.....	59
<b>4 DETALHAMENTO CONSTRUTIVO.....</b>	<b>61</b>
4.1 PROJETO DA TURBINA .....	61
4.2 CÁLCULO DOS COMPONENTES .....	62
4.3 DESENHO DAS PEÇAS.....	69
4.3.1 Montagem da Turbina de Tesla .....	70
4.4 CONCLUSÃO PARCIAL.....	73
<b>5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
5.1 RELAÇÃO TURBINA GERADOR .....	74
5.1.1 Relação tensão (V) x rotação (rpm) .....	74
5.1.2 Torque da Turbina de Tesla.....	75
5.2 ENSAIOS COM CARGA.....	76
5.2.1 Ensaio com Carga de 50 Ohms .....	77
5.2.2 Ensaio com Carga 5 Ohms.....	80
5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES .....	83
<b>6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
6.1 CONCLUSÃO .....	84
6.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	85
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE A - Modelagem mecânica.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO A – Tabelas: Capacidade Instalada e Geração Líquida.....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na busca por novas alternativas, e um tema que trouxesse inovação, verificou-se a existência de um modelo de turbina que apresenta características construtivas muito interessantes, e pouco exploradas atualmente. Concebida e patenteada por Nikola Tesla em 6 de maio de 1913, sob o registro '*United States Patent*' N°.1061206, a turbina de Tesla tem o diferencial de ser estruturalmente mais simples, quando comparada com modelos Francis, Kaplan ou Pelton, conseqüentemente mitigando o custo de montagem. Tal aspecto despertou o interesse deste estudo sob o viés do microgeração.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Em 17 de abril de 2012, por meio da resolução normativa ANEEL n°482/2012, a micro e mini geração foram regulamentadas, e, desde então, tornou-se possível estabelecer uma nova relação entre concessionárias de energia e consumidores, isso permitiu ao consumidor, que tivesse implementado algum tipo de geração de energia elétrica, fornecer o excedente de produção à rede de distribuição local. Esta medida também serve de incentivo aos consumidores que tenham o interesse de instalar geradores em suas propriedades, afim de atender suas necessidades energéticas, cabendo a eles a avaliação da viabilidade econômica. A resolução também estabelece e caracteriza que:

A microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW, para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes (Cadernos temáticos ANEEL, 2016).

Outro aspecto relevante da microgeração distribuída é a proximidade entre o consumidor que fornece o excedente de produção com aqueles que são apenas consumidores. Este aspecto é vantajoso quando há diminuição das perdas e, principalmente, há diminuição de investimentos de infraestrutura associados à

geração, transmissão e distribuição. Por sua vez, o principal revés é o aumento da complexidade de operação para as concessionárias de energia, (INDUSCON, 2012).

O interesse pela microgeração e minigeração tem se intensificado no Brasil; dados da ANEEL apontam um crescimento significativo de agosto de 2014 a setembro de 2016: “em um ano, o número de conexões de micro e minigeração de energia teve um rápido crescimento. São 5.040 conexões em agosto, contra 1.148 ligações registradas na ANEEL em setembro de 2015, o que representa uma potência instalada de 47.934 kW” (ANEEL, 2016).

Este crescimento destaca que as principais fontes exploradas pela microgeração no Brasil são a solar e a eólica, tendo até então 4955 pontos de geração solar e 39 eólica ligados a rede de distribuição (PUBLICAÇÃO ANEEL, 2016). Entretanto, outros modais poderiam ser igualmente explorados por pequenos e grandes consumidores. Como aponta Silva (2012), em sua tese de mestrado, existe a possibilidade e a viabilidade de aproveitamento da matriz de abastecimento de água tratada. Em seu estudo, Silva (2012) analisou, na cidade de Pato Branco - Paraná, a utilização da rede de abastecimento d'água na produção de energia elétrica, concluindo ser viável tal aproveitamento.

A busca por fontes renováveis é uma realidade e uma necessidade; muitos países investiram na mudança, como destaca a CPFL ENERGIA (2014) nas modificações das matrizes energéticas pelo mundo: a Alemanha em 2008 contava com 4,4 TWh de geração solar; em 2014 chegou ao patamar de 26,4 TWh; O crescimento abrupto até 2014, da oferta de energia, criou uma situação ímpar: preços negativos. Na China, no mesmo período houve crescimento de 0,2 TWh para 6,3 TWh. Tais modificações e seus benefícios inspiram observar os potenciais disponíveis no Brasil, para assim fazer uso correlato e trazer benefícios a curto, médio e longo prazo.

### 1.1.1 Delimitação do tema

Este trabalho de conclusão de curso aborda aspectos construtivos, funcionamento, projeto e avaliação dos parâmetros inerentes à aplicação da turbina de Tesla, em tamanho reduzido, tendo como fonte de força motriz um setup preparado para simular o sistema de abastecimento hídrico, funcionando desta maneira como

um microgerador. Os estudo e simulações ocorreu ao longo dos anos de 2017 a 2019, na cidade de Curitiba.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O desenvolvimento da humanidade sempre está atrelado ao consumo energético. Em tudo que se faça, existe a necessidade de energia, sendo a eficiência tão importante quanto a fonte de obtenção.

A busca por fontes de baixo impacto ambiental tem se tornado intensa, sendo um dos pontos abordados desde o Protocolo de Kyoto (1997) até a última Conferência Mundial das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas (Protocolo De Paris, 2015), que estabeleceu metas rígidas na diminuição da emissão de gases relacionados ao efeito estufa, até 2030. Sendo o Brasil um signatário destes tratados, torna a pesquisa por fontes energética mais eficientes e limpas um compromisso assumido.

A eficiência na geração e consumo da energia elétrica é um fator importante que colabora na obtenção destes objetivos. Anualmente, as perdas entre transmissão e distribuição são estimadas na faixa de 13,1% baseado no valor geral, sendo que os custos das perdas totais chegaram a 11,021 bilhões de reais entre os anos de 2010 a 2014, como se pode verificar na Tabela 1, simplificada para as dez melhores distribuidoras (RANKING 2015, ANEEL) e a COPEL (21º) para o ano de 2015.

**Tabela 1 - Perdas do sistema (regulatórias e reais)**

Empresa	Ano	(1) Perdas não técnicas sobre a energia injetada (Real)	(2) Perdas técnicas sobre a energia injetada (Real)	(3) Perdas sobre a energia injetada (Real) (1) + (2)	(4) Perdas não técnicas sobre a energia injetada (Regulatório)*	(5) Perdas técnicas sobre a energia injetada (Regulatório)	(6) Perdas sobre a energia injetada (Regulatório) (5) + (6)
AME	2011	65,81%	1,64%	67,45%	12,26%	7,71%	19,97%
AME	2012	37,34%	1,72%	39,06%	12,08%	7,71%	19,79%
AME	2013	36,08%	2,50%	38,58%	12,86%	7,72%	20,58%
AME	2014	37,45%	1,44%	38,89%	15,93%	7,77%	23,70%
BANDEIRANTE	2011	4,74%	5,54%	10,28%	4,66%	5,02%	9,68%
BANDEIRANTE	2012	4,73%	5,50%	10,23%	4,44%	4,96%	9,40%
BANDEIRANTE	2013	4,34%	5,53%	9,87%	4,05%	4,96%	9,01%
BANDEIRANTE	2014	3,94%	5,54%	9,48%	3,75%	4,96%	8,71%
CEMAR	2011	9,23%	11,73%	20,96%	11,74%	12,42%	24,16%
CEMAR	2012	10,05%	10,66%	20,71%	10,32%	12,42%	22,73%
CEMAR	2013	9,35%	9,81%	19,17%	9,67%	11,32%	20,98%
CEMAR	2014	8,02%	9,39%	17,41%	9,72%	9,90%	19,62%
COELCE	2011	1,65%	9,23%	10,89%	2,32%	8,66%	10,98%
COELCE	2012	1,65%	10,18%	11,83%	1,88%	8,96%	10,84%

(continua)

(conclusão)							
COELCE	2013	1,63%	10,08%	11,71%	1,88%	8,96%	10,84%
COELCE	2014	1,86%	10,26%	12,12%	1,90%	8,96%	10,86%
COPEL	2011	1,60%	6,52%	8,12%	1,32%	7,43%	8,75%
COPEL	2012	2,17%	6,48%	8,65%	1,36%	6,94%	8,30%
COPEL	2013	1,62%	6,58%	8,20%	1,36%	6,58%	7,94%
COPEL	2014	1,88%	6,22%	8,10%	1,27%	6,58%	7,85%
CPFL-Paulista	2011	2,40%	5,84%	8,24%	3,09%	6,37%	9,46%
CPFL-Paulista	2012	2,05%	5,88%	7,93%	3,11%	6,37%	9,48%
CPFL-Paulista	2013	1,98%	5,70%	7,67%	2,17%	6,33%	8,50%
CPFL-Paulista	2014	3,30%	5,90%	9,20%	1,92%	6,32%	8,24%
ELEKTRO	2011	0,58%	5,82%	6,40%	0,81%	6,04%	6,85%
ELEKTRO	2012	1,48%	5,82%	7,30%	0,38%	6,35%	6,72%
ELEKTRO	2013	1,33%	6,14%	7,48%	0,41%	6,35%	6,76%
ELEKTRO	2014	0,23%	6,35%	6,58%	0,39%	6,35%	6,74%
EMG	2011	0,94%	8,40%	9,34%	0,60%	8,92%	9,52%
EMG	2012	0,08%	8,88%	8,96%	0,53%	8,64%	9,17%
EMG	2013	0,38%	8,09%	8,47%	0,50%	8,41%	8,91%
EMG	2014	0,00%	9,62%	9,62%	0,53%	8,41%	8,94%
EPB	2011	3,75%	9,93%	13,68%	7,18%	9,96%	17,14%
EPB	2012	3,67%	9,92%	13,59%	6,48%	9,96%	16,44%
EPB	2013	2,06%	10,20%	12,26%	5,36%	9,69%	15,05%
EPB	2014	2,60%	9,73%	12,33%	4,40%	9,30%	13,70%
ESCELSA	2011	5,49%	7,36%	12,85%	4,76%	7,26%	12,02%
ESCELSA	2012	6,08%	7,67%	13,75%	4,39%	7,26%	11,65%
ESCELSA	2013	5,43%	7,81%	13,23%	3,95%	7,03%	10,98%
ESCELSA	2014	6,86%	7,58%	14,45%	3,53%	6,70%	10,23%

**Fonte: ANEEL 17/04/2015 valores de perdas estabelecidas para distribuidoras**

Pequenas diminuições nas perdas, que podem ser obtidas através da geração de energia elétrica próximo da carga, causariam grande economia nos custos de operação, possibilitando menores tarifas, maior investimento em pesquisas e tecnologia, geraria maior competitividade no mercado, bem como outras melhorias relacionadas ao sistema elétrico. Por exemplo, a partir dos dados supracitados, uma diminuição de 10% do custo das perdas totais geraria a economia de aproximadamente R\$1,102 bilhões, como observado na Tabela 2 - Montante de perdas, simplificada abaixo, que exprime os 15 primeiros maiores custos de perdas, e a perda total de todas as concessionárias.

**Tabela 2 - Montante de perdas**

Distribuidora	Mercado (Cativo + Livre)	Perdas	Mercado + Perdas	Perdas Não Técnicas	Perdas Técnicas	Perdas Rede Básica	Perdas Totais
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>437.878.525</b>	<b>66.164.958</b>	<b>504.043.483</b>	<b>3.780.643</b>	<b>5.917.059</b>	<b>1.324.218</b>	<b>11.021.921</b>
LIGHT	29.173.047	8.434.377	37.607.424	1.072.616	366.123	105.518	1.544.256
CEMIG	43.878.282	5.784.087	49.662.370	248.639	655.890	79.044	983.573
ELETROPAULO	45.750.136	5.626.809	51.376.946	362.561	434.502	150.483	947.546
CPFL PAULISTA	31.527.638	3.397.700	34.925.338	123.102	397.129	100.891	621.121
COPEL	29.692.039	3.017.158	32.709.197	80.338	368.118	94.136	542.592
CELPA	7.965.534	3.032.761	10.998.295	245.366	157.009	33.506	435.881
CELESC	23.245.077	2.201.978	25.447.055	53.983	308.404	63.917	426.304
AMPLA	11.601.443	2.619.045	14.220.488	200.728	185.922	39.171	425.821
CELPE	13.565.275	2.582.516	16.147.791	155.822	191.060	42.558	389.440
COELBA	18.604.360	3.010.183	21.614.543	81.703	247.145	48.405	377.252
CELG	12.892.661	1.884.459	14.777.119	49.418	232.296	39.634	321.348
ELEKTRO	16.690.544	1.707.516	18.398.060	45.480	170.444	98.221	314.145
BANDEIRANTE	15.173.346	1.497.522	16.670.868	93.873	131.897	37.858	263.628
EMT	8.014.941	1.337.895	9.352.836	66.289	178.674	15.107	260.070
AMPLA	11.601.443	2.619.045	14.220.488	200.728	185.922	39.171	425.821

**Fonte: ANEEL 17/04/2015 valores de perdas estabelecidas para distribuidoras**

\*Montantes considerados nas tarifas de energia elétrica;

\*\* Despesas de perdas (em mil reais R\$) - 17/04/2015.

Para alcançar melhorias e atingir tais metas, são necessárias muitas pesquisas e investimentos em várias áreas, sendo fundamental a busca constante de aprimoramento tecnológico, para que essas informações nos direcionem a novas soluções, e a microgeração distribuída é uma realidade que vem fazendo a diferença; assim, explorar infraestruturas disponíveis em nosso dia a dia, como a proposta deste trabalho de conclusão de curso, trará benefícios econômicos, e conseqüentemente sociais, incontáveis.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo geral

Estudar a aplicabilidade da turbina de Tesla como microgerador acoplado a sistemas de abastecimento de água potável.

Objetivos específicos.

- Realizar pesquisa bibliográfica relativas às turbinas (Tesla, Helton, Francis e Kaplan), na microgeração e geração de energia elétrica por fonte hidráulica.
- Projetar a turbina de Tesla.
- Montar a turbina de Tesla.
- Selecionar um gerador para a turbina ser acoplada.
- Coletar dados da turbina de Tesla.
- Avaliar dados do objeto de estudo.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

A geração de energia no Brasil tem como fonte majoritária as grandes usinas hidroelétricas. Por consequência, existe um grande conhecimento na administração e exploração destes recursos. Este sistema segue uma fórmula clássica, onde uma grande usina gera bastante energia, passa por extensas redes de transmissão e distribuição, seguindo de maneira unidirecional de energia e informação. O desenvolvimento tecnológico e a facilidade de acesso às novas tecnologias estão trazendo um conceito novo, uma “rede inteligente” (*“smartgrid”*), onde o consumidor também fornece informações de energia à rede; surge uma nova ideia: o bidimensional do fluxo de dados indo para ambos lados (INDUSCON, 2012).

Com o aumento de consumidores geradores, estão surgindo novos desafios na área de controle e operação, tornando-os mais complexos, porém, mais precisos e eficazes, o que, por sua vez, tornam mais atrativas as ideias de microgeração próxima da carga, uma vez que há diminuição nas perdas de transmissão, custo de operação, melhora na qualidade do fornecimento da energia elétrica, possibilitando maior disponibilidade do serviço de fornecimento elétrico.

O estudo da turbina de Tesla tenta agregar alguns pontos positivos, dos quais destaca-se:

- o domínio brasileiro em geração de energia elétrica por fontes hídricas;
- simplicidade na usinagem de peças para o gerador e a turbina;
- facilidade na montagem e instalação do gerador;
- fácil manutenção;
- com a microgeração, alimentar áreas próximas dos consumidores;
- utilização para cargas abaixo de 200 kW;
- ampla aplicabilidade do modelo estudado
- aplicabilidade para *smartgrid*.



## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

- Verificação do estado da arte de microgeradores hidráulicos.
- Estudo dos parâmetros necessários para a construção da turbina de Tesla.
- Estudos e levantamento de parâmetros de consumo de água de um grande consumidor de água tratada.
- Levantamento de materiais necessários, bem como seus custos.
- Montagem e instalação do microgerador, para simulação de situação análoga à sua finalidade.
- Coleta de dados referentes à geração, em função da vazão aplicada no sistema.
- A partir dos dados coletados, efetuar comparações e projeções de geração.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

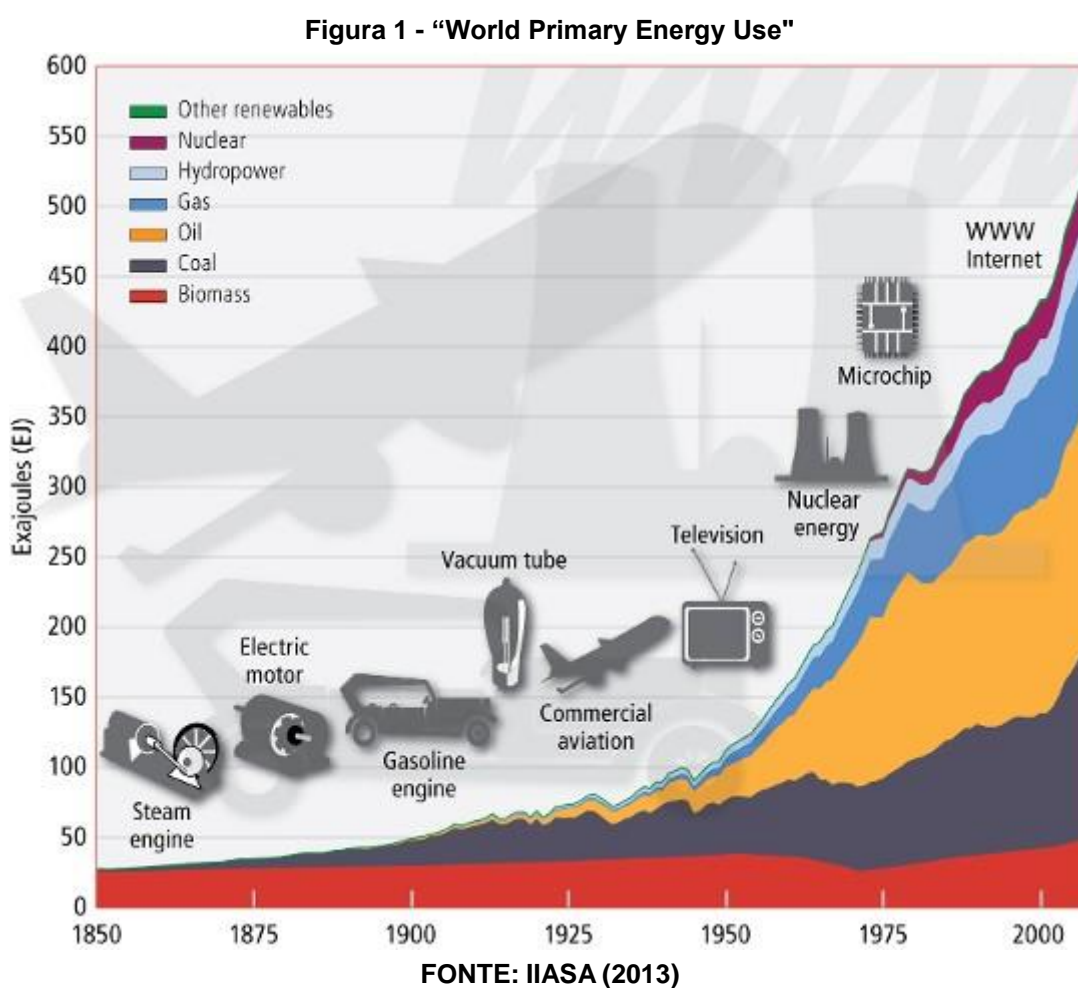
O presente trabalho seguirá arranjo estrutural a seguir:

- 1º Capítulo: apresentação da proposta de trabalho, delimitação do tema, os objetivos, procedimentos, e a justificativa para sua realização.
- 2º Capítulo: apresentação do estudo bibliográfico, e fundamentação teórica inerentes ao tema proposto.
- 3º Capítulo: apresentação dos procedimentos metodológicos, abordando as características técnicas, o desenvolvimento do projeto, e aspectos financeiros;
- 4º Capítulo: detalhamento construtivo, de implementação, de testes, e obtenção de dados.
- 5º Capítulo: discussão dos dados coletados, a partir das simulações.
- 6º Capítulo: conclusão do trabalho e sugestão de trabalho futuros.

## 2 REVISÃO LITERÁRIA

### 2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA

Com o desenvolvimento tecnológico, observa-se ao longo dos últimos dois séculos, o aumento da expectativa de vida, da população mundial, bem como a elevação da demanda energética em consequência de tal crescimento. A Figura 1 traz um paralelo entre invenções tecnológicas de grande influência e o desenvolvimento da demanda energética, e um panorama com a proporção das fontes energéticas mais utilizadas, projetado até 2015, sendo distribuído entre fontes renováveis, energia nuclear, geração hídrica, gás, óleo (petróleo e derivados), carvão e biomassa.



O acesso à energia elétrica e sua influência são recentes na história da humanidade, pouco mais de 120 anos; contudo, pode ser verificada, na projeção

anterior, sua expressiva e crescente importância para a humanidade, e seu desenvolvimento destacado pela massiva solicitação. Novas tecnologias como veículos elétricos, robótica, internet, processos industriais, telecomunicações, entre outras, são dependentes de eletricidade; a obtenção da energia elétrica por meios sustentáveis e renováveis de menor impacto ambiental, torna-se de grande importância, uma vez que a demanda se apresenta crescente.

### 2.1.1 Processos de geração de energia elétrica

Os processos de conversão de potenciais em energia elétrica são diversificados; processos físicos, químicos e mecânicos podem ser explorados na sua obtenção.

Pela vasta bacia hidrográfica, o Brasil fundamentou a geração elétrica através de hidroelétricas; entretanto, esta não é uma característica comum por todo o mundo; desta forma, cada região explora a tecnologia que lhe é economicamente mais viável.

No site da CCEE, aponta onze principais fontes utilizadas no Brasil e no mundo até 2017, sendo:

1. Hidráulica - (CGH, com até 1 MW de potência instalada);  
- (PCH, entre 1,1 MW e 30 MW de potência instalada);  
- (UHE, com mais de 30 MW de potência instalada).
2. Gás Natural - atualmente, as maiores turbinas a gás chegam a 330 MW de potência e os rendimentos térmicos atingem 42%.
3. Petróleo - responsável por cerca de 8% de toda a eletricidade gerada no mundo.
4. Carvão - responsável por cerca de 8% de todo o consumo mundial de energia e de 39% de toda a energia elétrica.
5. Nuclear - em operação no Brasil Angra I (657 MW) e Angra II (1.350 MW).
6. Biomassa - o recurso de maior potencial para geração de energia elétrico no país é o bagaço da cana-de-açúcar.
7. Eólica - a estimativa do APEB, ELETROBRAS (2010), indicam uma capacidade de geração em torno de 143,5 mil MW no Brasil.
8. Solar - O Nordeste brasileiro apresenta radiação comparável às melhores regiões do mundo.

9. Geotérmica - conhecida desde 1904 (construção da primeira usina); no Brasil não há este tipo de exploração.

10. Marítima – ainda não competitiva comercialmente; Portugal apresenta diversos projetos pilotos em estudo.

11. Biogás – a utilização do lixo para produção de Biogás, diminui a emissão de gases do efeito estufa, e poluição de terrenos e lençóis freáticos.

### 2.1.2 Mudanças da Geração Elétrica

Conforme aponta ABRACEEL (2016), o Fórum Econômico de Davos em 2015, indicou o futuro da geração de energia voltado para energias renováveis, reforçando este indicativo, a CPFL Energia (2014) apresenta a modificação das matrizes energéticas em alguns países, conforme no Anexo A, para as tabelas 14 a 25.

**Alemanha** - Por incentivo do governo federal da Alemanha, através do programa *Energiewende*, a matriz elétrica vem sendo modificada desde 2010. O *Energiewende* estipula metas e ações para o crescimento da exploração de fontes renováveis, bem como redes de distribuição e transmissão, como o desligamento imediato das plantas nucleares mais antigas (inicialmente sete), ilustra a Tabela 14.

No período avaliado há destaque na redução da fonte nuclear (-51,08% de contribuição), pequeno crescimento na fonte eólica, e expressiva evolução da energia solar, +290% de contribuição. Da geração líquida temos o seguinte perfil, na Tabela 15.

**França** - Maior produtor e consumidor da Europa, sua matriz energética tem expressiva colaboração nuclear; assim como a Alemanha iniciou, um processo de diminuição da participação desta fonte após o acidente de Fukushima em 2011, tendo grande atenção das autoridades francesas na verificação das condições das usinas nucleares, conforme indicou a CPFL ENERGIA (2014), conforme a Tabela 16.

Na França, no período analisado, houve pequena diminuição da fonte nuclear, redução para 48,17% de colaboração na geração, energia eólica quase dobrou (indo para 0,057%); por sua vez, a fonte solar cresceu 35 vezes sua participação percentual (0,03%). Para geração foi observado (Tabela 17 - GERAÇÃO LÍQUIDA FRANÇA (TWh)).

**Reino Unido** - Matriz elétrica suprida majoritariamente pela geração termelétrica, dividido entre gás natural e carvão, contando ainda com nucleares. A fim de atender metas ambientais, conta com incentivos fiscais principalmente para geração solar, como mostra CPFL Energia (2014), na Tabela 18.

Destacou-se nos anos avaliados, a diminuição da capacidade nuclear instalada, e grande crescimento das capacidades eólica e solar, que juntas passaram a contribuir com quase 11% do potencial.

Na geração líquida (TWh), fica evidenciado a diminuição da ativação de geração térmica, em conformidade com as mudanças incentivadas pelo governo do Reino Unido, como a Tabela 19.

**Argentina** - Em 2007 através da sanção da lei 26190, iniciou-se incentivos em pesquisa, desenvolvimento, e de investimentos para uso de fontes renováveis, com destaque para o comprometimento do estado em alcançar 8% da geração proveniente de fontes renováveis com mostra, como a CPFL ENERGIA (2014), ilustra a Tabela 20.

Embora não tenha participação significativa na avaliação acima, a CPFL afirma que “Apesar da lei de incentivo ao uso de energias renováveis ter sido aprovada em 2007, somente em 2011 o uso dessas energias, como fontes de geração de energia elétrica, começou a aparecer na matriz. Em 2011 havia 1 MW de capacidade de geração solar instalada, aumentando para 6 MW em 2012. A capacidade eólica era de 16 MW em 2011 e alcançou 111 MW em 2012. O potencial renovável na Argentina é alto, embora haja pouca exploração efetiva até o momento”.

**México** - Um dos pioneiros na exploração geotérmica, chegando a ser o quarto em capacidade instalada neste modal. A fim de reduzir a emissão de gases do efeito estufa e incentivar fontes renováveis, o governo mexicano recompensa com \$0,011 por kWh eólico fornecido à rede, conforme a Tabela 22.

Embora a capacidade instalada não apresente grandes modificações, destaca-se o crescimento da exploração eólica.

