

**RICARDO LUIZ LABOZETTO**

**SISTEMA PARA O ENSAIO DE TURBINAS DE TESLA**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:  
Engenharia Mecânica

Orientador:  
José Roberto Simões Moreira

São Paulo  
1999

Labozetto, Ricardo Luiz

Sistema para o ensaio de turbinas de Tesla. São Paulo, 1999-06-22

75p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Turbina de Tesla 2. Bancada de testes I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t

À minha mãe  
e ao meu irmão

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor José Roberto Simões Moreira pela objetividade e apoio, especialmente nos momentos iniciais do curso quando tudo parecia estar perdido.

Ao amigo Professor Doutor Carlos Chien Ching Tu sem o qual, com sua incomensurável paciência, dedicação e sabedoria, não seria possível o término deste trabalho.

À minha mãe Ondina, pela interminável paciência e por todo estímulo e apoio dado, sem os quais nada teria sido possível.

À Escola Politécnica da qual me foi oferecido o apoio necessário para tal empreitada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, por todo apoio dado no fornecimento de bolsas e equipamentos.

À todos os colegas da Escola Politécnica, pela força dada nos momentos difíceis.

À todos aqueles que de forma anônima contribuíram de forma direta ou indireta para a concretização deste trabalho.

## RESUMO

Um sistema para medir o desempenho de turbinas hidráulicas de Tesla foi projetado, construído e testado. Este sistema permite o ensaio de turbinas de até 1,5 kW, torque de saída de 8 Nm em rotação de 5000 rpm, com entrada de água de até 0,6 MPa a 10 l/s. A bancada foi projetada para permitir que as turbinas a serem ensaiadas possam ser facilmente montadas e desmontadas, sem perturbar o resto do sistema.

Para a verificação experimental da bancada e o estabelecimento de um procedimento de ensaio, uma turbina de Tesla representativa também foi projetada e construída. Os dados do seu desempenho foram satisfatoriamente levantados, mostrando o bom funcionamento do sistema como um todo.

## ABSTRACT

A system for the performance testing of hydraulic Tesla turbines has been designed, built and verified. This system is able to test turbines of up to 1.5kW, output torque of 8 Nm at 5000 rpm, with the water entering at a maximum pressure of 0.6 MPa at a flow rate of 10 l/s. The test bench was designed so that the turbines can be mounted and desmounted with ease, without disturbing the rest of the system.

For the experimental verification of the bench and to establish a testing procedure, a representative Tesla turbine was also designed and built. The performance data of this turbine was satisfactorially measured, demonstrating that the system, as a whole, works well

## ÍNDICE GERAL

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE GERAL</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>xi</b>

### **CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO**

1.1 Razão desse dispositivo .....	1
1.2 Considerações sobre a turbina de Tesla .....	2
1.3 Considerações sobre a bancada de testes.....	15
1.4 Objetivos da dissertação e roteiro .....	19

### **CAPÍTULO II – PROJETO E CONSTRUÇÃO DA BANCADA DE TESTES**

2.1 Descrição geral do equipamento .....	21
2.2 Detalhamento geométrico e de funcionamento da turbina de Tesla .....	26
2.3 Descrição e dimensionamento do dinamômetro .....	28
2.3.1 Descrição do dinamômetro .....	28

2.3.2 Projeto e simplificação do circuito eletrônico da parte rotativa ..	30
2.3.3 Circuito receptor .....	37
2.3.4 Dimensionamento do corpo do dinamômetro .....	40
2.4 Comentários a respeito de freio .....	45

### **CAPÍTULO III – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

3.1 Testes preliminares .....	46
3.2 Descrição do arranjo montado para a calibração do dinamômetro .....	47
3.3 Procedimento durante os testes .....	48
3.4 Testes para a determinação do torque resistivo .....	50

### **CAPÍTULO IV – APRESENTAÇÃO DOS DADOS COLETADOS**

4.1 Experimento da medida de vazão .....	52
4.2 Calibração do dinamômetro .....	54
4.3 Testes finais .....	57
4.4 Dados referentes ao torque resistivo .....	60

### **CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....**

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....**

<b>APÊNDICE – DESENHOS DE CONJUNTO E DE FABRICAÇÃO DA</b>	
<b>TURBINA .....</b>	<b>64</b>

## ERRATA

**Página 1:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... deve-se ao fato de que este tipo de turbina tem sido muito pouco estudada desde que foi inventada por Nikola Tesla ...

**se entende por:**

... deve-se ao fato de que este tipo de turbina tem sido muito pouco estudado desde que foi inventado por Nikola Tesla ...

**Página 2:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... utilidade prática desta bancada, foi necessária a construção ...

**se entende por:**

... utilidade prática desta bancada, foram necessários a construção ...

**e onde se lê:**

... refere-se também sobre o projeto de uma turbina de Tesla ... tipo de turbina é pouco conhecida ...

**se entende por:**

... refere-se também ao projeto de uma turbina de Tesla ... tipo de turbina é pouco conhecido ...

**Página 3:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... No caso das máquinas de deslocamento positivo, são desenvolvidas altas pressões com velocidade relativamente pequena, devido a redução do tamanho de um volume no qual o líquido está completamente confinado.

**se entende por:**

... No caso das máquinas de deslocamento positivo, são desenvolvidas altas pressões com velocidade relativamente pequena. ...

**Página 5:** no terceiro parágrafo, onde se lê:

... pode afirmar que esta é por volta de 88%.

**se entende por:**

... pode afirmar que este é por volta de 88%.

**Página 7:** no quinto parágrafo, onde se lê:

... aceitar trabalhar com fluidos impuros, isto é, com particulados, não apresentar ...

**se entende por:**

... aceitar trabalhar com fluidos impuros, isto é, com partículas que possuam diâmetro menor que a distância entre os discos, não apresentar ...

**Página 8:** no segundo parágrafo, onde se lê:

... específico obtido no eixo da turbina (por unidade de massa) e ...

**se entende por:**

... específico por unidade de massa obtido no eixo da turbina e ...

**no terceiro parágrafo, onde se lê :**

... onde pode-se ver a disposição dos discos planos e as distâncias entre eles. ...

**se entende por:**

... onde pode-se ter uma idéia da disposição dos discos planos e as distâncias entre eles. ...

**no quarto parágrafo, onde se lê:**

... espaçados por  $3/32''$  (2,38 mm) e  $1/16''$  (1,59 mm).

**se entende por:**

... espaçados por  $3/32''$  (2,38 mm) em um primeiro experimento e  $1/16''$  (1,59 mm) posteriormente num segundo experimento.

**Página 10:** na Tabela 1.2, onde se lê:

... os bocais de entrada com  $10^\circ$  de inclinação em relação à tangente.

**se entende por:**

... os bocais de entrada com  $10^\circ$  de inclinação em relação à tangente (Rice, 1965).

**Página 11:** no segundo parágrafo, onde se lê:

... além do indicado na Tabela 1.2. ...

**se entende por:**

... além do indicado na Tabela 1.2 (Rice, 1965). ...

**no gráfico da Figura 1.4, onde se lê:**

rotação (rpm) se entende por frequência (Hz)

**no gráfico da Figura 1.4, onde se lê:**

... Gráfico mostrando as características ...

**se entende por:**

... Gráfico com os valores da Tabela 1.2 mostrando as características ...

**Página 12:** no terceiro parágrafo, onde se lê:

... O dispositivo de Tesla ...

**se entende por:**

... Tanto a turbina como a bomba proposta por Tesla possuem ...

**no quinto item do terceiro parágrafo, onde se lê:**

- não apresenta problemas na passagem de fluidos bifásicos ou mesmo na combinação sólido líquido e sólido líquido gasoso. ...

**se entende por:**

- não apresenta problemas na passagem de fluidos bifásicos.

**no quinto parágrafo, onde se lê:**

... obtido para condições de operação semelhantes entre ambas. ...

**se entende por:**

... obtido para condições de operação semelhantes entre uma bomba de Tesla e uma bomba centrífuga de mesma potência. ...

**onde se lê:**

... de vazões utilizados nos testes. ...

**se entende por:**

... de vazões utilizadas nos testes. ...

**Página 14:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... e usando propano líquido como combustível a ...

**se entende por:**

... e usando propano líquido como combustível na tentativa de usá-las como motores de combustão interna trabalhando ...

**onde se lê:**

... de dois pólos onde foi obtido 100 Watts ...

**se entende por:**

... de dois pólos onde foram obtidos 100 Watts ...

**Página 15:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... produzindo 13.500 HP (10MW) de potência.

**se entende por:**

... produzindo 13.500 HP (10MW) de potência na geração de energia elétrica.

**no ultimo parágrafo, onde se lê:**

... tipo de situação, quase estática, usa-se um monômetro de ...

**se entende por:**

... tipo de situação, usa-se um manômetro de ...

**Página 16:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... a água é praticamente incompressível, ...

**se entende por:**

... a água é praticamente incompressível, ...

**Página 18:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... além de transmitirem muitos ruídos ...

**se entende por:**

... além de transmitir muitos ruídos ...

**Página 21:** no segundo parágrafo, onde se lê:

... de duas bombas de engrenagem sendo que ...

**se entende por:**

... de duas bombas centrífugas sendo que ...

**Página 24:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... à carcaça em posição diametralmente oposta um ao outro.

**se entende por:**

... à carcaça em posições diametralmente opostas.

**Página 26:** no terceiro parágrafo, onde se lê:

... Uma descrição detalhada do deste será feita ...

**se entende por:**

... Uma descrição detalhada deste será feita ...

**inclusão de parágrafo imediatamente abaixo do título:**

2.2 DETALHAMENTO GEOMÉTRICO E DE FUNCIONAMENTO DA TURBINA DE TESLA

**parágrafo incluído:**

É importante salientar que os parâmetros geométricos de construção da turbina de Tesla foram estimados a partir de um programa computacional (Cabral, 1999).

**Página 28:** no terceiro parágrafo, onde se lê:

... ficar posicionado no outro foco da elipse, como ...

**se entende por:**

... ficar posicionado na posição do outro foco da elipse, como ...

**Página 30:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

O sinal luminoso que sai dos led's é mandado para uma peça acrílica, estacionária, espelhada com formato elíptico que tem por finalidade encaminhar a luz para um fotoreceptor. Deste, o sinal vai para o circuito receptor estacionário, para que seja amplificado. A partir deste ponto o sinal está pronto para ser usado nas medições do frequencímetro, e do osciloscópio (Albuquerque, 1998).

**se entende por:**

Do transdutor mencionado, o sinal está pronto para ser usado nas medições do frequencímetro, e do osciloscópio (Albuquerque, 1998).

**Página 32:** no quinto parágrafo, onde se lê:

... corpo do dinamômetro afim de se obter maior sensibilidade. Tal superfície foi lixada com o cuidado de que não fossem deixados riscos que concentrar tensões e, ...

**se entende por:**

... corpo do dinamômetro a fim de se obter maior sensibilidade. Tal superfície foi lixada com cuidado para que não fossem deixados riscos que concentrariam tensões e, ...

**Página 33:** no terceiro parágrafo, onde se lê:

... realizados a partir dos dados obtidos na literatura:

**se entende por:**

... realizados a partir dos dados obtidos na literatura (Ponge, 1985):

**Página 37:** no quarto parágrafo, onde se lê:

... Assim, o eixo do dinamômetro foi posicionado de tal maneira ...

**se entende por:**

... Assim, o centro do eixo do dinamômetro foi posicionado de tal maneira ...

**Página 38:** no terceiro parágrafo, onde se lê:

... Cunha (1998) utilizou-se uma só chapa ...

**se entende por:**

... Cunha (1998) utilizou uma só chapa ...

**Página 40:** no quarto parágrafo, onde se lê:

... submetida apenas a torção, possui tensão que aparece é de ...

**se entende por:**

... submetida apenas à torção, a tensão que aparece é de ...

**Página 46:** no terceiro parágrafo, onde se lê:

... Na condição de regime, desviava-se rapidamente a mangueira de saída água da turbina, e a colocava em direção ...

**se entende por:**

... Na condição de regime permanente, desviava-se rapidamente a mangueira de saída de água da turbina, e se colocava em direção ...

**Página 47:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... com a pressão variando de 0,4 Pa, entre uma e outra

**se entende por:**

... com a pressão variando de 0,4 Pa, entre uma e outra, como pode-se observar na Tabela 4.1.

**no terceiro parágrafo, onde se lê:**

... A calibração foi feita estaticamente ...

**se entende por:**

... A calibração foi feita estaticamente ...

**no sexto parágrafo, onde se lê:**

... valores fornecidos pelo frequencímetro para que pudesse ser feita uma curva de calibração que relacionasse ...

**se entende por:**

... valores fornecidos pelo frequencímetro (vide Tabela 4.2) para que pudesse ser feita uma curva de calibração que relacionasse ...

**Página 48:** na Figura 3.1, onde se lê:

... montado para a calibração do dinamômetro.

**se entende por:**

... montado para a calibração do dinamômetro.

**Página 49:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... entrava em regime, os testes podiam ...

**se entende por:**

... entrava em regime permanente, os testes podiam ...

**no terceiro parágrafo, onde se lê:**

... descrito acima, e depois desta, foram feitas ...

**se entende por:**

... descrito acima, e depois destes, foram feitas ...

**Página 50:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

... utilizou-se de um motor de ...

**se entende por:**

... utilizou-se um motor de ...

**Página 52:** no primeiro parágrafo, onde se lê:

Durante os experimentos citados acima, foram coletados uma série de dados ...

**se entende por:**

Durante os experimentos citados acima, foi coletada uma série de dados ...

**no parágrafo, onde se lê:**

... foi medido o tempo que levou para que o reservatório ...

**se entende por:**

... foi medido o tempo necessário para que o reservatório ...

**Página 53:** na Tabela 4.2, onde se lê:

Pressão (Pa)

**se entende por:**

... Pressão ( $\text{kgf/cm}^2$ )

**Página 55:** no segundo parágrafo, onde se lê:

... foram feitos testes, afim de levantar ...

**se entende por:**

... foram feitos testes, a fim de levantar ...

**onde se lê:**

A seguir, é mostrado o Figura 4.2, que correspondente aos dados ...

**se entende por:**

A seguir, é mostrada a Figura 4.2, que corresponde aos dados ...

**Página 58:** na Tabela 4.4, onde se lê:

Pressão (Pa)

**se entende por:**

Pressão ( $\text{kgf/cm}^2$ )

**Página 59:** na Tabela 4.5, onde se lê:

Pressão (Pa)

**se entende por:**

Pressão ( $\text{kgf/cm}^2$ )

**Página 61:** no quarto parágrafo, onde se lê:

...percebe-se que consegui-se chegar a uma combinação perfeita entre a espessura da parede, a qual se encontram ...

**se entende por:**

...percebe-se que consegue-se chegar a uma combinação perfeita entre a espessura da parede, na qual se encontram ...

**nas referências bibliográficas:**

**incluir:**

Cabral, Eduardo L. Lustosa, 1999, departamento de engenharia mecânica da EPUSP,  
**Programa computacional de simulação numérica**, comunicação pessoal.

**LISTA DE FIGURAS**

<b>FIGURA 1.1</b>	Esquemas mostrando os tipos de turbinas .....	5
<b>FIGURA 1.2</b>	Esquemas mostrando os tipos de turbinas .....	6
<b>FIGURA 1.3</b>	Esquema mostrando a turbina de múltiplos discos.(TEBA) .....	9
<b>FIGURA 1.4</b>	Gráfico mostrando as características da turbina .....	11
<b>FIGURA 1.5</b>	Teste de desempenho entre uma bomba viscosa e uma bomba centrífuga .....	14
<b>FIGURA 1.6</b>	Disposição dos extensômetros no eixo .....	17
<b>FIGURA 1.7</b>	Princípio de funcionamento do acoplamento óptico .....	19
<b>FIGURA 2.1</b>	Vista geral do conjunto de bombas e do motor de corrente contínua	22
<b>FIGURA 2.2</b>	Circuito de ligações dos tubos e registros .....	23
<b>FIGURA 2.3</b>	Ilustração mostrando o tubo de distribuição, manômetro e mangueiras plásticas .....	24
<b>FIGURA 2.4</b>	Vista geral da turbina com os bocais de entrada .....	25
<b>FIGURA 2.5</b>	Vista geral da bancada de testes .....	25
<b>FIGURA 2.6</b>	Diagrama esquemático do dinamômetro .....	29
<b>FIGURA 2.7</b>	Fotografia do dinamômetro .....	29
<b>FIGURA 2.8</b>	Circuito da parte rotativa .....	31
<b>FIGURA 2.9</b>	Peças componentes do captador elíptico .....	38
<b>FIGURA 2.10</b>	Esquema ilustrando o circuito do receptor .....	39

<b>FIGURA 2.11</b> Elementos em barra circular.....	41
<b>FIGURA 2.12</b> Esquema dos triângulos elementares das tensões.....	41
<b>FIGURA 2.13</b> Esquema da ponte de Wheatstone .....	43
<b>FIGURA 2.14</b> Instalação de sensores em pontos diametralmente opostos do mesmo eixo intermediário .....	43
<b>FIGURA 2.15</b> Visão geral do sistema de frenagem .....	45
<b>FIGURA 3.1</b> Ilustração mostrando o arranjo montado para a calibração do dinamômetro .....	48
<b>FIGURA 3.2</b> Arranjo experimental montado para a determinação do torque resistivo .....	51
<b>FIGURA 4.1</b> Curva de calibração com torção no sentido anti-horário .....	55
<b>FIGURA 4.2</b> Curva de calibração com torção no sentido horário .....	56

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1.1</b>	Dados de operação da turbina obtidos por Tesla (Rice, 1965).....	9
<b>TABELA 1.2</b>	Dados representativos do desempenho da primeira turbina modificada pelo aumento do número de discos operando com exaustão para a atmosfera e usando os bocais de entrada com 10° de inclinação com relação à tangente .....	10
<b>TABELA 1.3</b>	Dados referentes a experimentos em que se utilizou o equipamento de Tesla para uso automotivo .....	13
<b>TABELA 2.1</b>	Valores dos componentes do circuito da Figura 2.8.....	31
<b>TABELA 4.1</b>	Dados coletados com a turbina em vazio, sem o dinamômetro e freio.....	53
<b>TABELA 4.2</b>	Dados encontrados nos testes de calibração para o eixo com rotação anti-horária .....	54
<b>TABELA 4.3</b>	Dados encontrados nos testes de calibração para o eixo com rotação horária .....	56
<b>TABELA 4.4</b>	Listagem dos valores encontrados nos experimentos .....	58
<b>TABELA 4.5</b>	Relação dos valores encontrados aumentando-se a massa do balde	59
<b>TABELA 4.6</b>	Valores encontrados nos testes para a determinação do torque resistivo...	60

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon$	deformação relativa
$f_0$	frequência
$GA$	ganho do amplificador
$J$	momento de inércia polar
$n$	rotação da turbina
$N$	potência da turbina
$Q$	vazão volumétrica
$R_i$	raio interno do eixo do dinamômetro
$R_o$	raio externo do eixo do dinamômetro
$\sigma$	tensão normal
$\sigma_{ADM}$	tensão admissível
$T$	torque
$\tau_{max}$	tensão de cisalhamento
$V$	tensão de alimentação
$\omega$	velocidade angular

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 RAZÃO DESSE DISPOSITIVO**

O laboratório de sistemas energéticos alternativos, SISEA, do departamento de engenharia mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo iniciou um programa de estudo das turbinas de Tesla e de algumas de suas variantes. Tal decisão, deve-se ao fato de que este tipo de turbina tem sido muito pouco estudada desde que foi inventada por Nikola Tesla no começo deste século. Ainda hoje existe uma deficiência muito grande de informações e de conhecimento a respeito desse equipamento.

Um modelamento matemático realista do comportamento da turbina de Tesla, exige que se obtenham dados experimentais em condições controladas de laboratório. Para tal, seria interessante que se dispusesse de um equipamento capaz de facilitar e agilizar a adaptação e preparação de turbinas que eventualmente venham a ser construídas, já que destas deve-se coletar dados referentes a vazão, rotação, torque, eficiência, entre outros.

Portanto, a motivação deste trabalho foi a necessidade de se ter disponível uma bancada de testes que fosse versátil, permitindo fácil troca de eventuais turbinas que

sejam construídas, atendendo assim, as necessidades do laboratório. Para verificar a utilidade prática desta bancada, foi necessária a construção e ensaio de uma turbina de Tesla simples, do tamanho das futuras turbinas a serem pesquisadas. Desta forma, além de testar plenamente a bancada, também os procedimentos experimentais foram verificados. Portanto, a pesquisa bibliográfica, apresentada a seguir, refere-se também sobre o projeto de uma turbina de Tesla. Levando-se em consideração que este tipo de turbina é pouco conhecida, será aproveitada a oportunidade, neste trabalho, para que seja discutida sua posição em relação aos outros tipos de turbina.

## **1.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A TURBINA DE TESLA**

Segundo Fox e McDonald (1998), o homem da antiguidade utilizava potes ou baldes para transportar água. Logo, ele percebeu que, com aumento da população, seria necessário mecanizar este processo. Como consequência, dispositivos como rodas de conchas e bombas de parafuso para o transporte de água foram concebidos. Por volta de 70 a.C. os romanos usaram rodas de pás, para que fosse extraída energia de pequenos cursos de água. Mais tarde, foram desenvolvidos moinhos de vento, os quais eram equipamentos importantes, mas que produziam baixa densidade de energia mecânica útil. Foi com o aparecimento de rodas de água que foi possível a produção de milhares de quilowatts de potência mecânica com um só equipamento.

Depois de muitos anos de estudo e experiências e também movidos pela necessidade, os pesquisadores desenvolveram máquinas de fluxo que somavam ou subtraíam energia do fluxo de água. As máquinas que adicionam energia a uma corrente fluida são chamadas de bombas enquanto que as outras máquinas hidráulicas, que convertem a energia potencial gravitacional armazenada pela água em trabalho mecânico, são chamadas de turbinas. Estas máquinas podem ser classificadas como de deslocamento positivo ou dinâmicas. No caso das máquinas de deslocamento positivo, são desenvolvidas altas pressões com velocidade de fluxo relativamente pequena, devido a redução do tamanho de um volume no qual o líquido está completamente confinado. Um exemplo típico desse tipo de equipamento é a bomba de engrenagens, as quais podem desenvolver pressões de até 35 MPa, com vazões baixas. Nas turbomáquinas dinâmicas, o fluxo é direcionado por meio de pás, aletas ou palhetas fixas ou em sistema rotativo onde o fluido nunca fica totalmente confinado, sendo o caso de bombas, sopradores centrífugos e turbinas em geral.

