

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO TORQUE ESTACIONÁRIO DE UMA
TURBINA DE MÚLTIPLOS DISCOS COM DIFERENTES
CONFIGURAÇÕES DE ROTOR

por

Ruddy Renato Bazan Antequera

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2019

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO TORQUE ESTACIONÁRIO DE UMA TURBINA
DE MÚLTIPLOS DISCOS COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ROTOR

por

Ruddy Renato Bazan Antequera
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Aprovada por:

Prof. Dr. Sergio Viçosa MöllerPROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu ZevallosPROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Paulo Roberto WanderUNISINOS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 13 de Junho de 2019

Dedico esse trabalho aos meus pais Renato, Sonia e meu irmão
Ronny que mesmo morando longe de mim os levo na mente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Agradeço à Universidade Federal de Rio Grande do Sul UFRGS e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para a elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Paulo Smith Schneider pela dedicação e paciência.

Ao aluno de doutorado André Thomazoni pelos comentários e contribuições durante este trabalho.

À banca examinadora pelo tempo dedicado à revisão deste trabalho.

À minha esposa Nelzy, razão da minha serenidade, que sempre me apoiou incondicionalmente nas decisões, paciência e suporte no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Luis Rocha e aos colegas: Giovanni Andrade, Lucas Raymundo, Cristiane Schweinberger, Bruno Bueno, Filipe Carvalho pela ajuda, apoio e amizade.

RESUMO

O presente trabalho avalia o comportamento do torque estático experimental de um protótipo de Turbina de Múltiplos Discos (TMD) em laboratório para 7 diferentes configurações de rotor submetido a 5 níveis de pressão de entrada de ar comprimido, na faixa de 200 kPa até 400 kPa. O rotor é composto por dois discos externos montados sobre o eixo da turbina, que é capaz de receber uma combinação de discos internos. As montagens testadas variam de número nulo de discos internos até 4 discos paralelos, seguido por 3 combinações de espaçamento de 2 discos. Observa-se uma dependência linear do torque estático experimental medido com uma célula de carga $Torq_{célula}$ com a pressão de entrada do ar comprimido, o que é esperado para as turbinas que operam com condição de bloqueio no bocal. Os valores do torque estático medidos com célula de carga $Torq_{célula}$ são comparados com aqueles medidos com um torquímetro $Torq_{torq}$ e com valores de torque estático calculado através do modelo de placa plana ($Torq_{pp}$). Observaram-se diferenças máximas de torque de 3,45% e 15,83% respectivamente, comprovando que todos os procedimentos de calibração e redução de ruídos elétricos desenvolvidos na bancada experimental da TMD foram apropriados. Os resultados mostram que existe um aumento do torque estático desde 0,28 N·m para a pressão de 200 kPa até 1,22 N·m para a pressão de 400 kPa, o que representa um aumento de 4,35 vezes do valor inicial.

Palavras-chave: Turbina de múltiplos discos; Turbina Tesla; Rotor estacionário; Torque estacionário.

ABSTRACT

The present study evaluates the experimental static torque behavior of a Multi Disk Turbine (MDT) prototype in laboratory for 7 different rotor configurations submitted to 5 compressed air inlet pressure levels, in the range of 200 kPa to 400 kPa. The rotor consists of two outer disks mounted on the turbine shaft, which is capable of receiving a combination of internal disks. The tested assemblies range from null number of internal disks to 4 parallel disks, followed by 3 combinations of spacing with 2 disks. A linear dependence of the experimental static torque measured with a load cell is observed with the compressed air inlet pressure, which is expected for turbines that operate with blocking condition in the nozzle. The static torque values measured with load cell $Torq_{célula}$ are compared with $Torq_{torq}$ (torque meter measures) and $Torq_{pp}$ (flat plate model values). It is observed the maximum torque differences of 3.45% and 15.83% respectively, proving that all the calibration and noise reduction procedures developed in the MDT experimental bench were appropriate. The results show that there is an increase of the static torque from 0.28 N·m to the pressure of 200 kPa to 1.22 N·m to the pressure of 400 kPa, which represents an increase of 4.35 times the initial value.

Keywords: Multiple Disk Turbine; Tesla turbine; Stationary rotor; Static torque.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Trabalhos desenvolvidos com a Turbina Tesla	1
1.3	Questão de pesquisa.....	3
1.4	Objetivos.....	4
1.4.1	Objetivo geral	4
1.4.2	Objetivos específicos	4
1.5	Estrutura do trabalho	4
2	DESCRIÇÃO DA TURBINA DE MÚLTIPLOS DISCOS (TURBINA TESLA) ..	6
2.1	Turbina Tesla.....	6
2.2	Descrição da turbina Tesla experimental.....	7
2.2.1	Bocal convergente	8
2.2.2	Rotor.....	10
2.2.3	Envoltório ou carcaça	11
2.3	Modelo analítico de placa plana numa TMD	12
2.4	Teorema do Pi de Buckingham para análise adimensional	15
2.5	Funcionamento da bancada experimental.....	16
2.6	Sistema de aquisição de dados da bancada experimental.....	17
2.6.1	Sensores de pressão	18
2.6.2	Sensores de temperatura	19
2.6.3	Sensor de força	19
2.6.4	Medidor de vazão	19
2.6.5	Dispositivos de aquisição de dados	20
2.6.6	Torquímetro estático digital.....	20
2.7	Redução dos ruídos elétricos de medição.....	20
2.8	Calibração do sistema de medição.....	22
3	MÉTODO EXPERIMENTAL	25
3.1	Equacionamento das grandezas calculadas	25
3.1.1	Massa específica	26

3.1.2	Número de Mach	26
3.1.3	Propriedades críticas.....	27
3.1.4	Vazão mássica medida com o Venturi	27
3.1.5	Vazão mássica pela expansão isentrópica em bocais	28
3.1.6	Torque medido pelo sensor de força.....	28
3.2	Incerteza.....	28
3.2.1	Incerteza das grandezas medidas	29
3.2.2	Incerteza das grandezas calculadas.....	35
3.3	Aperfeiçoamentos feitos no Software LabView	35
3.3.1	Painel frontal.....	35
3.3.2	Diagrama de blocos	36
4	RESULTADOS E ANÁLISE DO DESEMPENHO DA TURBINA	37
4.1	Descritivo do experimento.....	37
4.2	Resultado das grandezas medidas.....	40
4.3	Resultado das grandezas calculadas	45
4.4	Vazão mássica medida pelo Venturi e condição de bloqueio	48
4.5	Resultado do desempenho da turbina e validação da medição de torque.....	51
4.5.1	Análise do desempenho da turbina pelo torque $Torq_{célula}$	51
4.5.2	Ajuste de dados experimentais usando o teorema de Buckingham.....	54
4.5.3	Comparação do $Torq_{célula}$ com o torque teórico $Torq_{pp}$	55
4.5.4	Validação da medição de torque do eletrodinômetro	56
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	APÊNDICE A Dedução de Equações	64
	APÊNDICE B Histogramas	66
	APÊNDICE C Calibrações	70
	APÊNDICE D Planilha de Incerteza	81
	APÊNDICE E Dados das Grandezas Medidas	84
	APÊNDICE F Dados das Grandezas Calculadas por Equacionamento	87

APÊNDICE G Comparação das Grandezas Medidas para Diferentes Configurações de Discos	91
APÊNDICE H Comparação das Grandezas Calculadas por Equacionamentos para Diferentes Configurações de Discos	105
ANEXO I Sistema de Medição	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Desenho da TMD patenteada por Nikola Tesla em 1913	7
Figura 2.2	Turbina Tesla experimental com: a) vista superior em corte, b) trajetória do fluido dentro dos discos paralelos [Adaptado de Vincent, 2012], c) corte transversal da carcaça, d) carcaça da turbina	8
Figura 2.3	Variação de razão de pressão de um fluido ao longo de um bocal convergente, P_o é a pressão de estagnação, P_b é a contrapressão na descarga do bocal e P^* é a pressão equivalente ao bloqueio do escoamento [adaptado de Çengel, 2006]	9
Figura 2.4	Bocal convergente	10
Figura 2.5	Rotor de 4 discos junto ao eixo da turbina Tesla	10
Figura 2.6	Carcaça: (a) dimensões e (b) estrutura	11
Figura 2.7	Perfil de velocidade entre duas placas	12
Figura 2.8	Torque de uma distribuição de forças sobre a seção reta de um cilindro	13
Figura 2.9	Desenho esquemático da TMD mostrando a disposição dos pontos de medição para obtenção de dados de entrada (grandezas medidas)	17
Figura 2.10	Sequência de aquisição de dados: a) etapas em geral, b) etapas seguidas na bancada experimental	18
Figura 3.1	Desenho esquemático da TMD mostrando a disposição dos pontos das grandezas calculadas.....	25
Figura 3.2	Planilha para cálculo de incerteza de grandezas medidas	32
Figura 3.3	Painel frontal para acompanhamento de dados na turbina Tesla	36
Figura 3.4	Diagrama de blocos no software LabView	36
Figura 4.1	Detalhe do corte transversal da turbina Tesla	38
Figura 4.2	Temperaturas da entrada do bocal T_{-eb} , entrada da carcaça T_{-ec} e saída da carcaça T_{-sc} vs Pressão de entrada P_{-eb} para todas as configurações dos discos. As linhas pontilhadas representam as curvas de ajuste obtida com os dados da turbina na configuração.....	41
Figura 4.3	Pressão de entrada da carcaça P_{-ec} e saída da carcaça P_{-sc} vs Pressão de entrada P_{-eb} para todas as configurações dos discos. As linhas pontilhadas representam as curvas de ajuste.....	42
Figura 4.4	Pressão diferencial P_{-dif} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos	43

Figura 4.5 Massa do sensor de força m vs Pressão de entrada P_{-eb} para as configurações de discos da: a) aumentando o número de discos no rotor, b) modificando o espaçamento entre dois discos no rotor.....	44
Figura 4.6 Massa específica na entrada do bocal ρ_{-eb} , crítica na saída do bocal ρ_{-sb}^* , entrada da carcaça ρ_{-ec} e saída da carcaça ρ_{-sc} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos.....	45
Figura 4.7 Velocidade do ar na entrada V_{-eb} e na saída do bocal V_{-sb} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos	46
Figura 4.8 Número de Mach na entrada do bocal M_{-eb} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos	47
Figura 4.9 Temperatura crítica na saída do bocal T_{-sb}^* vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos	47
Figura 4.10 Vazão medida pelo Venturi \dot{m}_{vent} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos	48
Figura 4.11 Vazão mássica calculada pelo Venturi \dot{m}_{vent} e Vazão mássica calculada no bloqueio \dot{m}_{bloq} vs. Pressão de entrada P_{-eb}	49
Figura 4.12 Número de Mach na saída do bocal M_{-sb} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos	50
Figura 4.13 Torque $Torq_{célula}$ vs Pressão de entrada P_{-eb} vs Vazão mássica do bloqueio \dot{m}_{bloq} para todas as configurações de disco: a) primeira parte, b) segunda parte.....	52
Figura 4.14 Prova de análise dimensional Π_1 vs Π_2 para todas as configurações dos discos ..	54
Figura 4.15 Comparação dos torques $Torq_{célula}$ e $Torq_{pp}$ para a configuração de discos III ..	56
Figura 4.16 Torquímetro instalado na turbina Tesla	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Percentagem de redução de ruídos elétricos para sensores de pressão, sensores de temperatura e sensor de força	22
Tabela 3.2	Curvas de operação das grandezas medidas na TMD	24
Tabela 4.1	Valores de Fator Divisor segundo a distribuição de probabilidade [ISO GUM, 2008].....	30
Tabela 4.2	Fator de abrangência k_p em função dos Graus efetivos de liberdade V_{eff} para uma probabilidade de 95.45% [ISO GUM, 2008].....	31
Tabela 4.3	Parâmetros que influenciam o valor das incertezas de medição dos sensores	34
Tabela 4.4	Incerteza expandida de medição de cada sensor.....	34
Tabela 5.1	Configuração de rotores proposta para a primeira parte do experimento.....	39
Tabela 5.2	Configuração de rotores proposta para a segunda parte do experimento	40
Tabela 5.3	Resultado do desvio relativo percentual entre P_{-eb} e P_{-alim}	41
Tabela 5.4	Avaliação da vazão calculada pelo Venturi \dot{m}_{vent} e a vazão calculada por escoamento isentrópico \dot{m}_{bloq}	49
Tabela 5.5	Avaliação entre número de Mach sônico e Mach calculado na saída do bocal.....	51
Tabela 5.6	Variação de torque $Torq_{célula}$ entre pressões de 200 kPa e 400 kPa	53
Tabela 5.7	Comparação entre valores de pressão e torque, utilizando o sensor de força e o torquímetro	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANSYS	Swanson Analysis Systems
DAQ	Data acquisition
EES	Engineering Equation Solver
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	Organização Internacional de Padronização
LabView™	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
NBR	Norma Brasileira
LETA	Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos
NI	National Instruments
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RTD	Resistance Temperature Detector
TMD	Turbina de Múltiplos Discos
UFRGS	Universidade Federal de Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do escoamento, m ²
a_s, b_s	Constante para determinar desvio padrão do ajuste
b	Distância entre discos do rotor em paralelo, m
c_i	Coefficiente de sensibilidade
c	Velocidade do som no ar, m/s
C	Coefficiente de descarga
D	Diâmetro interno Venturi, m
F	Força, N
g	Aceleração gravitacional, m/s ²
k	Coefficiente isentrópico
k_p	Fator de abrangência
L	Distancia perpendicular ao eixo, m
m	Massa da célula de carga ou sensor de força, kg
\dot{m}	Vazão do ar, kg/s
\dot{m}_{bloq}	Vazão mássica (máxima) do ar em condições de bloqueio, kg/s
\dot{m}_{vent}	Vazão mássica de ar pelo Venturi, kg/s
M	Número de Mach
M_{-eb}	Número de Mach na entrada do bocal
M_{-sb}	Número de Mach na saída do bocal
n	Número de discos do rotor
P	Pressão, Pa
P_o	Pressão de estagnação, Pa
P_{-alim}	Pressão de alimentação, Pa
P_{-dif}	Pressão diferencial, Pa
P_{-eb}	Pressão de entrada do bocal, Pa
P_{-ec}	Pressão de entrada da carcaça, Pa
P_{-sc}	Pressão de saída da carcaça, Pa
P_{-sb}^*	Pressão crítica de saída do bocal, Pa
r_e	Raio externo do disco, m
r_i	Raio interno do disco, m
R_p	Correlação de Pearson

R	Constante do gases, (Pa·m ³)/(K·kg)
S	Desvio padrão do ajuste
T	Temperatura, K
T_o	Temperatura de estagnação, K
$T-amb$	Temperatura ambiente, K
$T-eb$	Temperatura na entrada do bocal, K
$T-ec$	Temperatura de entrada da carcaça, K
$T-sb$	Temperatura de saída da carcaça, K
$T-sb^*$	Temperatura crítica na saída do bocal, K
$Torq$	Torque, N·m
$Torq_{célula}$	Torque do sensor de força (célula de carga), N·m
$Torq_{torq}$	Torque do torquímetro estático digital, N·m
$Torq_{pp}$	Torque método da placas planas, N·m
U	Incerteza expandida de medição
$u_c(y)$	Incerteza padronizada combinada
$u(x_i), u_i(y)$	Incerteza padronizada (contribuições individuais)
V	Velocidade real da vazão de ar, m/s
V_{max}	Velocidade máxima da vazão entre discos, m/s
V_{med}	Velocidade média da vazão entre discos, m/s
$V-eb$	Velocidade do ar na entrada do bocal, m/s
$V-sb$	Velocidade do ar na saída do bocal, m/s
Vol	Volume vazio dentro da carcaça, m ³
V_{eff}	Graus efetivos de liberdade
v_i	Graus de liberdade
β	Relação de diâmetros do Venturi
ε	Coefficiente de expansibilidade atribuído
θ	Coordenada angular medida na superfície do rotor, rad
μ	Viscosidade dinâmica, kg/(m·s)
ρ	Massa específica, kg/m ³
ρ_o	Massa específica de estagnação, kg/m ³
$\rho-eb$	Massa específica na entrada do bocal, kg/m ³
$\rho-ec$	Massa específica na entrada da carcaça, kg/m ³
$\rho-sb$	Massa específica na saída da carcaça, kg/m ³

$\rho-sb^*$	Massa específica crítica na saída do bocal, kg/m ³
Π	Equivalente adimensional,
τ_p	Tensão de cisalhamento na parede, kg/(s ² ·m)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A turbina de múltiplos discos (TMD), também conhecida como turbina Tesla, é uma turbomáquina que converte a entalpia do fluido utilizado em trabalho de eixo. Ela apresenta benefícios técnicos por operar em baixa rotação, prescinde de dispositivos de redução para ser acoplada a um gerador elétrico, não apresenta problemas de cavitação e tem longa vida útil, razões que a tornam um equipamento robusto, com manutenção mais simples e menos frequente. Por isto, a TMD pode ser uma alternativa para a recuperação de correntes com baixa disponibilidade termodinâmica, também permitindo a redução da escala e redução do risco operacional, já que pode ser usada na microgeração de energia elétrica na ordem de 100 kW [Cairns, 2001; Batista, 2009]. Para entender o desempenho da turbina é necessário avaliar o torque, que se refere à capacidade da máquina de transferir trabalho para qualquer dispositivo acoplado ao seu rotor. Na literatura se reportam avaliações experimentais e numéricas para rotor em movimento e algumas para rotor parado [González, 2012; Maidana, 2015; Carvalho, 2018]. O estudo do comportamento da turbina Tesla com os discos estacionários permite compreender o comportamento dos diferentes parâmetros operacionais da turbina, tais como o torque, vazão mássica, pressão, temperatura e velocidade em vários pontos da turbina.

1.2 Trabalhos desenvolvidos com a Turbina Tesla

A turbina de múltiplos discos foi apresentada e patenteada por Nikola Tesla, 1913, e trata-se de uma turbomáquina com rotor composto por discos montados em paralelo, separados por arruelas espaçadoras, e montados em um eixo para formar o rotor.

Leaman, 1950, estudou e construiu uma turbina de múltiplos discos (TMD) acionada com ar comprimido. Ele experimentou discos com diferentes texturas e descobriu que os discos lisos trabalham um pouco melhor do que os ásperos, e observou que mudanças na configuração de mancais, bocais e no número de discos influenciaram no aumento do desempenho da turbina, chegando a triplicar valores de potência de 27,5 W a 87 W e eficiência de 2,9% para 8,6% usando discos de 120 mm de diâmetro em pressões de 3,44 kPa até 2,76 kPa.