**Japão** - Foi um dos maiores exploradores da energia nuclear no mundo, atrás apenas de EUA e França respectivamente. Com grande preocupação ambiental, o Japão faz grande aproveitamento de biomassa e de resíduos para geração de energia, como os provenientes do tratamento de esgoto, apresentada na Tabela 24:

Neste período, a matriz não passou por grandes modificações em capacidade instalada, mas ainda sim houve crescimento em fontes renováveis e hidroelétricas.

Ainda que as fontes renováveis não tenham amplo destaque nas matrizes energéticas apresentadas, seu crescimento em curto prazo foi elevado, sendo impulsionado pela grande influência que os combustíveis fósseis têm sobre a economia global.

### 2.1.3 Microgeração

O Brasil, durante 2017, indica uma gradativa recuperação econômica, o que consequentemente atingirá a demanda energética. Por outro lado, as fortes e seguidas estiagens; limitaram a capacidade de geração hidroelétrica; neste cenário cresceu a importância da microgeração distribuída e as expectativas de contribuição, como afirma Newton Duarte, presidente executivo da COGEN, em entrevista ao site Canal Energia (2017):

“são cerca de 6,5 GW médios de energia que se perde no Brasil, pois o índice é de cerca de 10% da carga nacional. “É como se o país tivesse que investir uma Belo Monte e meia somente para compensar essas perdas”, comparou”.

“Duarte se mostra otimista com as perspectivas da geração distribuída justamente por seus atributos serem positivos para o setor elétrico diante dessa conjuntura que se coloca para o país” ...

“Ele argumenta que o momento é positivo em decorrência do momento econômico porque a demanda tende a aumentar e em um momento no qual a condição hidrológica, principalmente, no Nordeste e no Norte mostra-se delicada. “Uma condição que começa a nos rondar é a seca futura, estamos vivendo um inverno quente e seco, tanto que no Tocantins vemos a situação crítica do reservatório de Serra da Mesa com 9% da capacidade. No São Francisco temos a vazão mínima histórica de 550 metros cúbicos por segundo, esse é o volume de apenas uma máquina da UHE Xingó, há seis máquinas e cinco estão paradas”, apontou.

## 2.2 GERAÇÃO HIDROELÉTRICA

O aproveitamento do potencial fornecido pelas águas, remonta ao surgimento de rodas d'água, e moinhos alocados em cursos de rios, com a finalidade de facilitar o trabalho, diminuindo o esforço físico necessário. No século XIX, com o avanço na informação da hidrodinâmica, e no apogeu da revolução industrial, surgiu o conceito da turbina hidráulica na geração de energia. E os precursores dessa nova era para as turbinas hidráulicas foram James Francis Bicheno (1815-1892), Lester Allan Pelton (1829-1908) e Victor Kaplan (1876-1934).

Mesmo no início século do XXI, as turbinas: Francis, Pelton e Kaplan, se apresentaram como turbinas mais comumente utilizadas, desta forma compreendidas como convencionais. Com o passar, do tempo sofreram algumas melhorias com a evolução tecnológica, sendo também adicionado ao grupo a turbina Bulbo, uma alteração da turbina Kaplan. Dos séculos XIX ao XXI, outras turbinas foram elaboradas, porém nem todas tiveram grande aceitação, muito embora propiciaram aplicações com fontes diferentes, como gases e vapor, entre elas: Hélices, Straflo, Dériaz, Michell-Bànkj, Tubular e Tesla.

### 2.2.1 Características Comuns às Turbinas

Tipos de turbinas hidráulicas:

- turbina de ação: caracteriza-se por ter usina com reservatórios com elevadas altitudes; aproveita a energia potencial guiadas por condutos forçados; onde se transforma em energia cinética; pelo longo trecho, ocasiona perda total da pressão antes da entrada na turbina;
- turbina de reação: por estarem mais próximas do reservatório para melhor aproveitamento, ficam totalmente submersas, resultando na perda de pressão no interior da turbina.

Posicionamento da turbina:

- escoamento radial: o fluxo de água fica perpendicular em relação com eixo de rotação;

- escoamento axial: o fluxo de água fica paralelo em relação ao eixo de rotação;
- escoamento misto: todas as posições entre o axial e o radial.

Alguns componentes presentes na maioria das turbinas definições, segundo a ABNT 6445:

- caixa espiral: caixa fechada, cujas seções transversais diminuem progressivamente no sentido do fluxo;
- pré-distribuidor: conjunto constituído de paletas, anéis superiores, e interior localizado entre a caixa e o distribuidor, com finalidade estrutural e de pré-orientação do escoamento para o rotor;
- distribuidor: elemento da turbina no qual é realizada a conversão da pressão da água em cinética, orientação de fluxo, e controle da vazão do rotor;
- tubo de sucção: elemento que tem por finalidade transformar em energia de pressão em energia cinética remanescente da água, ao deixar o rotor, e conduzir a água a saída ou uma nova estrutura hidráulica.

### 2.2.2 Modelos de Turbinas

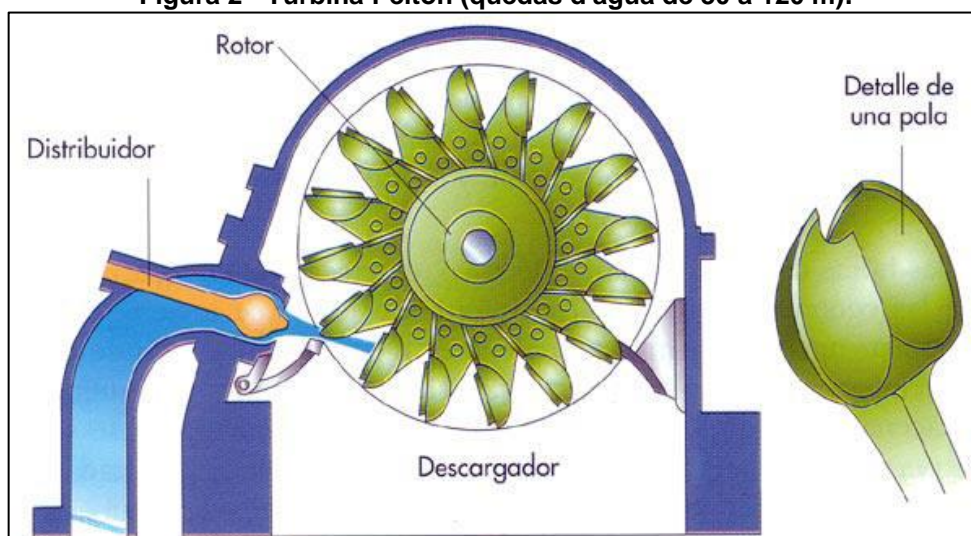
Neste tópico serão apresentas os modelos de turbina mais utilizados para a geração de energia elétrica, destacando suas diferenças operacionais e construtivas.

#### Turbinas Pelton

Desenvolvida em 1880, baseado numa modificação da roda d'água, com intuito de aproveitar fluxo de água de rios; essa modificação apresentada por Lester Allan Pelton foi revolucionária, pois apresentou uma nova visão em suas aplicações, S.Maior (2014). O princípio de funcionamento é dado por meio da aplicação de jato de água direcionado por um distribuidor; que ao colidir com as pás, em forma de colher duplicada e possui pontas vazadas no propósito de evitar choque com ponto não desejado (destaque na Figura 2), transfere a energia cinética fornecida ao eixo.



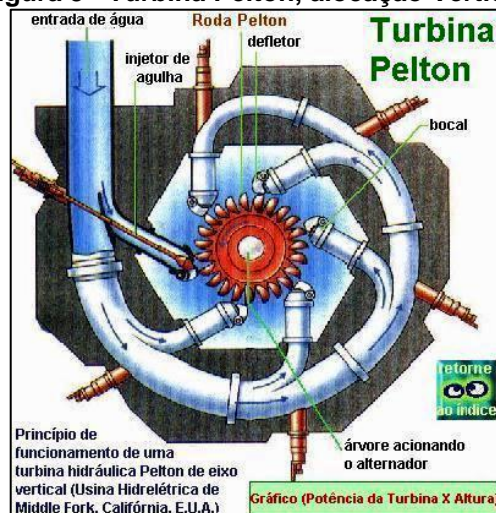
**Figura 2 - Turbina Pelton (quedas d'água de 30 a 120 m).**



Fonte: IQEnergy (2017).

A turbina de Pelton é do tipo ação com escoamento radial. Posicionada em forma horizontal, para facilitar sua manutenção, ou posicionada em forma vertical, ideal para maiores números de jatos d'água numa roda como explicito na Figura 3.

**Figura 3 - Turbina Pelton, alocação Vertical.**

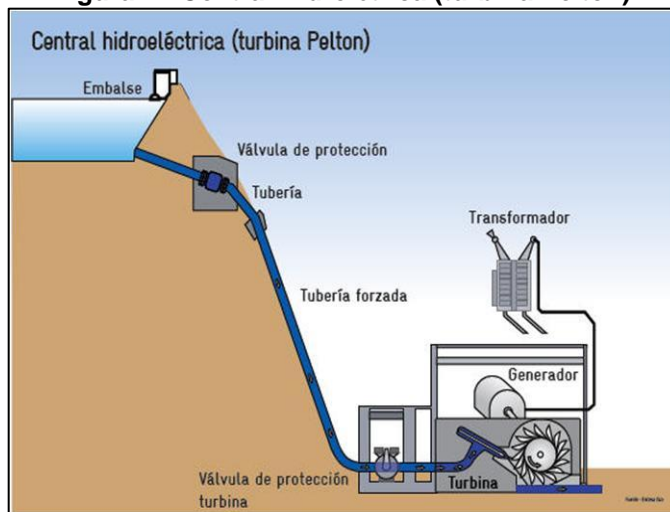


Fonte: CEPA, 2017.

Por apresentar excelente desempenho com jatos d'água de alta velocidade e pressão, são turbinas ideais para hidrelétricas com altas quedas (havendo usinas com quedas de 1800 m), as quais dispõe elevada energia potencial. Nos condutos, a energia potencial é transformada em energia cinética, mostrada na Figura 4, nela

vemos "condutos forçados" (tubería forçada), válvula de proteção (válvula de protección), pontos de controle de pressão e velocidade.

**Figura 4 - Central Hidrelétrica (turbina Pelton).**



**Fonte: MFA EB (2015).**

Na Usina Governador Parigot de Souza (GPS), no município de Antonina, estão instaladas 3 turbinas Pelton horizontais, alimentadas por um conduto com desnível de 740 m de altura.

#### Turbina Francis

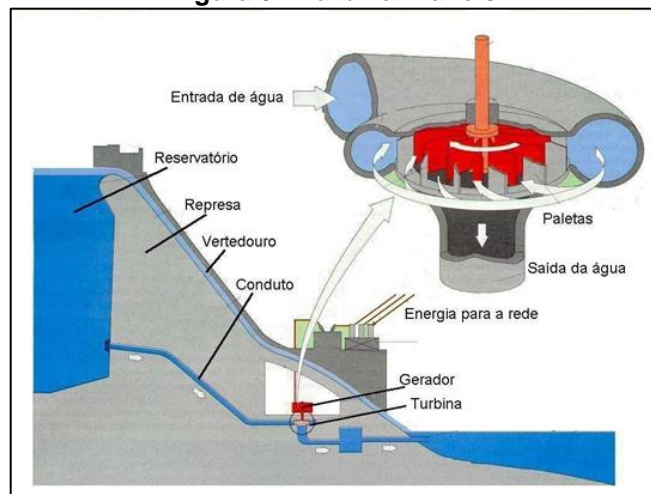
James Bicheno Francis, aprimorou a turbina patenteada por Samuel Down (1838); sua alteração foi tão significativa que a turbina recebeu seu nome. A primeira turbina Francis foi confeccionada pela empresa J.M Voith em 1873, primeira turbina radial até então, Merigue (2013) descreve como:

“As turbinas Francis são geralmente instaladas com o eixo vertical. A água com cabeça alta (pressão) entra na turbina através da carcaça em espiral que envolve as palhetas de guia. A água perde uma parte da sua pressão na voluta (invólucro em espiral) para manter sua velocidade. Em seguida, a água passa pelas palhetas de guia onde é direcionada para atingir as lâminas no corredor em ângulos ótimos. À medida que a água flui através do corredor, sua pressão e momento angular diminuem. Esta redução transmite reação no corredor e a energia é transferida para o eixo da turbina...” Mecânica Industrial (2016).

São ideais para quedas d’água de médio porte, 40 m até 400 m. A Figura 5 - Turbina Francis., ilustra os componentes da turbina, na parte superior o conduto de entrada. É aplicada em projeto de usina hidrelétrica a fio d’água, onde o vertedouro atua como controlador do fluxo de água. Um exemplo a usina Binacional de Itaipu, no

município de Foz do Iguaçu, Paraná, onde o desnível tem aproximadamente 196 m de altura.

**Figura 5 - Turbina Francis.**



**Fonte: Alterima (2017).**

### Turbina Kaplan

Em 1912, o engenheiro Victor Kaplan desenvolveu uma nova turbina, de reação axial, em forma de hélices, e aparência semelhante as turbinas utilizadas em navios; essa turbina apresentou um novo conceito: o sistema de orientação através de pás, ou seja, o fluxo e volume de água injetados nas hélices são controlados por paletas, por sua vez orientadas por um servomotor. A Figura 6 denota seu aspecto físico e semelhança com os propulsores de navios, com o diferencial de estar acoplado dentro de um conduto. Seu projeto assemelha-se ao com turbina Francis, com a diferença da turbina de Kaplan trabalhar numa rotação superior.

**Figura 6 - Turbina Kaplan.**

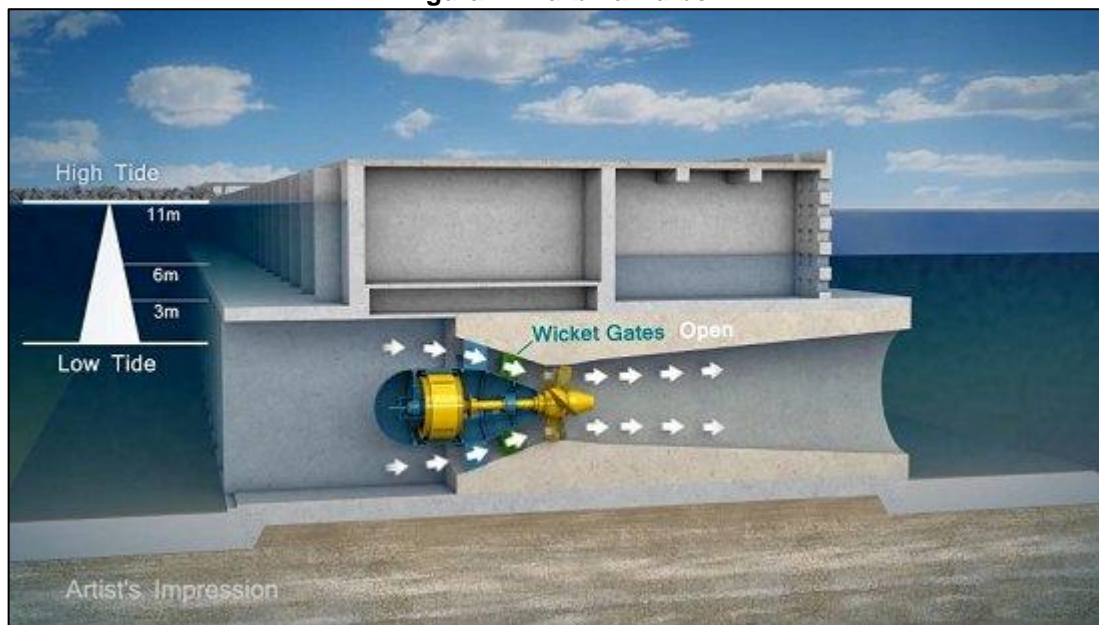
Fonte: Jornal El país (2018).

### Turbina Bulbo

A turbina Bulbo surgiu com objetivo de operar em pequenas quedas d'água, próximo a fio d'água, sendo ela um aprimoramento da Kaplan, pois além de possuir pás móveis, tem conjunto de pás fixas tipo hélices, e é subdividida em 3 partes: cubo, ogiva ou cone, e pás. Uma característica marcante é que o gerador se localiza dentro da turbina, na ogiva; este aspecto eleva o custo dessa turbina quando comparada a outros modelos; em contrapartida possui baixo custo na construção civil, dispensando grandes reservatórios. Dispõe de funcionamento semelhante a Kaplan, por ser uma turbina de reação axial, tendo principal diferença no desempenho; por ser menor, tem mais velocidade de escoamento com rotação elevada. As elevadas velocidades implicam na necessidade de maior altura de sucção, porem dispensa uso de cotovelo

na saída do conduto, evidenciado na Figura 7, usina hidrelétrica, utiliza-se da energia das marés, exemplo: La Rance, França.

**Figura 7 - Turbina Bulbo.**



**Fonte: Jornal GGN (2015).**

### Conclusão parcial

As formas de exploração hidroelétrica atuais utilizam modelos de turbinas historicamente consagradas, entretanto, como apresentado acima, todas elas são mecanicamente complexas o que atribui grande custo de produção e de manutenção, e são concebidas para grandes volumes d'água.

### 2.2.3 Máquinas Elétricas Girantes

As turbinas hidráulicas não atuam de maneira isolada no sistema de conversão de energia; junto a si existe outro elemento de fundamental participação: sendo a máquina elétrica girante, responsável pela conversão da energia potencial cinética em potencial elétrica (ação de gerador) ou converte do potencial elétrico para o cinético (ação de motor).

No quesito de operação, as máquinas podem ser divididas em dois tipos: máquina elétrica de corrente contínua (máquina CC) e máquina elétrica de corrente

alternada (máquina CA). As máquinas de CA tradicionalmente podem ser subdivididas em: máquinas de CA síncronas e máquinas de CA assíncronas.

Sua estrutura divide-se em duas partes: o rotor e estator. Ambos são compostos de aço com alta permeabilidade magnética, o qual direciona a forma do fluxo magnético, com enrolamentos (ou barras em alguns casos) fixados nas suas ranhuras em sua respectiva carcaça. E no seu esqueleto posiciona o número de fases presente nas máquinas, que podem ser monos ou trifásicas (Fitzgerald e Kingsley 2014, pág. 192).

Em geral utiliza-se de diagramas representativos para descrever os esquemas elétricos de funcionamento como: o '*enrolamento de armadura*', normalmente surge da geração de Força Eletromotriz (FEM) e '*enrolamento de campo*' componente responsável pela geração da Força Magnetomotriz (FMM), (Toro 1999, pág. 108; Fitzgerald e Kingsley 2014, pág. 190).

A diversificação das máquinas elétricas girantes surge em como cada estrutura construtiva aplica os princípios de funcionamento.

Os geradores, independentemente de suas diferenças construtivas, operam basicamente com os mesmos princípios de funcionamento. Em geral, a conversão parte da interação do campo magnético constante em relação ao movimento mecânico, aplicados em pontos de condutividade elétrica. Exemplo específico o grupo de bobinas ou enrolamentos (podem ter outras formas), induzindo uma FEM na sua saída (Fitzgerald e Kingsley 2014, pág. 190).

Já os motores apresentam funcionamento inverso do gerador. São alimentados por fonte elétrica, na qual gera campo magnético nos respectivos enrolamentos, dispostos em pares de polos (norte e sul), em contraste com a outra bobina de campo elétrico, essa relação gera um torque mecânico (Fitzgerald e Kingsley 2014, pág. 190).

Os tipos mais utilizados, encontrar-se:

- Máquinas CC de excitação: independente, de serie, derivado (paralelo ou shunt), composto;
- máquinas CA síncrona: de polos lisos e polos salientes;
- máquinas CA assíncronas: de gaiola de esquilo e bobinado;
- máquinas de relutância variável ou motor de passo.

### Gerador de corrente alternada síncrono

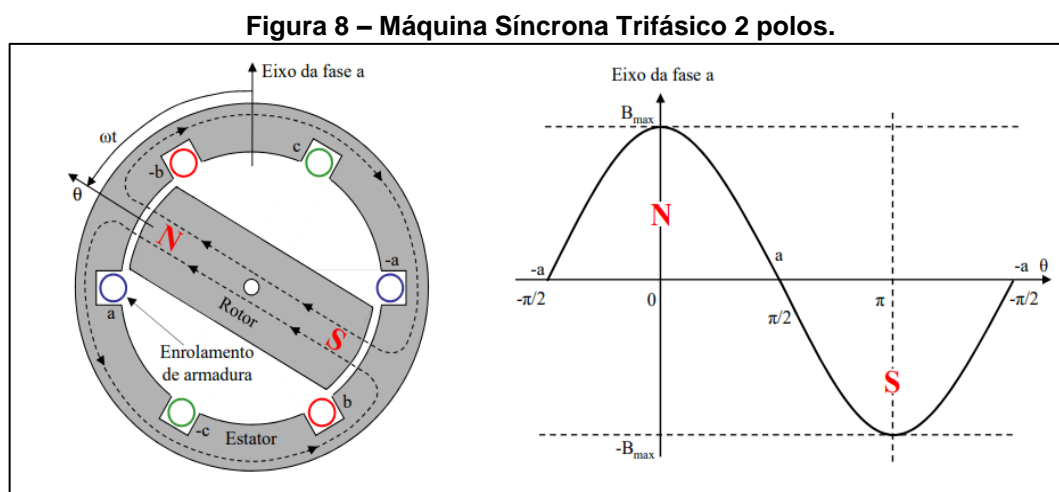
O gerador síncrono combinado a uma rede, segue a mesma frequência, seu campo estático gira na mesma velocidade do rotor. Seu giro é determinado pelo próprio sistema que o integra (Toro 1999, pág. 197).

As máquinas síncronas caracterizam-se normalmente pelo aspecto construtivo do estator, estar localizado no enrolamento de armadura. Já o enrolamento de campo é excitado por ímãs permanentes ou fluxo CC, localizado no rotor (Toro 1999, pág. 118; Fitzgerald e Kingsley 2014, pág. 262).

O Fluxo gerado por ímãs permanentes não requer injeção de potência, em contrapartida não é possível ajustar a intensidade do campo magnético. Há máquinas síncronas energizadas por corrente contínua.

As máquinas mais antigas eram excitadas por uma sistemas de CC (*excitatriz*), através de anéis deslizantes montados no mesmo eixo.

Nos modelos modernos, a excitação é fornecida pela excitatriz CA e retificadores de estado sólidos, dispensando a necessidade de anéis (Toro 1999, pág. 118; Fitzgerald e Kingsley 2014, pág. 262).

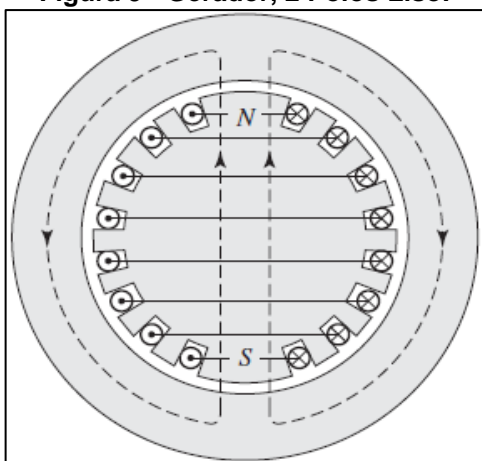


Fonte: Leão (2016).

O princípio de funcionamento do gerador síncrono trifásico de 2 polos: no rotor há um campo magnético em movimento circular o faz variar em graus elétrico, conforme a Figura 8 ilustra na fase a, gerando uma variação de fluxo na bobina em relação ao tempo, induzindo uma FEM.

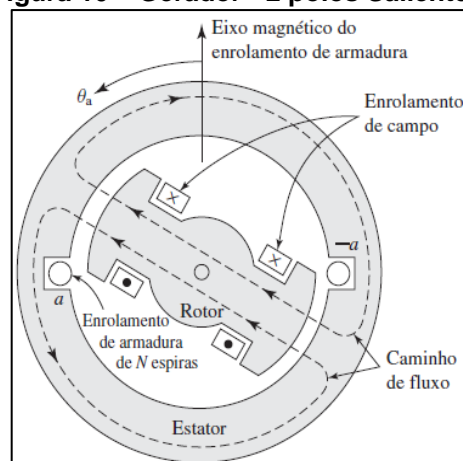
As máquinas síncronas podem ser classificadas em dois tipos: primeiro tipo polos lisos ou turbogerador, apresentam altas velocidades, com 2 e 4 polos, e superfície cilíndrica como ilustra Figura 8, partida de motor a vapor. O segundo tipo: polos salientes, tem baixa velocidade, é acionado por motor hidráulicamente, superfície achatada como na Figura 9 (Toro 1999, pág. 118; Fitzgerald e Kingsley 2014, pág. 262).

**Figura 9 - Gerador, 2 Polos Liso.**



Fonte: Fitzgerald e Kingsley (2014).

**Figura 10 – Gerador - 2 polos Salientes.**



Fonte: Fitzgerald e Kingsley (2014).

#### Gerador de corrente alternada assíncrono

Nas Máquinas Assíncronas, ou de Indução, o estator é semelhante ao síncrono, mas seu rotor é curto-circuito, e muitas vezes o rotor não apresenta conexão externa.

Seu princípio de funcionamento difere do síncrono, pois é excitado somente no estator por uma fonte alternada, na qual gera FEM, e suas correntes no enrolamento de armadura (por efeito transformador) geram torque em relação ao campo girante. (Toro 1999, pág. 118; Fitzgerald e Kingsley 2014, pág. 262).

Os geradores de corrente alternada assíncrono são divididos em dois tipos: máquina gaiola de esquilo, e bobinado também conhecido como de anéis.

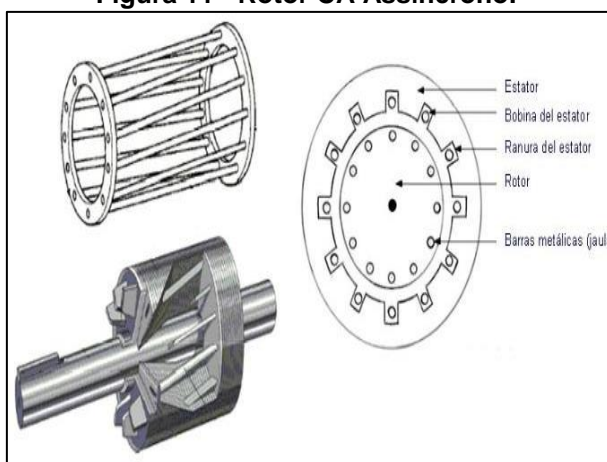
O gerador de corrente alternada assíncrono gaiola de esquilo, tem como característica construtiva as barras no rotor serem curto circuitadas no anel de suas extremidades. Vantagens desse gerador: melhor relação de custo por



peso de material, sendo bastante robusto; exige baixa manutenção; facilidade de construção dos componentes, principalmente o rotor (Figura 11).