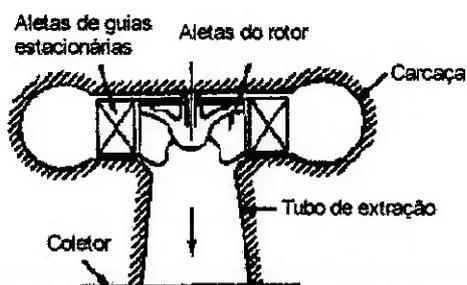
Foram desenvolvidos vários tipos de turbinas para as mais diversas aplicações e utilizações, dentre eles podemos citar:

- . turbina a reação, tipo Francis;
- . turbina a impulsão, tipo Pelton;
- . turbina a hélice, tipo Kaplan; e

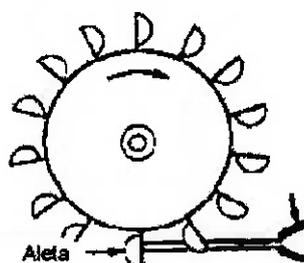
fazem passar por um bocal convergente para promover a aceleração do fluido. Esta água sai do bocal na forma de jato chocando-se nas pás existentes na periferia do rotor, como mostrado na Figura 1.1b.

A maneira de se fazer um controle gradual da potência produzida neste equipamento é variar a vazão da água que alimenta a turbina, através da variação da área de saída do bocal. Em casos que são necessárias mudanças rápidas ou maiores no volume de água do jato que incide nas pás, são usados defletores de jato ou bocais auxiliares para que este seja desviado.

Descobriu-se que a maior eficiência é conseguida quando a velocidade do rotor for apenas um pouco inferior à metade da velocidade do jato de água. Para que se tenha uma noção da ordem de grandeza do rendimento de uma turbina desse tipo, pode-se afirmar que esta é por volta de 88 %.

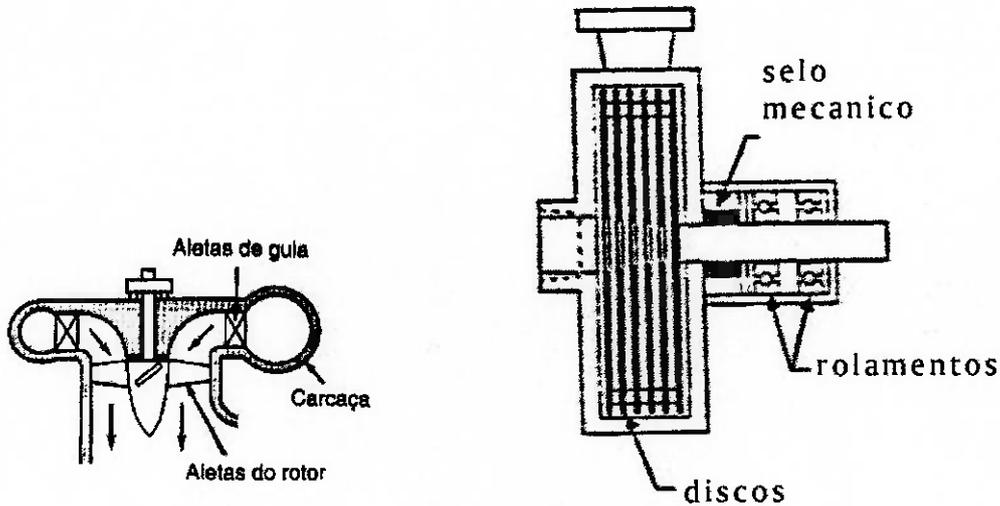


(a) de reação, turbina Francis



(b) de impulsão, turbina Pelton

**FIGURA 1.1** – Esquemas mostrando os tipos de turbinas.



(a) a hélice, tipo Kaplan

(b) de múltiplos discos, de Tesla

**FIGURA 1.2** – Esquemas mostrando os tipos de turbinas.

As turbinas a hélice foram desenvolvidas pelo professor alemão Victor Kaplan entre 1910 e 1924 e eram compostas de uma hélice com pás ajustáveis, e se adaptavam melhor aos casos em que a altura de carga seja menor que 15 m.

Existem muitas semelhanças entre a turbina Kaplan e a de Francis, mas pode-se dizer que o que mais as diferencia é que a primeira deflete a água antes de entrar no rotor, fazendo com que esta flua quase axialmente antes de encontrar o rotor, como mostrado na Figura 1.2a.

Apesar de possuir um rendimento máximo maior que o das turbinas a impulsão, as turbinas Kaplan têm uma eficiência que varia mais bruscamente com a carga devido as menores alturas manométricas.

Por volta de 1910 foi desenvolvido um novo tipo de turbina atribuída a Nikola Tesla. Esta turbina se diferenciava muito das anteriores, não só pelo seu tamanho reduzido, mas também pelo seu princípio de funcionamento.

Sendo composta de discos paralelos e lisos, a água entra praticamente na direção tangencial, no mesmo plano dos discos, percorrendo uma trajetória espiral e saindo pelo seu centro (Figura 1.2b). Ao contrário das turbinas anteriores, onde a movimentação dos rotores é feita devido a reação das forças vindas da corrente fluida, na turbina de Tesla, o rotor é movimentado pelas forças viscosas devido a passagem do fluido (líquido ou gasoso) por entre seus discos.

Uma das diferenças importantes entre a turbina viscosa e as demais é o fato desta necessitar uma vazão relativamente pequena com uma rotação extremamente alta, em alguns casos chegando a mais de 35000 rpm (583 Hz) (Seiple, 1979).

Apesar de apresentar rendimentos relativamente baixos, que vão de 10 a 30 %, este tipo de equipamento apresenta uma série de vantagens importantes que além de torná-lo atraente, garantem à turbina de Tesla um lugar de destaque no espectro de utilização das turbinas. Dentre as suas vantagens, pode-se citar o fato desta turbina aceitar trabalhar com fluidos impuros, isto é, com particulados, não apresentar problemas

com cavitação e baixo custo de fabricação, baixo nível de vibração e ruídos. Estas são apenas algumas das características que reforçam o seu uso.

Conforme descrição feita por Nikola Tesla, a primeira turbina construída operou com ar comprimido o qual foi lançado para a atmosfera, ou seja, a pressão efetiva de descarga igual a zero. Os resultados obtidos com os testes, bem como as condições de teste desta turbina encontram-se na Tabela 1. Nesta tabela constam as eficiências ou rendimentos obtidos nos testes, definidos como sendo a razão entre o trabalho real específico obtido no eixo da turbina (por unidade de massa) e o trabalho ideal específico disponível quando o fluido é injetado na turbina.

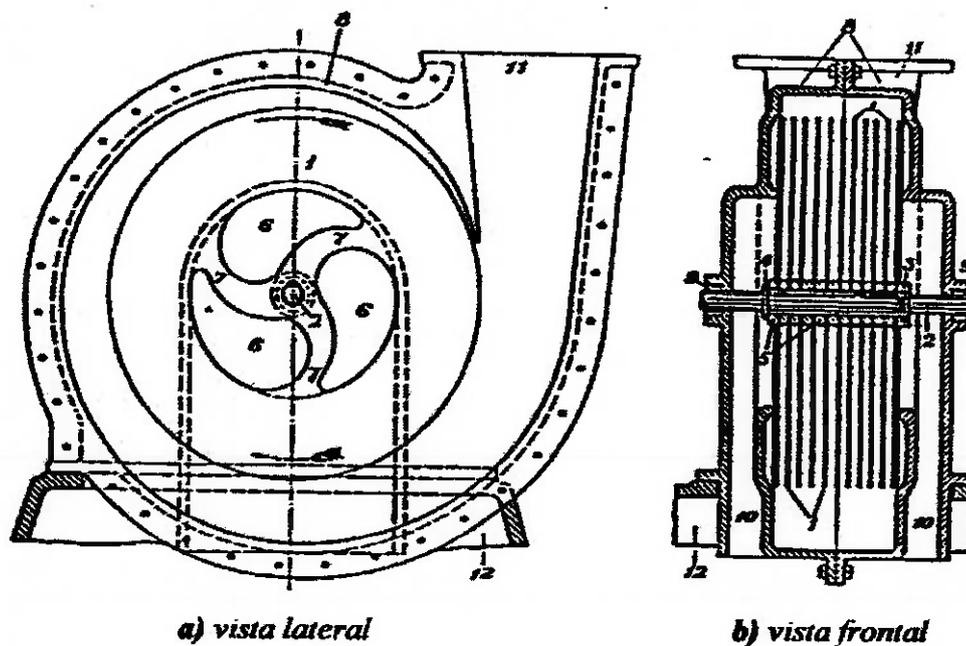
A Figura 1.3a mostra um rotor típico da turbina de Tesla onde pode-se ver a disposição dos discos planos e as distâncias entre eles. A Figura 1.3b (TEBA - Tesla Engine Builders Association) apresenta um diagrama esquemático de turbina com rotor de múltiplos discos.

Como exemplo, o rotor da turbina construída originalmente por Tesla apresentava um diâmetro de 7" (177,80 mm), composta por 9 discos espaçados por  $3/32$ " (2,38 mm) e  $1/16$ " (1,59 mm). Rice (1963) fez um estudo analítico e experimental do equipamento de múltiplos discos com o objetivo de verificar a viabilidade do equipamento. Esta investigação resultou no projeto, construção e teste de uma variedade de turbinas a ar, compressores e uma bomba.

**TABELA 1.1** – Dados de operação da turbina obtidos por Tesla (Rice, 1965).

pressão na turbina, psi, (MPa)	vazão mássica, lb <sub>m</sub> /min, (10 <sup>-3</sup> kg/s)	rotação, rpm, (Hz)	potência, HP, (kW)	rendimento, (%)
100 (6,89)	4,91 (37,11)	9400 (156,67)	1,12 (0,83)	16,5
105 (7,24)	5,76 (43,54)	8000 (133,33)	1,36 (1,01)	17,5
105 (7,24)	5,76 (43,54)	10000 (166,67)	1,48 (1,10)	18,8
110 (7,58)	5,86 (44,29)	8000 (133,33)	1,39 (1,04)	17,2
110 (7,58)	5,86 (44,29)	10000 (166,67)	1,31 (0,98)	16,3
125 (8,62)*	4,82 (36,43)	10000 (166,67)	1,68 (1,25)	23,2

\* com limitadores de fluxo nos bocais de entrada.



**FIGURA 1.3** - Esquema mostrando a turbina de múltiplos discos (Tesla Engine Builders Association).

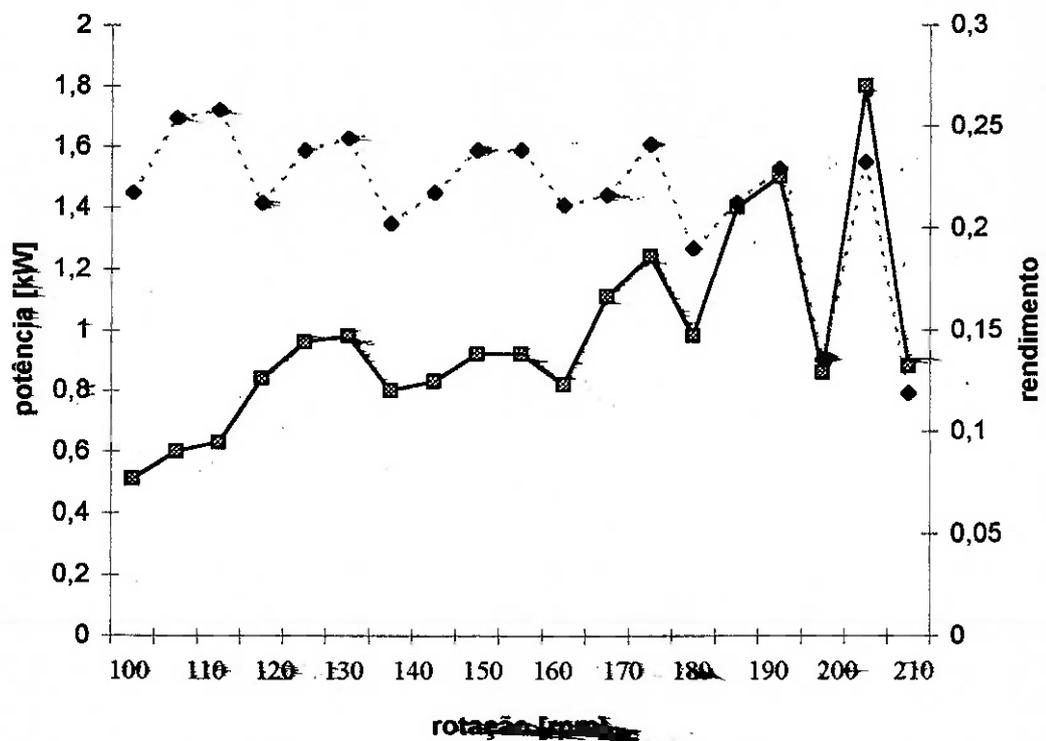
**TABELA 1.2 - Dados representativos do desempenho da primeira turbina modificada pelo aumento do número de discos, operando com exaustão para a atmosfera e usando os bocais de entrada com 10° de inclinação em relação à tangente.**

pressão na entrada da turbina, psi, (kPa)	temperatura na entrada da turbina, °F, (K)	vazão mássica, lb <sub>m</sub> /min, (10 <sup>-3</sup> kg/s)	rotação, rpm, (Hz)	potência, hp, (kW)	rendimento, (%)
40, (275,79)	203, (368,15)	2,82 (21,31)	6300 (105)	0,68 (0,51)	21,7
40, (275,79)	203, (368,15)	2,82 (21,31)	8500 (142)	0,81 (0,60)	25,4
40, (275,79)	203, (368,15)	2,82 (21,31)	9200 (153)	0,85 (0,63)	25,8
60, (413,69)	175, (352,59)	4,05 (30,61)	8000 (133)	1,13 (0,84)	21,2
60, (413,69)	175, (352,59)	4,05 (30,61)	10000 (167)	1,29 (0,96)	23,8
60, (413,69)	175, (352,59)	4,05 (30,61)	11000 (183)	1,32 (0,98)	24,4
60, (413,69)	175, (352,59)	4,05 (30,61)	11500 (192)	1,07 (0,80)	20,2
80, (551,58)*	182, (356,48)	3,48 (26,30)	8000 (133)	1,12 (0,83)	21,7
80, (551,58)	182, (356,48)	3,48 (26,30)	10000 (167)	1,24 (0,92)	23,8
80, (551,58)	182, (356,48)	3,48 (26,30)	11000 (183)	1,24 (0,92)	23,8
80, (551,58)	182, (356,48)	3,48 (26,30)	11500 (192)	1,10 (0,82)	21,1
100, (689,48)	175, (352,59)	4,38 (33,11)	9000 (150)	1,49 (1,11)	21,6
100, (689,48)	175, (352,59)	4,38 (33,11)	11000 (183)	1,67 (1,24)	24,1
100, (689,48)	175, (352,59)	4,38 (33,11)	12000 (200)	1,32 (0,98)	19,0
120, (827,38)	165, (347,04)	5,30 (40,06)	9300 (155)	1,88 (1,40)	21,2
120, (827,38)	165, (347,04)	5,30 (40,06)	11000 (183)	2,02 (1,50)	22,9
120, (827,38)	165, (347,04)	5,30 (40,06)	12200 (203)	1,16 (0,86)	13,5
140, (965,27)	165, (347,04)	6,00 (45,35)	11800 (197)	2,41 (1,80)	23,2
140, (965,27)	165, (347,04)	6,00 (45,35)	12500 (208)	1,18 (0,88)	11,9

\* Este e os dados abaixo com limitador de fluxo no bocal de entrada.

Algumas das características da turbina original atribuída a Tesla foram modificadas, aumentando-se o número de discos, de 9 para 11, e reduzindo-se o espaçamento entre eles, de 3/32" (2,38 mm) para 0,040" (1,01 mm) (Rice, 1965).

Posteriormente foram adaptados bocais para produzir velocidades supersônicas na saída do rotor, com fluxos razoavelmente uniformes, mas em nenhum dos casos as modificações feitas resultaram em aumentos no rendimento da turbina além do indicado na Tabela 1.2. É possível ter uma visão mais clara das características desta turbina analisando-se o gráfico da Figura 1.4.



**FIGURA 1.4** – Gráfico mostrando as características da turbina (linha cheia – potência, linha pontilhada – rendimento)

A análise dos parâmetros de projeto destas turbinas revelou a importância da geometria, vazão e velocidade no seu desempenho experimental.

Algumas destas características em turbinas construídas para uso automotivo são apresentadas na Tabela 1.3 (Seiple, 1979).

O dispositivo de Tesla possui vantagens e desvantagens em relação às máquinas convencionais. Como principais vantagens destes podemos citar:

- eliminação de problemas como vibração e produção de ruídos;
- possibilita o recalque de líquidos voláteis ou vaporizados sem problemas de cavitação;
- devido ao gradual ganho de rotação do rotor, evita impactos na linha fluida;
- viabiliza o transporte de materiais muito viscosos;
- não apresenta problemas na passagem de fluidos bifásicos ou mesmo na combinação sólido líquido e sólido líquido gasoso.

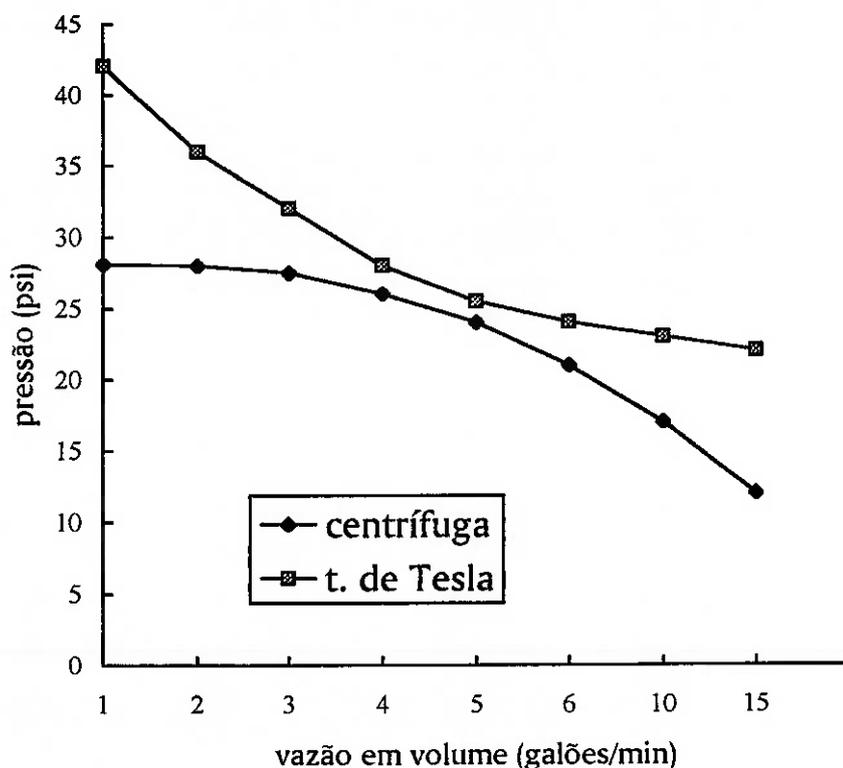
Além destas vantagens, as bombas e turbinas de Tesla são as que apresentam a mais fácil construção e também as de menor custo de construção além de apresentarem uma baixa relação entre o peso do equipamento e a potência por elas produzida.

Para que se possa ter uma idéia do desempenho de algumas bombas de múltiplos discos mostra-se um gráfico comparativo entre uma bomba de múltiplos discos (viscosa) e uma bomba centrífuga na Figura 1.5 (Jacobson), obtido para condições de operação semelhantes entre ambas. Neste caso observa-se uma pressão de saída sempre mais elevada para a bomba de viscosa em todo o espectro de vazões utilizados nos testes.

**TABELA 1.3 - Dados referentes a experimentos em que se utilizou o equipamento de Tesla para uso automotivo.**

item	ano	potência em CV, (kWatts)	rotação em rpm, (Hz)	vapor, psi, (kPa)	diâmetro dos discos, (mm)	número de discos	espaçamento entre os discos, (mm)	largura do conjunto, (mm)	comentários
1	1906	30, (22,1)	35000 (583,3)		6" (152,4)	8	1/32" (0,79)	1/2" (12,7)	peso do equipamento 10 lb (4,5kg). espaçamento dos discos variou até 1/64". (0,40mm)
2	1910	100 (73,6)	10000 (166,7)		12" (304,8)				
3	1911	110 (81,0)	9000 (150)		9 3/4" (171,5)			2" (50,8)	
4	1911	200 (147,2)	9000 (150)	125, (862)	18" (457,2)				peso do equipamento 400 lb (181,4kg). Taxa de vapor 38 lb/HP/h (6,4 <sup>μ</sup> kg/J). Perda de calor 176,3J
5		200 (147,2)	12000 (200)	80, (552)	18" (457,2)	20			
6		675 496,8)	3600 (60)	80 (552)a bs.	60" (1524)	15	1/8" (3,18)	4" (101,6)	3 lb. Sobreaquecimento no bocal 100°F, (311K). Se a força caísse mais de 80 PSI, (553kPa), deveria ser aumentada a força.
7	1972	15 (11,0)	18000 (300)	180 (1241) ar frio	6" (152,4)	8	1/32" (0,79)	1/2" (12,7)	com espessura de 1/32"(0,79mm) construído por Walter Baumgartner

Em se tratando de geração de energia elétrica encontram-se também alguns exemplos de turbinas trabalhando a 250.000 rpm (4167 Hz) e usando propano líquido como combustível a 2800° F (1811K) (Jacobson) com o número de discos variando entre 10 e 12 possuindo um diâmetro de 1" (25,4 mm) feitos de incoloy 825 gerando uma potência específica de 3 HP/lbm (4,93 kW/kg) e utilizando um compressor de discos de dois estágios e um tanque de propano de 2,6" (66,04 mm) de comprimento. Nesta mesma turbina, foi montado um gerador de dois pólos onde foi obtido 100 Watts de potência elétrica.



**FIGURA 1.5** – Teste de desempenho entre uma bomba viscosa e uma bomba centrífuga.

Mostrando a versatilidade do equipamento tem-se como exemplo as mais de 1000 turbinas de pequeno porte com diâmetros de 5/16" (7,94 mm) trabalhando silenciosamente a 500.000 rpm (8333 Hz) acopladas em brocas dentárias e as turbinas de seis pés de diâmetro operando a 36.000 rpm (600 Hz) produzindo 13.500 HP (10 MW) de potência.

Como desvantagens podemos citar:

- devido as suas pequenas dimensões, os dispositivos trabalham com baixas potências,
- baixo rendimento do equipamento; e
- grande quantidade de perdas de energia no rotor (Rice, 1965);

## **1.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A BANCADA DE TESTES**

Uma bancada projetada para testar turbinas hidráulicas de Tesla deve oferecer condições para monitorar as seguintes variáveis:

- i. Potência fornecida, que será conseguida indiretamente a partir dos valores da pressão e vazão da água;
- ii. Potência mecânica, obtida a partir dos valores do torque e da rotação do eixo de saída.