Rice, 1965, ressaltou que a turbina Tesla distingue-se das demais turbinas pois o rotor é composto por discos paralelos e espaçados ao longo do eixo, e a conversão de energia se dá pela fricção do fluido de trabalho com a superfície dos discos. O autor realizou um trabalho analítico e experimental que resultou no desenvolvimento de um modelo paramétrico que permite analisar sua eficiência. Ele concluiu que as turbinas de múltiplos discos são viáveis em aplicações nas quais é necessária baixa potência devido ao custo do equipamento e as propriedades do fluido de trabalho. Foi estudado o comportamento de rotores de 9 e 11 discos, com eficiências de até 23,2% para pressões na faixa de 276 kPa até 965 kPa e rotações de 6000 rpm até 12000 rpm.

Ao longo dos anos foram pesquisadas diferentes aplicações da turbina Tesla. Cairns, 2001, propôs o uso em carros e aviões leves ilustrando a flexibilidade do seu conceito. O autor apontou para a vantagem da alta relação potência/peso, configuração simples, uso de combustível de baixa qualidade, baixos custos de fabricação, bem como reduções significativas nas emissões e níveis de ruído. Finalmente, ele forneceu detalhes de desenho e construção de uma pequena turbina Tesla para construir a partir de materiais e técnicas atuais.

Harwood, 2008, simulou a vazão interna da turbina Tesla com o software ANSYS, e assim demonstrou a existência de um vórtice e uma contrapressão entre os discos. Além disso, avaliou o comportamento do fluido em função da pressão de entrada, verificando que a medida que aumentava a pressão o comportamento se aproximava para o modelo bidimensional. Através dos dados de simulação obteve um torque dinâmico de 0,007 N·m para cada disco a partir de uma pressão de 100 kPa em discos de 100 mm de radio externo.

Lezsovits, 2009, propôs a aplicação de turbinas de múltiplos discos em sistemas industriais de cogeração com vapor para fornecimento de energia elétrica no meio rural. A eficiência da turbina foi entre 30% - 40% na carga nominal, para vapor de entrada saturado. Além disso, a aplicação deste sistema em comparação com outro tipo de instalações de equipamento de expansão não necessitava de purificação adicional da água de alimentação da caldeira.

Além destas referências outros trabalhos relacionados à operação da turbina avaliaram o rotor estacionário e em movimento [Lawn, 1972; Murata et al., 1976; Tahil, 1998; Placo et al., 2010; Ho-Yan, 2011; Neckel, 2013; Guha e Sengupta, 2014; Galindo, 2016]. Por exemplo, Placo et al., 2010, desenvolveram um protótipo de uma TMD com o objetivo de estudar seu desempenho em determinadas condições. Tendo ar comprimido como fluido de trabalho, os resultados mostraram que a potência da turbina aumenta cerca de 50% ao dobrar

o número de discos, já que modificando a defasagem entre os orifícios de descarga dos discos em 30° positivos com a normal ao plano dos discos, resultou em um ganho de potência de até 12% em comparação com o sistema de orifícios alinhados. Ho-Yan, 2011, propôs o uso da turbina Tesla em um sistema hidrelétrico com capacidade de produção de energia de 300 W sob condição de 2,5 L/s de fluxo. Usou o programa Matlab para ampliar o trabalho de investigação analítica de Rice, 1965, sobre as turbinas Tesla. As dimensões gerais da unidade projetada foram de um cubo de 0,5 m de cada lado e 31 discos. A eficiência do projeto da turbina foi de cerca de 80%, mas o autor esclareceu que as perdas de eficiência podem ser encontradas nos fluxos de entrada e exaustão, que não foram consideradas na análise.

Esses trabalhos apresentam resultados para o torque dinâmico das turbinas, mas poucos trazem valores do torque estático. Maidana, 2015, realizou a construção, ensaio e otimização de turbinas de múltiplos discos verificando como principais parâmetros de estudo o torque, potência e eficiência isentrópica. Também estudou as formas de otimização dos equipamentos através de testes para várias condições de operação e com várias combinações e tipos de rotores. Finalmente fez uma comparação entre os resultados experimentais de potência e eficiência isentrópica e comparou com resultados dos modelos analíticos disponíveis, demonstrando que o modelo do fator de atrito (FA) é o que melhor representa a operação do equipamento. O autor obteve valores de torque estático da turbina entre 0,02 N·m e 0,28 N·m para três níveis de abertura dos orifícios de exaustão entre pressões de 35 kPa até 315 kPa.

Em vista da escassa informação sobre torque estático das turbinas de múltiplos discos, o presente trabalho propôs medi-lo avaliando diferentes parâmetros que permitiram melhorar seu desempenho. O estudo foi conduzido com uma abordagem experimental, em um protótipo de turbina existente no Laboratório de Ensaio Térmicos e Aerodinâmicos (LETA) da Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS). Para isto, foram propostos testes com diferentes configurações de disco no rotor freado e diferentes estados termodinâmicos na admissão da TMD.

1.3 Questão de pesquisa

O presente trabalho buscou responder a seguinte questão da pesquisa:

O número de discos que compõem um rotor de uma turbina tesla influencia seu torque estacionário?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente o desempenho de diferentes combinações de discos no rotor de uma turbina de múltiplos discos por meio da medição de seu torque estacionário.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Consolidar a bancada de ensaios para o teste do torque com rotor estacionário;
- Determinação das melhores condições de operação considerando diferentes configurações de discos do rotor estacionário;
- Organizar os resultados na forma de uma base de dados disponível para outros trabalhos.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho divide-se em 5 capítulos.

O capítulo 1 apresenta a motivação para realizar o presente trabalho, revisão bibliográfica sobre a turbina de múltiplos discos (TMD) e os objetivos.

No capítulo 2 desenvolve-se a fundamentação teórica, descrição geométrica da turbina e elementos que compõem a turbina Tesla. Detalha-se a modelagem adotada para representar o torque teórico para posterior comparação com dados de bancada. Também se descreve os principais componentes da bancada da TMD existente no LETA e o sistema de aquisição de dados. Em vista das necessidades da bancada, também detalha-se o procedimento aplicado para a redução de ruídos e subsequentemente obter as curvas de calibração dos componentes da bancada.

O capítulo 3 apresenta o equacionamento necessário para determinar as grandezas calculadas, se determina as incertezas de todas as grandezas e em seguida se detalha a modificação do software LabView™.

O capítulo 4 realiza a comparação de resultados para diferentes configurações de discos no rotor freado e finalmente apresenta resultados do desempenho da turbina através da verificação de torque.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões obtidas neste trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

Os Apêndices A até H detalham todos os dados experimentais e comparação das diferentes condições.

O Anexo I descreve as características principais de cada componente utilizado no sistema de aquisição.

2 DESCRIÇÃO DA TURBINA DE MÚLTIPLOS DISCOS (TURBINA TESLA)

No presente capítulo descreve-se a fundamentação teórica da turbina Tesla, a dedução do modelo analítico de placas planas na TMD e o método de Buckingham para adimensionalizar o torque. Posteriormente, descreve-se a turbina de múltiplos discos (TMD) utilizada experimentalmente e os elementos que a compõem. Finalmente, descreve-se o efeito da redução de ruído de medição nos sensores e define-se a metodologia de calibração.

2.1 Turbina Tesla

Uma turbina é um dispositivo capaz de transformar diretamente a energia cinética de um fluido em trabalho. Estes dispositivos são enquadrados de acordo com uma classificação geral como turbomáquinas, que geralmente consiste num rotor que permite a transmissão de energia do fluido de trabalho para energia útil. Quando o fluido de trabalho é água, eles são classificados como turbinas hidráulicas, quando o fluido de trabalho é ar, eles são conhecidos como turbinas eólicas. Por outro lado, quando se fala de ciclos de potência, com o vapor como fluido de trabalho, este tipo de turbina é conhecido como turbina a vapor. Existem também sistemas que usam gás compressível como fluido de trabalho conhecidas como turbinas a gás. Entre outros tipos de turbinas se encontra a turbina de múltiplos discos TMD, que pode trabalhar com diferentes fluidos [Çengel, 2006].

Primeiramente, a TMD foi patenteada (número 1061142) em 1913 por Nikola Tesla, posteriormente a bomba tipo Tesla foi patenteada (número 1061206) no mesmo ano. Essas duas patentes estão baseadas nos mesmos princípios operacionais compostas por um rotor de discos planos. Com esses dispositivos ele propôs fazer uma gestão útil e eficiente de energia, especialmente nas aplicações industriais [Logan, 2003].

A turbina Tesla ou de múltiplos discos TMD consiste em um sistema de discos posicionados paralelamente entre si ao longo de um rotor. Ao inserir um jato de fluido tangencial ao plano dos discos, é criado um torque no eixo. Este torque pode ser aproveitado, por exemplo, para bombas de água e alternadores elétricos [Maidana, 2015]. A Figura 2.1 apresenta esquematicamente o princípio de operação das turbinas de múltiplos discos.

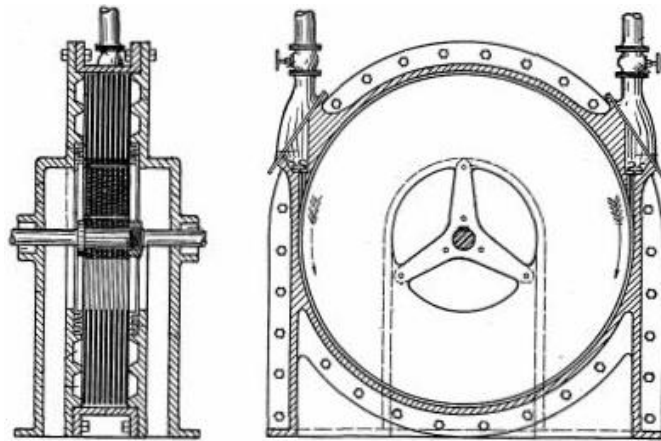


Figura 2.1 – Desenho da TMD patenteada por Nikola Tesla em 1913

[Adaptado de Cairns, 2001]

Nesta turbina o fluido é admitido em um bocal de aceleração que promove a transferência da energia mecânica associada à pressão do fluido em energia cinética. Em geral, uma turbina é composta de três partes principais: o bocal, um rotor e uma carcaça [Potter et al., 2012.]

Embora o propósito das turbinas Tesla seja idêntico às turbinas a gás convencionais, o mecanismo de conversão de energia nas turbinas Tesla é muito diferente. As turbinas a gás convencionais expandem o fluido de trabalho sobre as pás aerodinâmicas, produzindo uma força de sustentação em cada pá que induz o torque em torno de um eixo de acionamento rotativo. As turbinas Tesla dependem da força de cisalhamento do fluido na interface entre o fluido de trabalho e um conjunto interno de discos sem lâminas para gerar torque em torno do eixo de acionamento [Emran, 2011].

A turbina de múltiplos discos (TMD) utilizada neste trabalho foi montada e instalada por Maidana, 2015, no laboratório LETA da UFRGS. Maiores detalhes da turbina podem ser encontrados no trabalho de Ermel et al., 2017, que descreve a montagem e instalação experimental para a avaliação do desempenho e do torque dinâmico da turbina através do acompanhamento de variáveis medidas por sensores.

2.2 Descrição da turbina Tesla experimental

A turbina Tesla é constituída basicamente por uma entrada de fluido, um bocal, um rotor dentro de uma carcaça e uma saída do fluido [Maidana, 2015]. A Figura 2.2 apresenta cortes superior e transversal da turbina experimental Tesla a qual é detalhada nas seções seguintes.

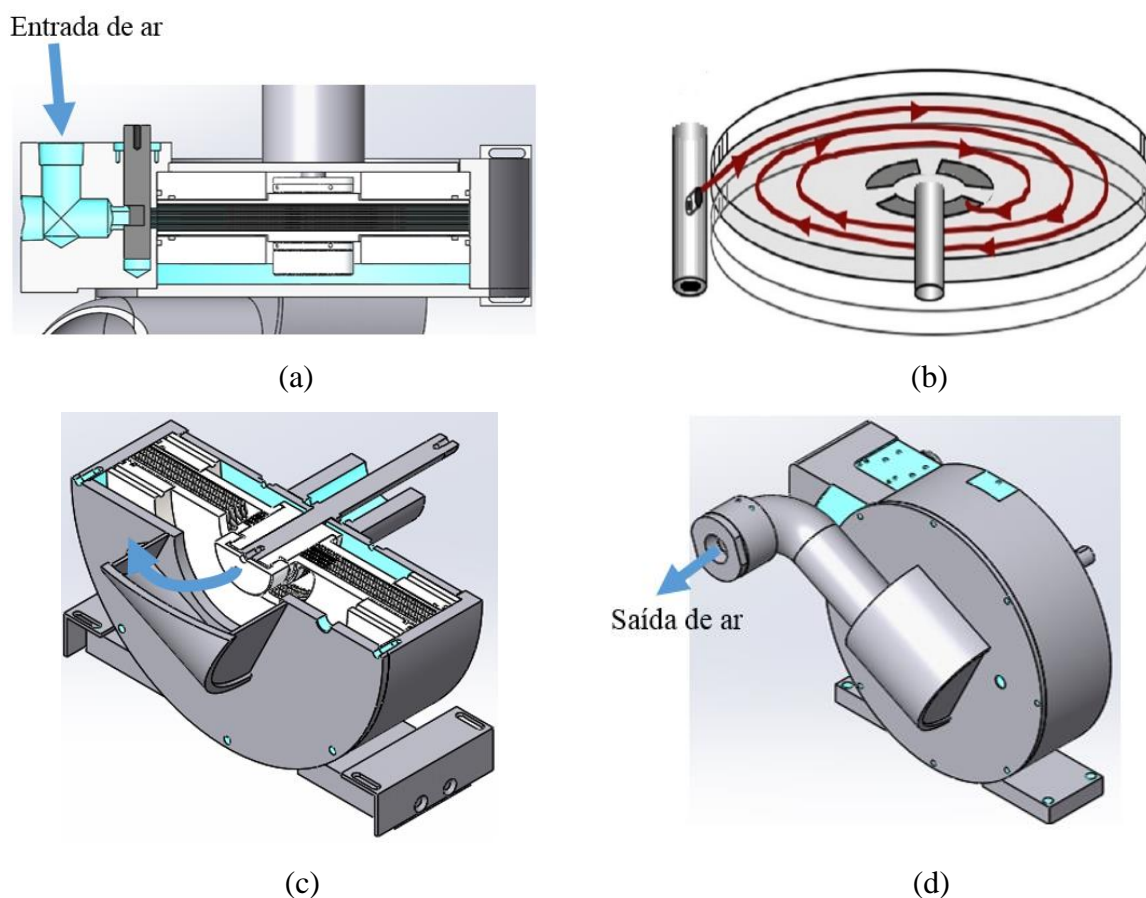


Figura 2.2 – Turbina Tesla experimental com: a) vista superior em corte, b) trajetória do fluido dentro dos discos paralelos [Adaptado de Vincent, 2012], c) corte transversal da carcaça, d) carcaça da turbina

O fluido proveniente de um compressor é injetado na periferia do rotor após a passagem pelo bocal convergente (ver Figura 2.2a), percorre uma trajetória espiral (ver Figura 2.2b), até ser descarregado por orifícios localizados no centro do rotor (ver Figura 2.2c), em direção ortogonal ao escoamento do fluido admitido na turbina, e paralelo ao eixo central, mostrado na Figura 2.2d.

2.2.1 Bocal convergente

O bocal é o componente responsável por converter a energia potencial do fluido de trabalho em cinética, para posterior injeção na carcaça da turbina. Os bocais podem ser dos tipos convergente ou convergente-divergente [Wylen et al., 2003] de acordo com a velocidade final pretendida. O bocal empregado neste estudo foi convergente.

Um bocal convergente tem formato longitudinal cônico, podendo ter uma seção transversal de várias formas geométricas. A Figura 2.3 apresenta um bocal convergente em corte, indicando os efeitos ligados à variação da contrapressão P_b .

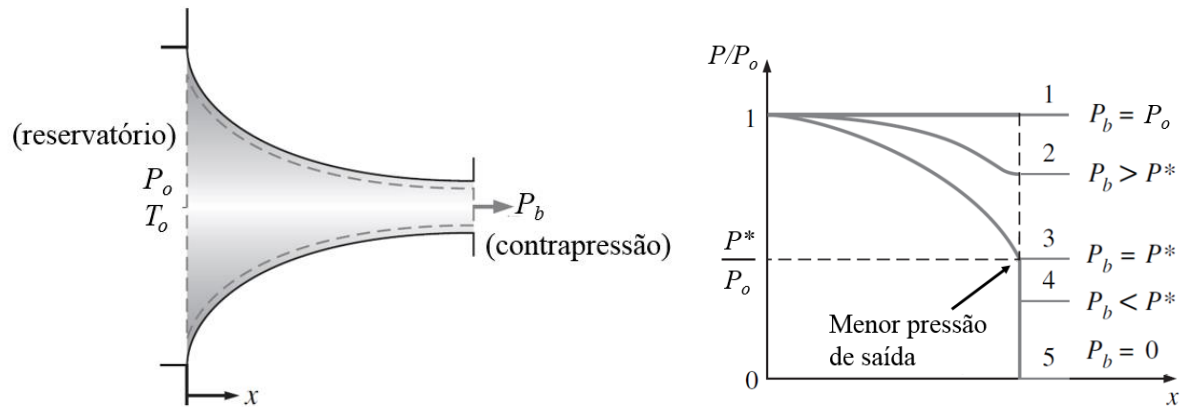


Figura 2.3 – Variação de razão de pressão de um fluido ao longo de um bocal convergente, P_o é a pressão de estagnação, P_b é a contrapressão na descarga do bocal e P^* é a pressão equivalente ao bloqueio do escoamento [adaptado de Çengel, 2006]

A reta 1 da Figura 2.3 apresenta o comportamento da contrapressão P_b quando é igual a pressão de estagnação P_o . Neste caso não existe escoamento e a distribuição da pressão é uniforme ao longo do bocal. As curvas 2 à 5 definem o comportamento da razão de pressão ao longo do bocal a medida que se reduz a contrapressão P_b . A curva 2 apresenta o comportamento do fluido quando a contrapressão é reduzida mas não chega à pressão de bloqueio ($P_b > P^*$). A pressão de bloqueio é aquela em que o escoamento atinge a velocidade do som na seção da garganta do bocal. Essa situação faz com que a pressão do fluido diminua ao longo do bocal na direção do escoamento. A curva 3 corresponde ao caso em que a contrapressão P_b é igual à P^* , atingindo a condição sônica ($P_b/P_o = 0,528$), e a vazão mássica atinge seu valor máximo. Uma maior redução da contrapressão até o $P_b < P^*$ e $P_b = 0$ (curvas 4 e 5 respectivamente) não resulta em variações adicionais na distribuição da pressão do fluido ao longo do comprimento do bocal [Çengel, 2006].