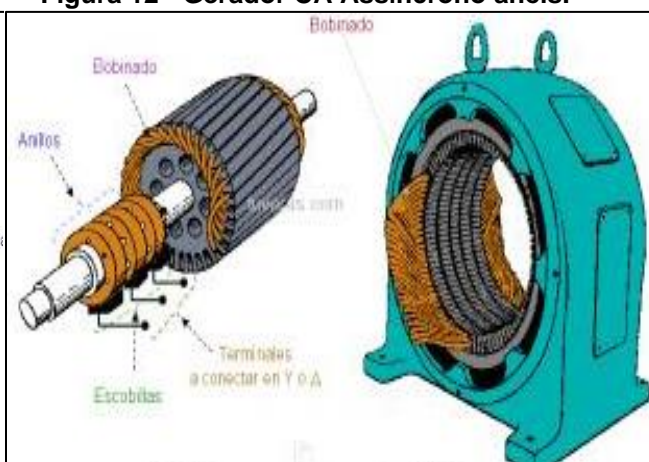
O gerador assíncrono CA bobinado (de anéis), tem seu enrolamento mais exposto e possui 3 anéis com escovas. Apresenta melhor arranque de partida, se comparado a gaiola de esquilo, porem possui elevado custo de manutenção, em função do desgaste das escovas, exige acompanhamento periódico, ilustra Figura 12 (Junior 2015, pág. 13):

**Figura 11 - Rotor CA Assíncrono.**



Fonte: Vieira (2013).

**Figura 12 - Gerador CA Assíncrono anéis.**



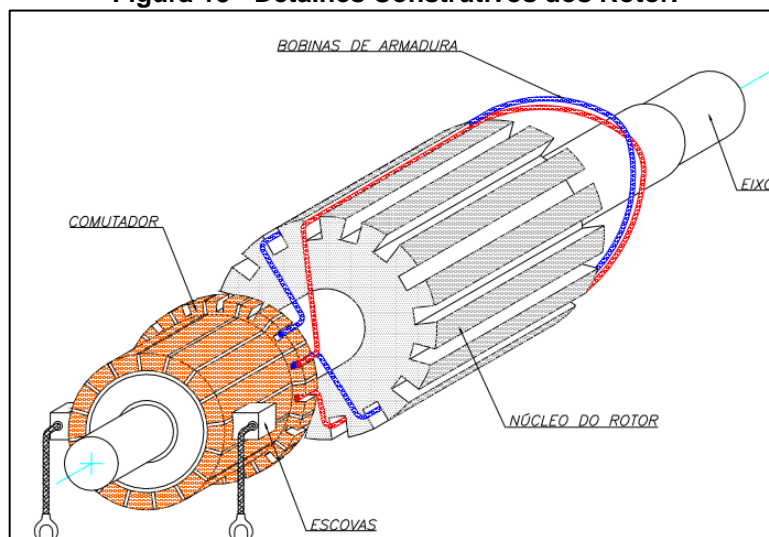
Fonte: Silva (2016).

#### Geradores de corrente contínua

As máquinas CC se caracterizam por sua versatilidade, no que tange à o controle e precisão: de sua velocidade; tensão em função da corrente; velocidade em relação ao conjugado (Fritzgerald e Kingsley, 2014 pág.403).

As máquinas girantes CC possuem dois aspectos de separação construtiva: rotor e estator. O rotor incorpora: eixo, mais bobinas interligadas no núcleo de ferro magnético (alta permeabilidade). Em geral o rotor nas Máquinas CC são enrolamentos de armadura, na qual gera em CA, transformam em CC, no comutador em associação as escovas, próxima no eixo de quadratura ( $90^\circ$  graus elétrico), a Figura 13 ilustra (Fritzgerald e Kingsley, 2014 pág.403):

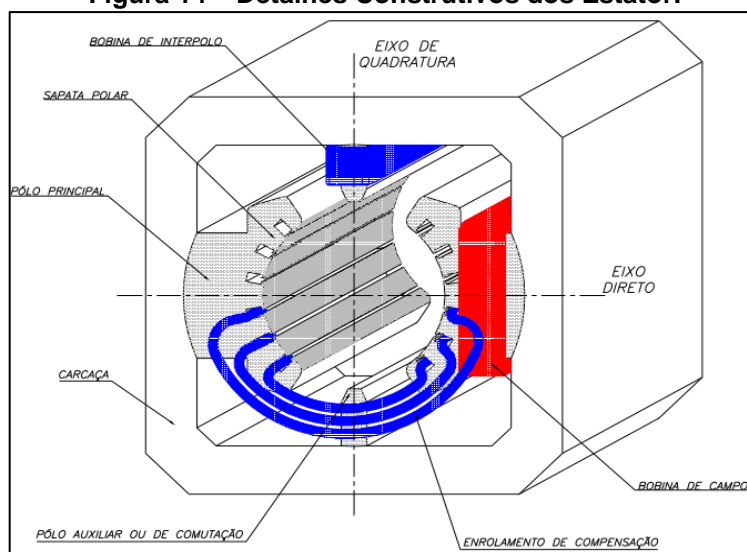
**Figura 13 - Detalhes Construtivos dos Rotor.**



Fonte: PEA (2019).

No estator, normalmente é o enrolamento de campo, parte responsável por gerar e direcionar o campo magnético da máquina. Composto de carcaça parte de proteção, bobina de campo (ou ímã permanente), gera fluxo magnético. Polo principal (material alta permeabilidade magnética) direciona o campo. Sapata polar, enrolamento de compensação e bobina de interpolo, extras na construção para redução de perdas referente ao fluxo magnético, como demonstra na Figura 14 – Detalhes Construtivos dos Estator, a seguir:

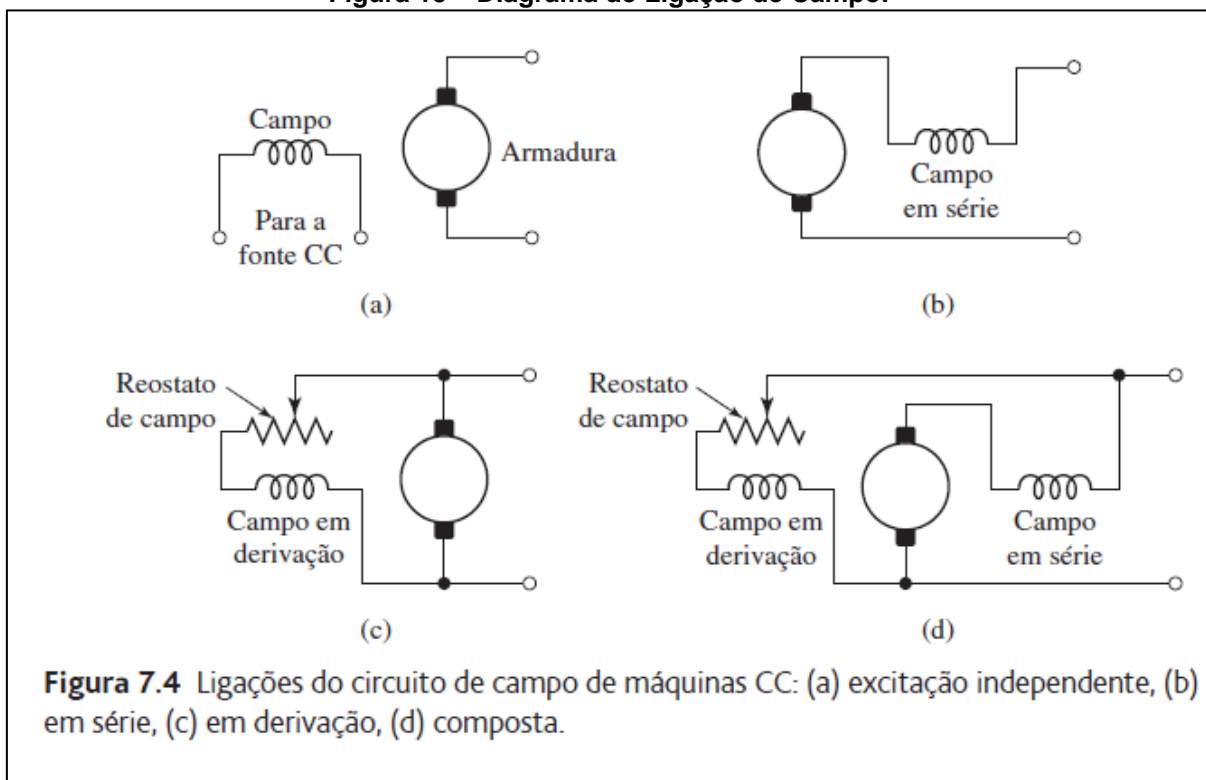
**Figura 14 – Detalhes Construtivos dos Estator.**



Fonte: PEA (2019).

Em função de todas as partes do estator, há diferentes combinações possíveis associadas às ligações do seu enrolamento de campo, ao de armadura, a Figura 15 ilustra estas disposições (Fitzgerald e Kingsley, 2014 pág.403):

**Figura 15 – Diagrama de Ligação de Campo.**



Fonte: Fitzgerald e Kingsley (2014).

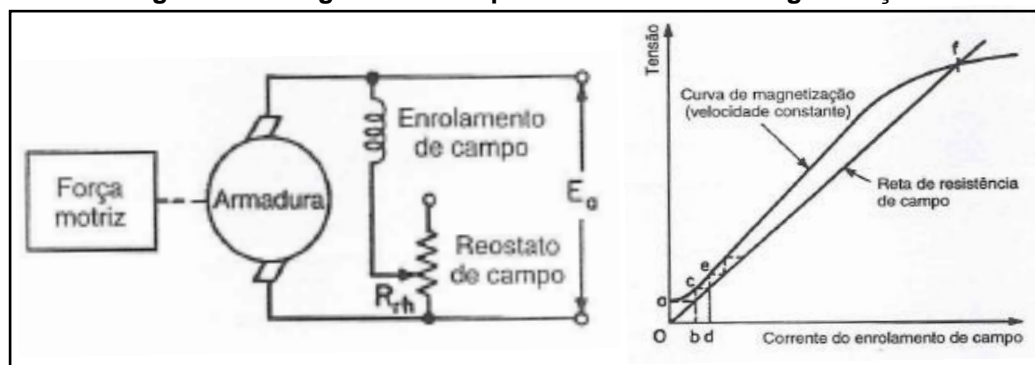
Primeira combinação Figura 15 (a) – excitação independente: o enrolamento de campo e alimentado por outra fonte, podendo ser feito de ímãs permanentes, ou de 1 a 3% em comparação a corrente nominal de armadura. Aplicação excelente controlador de tensão de armadura. (Fitzgerald e Kingsley, 2014 pág.403)

Segunda combinação Figura 15, intens. (b),(c),(d) – Gerador de Autocitação, pode ser realizadas em três tipos de ligação envolvendo o enrolamento de campo e o enrolamento de armadura: em série (Figura 15 - b), derivado ou paralelo (Figura 15- c), e composto, onde o enrolamento de campo é dividido em duas seções, sendo: serie, outra em paralelo (Figura 15 - d) (Fitzgerald e Kingsley, 2014 pág.408).

Nos geradores autoexcitados, devem estar presentes no ferro, magnetismo residual para o processo, possa ser iniciado. Observa-se isto na curva de magnetização, onde no início da curva não passa na origem, pelo residual presente aço elétrico. A Figura 16 – Diagrama da Máquina CC e Curva de Magnetização. Figura

16 – Diagrama da Máquina CC e Curva de Magnetização. ilustra a curva de magnetização (Fritzgerald e Kingsley, 2014 pág.408):

Figura 16 – Diagrama da Máquina CC e Curva de Magnetização.



Fonte: Toro (1999).

Na Figura 16, representa uma curva de magnetização, válida para uma velocidade constante de rotação de armadura. Mesmo com a FEM igual a zero e possível visualizar tensão em  $A_0$ , devido ao residual presente. A reta de resistência de campo, referente resistência de campo e à resistência ativa de reostato. Esta tensão gera corrente no enrolamento de campo  $b$ , e conseqüentemente gera um fluxo magnético, aumentando a FEM para  $bc$ , aumentado a corrente no enrolamento, este processo se replica até atingir  $f$ , ponto onde a corrente produza campo de suficiente para sustenta-lo. Este processo também conhecido como escorvamento, para ser possível são necessários três passos: primeiro existir um campo residual, segundo a FMM do enrolamento de campo deve auxiliar o campo residual e terceiro passo a resistência tem que ser menor ao trecho linear da curva de saturação (Toro 1999, pág. 271).

### 2.3 TURBINA DE TESLA

Este capítulo trará aspectos construtivos, descrição de funcionamento, a história e os detalhes referentes a turbina criada por Nikola Tesla, e que veio a ser patenteada nos Estados Unidos em 1913.

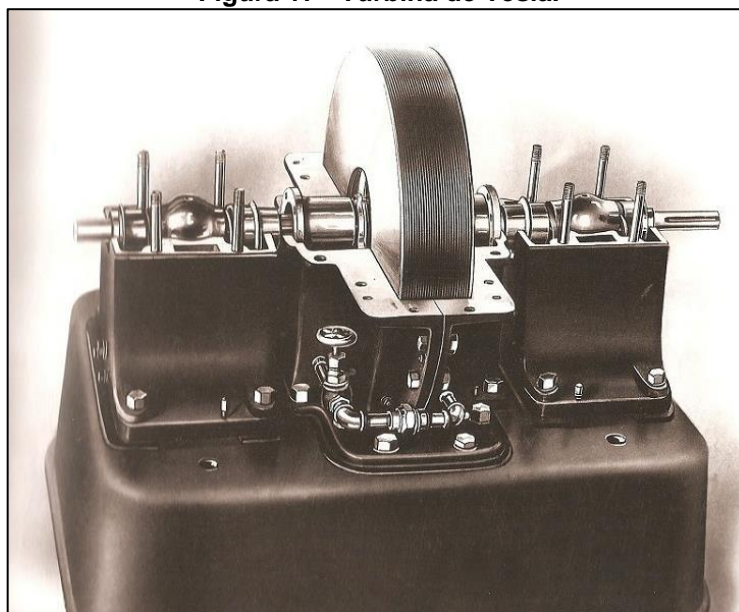
### 2.3.1 História

Nikola Tesla (1856-1943) está entre os gênios que revolucionaram a humanidade, destacado por projetos, invenções, e conceitos fora da sua época; com ideias inovadoras, foi responsável por diversas descobertas em vários seguimentos, aclamado como pai da rede distribuição de energia elétrica alternada, criador do motor de indução, entre outros feitos.

Em 1910 é apresentada a dupla patente de turbina e compressor: a turbina de Tesla veio com características pouco convencionais (Batista 2009).

Em parceria com a empresa Allis Chalmer Manufacturing Company (USA), desenvolveu 3 protótipos da turbina. A maior turbina produzida continha 60 discos de 1,5 m de diâmetro espaçados entre si, rotação de 3600 rpm, alimentada por vapor d'água a 5,5 atm de pressão, fornecendo a potência de 500 kW (Neckel 2013), apresentada na Figura 17:

**Figura 17 - Turbina de Tesla.**



**Fonte: Gaspar (2015).**

Porém, aspectos importantes inviabilizaram sua aplicação e sucesso, como às demais turbinas contemporâneas que se consagraram, os quais se destacam: gerar baixas potências; não possuir equações para realizar projetos; a siderúrgica

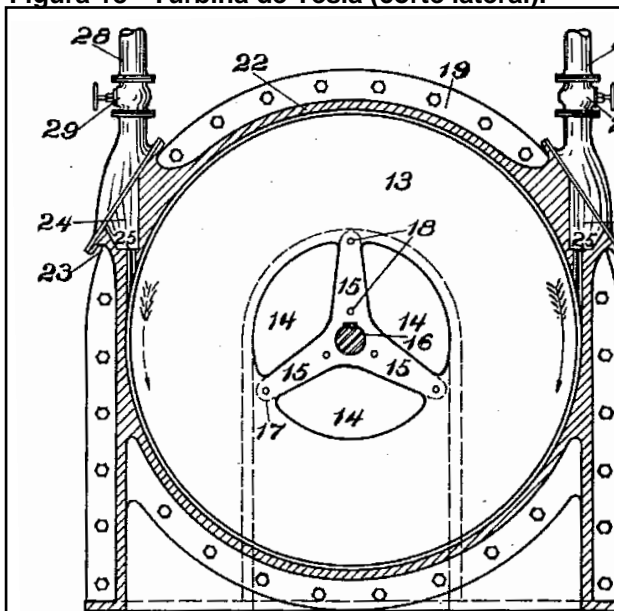
estava em desenvolvimento e os metais disponíveis não operavam com altas temperaturas e rotações sem apresentar falhas.

Na década de 50 a comunidade acadêmica voltou a pesquisar essa turbina, pelas suas características singulares que torna o custo produtivo viável (Gaspar 2015).

### 2.3.2 Características construtivas

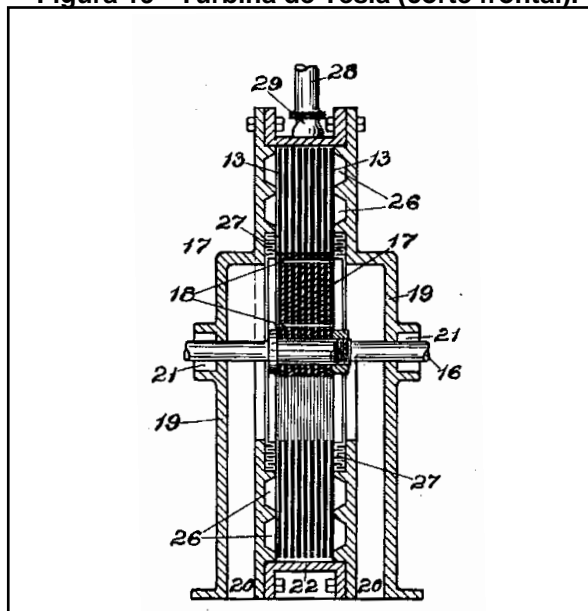
A patente 1061206, de 6 de março de 1913, registra a turbina de Tesla, sendo composta pelas seguintes partes ( Figura 18 e Figura 19): Discos Lisos: cilindros com a superfície não porosa (detalhe 13, Figura 18), material leve e inerte, com furos defasados igualmente próximo ao centro (escape do fluido, Figura 18 – detalhe 14.); No projeto original de Tesla eram barras no centro do disco (detalhe 15, Figura 18), por causa de problemas mecânicos, os projetos mais recentes alteram para furos no meio (Ilustrado na Figura 21- detalhe 6) (Rocha at al, 2013).

Figura 18 - Turbina de Tesla (corte lateral).



Fonte: Gaspar (2015).

Figura 19 - Turbina de Tesla (corte frontal).



Fonte: Gaspar (2015).

Eixo de rotação: "...Seção transversal circular maciça, com degraus para ajuste para peças montadas sobre ele. As extremidades são chanfradas para evitar

rebarbamentos e suas arestas são arredondadas para evitar esforços localizados”, (Rocha et al, 2013).

Encapsulamento: extremidades que isolam o fluido, para que o mesmo realize trabalho no disco liso, e o protege de elementos externos.

Bocal de entrada: abertura responsável por direcionar o jato contra o disco liso (detalhe 28, Figura 18 e Figura 19).

Bocal de saída: abertura ligada, aos furos do cilindro: retira o fluido da turbina.

Uma das características mais versáteis da Turbina de Tesla (TT) é possível utilizar vários tipos de fluidos em diversos estados, pois os componentes, dos materiais utilizados, devem ser planejados para ser adequar ao fluido operante, não resulte em falhas de exercício. Exemplo os materiais que a compõe deve ser resistente: a corrosão, pressão, vibração, choques e esforços mecânicos, de preferência (Rocha et al 2013).

Existem muitas variáveis a ser explorada na TT, tendo a formatação de suas formas geométricas, dos seus componentes, ao posicionamento das peças, interage diretamente na resolução de seu desempenho, dentre eles: (Neckel 2013):

- Rotor: junção do compilado de discos espaçados entre si acoplados ao eixo, termo utilizado por autores para facilitar o entendimento do funcionamento em relação a outras turbinas. Local onde realiza a conversão de energia (detalhe 5 e 6 na, Figura 19). (Neckel 2013)
- Estator: nomenclatura associado na mesma ideia do rotor. Componente em questão e Encapsulamento que ficar a redor do rotor não realiza movimento (detalhe 2 e 7 na Figura 19) parte responsável pela vedação.
- Distância entre disco: os discos acoplados paralelamente em relação ao outro; a sua distância interfere diretamente na queda de pressão, na velocidade e torque aplicados no eixo.

Muitos autores afirmam que quanto menor a distância entre os discos reduz escoamento do fluido; melhora o desempenho, pela maior área de contato nos discos, causando o aumento de torque, mas em contrapartida eleva o momento de inércia da turbina, na qual reduz o dinamismo do sistema, gerando lentidão no processo entre outros problemas. (Neckel 2013, pág. 19).

- A distância do rotor (disco) e o estator (encapsulamento), distância interfere no que tange a direção e escoamento do fluido também afeta no desempenho do mesmo.
- Raio dos Discos: o raio externo, região total do disco fornece a área de contato com a vazão do fluido ponto onde realiza trabalho e transfere energia para o rotor. O raio interno, círculo fictício criado para facilitar parâmetros de cálculo e simulação, se enquadra o eixo, os furos de vazão, região sobressalente.
- Números de bocais Injetores e saídas do fluido: seu formato, ou posição e quantidade; influencia diretamente no comportamento do fluido em relação a TT sendo na velocidade e vazão volumétrica se o mesmo atua em comportamento regime laminar (escoamento em direção linear) ou em regime tubular (escoamento em sentido circular, direção e sentido, mais caóticos).  
Já a saídas e a composição dos furos na proximidade do centro do disco, fica responsável pela extração do fluido do interior da TT pede compatibilidade ao sistema de entrada. Para evitar resistência na saída do fluido do interior da TT.
- Variação de inclinação angular dos componentes e formato geométrico: mudança no posicionamento angular e na estrutura geométrica de alguns componentes afeta a direção e sentido e influencia no fluxo de água.
- Dimensionamento mecânico: estrutura rígida complementar a qual finaliza seu funcionamento é formada por: eixo, mancais, rolamentos, espaçadores, suportes, parafusos, arruelas, porcas e etc.

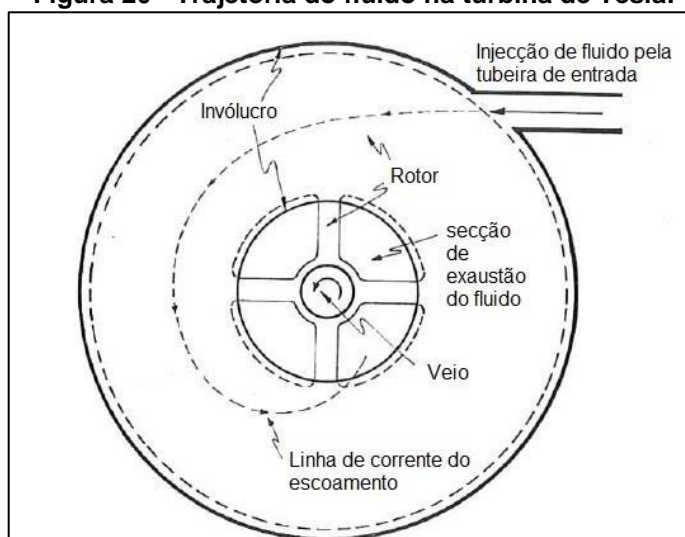
### 2.3.3 Funcionamento

O princípio de funcionamento da TT consiste na capacidade de aderência de um fluido sobre a uma superfície (Couto et al, 2006). Quando um fluido é injetado no encapsulamento da turbina, sua tendência natural é preencher o local e buscar uma saída; estabelecido o percurso, o fluido se desloca adquirindo certa velocidade; pelo



princípio da aderência, os discos serão forçados a se movimentar e adquirir velocidade compatível ao fluido; destacado na Figura 20 - Trajetória do fluido na turbina de Tesla, neste fenômeno, a energia contida no deslocamento do fluido é transferida à turbina, permitindo a sua aplicação em inúmeros fins, como a geração de energia elétrica. Sua principal diferença entre as demais turbinas é a capacidade de ser acionada com gases, fluidos com mais de uma fase, fluidos com viscosidade elevada, e ainda com partículas sólidas suspensas no fluido.

**Figura 20 - Trajetória do fluido na turbina de Tesla.**



**Fonte: Gaspar (2015).**

#### 2.3.4 Estado da Arte

Na forma original proposta por Tesla, o sentido de rotação da turbina é reversível, uma vez que há dois bicos de injeção em posições opostas. Em projetos recentes, esta característica não é adotada; nos estudos de Gaspar (2015), Rocha (2013), Neckel (2013) e Couto (2006), por exemplo, dispõe de apenas um duto de admissão, destacado pela parte 2: (Figura 21).

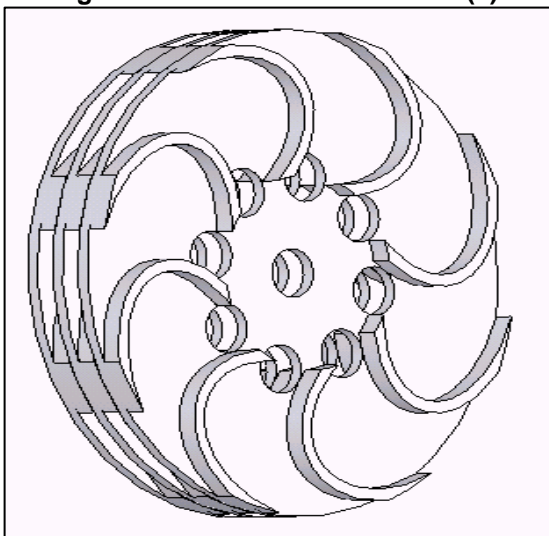
**Figura 21 - Protótipo de turbina de Tesla.**



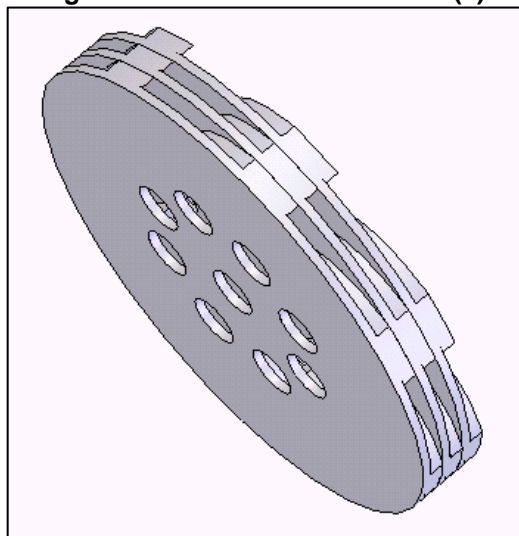
**Fonte: Placco (2010).**

Após estudos, os discos também tiveram proposta de modificação, gerando novas patentes; o Engenheiro Eletricista Julio Cesar Batista e o Físico Heraldo da Silva Couto, uniram ao disco características análogas a forma das pás da turbina Pelton, tal alteração foi registrada sob o n° de patente MU 8601863-9 U2 de 2008. Com a forma explicitada na, os autores atribuem maior eficiência na obtenção de torque sobre o eixo, quando na função de turbina, ou pressão, quando acionada como bomba: assim versa a patente, apresentada nas Figura 22 e Figura 23:

“TURBINA DE DISCOS HÍBRIDA TESLA-RODA PELTON. Patente de Modelo de Utilidade para uma turbina híbrida que se constitui numa turbina Tesla aperfeiçoada com a substituição parcial ou total de seus discos lisos por discos inovadores denominados "Tipo Pelton". As partes da turbina Tesla são: Estator, eixo, injetor, exaustor e discos lisos. O disco com forma inovadora objeto desta patente possui características da Roda Pelton, uma vez que possui cavidades que são impulsionadas pelo fluido de trabalho. Os discos "tipo Pelton" têm a finalidade de aumentar o torque fornecido pelo eixo da turbina consistindo em um aperfeiçoamento da turbina Tesla que permite viabilizar sua utilização e melhorar sua eficiência em aplicações que requerem maior torque do que o fornecido pela turbina Tesla original. A proporção de discos "tipo Pelton" e lisos, utilizada na turbina híbrida, determina o quanto aumentará o torque fornecido pela turbina se comparado à uma turbina Tesla original. A turbina Híbrida Tesla-Roda Pelton pode ser utilizada como bomba, compressor ou bomba de vácuo se operar de modo inverso, ..., efeito obtido girando-se o seu eixo por um motor”.