Geralmente, para a medição de pressão para este tipo de situação, quase estática, usa-se um monômetro de coluna ou de Bordon. Quanto à vazão, esta pode ser medida

de forma econômica, e ainda precisa, usando-se um venturi ou uma placa de orifício, por exemplo. Por outro lado, como a água é praticamente incompressível, também pode-se medir a vazão na saída da turbina de uma forma ainda mais simples. Neste caso, pode-se fazer uma medida indireta da vazão medindo-se o tempo que esta demora para encher um tanque com volume pré-determinado.

A medição da rotação do eixo de saída da turbina é conseguida prontamente usando-se um tacômetro, que pode ser mecânico ou eletrônico (estroboscópico). Para a medição do torque, no entanto, tem-se uma situação mais complicada. Há duas maneiras geralmente usadas para medi-lo, as quais são as seguintes:

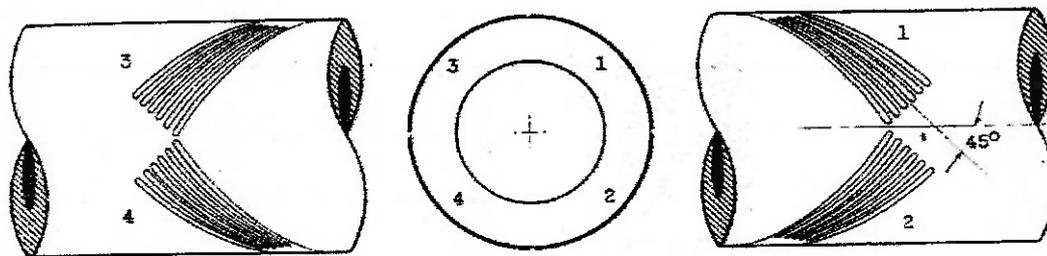
(1) A maneira mais comum é dada pelo uso do freio de Prony, em que o torque fornecido pela turbina é medido indiretamente através do torque necessário para manter a carcaça do freio estacionária. Esse torque de reação é facilmente medido por um dinamômetro simples que impede a carcaça de girar. Porém, se é desejado medir o atrito interno da turbina (perda mecânica), o sistema pode ser revertido de forma a acionar a turbina. Para isso, costuma-se trocar o simples freio por um moto-gerador elétrico que, em alguns arranjos, também pode ser usado como o freio. Nesse caso, o motor "absorve" a energia da turbina e, agindo como um gerador elétrico, transforma a energia mecânica em energia elétrica. A carcaça desse motor precisa ser montada entre mancais de baixíssimo atrito para não influenciar em demasia a medição do torque de reação necessário para manter essa carcaça parada.

(2) A outra maneira de medir o torque da saída da turbina é medir diretamente o torque que está sendo transmitido pelo eixo que liga a turbina ao freio absorvedor de potência. Tal é o caso do presente trabalho, onde extensômetros elétricos foram

utilizados. No entanto, a situação é mais complexa, pois há a necessidade de se transmitir o valor do torque para um medidor estacionário, como será visto adiante.

Quando do estudo de máquinas de baixa eficiência e desempenho, torna-se importante realizar medições com a máxima precisão possível. No caso de se estudar o comportamento de compressores e turbinas, onde tem-se um eixo rotativo, a técnica mais amplamente difundida, é a que utiliza extensômetros elétricos, dispostos em ponte de Wheatstone. O princípio de operação neste caso, é a proporcionalidade existente entre o torque aplicado a um eixo e a deformação elástica na superfície externa desse eixo. A disposição dos extensômetros conectados em ponte pode ser vista na Figura 1.6, onde quatro extensômetros são colados ao eixo de torção formando ângulos de  $45^\circ$  com a direção axial.

Quando o torque é aplicado à seção de teste, um par de extensômetros (resistências opostas na ponte) detecta a máxima deformação positiva (tração), enquanto o outro par assinala a máxima deformação negativa (compressão). É importante salientar que o circuito da ponte é sensível somente às solicitações torcionais, e quase insensível às axiais e de flexão. Efeitos de elevação de temperatura nas resistências dos extensômetros também são totalmente compensados, graças a configuração em ponte.

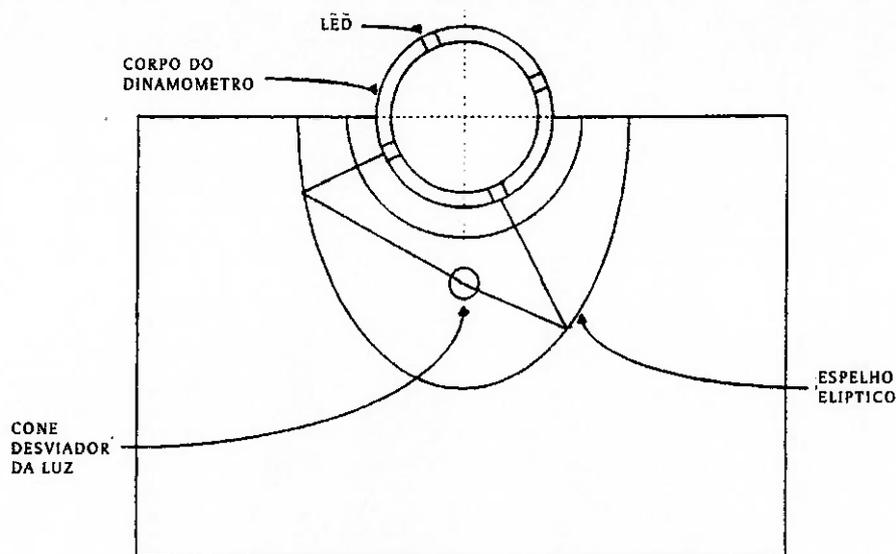


**FIGURA 1.6** – Disposição dos extensômetros no eixo.

Com relação à transmissão do sinal do eixo rotativo para o receptor estacionário, existem algumas alternativas normalmente utilizadas, dentre elas destacam-se (1) o uso de anéis metálicos e escovas, (2) transformadores rotativos e (3) rádio telemetria. Como desvantagens dessas possibilidades, pode-se citar o fato de que o sistema de anéis e escovas apresenta alguns problemas para compensar a variação da resistência de contato entre escovas e anéis, além de transmitirem muitos ruídos pelos sinais elétricos. Outra desvantagem é que os transformadores rotativos montados sobre os eixos são de difícil construção e interferem na variação de torque dinâmico, bem como na transmissão do campo magnético. Por último, pode-se dizer que os transmissores de rádio telemetria em FM sofrem também interferência de ruídos elétricos externos.

Um novo sistema de transmissão foi implementado com sucesso na medição de esforços de usinagem (Vinícius, 1998). Este tem como características o fato do sinal ser codificado através da modulação da frequência de um oscilador, possuindo a vantagem de ser imune às interferências e ruídos. Outra característica é que os sinais gerados pelo oscilador são transformados em sinais ópticos por meio de diodos emissores de luz (led's), fixados na periferia do eixo (Ponge, 1985).

Os sinais luminosos gerados pelos led's que giram solidários com o eixo, são captados por um disco de acrílico estacionário, em forma de elipse, com borda espelhada, a qual reflete os raios luminosos para seu foco geométrico, onde é instalado o transdutor que converte o sinal óptico em elétrico. Faz-se necessário esclarecer que o centro do eixo citado acima deve ficar posicionado no outro foco da elipse, como mostrado na Figura 1.7.



**FIGURA 1.7** – Princípio de funcionamento do acoplamento óptico.

#### **1.4 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO E ROTEIRO**

O objetivo deste trabalho é o projeto, construção e verificação de um sistema para o ensaio de turbinas Tesla. Este sistema ( ou bancada de teste) deve permitir a fácil troca de turbinas a ser ensaiadas e o levantamento da sua eficiência além do torque e velocidade que poderá fornecer.

Estima-se que o tamanho da turbina a ser testada não deva ultrapassar os seguintes valores: potência de 1,5 kW, torque de 8 Nm, rotação de 5000 rpm, pressão de 0,6 MPa e vazão de 10 l/s.

Para verificar se a bancada funciona adequadamente, uma turbina de Tesla representativa, de tamanho e forma semelhante às que serão ensaiadas, foi projetada e construída. Essa turbina não só serviu para testar se a bancada funcionou

adequadamente, mas também foi utilizada para estabelecer o procedimento experimental para a coleta de dados.

No capítulo seguinte, o projeto da bancada de teste será descrito com ênfase especial ao projeto e construção do dinamômetro e da turbina representativa. No Capítulo 3, o procedimento experimental da coleta de dados será explicado. O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios e o capítulo final concluirá este trabalho com recomendações sobre possíveis melhoras que poderão ser feitas no futuro.

## CAPÍTULO II

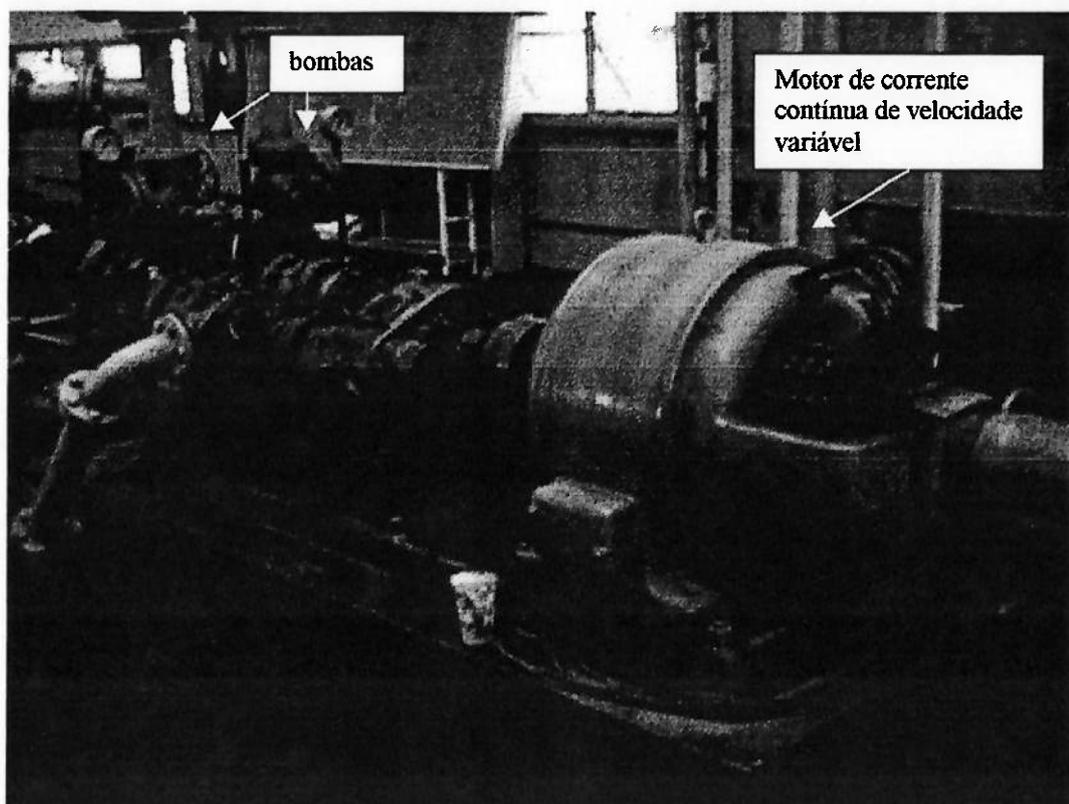
### PROJETO E CONSTRUÇÃO DA BANCADA DE TESTES

Como foi visto no Capítulo I, há a necessidade de um sistema que forneça água a altas pressões com vazão adequada. Muito afortunadamente, no departamento de engenharia mecânica da EPUSP, foi construído um laboratório de hidráulica em 1916 que podia ensaiar turbinas Pelton, as quais requerem altas pressões e vazões moderadas. Este equipamento possuía todas as características necessárias para que pudesse ser utilizado nos ensaios da turbina de Tesla e ainda funciona bem depois de tantos anos. Segue-se abaixo, uma descrição deste equipamento, que será aproveitado bem como de todos os componentes da bancada de testes.

#### 2.1 DESCRIÇÃO GERAL DO EQUIPAMENTO

O fornecimento de água para o equipamento é feito por meio de um circuito composto de duas bombas de engrenagens sendo que cada uma pode fornecer uma vazão máxima de 12 l/s e pressão máxima de saída da água de  $1,025 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$  (10,116 atm) acopladas a um motor de corrente contínua, que oferece a possibilidade de variar sua rotação. Pode-se ter uma idéia mais exata do conjunto observando-se a Figura 2.1.

As duas bombas estão ligadas entre si por meio de tubos, de tal maneira que possibilitem que estas sejam usadas em série ou em paralelo, o que possibilita o uso do equipamento em situações muito diferentes. No caso em questão, as referidas bombas foram usadas em série devido à necessidade de se ter uma pressão que fosse o dobro daquela que cada bomba poderia oferecer isoladamente. Quanto à vazão, era suficiente o quanto cada uma oferecia.

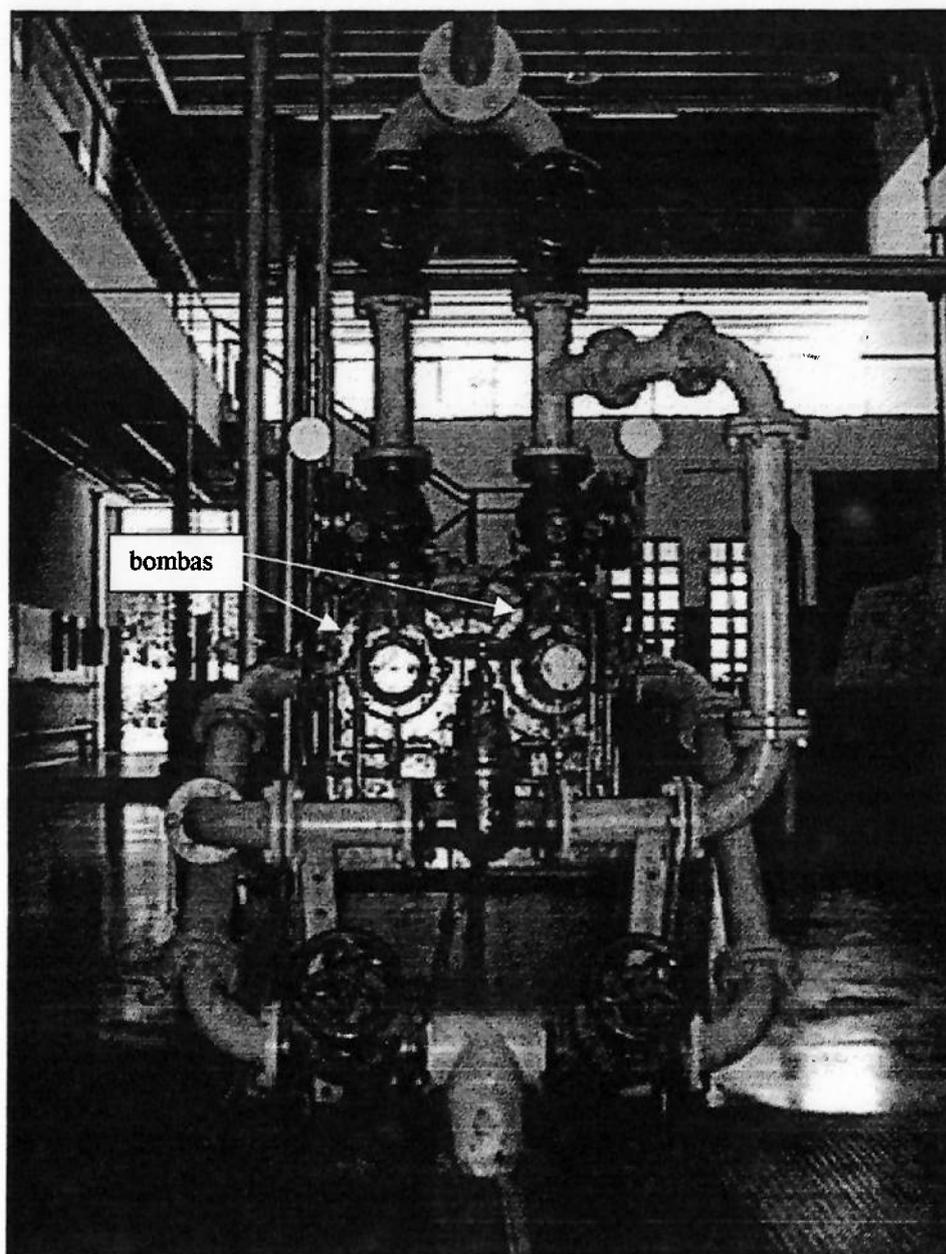


**FIGURA 2.1** – Vista geral do conjunto de bombas e do motor de corrente contínua.

A Figura 2.2, mostra os tubos que entram e saem das bombas com os registros que a eles estão ligados e que permitem as mudanças nas ligações entre as bombas.

A água, então, sai de um grande reservatório que fica no subsolo, entra no circuito de tubos, passa pelas bombas e sai do circuito indo diretamente para um vaso de pressão situado na seqüência das bombas. Este, por sua vez, está em condições de suportar uma pressão de até  $2,03 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$  (20 atmosferas).

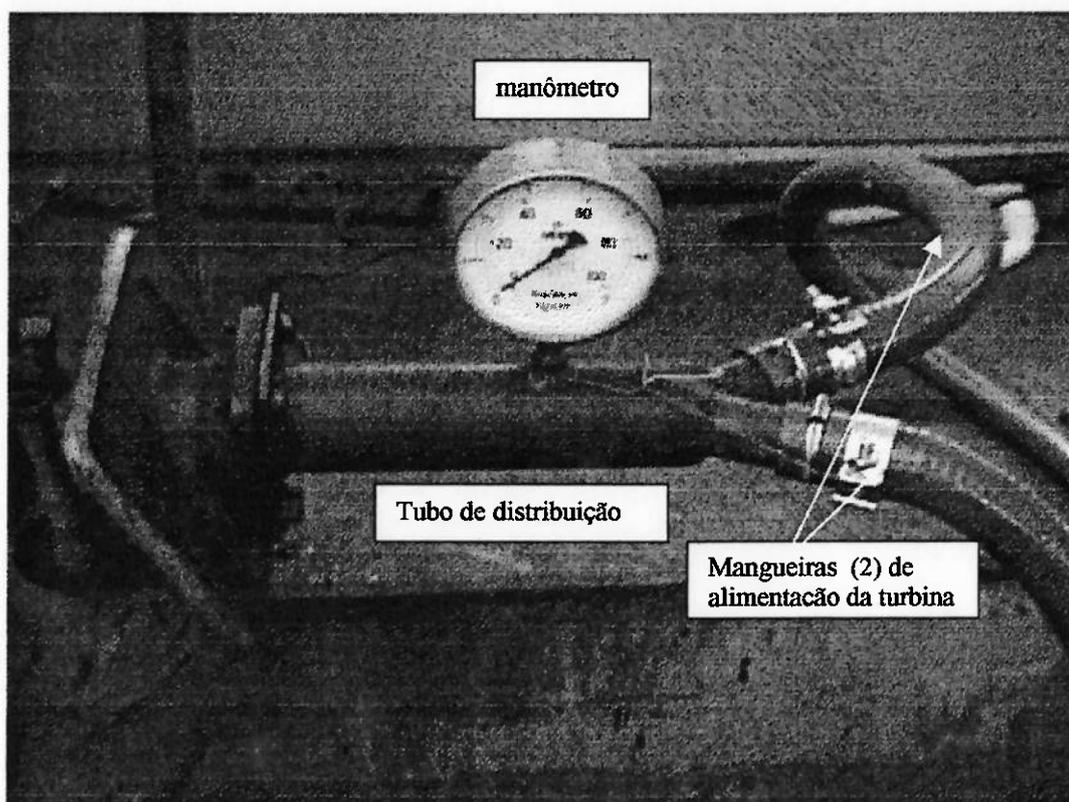
Saindo do vaso de pressão a água vai ao tubo de distribuição, o qual pode ser observado na Figura 2.3, onde além de servir como suporte para o manômetro que foi usado para medir a pressão de entrada na turbina, serviu também para que a água fosse



**FIGURA 2.2** – Circuito de ligações dos tubos e registros.

distribuída igualmente para os dois bocais de entrada da turbina. O manômetro mencionado era analógico e possuía fundo de escada de  $7,09 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$  (7 atmosferas).