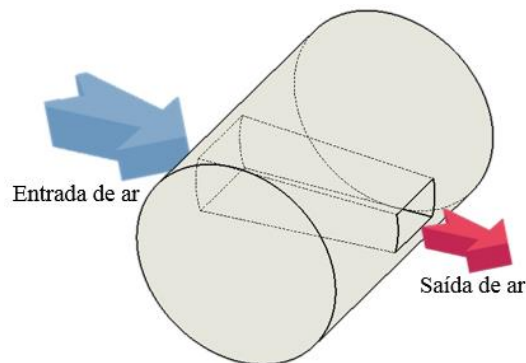


Figura 2.4 – Bocal convergente

O bocal convergente empregado neste estudo (ver Figura 2.4) tem como entrada uma área de 75 mm^2 (7,5 mm de comprimento e 10 mm de altura) e uma área de saída de 30 mm^2 (7,5 mm de comprimento e 4 mm de altura), assim o ar comprimido que entra no bocal percorre uma distância de 20 mm entre essas áreas.

2.2.2 Rotor

O rotor da bancada experimental é constituído por vários discos paralelos, intercalados entre si, e dispostos ao longo do eixo, como mostra a Figura 2.5.



Figura 2.5 – Rotor de 4 discos junto ao eixo da turbina Tesla

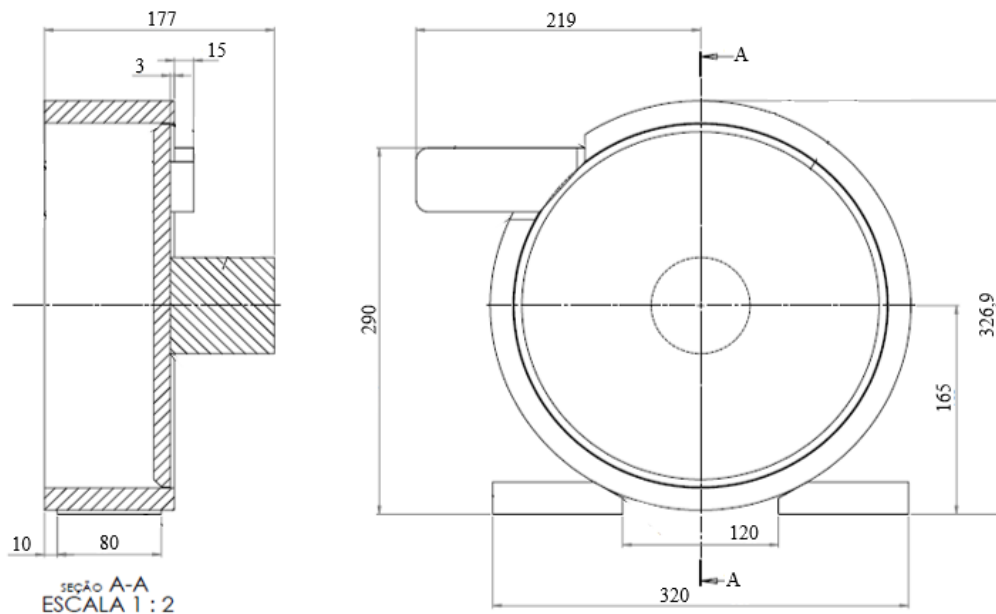
Observa-se que o rotor está formado por vários discos concêntricos de 1 mm de espessura, 300 mm de diâmetro externo e 100 mm de diâmetro interno em um eixo com dimensões de 20 mm de diâmetro e um comprimento de 200 mm.

Após passar pelo bocal convergente, o fluido escoava paralelamente aos discos montados no rotor. Durante esta trajetória, o fluido transfere sua energia cinética para os discos, para

depois ser descarregado para o exterior da carcaça por meio de orifícios de exaustão posicionados próximos ao eixo do rotor. A potência convertida pela turbina depende do número de discos e do espaçamento entre eles [Maidana, 2015].

2.2.3 Envoltório ou carcaça

O envoltório da turbina, ou carcaça, abriga o eixo rotor com discos e separadores, e deve garantir a estanqueidade do fluido de trabalho. A Figura 2.6a mostra o rotor com diâmetro interno de 300 mm e largura de 86 mm e a Figura 2.6b mostra a carcaça utilizada na bancada.



a)



b)

Figura 2.6 – Carcaça: (a) dimensões e (b) estrutura

Um canal de descarga de ar, perpendicular à carcaça, com diâmetro de 52,5 mm garante a saída do fluido, que posteriormente tem sua vazão mássica determinada experimentalmente.

2.3 Modelo analítico de placa plana numa TMD

Este modelo aproxima o escoamento através do rotor como aquele que se estabelece entre duas placas planas, como mostrado na Figura 2.7.

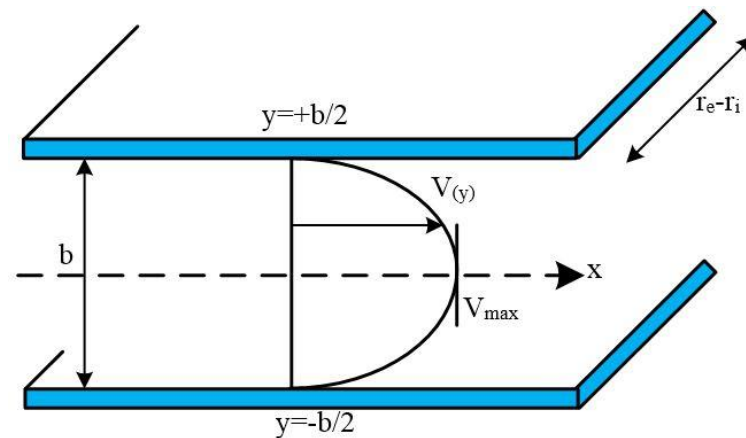


Figura 2.7 – Perfil de velocidade entre duas placas

O modelo considera o escoamento dum fluido incompressível estabelecido a partir das condições de estagnação de um bocal unidimensional sem atrito, através dos espaços entre os discos do rotor da turbina [Rice, 1965].

A vazão sobre uma placa plana pode ser utilizada para calcular analiticamente o torque estático, considerando um regime de escoamento laminar. Considerando o perfil de velocidade entre placas planas apresentado na Figura 2.7, aplica-se a equação de Navier Stockes na componente x para um escoamento incompressível com viscosidade constante, Equação 2.1.

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

As hipóteses simplificativas assumidas para essa equação são:

- Escoamento incompressível;
- Regime permanente;

- Escoamento totalmente desenvolvido;
- Regime laminar;
- As dimensões da placa nas direções x e z são muito maiores do que em y ;
- O escoamento do fluido é observado apenas na direção x ;
- Desprezam-se as forças de campo.

Usando todas estas considerações e de acordo com Rosa, 2015, procede-se à resolução da equação de Navier Stokes, Equação 2.1, obtendo-se desta forma a tensão de cisalhamento τ_p que é dada pela Equação 2.2, induzido pelo escoamento entre duas placas paralelas.

$$\tau_p = \frac{\mu V_{med} 12}{b} \quad (2.2)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido, [kg/(m·s)], V_{med} é a velocidade média da vazão entre as placas [m/s], e b é a distância entre dois discos [m]. Os detalhes dessa modelagem estão no Apêndice A.

Este modelo considera apenas o escoamento laminar de ar que atua tangencialmente nos discos da turbina, como mostra a Figura 2.8.

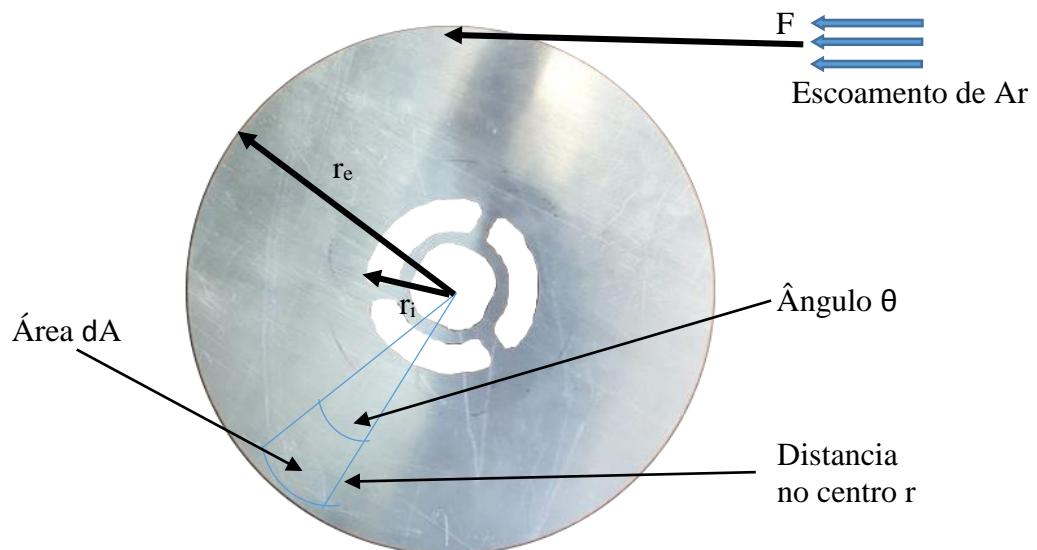


Figura 2.8 – Torque de uma distribuição de forças sobre a seção reta de um cilindro

Expressa-se o elemento infinitesimal de área dA pela Equação 2.3,

$$dA = r dr d\theta \quad (2.3)$$

em função da distância r desde o centro do disco e em um ângulo θ desde uma linha paralela ao escoamento. A força resultante F em cada placa é o produto da tensão de cisalhamento τ_p pela área de superfície A , expressa na Equação 2.4 em sua forma diferencial.

$$dF = \tau_p dA \quad (2.4)$$

O torque diferencial resultante de uma face exposta num único disco de turbina é representado pela Equação 2.4.

$$dTorg_{pp} = r dF \quad (2.5)$$

Portanto, usando as Equações 2.3 até 2.5, chega-se na Equação 2.6 para o torque diferencial.

$$dTorg_{pp} = \tau_p r^2 dr d\theta \quad (2.6)$$

O torque total para uma placa é dado pela integração dessa última equação, para $r=r_i$ até r_e , onde r é o raio do disco e $\theta=0$ até 2π , apresentado na Equação 2.7,

$$Torg_{pp} = \tau_p \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_e} r^2 dr d\theta \quad (2.7)$$

o que resulta na expressão para o torque $Torg_{pp}$ dado pela Equação 2.8.

$$Torg_{pp} = \tau_p 2\pi \left(\frac{r_e^3 - r_i^3}{3} \right) \quad (2.8)$$

Finalmente, com o auxílio da Equação 2.2 o torque $Torg_{pp}$ desenvolvido por um escoamento entre duas placas paralelas é dado pela Equação 2.9,

$$Torg_{pp} = \frac{8\pi\mu V_{med}}{b} (r_e^3 - r_i^3) \quad (2.9)$$

onde r_e e r_i são o radio do disco externo e interno respectivamente, [m].

2.4 Teorema do Pi de Buckingham para análise dimensional

O teorema de Buckingham foi proposto em 1914 e é conhecido hoje como teorema Pi de Buckingham. O nome de Pi vem da notação matemática Π para representar um produto de variáveis. Os grupos adimensionais encontrados a partir do teorema são produtos de potências denotados por Π_1, Π_2, Π_3 etc. A resolução de este método nos permite determinar os Pi's em ordem sequencial sem recorrer a expoentes livres [White, 2002].

A partir deste teorema é possível adimensionalizar o torque estático ($Torque_{celula}$) da TMD calculado a partir dos dados obtidos em laboratório. Observa-se que o torque é uma função da vazão mássica (\dot{m}_{bloq}), da pressão de entrada do bocal (P_{-eb}), do volume vazio dentro da carcaça (Vol) e da viscosidade do ar (μ). Na Tabela 2.1 se identifica as variáveis relevantes com suas respectivas dimensões para depois fazer um análise dimensional do problema.

Tabela 2.1 Descrição das variáveis

Descrição das variáveis	Símbolo	Dimensões
Torque	$Torque_{celula}$	ML^2T^{-2}
Vazão mássica	\dot{m}_{bloq}	MT^{-1}
Pressão entrada do bocal	P_{-eb}	$ML^{-1}T^{-2}$
Volume vazio dentro da carcaça	Vol	M^3
Viscosidade do ar	μ	$ML^{-1}T^{-1}$

Se estabelece o número de dimensões independentes e grupos não dimensionais.

- Número de variáveis relevantes: $n = 5$
- Número de dimensões independentes: $m = 3$ (L, M e T)
- Número de grupos não dimensionais (Π 's): $n-m = 2$

Criando os Π 's pela não-dimensionalização das variáveis restantes: $Torque_{celula}$, \dot{m}_{bloq} , P_{-eb} , Vol e μ .

- Para o $\Pi_1 = Torque_{celula} (P_{-eb})^a (Vol)^b (\mu)^c$

Em términos de dimensões:

$$M^0L^0T^0 = (ML^2T^{-2}) (ML^{-1}T^{-2})^a (L^3)^b (ML^{-1}T^{-1})^c$$

Obtem-se as constantes: $a=-1$, $b=-1$ e $c=0$

$$\Pi_1 = \frac{Torque_{celula}}{P_{-eb} Vol} \quad (2.10)$$

- Para o $\Pi_2 = \dot{m}_{bloq} (P_{eb})^a (Vol)^b (\mu)^c$

Em términos de dimensões:

$$M^0 L^0 T^0 = (MT^{-1}) (ML^{-1}T^{-2})^a (L^3)^b (ML^{-1}T^{-1})^c$$

Obtem-se as constantes: $a=0$, $b=-0,33$ e $c=-1$

$$\Pi_2 = \frac{\dot{m}_{bloq}}{\mu Vol^{0,33}} \quad (2.11)$$

Portanto, igualando as Equações 2.10 e 2.11, que são do teorema de Buckingham que garante uma relação funcional que deve ter a seguinte forma não dimensional equivalente da Equação 2.12 e de forma reduzida (ou simplificada) para a obtenção de $Torq_{célula}$ tem-se a Equação 2.13.

$$\left(\frac{Torq_{célula}}{P_{eb} Vol} \right) = f \left(\frac{\dot{m}_{bloq}}{\mu Vol^{0,33}} \right) \quad (2.12)$$

$$Torq_{célula} \approx (const) \left(\frac{P_{eb} \dot{m}_{bloq} Vol^{0,66}}{\mu} \right) \quad (2.13)$$

2.5 Funcionamento da bancada experimental

A Figura 2.9 apresenta esquematicamente a bancada experimental da TMD e a disposição das grandezas medidas por cada sensor, necessárias para a determinação do torque estático.

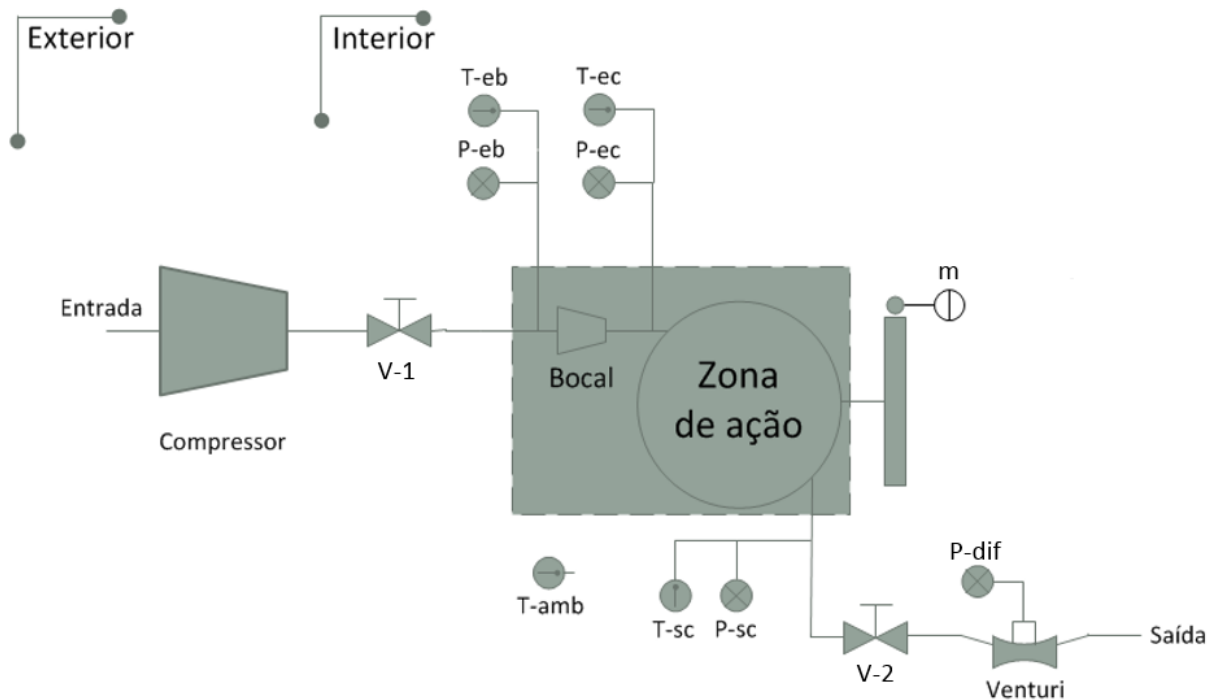


Figura 2.9 – Desenho esquemático da TMD mostrando a disposição dos pontos de medição para obtenção de dados de entrada (grandezas medidas)

O ar comprimido proveniente do compressor passa pela válvula reguladora de pressão $V-1$, para depois ser injetado na turbina através do bocal convergente. Nesse trecho são efetuadas as medições de pressão ($P-eb$) e temperatura ($T-eb$) do ar. Após a passagem do ar pelo bocal, são efetuadas as medições de pressão ($P-ec$) e temperatura ($T-ec$) do ar na entrada do volume interno da turbina, também se efetua a medição do sensor de força (m). Por fim o ar sai da zona de ação na qual o sistema registra os dados de pressão ($P-sc$) e temperatura ($T-sc$), passando pela válvula $V-2$ e ingressando ao Venturi no qual se registra dados de pressão diferencial ($P-dif$) para depois ser descarregado ao ambiente. Onde eb refere-se à entrada do bocal e ec e sc à entrada e saída da carcaça da turbina respectivamente.

2.6 Sistema de aquisição de dados da bancada experimental

O esquema geral da sequência de medição e aquisição de dados da bancada é descrito na Figura 2.10a, seguido de um detalhamento na Figura 2.10b.