**Figura 22 - Turbina Tesla-Pelton (1).**

Fonte: Batista (2009).

**Figura 23 - Turbina Tesla-Pelton (2).**

Fonte: Batista (2009).

A disposição dos discos, em função do posicionamento dos orifícios de escoamento do fluido, círculos ou triângulos distribuídos em torno do eixo, também foi ensaiado com modificações em referência a TT original. Placco (at al, 2010) efetuou estudos aplicando defasagem angular entre os discos da Turbina de Tesla, como evidenciado nas Figura 24 e Figura 25.

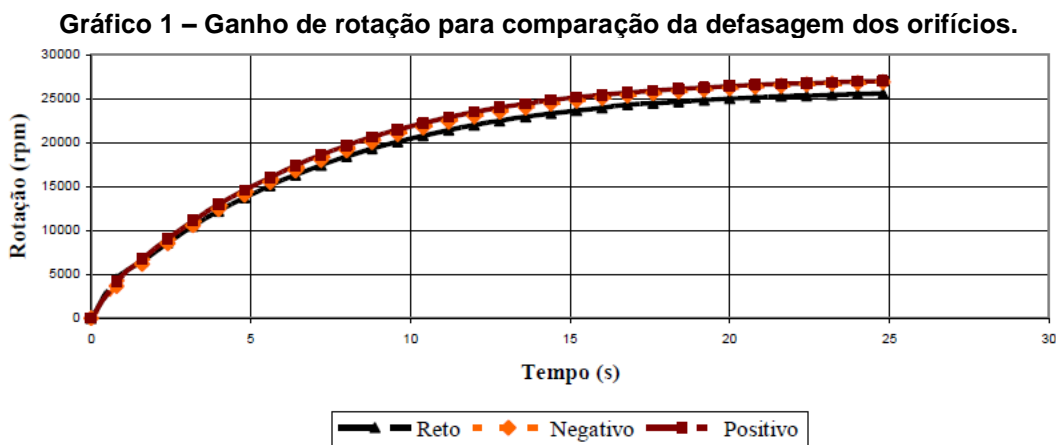
**Figura 24 - Discos (Defasagem de  $-30^\circ$ ).**

Fonte: Placco (2010).

**Figura 25 - Discos (Defasagem de  $+30^\circ$ ).**

Fonte: Placco (2010).

As aplicações destas defasagens obtiveram resultados significantes; Placco (2010) relata ganhos observados na ordem de 12%, quando da defasagem de +30°; os resultados foram evidenciados pelo Gráfico 1.



Fonte: Placco (2010).

Tais estudos são de grande valia para o desenvolvimento da TT. Dos materiais às características construtivas, os avanços podem propiciar uma turbina de baixo custo, com rendimento aceitável para microgeração, impactando na cadeia energética como um todo, por se tornar acessível aos, até então, apenas consumidores de energia elétrica.

## 2.4 CONCLUSÃO PARCIAL

As demandas energéticas são crescentes, no mesmo sentido está a busca por fontes renováveis de todos os tipos, abrindo campo para diferentes formas de geração. Como visto, o maior crescimento tem se observado pela contribuição das gerações fotovoltaica e eólica, sendo a fonte solar a de maior facilidade de instalação e menor aporte de investimentos. Como consequência das modificações na geração e distribuição de energia elétrica, a microgeração se tornou uma realidade crescente.

Todas as turbinas apresentadas tem elevado custo de produção, em função da complexidade dos componentes e quantidade de materiais utilizados. São amplamente empregadas em situações de relevo favorável, seja por quedas elevadas ou capacidade de represamento de água. Comparativamente, a Turbina de Tesla

apresenta menor complexidade mecânica, impactando positivamente no seu custo de produção. Ela tem grande versatilidade de aplicação, podendo ser empregada em diferentes fluidos, gases em alta pressão, ou mesmo com fluxos de água.

Para a geração de pequenas potências, o emprego de geradores de imã permanente apresenta vantagem por não necessitar de injeção de potência para controle de carga. Esta característica foi relevante na escolha do gerador a ser acoplado a Turbina de Tesla deste trabalho.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo será mostrado: a escolha do gerador entre os modelos disponíveis; a pesquisa de consumo de água realizada como fonte de parâmetro de projeto; o setup utilizado para a realização dos ensaios.

#### 3.1 ESCOLHA DO TIPO DE GERADOR

Para a escolha do modelo de gerador mais adequado à turbina, foram selecionados dois tipos de motores ligados para funcionar como gerador, sendo:

1. Motor monofásico - 127 V tipo universal de 450 W;
2. Servo motor 1 - 24 V<sub>cc</sub> de imã permanente; ilustra a Figura 26;

**Figura 26 - Servo Motor Electro-Craft PN0650.00-020.**



O Autor, 2019.

3. Servo motor 2 - 24 V<sub>cc</sub> de imã permanente; apresentada Figura 27:

**Figura 27 - Servo Motor Maxon Motor Pn.: 2260.88-54.**



O Autor, 2019.

A metodologia empregada para a escolha entre eles foi a avaliação das curvas de potência, fornecidas pelos fabricantes, e teste de geração: onde aplicou-se as mesmas velocidades de rotação e torque e efetuaram-se as leituras de tensão de saída, para circuito aberto; e corrente máxima, quando curto circuitado os polos. Por se tratar de motores de pequeno porte, a rotação foi fornecida pelo acoplamento do eixo dos motores ao mandril de uma parafusadeira a bateria, marca DeWalt modelo DCD776, a leitura da rotação foi efetuada por um rotâmetro laser. O ensaio teve os seguintes resultados, conforme Tabela 3:

**Tabela 3 - Comparativo de geração entre máquinas elétricas.**

Gerador	Rotação (rpm)	Excitação do rotor		Tensão gerada	Corrente de curto
<b>Motor Monofásico</b>	<b>1492</b>	8,0 A	2,3 V	<b>5 Vac</b>	<b>7,0 A</b>
<b>Servo Motor 1</b>	<b>1435</b>	0	0	<b>46,72 Vdc</b>	<b>4,7 A</b>
<b>Servo Motor 2</b>	<b>1468</b>	0	0	<b>42</b>	<b>3,2 A</b>

**O Autor, 2019.**

Com os dados acima coletados utilizou-se da potência gerada como critério de avaliação. Em primeira análise, os servos motores mostraram-se mais eficientes, uma vez que não necessitou excitação, já que são fabricados com ímãs permanentes que garantem campo magnético permanente. Em geral, os motores forneceram as potências de 35 W, 219 W e 134 W respectivamente. O motor monofásico necessitou de 18,4 W, potência injetada no rotor, tendo um balanço de apenas 16,6 W. Assim, pela potência fornecida, o servo motor 1 apresentou-se mais interessante para ser utilizado como gerador. Outros pontos preponderantes foram a facilidade de montagem e operação, o servo motor dispensa excitação externa; dimensões dos equipamentos, o motor monofásico é maior e mais pesado que os servos motores, dificultando a instalação.

### 3.2 PRESQUISA DE PERFIL DE CONSUMO HÍDRICO

Foram coletados os dados de consumo mensal de dois condomínios da cidade Curitiba, num espectro de 18 meses a 24 meses. Não foi possível o

levantamento do perfil de consumidores industriais ou comercial, desta forma limitou-se a avaliação dos presentes perfis. O objetivo deste levantamento foi encontrar a vazão média em litros por minuto, e utilizar este dado como parâmetro inicial do setup de ensaio da Turbina de Tesla, e durante o ensaio verificar o potencial de geração a partir destas condições.

O primeiro condomínio é constituído por um prédio de 20 andares, com aproximadamente 95 usuários, entre condôminos e funcionários, dispõe de uma unidade residencial por andar, situado no bairro Água Verde.

Os dados de consumo coletados, para o período de setembro de 2017 a abril de 2019 de consumo, são apresentados na Tabela 4:

**Tabela 4 - Consumo de água condomínio 1.**

Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Média Consumo
set/17	344	mar/18	370	set/18	485	385 m³/mês
out/17	387	abr/18	383	out/18	455	12,83 m³/dia
nov/17	422	mai/18	349	nov/18	457	0,53 m³/h
dez/17	401	jun/18	367	dez/18	412	534,72 l/h
jan/18	406	jul/18	330	jan/19	358	8,91 l/min

O Autor (2019).

O segundo consumidor é um condomínio, do bairro Barreirinha, constituído por 10 prédios de 5 andares, 8 unidades por andar, um total de 400 unidades, e aproximadamente 850 usuários entre condôminos e funcionários.

Os medidores são dispostos um para cada dois prédio, tendo suas médias de consumo de água, apresentadas nas Tabela 6 e Tabela 5 a 9:

**Tabela 5 - Consumo mensal médio (cond. 2 / medidor 1).**

Medidor		0176-4060		Hidrômetro		315n003926-5-2			
Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Média Consumo	
mai/17	601	nov/17	596	mai/18	704	nov/18	619	600,5 m³/mês	
jun/17	507	dez/17	569	jun/18	629	dez/18	600	20,01 m³/dia	
jul/17	547	jan/18	558	jul/18	628	jan/19	667	0,83 m³/h	
ago/17	569	fev/18	610	ago/18	619	fev/18	595	834,0 l/h	

(continua)



set/17	539	mar/18	603	set/18	591	mar/18	620	(conclui)	
out/17	577	abr/18	665	out/18	629	abr/18	563	13,90	l/min

O Autor (2019).

**Tabela 6 - Consumo mensal médio (cond. 2 /medidor 2)**

Medidor		0176-5116		Hidrômetro		214S001288-5-2			
Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Média Consumo	
mai/17	561	nov/17	540	mai/18	516	nov/18	398	510,5	m³/mês
jun/17	489	dez/17	497	jun/18	437	dez/18	382	17,01	m³/dia
jul/17	519	jan/18	523	jul/18	362	jan/19	585	0,70	m³/h
ago/17	533	fev/18	540	ago/18	358	fev/18	642	709,02	l/h
set/17	479	mar/18	547	set/18	533	mar/18	348	11,81	l/min
out/17	481	abr/18	505	out/18	570	abr/18	360		

O Autor (2019).

**Tabela 7 - Consumo mensal médio (cond. 2 /medidor 3).**

Medidor		0176-6996		Hidrômetro		C16S007355-5-2			
Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Média Consumo	
mai/17	742	nov/17	718	mai/18	685	nov/18	633	664	m³/mês
jun/17	570	dez/17	680	jun/18	721	dez/18	632	22,13	m³/dia
jul/17	677	jan/18	646	jul/18	470	jan/19	693	0,922	m³/h
ago/17	700	fev/18	686	ago/18	656	fev/18	643	922,22	l/h
set/17	667	mar/18	652	set/18	586	mar/18	681	15,37	l/min
out/17	661	abr/18	672	out/18	644	abr/18	614		

O Autor (2019).

**Tabela 8 - Consumo mensal médio (cond. 2 /medidor 4).**

Medidor		0176-7011		Hidrômetro		712Z011160-5-2			
Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Mês	Consumo (m³)	Média Consumo	
mai/17	531	nov/17	531	mai/18	555	nov/18	447	466	m³/mês
jun/17	461	dez/17	469	jun/18	495	dez/18	467	15,53	m³/dia
jul/17	490	jan/18	465	jul/18	454	jan/19	460	0,6472	m³/h
ago/17	504	fev/18	512	ago/18	513	fev/18	354	647,22	l/h
set/17	449	mar/18	465	set/18	405	mar/18	422	10,78	l/min
out/17	480	abr/18	508	out/18	430	abr/18	403		

O Autor (2019).

**Tabela 9 - Consumo mensal médio (cond. 2 /medidor 5).**

Medidor		1764780		Hidrômetro		214S001277-5-2			
Mês	Consumo (m <sup>3</sup> )	Mês	Consumo (m <sup>3</sup> )	Mês	Consumo (m <sup>3</sup> )	Mês	Consumo (m <sup>3</sup> )	Média Consumo	
mai/17	620	nov/17	614	mai/18	713	nov/18	568	604	m <sup>3</sup> /mês
jun/17	517	dez/17	545	jun/18	644	dez/18	604	20,13	m <sup>3</sup> /dia
jul/17	537	jan/18	553	jul/18	603	jan/19	635	0,838	m <sup>3</sup> /h
ago/17	550	fev/18	612	ago/18	642	fev/18	591	838,89	l/h
set/17	485	mar/18	561	set/18	662	mar/18	630	13,99	l/min
out/17	541	abr/18	660	out/18	725	abr/18			

**O Autor (2019).**

As médias de m<sup>3</sup> consumidos apresentaram diferenças significativas. Como metodologia do ensaio, para a vazão que será aplicada na turbina optou-se por utilizar a média geral dos consumidores pesquisados, conforme Tabela 10:

**Tabela 10 - Médias de consumo.**

<b>Média Geral de Consumo</b>
555,50 m <sup>3</sup> /mês
18,52 m <sup>3</sup> /dia
0,77 m <sup>3</sup> /h
771,53 l/h
12,86 l/min

**O Autor (2019).**

Desta forma, o valor inicial para o ensaio será a aplicação de aproximadamente 13 litros por minuto. Caso seja verificado, durante o ensaio, que a vazão média não desenvolva força de arrasto suficiente para a geração de energia elétrica, conforme a Turbina de Tesla elaborada, buscar-se-á a vazão mínima para geração.

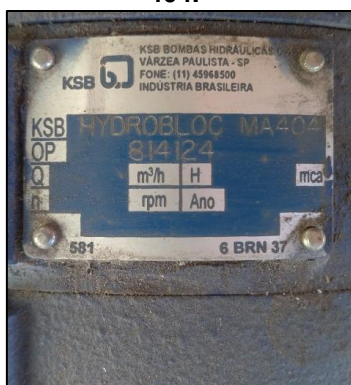
A vazão média também será utilizada como parâmetro de projeto dos componentes da turbina.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS DE ENSAIO

O setup de ensaio é constituído por três caixas d'água de 400 L, duas como reservatório instaladas a 3,5 m de altura, e uma caixa d'água para coleta da água

escoada pela Turbina de Tesla, instalada ao nível do chão. Conta ainda com uma bomba d'água de recalque entre a caixa de coleta e as caixas de armazenamento, e uma bomba fornecendo água para o coletor da Turbina de Tesla. Assim, a estrutura de ensaio permite a realização de testes sem interrupções: nas Figura 28, 29 e 30:

**Figura 28 - Dados de Placa: Bomba KSB MA-404.**



O Autor (2019).

**Figura 29 - Dados de Placa: Motor WEG 3.0 kW.**



O Autor (2019).

**Figura 30 - Conjunto Moto bomba.**



O Autor (2019).

A bomba principal tem vazão limite de 100 l/min, sua capacidade é de 116 mca para 50 l/min. O sistema de bombeamento é de quatro estágios, e movimentado por um motor de 3.0 kW (4.0 c.v.). Ela está ligada a uma tubulação com duas saídas, uma para até 25 l/min e outra para vazão de ordem superior, na Figura 31

**Figura 31 – Hidrômetro.**



O Autor (2019).

O controle da vazão é feito por um sistema de by-pass (desvio do fluxo de água, que retorna para as caixas de armazenamento), instalado na tubulação. E, a fim

de validar o fluxo em tempo real, para condição de até 25 l/min, é utilizado um hidrômetro, exemplificado na Figura 31.

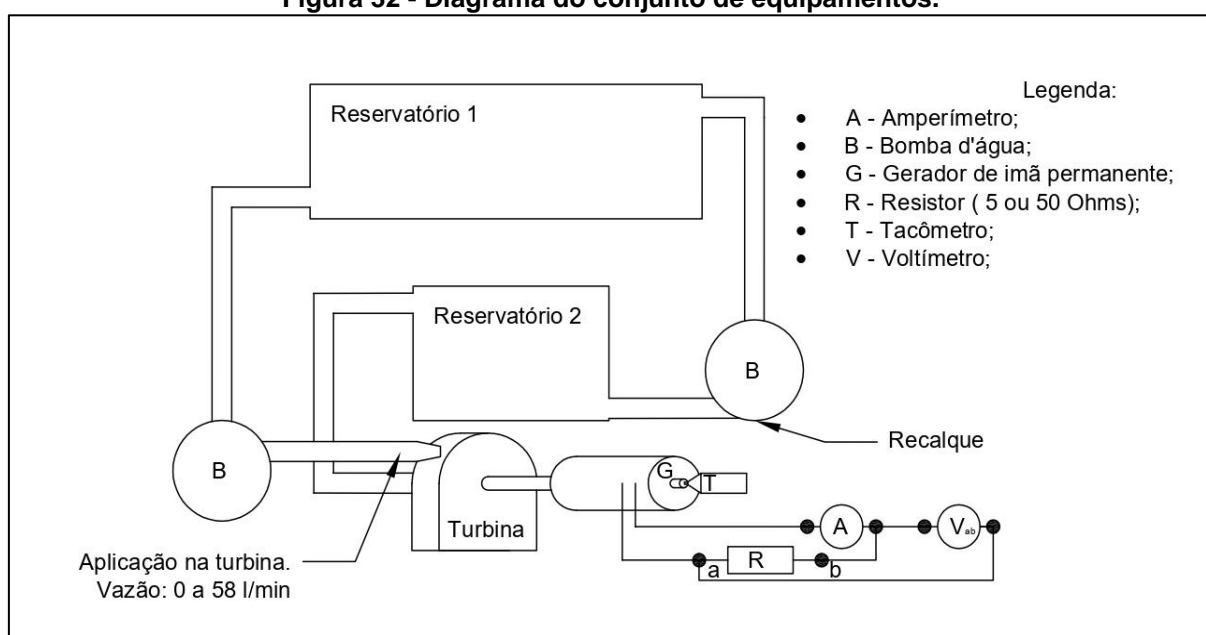
Assim, o procedimento de simulação ocorreu inicialmente com a vazão média encontrada, e em segundo momento foram feitas variações de vazão até limite máximo do setup. A partir das variações e da coleta dos dados de tensão de saída do gerador, foram traçadas as curvas de tensão (V) x vazão (l/min) e tensão (V) x rotação (rpm), que serão apresentados e discutidos nos próximos tópicos.

### 3.4 CONCLUSÃO PARCIAL

Inicialmente, foi efetuada a pesquisa de consumo de água tratada para dois condomínios da cidade de Curitiba, abrangendo valores de consumo para períodos de 18 meses e 24 meses, entre os anos de 2017 a 2019. O resultando obtido foi uma vazão média de 13 l/min, para os locais pesquisados. Este índice foi fundamental para projetar a turbina.

Para a experimentação, foi necessário um conjunto de equipamentos a Figura 32 ilustra, que fornecesse os mesmos valores de vazão encontrados na pesquisa. O componente principal foi a bomba d'água, com capacidade de fornecimento de 100 l/min, e até 116 mca quando fornecendo 50 l/min.

**Figura 32 - Diagrama do conjunto de equipamentos.**



**Fonte: O Autor (2019).**

A última etapa foi a escolha do gerador mais adequado ao projeto da turbina, onde, dentre os três modelos disponíveis optou-se pelo Electro-Craft. A facilidade de acoplamento entre os eixos, a tensão e corrente CC geradas nos testes, a facilidade de acesso aos terminais da bobina, a robustez deste motor, e sua curva característica foram os fatores de se optar por ele.

## 4 DETALHAMENTO CONSTRUTIVO

### 4.1 PROJETO DA TURBINA

Para início do projeto da Turbina de Tesla foi arbitrado um valor para o número de Reynolds dentro dos limites de escoamento laminar. A importância deste parâmetro consiste em não permitir que a velocidade dos discos seja igual à do fluido, posto que: “quando a extremidade do disco atinge a velocidade do fluido injetado tangencialmente, a velocidade relativa entre fluido e disco é nula, e, portanto, não há forças do fluido sobre o disco e não há realização de trabalho ou potência no eixo” (Batista, 2009). Fazendo uso da base de cálculo utilizada por Batista (2009), efetuou-se as adaptações devidas para a água em estado líquido, já que o trabalho referenciado se utilizou de vapor como fluido de excitação da turbina.

As características apresentadas por Placco (2010), de criar defasagem entre a furação dos discos, foram aproveitadas neste trabalho, motivado pelos resultados apresentados

Nesta turbina, assim como a dos autores estudados, não se objetivou a possibilidade de alteração do sentido de rotação. Essa escolha facilitou o projeto, bem como diminuiu o custo de produção do protótipo.

Optou-se por fazer a estrutura em acrílico, para as tampas laterais, uma vez que os processos de usinagem são mais fáceis. Os custos de insumos e hora/máquina são menores quando comparados à metais, como aço ou alumínio. E por se tratar de um modelo didático, a possibilidade de visualizar o funcionamento interno durante a operação foi considerado relevante. Por sua vez, optou-se por aço inox para a manufatura do eixo e dos discos.

Referente ao dimensionamento alguns parâmetros foram desenvolvidos via a comparações, no programa de planilha Excel, equações foram interligadas para que os valores de entrada se combinem, até atingir pontos sugeridos por Choon et al (2011) e de Batista (2009).

## 4.2 CÁLCULO DOS COMPONENTES

Adaptando a metodologia de Choon, et al. (2011) e de Batista (2009), para a utilização de água como fluido de propulsão, os cálculos utilizados foram iniciados com a equação 4.1:

$$V = \frac{Q_v}{A} \quad (4.1)$$

$Q_v$  Vazão Volumetrica ( $m^3/s$ ).

$V$  Velocidade relativa do escoamento ( $m/s$ ).

$A$  Área ( $m^2$ ).

O ponto de partida foi utilizar os dados de vazão média de consumo e vazão máxima do setup de ensaio como parâmetros. A vazão volumétrica máxima foi obtida através da medição de carregamento de um objeto de volume conhecido, sendo obtido potencial máximo de 100 litros por minuto (convertendo para o SI:  $0,00167 m^3/s$ ). E o valor da área do tubo de admissão (bocal de entrada), seu raio de  $0,0127 m$  com área resultando em  $0,0005067 m^2$ , conforme a equação 4.2:

$$V = \frac{0,00167}{0,0005067} = 3,289 \frac{m}{s} \quad (4.2)$$

Segundo Batista (2009 pág.98) Não existe equações, que auxiliem o dimensionamento da Turbina de Tesla, para determinar torque ou potência. Neste caso, foi necessário estipular proporções para os discos, metodologia apresentada por Choon et al. (2011), estabelece uma sugestão a evitar problemas mecânicos, assim como apresenta a equação 4.3:

$$\frac{R}{r_0} \geq 2,5 \quad (4.3)$$

$R$  Raio do discos paralelos (m).

$r_0$  Raio interno fictício (m).

Vendo o estado da arte e partindo de valores de materiais em mãos, estipulou-se, valor do raio dos discos em 0,073 m, e o raio interno fictício 0,018 m (eixo mais furos de vazão, próximos do centro), resolvendo a equação 4.3:

$$\frac{0,073}{0,018} \geq 4,056 \quad (4.4)$$

A próxima etapa: determinar espessura de camada limite laminar, pois dela é possível estipular o máximo de espaço entre disco e encapsulamento, como demonstra equação 4.5:

$$\delta \approx 5 \sqrt{\frac{v \cdot \pi \cdot D}{V}} \quad (4.5)$$

- $\delta$  Espaçamento entre disco e encapsulamento (m).
- $v$  Viscosidade cinemática do fluido ( $m^2/s$ ).
- $V$  Velocidade Relativa de Escoamento (m/s).
- $D$  Diâmetro do disco (m).

A água foi utilizada com suas propriedades á 20°C, sua viscosidade cinemática é de  $1,003 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$  (Evangelista), resolvendo a equação 4.5:

$$\delta = 5 \times \sqrt{\frac{1,003 \times 10^{-6} \times \pi \times 0,146}{3,289}} = 1,867 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (4.6)$$

Como o vão está contido entre duas superfícies, o espaço máximo entre disco será o dobro, assim como a equação 4.7:

$$D_{\delta\text{máx}} = 2 \cdot \delta = 2 \times 1,867 \times 10^{-3} = 3,74 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (4.7)$$



$D_{\delta\text{máx}}$  Distância máxima entre discos (m).

$\delta$  Espaçamento entre disco e encapsulamento (m).

Caso o fator do número de Reynolds seja superior a 2300 estará no regime transitório, e se torna escoamento turbulento acima dos 2400 (Rodrigues). Neste caso o cálculo para a camada limite turbulenta, conforme a equação 4.8 e aplicando na 4.9:

$$\delta = 0,526 \cdot r_0 \cdot \sqrt[5]{\left(\frac{\nu}{r_0^2 \cdot \omega}\right)} \quad (4.8)$$

$\delta$  Espaçamento entre disco e encapsulamento (m).

$\nu$  Viscosidade cinemática do fluido (m/s).

$\omega$  Velocidade Angular (rad/s).

$r_0$  Raio interno fictício (m).

$$\delta = 0,526 \times 0,018 \times \sqrt[5]{\left(\frac{1,003 \times 10^{-3}}{0,018^2 \times \left(\frac{3,289}{0,073}\right)}\right)} = 5,646 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (4.9)$$

O espaçamento entre disco, é a solução da equação 4.7. Com valor da equação 4.9, chega-se na equação 4.10:

$$D_{\delta\text{máx}} = 2 \cdot \delta = 2 \times 5,646 \times 10^{-3} = 1,129 \times 10^{-2} \text{ m} \quad (4.10)$$

Estes valores são projeções que estabelecem valores limite de contorno. Batista fixou um número Reynolds para poder localizar o número de discos. Mantendo padrão a densidade da água em 20°C,  $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$  e coeficiente de viscosidade dinâmica:  $\mu = 1,002 \times 10^{-3} \text{ Pa/s}$  (Evangelista). O valor de Vazão mássica, aplicando a equação 4.11:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q_v = 998,2 \times 0,00167 = 1,663 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.11)$$

- $\dot{m}$  Vazão massica (kg/s).  
 $\rho$  Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>).