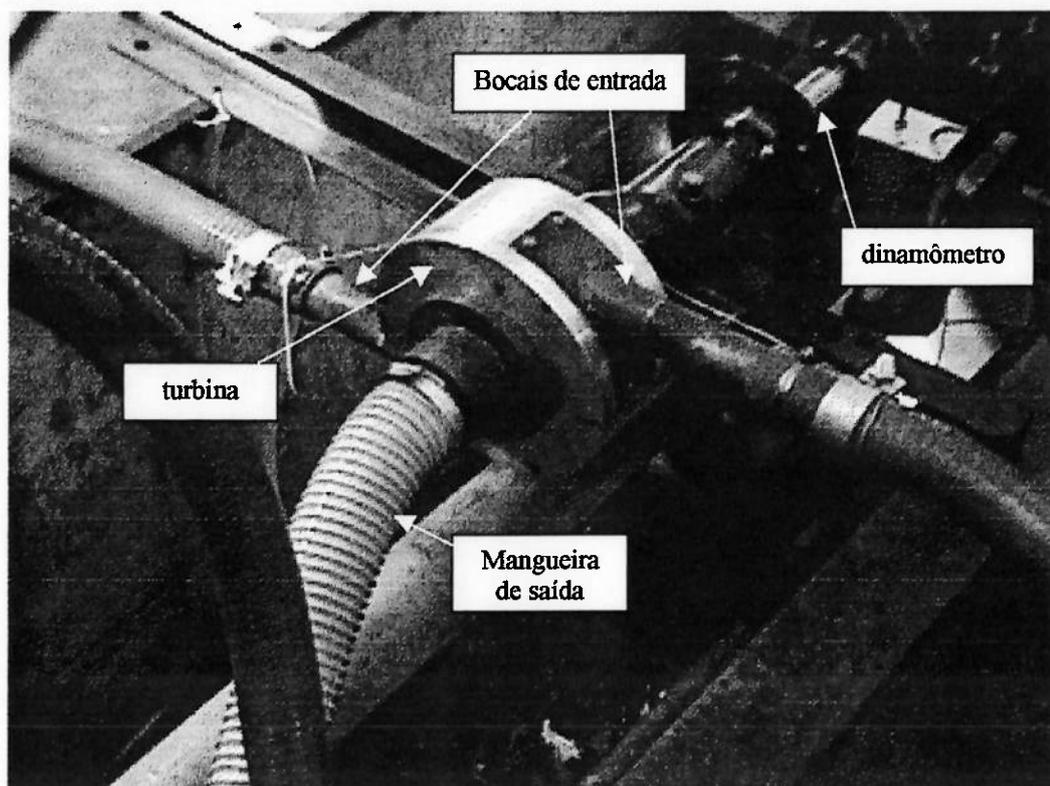
A ligação do tubo de distribuição à turbina foi feita através de mangueiras plásticas preparados para suportar altas pressões. Passando pelos tubos citados acima,



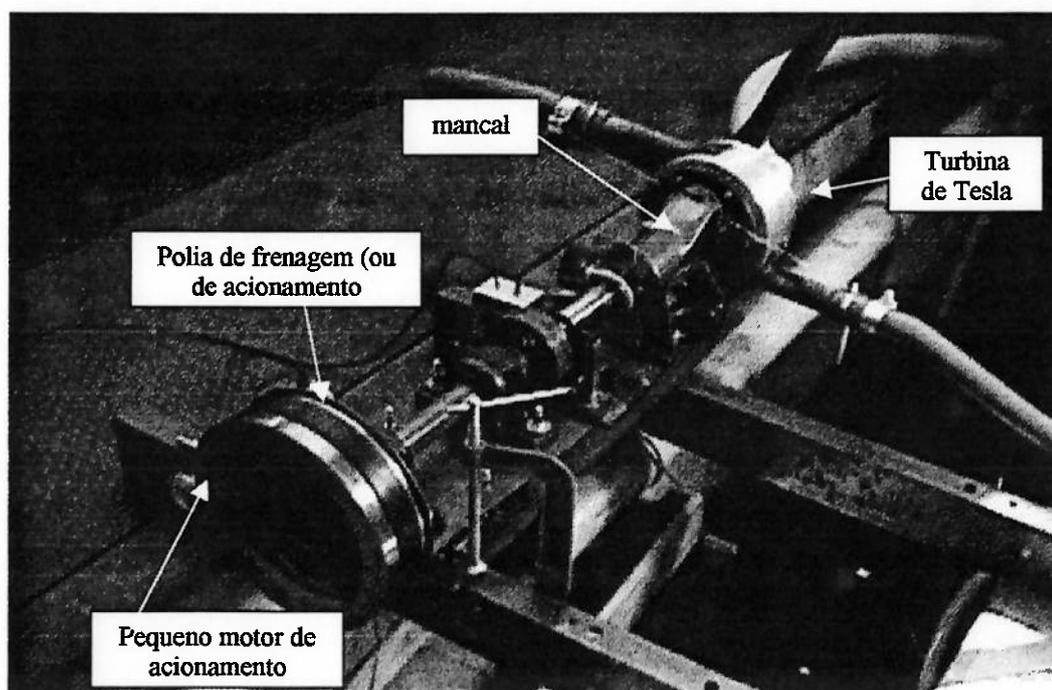
**FIGURA 2.3** – Ilustração mostrando o tubo de distribuição, manômetro e mangueiras plásticas.

finalmente, a água chega aos bocais de entrada da turbina, como pode-se observar na Figura 2.4. Bocais estes, que estão presos à carcaça em posição diametralmente oposta um do outro.

Após a passagem da água pela turbina, esta vai, através de um tubo flexível para o escape. A água é jogada, então, em um reservatório que estava sobre uma balança. Este reservatório tem a capacidade de acomodar 144kg de água sendo este esvaziado a cada nova medição de vazão, através de um registro que libera a água para que esta volte para o reservatório subterrâneo.



**FIGURA 2.4** – Vista geral da turbina com os bocais de entrada.



**FIGURA 2.5** – Vista geral da bancada de testes.

O eixo do rotor da turbina está fixo no eixo de um mancal (de cor azul), que esta ligado ao dinamômetro que por sua vez está ligado ao freio, todos estes componentes, que serão detalhados a seguir, são mostrados na Figura 2.5.

Quando do funcionamento do equipamento, notou-se que havia um aquecimento excessivo no mancal da turbina. Para que este problema não afetasse as medições, foi feito o isolamento deste do resto do equipamento. Tal isolamento foi conseguido colocando-se um disco de celeron e um metálico entre o acoplamento que une o eixo do mancal ao dinamômetro para que o eventual calor gerado no mancal ficasse isolado não causando o comprometimento das medições.

O dinamômetro é preso através de dois acoplamentos, um fixo e outro móvel, que permite regulagem para que este possa ficar o mais concêntrico possível com os eixos que estão em suas extremidades. Uma descrição detalhada do deste será feita no item abaixo. Na outra extremidade do equipamento, tem-se um disco de atrito semelhante ao de um freio de Prony, como foi indicado na Figura 2.5.

## **2.2 DETALHAMENTO GEOMÉTRICO E DE FUNCIONAMENTO DA TURBINA DE TESLA**

O detalhamento da turbina será feito com a ajuda do desenho de conjunto (Vide Apêndice) e os respectivos desenhos representando cada uma das peças que serão apresentados a seguir.

A entrada da água na turbina é feita através de dois bocais, indicados pelo item 5 do desenho de conjunto da turbina. Optou-se por usar duas entradas de água, para que

os esforços desbalanceados no eixo do mancal que suporta o rotor fossem minimizados, evitando assim, a necessidade de se ter estruturas robustas. Tais bocais, possuem inclinação de  $75^\circ$  com relação à reta normal e seção de entrada na carcaça com formato retangular de 30 mm de comprimento e 13,4 mm de largura. Este ângulo de entrada e a área de sua seção são de fundamental importância, determinando o tempo que a água permanece no interior da turbina. Dentro desta, a água percorre uma trajetória espiral por entre os discos, e os arrasta, devido ao atrito viscoso, produzindo o torque que movimentava o eixo do rotor.

A carcaça, indicada pelo item número 1 dos desenhos do Apêndice, construída totalmente em alumínio, abriga um rotor composto de dois discos guia, representados pelos item 6 e 7, também feitos em alumínio, com aproximadamente 15mm de espessura, que servem de suporte para vinte discos feitos a partir de chapas de aço inoxidável de 1mm de espessura, item 9. Para que estes discos ficassem fixos na posição correta, foram usados 3 pinos guia também feitos em aço inoxidável, item 8. É importante salientar que a distância entre os discos foi mantida em 0,4 mm por meio de arruelas de latão calibradas que foram prensadas entre os discos e posicionadas pelos pinos guia citados acima. A razão da escolha desta distância entre os discos foi o fato de era necessário fazer o balanceamento entre a facilidade de construção e a máxima proximidade entre os discos. É imprescindível salientar que outra variável muito importante no momento de se dimensionar uma turbina viscosa, é a distância entre os discos, mencionados acima, pois quanto menor esta distância, maior o rendimento do equipamento (Rice, 1965).

Um detalhe que deve ser salientado, é o fato dos discos guia serem mantidos afastados da carcaça em 3 mm, para que se possa evitar que os efeitos viscosos interfiram no funcionamento da turbina.

## **2.3 DESCRIÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO DINAMÔMETRO**

### **2.3.1 DESCRIÇÃO DO DINAMÔMETRO**

O dinamômetro consiste basicamente de um eixo usinado em aço carbono possuindo um alojamento em seu interior. Tal alojamento destina-se a abrigar os componentes eletrônicos do circuito que faz a conversão do torque mecânico em sinal elétrico. Além disto, o eixo com formato tubular, ou seja, com paredes finas, fez com que o circuito tivesse condições de fazer medir a torção produzida pela turbina de forma mais sensível e precisa pois a deformação do eixo é relativamente maior (Albuquerque, 1998).

Durante o funcionamento do dinamômetro, este sofre tensões que são captadas por meio de quatro extensômetros que foram afixados no eixo. O sinal que vem destes é amplificado e, depois de passa por um oscilador (isto é, um VCO), produzindo uma frequência, que por sua vez, controla a taxa de acendimento de quatro led's que giram solidários ao eixo, Figura 2.6 e Figura 2.7..

Estes sinais luminosos são captados por um disco de acrílico estacionário, em forma de elipse, com borda espelhada, que reflete os raios luminosos dos led's para seu foco geométrico, onde é instalado o transdutor que converte o sinal óptico em elétrico. Faz-se necessário esclarecer que o eixo citado acima deva ficar posicionado no outro foco da elipse, como mostrado na Figura 1.7.

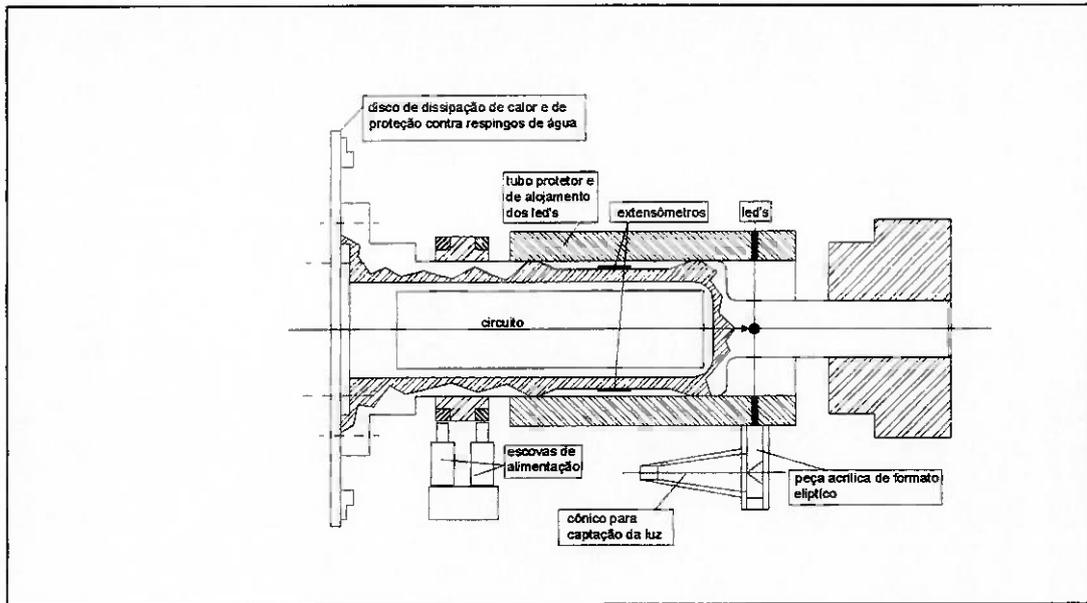


FIGURA 2.6 – Diagrama esquemático do dinamômetro.

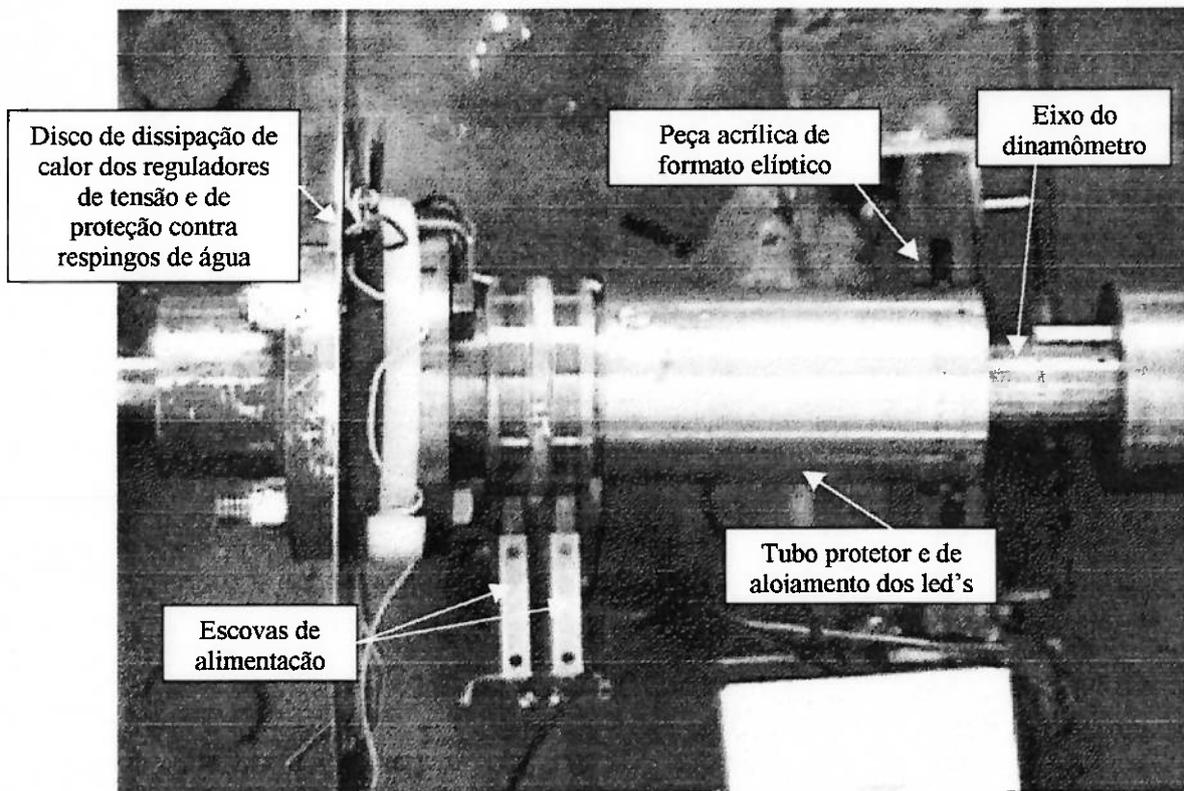


FIGURA 2.7 – Fotografia do dinamômetro.

O sinal luminoso que sai dos led's é mandado para uma peça acrílica, estacionária, espelhada com formato elíptico que tem por finalidade encaminhar a luz para um fotoreceptor. Deste, o sinal vai para o circuito receptor estacionário, para que seja amplificado. A partir deste ponto o sinal está pronto para ser usado nas medições do frequencímetro, e do osciloscópio(Albuquerque, 1998).

### **2.3.2 PROJETO E SIMPLIFICAÇÃO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DA PARTE ROTATIVA**

O circuito eletrônico da parte rotativa (emissor), foi concebido, conforme proposta inicial, introduzindo-se modificações naquele desenvolvido por Cunha (1998).

Chegou-se a configuração do circuito eletrônico apresentado na Figura 2.8. Nessa figura pode-se identificar-se os blocos que realizam as seguintes funções básicas:

- alimentação;
- elementos sensores e de balanceamento;
- amplificação e filtragem do sinal;
- modulação em frequência; e
- transmissão (acendimento dos led's).

A tabela 2.1 fornece os valores dos resistores e capacitores utilizados no circuito eletrônico da Figura 2.8.

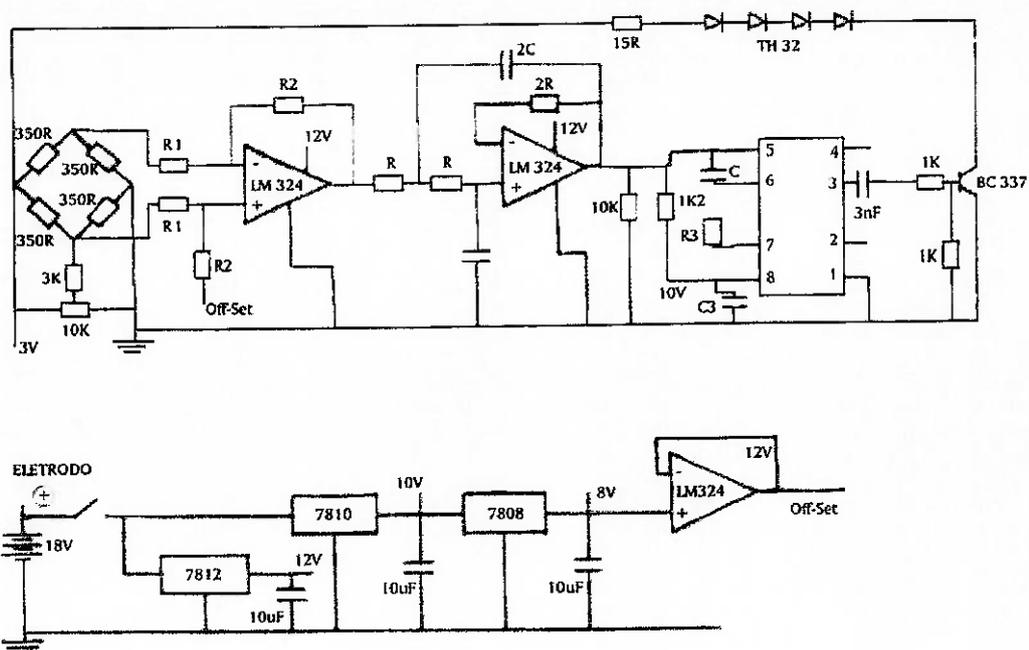


FIGURA 2.8 –Circuito da parte rotativa.

TABELA 2.1 – Valores dos componentes do circuito da Figura 2.8.

Resistor/ capacitor	valor
$R_1$	120 $\Omega$
$R_2$	12 k $\Omega$
R	150 k $\Omega$
C	56 nF
2R	300 k $\Omega$
2C	120 nF
$R_3$	10 k $\Omega$
$C_3$	10 nF

Para o funcionamento do circuito, é necessário uma voltagem de 18 V, que foi fornecida por uma fonte de corrente contínua. Esta energia foi transmitida ao eixo por um sistema de duas escovas que entravam em contato com dois anéis de cobre de onde saem os fios que vão até o circuito.

Utilizaram-se três circuitos integrados reguladores de tensão: 7808, 7810 e 7812. Com o regulador 7808 alimentou-se a ponte com 8 V, e, aplicando-se extensômetros elétricos de  $350 \Omega$ , como pode-se observar na Figura 2.8, obteve-se um valor de corrente dentro da faixa usual: de 20 a 25 mA. Vale lembrar que devido à extrema sensibilidade dos extensômetros, recomenda-se o uso de baixos valores de tensão. Também utilizou-se 8 V como tensão de “off-set” conforme será tratado mais a diante.

O regulador 7810 fornece 10 V para alimentação do VCO que funciona estavelmente a partir de 9 V. Ainda o regulador 7810 alimenta o 7808 por ser a máxima tensão de entrada desse último igual a 14V.

Por fim, com o regulador 7812, alimentou-se o amplificador operacional (LM324). O uso de 12 V evita a saturação do amplificador operacional quando montado na configuração apresentada.

Os extensômetros foram instalados na região com menor espessura de parede do corpo do dinamômetro afim de se obter maior sensibilidade. Tal superfície foi lixada com o cuidado de que não fossem deixados riscos que concentrar tensões e, posteriormente, a superfície sofreu um processo de desengranchamento com dissolvente químico (tricloretoetileno). Após a colagem dos extensômetros no eixo, os mesmos foram revestidos com uma cola a base de epoxi para que tivessem proteção contra umidade. Um tubo metálico foi colocado sobre a região dos sensores com a finalidade de garantir a integridade física destes.

A ponte de Wheatstone conta com um “trimpot” para balanceamento. O “trimpot” utilizado foi o de 10 k $\Omega$  para se alcançar boa precisão. Além disso, um resistor de 3 k $\Omega$  funciona como um limitador de corrente. Fez-se a amplificação do sinal dos extensômetros utilizando-se um amplificador operacional na configuração diferencial com realimentação negativa e um filtro passa baixa foi dimensionado com frequência de corte ( $f_c$ ) em torno de 13 kHz.

Utilizou-se um “off-set” de 8 V para que o amplificador, quando não houvesse torque aplicado, fornecesse uma saída diferente de zero, satisfazendo a condição de tensão de controle ( $V_c$ ) do VCO (modulador em frequência):  $3/4 V^+ \leq V_c \leq V^+$  ( $V^+ = 10V$ , tensão de alimentação do VCO). A realimentação negativa tem a finalidade de garantir a estabilidade da tensão de 8 V.

Para a estimativa da amplificação necessária foram feitos os seguintes cálculos preliminares abaixo, realizados a partir dos dados obtidos na literatura. :

a) Potência da turbina (N): 1000 W

b) Rotação mínima (n): 30 rpm

( esta seria uma condição crítica estimada próxima da frenagem do equipamento.)

c) Momento torsor máximo (T):  $T = 71620 \text{ N/n}$

onde: [T] = kgf.cm

[N] = CV

[n] = rpm

$T = 3246,77 \text{ kgf.cm}$

$T = 32467,7 \text{ kgf.mm}$

d) Deformação relativa do eixo ( $\varepsilon$ ):

. módulo de elasticidade transversal do material do eixo (G):  $8 \cdot 10^3 \text{ kgf/mm}^2$

. raio externo do eixo na região de instalação do sensor (Ro): 16,5 mm

. raio interno do eixo (Ri): 14,5 mm

$$\varepsilon = \frac{T \cdot R_o}{\pi \cdot G \cdot (R_o^4 - R_i^4)}$$

$$\varepsilon = 7,12 \cdot 10^{-4}$$

e) Variação da tensão da ponte de extensômetros ( $\Delta V$ ):

. tensão de alimentação da ponte (Vp): 8 V

. fator dos extensômetros utilizados (F): 2,12

Da ponte dos extensômetros, temos que:

$$\frac{\Delta V}{V_p} = \frac{\Delta R}{R}$$

onde  $\Delta R$  = variação da resistência

Na faixa linear a deformação relativa,  $\varepsilon$ , está associada com a variação da resistência elétrica por meio de:

$$\varepsilon = \frac{1}{F} \frac{\Delta R}{R}$$

onde F é especificado pelo fabricante do extensômetro

Assim, a variação da tensão da ponte pode ser calculada por:

$$\Delta V = V_p \cdot F \cdot \varepsilon$$

$$\Delta V = 12 \text{ mV}$$

f) Variação da tensão de controle de VCO ( $\Delta V_c$ ):

Tensão de controle do VCO para a situação de torque zero, que é a tensão de “off-set” colocada no amplificador: 8 V

A frequência produzida pelo VCO, segundo o fabricante, é proporcional à diferença entre a tensão de alimentação e a tensão de controle:

$$f_o = K \cdot (V^+ - V_c)$$

Utilizando 3000 Hz como frequência de torque zero, adotando-se 6600 Hz como frequência para a situação de torque máximo calculado (T), o que representa uma variação de 120%. Para gerar esta variação, deve ocorrer uma variação de 1,2 V na tensão de controle, portanto:

$$\Delta V_c = 1,2 \text{ V}$$

g) Ganho do amplificador (GA):

O ganho do amplificador pode ser obtido por:

$$GA = \frac{\Delta V_c}{\Delta V}$$

$$GA = 100$$

h) Resistências de ganho ( $R_1$  e  $R_2$ ):

Para um simples amplificador diferencial, a resistência de ganho é dada por:

$$GA = R_2/R_1 \tag{2.2.2.1}$$

$$R_1 = 120 \Omega$$

$$R_2 = 12 \text{ k}\Omega$$

OBS.: Utilizou-se os dois resistores  $R_1$  e dois resistores  $R_2$  com valores o mais próximo o possível para equalizar com uma boa precisão os resistores de um amplificador na configuração diferencial, para garantir a rejeição de ruído no modo comum. Tal seleção

foi feita pelo teste com multímetro de diversos resistores de mesmo valor, escolhendo-se dois idênticos.

i) Dimensionamento do filtro passa baixa:

Utilizou-se um filtro Butterworth de 40 db/década com frequência de corte:  $F_c = 13$  Hz (assumido).