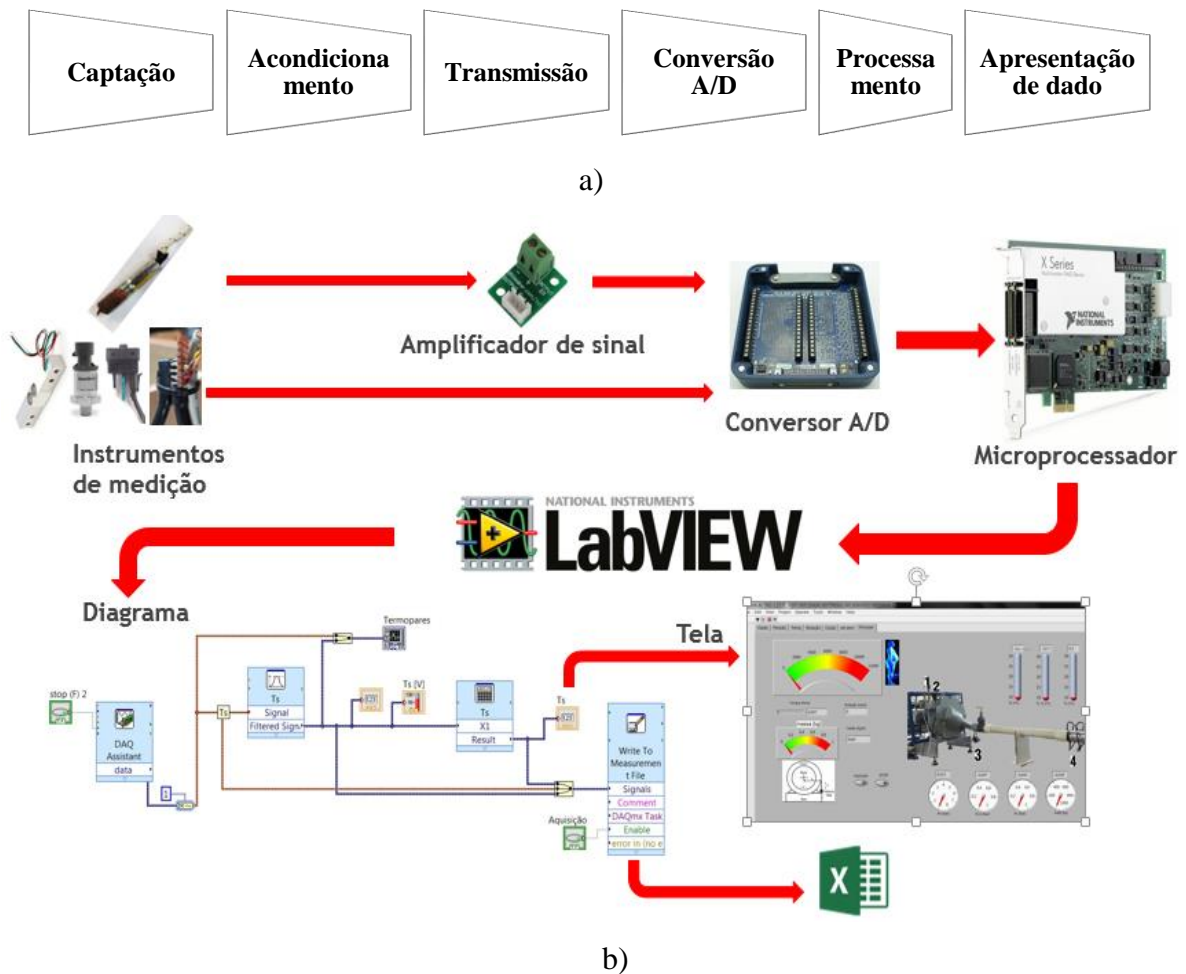


Figura 2.10 – Sequência de aquisição de dados: a) etapas em geral, b) etapas seguidas na bancada experimental

A instrumentação da bancada e seus componentes são descritos a seguir (maiores detalhes são descritos no Anexo I).

2.6.1 Sensores de pressão

Sensores de pressão do tipo capacitivo foram utilizados para medir a pressão manométrica do ar ao longo da bancada, com alimentação de 0 V à 5 V e de 0 V à 12 V, em corrente contínua. Ao total foram instalados três sensores de pressão (P_{-eb} , P_{-ec} e P_{-sc}) e um sensor de pressão diferencial (P_{-dif}), e os sinais foram coletados pelo sistema de aquisição de dados.

- **Sensor de pressão de entrada (*P-eb*)**

O sensor de pressão de entrada do bocal consiste num sensor de pressão de ar com faixa de medição de 0 kPa à 1000 kPa modelo standard.

- **Sensor de entrada da carcaça e saída da carcaça (*P-ec, P-sc*)**

Sensor utilizado na entrada e na saída da carcaça. Esses sensores são modelo standard e trabalham numa faixa de medição entre 0 kPa à 300 kPa.

- **Sensor de pressão diferencial (*P-dif*)**

O sensor de pressão diferencial é modelo standard com faixa de medição -2 kPa à 2 kPa.

2.6.2 Sensores de temperatura

Foram utilizados termopares do Tipo K modelo padrão (standard) para as medições de temperatura do ar. Os sensores instalados ao longo da bancada da turbina foram: na entrada do bocal (*T-eb*), na entrada da carcaça (*T-ec*) e na saída da carcaça (*T-sc*). Além disso, um sensor foi utilizado fora da bancada para medir a temperatura ambiente (*T-amb*). Os pontos de instalação dos termopares foram indicados na Figura 2.9. Esses sensores possuem uma larga faixa de trabalho (desde -200 °C até 1250 °C).

2.6.3 Sensor de força

O sensor de força (ou célula de carga) utilizado foi modelo Single Point. O ponto de instalação do sensor de força foi indicado na Figura 2.9, funciona numa faixa de medição de 0 kg até 1 kg. O sensor foi conectado externamente a um braço da turbina em equilíbrio.

2.6.4 Medidor de vazão

A vazão total de ar através da TMD foi registrada por um medidor de vazão volumétrica, do tipo Venturi, que foi construído conforme a norma ABNT NBR 5167-1:2008. O Venturi é capaz de medir vazões volumétricas em função dos limites de medição do sensor de pressão diferencial (*P-dif*), junto aos sensores de pressão de saída da carcaça (*P-sc*) e temperatura da saída da carcaça (*T-sc*) instalados. O sinal de cada sensor foi registrado pelo

sistema de aquisição de dados, isto com a finalidade de calcular a vazão total de ar comprimido.

2.6.5 Dispositivos de aquisição de dados

Para fazer a leitura dos sinais elétricos enviados pelos diferentes sensores instalados na bancada experimental foi utilizado um conversor SCB-68A para converter os sinais analógicos a digitais para posteriormente processar os dados no PCIe-6363 através dum cabo blindado que foi conectado ao computador. A placa foi configurada e controlada através do software computacional LabView™, com o objetivo de coletar dados e poder determinar diferentes variáveis na turbina Tesla em várias condições de pressão de entrada e operação. O software Labview™ é detalhado na seção 3.3.

2.6.6 Torquímetro estático digital

Para a verificação do torque estático foi utilizado um torquímetro digital portátil da Lutron, modelo TQ-8800, sendo o aparelho fixado ao eixo de rotação da TMD.

2.7 Redução dos ruídos elétricos de medição

Neste trabalho foram feitas ações para a diminuição dos ruídos elétricos de medição, existentes na bancada experimental, que são perturbações espontâneas de um sinal determinístico inerente à física do dispositivo. Todo componente não ideal contribui com ruído elétrico, o que diminui o desempenho geral do sistema [Von Haartman e Ostling, 2007] por isto diversas medidas são consideradas para reduzi-lo. A miniaturização dos dispositivos tem sido fomentada pela indústria de eletrônicos e pela demanda dos consumidores de se produzir equipamentos com melhor desempenho, que possam realizar tarefas cada vez mais complexas com a finalidade de diminuir a razão sinal-ruído elétrico. Sendo assim imprescindível que se desenvolvam técnicas para amenizar os efeitos de tal ruído [Furtado, 2015]. Atualmente existem técnicas com as quais diferentes tipos de ruídos elétricos podem ser reduzidos por meio de filtragem digital. Eles tem sido utilizados para o processamento

digital de sinais, pois apresentam baixa sensibilidade a ruídos e alta exatidão [Villa et al., 2004; Weng et al., 2006].

Levando-se tudo isso em consideração, foi feita a redução de ruídos elétricos produzidos na bancada para cada sensor. Inicialmente, foi observado que existiam mudanças bruscas de corrente elétrica, isto devido a que os sensores compartilhavam a mesma conexão elétrica nas placas de aquisição. Todos os sensores, exceto o *P-eb*, compartilharam tanto a conexão de entrada como de terra. Sendo assim, foi necessário saber o efeito da redução dos ruídos após as seguintes modificações. Foi feita a separação, distribuição e isolamento das conexões, criando um novo cabo terra, reduzindo o comprimento e trocando cabos para evitar o efeito de antena. Também foram usados condensadores na alimentação, que resolvem as mudanças de tensão e reduzem os loops de corrente nos circuitos integrados. Feito tudo isso, diminuiu-se os componentes resistivos e indutivos da impedância parasita na linha e se reduziu o loop de corrente, permitindo que o sistema se torne mais estável e apresente dados sem oscilações elétricas bruscas e, portanto, reduzindo o ruído elétrico de forma significativa.

Para observar a redução de ruídos elétricos procedeu-se a coletar dados experimentais. Após a análise dos dados pelo critério de Chauvenet foram obtidos os histogramas dos ruídos elétricos para cada sensor antes e depois das modificações já mencionadas (ver Apêndice B). Esses histogramas são utilizados para observar o comportamento dos resultados. Assim, é possível avaliar quantitativamente e na forma de uma distribuição gráfica características do processo, tais como: tendência, variabilidade e dispersão [Rodrigues e Lemma, 2012]. Observa-se que a distribuição dos histogramas foi normal, pela simetria dos dados, tanto antes como depois da redução dos ruídos. Sendo que o comportamento dos dados inicialmente era de um pico “platicúrtico” (indicando que tem vários valores com a mesma frequência), mudando para um pico “leptocúrtico” (no qual a frequência aumenta num valor) demonstrando uma diminuição dos ruídos elétricos. A Tabela 2.2, baseada no Apêndice B, apresenta um resumo das reduções dos ruídos elétricos (antes e depois) gerados pelos sensores existentes na bancada.

Tabela 2.2 – Percentagem de redução de ruídos elétricos para sensores de pressão, sensores de temperatura e sensor de força

Tipo de sensor		Número de medidas	Valores dos ruídos elétricos [V]			% de incerteza	% de redução de incerteza
			Limite inferior	Media	Limite superior		
P-eb	Antes	12900	1,021382	1,566138	2,085680	0,113713	28,0
	Depois	16600	0,771462	0,998003	1,245480	0,081852	
P-ec	Antes	12890	2,113531	3,240787	4,315868	0,114918	86,0
	Depois	16600	1,185122	1,240689	1,297148	0,015150	
P-sc	Antes	12900	2,477270	3,798526	5,058628	0,111827	87,8
	Depois	16600	1,184639	1,237144	1,285559	0,014797	
T-eb	Antes	12900	0,204376	0,738465	0,682354	0,103642	67,8
	Depois	16600	0,201232	0,228012	0,244532	0,033423	
T-ec	Antes	12900	0,345216	0,529338	0,704937	0,338535	92,5
	Depois	16600	0,214873	0,227973	0,243363	0,025243	
T-sc	Antes	12900	0,373556	0,550461	0,712988	0,107815	67,5
	Depois	16600	0,203284	0,228395	0,246743	0,035068	
T-amb	Antes	12900	0,360030	0,548077	0,831500	0,183130	85,8
	Depois	16600	0,211815	0,225531	0,239822	0,026084	
P-dif	Antes	12900	2,472615	3,690529	4,777020	0,123112	92,7
	Depois	16600	2,481474	2,578418	2,691364	0,008938	
m	Antes	12900	0,973509	1,492732	1,987922	0,113713	74,0
	Depois	16600	0,074044	0,054512	0,191856	0,029516	

Observa-se que a percentagem de redução de incerteza do *P-eb* é de 28%, que é a menor redução. A razão pela qual o sensor *P-eb* teve menor redução de ruídos elétricos se dá, principalmente, devido à instalação elétrica que não estava compartilhada com outros sensores, e pelas características do sensor em si. Por outro lado, os demais sensores apresentaram uma percentagem de redução da incerteza entre 67,5% e 92,7%, devido a todos os sensores terem sido separados e conectados num novo cabo de terra. Com esta redução de ruídos elétricos, o sistema pôde oferecer dados mais acurados.

2.8 Calibração do sistema de medição

A calibração é o resultado da comparação do comportamento de um instrumento em relação a um padrão. O padrão pode ser um ponto físico conhecido, como no caso da calibração de termômetros de platina frente a uma cápsula de ponto tríplice da água, por exemplo, ou por comparação com outro instrumento já anteriormente calibrado. Segundo Schneider, 2007, deve-se observar que as condições de calibração devem ser rigorosamente

iguais às de utilização do instrumento. Isto não é feito na maioria das vezes, resultando em discrepâncias em relação aos valores de calibração, aumentando portanto a incerteza da medição, que pode ser interpretado como degradação do desempenho do sistema de medição, indicando valores afastados dos supostamente verdadeiros. A calibração de um instrumento pode ser seguida de um ajuste para conformar sua resposta a valores anteriormente estabelecidos pelo fabricante, relacionando o valor indicado com o valor do padrão.

Uma sequência de eventos de medição forma uma amostra, que é usada para construir uma curva por meio de uma regressão, que pode ser linear, polinomial, ou outras que reproduzam o comportamento com um compromisso com o desvio obtido entre dados reais e ajustados. A obtenção da curva de regressão é obtida com a aplicação do método dos mínimos quadrados [Rodrigues e Lemma, 2012] aplicada a uma amostra experimental composta de n eventos, com a variável assumindo valores y_1, y_2, \dots, y_n . O método consiste em minimizar a soma dos quadrados dos desvios S , dada pela Equação 2.14,

$$\frac{\partial S}{\partial \bar{x}} = 0 = \sum_{i=1}^n -2(y_i - \bar{y}) = -2 \sum_{i=1}^n y_i - n\bar{y} \quad (2.14)$$

com S dado pela Equação 2.15,

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.15)$$

onde \bar{y} é o valor médio da amostra e y_i representa os valores de y correspondentes a valores de x . O desvio padrão do ajuste S é dado pela Equação 2.16.

$$S = \left[\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2} \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

Para verificar se existe relação linear entre duas amostras, com uma variável chamada de x e outra de y , usa-se o coeficiente de correlação de Pearson (R_p), calculado através da Equação 2.17, que assume valores na faixa $-1 \leq R_p \leq +1$.

$$R_p = \frac{n \sum x_1 y_1 - \sum x_1 \sum y_1}{[n \sum x_1^2 - (\sum x_1)^2] [n \sum y_1^2 - (\sum y_1)^2]} \quad (2.17)$$

O quadrado do coeficiente de correlação de Pearson é chamado de coeficiente de determinação ou simplesmente R_p^2 , o qual indica quanto da variação total é comum aos elementos que constituem os pares analisados em um modelo de regressão linear. R^2 varia entre 0 (zero) e 1 (um). Evidentemente, quanto mais próximo da unidade for o coeficiente de determinação, tanto maior será a validade da regressão.

A partir destas considerações foram feitas as curvas de operação para: as pressões ($P\text{-}eb$, $P\text{-}ec$, $P\text{-}sc$ e $P\text{-}dif$), temperaturas ($T\text{-}eb$, $T\text{-}ec$, $T\text{-}sc$ e $T\text{-}amb$), e a massa do sensor de força (m). A Tabela 2.3 apresenta as curvas de operação (ver Apêndice C).

Tabela 2.3 – Curvas de operação das grandezas medidas na TMD

Elemento	Curvas de operação	R_p^2
$P\text{-}eb$	$P\text{-}eb = 250,59V - 249,37$	1,0000
$T\text{-}eb$	$T\text{-}eb = 100,82V - 0,3211$	0,9999
$P\text{-}ec$	$P\text{-}ec = 79,88V - 101,63$	1,0000
$T\text{-}ec$	$T\text{-}ec = 103,01V - 1,8446$	0,9998
$P\text{-}sc$	$P\text{-}sc = 80,02V - 101,97$	0,9999
$T\text{-}sc$	$T\text{-}sc = 100,73V - 2,127$	0,9997
$T\text{-}amb$	$T\text{-}amb = 102,1V - 4,2315$	0,9999
$P\text{-}dif$	$P\text{-}dif = 1022,4V - 2666,1$	0,9999
m	$m = 227,51V + 0,6886$	1,0000

O coeficiente de determinação (R_p^2) para todas as curvas é aproximado a 1, indicando uma correlação satisfatoriamente linear entre as variáveis de cada curva de operação.

3 MÉTODO EXPERIMENTAL

O presente capítulo detalha a sequência empregada para obter as grandezas calculadas a partir das medições realizadas na bancada. Também se detalha a avaliação da propagação de incerteza das grandezas medidas e calculadas. Além disso, é apresentado o uso do software LabView™ e as modificações realizadas.

3.1 Equacionamento das grandezas calculadas

A partir das grandezas medidas (definidas na seção 2.5) e o conjunto de equações apresentadas na presente seção, foram obtidas as seguintes grandezas calculadas (ver Figura 3.1):

- **Na entrada do bocal:** massa específica $\rho\text{-}eb$, velocidade $V\text{-}eb$ e número de Mach $M\text{-}eb$;
- **Na saída do bocal:** pressão crítica $P\text{-}sb^*$, temperatura crítica $T\text{-}sb^*$, massa específica crítica $\rho\text{-}sb^*$, velocidade $V\text{-}sb$, vazão mássica \dot{m}_{bloq} , número de Mach $M\text{-}sb$ e torque $Torq_{célula}$;
- **Na entrada e saída da carcaça:** massa específica $\rho\text{-}ec$, massa específica $\rho\text{-}sc$ e vazão mássica \dot{m}_{vent} .

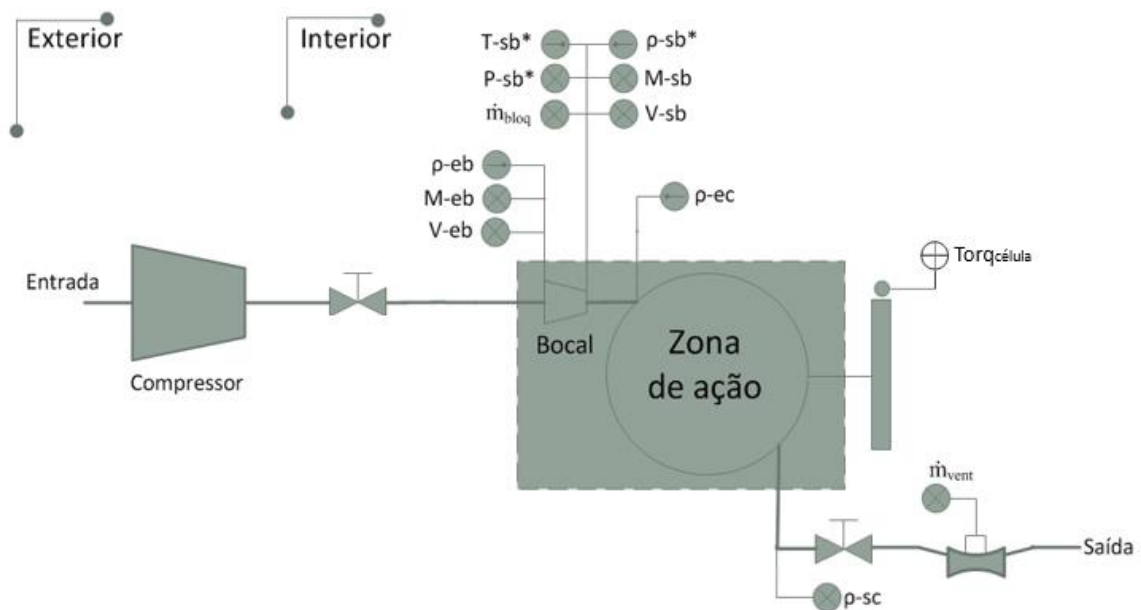


Figura 3.1 – Desenho esquemático da TMD mostrando a disposição dos pontos das grandezas calculadas

3.1.1 Massa específica

A massa específica ρ [kg/m³] é calculada a partir da Equação 3.1 [Moran e Shapiro, 2002] que pode ser usada para condições de temperatura aproximada de 297 [K] e pressão de 200 [kPa] à 400 [kPa],

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3.1)$$

onde P é a pressão do ar [Pa], R é a constante dos gases 287 (Pa·m³)/(K·kg), T é a temperatura do ar [K].