O coeficiente de vazão e apresentado como equação 4.12:

$$n = \frac{4}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot D \cdot Re} \dot{m} \quad (4.12)$$

- $\dot{m}$  Vazão mássica (kg/s).  
 $\mu$  coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido (Pa/s).  
 D Diâmetro do disco (m).  
 Re Número de Reynolds (adimensional).

O número especulado foi 320 para o número de Reynolds, e usando valor de 4.11, só para a operação se encontrar dentro escoamento laminar, resolvendo equação 4.12:

$$n = \frac{4 \times 1,663}{3 \times \pi \times 1,002 \times 10^{-3} \times 0,146 \times 320} = 15 \quad (4.13)$$

Os números de disco seria, conforme a equação 4.14:

$$N = n + 1 = 16 \quad (4.14)$$

- n coeficiente de vazão (adimensional).  
 N número de discos (adimensional).

Em função dos materiais, decidiu fixar números de discos em 20, para melhorar o torque final, calculando com novo parâmetro número de Reynolds na equação 4.15:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot D \cdot n} = \frac{4 \times 1,663}{3 \times \pi \times 1,002 \times 10^{-3} \times 0,146 \times 19} = 254,028 \quad (4.15)$$

Com este valor especular o espaço entre disco, conforme a equação 4.16 e calculando na 4.17:

$$Re = \frac{4 \rho \cdot V \cdot a}{3 \mu} \quad (4.16)$$

- Re Número de Reynolds (adimensional).  
 **$\rho$**  Densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ ).  
 V Velocidade Relativa de Escoamento (m/s).  
 a Espaço entre disco (m).

$$a = \frac{3 \cdot \mu \cdot Re}{4 \cdot \rho \cdot V} = \frac{3 \times 1,002 \times 10^{-3} \times 254,028}{4 \times 998,2 \times 3,289} = 5,814 \times 10^{-5} \text{ m} \quad (4.17)$$

O distanciamento resultante dos cálculos não era praticável, assim optou-se por estipular um valor de entre discos, 1,2 mm (espessura da chapa de aço inox), e verificar se era adequado, ou seja, o novo número de Reynolds estará na faixa de escoamento laminar, conforme a equação 4.18:

$$Re = \frac{4 \rho \cdot V \cdot a}{3 \mu} = \frac{4 \times 998,2 \times 1,2 \times 10^{-3}}{3 \times 1,002 \times 10^{-3}} = 1593,93 \quad (4.18)$$

O valor encontrado atende à necessidade, não é superior a 2000, ou seja, encontra-se dentro do regime de escoamento laminar.

Para os novos parâmetros definidos, o cálculo de Torque fornecido no regime de escoamento laminar, em uma das faces do disco, é como na equação 4.19 e resolvendo 4.20:

$$T_0 = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R^5 \cdot 3,87 \cdot \left( \frac{R^2 \cdot \omega}{\nu} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4.19)$$

- $T_0$  Torque fornecido (N.m).  
 **$\rho$**  Densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ ).  
 R Raio dos discos paralelos (m).

- $\omega$  Velocidade Angular (rad/s).  
 $\nu$  viscosidade cinemática do fluido (m/s).

$$T_0 = \frac{1 \times 998,2 \times 45,058^2 \times 0,146^5 \times 3,87}{4} \left( \frac{0,146^2 \times 45,058}{1,003 \times 10^{-6}} \right)^{-\frac{1}{2}} = 0,334 \text{ N.m} \quad (4.20)$$

Torque total, para os 20 discos, fornecido na camada limite laminar, assim como na equação 4.21:

$$T_T = 2 \cdot (N - 1) \cdot T_0 = 2 \times (20 - 1) \times 0,334 = 12,687 \text{ N.m} \quad (4.21)$$

- $T_T$  Torque total (N.m).  
 $N$  número de discos (adimensional).

Potência Ativa fornecida na camada de limite laminar, conforme a equação 4.22:

$$P = T_T \cdot \omega = 12,687 \times 45,058 = 571,666 \text{ W} \quad (4.22)$$

Caso o regime de escoamento fosse turbulento o Torque resultante, para uma das faces do disco, conforme a equação 4.23 e sendo equacionado na 4.24:

$$T_0 = \frac{0,073}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R^5 \cdot \sqrt[5]{\frac{\nu}{\omega \cdot R^2}} \quad (4.23)$$

- $T_0$  Torque fornecido (N.m).  
 $\rho$  Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>).  
 $R$  Raio do discos paralelos (m).  
 $\omega$  Velocidade Angular (rad/s).  
 $\nu$  viscosidade cinemática do fluido (m/s).

$$T_0 = \frac{0,073}{2} \times 998,2 \cdot 45,058^2 \cdot 0,146^5 \times \sqrt[5]{\frac{1,003 \times 10^{-6}}{45,058 \times 0,146^2}} = 0,312 \text{ N.m} \quad (4.24)$$

O torque total e potência na camada turbulenta, é encontrado utilizando das equações 4.25 e 4.26, respectivamente:

$$T_T = 2 \cdot (N - 1) \cdot T_0 = 2 \times (20 - 1) \times 0,312 = 11,856 \text{ N.m} \quad (4.25)$$

$$P = T_T \cdot \omega = 11,856 \times 45,058 = 534,208 \text{ W} \quad (4.26)$$

Com a utilização dos cálculos supracitados se fez necessário para preparação do projeto da turbina, com eles foram definidas as medidas dos discos e bico de injeção, para o melhor aproveitamento da turbina.

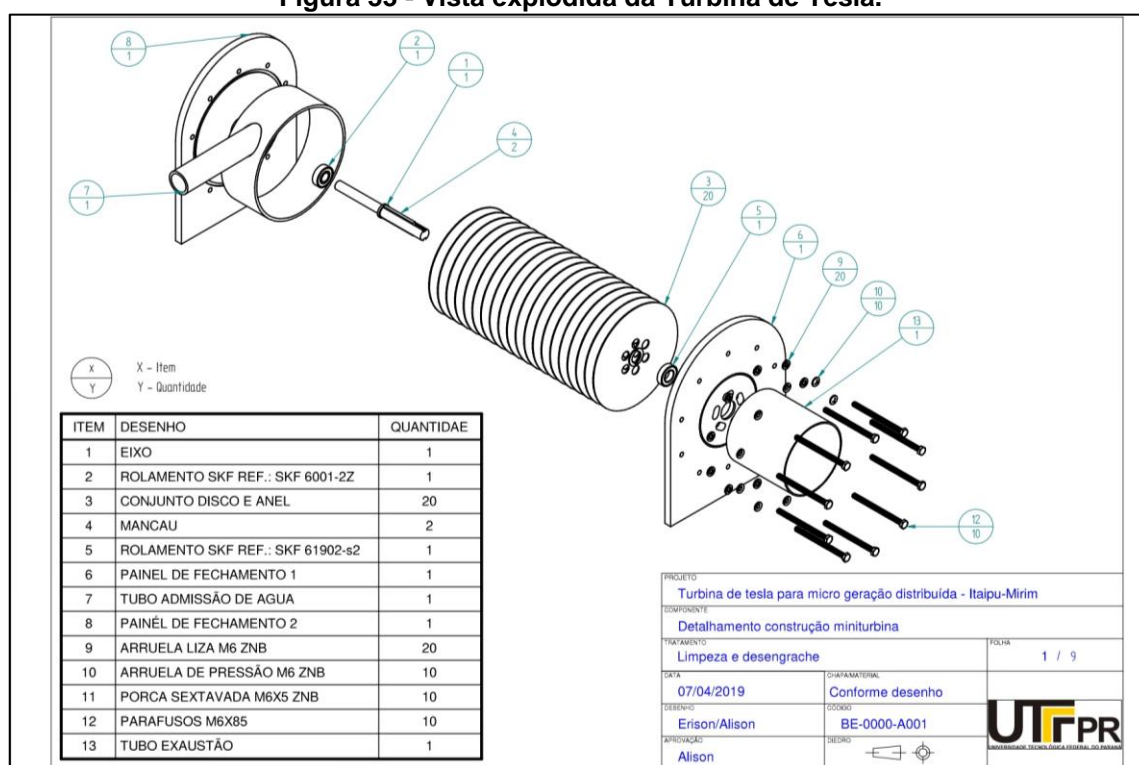
Os valores encontrados para potência da turbina são projeções, pois foram adaptados de autores que utilizaram a turbina para gases em elevadas temperaturas e pressões. Desta forma, entende-se que poderá ocorrer variações significativas, uma vez que será aplicada água em temperatura ambiente.

Assim, considerando os cálculos para modelagem em regime laminar, espera-se que a turbina atinja valores próximos aos calculados.

### 4.3 DESENHO DAS PEÇAS

Após os cálculos dos parâmetros para a turbina, executou-se a modelagem das partes da Turbina de Tesla com o auxílio de software CAD (computer-aided design). Com o uso desta ferramenta pode-se utilizar de processos mais precisos na produção dos componentes, garantindo maior proximidade entre o projeto e a execução. Na Figura 33 apresenta-se o projeto da Turbina de Tesla em vista explodida:

Figura 33 - Vista explodida da Turbina de Tesla.



O Autor (2019).

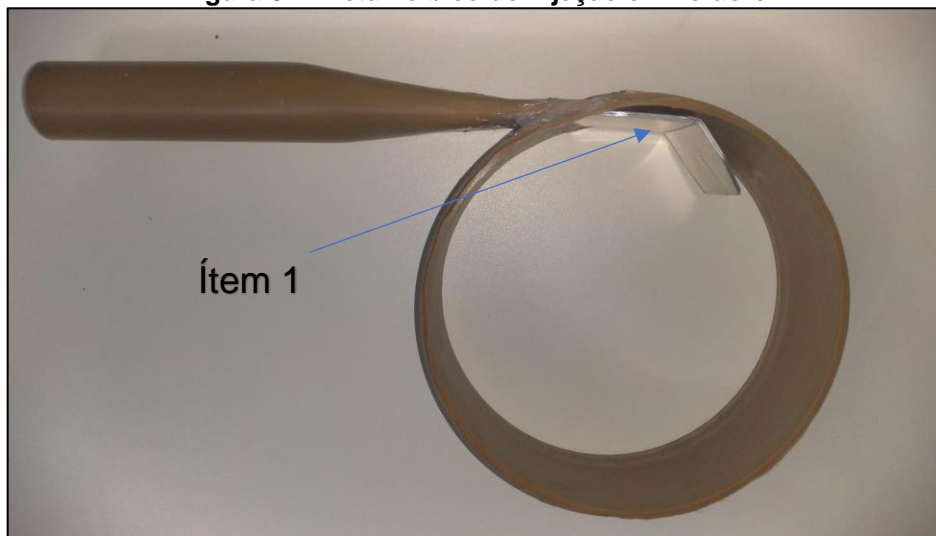
O corte e fresagem das peças fora realizado em torno CNC, para placas laterais em acrílico, por equipamentos de corte a laser, no caso dos discos de aço inox, e eixo em torno manual, o eixo da turbina.

A prancha de desenho com todos os elementos utilizados, seus detalhes de montagem, medidas, materiais e outras características construtivas estão disponibilizadas ao final, no Apêndice A.

#### 4.3.1 Montagem da Turbina de Tesla

No objetivo de conseguir maior velocidade de entrada, para a água, o bico de injeção foi modificado. Para facilitar a modelagem, foi utilizado tubo de PVC, como pode ser visto na Figura 34:

**Figura 34 - Detalhe bico de injeção e involucro.**



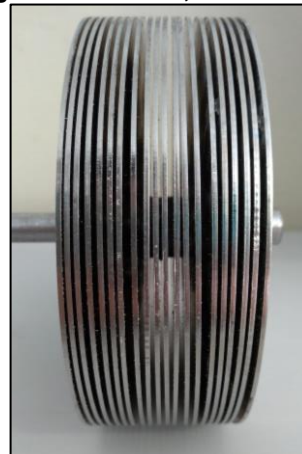
O Autor (2019).

Com as modificações, o bico injetor ficou em forma de retângulo, com 3 mm de altura por 50 mm de largura, uma área aproximada de 15 mm<sup>2</sup>. O posicionamento foi ajustado para que a água atinja os discos numa linha secante, posicionada a aproximadamente 72 mm acima do eixo, como destacado pelo item 1 da Figura 34 - Detalhe bico de injeção e involucro (Item 1 - molde confeccionado em alumínio, para a modelagem do bico injetor).

Ainda, buscando aperfeiçoar o protótipo, seguindo os resultados de Placco (2010), aplicou-se a defasagem de 30° entre os discos, evidenciado nas Figura 35 e Figura 36:

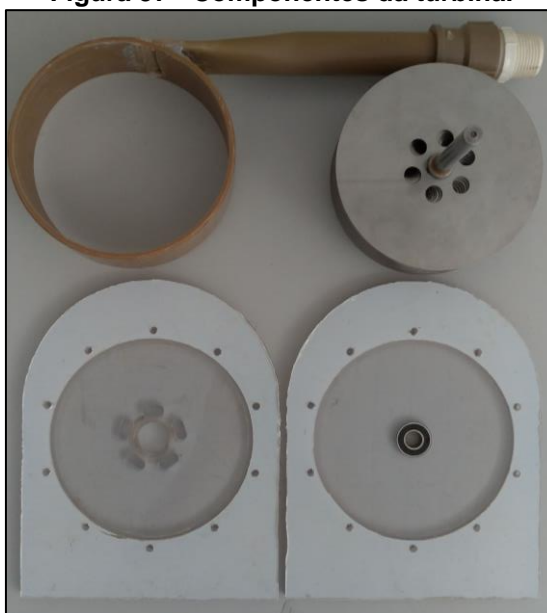
**Figura 35 - Discos com defasagem de 30°.**

O autor (2019).

**Figura 36 - Disco, vista lateral.**

O autor (2019).

As placas laterais e os discos seguiram todos os parâmetros de projeto, não sofrendo quaisquer alterações em suas respectivas produções, conforme apresentado na Figura 37 - Componentes da turbina:

**Figura 37 - Componentes da turbina.**

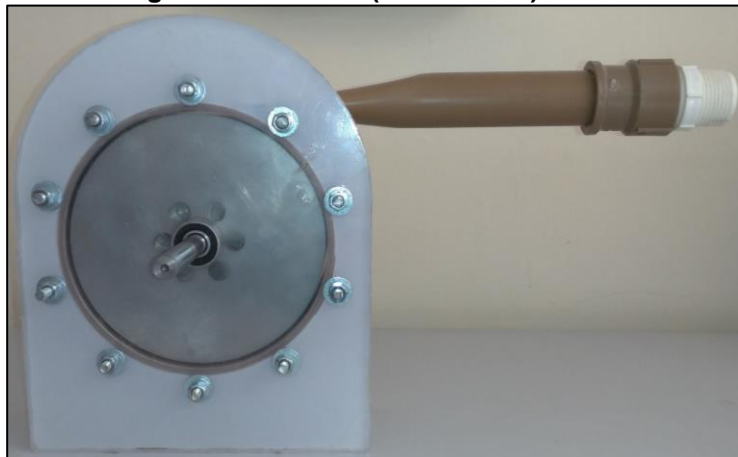
O autor (2019).

A turbina montada para os ensaios é a apresentadas nas Figura 38 e Figura 39:



**Figura 38 - Turbina (vista lateral).**

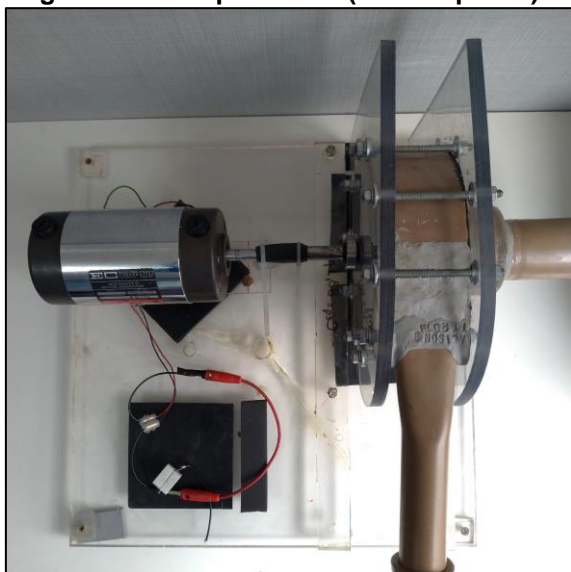
O autor (2019).

**Figura 39 - Turbina (vista frontal).**

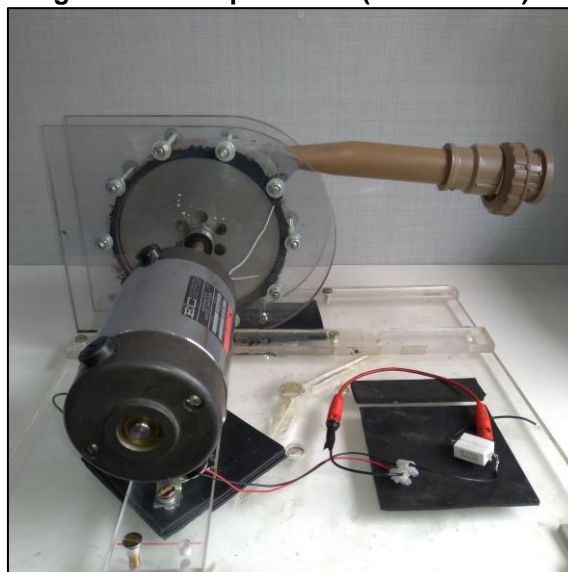
O autor (2019).

Algumas dificuldades que podem comprometer a máxima eficiência da Turbina de Tesla foram encontradas na montagem, sendo a mais relevantes: o distanciamento dos discos instalados no eixo, por nem todos serem completamente planos, não foi possível manter a distância de 1,2 mm, como projetado; As massas acumuladas dos 20 discos feitos em aço inox apresentam grande densidade, ao total eixo e discos tem juntado 4,85 kg; A turbina, montada, ficou com 5,2 kg; e uma leve vibração no eixo.

Por fim, o setup composto pela Turbina de Tesla acoplado ao gerador é apresentado nas Figura 40 e Figura 41 - Setup de teste (vista frontal).:

**Figura 40 - Setup de teste (vista superior).**

O autor (2019).

**Figura 41 - Setup de teste (vista frontal).**

O autor (2019).

A turbina finalizada conta ainda com: um duto direcionar a água que sai de dentro dela; um conjunto de registro com união, na entrada do bico de injeção; junção entre eixos, adaptada com tubo plástico termoencolhível; base em acrílico.

Finalizada, a turbina apresentou pontos de vazamento entre o invólucro e as tampas laterais, sendo solucionado com aplicação de massa de calafetar. Também se verificou uma leve tortuosidade no eixo, este defeito não teve solução e ocasionando excessiva vibração em rotações acima de 100 rpm.

#### 4.4 CONCLUSÃO PARCIAL

O projeto da turbina necessitou dos dados levantados pela pesquisa, que foram utilizados como parâmetro inicial para o desenvolvimento dos componentes, em especial diâmetro do disco, espaçamento entre discos, e espaçamento entre disco e invólucro. A fim de melhorar o desempenho da turbina se aplicou a proposta de defasagem dos discos, apresentada por Placco (2010). Isto resulta em possível distorção entre valores de dados de ensaio quando comparados aos valores calculados, embasado na abordagem de Batista (2009) onde contemplava somente a Turbina de Tesla sem desfasamento.

O dimensionamento da turbina fora realizado sem considerar perdas por esforços mecânicos relacionados ao elevado momento de inércia dos discos, vibrações e mais o fator de irregularidade de espaçamento entre os discos. Estes fatores mecânicos podem acarretar na redução de rendimento.

Nos estudos de Batista (2009), sua turbina operando em carga nominal, apresentou rendimento aproximado de 40%, o projeto de Placco (2010) atingiu em torno dos 32% na maior pressão. Em função das dificuldades citadas, a expectativa do rendimento é atingir próximo dos 20%, como resultado dos problemas apresentados.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os ensaios realizados com a Turbina de Tesla, os resultados e comentários para cada avaliação efetuada.

### 5.1 RELAÇÃO TURBINA GERADOR

Foram realizados dois ensaios para verificar a potência fornecida pela turbina e se seria suficientemente adequada para à curva característica do motor. O primeiro avaliou rotação e tensão gerados, o segundo mediu o torque gerado na turbina.

#### 5.1.1 Relação tensão (V) x rotação (rpm)

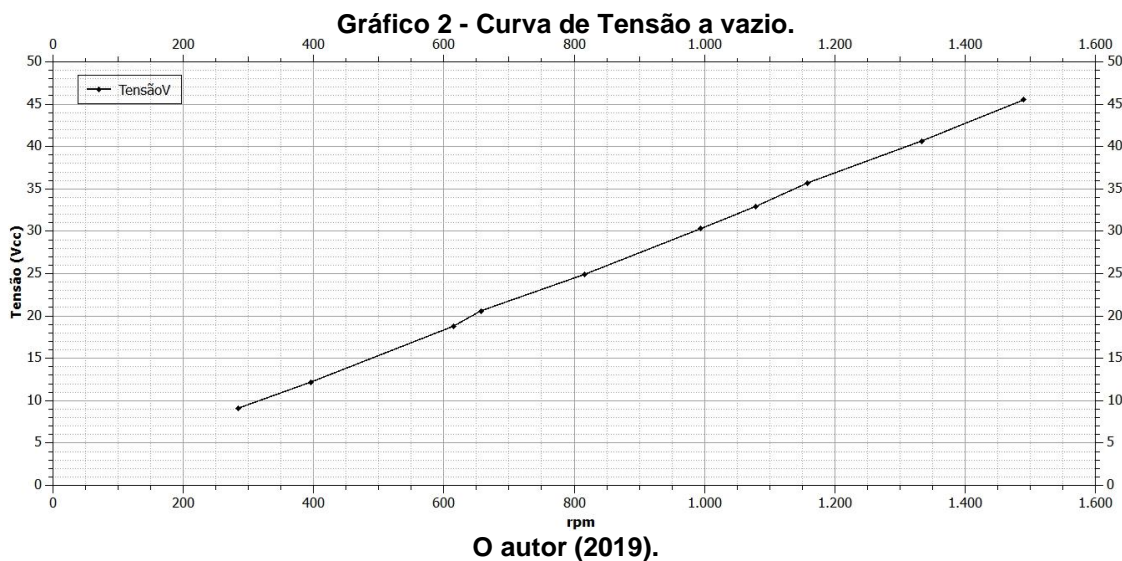
Este ensaio foi realizado sem a presença de carga, verificando assim os valores mínimo e máximo para rotação e tensão. A máxima rotação encontrada foi de 1490 rpm, gerando a tensão de 48,86 V<sub>dc</sub>, valores muito próximos aos encontrados no teste de verificação do motor, e estão apresentados na Tabela 11 - Dados de ensaio: a vazio:

**Tabela 11 - Dados de ensaio: a vazio.**

Velocidade (rpm)	Tensão (V)	Velocidade (rpm)	Tensão (V)
284	9,1	993,7	30,29
396	12,2	1078,6	32,93
615	18,8	1158	35,7
656,6	20,6	1333	40,65
816,6	24,93	1490	45,51

O autor (2019).

No Gráfico 2, a seguir, apresenta-se a curva de tensão para a condição do gerador funcionando a vazio, sem carga ligada nos terminais da bobina.



As curvas apresentadas indicam haver potência na turbina suficiente para excitar o gerador acoplado a ela. A força de frenagem da turbina, nos menores e maiores níveis de vazão, foi superior ao necessário para movimentar o gerador com a bobina curto circuitada.

A capacidade da turbina em converter as vazões de água injetada em rotação (energia cinética) mostrou bastante eficiente, considerando já estar acoplada ao gerador. Atingiu-se quase 1500 rpm, quando grande parte dos motores tem como velocidade padrão 1800 rpm. Ajustes no projeto ou melhoria em materiais poderiam elevar a capacidade de conversão. Como consequência direta à máxima rotação medida, o gerador forneceu um potencial elevado que consideramos acima do esperado, de 45,51 Vcc a 48,9 Vcc (o valor de 48,9 Vcc não foi utilizado na tabela por não ter sido feita a medição de velocidade do eixo)

### 5.1.2 Torque da Turbina de Tesla

A medição do torque ocorreu por meio de um torquímetro calibrado, com capacidade de 7 kgf.m, ele foi acoplado ao eixo da turbina, e aplicou-se a vazão

máxima do setup. O torque encontrado foi de aproximadamente 0,3 kgf.m, conforme Figura 42.

**Figura 42 - Torque medido.**



O autor (2019).

O valor de torque medido, 0,3 kgf.m (para o SI, o valor é equivalente a 2,942 N.m) foi considerado intenso para a vazão utilizada. Entretanto, a faixa de medição do equipamento estava muito acima dos valores produzidos pela turbina, não permitindo maior precisão nas medições.

Como a vazão só atingiu a 56,8 l/min, aplicando a mesma metodologia já apresentada no subcapítulo 4.2, alterando somente a vazão de entrada, foi recalculado (usando equações: 4.1; 4.2; 4.11; 4.19 e 4.21) o torque total para esta situação, sendo aproximadamente 7,104 N.m. Aplicando este torque na equação 4.22, o valor da potência resulta em 179,29 W.

Efetuada a comparação: dividindo o torque medido (2,942 N.m) pelo torque total calculado (7,104 N.m) para camada limite laminar, na vazão de 56 l/min. Dá uma relação em torno de 41,40%. Indica uma perda de 58,60% em gastos mecânicos e de conversão.

## 5.2 ENSAIOS COM CARGA

Foram realizados dois ensaios, o primeiro com carga de 50 Ohms ligada ao gerador, composta por um par de resistores de porcelana de 100 Ohm e 10 W. O

segundo ensaio foi realizado utilizando carga de 5 Ohms, formada por dois resistores de 10 Ohms e 5W em paralelo.

A expectativa era de observar redução na máxima tensão gerada, em função da força contra eletromotriz do gerador. Tal reação ficou evidente na tensão máxima produzida, e pela limitação de rotação imposta à turbina pelo gerador.

Em todas as curvas apresentadas, não se observou indícios de saturação do gerador, o que permite afirmar que com maior torque fornecido pela turbina geraria maior potência fornecida pelo gerador.