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot \pi$$

para o cálculo de R.C:

$$R \cdot C = \frac{0,707}{\omega_c}$$

resultando  $R = 150$  k $\Omega$

$$C = 56$$
 nF

OBS.: Também aqui o valor dos resistores deve ser o mais próximo possível, não sendo necessária tanta precisão com relação aos capacitores. O filtro possui ainda um resistor e um capacitor de valores:

$$2 \cdot R = 300$$
 k $\Omega$

$$2 \cdot C = 120$$
 nF

O VCO recebe o sinal vindo do amplificador e gera uma frequência modulada para este sinal. Um resistor ( $R_3$ ) e um capacitor ( $C_3$ ) são responsáveis pela escolha da faixa de frequência que será gerada pelo VCO conforme a equação (2.2.2.1). Por indicação do fabricante instalou-se dois resistores (10 k $\Omega$  e 12 k $\Omega$ ) e um pequeno capacitor (1 nF) que, segundo manual, ajuda a gerar um sinal mais estável.

j) Cálculo de  $R_3$  e  $C_3$ :

$$f_o = \frac{2 \cdot [V^+ - V_c]}{R_3 \cdot C_3 \cdot V^+}$$

Constatou-se que a equação anterior não é muito precisa, obtendo-se uma frequência ( $f_o$ ) um pouco diferente da calculada. O manual do fabricante indica a seguinte faixa para  $R_3$ :  $2 \text{ k}\Omega < R_3 < 20 \text{ k}\Omega$

Desta forma:  $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$

$C_3 = 10 \text{ nF}$

A saída do VCO é um sinal em onda quadrada de grande amplitude. Porém, para aumentar a potência, utilizou-se um transistor (BC 337) para acendimento dos led's, em número de quatro. Um capacitor (3 nF) na saída do VCO tem a função de isolar o nível DC.

Um divisor resistivo (1 k $\Omega$ ) foi necessário para a polarização do transistor. Colocou-se um resistor de 15  $\Omega$  em série com os led's afim de se conseguir um acendimento com corrente próxima da máxima bem como o apagamento total dos led's. Desta forma se obteve o sinal mais forte possível, garantindo-se a conexão óptica.

### 2.3.3 CIRCUITO RECEPTOR

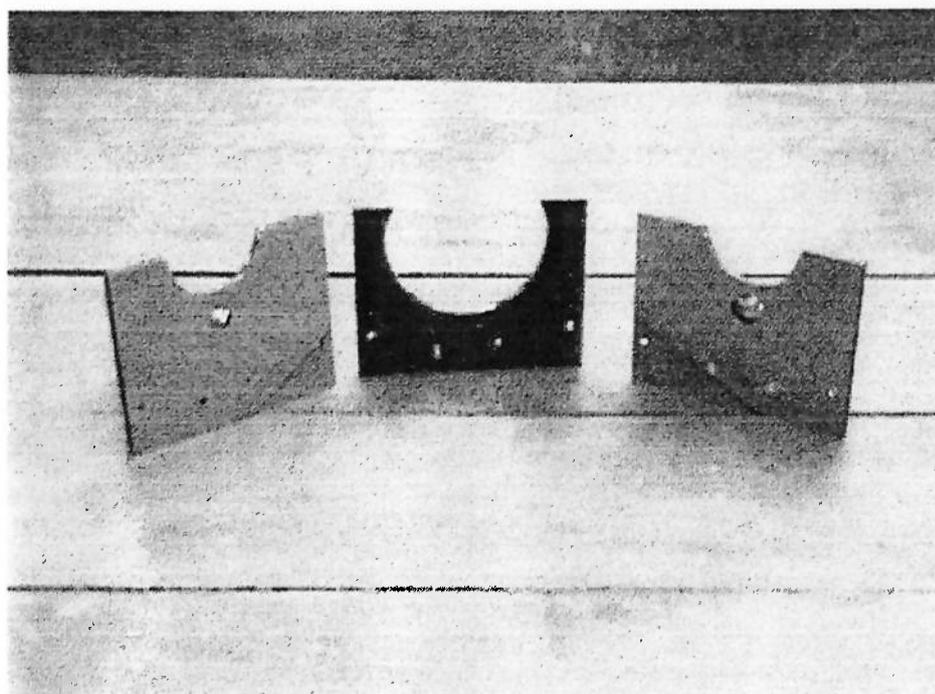
Como exposto no item anterior, os led's mandam seus sinais na direção radial ao eixo para que sejam coletados. Optou-se por fazer tal coleta com a ajuda de um captador de formato elíptico segundo o modelo adotado por Cunha (1998). Um espelho elíptico tem a propriedade de desviar a luz vinda na direção radial de um de seus focos, para o outro foco. Os quatro led's da parte rotativa, instalados na periferia do corpo do dinamômetro, estão defasados de 90° e têm acendimento simultâneo. Assim, o eixo do dinamômetro foi posicionado de tal maneira que coincidissem com um dos focos da elipse

de modo que a luz emitida pelos led's fosse desviada para o outro foco, como ilustrado na Figura 1.7.

Confeccionou-se, então, o captador elíptico em acrílico assim como o de Cunha (1998), porem, fez-se uma alteração de projeto objetivando a melhoria da captação.

Cunha (1998) utilizou-se uma só chapa de acrílico maciço, com formato elíptico, aproveitando o fenômeno da reflexão total dentro do captador. No presente trabalho, foi feito exatamente o contrário, pois após a usinagem da peça em acrílico, esta foi revestida com papel aluminizado para que a luz fosse refletida por reflexão simples.

A Figura 2.9 mostra como foram feitas as peças que compõe o captador elíptico. A primeira e a terceira peça, mostram em sua parte superior um formato semi circular para que o eixo do dinamômetro possa ser posicionado, posição esta, do primeiro foco da elipse. A diferença entre estas é um furo existente na primeira onde fica o segundo foco geométrico da elipse usinada na peça de acrílico. É na peça que se encontra entre as suas citadas anteriormente, que está o refletor elíptico com distância focal de 40mm.

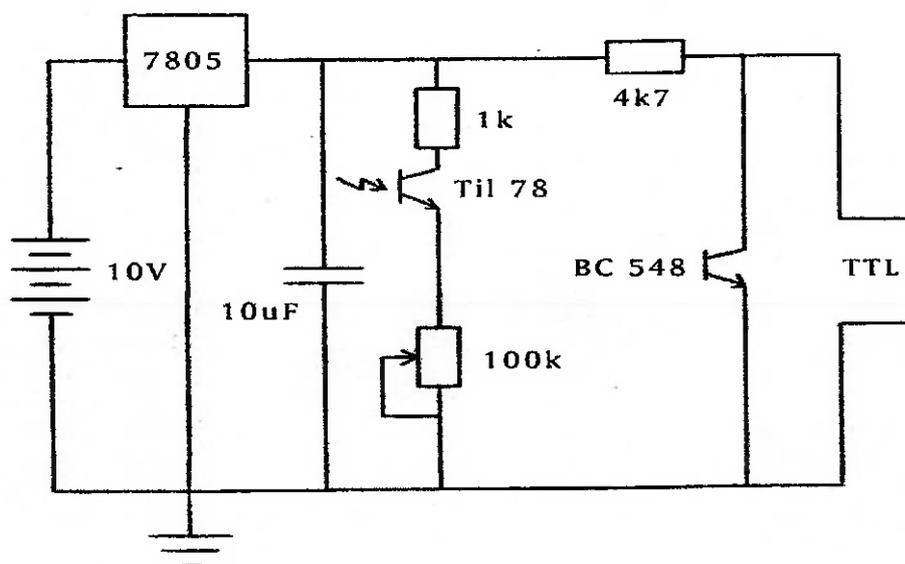


**FIGURA 2.9** – Peças componentes do captador elíptico.

Para que a luz fosse desviada de  $90^\circ$  quando chegasse na posição do segundo foco, foi usado um desviador, fabricado em aço inoxidável, com formato cônico cilíndrico maciço com inclinação de  $45^\circ$  e perfeitamente polido, onde pode ser visto no centro da peça da esquerda na figura anterior. Após a passagem da luz por este primeiro cone, ela vai direto a um captador também em formato coneiforme, desta vez, oco e feito em latão e devidamente polido, apresentado no centro da peça da direita. No vértice deste cone está instalado o fotoreceptor óptico que capta o sinal luminoso que vem dos led's.

É interessante salientar que o captador elíptico, foi feito de maneira tal, que este está sempre recebendo sinal de pelo menos dois led's, garantindo assim, uma recepção constante, independentemente da rotação do dinamômetro.

O circuito receptor, estacionário, é responsável por detectar o sinal dos led's da parte girante e amplificá-lo. Um esquema deste circuito é mostrado na Figura 2.10. O sinal é amplificado para se obter um padrão compatível com o frequencímetro utilizado para a leitura.



**FIGURA 2.10** – Esquema ilustrando o circuito do receptor.

Adotou-se um circuito semelhante ao utilizado por Cunha (1998), que explica o seu funcionamento dizendo que a amplificação neste circuito funciona, inicialmente, admitindo que o fototransistor não está recebendo sinal. Nesta situação não passa corrente por este elemento, fazendo com que também não circule corrente pela base do transistor de amplificação e nem pelo resistor de  $4,7\text{ k}\Omega$  que está ligado em  $5,0\text{ V}$ . Não havendo corrente neste resistor, não há queda de tensão, gerando  $5,0\text{ V}$  na saída do circuito, conectada a porta paralela do computador.

Quando o fototransistor passa a receber um sinal, uma pequena corrente circula por ele, fazendo, devido ao “trimpot” de  $10\text{ k}\Omega$ , a tensão subir na base do transistor de amplificação, saturando-o. Com a saturação deste elemento, a corrente que circula no resistor de  $4,7\text{ k}\Omega$  gera uma grande queda de tensão, fazendo a tensão na saída do circuito cair a valores próximos a zero.

O presente circuito diferencia-se do circuito utilizado por Cunha, apenas pelo acréscimo do resistor de  $1\text{ k}\Omega$  posicionado antes do fototransistor, com a finalidade de se evitar um curto circuito no caso da posição de fim de curso do potenciômetro, e pela substituição do potenciômetro de  $10\text{ k}\Omega$  por um de  $100\text{ k}\Omega$ , objetivando-se maior precisão.

### **2.3.4 DIMENSIONAMENTO DO CORPO DO DINAMÔMETRO**

Sabe-se, da resistência dos materiais, que em um elemento  $a$  de uma barra circular, submetida apenas a torção, possui tensão que aparece é de natureza cisalhante ( $\tau$ ), caso as faces desse elemento sejam paralelas ou perpendiculares ao eixo da barra, Figura 2.11.

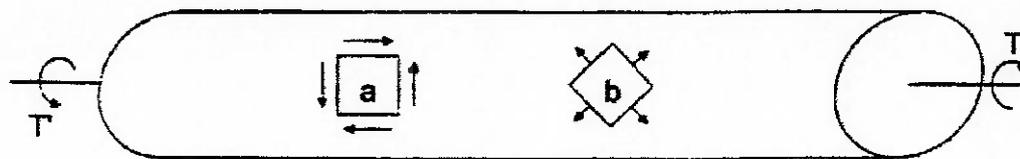


Figura 2.11 – Elementos em barra circular.

Teremos, portanto, a seguinte equação de tensão de cisalhamento máximo em a:

$$\tau_{\max} = \frac{T \cdot y}{J}$$

onde: T = momento torsor

y = distância da linha neutra à linha considerada

J = momento de inércia polar da seção transversal em relação ao seu centro

Porém, ao considerar-se um elemento b formando  $45^\circ$  com o eixo da barra, teremos tensões de tração e compressão que são resultantes de F, conforme análise dos dois triângulos elementares mostrados na Figura 2.12, abaixo.

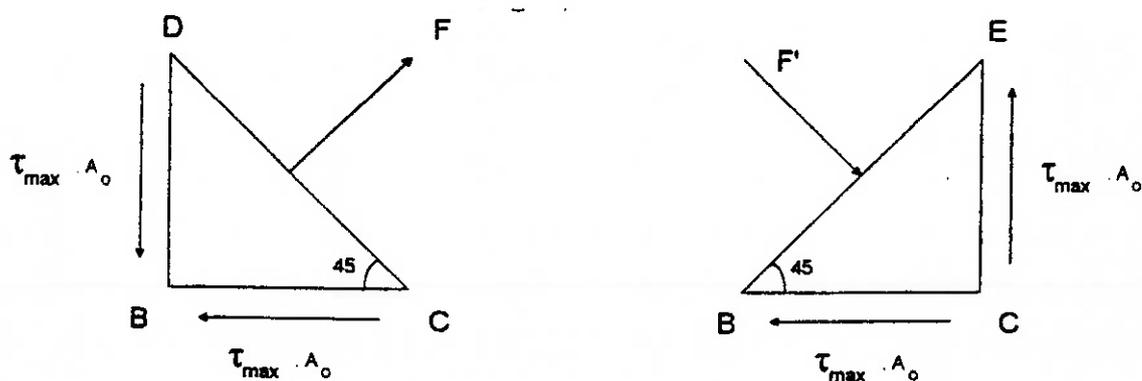


FIGURA 2.12 – Esquema dos triângulos elementares de tensões.

Sabe-se que o esforço cortante interno provocado pelas tensões cisalhantes ( $\tau_{m\acute{a}x}$ ) nas faces BC e BD, tem intensidade  $\tau_{m\acute{a}x} \cdot A_0$ , onde  $A_0$  representa a área da face do elemento.

Concluimos que a força F exercida em DC deve ser perpendicular a essa face e sua intensidade deve ser:

$$F = 2 \cdot (\tau_{m\acute{a}x} \cdot A_0) \cdot \cos 45^\circ = \tau_{m\acute{a}x} \cdot A_0 \cdot \sqrt{2}$$

Portanto, a tensão correspondente será:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\tau_{m\acute{a}x} \cdot A_0 \cdot \sqrt{2}}{A_0 \cdot \sqrt{2}} = \tau_{m\acute{a}x}$$

Assim, enquanto o elemento **a**, da Figura 2.10 está sob cisalhamento puro, o elemento **b** está sujeito a tensões de tração em duas de suas faces e a tensão de compressão nas outras duas. Na disposição dos extensômetros em ponte de Wheatstone teremos dois sensores submetidos a tração e dois submetidos a compressão, conforme a Figura 2.13.

Isso foi possível, pela instalação no eixo intermediário, de dois sensores biaxiais posicionados em pontos diametralmente opostos, como ilustra a Figura 2.14.

No caso do trabalho em questão, o corpo do dinamômetro é de aço SAE 1020 estirado a frio com tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) = 50kgf/mm<sup>2</sup>. Utilizou-se este material para garantir que não haja deformação residual após o descarregamento do eixo, o que levaria a incorreções de medição.

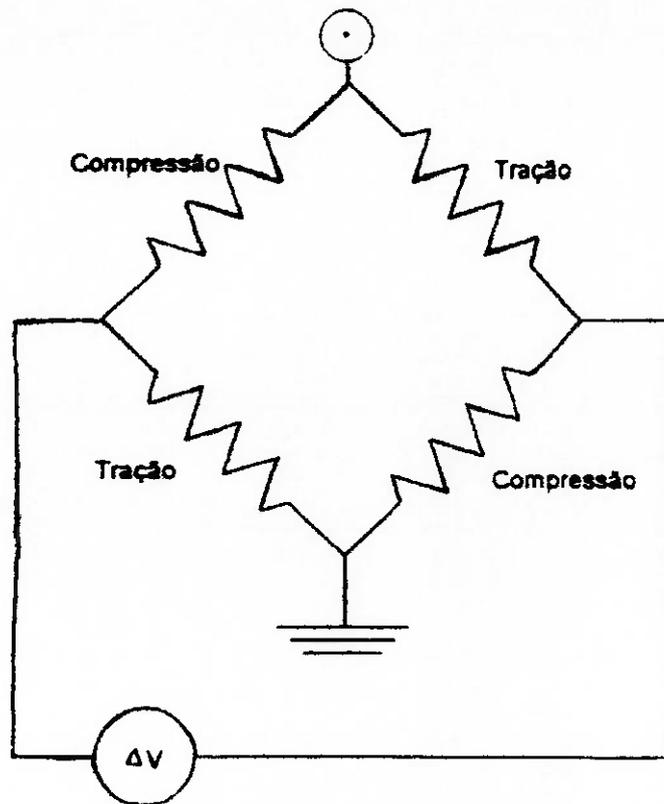


FIGURA 2.13 – Esquema da ponte de Wheatstone.

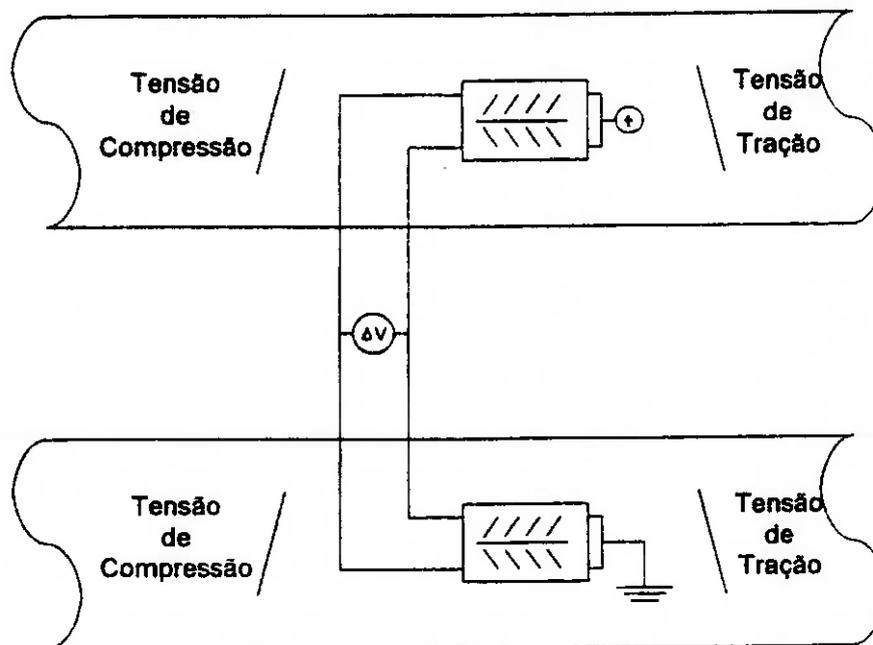


FIGURA 2.14 – Instalação de sensores em pontos diametralmente opostos do mesmo eixo intermediário.

Para a determinação da tensão admissível ( $\tau_{adm}$ ), na verificação da espessura adotada para a parede do tubo, considerou-se um coeficiente (CS) igual a 2, com o qual garante-se o trabalho antes do limite de proporcionalidade do material, partir-se-á agora para a determinação da tensão admissível ( $\tau_{adm}$ ):

momento torsor máximo (T): 32467,7kgf.mm

pelo círculo de Mohr no caso da torção, temos:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \tau_{m\acute{a}x} = \frac{T}{W_t}$$

onde  $\tau_{m\acute{a}x}$  é a tensão máxima atuante, onde tem-se a condição  $\tau_{m\acute{a}x} \leq \tau_{adm}$

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_e}{CS} = \frac{\sigma_e}{2}$$

$$\tau_{adm} = 250\text{MPa}$$

fazendo a verificação, vem que:

\* diâmetro externo do eixo na região de instalação dos sensores (Do): 33 mm

\* diâmetro interno do eixo (Di): 29 mm

$$W_t = \frac{\pi(D_o^3 - D_i^3)}{16 \cdot D_o}$$

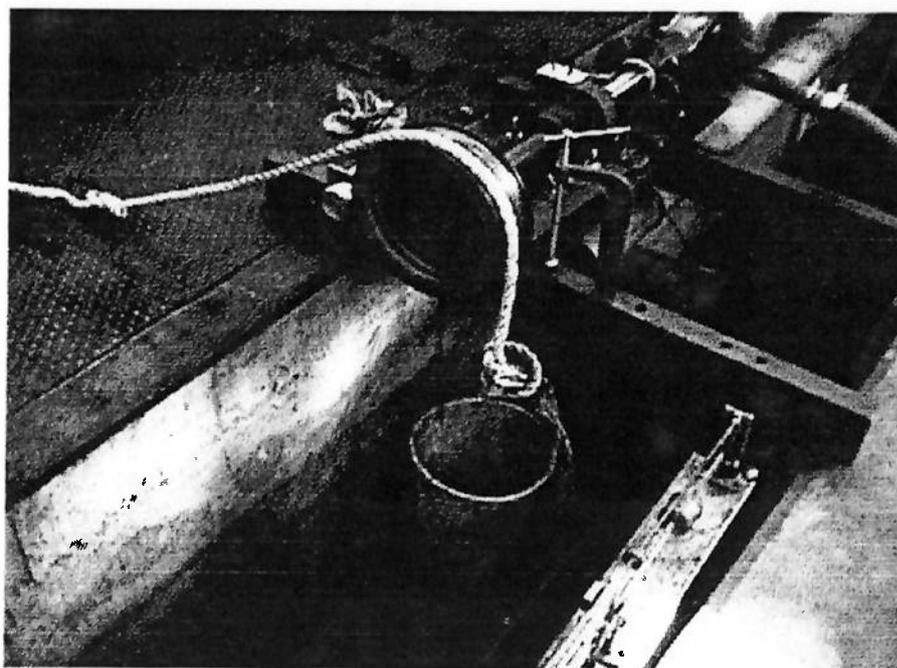
$$\tau_{adm} = 11,4 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\tau_{m\acute{a}x} \lll \tau_{adm}$$

## 2.4 COMENTÁRIOS A RESPEITO DO FREIO

Na outra extremidade da bancada de testes, como dito anteriormente, tem-se o freio. A finalidade dele é que este possa gerar, quando acionado, uma torção para absorver o torque produzido pela turbina. Este arranjo pode ser observado na Figura 2.15.

Devido ao pequeno torque da turbina, usou-se uma corda sobre o disco ligada a um reservatório que, recebendo água, fazia com que o torque aplicado à turbina fosse modificado. Na figura abaixo pode-se ter uma visão mais exata do arranjo.



**FIGURA 2.15** – Visão geral do sistema de frenagem.

## CAPÍTULO III

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 TESTES PRELIMINARES

É sabido que qualquer estudo experimental está sujeito a erros e incertezas. Por esta razão, é imprescindível saber o quão grandes eles são, para que se possa avaliar sua abrangência e até onde vão suas influências nos resultados. Deve-se ter em mente que a partir de certo ponto, tais erros podem comprometer o experimento.

Considerando o exposto acima, chegou-se à conclusão de que seria necessário, antes que se começasse a coleta de dados, que se fizesse feita uma série de medições de vazão para que se avaliassem as incertezas associadas nesta parte do experimento, pois esta etapa parecia ser a mais crítica no que tange à origem dos erros experimentais.