3.1.2 Número de Mach

A Equação 3.2 calcula o número de Mach (M) definido pela razão entre a velocidade real do ar V da Equação 4.3 e a velocidade do som no ar c da Equação 4.4 [Çengel, 2006].

$$M = \frac{V}{c} \quad (3.2)$$

Para o cálculo da velocidade real do ar V [m/s] usou-se a Equação 3.3,

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (3.3)$$

onde A é a área da seção transversal do escoamento, [m²] e \dot{m} é a vazão mássica do ar [kg/s].

A velocidade do som no ar c [m/s] é calculada através da Equação 3.4 [White, 2002], considerando o ar como um gás perfeito.

$$c = \sqrt{kRT} \quad (3.4)$$

onde k é a razão do calor específico a pressão e volume constantes e igual à 1,4.

3.1.3 Propriedades críticas

As propriedades do fluido em uma região na qual o número de Mach é unitário são chamadas propriedades críticas. As propriedades estudadas no presente trabalho foram a pressão crítica P^* [kPa], Equação 3.5, a temperatura crítica T^* [K], Equação 3.6, e a massa específica crítica ρ^* [kg/m³], Equação 3.7, [Çengel, 2006],

$$P^* = P_o \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (3.5)$$

$$T^* = T_o \left[\frac{2}{k+1} \right] \quad (3.6)$$

$$\rho^* = \rho_o \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{1}{k-1}} \quad (3.7)$$

onde o subíndice o refere-se às condições de estagnação na entrada do bocal.

3.1.4 Vazão mássica medida com o Venturi

A vazão mássica \dot{m}_{vent} [kg/s] que passa através do bocal convergente foi calculada por meio do uso de um Venturi utilizando a Equação 3.8 [ABNT NBR 5167-1:2008],

$$\dot{m}_{vent} = C\varepsilon \frac{\pi}{4} D^2 \frac{\sqrt{2\rho P_{-dif}}}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (3.8)$$

onde β é a relação de diâmetros internos dentro do Venturi (0,6787), C é o coeficiente de descarga do fluido (0,95), ε é o coeficiente de expansibilidade atribuído (1), D é o diâmetro interno do Venturi (0,03 m), ρ é a massa específica na entrada do fluido do Venturi (que corresponde à $\rho-sc$) [kg/m³] e P_{-dif} é a pressão diferencial do Venturi [Pa].

3.1.5 Vazão mássica pela expansão isentrópica em bocais

A vazão mássica isentrópica \dot{m}_{bloq} é a máxima vazão através de um bocal convergente que executa uma expansão isentrópica. A condição de máxima vazão mássica é o mesmo que afirmar que o bocal atingiu a condição de escoamento sônico (Mach = 1) ou escoamento bloqueado. A \dot{m}_{bloq} [kg/s] foi calculada pela Equação 3.9 para uma expansão isentrópica com número de Mach igual a 1 [Çengel, 2006], considerando o fluido como gás ideal,

$$\dot{m}_{bloq} = P_o A \sqrt{\frac{k}{RT_o} \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} \quad (3.9)$$

onde P_o é a pressão de estagnação na entrada do bocal [kPa], A é a área da seção transversal na garganta [m²], T_o é a temperatura de estagnação da entrada [K] e R é a constante do gás para o ar seco 287 [J/(kg·K)].

3.1.6 Torque medido pelo sensor de força

O torque experimental na bancada $Torq_{célula}$ [N·m] foi calculado a partir dos dados de entrada na TMD, determinado a partir da Equação 3.10 [Hibbeler, 2004],

$$Torq_{célula} = mgL \quad (3.10)$$

onde m é a massa do sensor de força [kg], g é a aceleração gravitacional local (9,806 m/s²) e L é a distancia perpendicular do eixo da TMD até o sensor de força (0,125 m).

3.2 Incerteza

Quando se apresenta o resultado de medição de uma grandeza física é obrigatório que alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado seja dada para que aquele que o usa possa avaliar sua fidedignidade [Rodrigues e Lemma, 2012]. Os meios através dos quais os laboratórios são orientados para tratar as incertezas de medição são definidos em detalhe e NIS 3003, 1995 e ISO GUM, 2008.

Erros aleatórios originam-se de efeitos randômicos de várias fontes. As fontes de variabilidade não podem ser eliminadas, mas a incerteza devido a seus efeitos pode ser reduzida aumentando o número de observações e aplicando análise estatística. Desta forma, o ISO GUM, 2008, adotou a abordagem de combinação de componentes de incertezas de duas categorias baseadas em seus métodos de avaliação [INMETRO, 1998].

Incerteza Tipo A na qual a avaliação é a partir de uma série de medições ou observações repetidas de uma dada grandeza, assumindo uma distribuição normal (Gaussiana).

Incerteza Tipo B obtida por outros meios em que não há análise estatística de uma série de observações. É estimada a partir de considerações de efeitos físicos que afetam os resultados.

Uma distribuição Gaussiana necessita de dois parâmetros para a sua definição: média e desvio padrão. Assim, estimando-se o desvio padrão de uma distribuição complexa e sua média, conhece-se o nível de confiabilidade. Então todos os esforços objetivam a estimativa da Incerteza Padrão.

A partir dos dados experimentais foram calculadas as incertezas das grandezas medidas para posteriormente utilizá-las para determinar as incertezas das grandezas calculadas.

3.2.1 Incerteza das grandezas medidas

A norma ISO GUM, 2008, menciona que os resultados das medições sempre são afetados por erros inerentes do equipamento de medição (geometria, sistema de medição, atrito, elasticidade, negligencia), pela prática do operador (leitura incorreta, cuidado insuficiente) e pelo procedimento aplicado (deformação das partes devido a forças exercidas pelos fixadores, pressão de medição ou variações na temperatura) [INMETRO, 1998]. Também efeitos aleatórios podem ser causados por:

- Ruídos elétricos nos instrumentos de medição;
- Pequenas flutuações térmicas no ambiente de medição;
- Variabilidade na performance no decorrer da medição.

Estas fontes não são necessariamente independentes e, além disso, efeitos sistemáticos desconhecidos podem existir e não foram levados em conta mas contribuem para erros. Sendo

assim o presente trabalho considerou as seguintes **Fontes de Incerteza** das grandezas medidas:

- **Desvio padrão das medições (DP)** indica uma medida de dispersão dos dados em torno da média amostral;
- **Ruídos de fundo (RF)** é considerado qualquer medida elétrica indesejada que ocorre simultaneamente com o desempenho de uma medição que pode afetar os resultados;
- **Padrão de referência de incerteza herdada (PR)** é a incerteza definida pelo padrão de referência;
- **Repetitividade (RT)** é a variação das medidas obtidas por um único operador, utilizando o mesmo equipamento de medição e método, ao medir repetidas vezes uma mesma grandeza de uma única amostra;
- **Reprodutibilidade (RD)** é a variação das médias obtidas por diferentes operadores utilizando o mesmo equipamento de medição para medir repetidamente uma mesma grandeza de uma única amostra.

Distribuição de Probabilidade descreve o comportamento de uma variável. Entre as distribuições de probabilidade, a distribuição *normal* se apresenta nas incertezas de Tipo A. Já para o Tipo B deve existir alguma informação que declare o tipo de distribuição: *normal (k_p)*, *retangular*, *triangular* e em *forma de U*. Caso não seja possível determinar o tipo de distribuição assume-se uma distribuição *retangular*. Para cada tipo de distribuição existe o **Fator Divisor** que pode ser definido conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valores de Fator Divisor segundo a distribuição de probabilidade

[Fonte: ISO GUM, 2008]

Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor
normal	1
normal (k _p)	2
retangular	$\sqrt{3}$
triangular	$\sqrt{6}$
forma de U	$\sqrt{2}$

$u_c(y)$ é a **Incerteza Padronizada Combinada** na qual componentes de incerteza foram combinadas para produzir uma incerteza total, na maioria dos casos isto é reduzido ao aplicar a raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas padronizadas, conforme mostra a Equação 3.11,

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (3.11)$$

onde c_i é um coeficiente de sensibilidade, $u(x_i)$ e $u_i(y)$ são incertezas padronizadas provenientes de avaliações Tipo A e/ou Tipo B.

Para calcular o valor dos **Graus Efetivos de Liberdade** (V_{eff}) da incerteza padronizada combinada $u_c(y)$ a guia ISO GUM, 2008, recomenda que a equação de Welch-Satterwaite seja utilizada. A equação esta baseada nos graus de liberdade ν_i e nas contribuições individuais de incerteza $u_i(y)$, Equação 3.12.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (3.12)$$

Incerteza Expandida de Medição (U) é usualmente requerida para reunir as necessidades de muitas aplicações, especialmente quando interessa a segurança. Ela intenciona fornecer um intervalo maior do que a incerteza padronizada, conseqüentemente, existe a probabilidade de que o valor verdadeiro da variável medida esteja contido neste intervalo. A Incerteza expandida de medição foi obtida através da multiplicação do **fator de abrangência** k_p e da incerteza padronizada combinada $u_c(y)$, Equação 3.13,

$$U = k_p u_c(y) \quad (3.13)$$

que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95,45%, a qual está em função dos Graus efetivos de liberdade. Obtido um valor para V_{eff} , pode-se utilizar a Tabela 3.2 para encontrar o k_p [Adams, 2002].

Tabela 3.2 – Fator de abrangência k_p em função dos Graus efetivos de liberdade V_{eff} para uma probabilidade de 95.45% [Fonte: ISO GUM, 2008]

V_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
k_p	13,9	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,23	2,20	2,17
V_{eff}	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	∞
k_p	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,04	2,04	2,02	2,00

A Figura 3.2 apresenta uma planilha para o cálculo de incertezas de cada grandeza medida definida na seção 2.5. Portanto, as Incertezas Expandidas da Medição U foram determinadas para às seguintes grandezas: $P\text{-}eb$, $T\text{-}eb$, $T\text{-}amb$, $P\text{-}ec$, $T\text{-}ec$, $P\text{-}sc$, $T\text{-}sc$, $P\text{-}dif$ e m .


PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO													
FONTES DE INCERTEZAS							DADOS DE ENTRADA E SAÍDA						
Nro.	Símbolo	Fontes de Incerteza	Valor		Distribuição		Coeficiente de Sensibilidade C_i	Entrada		Grau de Liberdade ν_i	Saída		% Contribuição
			\pm	Unidade	Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor		Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Unidade		Incerteza Padronizada $u(y)$	Unidade	
1													
2													
3													
4													
5													
MEDIÇÕES							CÁLCULOS						
Nro.	VVC	Leituras			MÉDIA (\bar{x}^i)	Erro de Indicação (EI)	Desvio Padrão Amostral (s_i)	Entrada		Grau de Liberdade ν_i	Saída		% Contribuição
		1	2	3				Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Unidade		Incerteza Padronizada $u(y)$	Unidade	
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
OBSERVAÇÕES													

Figura 3.2 – Planilha para cálculo de incerteza de grandezas medidas

A determinação da Incerteza Expandida de Medição U de cada sensor foi realizada através da seguinte metodologia:

Seção 1- MEDIÇÕES:

- Inserir 3 **Leituras** em torno de um estado definido;
- Obter a **Média** Aritmética das 3 leituras;
- Para obter o **Erro de Indicação (EI)**, é necessário subtrair a **Média** Aritmética do **Valor Verdadeiro Convencional (VVC)**;
- Calcular o **Desvio Padrão Amostral** das 3 leituras anteriores.

Seção 2 - FONTES DE INCERTEZAS:

- Declare na coluna **Símbolos** e na coluna **Fontes de Incerteza** a abreviação e a fonte do Tipo A ou Tipo B que estiver presente no decorrer do experimento ou que chegou a afetar o resultado da incerteza do equipamento de acordo com os dados obtidos;
- **Valor** correspondente ao valor numérico do desvio padrão conforme o tipo de distribuição de probabilidade de cada fonte de incerteza junto com sua respectiva **unidade**;
- Declare na **Distribuição** tanto a **Distribuição de Probabilidade** como o **Fator Divisor** segundo a classificação definida na Tabela 3.1 para cada incerteza.

Seção 3 - DADOS DE ENTRADA E SAÍDA:

- O **Coefficiente de Sensibilidade** c_i é um transformador de unidade que relaciona a grandeza de saída com a grandeza de entrada. Assume-se o valor unitário se a resposta na entrada é a mesma que a resposta na saída;
- Na coluna **Entrada** devem ser adicionadas a **Incerteza Padronizada** $u(x_i)$ e a respectiva **unidade**. A **Incerteza Padronizada** $u(x_i)$ é a divisão entre o **Valor** e o **Fator Divisor**;
- O valor dos **Graus de Liberdade** v_i depende do tipo de fonte. Para o Tipo A é igual ao número de Leituras menos 1 e para o Tipo B coloca-se o valor de 1E +999 caso não seja informado outro valor conforme a norma ISO GUM, 2008;
- Na coluna **Saída** devem ser adicionadas a **Incerteza Padronizada** $u_i(y)$ e a respectiva **Unidade**. A $u_i(y)$ corresponde à multiplicação da **Incerteza Padronizada** $u(x_i)$ pelo **Coefficiente de Sensibilidade** c_i ;
- A **% Contribuição** é a percentagem de contribuição das **Fontes de Incerteza** que afetam o instrumento.

Seção 4 - CÁLCULOS:

- A **Incerteza Padronizada Combinada** $u_c(y)$ é obtida ao aplicar a raiz quadrada da soma dos quadrados das Incertezas Padronizadas $u_i(y)$ da Equação 3.11;
- Para o cálculo dos **Graus Efetivo de Liberdade** V_{eff} substitui-se os valores da **Incerteza Padronizada Combinada** $u_c(y)$, **Incerteza Padronizada** $u_i(y)$ e os **Graus de Liberdade** da Equação 3.12;
- O **Fator de Abrangência** k_p é obtido através de interpolação dos valores da Tabela 3.2;
- Para a obtenção do resultado final da **Incerteza Expandida da Medição** U do instrumento deve se multiplicar a **Incerteza Padronizada Combinada** com o **Fator de Abrangência** conforme a Equação 3.13.

A partir do cálculo das incertezas das medições correspondentes a cada sensor observa-se na Tabela 3.3 que a maior percentagem de contribuição na incerteza em cada instrumento é devido ao desvio padrão de medição. Isto ocorre devido à diferença de leitura existente entre o valor dado pelo padrão e o valor coletado pelo sistema computacional na hora de realizar as medições, o qual afeta o desvio.

Tabela 3.3 – Parâmetros que influenciam o valor das incertezas de medição dos sensores

Sensor	Desvio padrão de medição [%]	Ruído de fundo [%]	Padrão de referência [%]	Repetitividade [%]	Reprodutibilidade [%]
<i>P-eb</i>	42,26	0,38	20,66	22,00	17,33
<i>P-ec</i>	72,13	0,04	25,53	1,22	1,09
<i>P-sc</i>	72,76	0,04	25,69	0,79	0,71
<i>T-eb</i>	44,01	0,36	4,12	27,19	24,32
<i>T-ec</i>	52,30	0,26	2,80	22,50	20,13
<i>T-sc</i>	38,32	0,70	2,04	31,11	27,83
<i>T-amb</i>	59,74	0,55	2,12	19,84	17,75
<i>P-dif</i>	11,22	0,05	74,11	7,71	6,90
<i>m</i>	27,27	40,26	24,47	4,22	3,78

Nas pressões *P-ec* e *P-sc*, o desvio padrão de medição e o padrão de referência foram os fatores de maior influência. No caso das temperaturas (*T-eb*, *T-ec*, *T-sc* e *T-amb*) os parâmetros de maiores porcentagens sobre as incertezas foram a repetitividade e o desvio padrão de medição. Em *P-dif*, o percentual do padrão de referência foi 74,11% devido à falta de sensor padrão que pudesse ser utilizado no laboratório e, portanto, não houve como herdar a incerteza do padrão de referência. No sensor de força *m* o ruído do fundo foi o fator de maior influência.

A Tabela 3.4 apresenta um resumo das incertezas expandidas de medição (ver Apêndice D), comparadas com as incertezas do catálogo de cada sensor.

Tabela 3.4 – Incerteza expandida de medição de cada sensor

Lista de sensores e instrumentos do banco de trabalho				Incerteza no catálogo	Incerteza Expandida da Medição	Desvio relativo porcentual
TAG	Descrição	Tipo	Faixa			
V-1	Válvula Esfera 1/2"	---	---	---	---	---
T-amb	Sensor de Temperatura - Ambiente do LETA	Termopar Tipo K	73 - 1523 [k]	2,2 [K]	0,96 [K]	56,30 % ↓
P-eb	Sensor de Pressão - Entrada do Bocal	PS-10B	0 - 1000000 [Pa]	5000 [Pa]	8793,07 [Pa]	75,86 % ↑
T-eb	Sensor de Temperatura - Entrada do Bocal	Termopar Tipo K	73 - 1523 [k]	2,2 [K]	0,52 [k]	76,26 % ↓
P-ec	Sensor de Pressão - Entrada da Carçaça	PSE550	0 - 300000 [Pa]		13640,55 [Pa]	
T-ec	Sensor de Temperatura - Entrada da Carçaça	Termopar Tipo K	73 - 1523 [k]	2,2 [K]	0,65 [k]	70,10 % ↓
m	Sensor de Força - Medição de Massa	Bonad - Bnd - Ic5.0	1 [kg]	0,0001 [kg]	0,00023 [kg]	132,6 % ↑
P-sc	Sensor de Pressão - Saída da Carçaça	PSE550	0 - 300000 [Pa]		13704,71 [kg]	
T-sc	Sensor de Temperatura - Saída da Carçaça	Termopar Tipo K	73 - 1523 [k]	2,2 [K]	0,64 [k]	70,91 % ↓
V-2	Valvula de Agulha 2"	---	---	---	---	---
P-dif	Sensor de Pressão Diferencial	MPXV7002	-2 - 2 [kPa]	50 [Pa]	51,04 [Pa]	2,10 % ↑
--	Paquímetro digital	Mitutoyo	0 - 150 mm	0,00005 [m]	---	---
--	Micrometro - (medição do bocal)	Mitutoyo	0 - 25 mm	0,000002 [m]	---	---

Na Tabela 3.4 observa-se que houve uma redução (seta verde) de 56,30% a 76,26% na incerteza expandida de medição nos sensores de temperatura ($T\text{-}eb$, $T\text{-}ec$, $T\text{-}sc$ e $T\text{-}amb$) em comparação com a incerteza no catálogo de cada sensor utilizado. Esse ganho foi obtido a partir do controle das medições e de sua aquisição, incluindo o tempo para estabilidade do sistema, calibrações, reduções dos ruídos através de correções no arranjo dos sensores, no sistema elétrico e no software de aquisição dos dados. No caso dos sensores de $P\text{-}eb$, $P\text{-}dif$ e m houve um incremento na incerteza em no máximo (seta vermelho) de 2,10% a 132,6%, devido ao emprego de referências não exatas, o que indica a necessidade de proceder à calibração de forma adequada.