### 5.2.1 Ensaio com Carga de 50 Ohms

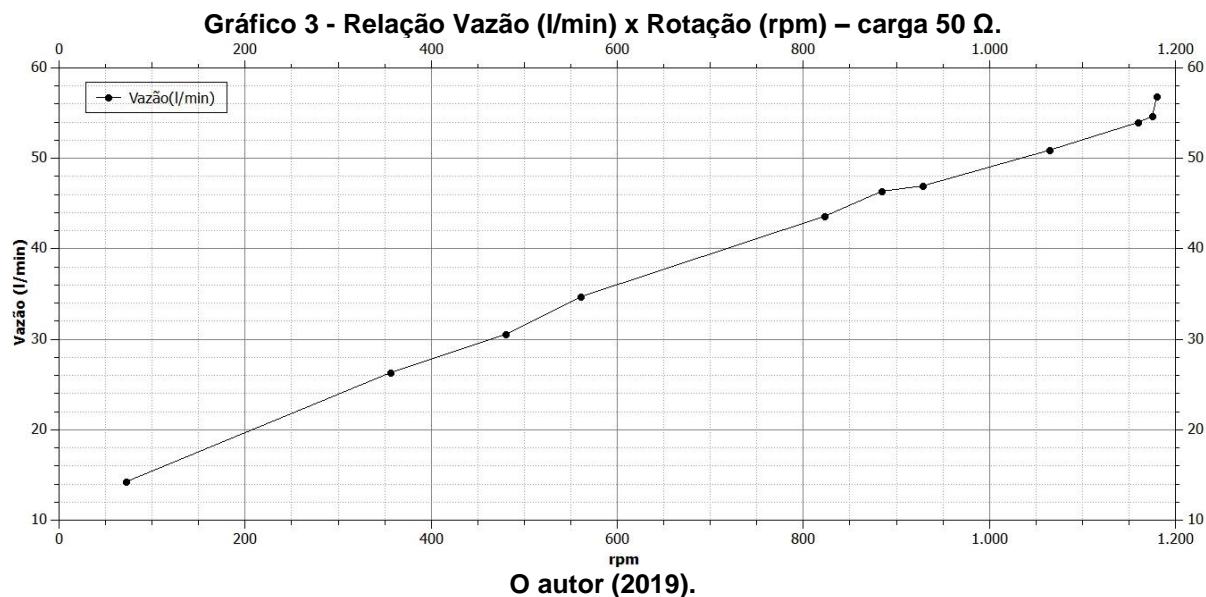
Sob esta condição foram realizadas medições de vazão, de rotação, tensão e corrente sobre a carga, conforme apresentado na Tabela 12, e nos gráficos a seguir:

**Tabela 12 - Dados de ensaio: carga 50  $\Omega$ .**

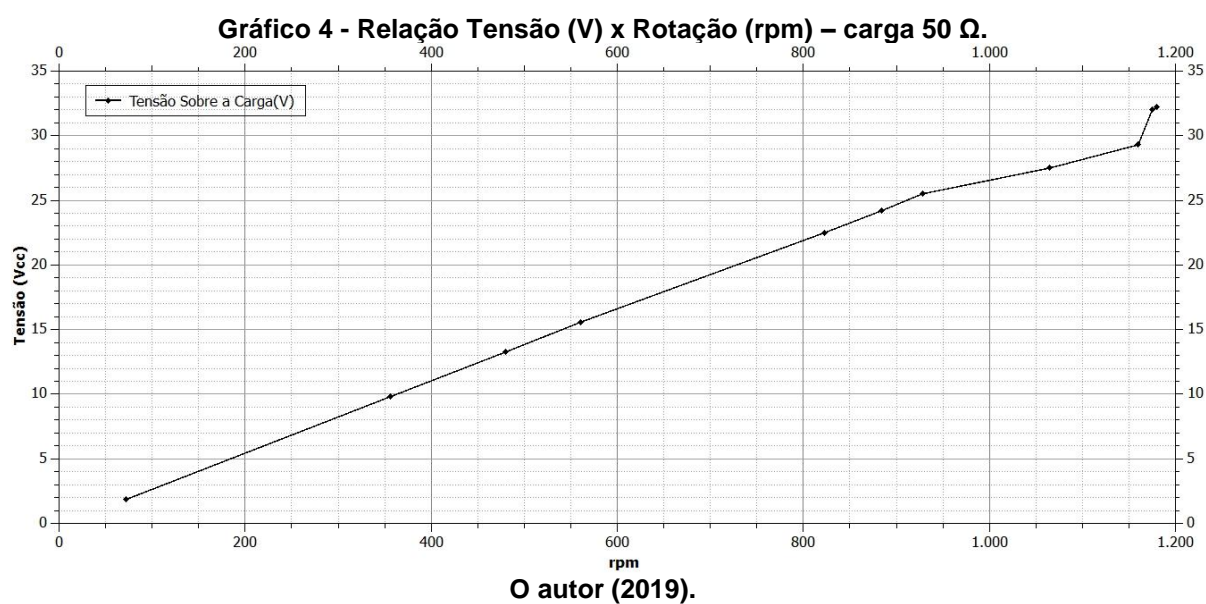
<b>Velocidade (RPM)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (mA)</b>	<b>Vazão (l/min)</b>	<b>Potência dissipada na carga</b>
72,0	1,9	20,0	14,2	0,0
356,0	9,8	180,0	26,3	1,8
480,0	13,3	240,0	30,6	3,2
561,0	15,6	300,0	34,7	4,7
823,0	22,5	430,0	43,6	9,7
884,0	24,2	460,0	46,4	11,1
928,0	25,5	490,0	46,9	12,5
1065,0	27,5	530,0	50,9	14,6
1160,0	29,3	570,0	54,0	16,7
1175,0	32,0	600,0	52,7	19,2
1180,0	32,2	630,0	56,8	20,3

**O autor (2019).**

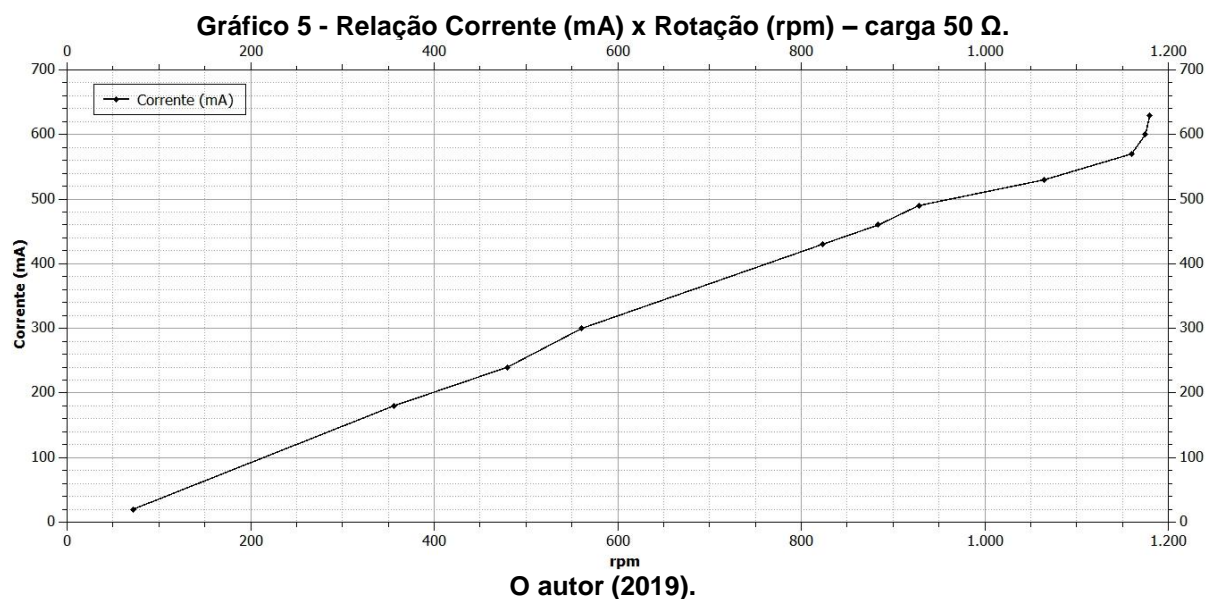
Os valores de rotação encontrados, em função da vazão, apresentaram bom rendimento, chegando a 1180 rpm com vazão de 56 l/min. Estes valores indicam que ocorreu restrição da vazão na turbina, o que trouxe consequências de menor torque e potência máxima gerada, para o Gráfico 3:



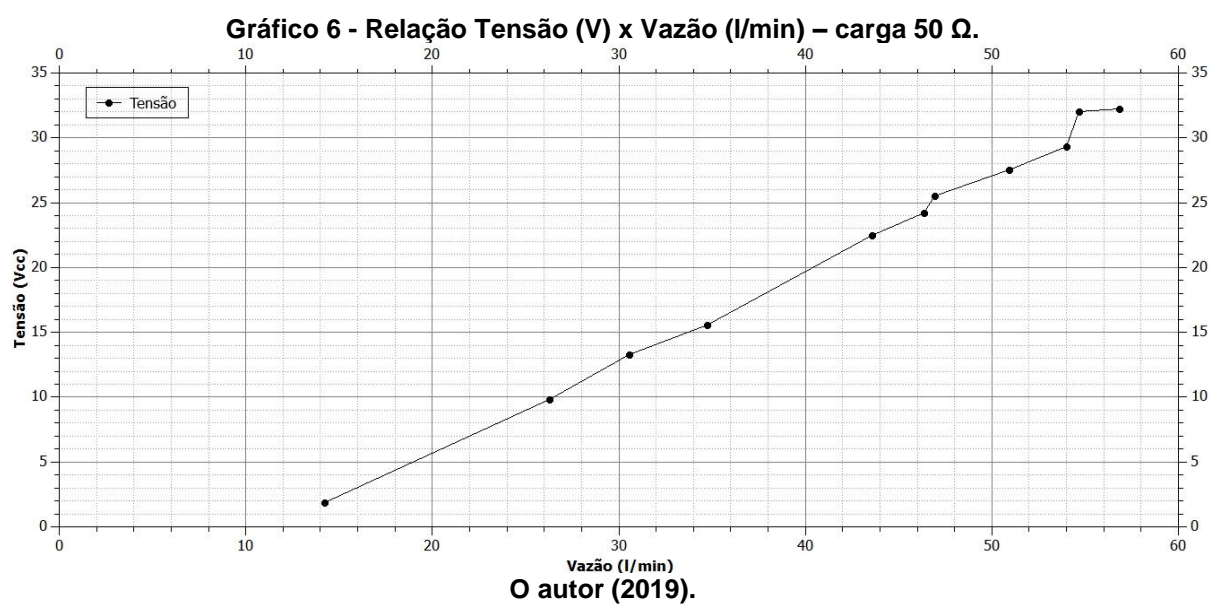
Os valores máximos de tensão encontrados chegaram a bons níveis, próximos de 33 V, adequados para ligação em inversores de frequência amplamente utilizados em sistemas fotovoltaicos de microgeração distribuída, no Gráfico 4:



No Gráfico 5 - Relação Corrente (mA) x Rotação (rpm), a curva de corrente medida sobre a carga de 50 Ohms, em função da rotação.



Conforme visto a seguir, Gráfico 6 - Relação Tensão (V) x Vazão (l/min), a menor capacidade de escoamento da turbina influenciou a tensão máxima aplicada sobre a carga.



O ensaio sobre uma carga de 50 Ω gerou um bom nível de tensão, aproximadamente 32,2 Vcc. Observou-se que a limitação de vazão não permitiu maior produção energética, assim, com maior fluxo de água injetada na turbina, maior será a capacidade de produção energética.

O cálculo do rendimento na potência gerada 50 Ω, na faixa de vazão 56.8 l/min, com a potência recalculada, assim como na equação 5.28:



$$\eta = \frac{P_{G50\Omega}}{P} = \frac{20,3}{179,27} = 0,1132 = 11,32\% \quad (5.28)$$

$\eta$       Rendimento (adimensional)

$P_{G50\Omega}$  Potência gerada com resistor 50  $\Omega$  (W);

P      Potência Ativa (W)

### 5.2.2 Ensaio com Carga 5 Ohms

Este ensaio foi realizado para verificar o comportamento do grupo Turbina de Tesla -Gerador sob aspecto do conceito de máxima transferência de potência. Foi medido 5,2 Ohms na bobina do motor, e por consequência acoplada como carga um par de resistores em paralelo, com resistência equivalente de 5 Ohms.

Neste ensaio foram medidos os valores de rotação no eixo do gerador, tensão e corrente sobre a carga. Os valores encontrados na Tabela 13:

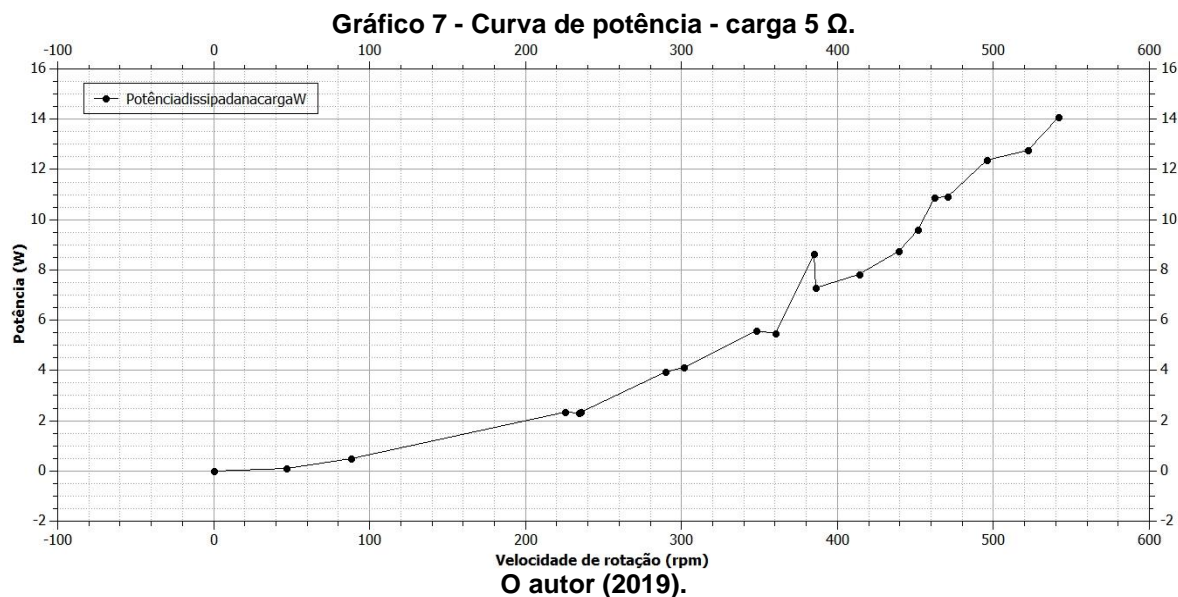
**Tabela 13 - Dados de ensaio: carga 5  $\Omega$ .**

Velocidade (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência dissipada na carga (W)	Velocidade (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência dissipada na carga (W)
0,00	0,00	0,00	0,00	384,90	6,58	1,31	8,64
46,90	0,71	0,14	0,10	385,90	6,00	1,22	7,29
88,00	1,55	0,31	0,49	413,80	6,26	1,25	7,83
225,20	3,42	0,68	2,32	439,40	6,62	1,32	8,75
234,20	3,39	0,68	2,29	451,70	6,93	1,39	9,61
235,20	3,43	0,68	2,34	462,00	7,38	1,48	10,89
289,50	4,46	0,89	3,96	470,40	7,39	1,48	10,92
301,40	4,53	0,91	4,11	495,60	7,75	1,60	12,38
348,10	5,29	1,05	5,58	522,40	7,98	1,60	12,76
360,20	5,44	1,00	5,46	542,00	8,34	1,69	14,07

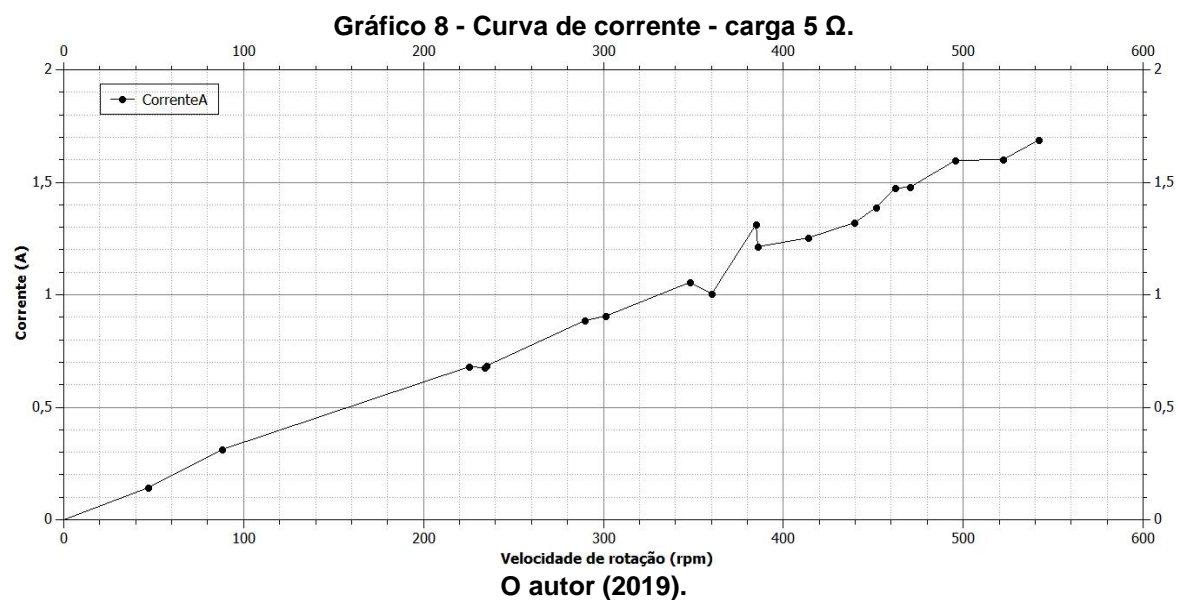
O autor (2019).

A potência gerada não apresentou grande magnitude, entretanto já era esperado após a verificação do nível de torque medido pela turbina e o torque do motor. Assim, apesar da turbina ter gerado força suficiente para impulsionar o motor, entendeu-se que as curvas de torque do motor e da turbina não eram adequadas entre

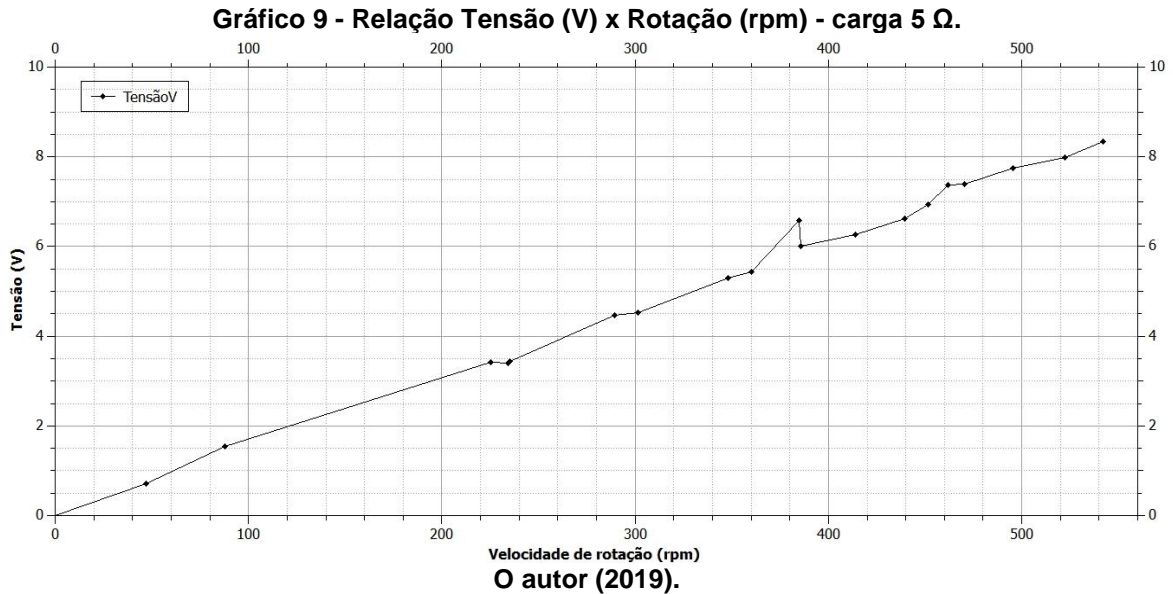
si, ou seja, a configuração da turbina pedia um motor de menor torque, ou o inverso, uma turbina de maior potência para o motor disponível, no Gráfico 7:



Ainda, mesmo que o conjunto não fosse o ideal, a magnitude da corrente na vazão máxima foi elevada, atingindo 1,7 A, apresentada no Gráfico 8:



E a relação de tensão em função da corrente gerou o Gráfico 9 - Relação Tensão (V) x Rotação (rpm) - carga 5  $\Omega$ :



A carga de 5 Ω serviu como aplicação da teoria de máxima transferência de potência, onde ligada a fonte estava uma carga de mesma impedância.

Como observado anteriormente, os dados coletados foram limitados pela vazão de 56 l/min, quando a possibilidade do setup era 100 l/min. Assim, a turbina não pôde ser levada à sua maior capacidade, estreitando a produção de dados. Mesmo com os problemas apontados, o grupo turbina-gerador apresentou potência gerada de 14 W. Com as devidas adequações, no setup e na turbina, é esperada maior potência gerada, conforme calculado pela equação 4.22.

O cálculo do rendimento na potência gerada com resistor de 5 Ω, na vazão de 56 l/min, conforme equação 5.29:

$$\eta = \frac{P_{G5\Omega}}{P} = \frac{14}{179,27} = 0,0781 = 7,81\% \quad (5.29)$$

$\eta$  Rendimento (adimensional).

$P_{G5\Omega}$  Potência gerada com resistor 5 Ω(W);

P Potência Ativa (W).

### 5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES

A execução do ensaio a vazio resultou em bom nível de tensão, na máxima vazão atingida pelo setup. O patamar alcançado de  $45 V_{cc}$  é um nível de tensão adequado para ligação em inversores já utilizados com sistema fotovoltaico. Uma vez que painéis em circuito aberto atingem tensões de  $46,7 V$  (Sino Sola, modelo SA330-72P), e  $38,4 V$  quando acoplado ao inversor.

No ensaio com carga de  $50 \Omega$  foi atingido  $32,2 V_{cc}$ , e corrente de  $630 mA$ , resultando numa potência calculada de  $20,3 W$ . Foi verificada a redução na velocidade de rotação, comportamento já esperando, sendo reflexo da força contra eletromotriz gerada pela corrente fornecida pelo gerador.

Por sua vez, na aplicação do conceito de máxima transferência de potência, utilizando carga de  $5 \Omega$ , a força contra eletromotriz gerada foi maior. Como resultado, apresentou diminuição da potência gerada. Os valores alcançados foram  $8,34 V_{cc}$  e  $1,68 A$  ( $14 W$ , potência calculada).

Em função da alta carga inercial, somadas às perdas mecânicas e a limitação inesperada do setup, o rendimento resultou num valor muito inferior ao esperado, em torno dos  $11\%$  para teste com carga de  $50 \Omega$ , e  $7,8\%$  com carga de  $5 \Omega$ . Os rendimentos calculados em função dos dados coletados (apresentados nas equações 28 e equação 29) indicam que a turbina estava sendo subexcitada. Maiores níveis de vazão aplicados na turbina, os mesmo para qual foi projetada, deverão expressar melhor rendimento final.

Os dados supracitados indicam que: o uso de um grande intervalo de vazão para projetar a turbina resulta num sacrifício na qualidade da conversão energética. Entende-se que mais correto seria limitar o espectro de atuação da turbina, para uma faixa mais restrita, por exemplo, de  $15$  a  $20 l/min$  (a turbina deste trabalho foi projetada para atuar de  $13 l/min$  à  $100 l/min$ ).

## 6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÃO

O torque gerado pela turbina foi de intensidade significativa, sendo prejudicado pela massa total dos discos sobre o eixo, que impuseram grande inércia, bem como a restrição de vazão, verificada nas medições, e excessiva vibração e desbalanceamento no eixo.

O motor acoplado não era o mais indicado para a capacidade da turbina finalizada, o que limitou a potência final produzida pelo grupo gerador.

Detalhes de projeto como bico de injeção, área da seção de exaustão, regularidade dos discos, aplicação de outros materiais como outras ligas metálicas mais leves, para eixo e discos, bem como rolamentos de melhor desempenho poderão melhorar ainda mais a capacidade de geração, em diferentes níveis de vazão, contornando os problemas encontrados durante os teste e expressos nas curvas apresentadas.

A capacidade de aproveitamento por meio deste tipo de turbina para a aplicação estuda apresenta-se viável, ainda que haja muitos pontos de melhoria nos aspectos construtivos e de eficiência para o conjunto Turbina de Tesla -Gerador.

As formas de aplicação são inúmeras, e o crescente uso de inversores utilizados com painéis solares eleva o número de locais aplicáveis, uma vez que se apresenta como mais uma fonte de energia elétrica para um sistema de microgeração já em funcionamento. Grandes indústrias e condomínios com elevado consumo de água, e outros consumidores com tal perfil, poderiam se utilizar de mais esse modal para a elevação de produção energética em suas centrais de microgeração.

Pode se interligar este microgerador na área comum dos condomínios residencial, com a devida instalação elétrica e com o controle da entrada de tensão e corrente na qual fornece a potência de geração (para fornecer dados para os residentes, se informarem do quanto pode utilizar na instalação). Com estes valores é possível associar esta potência gerada referente a carga de  $50 \Omega$  (20,3 W), partir de pressuposto que um carregador médio de celular está na faixa de consumo de 5 W, neste caso específico, permite até quatro destes componentes ligados nesta rede.

Nestes termos, para o condomínio 2, onde há 10 cisternas, consecutivamente 10 locais passíveis de instalação para microgeradores (acoplando a Turbina de Tesla na saída da caixa d'água) no sistema de recalque entre a cisterna e caixa d'água, seria possível produzir na faixa dos 200 W (dependendo da vazão), o que poderia alimentar dez lâmpadas tubular de LED 20 W - T8 6500K branco frio - ou fornecer retorno ao consumo das bombas de recalque, melhorando o rendimento. Ainda, aplicando as correções mecânicas e substituindo o modelo de gerador por outro mais adequado, levando a turina ao seu rendimento máximo, a potência gerada poderia alcançar os 1200 W, potência que auxiliaria a diminuição dos custos de energia elétrica condominial.

## 6.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Entende-se que a continuação deste trabalho poderá ocorrer por meio de: pesquisa de modelos matemáticos que associem potência e torque ao fluido operante, como dado de entrada, e assim seja possível dimensionar os valores mais adequados para os componentes (como raios dos discos, espaçamento entre discos, tipo de bocais de admissão, eixo, bocais de saída, distância do encapsulamento ao disco, números de disco e entre outros).

Desenvolver a Turbina de Tesla para valores de vazão reduzidos, como limitado a 20 l/min ou menos, para microgeração. Contando assim com as dimensões compatíveis ao volume desejado.

Aplicar a Turbina de Tesla possa operar com diversos fluidos como: óleos, gases, água com resíduos entre outros.

Acoplar ela a outros tipos de geradores, com potência e torque fixos, e estudar qual o melhor nos quesitos de geração e relação custo benefício.

Utilizar-se de a característica da Turbina de Tesla também poder operar como bomba e desenvolver um sistema de controle, para manobrar a máquina elétrica, com finalidade alternar sua função, migrando de gerador para motor (funcionando como bomba) conforme a necessidade do local de instalação, ou auxílio no controle de reativo da rede.