Para que esta série de medições fosse feita, primeiramente esperou-se que a pressão e, conseqüentemente a vazão se estabilizassem. Na condição de regime, desviava-se rapidamente a mangueira de saída água da turbina, e a colocava em direção ao reservatório, mostrados na Figura 2.15, acionando-se, no mesmo instante, o cronômetro. Quando o reservatório mencionado estava completamente cheio, o cronômetro era acionado novamente.

Foi feita, desta forma, uma série de 70 medições, onde a pressão na entrada da turbina foi variada de 5,4Pa, apresentando a rotação máxima, até uma pressão mínima

de 0,2Pa, onde a turbina parava de girar. Estas medições foram feitas com a pressão variando de 0,4Pa, entre uma e outra.

Após a redução e análise dos dados medidos, concluiu-se que o erro médio nas medições era de aproximadamente 2% e, portanto, aceitável em um estudo experimental dessa natureza.

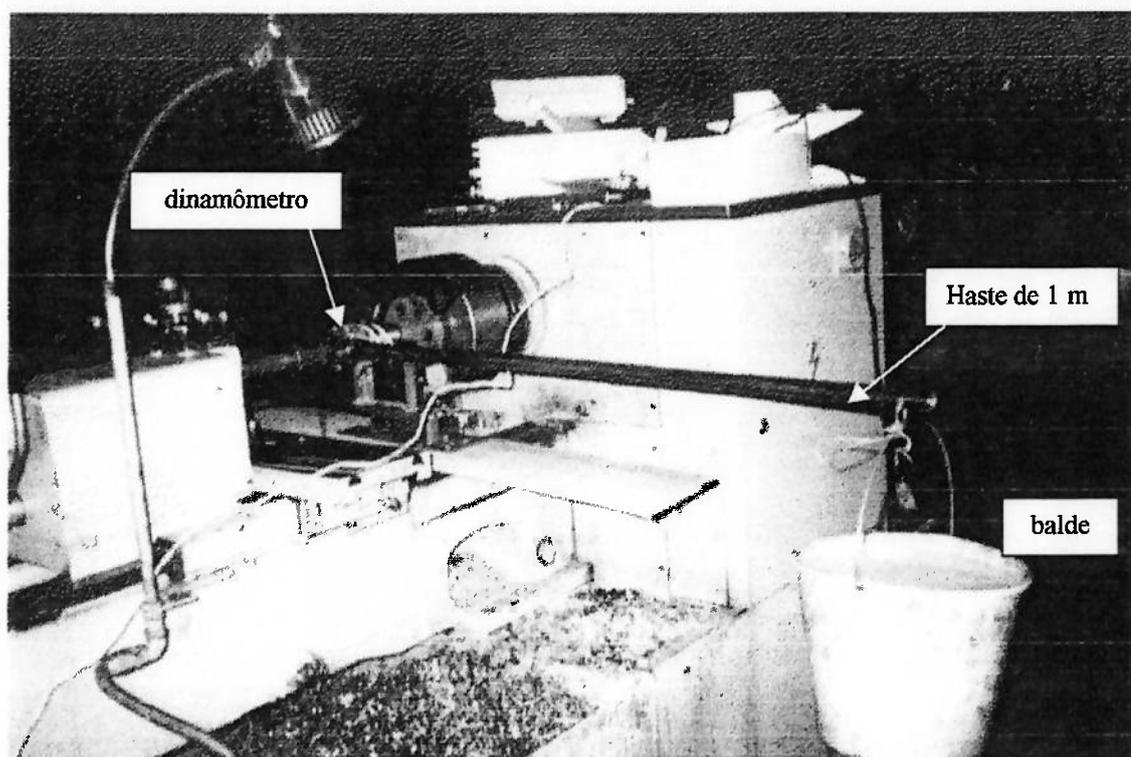
### **3.2 DESCRIÇÃO DO ARRANJO MONTADO PARA A CALIBRAÇÃO DO DINAMÔMETRO**

A calibração foi feita estaticamente utilizando-se uma haste com comprimento de braço de 1 m e um balde plástico preso em sua extremidade. A aquisição de dados era feita com um freqüencímetro que foi conectado ao circuito receptor estacionário.

Para que a calibração fosse feita, o dinamômetro foi preso pelas “castanhas” de um torno em uma extremidade e a haste na outra, como mostrado na Figura 3.1.

Durante o ensaio, colocou-se 1 litro de água por vez no balde de modo que o peso desta provocasse um torque no eixo do dinamômetro.

É importante salientar que, durante o ensaio, tomou-se nota dos valores fornecidos pelo freqüencímetro para que pudesse ser feita uma curva de calibração que relacionasse a freqüência com o torque. A curva mencionada acima poderá ser apreciada em capítulo posterior.



**FIGURA 3.1** – Ilustração mostrando o arranjo montado para a calibração do dinamômetro.

A equação ajustada da reta é mostrada a seguir e será considerada no momento de converter os dados modulados em frequência na unidade apropriada para medição do torque.

$$T = 295,71 - 2,33 \cdot 10^{-2} f_0$$

Onde : T = torque aplicado em Nm

$f_0$  = frequência emitida pelo transdutor em Hz

### 3.3 PROCEDIMENTO DURANTE OS TESTES

Procurou-se estabelecer uma rotina, durante a aquisição de dados ao longo dos testes, que fosse sempre a mesma.

Depois de escorvadas as bombas, o motor era ligado e, a água começava a fluir. Quando esta chegava ao vaso de pressão, esperava-se que a pressão dentro deste

chegasse a aproximadamente 0,8MPa. Atingida esta pressão, era o momento de se abrir totalmente o registro que antecede o tubo de distribuição mostrado na Figura 2.3. A pressão na entrada da turbina devia ser mantida em 0,5MPa. Para que isto fosse possível, a rotação do motor era variada até que a pressão se estabilizasse no valor previsto. Quando o equipamento entrava em regime, os testes podiam ser iniciados.

Era medida então, a pressão de entrada na turbina, sua vazão, rotação e frequência indicada pelo frequencímetro.

A primeira série de testes foi feita com a turbina em vazio, ou seja, sem qualquer torque resistivo. Desta forma, esperava-se que o sistema entrasse em equilíbrio em rotação máxima. Em seguida, a rotação do motor era diminuída pela aplicação de torque e esperava-se que o regime fosse novamente estabelecido e, então, novas medições eram feitas. A rotação do motor era diminuída novamente, e tudo se repetia até que a rotação do motor fosse pequena a tal ponto que a vazão e pressão fornecidas á turbina não eram suficientes para que esta girasse.

Acabada esta primeira série de testes, utilizou-se o dispositivo de torque formado pelo balde e corda. Continuaram-se os ensaios repetindo o procedimento descrito acima, e depois desta, foram feitas outras séries de testes aumentando-se a massa de água no balde, adicionando-se 250ml de água a cada novo teste.

### **3.4 TESTES PARA A DETERMINAÇÃO DO TORQUE RESISTIVO.**

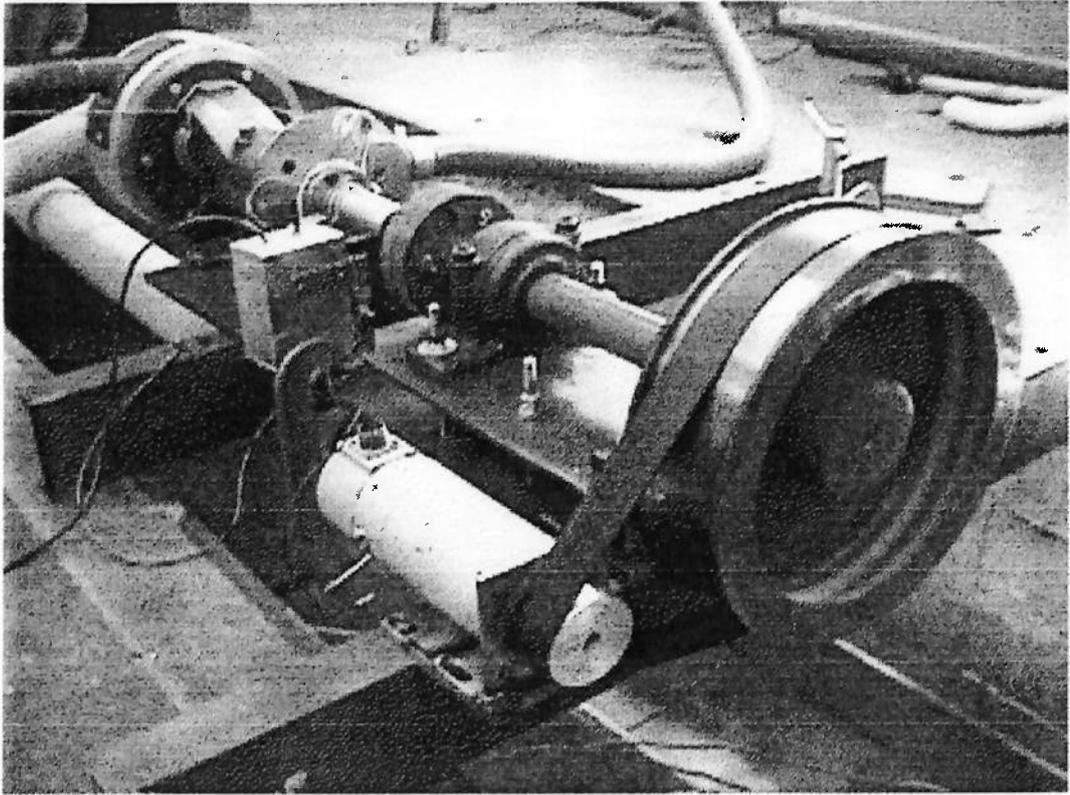
Depois de feitos todos os testes, ficou patente a importância da determinação do torque resistivo da turbina referida neste trabalho. Para tal, utilizou-se de um motor de corrente contínua para que sua rotação pudesse ser variada.

O disco do freio foi usado como polia motriz a fim de que o rotor da turbina girasse, possibilitando assim, a determinação do torque proveniente do atrito oriundo do mancal de apoio e dos dois selos mecânicos instalados na carcaça da turbina. Com a Figura 3.2 pode-se ter uma visão mais precisa do arranjo experimental

A coleta de dados foi feita mediante variação da voltagem fornecida ao motor, e conseqüente variação da rotação deste. Partindo de zero, a cada nova medição, a voltagem era acrescida de 5 V até que esta chegasse a 30 V.

A rotação imprimida à turbina foi de zero até aproximadamente 200 rpm com incrementos em torno de 45 rpm.

Em cada medição, era colhido o valor da frequência e, por consequência, obtinha-se o valor do torque associado. Também media-se a rotação da turbina.



**FIGURA 3.2** – Arranjo experimental montado para a determinação do torque resistivo.

## **CAPÍTULO IV**

### **APRESENTAÇÃO DOS DADOS COLETADOS**

Durante os experimentos citados acima, foram coletados uma série de dados que são de vital importância para que se possa chegar a conclusões e conhecer melhor as características, limitações e aplicações da bancada de testes. Tendo isto em mente, é chegado o momento de se fazer a apresentação desses dados e resultados obtidos durante os vários testes. Outra razão de se fazer longas séries de testes foi para que todas as peças do equipamento fossem acomodadas, estabilizando, assim, seu funcionamento.

#### **4.1 EXPERIMENTO DA MEDIDA DE VAZÃO**

Como mencionado no capítulo III, foram feitas várias medidas da vazão para que se tivesse uma idéia exata da precisão dos dados coletados. A Tabela 4.1, abaixo, mostra esses resultados. Tais medições foram feitas com apenas a turbina instalada na base do equipamento, sem o dinamômetro e o freio.

Para se obter os valores das medidas de vazão apresentadas acima, foi medido o tempo que levou para que o reservatório fosse completamente cheio, sendo que este comportava um volume de 144 litros. Na verdade, a medida da vazão é uma medida indireta pois é obtida dividindo-se o volume do reservatório pelo tempo que este demorou para este ser cheio.

TABELA 4.1 – Dados coletados com a turbina em vazio, sem dinamômetro e freio.

ensaio	Pressão (Pa)	Vazão (l/s)	Rotação (rpm)
1	5,4	5,35	1983
2	5,4	5,43	1976
3	5,4	5,35	1990
4	5,4	5,45	1987
5	5,4	5,43	1981
6	5,0	5,27	1900
7	5,0	5,20	1911
8	5,0	5,26	1910
9	5,0	5,20	1903
10	5,0	5,20	1896
11	4,6	5,11	1842
12	4,6	5,03	1840
13	4,6	5,02	1839
14	4,6	5,05	1837
15	4,6	5,02	1841
16	4,2	4,85	1759
17	4,2	4,80	1758
18	4,2	4,83	1753
19	4,2	4,75	1754
20	4,2	4,72	1756
21	3,8	4,51	1651
22	3,8	4,57	1648
23	3,8	4,56	1664
24	3,8	4,68	1654
25	3,8	4,63	1661
26	3,4	4,43	1560
27	3,4	4,35	1557
28	3,4	4,40	1553
29	3,4	4,40	1550
30	3,4	4,36	1557
31	3,0	4,17	1464
32	3,0	4,16	1466
33	3,0	4,24	1464
34	3,0	4,20	1456
35	3,0	4,16	1449

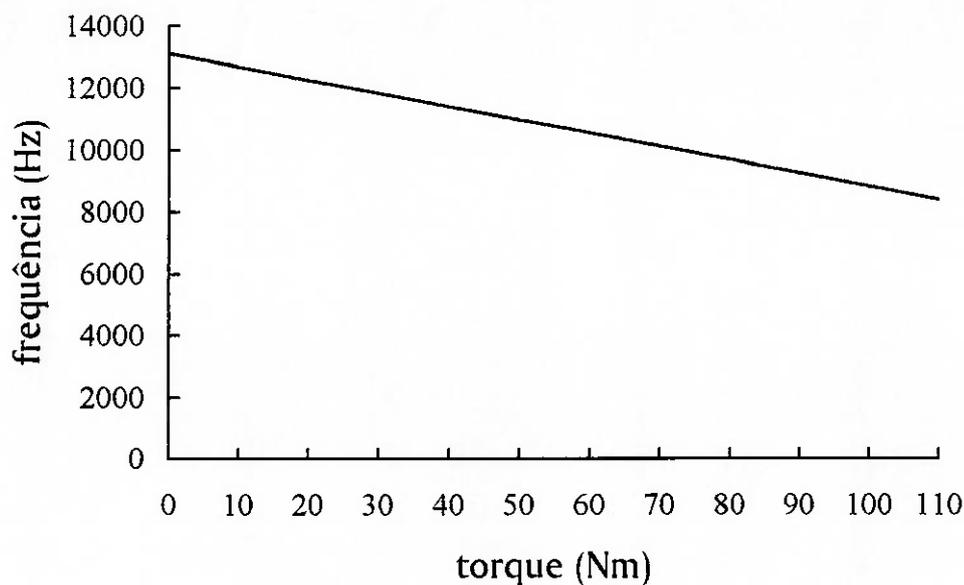
ensaio	Pressão (Pa)	Vazão (l/s)	Rotação (rpm)
36	2,6	3,93	1332
37	2,6	3,96	1341
38	2,6	3,95	1337
39	2,6	3,98	1337
40	2,6	3,96	1350
41	2,2	3,74	1217
42	2,2	3,77	1212
43	2,2	3,71	1211
44	2,2	3,63	1211
45	2,2	3,71	1210
46	1,8	3,46	1079
47	1,8	3,47	1070
48	1,8	3,37	1073
49	1,8	3,46	1076
50	1,8	3,42	1065
51	1,4	3,14	918
52	1,4	3,13	914
53	1,4	3,12	914
54	1,4	3,16	918
55	1,4	3,15	910
56	1,0	2,76	718
57	1,0	2,76	721
58	1,0	2,79	721
59	1,0	2,82	726
60	1,0	2,78	732
61	0,6	2,05	424
62	0,6	2,29	452
63	0,6	2,31	428
64	0,6	2,33	450
65	0,6	2,36	452
66	0,2	-	-
67	0,2	-	-
68	0,2	-	-
69	0,2	-	-
70	0,2	-	-

## 4.2 CALIBRAÇÃO DO DINAMÔMETRO

A calibração do dinamômetro foi feita levando-se em consideração os dois sentidos de rotação. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores encontrados simulando-se a torção que o eixo sofre se este girar no mesmo sentido da turbina, ou seja, sentido anti-horário.

**TABELA 4.2** – Dados encontrados nos testes de calibração para o eixo com rotação anti-horária.

<b>Torque (N)</b>	<b>Teste 1 frequência (Hz)</b>	<b>Teste 2 Frequência (Hz)</b>	<b>Teste 3 Frequência (Hz)</b>
0	12660	12714	12685
10	12235	12295	12258
20	11800	11868	11848
30	11366	11430	11409
40	10940	11011	10980
50	10540	10590	10541
60	10096	10140	10128
70	9664	9716	9678
80	9255	9300	9263
90	8808	8870	8828
100	8386	8432	8370



**FIGURA 4.1** – Curva de calibração com torção no sentido anti-horário.

Para que se tivesse maior precisão no momento de fazer o gráfico, fez-se três seções de testes. Com estes valores, tirou-se a média das frequências dos respectivos torques, de onde resultou o Figura 4.1, abaixo. Observe a linearidade da curva encontrada.

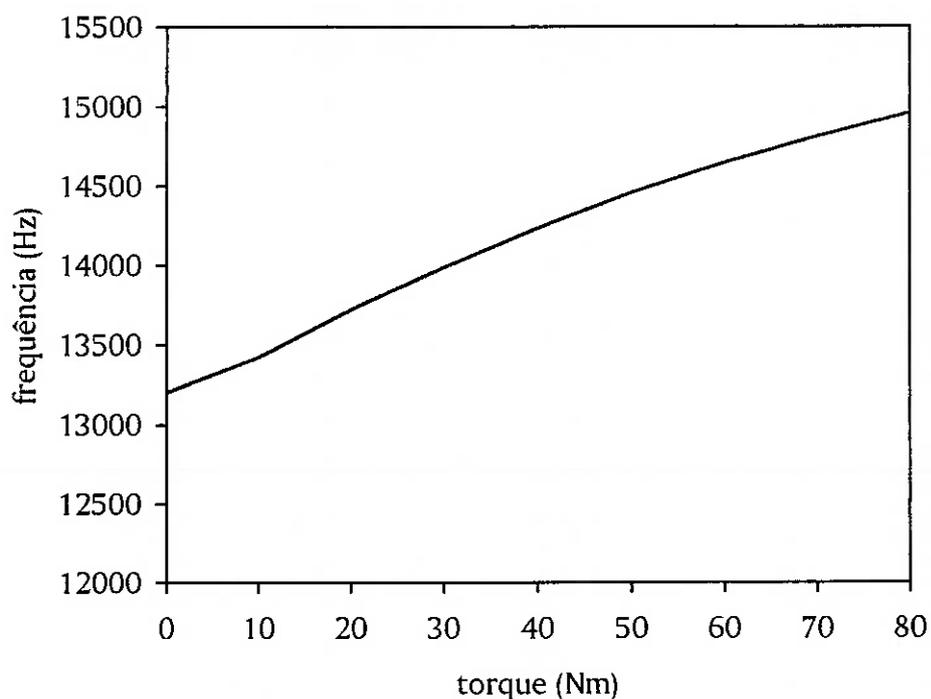
Também foram feitos testes, afim de levantar a curva de calibração para rotação horária do eixo. Tais resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Os testes feitos com a rotação invertida, destinam-se a disponibilizar informações para posteriores trabalhos envolvendo o referido dinamômetro

A seguir, é mostrado o Figura 4.2, que correspondente aos dados da tabela acima. É importante observar que neste outro sentido de rotação a curva não apresenta a linearidade da anterior.

**TABELA 4.3** - Dados encontrados nos testes de calibração para o eixo com rotação horária.

Torque (N)	Teste 1 frequência (Hz)	Teste 2 Frequência (Hz)	Teste 3 Frequência (Hz)
0	13383	13433	13460
10	13684	13731	13752
20	13954	14001	14015
30	14204	14250	14258
40	14436	14467	14476
50	14626	14660	14663
60	14791	14824	14826
70	14932	14973	14973



**FIGURA 4.2** – Curva de calibração com torção no sentido horário.

### 4.3 TESTES FINAIS

Nesta última etapa, a bancada de testes já estava completamente montada, ajustada e pronta para trabalhar oferecendo todos os seus recursos.

É importante notar que os testes foram feitos seguindo-se um mesmo procedimento experimental. Em todos eles, manteve-se inicialmente o equipamento a uma pressão constante de 0,5MPa e esperava-se até que este estabilizasse. Feito isto, os dados eram coletados. Para a próxima medição, aumentava-se o torque colocando-se água no balde atrelado à corda. Esperava-se que o conjunto entrasse em regime e, então, coletavam-se os respectivos dados. Em seguida, com a mesma massa no balde, a pressão na entrada da turbina era diminuída. Depois de tudo estabilizado fazia-se nova coleta de dados. Este procedimento foi repetido até que a vazão fosse tão pequena que não era suficiente para fazer a turbina girar.

A Tabela 4.4 mostra os valores das várias variáveis coletadas durante os experimentos. Nesta, apresentam-se os valores obtidos utilizando-se apenas o balde e a corda para produzir torque, como pode ser visto na última coluna desta.

Na Tabela 4.5, tem-se a variação do torque em intervalos iguais de 2,5 N cada, até que a turbina não virasse mais.

**TABELA 4.4** – Listagem dos valores encontrados nos experimentos.

<b>Pressão (Pa)</b>	<b>Vazão (l/s)</b>	<b>Rotação (rpm)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Peso (N)</b>
5,00	5,56	1807	12902	0
3,80	5,80	1303	12809	4,5
3,15	5,50	1146	12679	4,5
3,10	6,00	1058	12835	4,5
2,90	5,92	904	12830	4,5
2,60	5,55	912	12735	4,5
2,15	5,61	646	12787	4,5
2,10	4,98	802	12749	4,5
1,80	5,34	482	12794	4,5
1,70	4,71	637	12682	4,5
1,30	5,22	201	12783	4,5
1,20	4,42	328	12681	4,5
0,90	4,60	0	12782	4,5

TABELA 4.5 – Relação dos valores encontrados aumentando-se a massa do balde.

Pressão (Pa)	Vazão (l/s)	Rotação (rpm)	Frequência (Hz)	Peso (N)
5,00	5,42	1838	12862	0
3,80	5,87	1370	12850	7,0
2,90	5,82	951	12784	7,0
2,30	5,50	772	12769	7,0
1,90	5,27	604	12763	7,0
1,60	5,82	432	12734	7,0
1,40	5,33	291	12739	7,0
1,13	5,32	0	12743	7,0
5,00	5,61	1826	12818	0
2,40	6,11	616	12694	9,5
1,90	5,80	432	12697	9,5
1,60	5,72	273	12689	9,5
1,20	5,49	107	12698	9,5
1,10	5,46	0	12694	9,5
5,00	5,45	1804	13101	0
1,80	5,94	313	12905	12
1,55	5,78	191	12876	12
1,40	5,77	131	12857	12
1,30	5,71	0	12853	12
5,00	5,69	1837	13003	0
1,40	6,03	0	12810	14,5

#### 4.4 DADOS REFERENTES AO TORQUE RESISTIVO

Seguindo-se os procedimentos expostos em capítulo anterior, foram coletados diversos dados, os quais são apresentados na Tabela 4.6, abaixo.