3.2.2 Incerteza das grandezas calculadas

A incerteza combinada $u_c(y)$ das grandezas calculadas foi estimada pela relação de Taylor e Kuyatt, 1994, dada pela Equação 3.14,

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_i^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u_i(x_i, x_j) \quad (3.14)$$

onde u_i é a incerteza do instrumento, e seu valor é calculado com o auxílio do software EES (Engineering Equation Solver).

3.3 Aperfeiçoamentos feitos no Software LabView™

O software LabView™ é um instrumento virtual que pode representar a aparência e operação de instrumentos físicos, contendo uma extensa variedade de ferramentas para adquirir, analisar, visualizar e armazenar dados.

3.3.1 Painel frontal

A Figura 3.3 apresentam imagens do programa LabView™, o qual foi melhorado com a criação de novas telas (ver Apêndice C), desenhos e agrupamento de sensores para uma interface mais amigável com o usuário e monitoramento da TMD em tempo real.

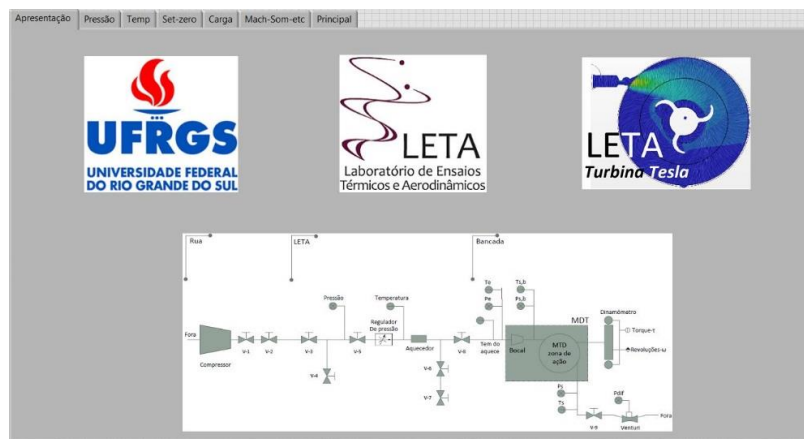


Figura 3.3 – Painel frontal para acompanhamento de dados na turbina Tesla

3.3.2 Diagrama de blocos

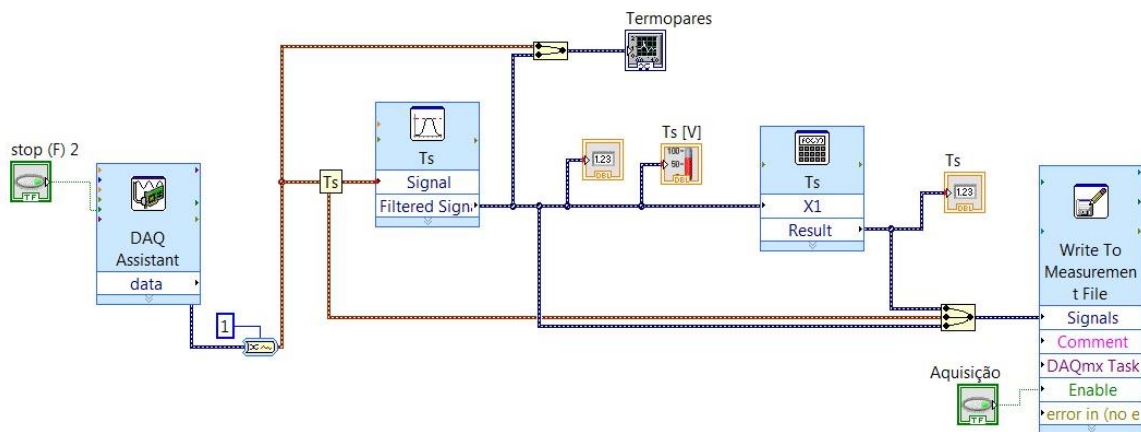


Figura 3.4 – Diagrama de blocos no software LabView™

O diagrama de blocos da Figura 3.4 contém o código de fonte gráfica que pode se associar a um fluxograma de funcionamento da turbina, através do qual criaram-se mais conexões (para converter sinais em valores de temperatura, pressão e força), adicionando equações e representações gráficas das funções para controlar os objetos do painel principal. A Tabela 2.3 detalha as equações de operação utilizadas neste diagrama de blocos do software LabView™.

4 RESULTADOS E ANÁLISE DO DESEMPENHO DA TURBINA

Neste capítulo é apresentada a avaliação do torque da turbina em função da variação controlada das condições de pressão de entrada P_{-eb} , do número de discos do rotor e do espaçamento dos discos do rotor. Também foram avaliadas:

- A capacidade da bancada de reproduzir a mesma condição de pressão de entrada para diversos testes;
- As propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho ao longo da turbina, focando nas condições de entrada do bocal, saída do bocal, entrada na carcaça e saída da carcaça (ver Figura 2.9 e Figura 3.1);
- A condição de bloqueio da turbina através da comparação entre a vazão mássica obtida com o Venturi \dot{m}_{vent} e a vazão mássica isentrópica \dot{m}_{bloq} ;
- A capacidade do eletrodinamômetro de medir com exatidão o torque da turbina $Torq_{célula}$.

Por fim, neste capítulo utilizou-se os dados experimentais para calcular o torque adimensional a partir do método de Buckingham. Além disso, foram comparados valores de torque experimental da configuração de 4 discos com os valores obtidos através do modelo de placas planas e dados obtidos com um torquímetro.

4.1 Descritivo do experimento

Testes foram realizados para diferentes configurações do rotor montadas na turbina operando em valores escolhidos de P_{-eb} dentro de uma faixa de alimentação. Cada ensaio foi estabilizado em condições de regime permanente e a aquisição das pressões P_{-eb} , P_{-ec} e P_{-sc} , além da pressão diferencial P_{-dif} foi executada a taxa de 1 dado por segundo pelo sistema de aquisição.

A pressão do fluido de trabalho na entrada no bocal P_{-eb} foi usada como fator controlável através da atuação da válvula $V-1$, estabilizada a pressões absolutas de 200 kPa, 250 kPa, 300 kPa, 350 kPa e 400 kPa. Os níveis de temperatura de entrada T_{-eb} foram mantidos constantes em torno de 296 K e a pressão de descarga foi sempre comandada pela condição atmosférica.

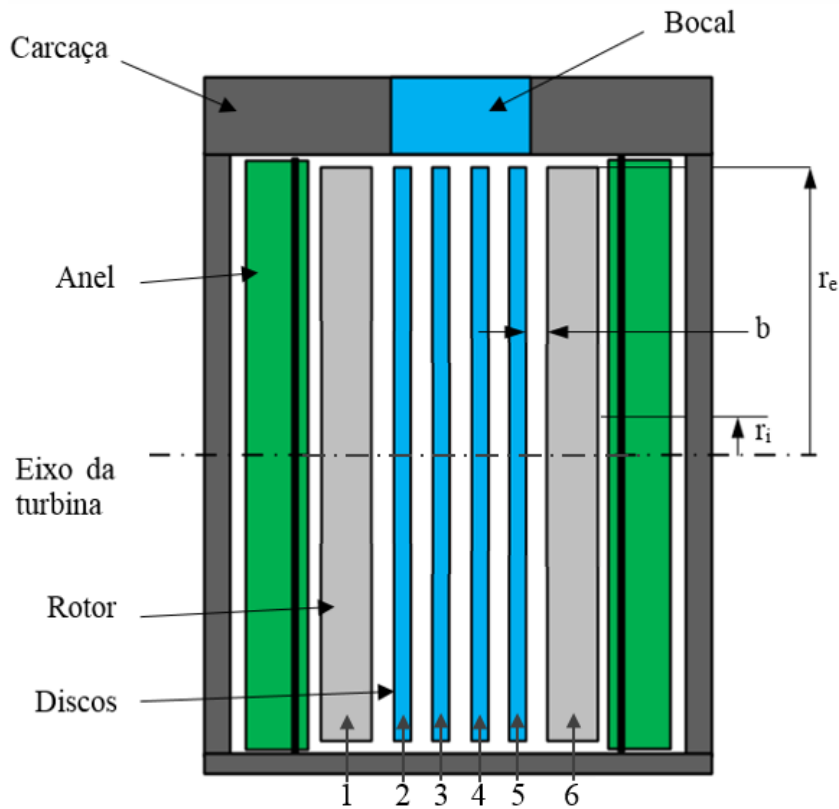

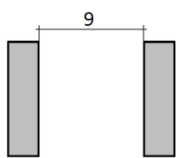

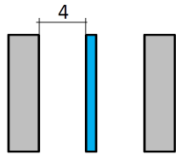
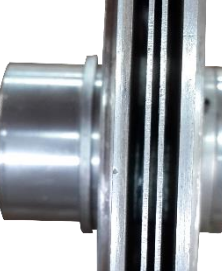
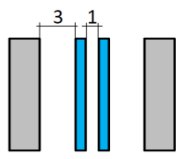

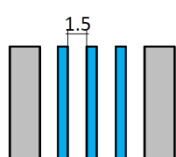

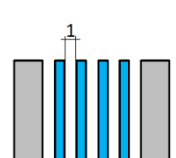


Figura 4.1 – Detalhe do corte transversal da turbina Tesla

Na Figura 4.1 está apresentado um corte transversal da TMD estudada nesta pesquisa. Os discos 1 e 6 correspondem aos limites externos do rotor e tem distância fixa, enquanto que os discos 2 até 5 são discos que podem ser acrescentados, partindo de 0 discos até o máximo de 4 discos, que é o limite de empacotamento do rotor. O número de discos determina o espaçamento b e a área disponível para transferência de quantidade de movimento do escoamento para o rotor.

Para estudar como a configuração dos discos influencia no desempenho da turbina foi proposto dividir a avaliação em duas partes. A Tabela 4.1 apresenta a primeira parte do experimento onde diferentes configurações do rotor foram obtidas considerando a condição de aumento do número de discos e largura total do rotor constante.

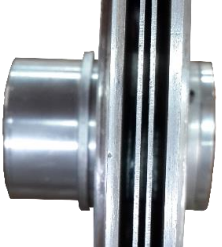
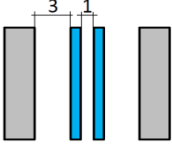

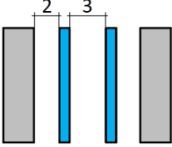

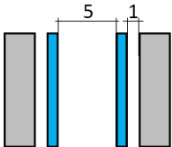
Tabela 4.1 – Configuração de rotores proposta para a primeira parte do experimento

Item	Nome	Fotografia	Espaçamento	Código
1	0 Discos internos			O
2	1 Disco interno			I
3	2a Discos internos			II
4	3 Discos internos			III
5	4 Discos internos			III

Na primeira parte do experimento, nota-se que foram incrementados 1 disco por vez a partir da configuração O, e para todas as configurações manteve-se constante a distância total de 9 mm. Optou-se por realizar os experimentos dessa maneira pois buscou-se replicar a condição usual em turbinas a vapor de não alteração das dimensões do bocal, mantendo constante a razão entre a largura do rotor e a largura do bocal.

Na segunda parte do experimento foi feita a comparação do desempenho da turbina com configurações combinando 2 discos por rotor, detalhadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Configuração de rotores proposta para a segunda parte do experimento

Item	Nome	Fotografia	Espaçamento	Código
3	2a Discos internos			II
6	2b Discos internos			IoI
7	2c Discos internos			IOI

Nota-se que as configurações apresentadas (II, IoI e IOI) diferenciam-se apenas pela distância entre os discos internos.

4.2 Resultado das grandezas medidas

Nesta seção, o comportamento dos dados obtidos experimentalmente (P_{-eb} , T_{-eb} , P_{-ec} , T_{-ec} , P_{-sc} , T_{-sc} , P_{-dif} e m) foi avaliado como uma função da pressão de entrada para todas as configurações de rotor da TMD (valores e incertezas são detalhados no Apêndice E e Apêndice G).

- **Pressão de entrada do bocal (P_{-eb})**

A capacidade de reprodução das condições de P_{-eb} para os diferentes testes foi avaliada antes de proceder com a sequência de ensaios. Essa avaliação foi feita considerando o desvio percentual dos valores obtidos de P_{-eb} em relação ao valor de referência chamado de

P_{-alim} . Na Tabela 4.3 é apresentado o desvio relativo percentual entre P_{-eb} e P_{-alim} para cada configuração de discos.

Tabela 4.3 – Resultado do desvio relativo percentual entre P_{-eb} e P_{-alim}

Pressão de alimentação P_{-alim} [kPa]	Desvio relativo percentual por configuração de discos [%] $(P_{-alim} - P_{-eb})/P_{-alim}$						
	O	I	II	IOI	IoI	III	IIII
200	1,54	1,24	1,40	0,76	0,80	1,15	0,19
250	0,89	0,68	0,92	1,14	0,73	0,61	0,80
300	0,08	0,93	1,35	0,22	0,78	0,12	0,95
350	0,13	0,38	0,85	0,74	0,33	0,05	0,49
400	0,51	0,29	0,50	0,05	0,37	0,57	0,15

A válvula reguladora $V-1$ proporcionou uma diferença máxima de 1,54% do valor de referência P_{-alim} , mostrando que não foram observadas diferenças significativas entre P_{-eb} e P_{-alim} . Portanto, avaliou-se o comportamento de todas as grandezas em função das configurações de rotor e do P_{-eb} .

- **Temperaturas T_{-eb} , T_{-ec} e T_{-sc}**

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados para a temperatura de entrada do bocal T_{-eb} , temperatura entrada da carcaça T_{-ec} e temperatura saída da carcaça T_{-sc} para todas as configurações de discos.

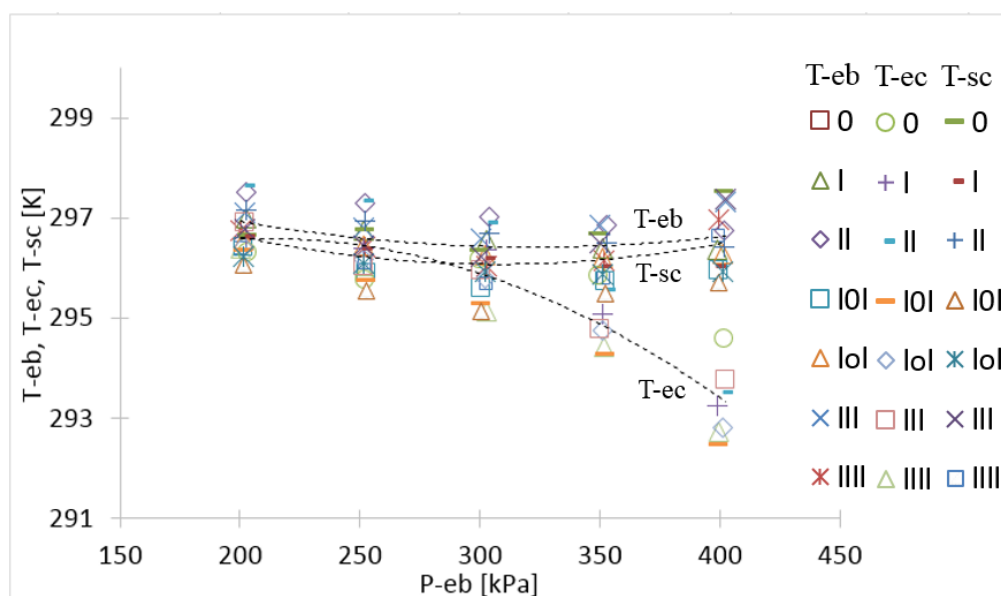


Figura 4.2 – Temperaturas da entrada do bocal T_{-eb} , entrada da carcaça T_{-ec} e saída da carcaça T_{-sc} vs Pressão de entrada P_{-eb} para todas as configurações dos discos. As linhas pontilhadas representam as curvas de ajuste obtida com os dados da turbina na configuração

Os valores de T_{-eb} , T_{-ec} e T_{-sc} apresentaram uma flutuação menor do que 4 K independentemente da variação da pressão de entrada ou das configurações de discos (Figura 4.2). Portanto, para os propósitos deste trabalho pode ser considerado que o valor medido é muito próximo da temperatura ambiente. Assim, T_{-eb} , T_{-ec} e T_{-sc} podem ser consideradas constantes no equipamento aproximadamente 297 K. Observa-se que os resultados experimentais de T_{-eb} , T_{-ec} e T_{-sc} são idênticos aos dados detalhados por Carvalho, 2018, e os dados de T_{-ec} obtidos experimentalmente por Neckel, 2013, que também trabalharam em temperatura ambiente.

- **Pressões na carcaça (P_{-ec} e P_{-sc})**

Na Figura 4.3 estão apresentados os resultados de pressão de entrada da carcaça P_{-ec} e a pressão de saída da carcaça P_{-sc} para todas as configurações de discos e sem as incertezas de medição.