E por fim, fica os desafios criativos de tentar associar a turbina de tesla a alguma máquina elétrica girante, na qual ambas fiquem integradas, como um sistema semelhante a turbina Bulbo, em busca de amenizar as perdas na transmissão mecânica ou até o desenvolvimento de uma nova máquina. Exemplo em pequena escala utilizar aço elétrico no material de eixo e disco assim como no encapsulamento, usar bobinas em ranhuras na qual na sua formatação auxiliem no desempenho. Misturar ambas teorias e criar uma *Turbina/Gerador*.

## REFERÊNCIAS

ALTERIMA (2017), **Miniúsinas**. Disponível em: <<http://www.alterima.com.br/index.asp?InCdSecao=35>>. Acesso em: 28 de setembro de 2017.

ANEEL, 2012. **Resolução Normativa nº482 de abril de 2012**: Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 10 de maio de 2017.

ANEEL, 2015. **Agência Nacional de Energia Elétrica**: tabela montante e despesas de perdas. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfil=4>>. Acesso em: 11 de maio de 2017.

ANEEL, 2015. **Ranking da Continuidade de Serviço**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ranking-2015>>. Acesso em 10 de maio, de 2017.

ANEEL, 2016. **Brasil Ultrapassa 5 mil conexões de micro e minigeração**: Disponível em: <<http://rgrenergia.com.br/detalhesnoticia.php?id=172>>. Acesso em: 11 de maio de 2017.

ARAUJO, C. A. **Análise de máquina síncrona de polos salientes sólidos**. monografia de defesa engenharia elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica, 2011

BATISTA, J.C., **MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (ABAIXO DE 100 kW) UTILIZANDO TURBINA TESLA MODIFICADA**. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia. Universidade Estadual Paulista (UNESP) Campus Guaratinguetá, 2009.

CCEE (2017), Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Fontes**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/fontes?\\_afzLoop=367391334034398&\\_adf.ctrl-state=ar59t2z1z\\_1#!%40%40%3F\\_afzLoop%3D367391334034398%26\\_adf.ctrl-state%3Dar59t2z1z\\_5](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_afzLoop=367391334034398&_adf.ctrl-state=ar59t2z1z_1#!%40%40%3F_afzLoop%3D367391334034398%26_adf.ctrl-state%3Dar59t2z1z_5)>. Acesso em: 12 de maio de 2017.



CEPA, Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada. **Turbina Pelton**, 1999. Disponível em: <<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/turbina3.htm>>. Acesso em: 15 de setembro, 2017.

CHOON, T. W.; RAHMAN, A. A.; JER, F. S. **Optimization of Tesla Turbine Using Computational Fluid Dynamics Approach**. IEEE 2011 Symposium on Industrial Electronics and Application (ISIEA 2011), Langkawi, Malasia.

COUTO, H.S.; DUARTE, J.B.F; BASTOS-NETTO, D. **The Tesla Turbine Revisited**. 8<sup>th</sup> Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Sochi, Federação Russa, Agosto de 2006.

CPFL ENERGIA, 2014 - **CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS E DO SETOR ELÉTRICO DE PAÍSES E / OU ESTADOS SELECIONADOS, PANORAMA E ANÁLISE COMPARATIVA DA TARIFA DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL COM TARIFAS PRATICADAS EM PAÍSES SELECIONADOS, CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DO MODELO INSTITUCIONAL VIGENTE OUTUBRO/2014**. Artigo desenvolvido para base de projeto de P&D, São Paulo – SP. Disponível em: <<https://www.cpf.com.br/energias-sustentaveis/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 03 de novembro de 2017.

EVANGELISTA, A. W. P. **1.1.2 Propriedades Fundamentais dos Fluidos**. Material disciplinar. Universidade de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Setor de Engenharia Rural. Disponível em: <[https://www.agro.ufg.br/up/68/o/1.1.2\\_\\_Propriedades\\_dos\\_fluidos.pdf](https://www.agro.ufg.br/up/68/o/1.1.2__Propriedades_dos_fluidos.pdf)>. Acesso em: 28 de setembro de 2018.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.J.; KUSKO, A (2014). **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7<sup>o</sup> edição, [recurso eletrônico]; tradução Anatólio Laschuk. Porto Alegre: editora AMGH, 2014.

GASPAR, P.M.T, **Estudo da Turbina de Tesla visando a sua aplicação em sistemas de geração de energia elétrica descentralizada**. Tese para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, 2015.

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 2017 - CANAL ENERGIA, **Conjuntura é positiva para a geração distribuída, afirma Cogen**. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53034107/conjuntura-e-positiva-para-a-geracao-distribuida-afirma-cogen>>. Acesso em: 03 de novembro de 2017.

IIASA, 2012 – **INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS, THE GLOBAL ENERGY ASSESSMENT: TOWARD A SUSTAINABLE ENERGY FUTURE**. Disponível em: <<http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/Sustainable.en.html>>. Acesso em: 14 de outubro de 2017.

INDUSCON, 2012. **Estudos de Impactos da Microgeração em Redes secundárias de distribuição no contexto das redes inteligentes: Fortaleza – CE Anais busca-se apontar e quantificar alguns impactos relacionado a injeção de potência em um circuito secundário de distribuição**. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/anais/induscon/2012/Data/iREP1802.pdf>>. Acesso em: 12 de maio de 2017.

IQENERGY. **Turbina**. Disponível em: <<https://iqenergy.ddns.net/energiasalternativas/sikovneruce/turbina.htm>>. Acesso em: 23 de outubro de 2017.

JORNAL EL PAÍS, 2018. **Turbinas para contener una gran crisis**. Jornal eletrônico, 16 de maio de 2018. Disponível em: <[https://elpais.com/economia/2018/05/16/actualidad/1526486814\\_344075.html](https://elpais.com/economia/2018/05/16/actualidad/1526486814_344075.html)>. Acesso em: 28 de maio de 2019.

JORNAL GGN .2015. **A Exploração da Energia das marés com turbinas flutuantes**. Disponível em: <<https://jornalggm.com.br/energia/a-exploracao-da-energia-das-mares-com-turbinas-flutuantes/>>. Acesso em: 28 de maio de 2019.

MAIOR, F. S.; XIMENES, M.; LIRA, P. H. J.; HENRIQUE, S. **Turbinas Pelton** trabalho parcial de obtenção de aprovação de disciplina máquinas hidráulicas. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) 2014. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/19966666/turbinas-pelton>>. Acesso em: 20 outubro de 2017.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **Turbinas hidráulicas: turbinas Francis**, (2017). Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/turbinas-hidraulicas-turbinas-francis/>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

MERIGUE, R.; SILVA, R. S. **Estudo De Turbinas Para Hidrelétrica De Roncador – Bocaiúva Do Sul**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná - Curitiba, 2013.

MFAEB, (2015). **Energia Limpa**. Disponível em: <<http://mfaeb.blogspot.com.br/2015/04/energia-renovavel-de-hidroelectrica-blue.html>>. Acesso em: 23 de setembro de 2017.

NECKEL, A.L., **INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA SOBRE O RENDIMENTO DE BOCAIS INJETORES DE TURBINAS TESLA NO ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL SUPERSÔNICO**. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos. Universidade de Caxias do Sul, 2013.

PLACCO, G.M.; GUIMARÃES, L.N.F.; **CAMILLO, G.P. PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DE UMA TURBINA DE TESLA**. VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. Campina Grande – Paraíba, agosto de 2010.

PROTOCOLO DE PARIS, 2015. **Framework Convention on Climate Changes**: Conference of the Paris, 12 de dezembro de 2015. Disponível em: <[http://unfccc.int/meetings/paris\\_nov\\_2015/meeting/8926.php](http://unfccc.int/meetings/paris_nov_2015/meeting/8926.php)>. Acesso em: 12 maio de 2017.

PROTOCOLO DE QUIOTO, 1997. **Kyoto Protocol Reference Manual: On Accounting of Emissions and Assigned Amount**. Disponível em: <[http://unfccc.int/resource/docs/publications/08\\_unfccc\\_kp\\_ref\\_manual.pdf](http://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf)>. Acesso em: 12 maio de 2017.

ROCHA, G.V.B. da; GUIMARÃES, L.N.F.; PLACCO, G. G, **OTIMIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA AS PARTES QUE COMPÕE UMA TURBINA TIPO TESLA**. International Nuclear Atlantic Conference (INAC). Salvador - Bahia, 2013.

RODRIGUES, L. E.M.J.; **Aula 10 – escoamento laminar e turbulento**. Material didático. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, São Paulo. Disponível em: < <http://www.engbrasil.eng.br/pp/mf/aula10.pdf> >. Acesso em: 27 de maio de 2019.

SILVA, B. L. A. **Levantamento do potencial energético e estudo da viabilidade econômica da geração hidroelétrica utilizando a rede pública de distribuição de água- estudo de caso: sistema de abastecimento de Pato Branco.**

Dissertação de defesa do título parcial de mestre de engenharia elétrica UTFPR de pato branco, 2012.

SILVA, E. C. N. **Máquinas de Fluxo.** Material de aula slide Escola Politécnica da USP Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2481/Aula04-Tur.pdf>> Acesso em: 14 de outubro de 2017.

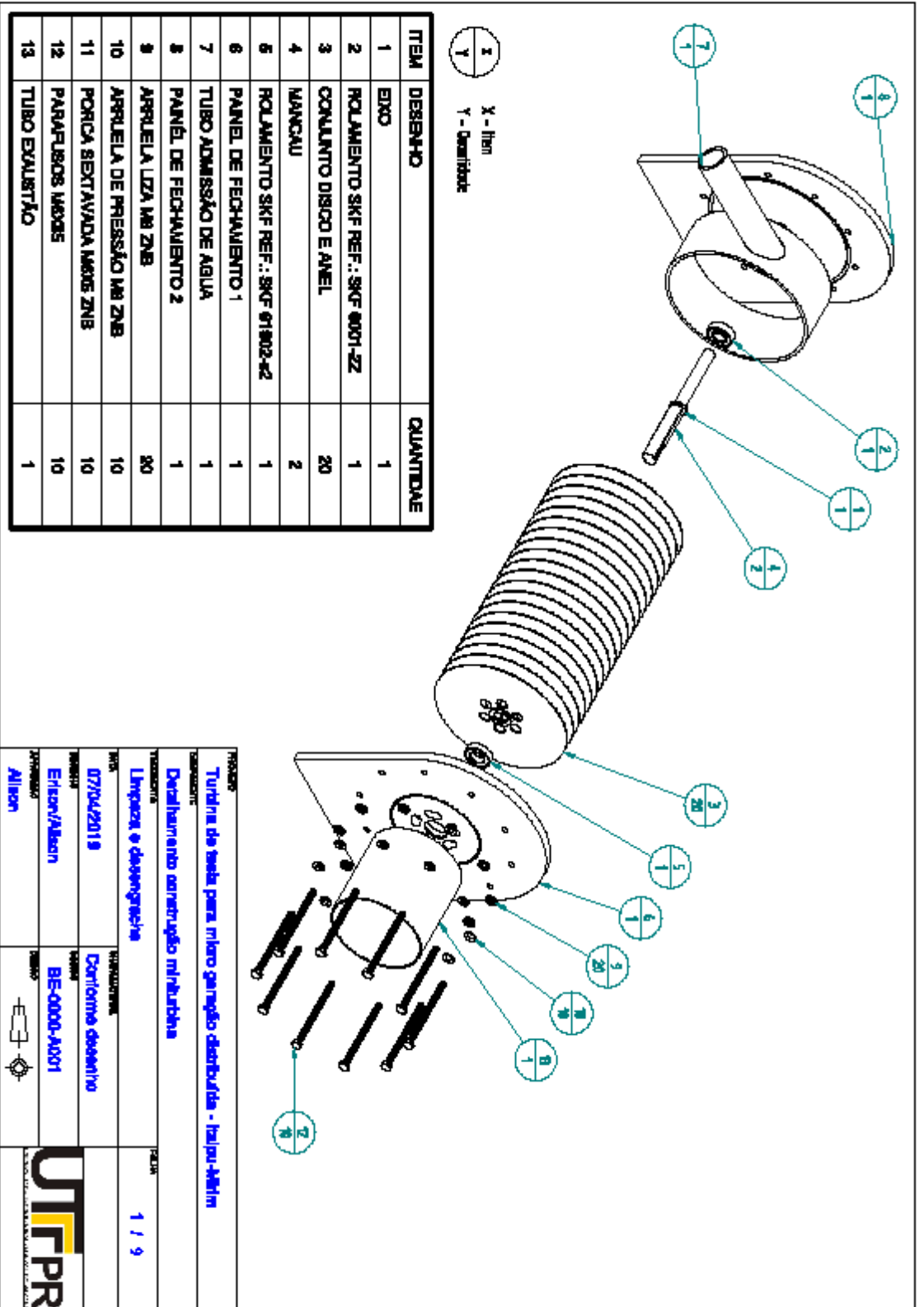
SINOSOLA. Datasheet: Poly SA330-72P. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=1&file=custo m%2Fupload%2FFile-1534798695.pdf>>. Acesso em: 22 de maio, de 2019.

TORO, V. D. (1999). **Fundamentos de Máquinas elétricas.** Editora LTC – Livros técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ. Reimpressão 1999.

UNITED STATES PATENT' N°.1061206, 1913. **N. Tesla Turbine.** Lens Org - The Lens is a joint initiative of Cambia and Queensland University of Technology Disponível em: <[https://www.lens.org/lens/patent/US\\_1061206\\_A](https://www.lens.org/lens/patent/US_1061206_A)>. Acesso em: 10 de maio, de 2017.

VIEIRA, A. L. **Motores elétricas e princípios de funcionamento.** Engenheiro agrícola Universidade Estadual Maringá, 2013.

## APÊNDICE A - Modelagem mecânica



**PROJETO**  
 Turbina de teste para motor gamma distribuída - Itaipu-Atetim

**DESENVOLVIDOR**  
 Desenvolvimento construtivo mlti-área

**VERSÃO**  
 Linhas e desenhos

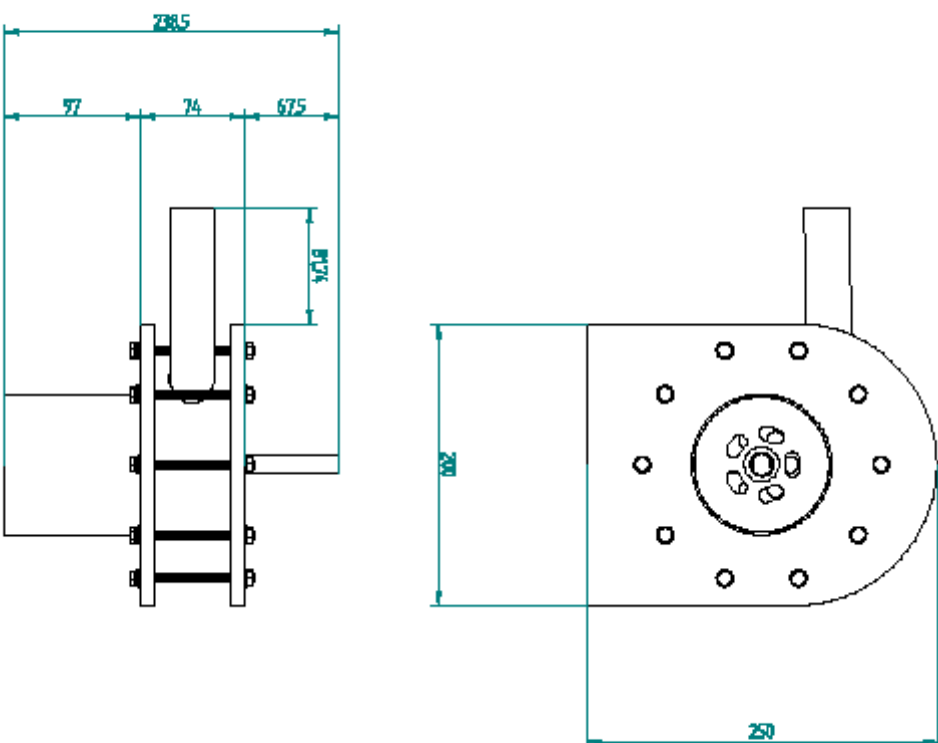
**DATA**  
 07/04/2019

**PROJETO**  
 Desenho desenhivo

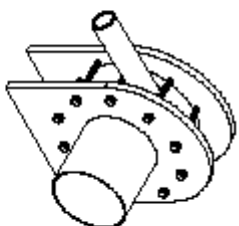
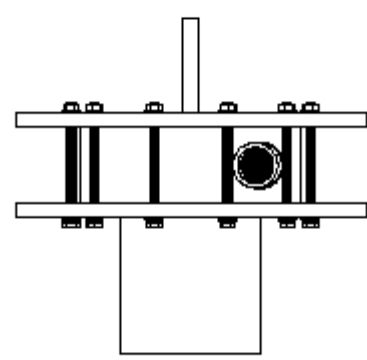
**REVISÃO**  
 BE-0000-A001



**APROVADO**  
 Allison

**UTPR**

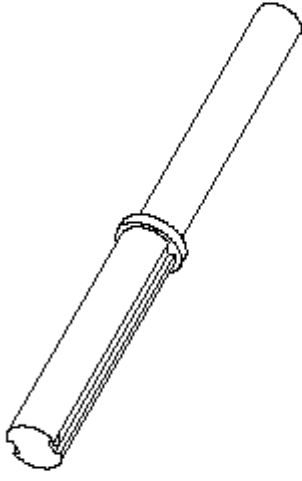
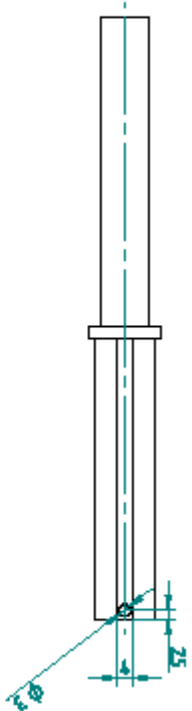
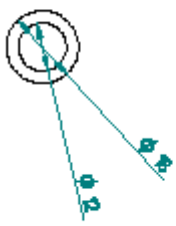
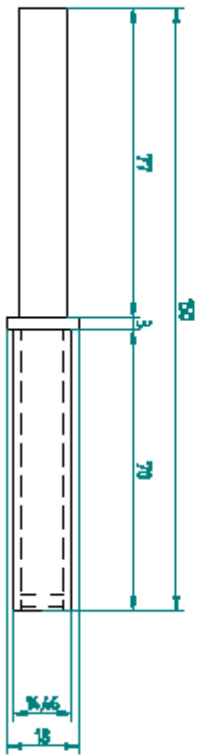
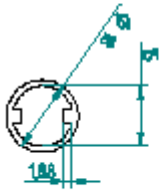


Technical drawing showing a turbine nozzle assembly with dimensions: 288,5 (total length), 97 (flange length), 74 (central section length), 675 (total width), and 81,24 (height of the central section).

<b>PROJETO</b>	Turbinas de sonda para micro geração distribuída - Itaipu-Atetim		
<b>ELABORAÇÃO</b>	Detalhamento construtivo preliminar		
<b>REVISÃO</b>	Linguagem e designação		
<b>DATA</b>	07/04/2013	<b>TIPO DE PROJETO</b>	Projeto definitivo
<b>PROJETADE</b>	Ericson/Alison	<b>PROJETO</b>	BE-0000-A001
<b>APROVADO</b>	Alison		
		<b>PÁGINA</b>	2 / 9
			

# 1 - Eixo



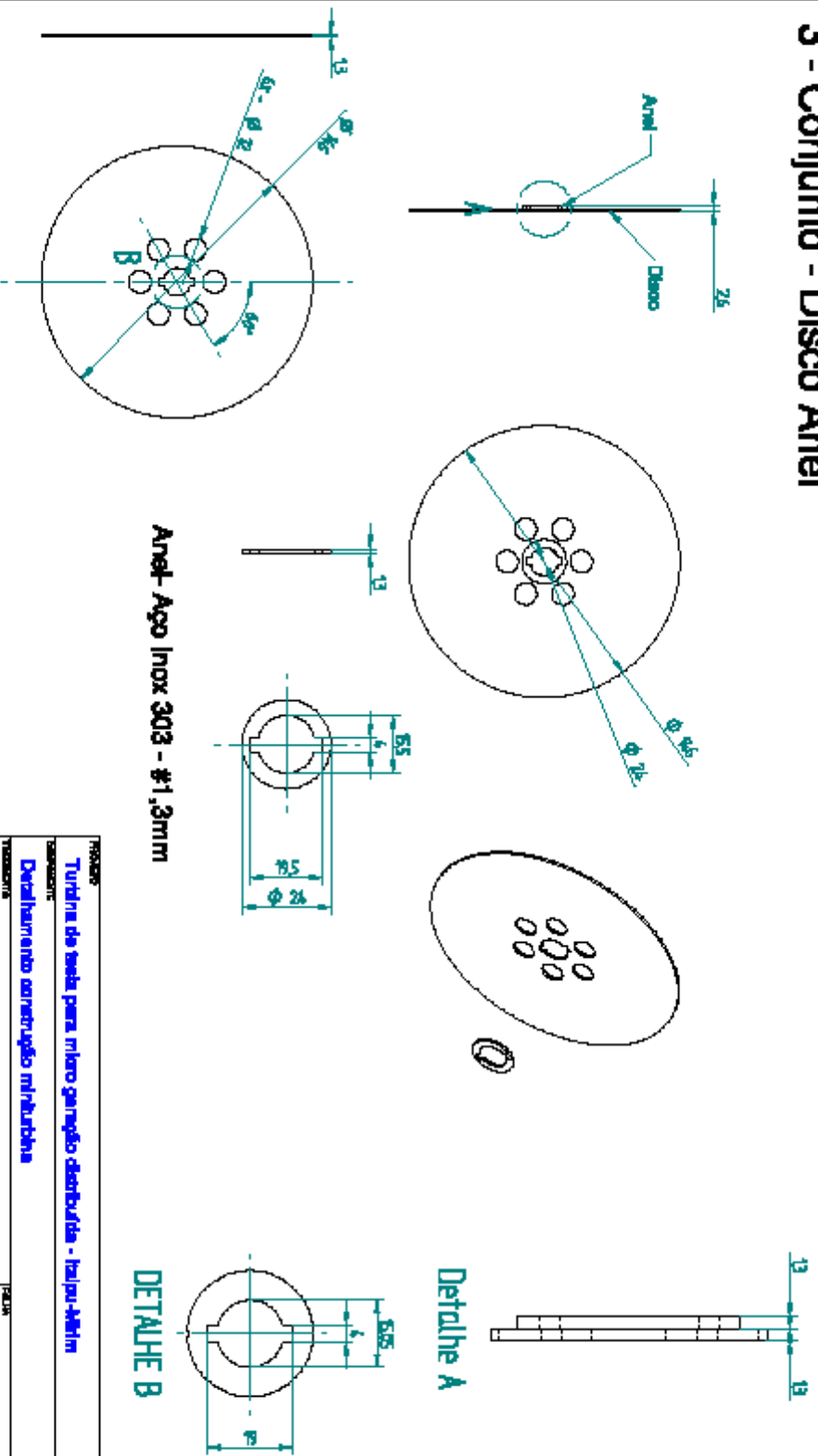
Aço Inox 303

<b>PROJETO</b>		<b>FECHA</b>	
Turbina de teste para motor gancho distribuída - Inalou-Alfin			
<b>DESENO</b>			
Detalhamento construtivo rebarbada			
<b>TIPO DE LINHA</b>			
Linha: 4 desengenharia			
<b>DATA</b>		<b>FECHA</b>	
07/04/2013		3 / 9	
<b>PROJETO</b>		<b>TIPO DE LINHA</b>	
Ericson/Alfin		Conforme desenho	
<b>TIPO DE LINHA</b>		<b>TIPO DE LINHA</b>	
BE-0000-A001		BE-0000-A001	
<b>TIPO DE LINHA</b>		<b>TIPO DE LINHA</b>	
Alison		Alison	





### 3 - Conjunto - Disco Anel



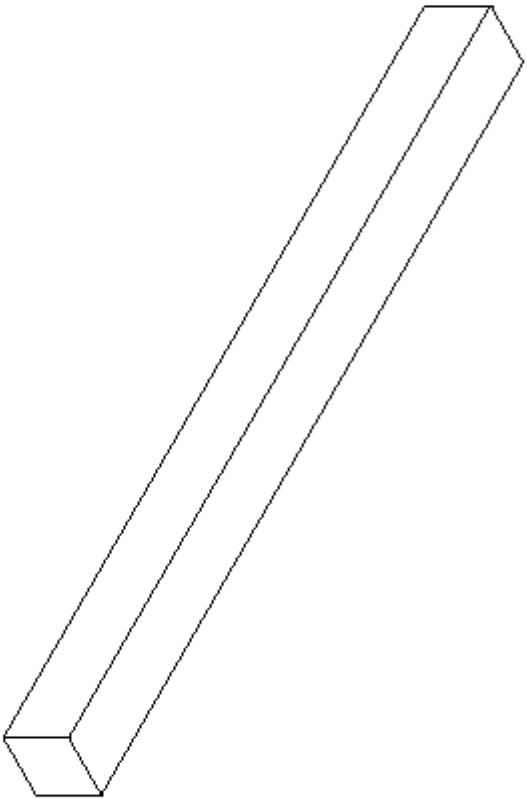
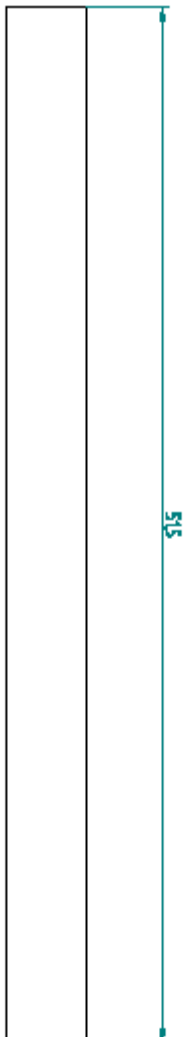
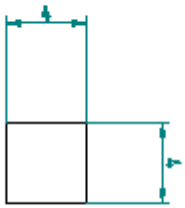
Disco - policarbonato - #1,3mm

Anel- Aço Inox 303 - #1,3mm

<b>PROCESSO</b>		<b>PROJETO</b>	
Turdina de teste para micro gancho distribuída - Inalou-Alim		4 / 9	
<b>SERVIÇO</b>		<b>FECHA</b>	
Detalhamento construtivo preliminar			
<b>TIPO DE PROJETO</b>			
Linha e desenvolvimento			
<b>DATA</b>	<b>PROJETO</b>	<b>REVISÃO</b>	<b>FECHA</b>
07/04/2013	Confirme desenhos		
Ericson/Alison		BE-0000-A001	
<b>PROJETO</b>	<b>REVISÃO</b>	<b>FECHA</b>	<b>FECHA</b>
Alison			