**TABELA 4.6** – Valores encontrados nos testes para determinação do torque resistivo.

Vtagem (V)	Frequência (Hz)	Rotação (rpm)	Frequência (Hz)	Rotação (rpm)	Frequência (Hz)	Rotação (rpm)
0	13220	0	13216	0	13186	0
10	13211	59	13026	55	13004	61
15	13151	94	13033	94	13033	98
20	13119	134	12959	131	12935	136
25	13121	171	13077	173	13037	175
30	13112	197	13051	199	13023	197

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os objetivos apresentados no capítulo introdutório deste trabalho, a bancada de testes, constituída de uma turbina de Tesla, um dinamômetro e um freio, foi construída e testada com sucesso.

Como exposto anteriormente, foram coletados inúmeros dados a partir dos testes experimentais feitos com a turbina de Tesla. Para que tais dados fossem colhidos, a referida turbina permaneceu em funcionamento durante várias horas sem quaisquer problemas operacionais.

É importante salientar também que, confirmando as expectativas iniciais, a turbina realmente é extremamente silenciosa e apresenta um torque muito pequeno, se comparado com outras turbinas em situação e dimensões semelhantes.

Analisando os dados encontrados, percebe-se que conseguiu-se chegar a uma combinação perfeita entre a espessura da parede, a qual se encontram os extensômetros, e a sensibilidade dos circuitos eletrônicos. Este binômio, foi conseguido quando da construção de um segundo eixo e após mudanças nos circuitos, que tiveram sua sensibilidade aumentada. Além disto foram realizados incontáveis testes estáticos de medição do torque, até que fossem conseguidas as curvas de calibração apresentadas.

Quanto à bancada de testes, esta funcionou perfeitamente bem como um todo, possibilitando a realização dos testes necessários. Observou-se que esta apresenta

grande versatilidade pois, quando da sua utilização com outra turbina, basta trocá-la mediante a retirada de quatro parafusos.

Como recomendações importantes, deve-se observar que, apesar das dificuldades construtivas, o torque da turbina de Tesla seria significativamente aumentado se a distância entre os discos fosse menor.

Uma outra observação, no sentido de melhorar ainda mais a utilização da bancada de testes, é a possibilidade de se construir um outro freio, que possuísse um disco de atrito com diâmetro menor que o atual para que este tivesse sua sensibilidade aumentada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, F. V., 1998, **Pequeno Dinamômetro Óptico**, Relatório Final de Iniciação Científica, Proc. 98/05424-1, FAPESP.

Cunha, V. L. C. , Santos, M. T., Tu, C. C. , 1998, *End Mill Sensor for Tool Condition Monitoring*, **Proceeding of the International Seminar on Improving Machine Tool Performance**, CIRP, San Sebastian Espanha, 6-8 julho, pp. 797-808.

Daugherty, R. L.; Franzini B. J. e Finnemore, E. J., 1985, **Fluid Mechanics With Engineering Applications**, 8<sup>th</sup> edition, Mc Graw-Hill, N.Y.

Fox, R. W. e McDonald, A. T., 1998, **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 5<sup>a</sup> ed., Guanabara-Koogan.

Jacobson, R., **The Tesla Bladeless Pumps and Turbines**, **Proceedings of the Intersociety Energy Engineering Conference**, V. 4, IEEE, NJ, EUA, P. 445-50.

NACA, **Investigation of a High-speed Strain-gage Torquemeter**

Ponge-Ferreira, W. A., 1985, **Projeto Preliminar de um Torquímetro Óptico Digital em Frequência Modulada**. Trabalho de Formatura, Depto. Eng<sup>a</sup> Mecânica, EPUSP

Ponge-Ferreira, W. A. e Tu, C. C., 1986, **Torquímetro Dinâmico em FM**, 6<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, M. G., novembro de 1986.

Rice, W., 1963, An Analytical and Experimental Investigation of Multiple Disk Pumps and Compressors, **J. of Engineering for Power, Trans. ASME**, Series A, vol. 85, p. 191

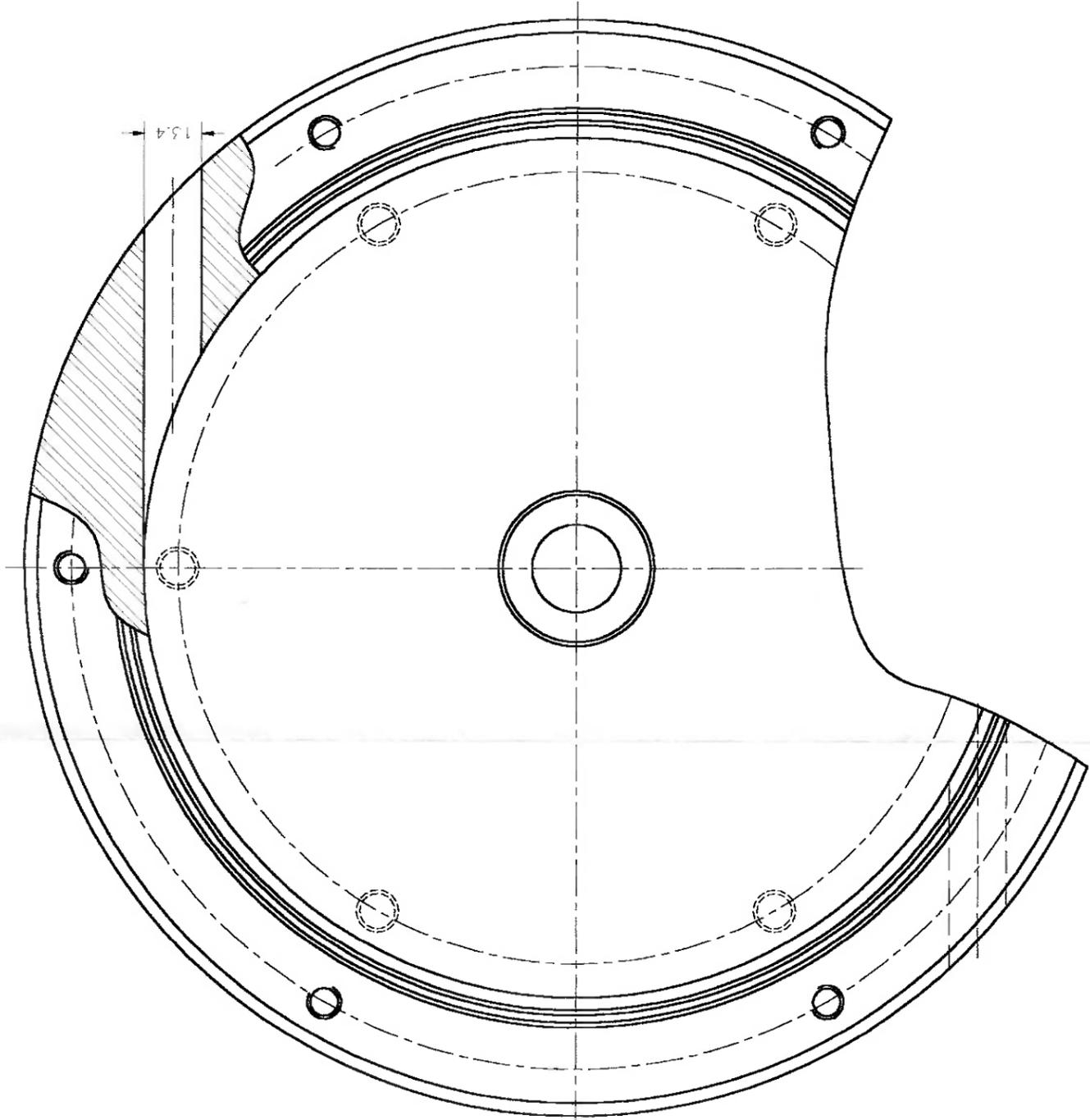
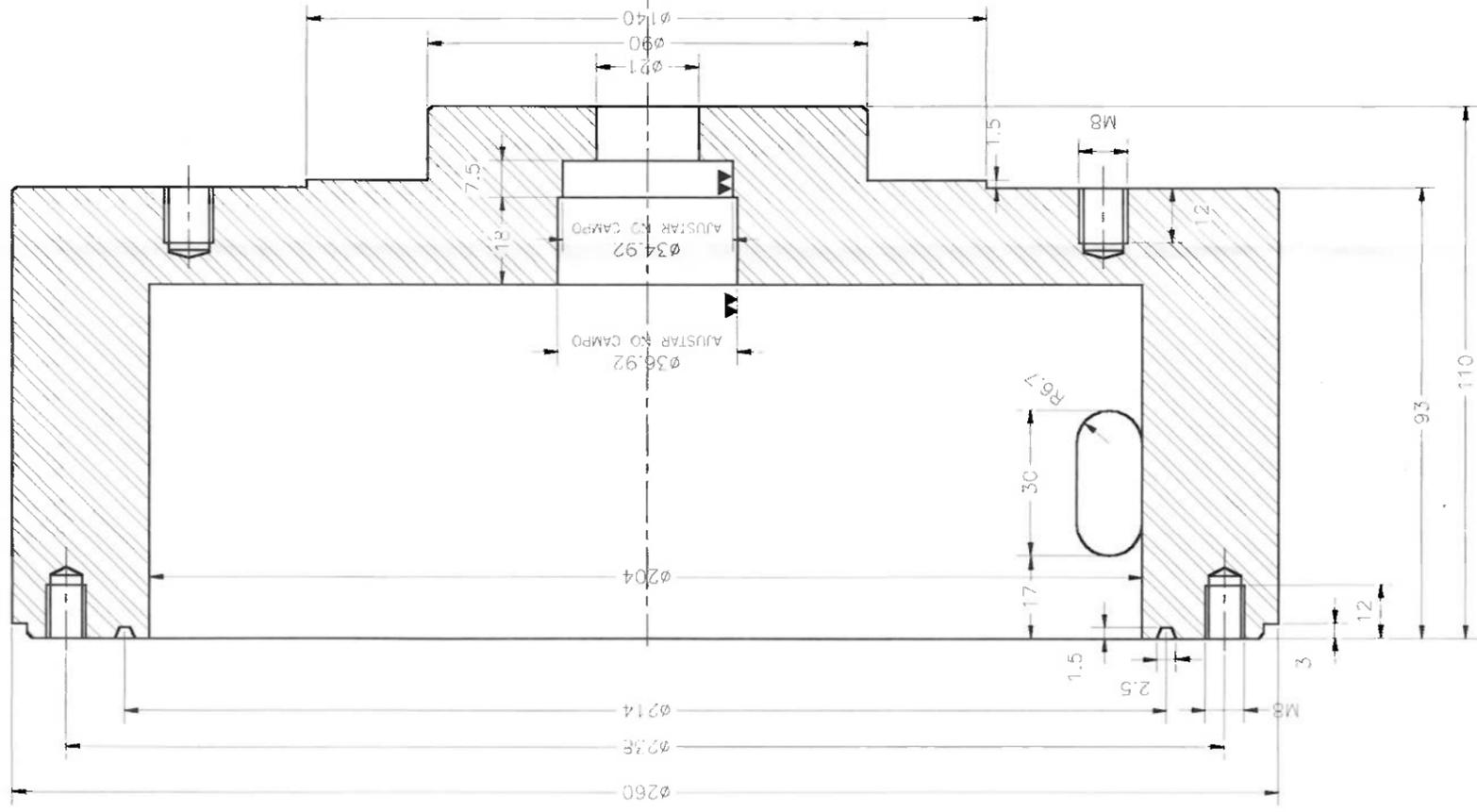
Rice, W., 1965, An Analytical and Experimental Investigation of Multiple Disk Turbines, **J. of Engineering for Power, Trans. ASME**, Series A, vol. 87, pp 29-36.

Seiple, W. D., 1979, **The Tesla Concept Friction Operating Steam Turbine**

TEBA – Tesla Engine Builders Association. 5464 N. Port Washington Rd., Suite 293, Wisconsin 53217-4925.

## **APÊNDICE**

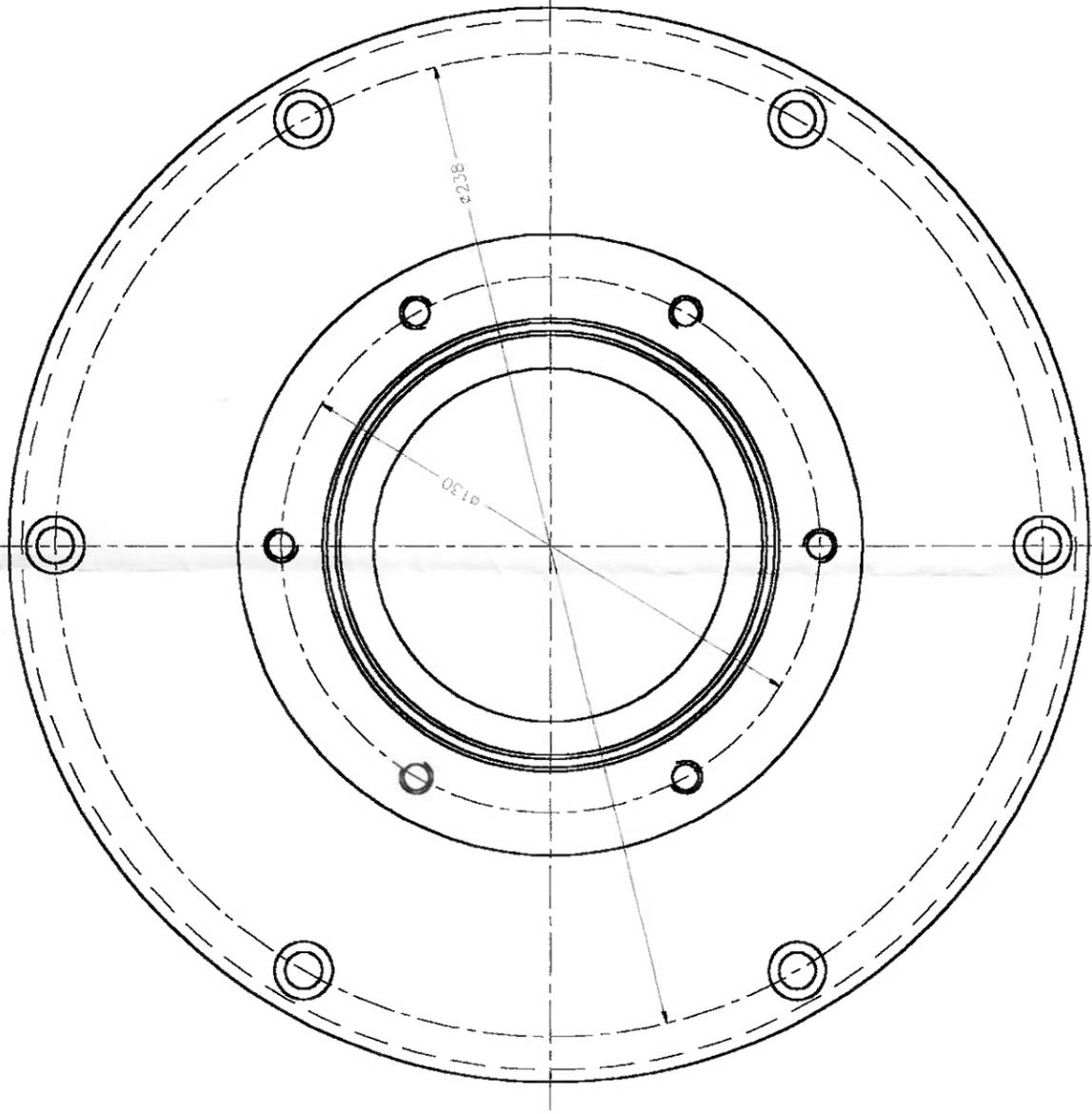
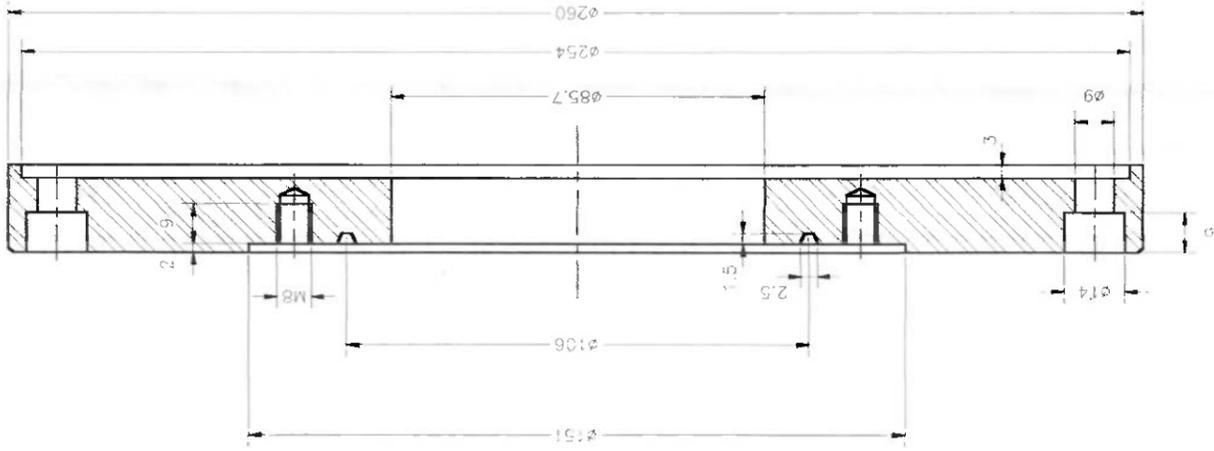
### **DESENHOS DE CONJUNTO E DE FABRICAÇÃO DA TURBINA**



01	BAR.Ø260X110	ALUMINIO	01
POS.	COM.	DISCRIMINACAO	MATERIAL/NORMA
			QUA.
			DESEN.NUM.

## ESCOLA POLITECNICA - USP

SINAIS DE USINAGEM		MAQUINA		PROJETADO R.L.LABOZETTIC	
~	▼	▼▼	▼▼▼	DESENHADO	
BRUTO	DESB.	LISO	RETIF.	APROVADO	
TOLERANCIA	QDO.	NAO ESPECIFICADA	ESCALA	TITULO: TURBINA DE TESLA	
<10	10-100	100-1000	>1000	DETALHE	
0,1mm	0,2mm	0,3mm	0,4mm	ARQUIVO:	NUMERO
QUEBRAR OS CANTOS VIVOS NAO ESPECIFICADOS			A1	TESLA.DWG	REV.
OBS:					

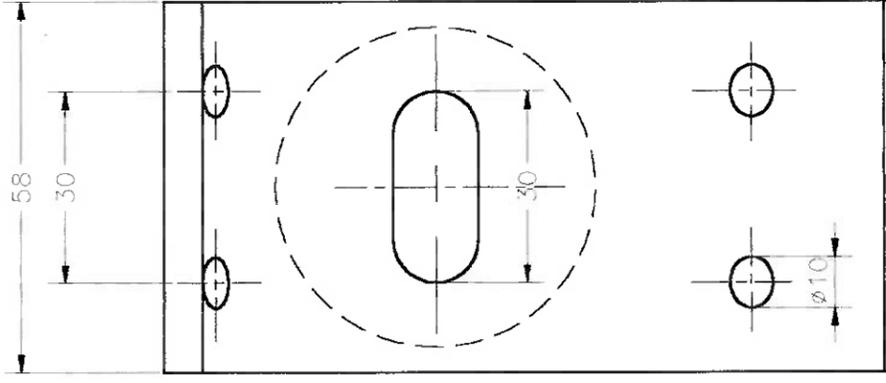
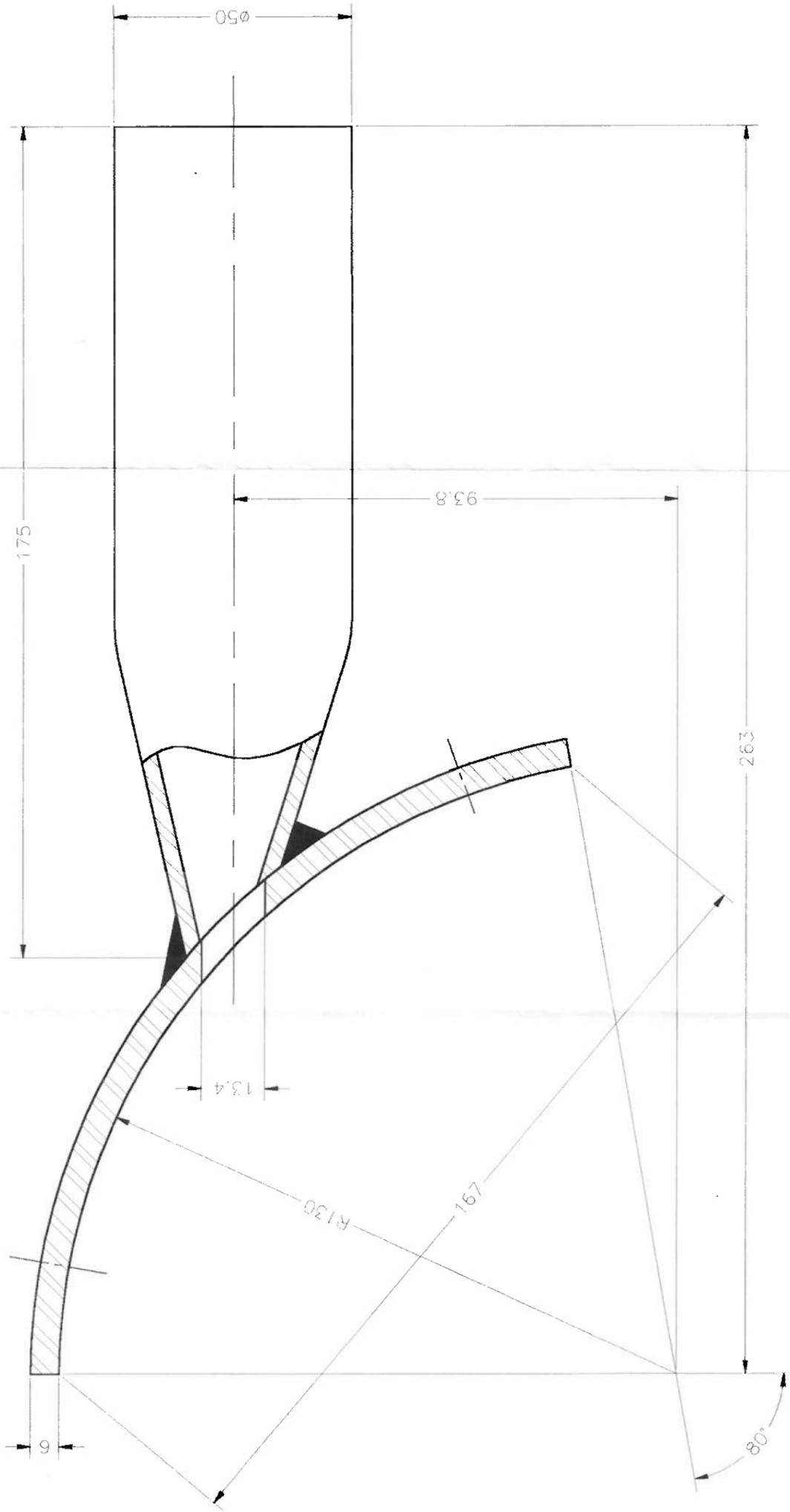