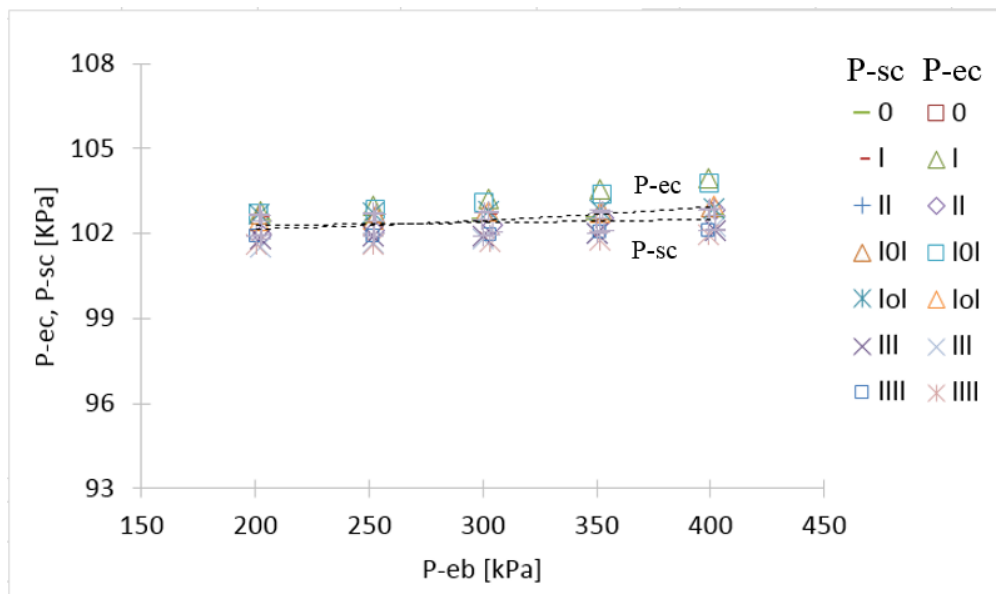


Figura 4.3 – Pressão de entrada da carcaça P_{-ec} e saída da carcaça P_{-sc} vs Pressão de entrada P_{-eb} para todas as configurações dos discos. As linhas pontilhadas representam as curvas de ajuste

As pressões de entrada da carcaça P_{-ec} e de saída da carcaça P_{-sc} apresentaram flutuação menor do que 4 kPa independentemente da variação da pressão de entrada e das configurações de discos no rotor (ver Figura 4.3). A partir desse resultado é possível evidenciar a característica de uma expansão isentrópica. Portanto, para um intervalo de pressões de entrada no bocal entre 200 kPa até 400 kPa, a pressão de entrada da carcaça e a

pressão de saída da carcaça será aproximadamente igual à pressão atmosférica. A partir desse conjunto de valores de P_{-ec} e P_{-sc} é possível verificar o comportamento de uma turbina de ação ou também chamada de impulso, que é caracterizada por pequenas variações de pressão estática entre a entrada e a saída do fluido no rotor, também mencionado por Rice, 1965, e obtido experimentalmente por Neckel, 2013, e Maidana, 2015.

- **Pressão diferencial (P_{-dif})**

Na Figura 4.4 são apresentados os resultados de P_{-dif} para todas as configurações de discos e sem as incertezas de medição.

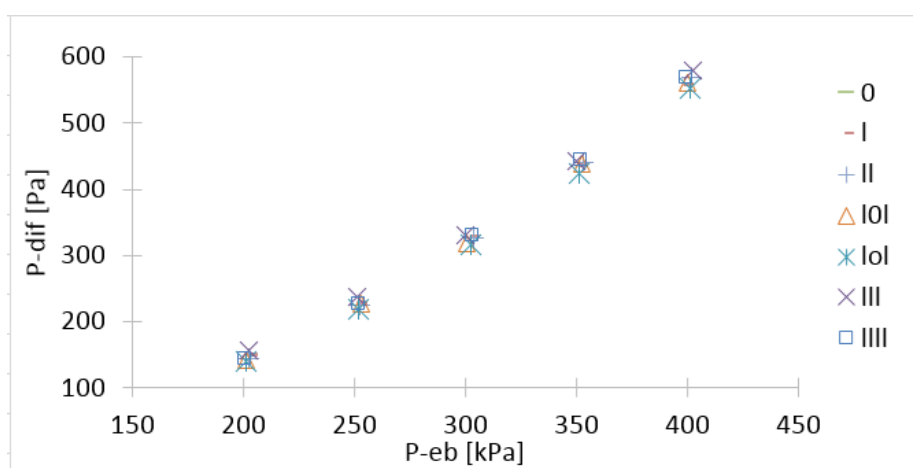
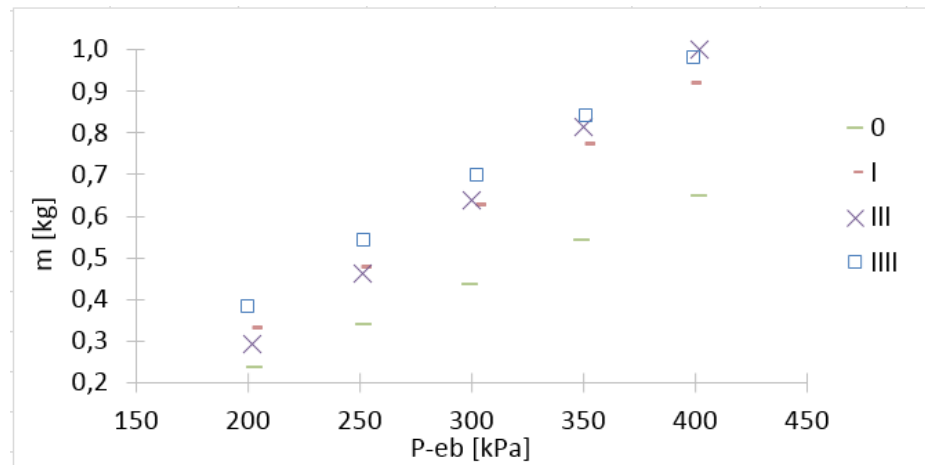


Figura 4.4 – Pressão diferencial P_{-dif} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos

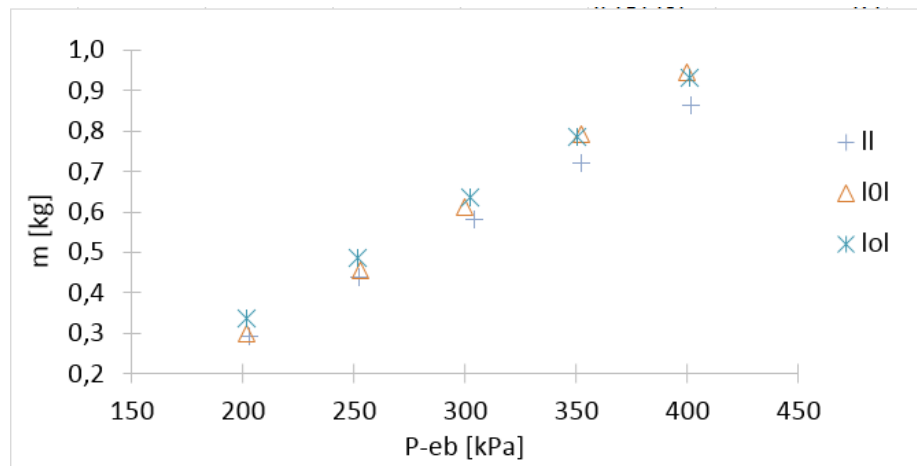
A pressão diferencial P_{-dif} aumentou proporcionalmente à pressão de entrada, que é resultado do consequente aumento de vazão mássica do escoamento, atingindo um valor quase 4 vezes maior que o inicial (ver Figura 4.4). Pode-se observar que a variação das configurações de disco não influenciou nos valores de pressão diferencial.

- **Sensor de força (m)**

Na Figura 4.5 são apresentados os resultados de m para todas as configurações de discos e sem as incertezas de medição.



a)



b)

Figura 4.5 – Massa do sensor de força m vs Pressão de entrada $P\text{-}eb$ para as configurações de discos da: a) aumentando o número de discos no rotor, b) modificando o espaçamento entre dois discos no rotor

Na Figura 4.5 é possível observar um comportamento diretamente proporcional da força na célula de carga m em função da pressão de entrada $P\text{-}eb$. A configuração dos discos também influenciou nos valores de m , a medida que o aumento na quantidade de discos ocasionou um aumento diretamente proporcional na força na célula de carga. Na Figura 4.5a as configurações III e IIII apresentaram valores aproximados a 1 kg para uma $P\text{-}eb$ de 400 kPa, que é próximo do limite superior da força da célula de carga utilizada, a configuração IIII apresentou maiores valores no sensor de força quando comparados com as outras configurações, sendo a exceção para $P\text{-}eb$ 400 kPa. A configuração O apresentou uma carga máxima de 0,6 kg para uma $P\text{-}eb$ de 400 kPa, é possível observar que a sua curva de tendência apresentou inclinação inferior as demais. Na Figura 4.5b a configuração IOI

apresentou maiores valores no sensor de força quando comparada com as outras configurações para uma faixa de P_{-eb} de 200 kPa a 350 kPa. A configuração IOI atravessa a configuração IoI, apresentando uma carga máxima de 0,93 kg para uma P_{-eb} de 400 kPa.

4.3 Resultado das grandezas calculadas

Nesta seção, o comportamento das grandezas calculadas a partir de equacionamento (ρ_{-eb} , V_{-eb} , M_{-eb} , P_{-sb^*} , T_{-sb^*} , ρ_{-sb^*} , V_{-sb} , ρ_{-ec} e ρ_{-sc}) foi avaliado como uma função da pressão de entrada P_{-eb} para todas as configurações de rotor da TMD (valores e incertezas são detalhados no Apêndice F e Apêndice H).

- **Massa específica (ρ_{-eb} , ρ_{-sb^*} , ρ_{-ec} e ρ_{-sc})**

Na Figura 4.6 estão apresentados os resultados de ρ_{-eb} , ρ_{-sb^*} , ρ_{-ec} e ρ_{-sc} para todas as configurações de discos sem as incertezas de medição.

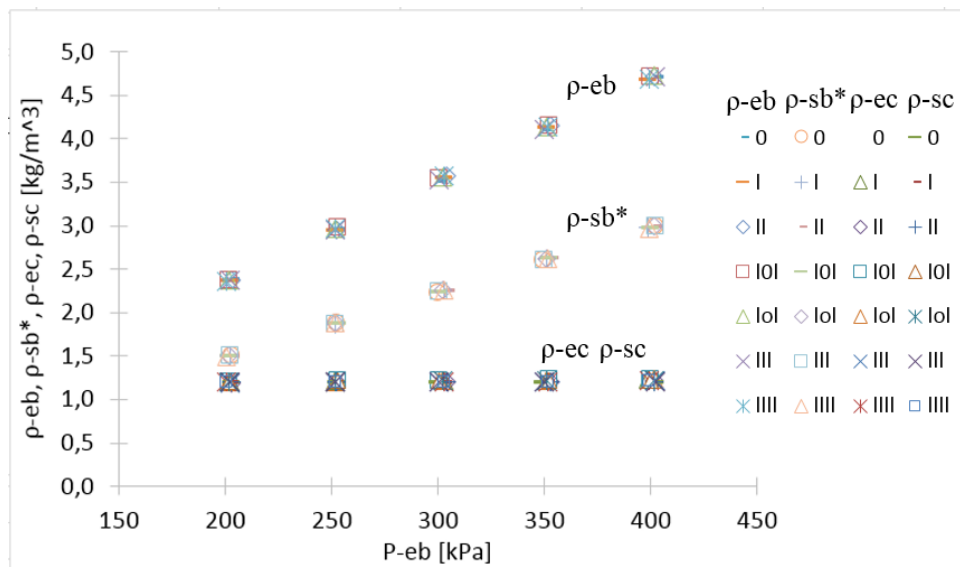


Figura 4.6 – Massa específica na entrada do bocal ρ_{-eb} , crítica na saída do bocal ρ_{-sb^*} , entrada da carcaça ρ_{-ec} e saída da carcaça ρ_{-sc} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos

Na Figura 4.6 observa-se as massas específicas tanto na entrada do bocal ρ_{-eb} como na saída do bocal ρ_{-sb^*} acompanharam de maneira diretamente proporcional o aumento da pressão de entrada, chegando a duplicar seu valor (ρ_{-eb} de 2,5 kg/m³ até 5 kg/m³) e (ρ_{-sb^*} de 1,5 kg/m³ até 3 kg/m³). Para o caso dos valores de massa específica na entrada da carcaça ρ_{-ec} e saída da carcaça ρ_{-sc} pode se observar que para todas as configurações apresentaram

flutuações inferiores a $0,1 \text{ kg/m}^3$, portanto, esses resultados demonstram que tanto o interior da carcaça como a descarga da saída encontra-se quase a condição ambiente.

- **Velocidade do ar na entrada e saída do bocal (V_{-eb} e V_{-sb})**

Na Figura 4.7 são apresentados os resultados de V_{-eb} e V_{-sb} para todas as configurações de discos e sem as incertezas de medição.

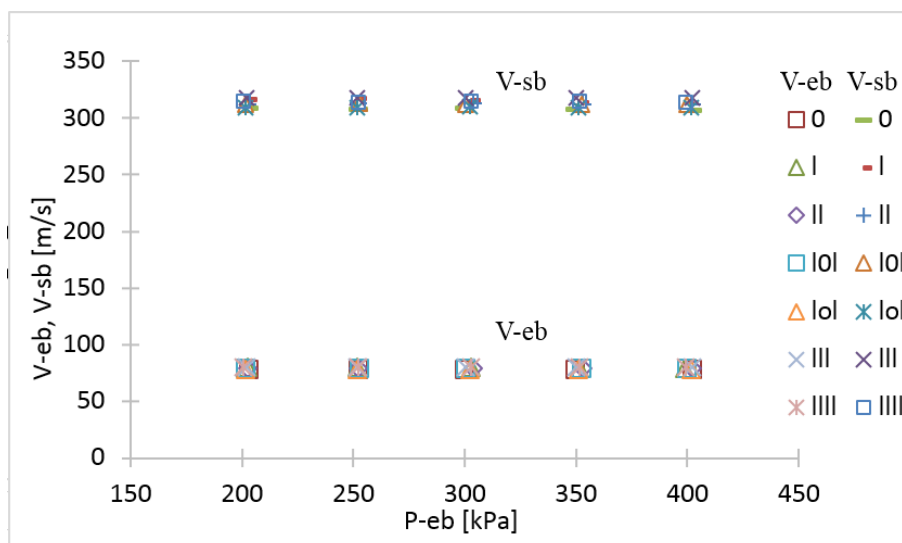


Figura 4.7 – Velocidade do ar na entrada V_{-eb} e na saída do bocal V_{-sb} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos

O cálculo da velocidade do ar na entrada e saída do bocal (V_{-eb} e V_{-sb}) foi obtida com a Equação 3.3. Conforme a Figura 4.7, V_{-eb} mostrou uma flutuação menor que 4 m/s para todos os casos, essa pequena flutuação se deve ao comportamento dos valores de ρ_{-eb} e \dot{m}_{vent} que aumentaram na mesma proporção a medida que houve o aumento da P_{-eb} correspondente. Para a V_{-sb} que considera a mesma área A na saída do bocal, a vazão mássica \dot{m}_{vent} e a densidade ρ_{-sb}^* , mostrou que os resultados apresentaram uma flutuação inferior ao 15 m/s independentemente da variação da pressão de entrada ou das configurações de discos. Esses resultados da V_{-sb} , nas condições de operação da TMD, são idênticos aos resultados obtidos experimentalmente por Neckel, 2013, para qualquer intervalo de pressões.

- **Número de Mach na entrada do bocal (M_{-eb})**

Na Figura 4.8 são apresentados os resultados de M_{-eb} para todas as configurações de discos sem as incertezas de medição.

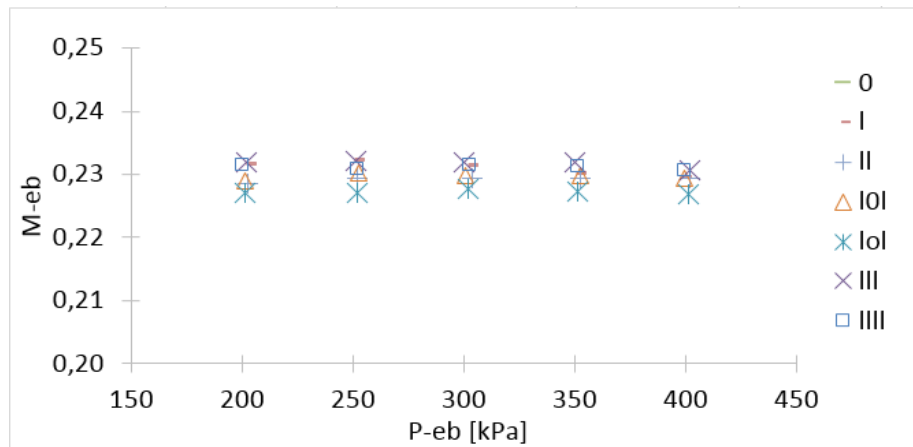


Figura 4.8 – Número de Mach na entrada do bocal M_{-eb} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos

Na Figura 4.8 observa-se o número de Mach M_{-eb} apresentou flutuação inferior a 0,01 para todos os casos estudados, sendo de aproximadamente 0,23, não caracterizando escoamento compressível tomando como referência a condição de que pode-se considerar o escoamento de um gás incompressível caso ele apresente número de Mach menor que 0,3 [Çengel, 2006].

- **Temperatura crítica na saída do bocal (T_{-sb}^*)**

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados de T_{-sb}^* para todas as configurações de discos e sem as incertezas de medição.

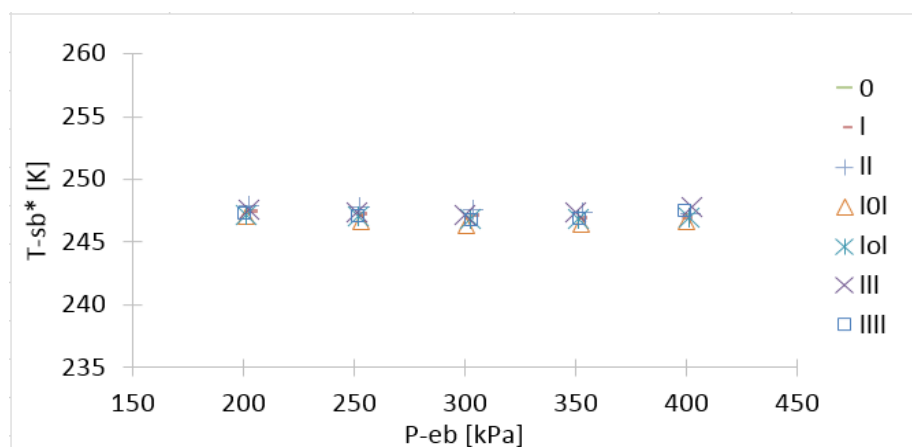


Figura 4.9 – Temperatura crítica na saída do bocal T_{-sb}^* vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos

A Equação 3.6 foi empregada para calcular a temperatura crítica na saída do bocal T_{-sb}^* , e seus resultados apresentaram a mesma variação que T_{-eb} teve com a pressão de

entrada para todas as configurações dos discos (ver Figura 4.9). Observa-se que os valores de temperatura T_{sb}^* são em média 50 K inferiores do que os medidos em T_{eb} , T_{ec} e T_{sc} , na Figura 4.2.

4.4 Vazão mássica medida pelo Venturi e condição de bloqueio

Os resultados da vazão mássica medida pelo venturi \dot{m}_{vent} foram obtidos em função da pressão de entrada de ar do bocal P_{-eb} , calculada com a Equação 4.10.