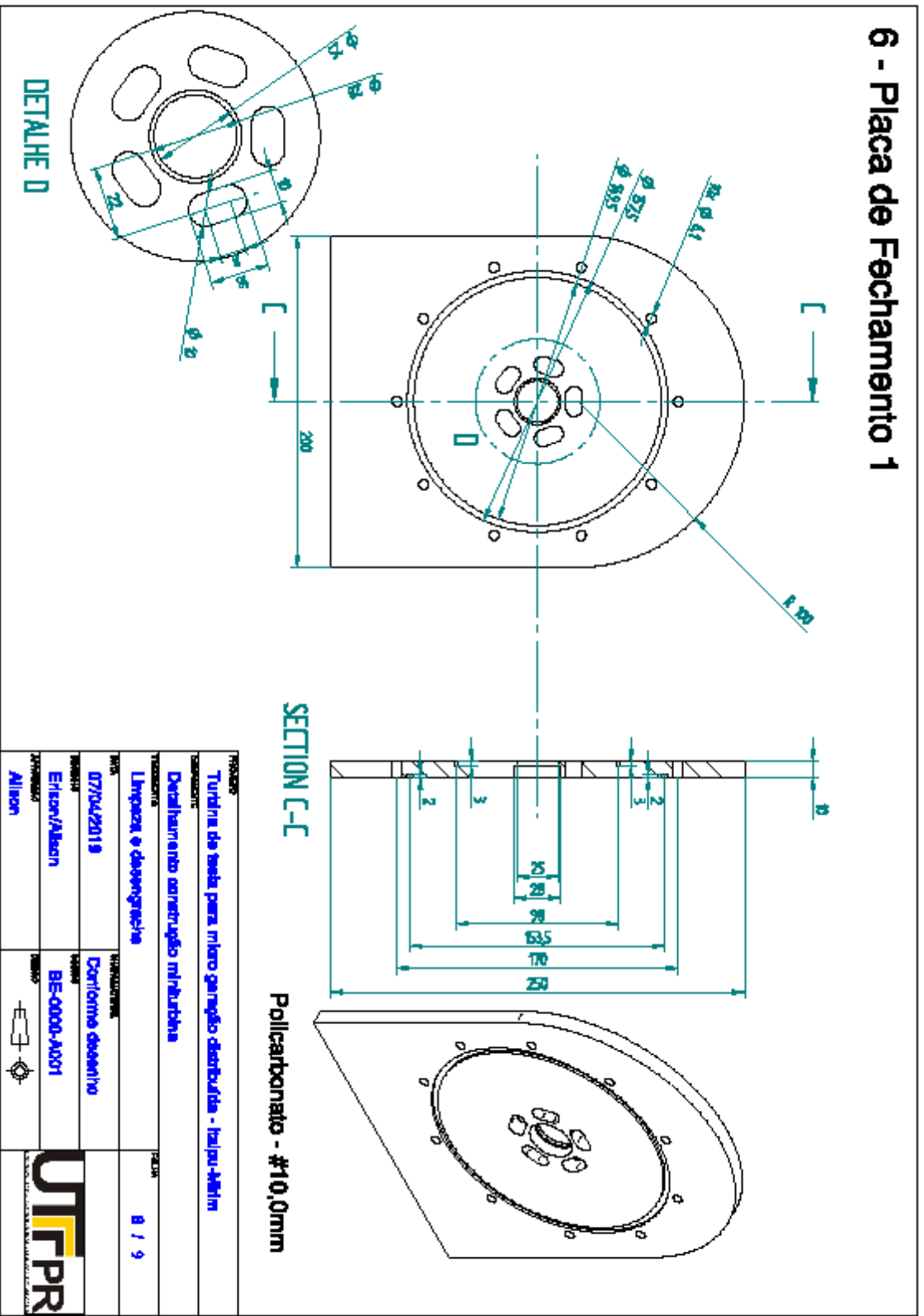
## 4 - Mancau



**Aço Inox 303**

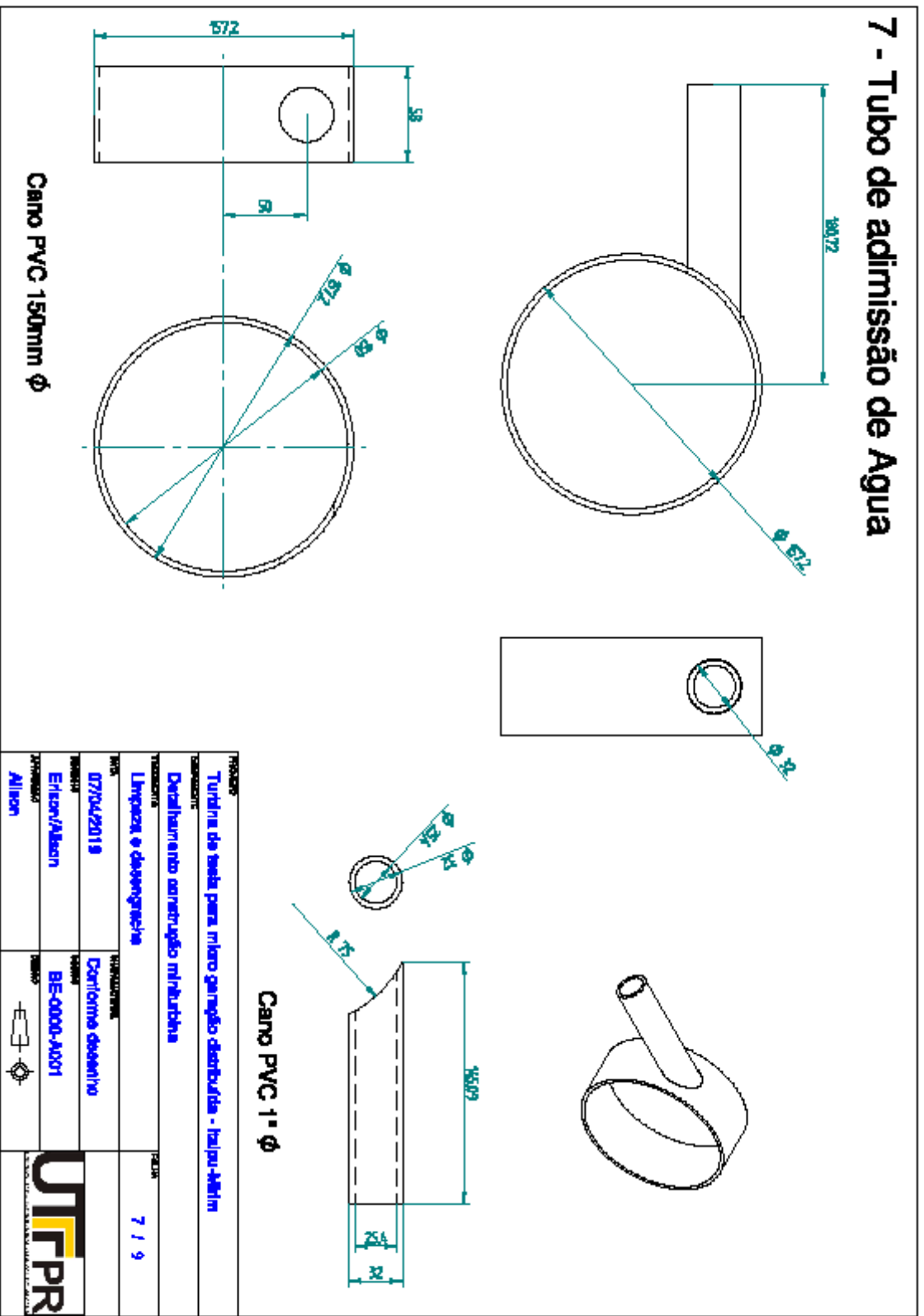
<b>PROJETO</b>		<b>UTPR</b>	
Turbinas de sonda para rãno gancho distribuída - Itaipu-Atôm			
<b>COMANDO</b>			
Detalhamento correção minitorção			
<b>TIPO DE PROJETO</b>		<b>FECHA</b>	
Limpeza e desengraxe		E / 9	
<b>DATA</b>		<b>REVISÃO</b>	
07/04/2019		Conforme desenhos	
<b>PROJETA</b>		<b>REVISOR</b>	
Eilson/Alison		BE-0000-A001	
<b>APROVADO</b>			
Alison			

## 6 - Placa de Fechamento 1

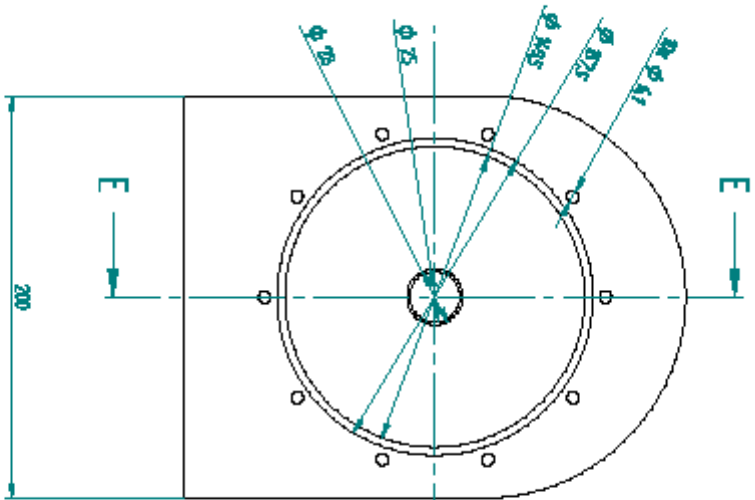


<b>PROJETO</b>	Turbinas de sonda para micro ganho distribuídas - Itaipu-Atôm		
<b>CONCEITO</b>	Detalhamento construtivo preliminar		
<b>TITULO</b>	Linhação e detalhamento		
<b>DATA</b>	07/04/2013	<b>VERSÃO</b>	Caríonome desenhado
<b>PROJETA</b>	Ericson/Alison	<b>REVISOR</b>	BE-0000-AJ01
<b>APROVADO</b>	Alison	<b>REVISADO</b>	
		<b>PÁGINA</b>	8 / 9
<b>UTFPR</b>			

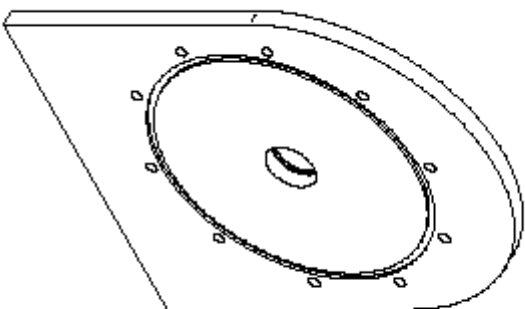
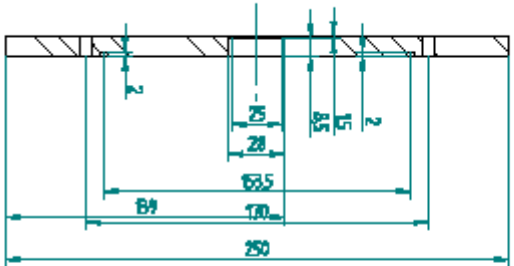
## 7 - Tubo de admissão de Água



## 8 - Placa de Fechamento 2



### SECTION E-E

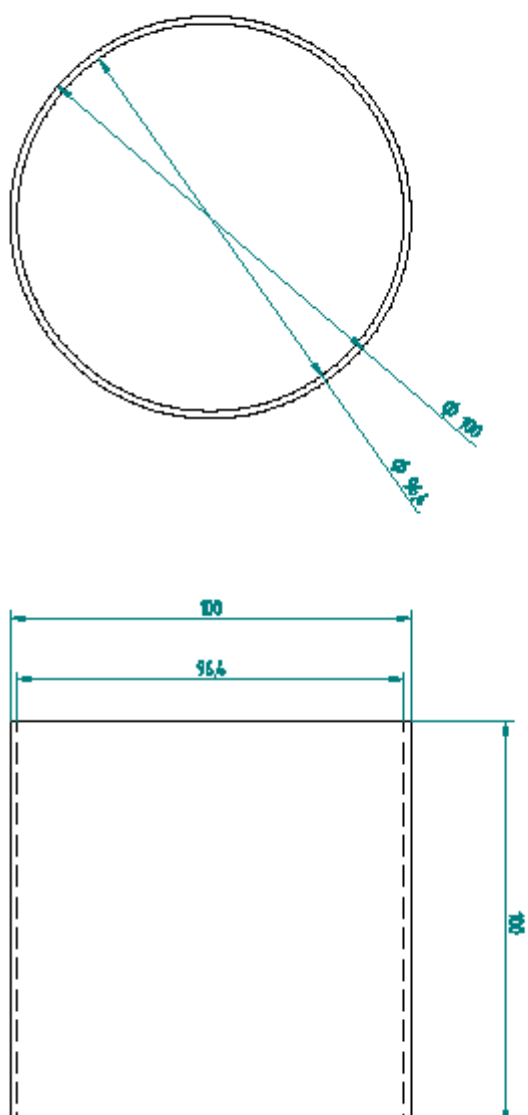


Policarbonato - #10,0mm


<b>PROJETO</b>		<b>FECHA</b>	
Turbinas de sonda para rãoço distribuída - Itaipu-Atôm			
<b>COMANDO</b>			
Detalhamento correção minitorbina			
<b>TIPO DE</b>		<b>FECHA</b>	
Linha e designação		8 / 9	
<b>DATA</b>		<b>PROJETO</b>	
07/04/2019		Cofre de concreto	
<b>PROJETA</b>		<b>PROJETA</b>	
Elison/Alison		BE-0000-A001	
<b>APROVADO</b>		<b>APROVADO</b>	
Alison			



## 13 - Tubo de exaustão de água



Carno esgoto PVC 100mm  $\phi$

PROJETO	Tubos de esgoto para rede geral distribuída - Itaipu-Atômico	
COMANDO	Detalhamento correção minuta	
TIPO DE PROJETO	Linha e desenhos	
DATA	07/04/2019	CONFORME
PROJETA	Elison/Alison	BE-0000-A001
APROVADO	Alison	
		<b>UTPR</b>

**ANEXO A – Tabelas: Capacidade Instalada e geração líquida.**

**Tabela 14 - CAPACIDADE INSTALADA DA ALEMANHA (GW).**

<b>FONTE</b>	<b>2008</b>		<b>2009</b>		<b>2010</b>		<b>2011</b>		<b>2012</b>	
<b>HÍDRICA</b>	16,45	11%	17,14	10,90%	17,03	10,10%	17,25	9,50%	16,91	9,30%
<b>TÉRMICA</b>	81,79	54,90%	83,25	52,80%	85,82	50,90%	89,42	49,20%	89,65	49,00%
<b>NUCLEAR</b>	20,49	13,70%	20,48	13,00%	20,47	12,10%	20,47	11,30%	12,07	6,60%
<b>EÓLICA</b>	23,85	16%	25,72	16,30%	27,23	16,20%	29,06	16%	31,3	17,10%
<b>SOLAR</b>	6,12	4,10%	10,57	6,70%	17,57	10,40%	25,04	13,80%	32,64	17,80%
<b>OUTROS</b>	0,44	0,30%	0,46	0,30%	0,46	0,30%	0,47	0,20%	0,37	0,20%
<b>TOTAL</b>	<b>149,14</b>	<b>100%</b>	<b>157,62</b>	<b>100,00%</b>	<b>168,58</b>	<b>100,00%</b>	<b>181,71</b>	<b>100,00%</b>	<b>182,94</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: CPFL (2014).

**Tabela 15 - GERAÇÃO LIQUIDA ALEMANHA (TWh).**

<b>FONTE</b>	<b>2008</b>		<b>2009</b>		<b>2010</b>		<b>2011</b>		<b>2012</b>	
<b>HÍDRICA</b>	26	4%	24,2	4,30%	26,9	4,50%	23	4,00%	27,3	4,60%
<b>TÉRMICA</b>	387,3	64,40%	359,5	64,40%	383,3	64,40%	381,2	66,10%	392,5	66,20%
<b>NUCLEAR</b>	140,7	23,40%	127,7	22,90%	133	22,40%	102,2	17,70%	94,2	15,90%
<b>EÓLICA</b>	40,5	7%	38,5	6,90%	37,7	6,30%	48,7	8%	50,5	8,50%
<b>SOLAR</b>	4,4	0,70%	6,6	1,10%	11,7	2,00%	19,6	3,40%	26,4	4,50%
<b>OUTROS</b>	2,1	0,40%	2	0,40%	2,2	0,40%	2,2	0,40%	1,9	0,30%
<b>TOTAL</b>	<b>601</b>	<b>100%</b>	<b>558,5</b>	<b>100,00%</b>	<b>594,8</b>	<b>100,00%</b>	<b>576,9</b>	<b>100,00%</b>	<b>592,8</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: CPFL (2014).

**Tabela 16 - CAPACIDADE INSTALADA DA FRANÇA (GW).**

<b>FONTE</b>	<b>2008</b>		<b>2009</b>		<b>2010</b>		<b>2011</b>		<b>2012</b>	
<b>HÍDRICA</b>	25,1	21%	25,2	21%	25,3	20%	25,3	19%	25,4	19%
<b>TÉRMICA</b>	25,6	22%	25,6	22%	28,8	23%	31,9	24%	29,7	23%
<b>NUCLEAR</b>	63,3	54%	63,1	53%	63,1	51%	63,1	48%	63,1	48%
<b>EÓLICA</b>	3,4	3%	4,6	4%	6	5%	6,7	5%	7,5	6%
<b>SOLAR</b>	0,1	0%	0,3	0%	1	1%	2,8	2%	4	3%
<b>OUTROS</b>	0	0%	0	0%	0	0%	1,3	1%	1,3	1%
<b>TOTAL</b>	<b>117,5</b>	<b>100%</b>	<b>118,8</b>	<b>100%</b>	<b>124,2</b>	<b>100%</b>	<b>131,1</b>	<b>100%</b>	<b>131</b>	<b>100%</b>

Fonte: CPFL (2014).



Tabela 17 - GERAÇÃO LIQUIDA FRANÇA (TWh).

FONTE	2008	2009	2010	2011	2012
HÍDRICA	67,5 11%	61,2 11%	66,4 11%	49,3 9%	62,8 11%
TÉRMICA	418,3 70%	390 70%	407,9 69%	421,1 73%	404,9 68%
NUCLEAR	56,6 9%	52 9%	59,2 10%	50,5 9%	52,1 9%
EÓLICA	5,7 1%	7,9 1%	9,9 2%	12,1 2%	14,9 3%
SOLAR	0 0%	0,2 0,04%	0,6 0,10%	2,1 0,36%	4 0,67%
OUTROS	0,5 0,08%	0,4 0,07%	0,5 0,08%	0,5 0,09%	1,1 0,19%
<b>TOTAL</b>	<b>548,6 91%</b>	<b>511,7 92%</b>	<b>544,5 92%</b>	<b>535,6 93%</b>	<b>539,8 91%</b>

Fonte: CPFL (2014)

Tabela 18 - CAPACIDADE INSTALADA DA REINO UNIDO (GW).

FONTE	2008	2009	2010	2011	2012
HÍDRICA	7,11 8%	7,13 7,90%	7,13 7,40%	7,16 7,50%	7,17 7,40%
TÉRMICA	66,95 75,70%	67,77 75,10%	72,93 75,60%	70,32 73,50%	69,53 71,50%
NUCLEAR	10,98 12,40%	10,86 12,10%	10,87 11,30%	10,66 11,20%	9,95 10,20%
EÓLICA	3,41 4%	4,43 4,90%	5,39 5,60%	6,48 7%	8,89 9,10%
SOLAR	0,02 0,00%	0,03 0,00%	0,09 0,10%	0,99 1,00%	1,71 1,80%
OUTROS	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>88,47 100%</b>	<b>90,22 100,00%</b>	<b>96,41 100,00%</b>	<b>95,61 100,00%</b>	<b>97,25 100,00%</b>

Fonte: CPFL (2014).

Tabela 19 - GERAÇÃO LIQUIDA DO REINO UNIDO (TWh).

FONTE	2008	2009	2010	2011	2012
HÍDRICA	9,2 3%	8,9 2,50%	6,7 1,80%	8,5 2,40%	8,2 2,40%
TÉRMICA	308,6 82,80%	279,2 77,50%	292,3 80,00%	264,1 75,20%	252,9 73,10%
NUCLEAR	47,7 12,80%	62,8 17,40%	56,4 15,40%	62,7 17,90%	63,9 18,50%
EÓLICA	7,1 2%	9,3 2,60%	10,2 2,80%	15,5 4%	19,6 5,70%
SOLAR	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	0,2 0,10%	1,2 0,30%
OUTROS	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>372,6 100%</b>	<b>360,2 100,00%</b>	<b>365,6 100,00%</b>	<b>351 100,00%</b>	<b>345,8 100,00%</b>

Fonte: CPFL (2014).

Tabela 20 - CAPACIDADE INSTALADA DA ARGENTINA (GW).

FONTE	2008	2009	2010	2011	2012
HÍDRICA	10,2 39%	10,5 38,90%	11 38,50%	11,1 37,60%	11,1 35,90%
TÉRMICA	15,1 57,40%	15,5 57,40%	16,6 58,00%	17,4 59,00%	18,7 60,60%
NUCLEAR	1 3,80%	1 3,70%	1 3,50%	1 3,40%	1 3,20%
EÓLICA	0 0%	0 0,00%	0 0,00%	0 0%	0,1 0,30%
SOLAR	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%
OUTROS	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>26,3 100%</b>	<b>27 100,00%</b>	<b>28,6 100,00%</b>	<b>29,5 100,00%</b>	<b>30,9 100,00%</b>

Fonte: CPFL (2014).

**Tabela 21 - GERAÇÃO LIQUIDA DA ARGENTINA (TWh).**

<b>FONTE</b>	<b>2008</b>		<b>2009</b>		<b>2010</b>		<b>2011</b>		<b>2012</b>	
HÍDRICA	31,6	26%	35,2	28,80%	33,8	26,90%	32	24,70%	29,8	21,90%
TÉRMICA	83	68,10%	78,9	64,50%	84,7	67,40%	91,5	70,40%	99,5	73,10%
NUCLEAR	7,3	6,00%	8,2	6,70%	7,1	5,70%	6,4	4,90%	6,4	4,70%
EÓLICA	0	0%	0	0,00%	0	0,00%	0	0%	0,4	0,30%
SOLAR	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
OUTROS	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>121,9</b>	<b>100%</b>	<b>122,3</b>	<b>100,00%</b>	<b>125,6</b>	<b>100,00%</b>	<b>129,9</b>	<b>100,00%</b>	<b>136,1</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: CPFL (2014).

**Tabela 22 - CAPACIDADE INSTALADA DO MÉXICO (GW).**

<b>FONTE</b>	<b>2008</b>		<b>2009</b>		<b>2010</b>		<b>2011</b>		<b>2012</b>	
HÍDRICA	11,3	22%	11,3	21,90%	11,5	22,00%	11,4	22,00%	11,5	21,90%
TÉRMICA	37,3	73,00%	37,9	73,30%	39	73,40%	38,1	73,40%	38	72,40%
NUCLEAR	1,4	2,70%	1,4	2,70%	1,4	2,70%	1,4	2,70%	1,6	3,10%
GEOTÉRMICA	1	2%	1	1,90%	1	1,70%	0,9	2%	0,8	1,50%
EÓLICA	0,1	0,20%	0,1	0,20%	0,1	0,20%	0,1	0,20%	0,6	1,10%
OUTROS	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>51,1</b>	<b>100%</b>	<b>51,7</b>	<b>100,00%</b>	<b>53</b>	<b>100,00%</b>	<b>51,9</b>	<b>100,00%</b>	<b>52,5</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: CPFL (2014).

**Tabela 23 - GERAÇÃO LIQUIDA DO MÉXICO (TWh).**

<b>FONTE</b>	<b>2008</b>		<b>2009</b>		<b>2010</b>		<b>2011</b>		<b>2012</b>	
HÍDRICA	38,9	15%	26,4	9,90%	36,7	12,30%	35,8	12,30%	31,3	10,50%
TÉRMICA	179,9	67,00%	191,2	71,70%	193,5	70,90%	206,6	70,90%	214,6	72,30%
NUCLEAR	9,8	3,70%	10,5	3,90%	5,9	3,50%	10,1	3,50%	8,8	3,00%
GEOTÉRMICA	7	3%	6,7	2,50%	6,6	2,20%	6,5	2%	5,8	2,00%
EÓLICA	0,3	0,10%	0,3	0,10%	0,2	0,10%	0,4	0,10%	1,7	0,60%
PARTICULAR	32,4	12,10%	31,7	11,90%	32,2	11,00%	32,1	11,00%	34,4	11,60%
<b>TOTAL</b>	<b>268,3</b>	<b>100%</b>	<b>266,8</b>	<b>100,00%</b>	<b>275,1</b>	<b>100,00%</b>	<b>291,5</b>	<b>100,00%</b>	<b>296,6</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: CPFL (2014).

**Tabela 24 - CAPACIDADE INSTALADA DO JAPÃO (GW)**

<b>FONTE</b>	<b>2008</b>		<b>2009</b>		<b>2010</b>		<b>2011</b>		<b>2012</b>	
HÍDRICA	47,9	17%	48	17,10%	48,1	16,90%	48,4	16,90%	48,9	17,20%
TÉRMICA	179,3	64,60%	181,7	64,60%	182,4	64,90%	188,9	64,90%	188,9	66,50%
NUCLEAR	47,9	17,30%	48,8	17,40%	49	17,20%	46,1	17,20%	46,1	16,30%
RENOVÁVEL	2,3	1%	2,5	0,90%	2,9	1,00%	3	1%	0	0,00%
SOLAR	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
OUTROS	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>277,4</b>	<b>100%</b>	<b>281</b>	<b>100,00%</b>	<b>282,4</b>	<b>100,00%</b>	<b>286,4</b>	<b>100,00%</b>	<b>283,9</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: CPFL (2014)

**Tabela 25 - GERAÇÃO LÍQUIDA DO JAPÃO (TWh)**

<b>FONTE</b>	<b>2008</b>		<b>2009</b>		<b>2010</b>		<b>2011</b>		<b>2012</b>	
HÍDRICA	83,5	8%	83,8	8,00%	90,7	8,10%	91,7	8,70%	83,7	8,10%
TÉRMICA	710,2	65,60%	655,7	62,40%	691,6	61,90%	807,9	76,80%	881,8	85,30%
NUCLEAR	258,1	23,80%	279,8	26,60%	288,2	25,80%	101,8	9,70%	15,9	1,50%
EÓLICA	2,9	0%	3,6	0,30%	4	0,40%	4,7	0%	4,8	0,50%
SOLAR	2,3	0,20%	2,8	0,30%	3,8	0,40%	5,2	0,50%	7	0,70%
BIOMASSA	15,4	1,40%	14,3	1,40%	29,1	2,60%	29,1	2,80%	30,2	2,90%
RESÍDUOS	7,3	0,70%	7,4	0,70%	7,1	0,60%	8,2	0,80%	8,3	0,80%
GEOTÉRMICA	2,8	0,30%	2,9	0,30%	2,6	0,20%	2,7	0,30%	2,6	0,20%
<b>TOTAL</b>	<b>1082,5</b>	<b>100%</b>	<b>1050,3</b>	<b>100,00%</b>	<b>1117,1</b>	<b>100,00%</b>	<b>1051,3</b>	<b>100,00%</b>	<b>1034,3</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: CPFL (2014)