▼ [W]

02	BAR. ø260X20	ALUMINIO	01
POS. COM.	DISCRIMINACAO	MATERIAL/NORMA	QUA. DESEN.NUM.

### ESCOLA POLITECNICA - USP

SINAIS DE USINAGEM		MAQUINA		PROJETADO R.L.LABOZETTO	
~	▼	▼	▼	DESENHADO	
BRUTO	DESB. LISO	REFIF. POLIDO		APROVADO	
TOLERANCIA QDO. NAO ESPECIFICADA		ESCALA	TITULO: TURBINA DE TESLA		
<10	10-100	100-1000	>1000	S/E	DETALHE
0,1mm	0,2mm	0,3mm	0,4mm	FORMATO	
QUEBRAR OS CANTOS VIVOS NAO ESPECIFICADOS		A1	NUMERO		
OBS:		ARQUIVO:	REV.		
		TESLA.DWG			

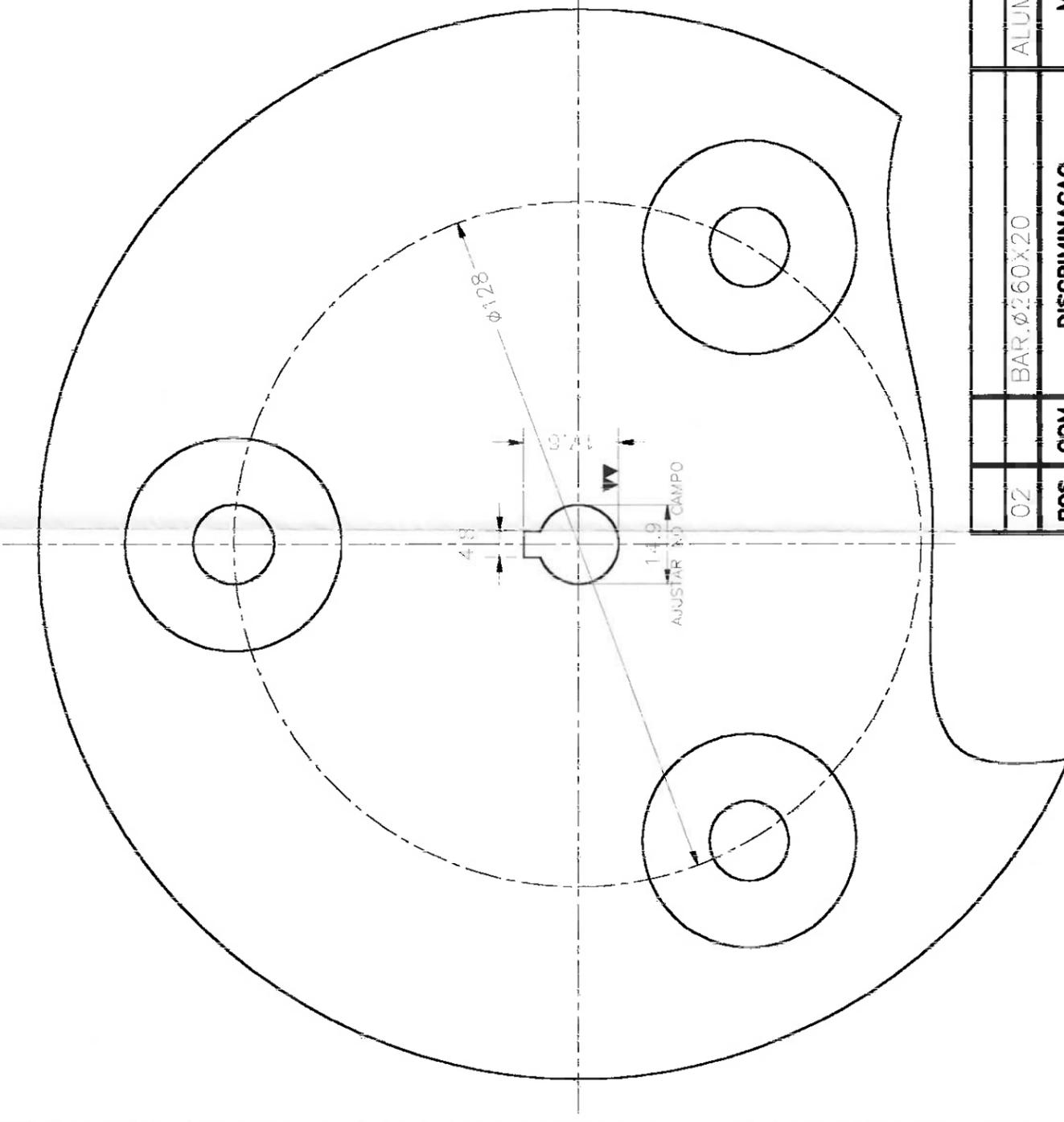
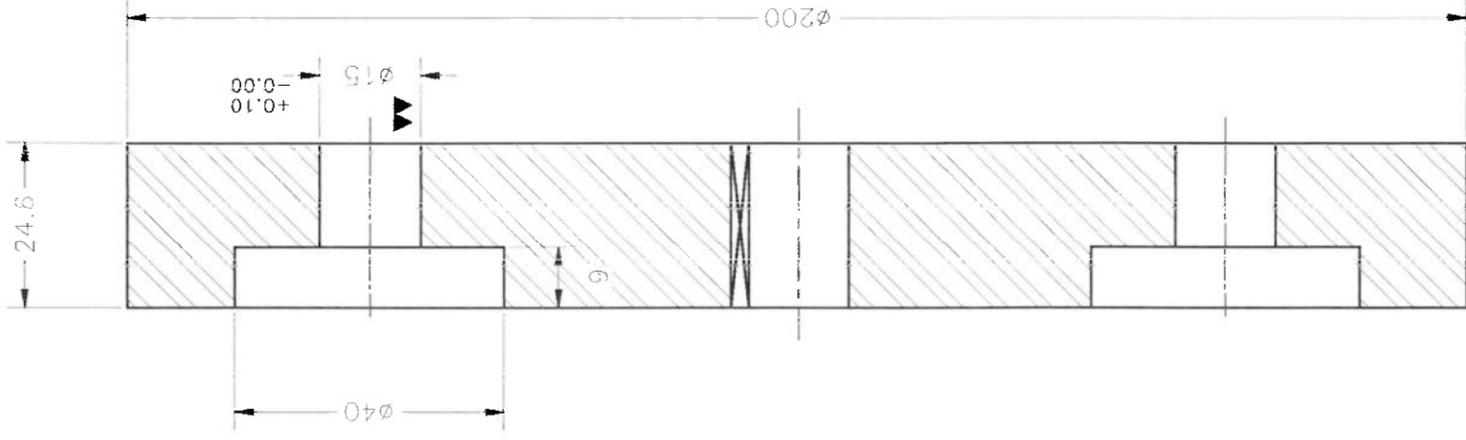


▼ [W]

05	02	TUBO $\phi 2" \times 180$	AÇO	02	
05	01	CH. 3/8" X 60 X 185	AÇO SAE 1020	02	
<b>POS.</b>	<b>COM.</b>	<b>DISCRIMINACAO</b>	<b>MATERIAL/NORMA</b>	<b>QUA.</b>	<b>DESEN.NUM.</b>

## ESCOLA POLITECNICA - USP

<b>SINAIS DE USINAGEM</b>		<b>MAQUINA</b>		<b>PROJETADO</b> R.L.LABOZETTO	
~	▼	▼▼	▼▼▼	DESENHADO	
<b>BRUTO</b>	<b>DESB. LISO</b>	<b>REFIF.</b>	<b>POLIDO</b>	APROVADO	
<b>TOLERANCIA QDO. NAO ESPECIFICADA</b>			<b>ESCALA</b>	<b>TITULO:</b> TURBINA DE TESLA	
<10	10-100	100-1000	>1000	S/E	DETALHE
0,1mm	0,2mm	0,3mm	0,4mm	<b>FORMATO</b>	
<b>QUERRAR OS CANTOS VIVOS NAO ESPECIFICADOS</b>			A1	<b>ARQUIVO:</b>	<b>NUMERO</b>
<b>OBS:</b>			TESLA.DWG		<b>REV.</b>



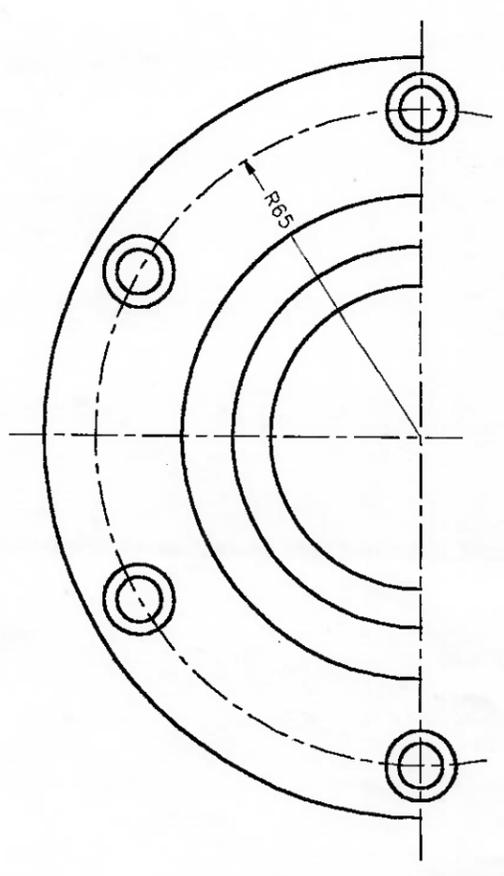
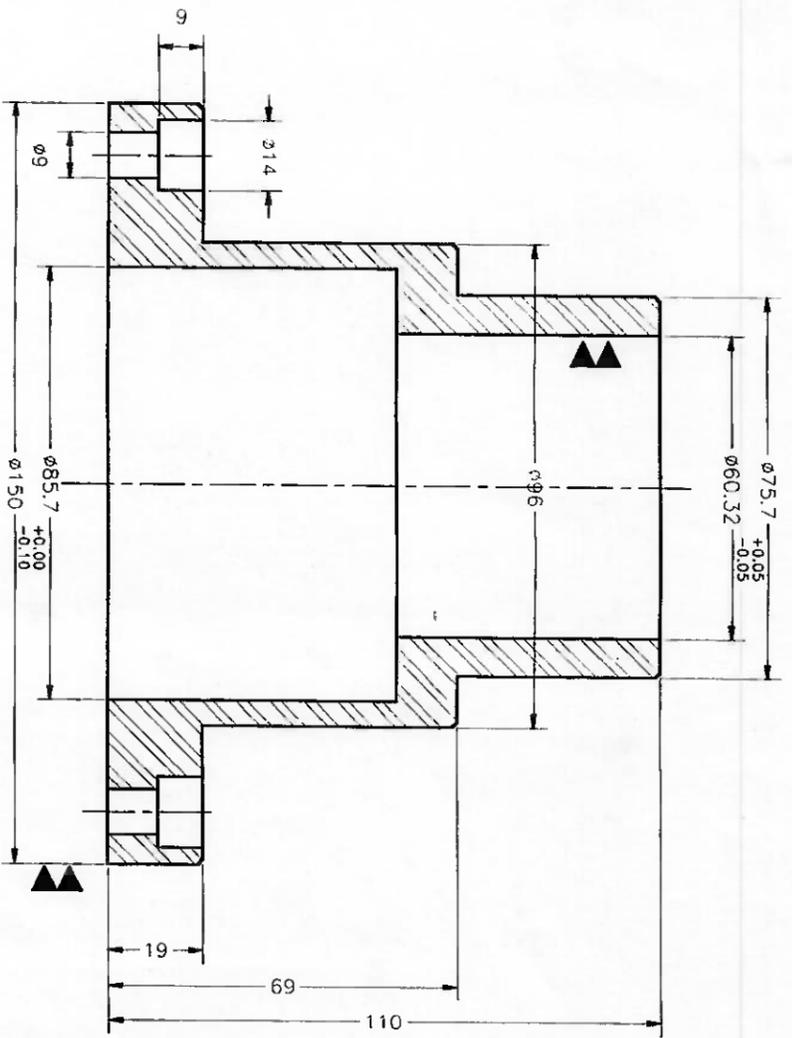
▼ [W]

02	BAR. Ø260X20	ALUMINIO	01
POS. COM.	DISCRIMINACAO	MATERIAL/NORMA	QUA. DESEN.NUM.

### ESCOLA POLITECNICA - USP

SINAIS DE USINAGEM		MAQUINA	PROJETADO	R.L.LAROZETTO
~	▼	▼	DESENHADO	
BRUTO	DESB.	LISO	RETIF.	POLIDO
TOLERANCIA QDO. NAO ESPECIFICADA	<10	10-100	100-1000	>1000
ESCALA	S/E	FORMATO	AI	
0,1mm	0,2mm	0,3mm	0,4mm	
QUEBRAR OS CANTOS VIVOS NAO ESPECIFICADOS				
OBIS:		ARQUIVO:	NUMERO	REV.
		TESLA.DWG		
		TITULO: TURBINA DE TESLA DETALHE		



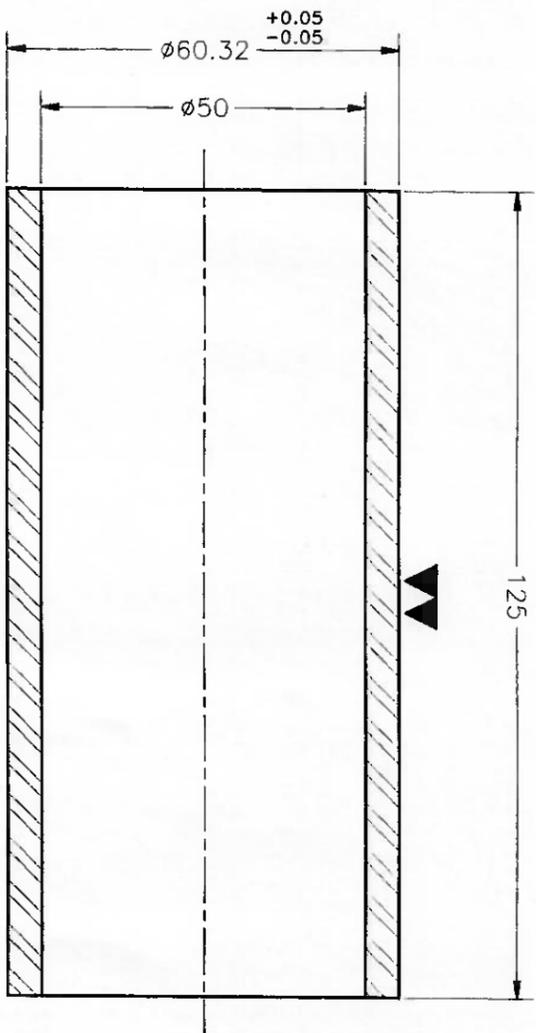


▼ [VV]

03	BAR. Ø150X110	ALUMINIO	01	
POS. COM.	DISCRIMINACAO	MATERIAL/NORMA	QUA.	DESEN.NUM.

## ESCOLA POLITECNICA - USP

SINAIS DE USINAGEM				MAQUINA	
~	▼	VV	VVV	VVVV	PROJETADO R.L.LABOZETTO
BRUTO	DESBJ.	LISO	RETIF.	POLIDO	DESENHADO
TOLERANCIA QDO. NAO ESPECIFICADA				ESCALA	TITULO:
<10	10-100	100-1000	>1000	S/E	TURBINA DE TESLA
0,1mm	0,2mm	0,3mm	0,4mm	FORMATO A1	DETALHE
OBS: QUEBRAR OS GANTOS VIVOS NAO ESPECIFICADOS					
ARQUIVO: TESLA.DWG		NUMERO		REV.	

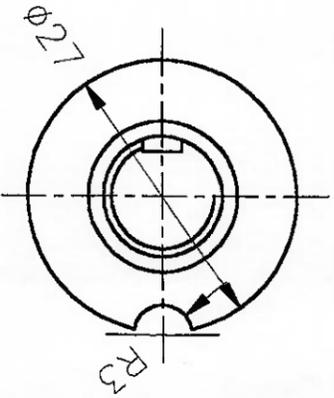
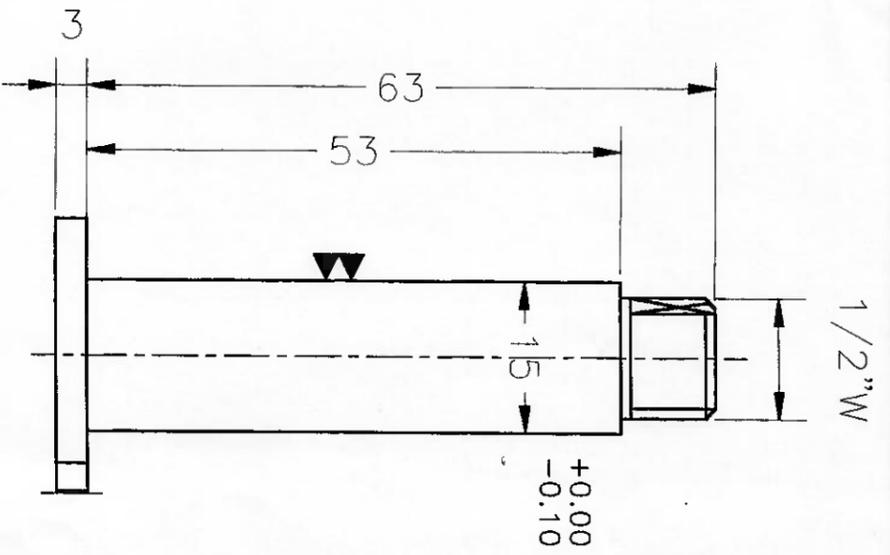


▼ [▼]

04	BAR. $\phi 65 \times 40 \times 125$	ALUMINIO	01	
POS. COM.	DISCRIMINACAO	MATERIAL/NORMA	QUA.	DESEN. NUM.

## ESCOLA POLITECNICA - USP

SINAIS DE USINAGEM					MAQUINA		PROJETADO R.L.LABOZETTO		REV.
~	▼	▼▼	▼▼▼	▼▼▼▼	DESENHADO	APROVADO	TITULO:	NUMERO	
BRUTO	DESB.	LISO	RETIF.	POLIDO	ESCALA		TURBINA DE TESLA		
TOLERANCIA ODD. NAO ESPECIFICADA					S/E		DETALHE		
<10	10-100	100-1000	>1000		FORMATO				
0,1mm	0,2mm	0,3mm	0,4mm		A1				
QUEBRAR OS CANTOS VIVOS NAO ESPECIFICADOS					ARQUIVO:				
OBS:					TESLA.DWG				



▼ [VV]

08	BAR. Ø27X66	AÇO INOX	03	
POS. COM.	DISCRIMINACAO	MATERIAL/NORMA	QUA.	DESEN.NUM.

## ESCOLA POLITECNICA - USP

### SINAIS DE USINAGEM

~ ▼ VV VV VV VVV

BRUTO DESB. LISO RETIF. POLIDO

TOLERANCIA ODO. NAO ESPECIFICADA

<10 10-100 100-1000 >1000

0,1mm 0,2mm 0,3mm 0,4mm

QUEBRAR OS CANTOS VIVOS NAO ESPECIFICADOS

### MAQUINA

PROJETADO R.L.LABOZETTO

DESENHADO

APROVADO

### ESCALA

S/E

FORMATO A1

TITULO: TURBINA DE TESLA

DETALHE

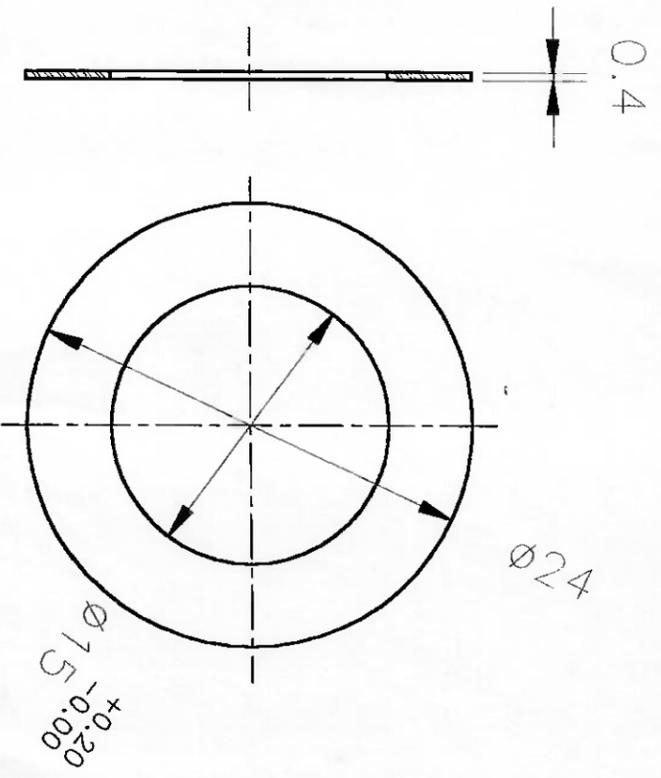
OBS:

ARQUIVO: TESLA.DWG

NUMERO

REV.





10	CH. 0,4XØ24	ALUMINIO	63	
POS.	COM.	DISCRIMINACAO	MATERIAL/NORMA	QUA. DESEN.NUM.

## ESCOLA POLITECNICA - USP

SINAIS DE USINAGEM				MAQUINA	PROJETADO	R.L.LABOZETTO
~	▼	▼▼	▼▼▼		DESENHADO	
BRUTO DESB. LISO RETIF. POLIDO					APROVADO	
TOLERANCIA QDO. NAO ESPECIFICADA				ESCALA	TITULO:	
<10	10-100	100-1000	>1000	S/E	TURBINA DE TESLA	
0,1mm	0,2mm	0,3mm	0,4mm	FORMATO	DETALHE	
QUERER OS CANTOS VIVOS NAO ESPECIFICADOS				A1	ARQUIVO:	TESLA.DWG
OBS:				NUMERO	REV.	