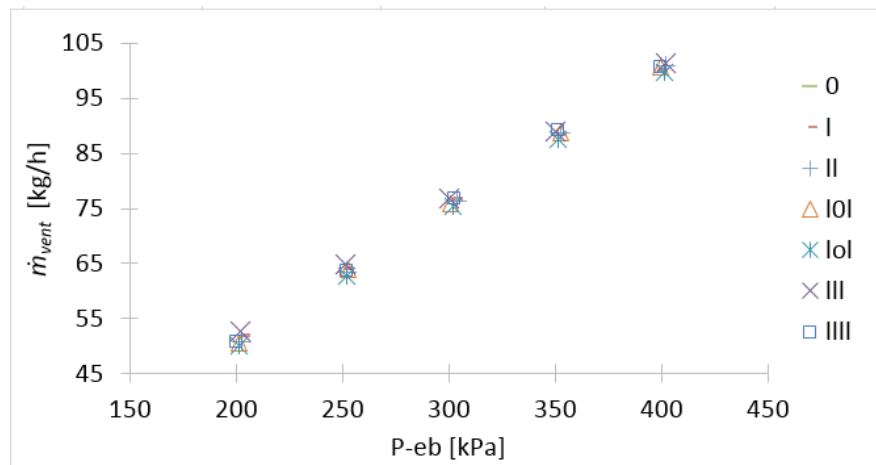


Figura 4.10 – Vazão medida pelo Venturi \dot{m}_{vent} vs Pressão de entrada P_{-eb} de todas as configurações dos discos

A vazão mássica \dot{m}_{vent} aumentou linearmente em relação ao P_{-eb} da Figura 4.10. Este comportamento é típico de escoamentos bloqueados que tem sua pressão de entrada aumentada, reforçando então a condição de escoamento bloqueado para todos os ensaios. Os resultados de \dot{m}_{vent} são aproximados aos resultados obtidos experimentalmente por Rice, 1965, para um intervalo de P_{-eb} de 350 KPa até 400 KPa. Comparando o comportamento da vazão mássica \dot{m}_{vent} e a vazão mássica \dot{m}_{bloq} vs. pressão de entrada P_{-eb} se observa que existe o mesmo comportamento para ambos casos em qualquer pressão de entrada.

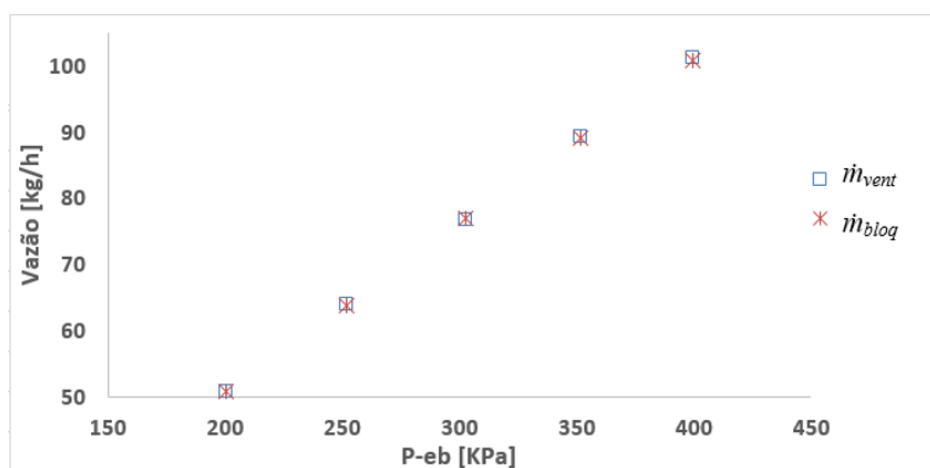


Figura 4.11 – Vazão mássica calculada pelo Venturi \dot{m}_{vent} e Vazão mássica calculada no bloqueio \dot{m}_{bloq} vs. Pressão de entrada P_{-eb}

Na Figura 4.11 é feita a comparação entre a curva de vazão mássica \dot{m}_{vent} e a vazão mássica de expansão isentrópica \dot{m}_{bloq} obtidas da média entre as vazões calculadas pelas Equação 3.8 e a Equação 3.9 para cada configuração de discos. Observa-se que o comportamento das duas curvas é linear.

Tabela 4.4 – Avaliação da vazão calculada pelo Venturi \dot{m}_{vent} e a vazão calculada por escoamento isentrópico \dot{m}_{bloq}

Pressão de entrada P_{-eb} [kPa]	Desvio relativo percentual entre vazões mássicas [%]						
	$ \dot{m}_{vent} - \dot{m}_{bloq} / \dot{m}_{vent}$						
	O	I	II	IOI	IoI	III	III
200	1,2	1,2	1,2	1,0	1,8	3,0	0,1
250	2,6	0,5	0,8	0,5	1,8	1,9	0,2
300	2,2	0,1	0,8	0,7	1,5	1,0	0,1
350	2,4	0,5	0,8	0,7	1,8	0,2	0,1
400	2,5	0,8	0,9	0,8	1,9	0,2	0,3

A Tabela 4.4 apresenta os valores de desvio relativo percentual entre as vazões medidas \dot{m}_{vent} e \dot{m}_{bloq} (detalhados no Apêndice F e Apêndice H). Observa-se que a variação absoluta de valores flutuou entre 0,1% e 3%, indicando que o escoamento encontra-se muito próximo da condição de bloqueio ou na própria condição de bloqueio. Na determinação do desvio opta-se por considerar o valor absoluto da diferença pois a condição de vazão mássica medida maior que a vazão mássica isentrópica não pode ser atingida fisicamente. Ainda, também deve-se levar em consideração a incerteza de medição propagada das variáveis.

Dado o exposto é possível afirmar que não existe uma variação significativa entre a vazão mássica calculada pelo Venturi \dot{m}_{vent} e a vazão mássica calculada no bloqueio \dot{m}_{bloq} para as diferentes configurações de discos, chega-se à conclusão que a vazão mássica de saída pode ser calculada a partir da Equação 3.9, que permite um cálculo rápido e direto. Isto evitaria o uso do Venturi, que requer a prévia determinação da pressão diferencial e da massa específica.

Para avaliar em definitivo a condição de bloqueio os valores do número de Mach na saída do bocal $M-sb$ foram calculados com a Equação 3.2 e são apresentados na Figura 4.12. $M-sb$ está definido pela razão entre $V-sb$ (calculada com a Equação 3.3) e c (utiliza-se a Equação 3.4) para uma temperatura $T-sb$.

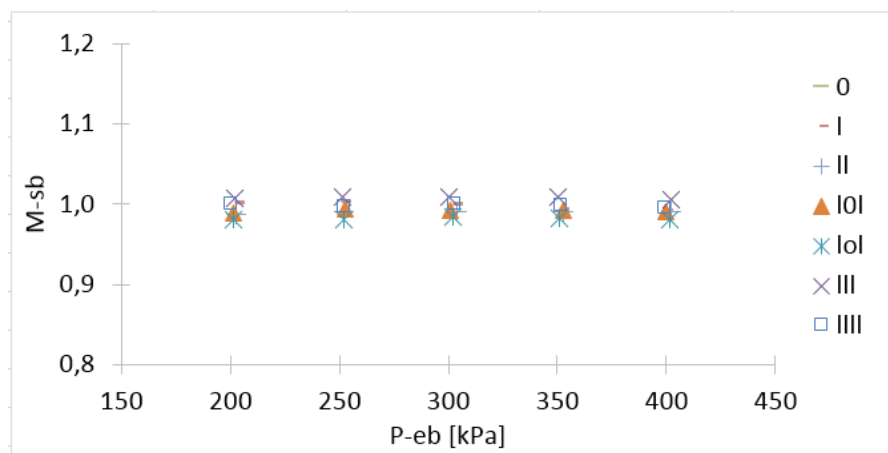


Figura 4.12 – Número de Mach na saída do bocal $M-sb$ vs Pressão de entrada $P-eb$ de todas as configurações dos discos

Observa-se na Figura 4.12 que os valores do número de Mach apresentam uma pequena variação de 0,03. A Tabela 4.5 apresenta os desvios relativos percentuais do número de Mach na saída do bocal $M-sb$ em relação ao Mach sônico esperado (Mach = 1), entre todas as configurações dos discos na turbina Tesla. Pode-se constatar que a diferença máxima foi de 2,8% e não apresentou flutuação em função das configurações geométricas. Observa-se que os resultados de $M-sb$ são idêntico aos resultados obtidos experimentalmente por Neckel, 2013, para qualquer intervalo de pressões.

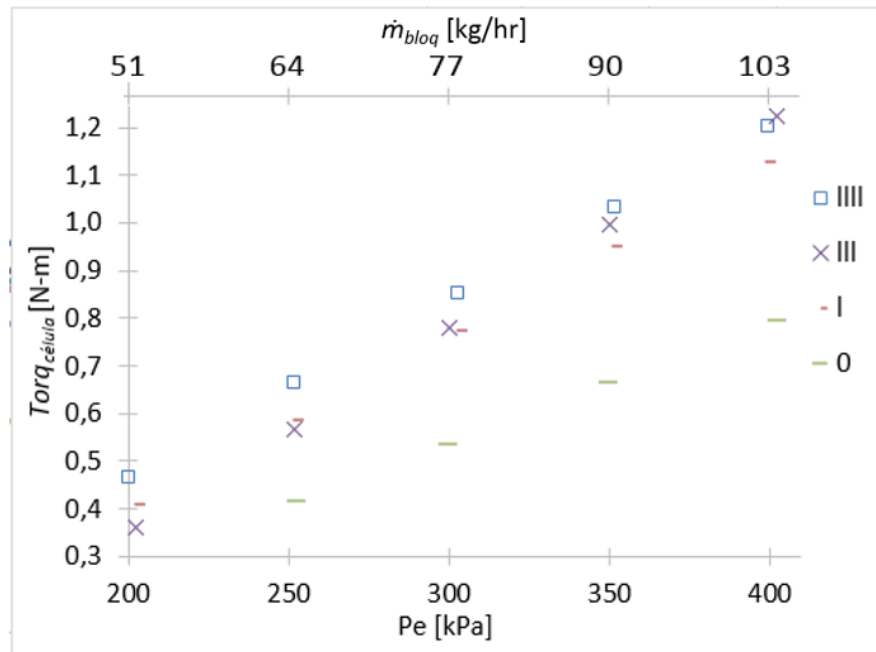
Tabela 4.5 – Avaliação entre número de Mach sônico e Mach calculado na saída do bocal

Mach sônico teórico	Diferença relativa entre o valor teórico e o calculado [%]						
	O	I	II	IOI	IoI	III	IIII
1	2,3	0,2	1,2	1,1	1,9	0,8	0,0
1	2,7	0,4	0,9	0,5	1,9	0,9	0,2
1	2,2	0,0	0,9	0,7	1,6	0,9	0,0
1	2,6	0,6	0,9	0,7	1,8	0,8	0,1
1	2,8	0,9	1,0	0,9	2,0	0,6	0,4

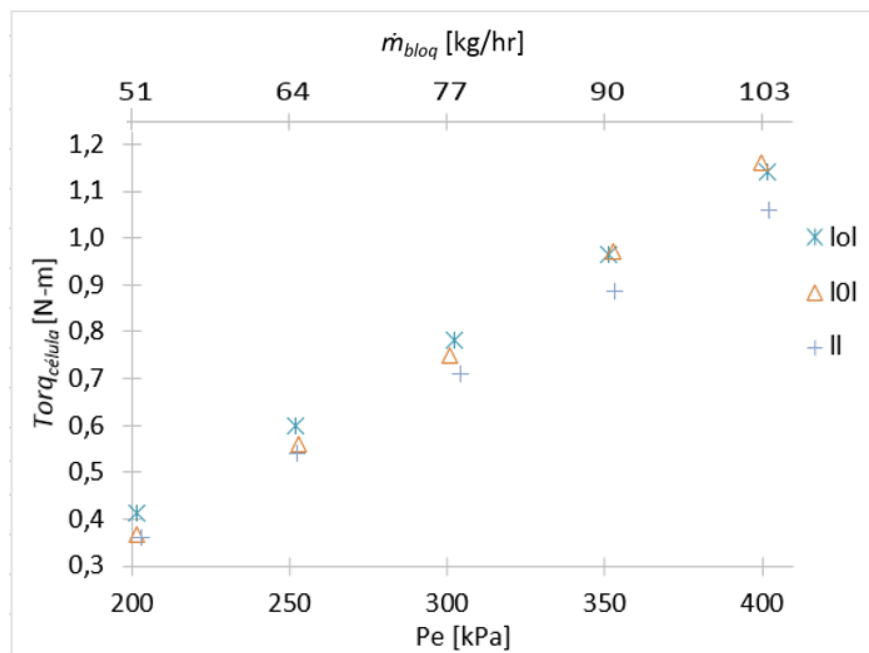
4.5 Resultado do desempenho da turbina e validação da medição de torque

4.5.1 Análise do desempenho da turbina pelo torque $Torq_{célula}$

Os valores de torque experimental $Torq_{célula}$ foram obtidos utilizando a Equação 3.10, sendo que suas incertezas propagadas se apresentaram com valores inferiores a 1%. O comportamento do torque $Torq_{célula}$ pode ser observado na Figura 3.13.



a)



b)

Figura 4.13 – Torque $Torq_{célula}$ vs Pressão de entrada P_{-eb} vs Vazão mássica do bloqueio \dot{m}_{bloq} para todas as configurações de disco: a) primeira parte, b) segunda parte

Na Figura 4.13 é possível distinguir o comportamento do torque em função do aumento de pressão na entrada e o aumento da vazão mássica respectivamente, e observa-se um incremento linear e diretamente proporcional para todas as configurações de discos. A Tabela 4.6 apresenta a diferença de torque para as pressões de 200 kPa e 400 kPa.

Tabela 4.6 – Variação de torque $Torq_{célula}$ entre pressões de 200 kPa e 400 kPa

Parte	Configuração dos discos	Torque [N·m]		Diferença de Torque [N·m]
		200 [kPa]	400 [kPa]	
Primeira	O	0,29	0,79	0,50
	I	0,41	1,13	0,72
	III	0,36	1,22	0,86
	III	0,47	1,20	0,73
Segunda	II	0,36	1,06	0,70
	IOI	0,37	1,16	0,79
	IoI	0,41	1,14	0,73

Nota-se na Tabela 4.6 que todas as configurações de discos atingiram mais que o dobro do seu torque inicial quando a pressão de entrada aumentou, sendo o maior incremento (0,86 N·m) o da configuração de disco III e o menor (0,5 N·m) o da configuração O.

Para as configurações O, I, III e III da Figura 4.13a, é possível observar que a quantidade e espaçamento dos discos também influencia no valor de torque. Para a pressão de entrada de 200 kPa o torque teve um incremento de 0,18 N·m comparando os torques entre a configuração III e a configuração O. A configuração O apresentou valores menores em toda a faixa de pressões estabelecida se comparado com as outras configurações, o qual era esperado devido à ausência de disco no rotor e portanto falta de área de contato para a conversão de momento. O espaçamento nesta configuração foi de 9 mm entre as paredes do rotor e gerou uma diferença de torque de 0,50 N·m.

Comparando as configurações: II, IoI e IOI da Figura 4.13b, montadas utilizando 2 discos no rotor com 3 espaçamentos diferentes, pode se observar que existiu um incremento de 0,05 N·m em 200 kPa (entre as configurações II e IoI) e um incremento de 0,1 N·m em 400 kPa (entre as configurações II e IOI). Isto, demonstra que o espaçamento pode ter um efeito no valor do torque. A configuração IoI apresentou o valor de torque maior ao das configurações II e IOI em 200 kPa (0,41 N·m). Mas a configuração IOI apresentou valor maior ao das configurações II e IoI na pressão de 400 kPa (1,16 N·m) e maior diferença de torque de 0,79 N·m (entre 200 kPa e 400 kPa).

Para a Figura 4.13 pode-se observar que o menor valor de torque foi de 0,29 N·m na pressão de 200 kPa na configuração O, que atingiu o torque máximo de 1,22 N·m na pressão de 400 kPa na configuração III, o que representa um aumento de 4,2 vezes o torque devido ao aumento de discos e pressão de entrada. Os valores de $Torq_{célula}$ obtidos experimentalmente foram quase o dobro dos valores obtidos por Galindo, 2016, para um intervalo de P_{-eb} de

200 KPa até 300 KPa. Isto pode ser devido às condições de operação da TMD do *Torq_{célula}* com espaçamento praticamente igual a 1 mm mas discos e diâmetros diferentes.

4.5.2 Ajuste de dados experimentais usando o teorema de Buckingham

A partir da Equação 2.12 obteve-se a Figura 4.14 que é uma comparação entre os grupos adimensionais $\Pi_1 = f(\Pi_2)$. Se utilizou a Equação 2.12 junto com os resultados obtidos experimentalmente para todas as configurações dos discos.

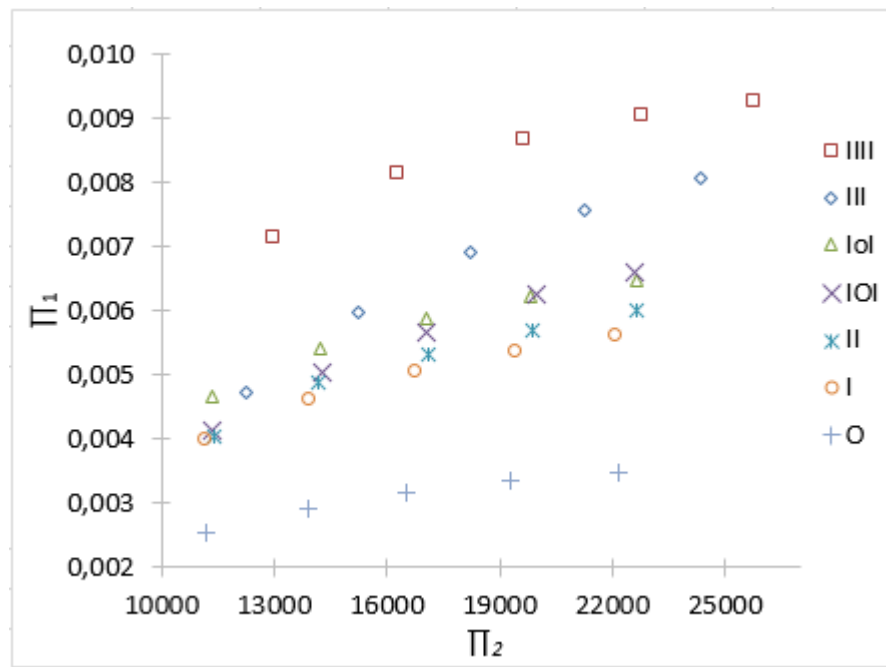


Figura 4.14 – Prova de análise dimensional Π_1 vs Π_2 para todas as configurações dos discos

Observa-se que Π_1 e Π_2 , para cada configuração de discos, estão em função do volume (*Vol*) e dentro de ela está o espaçamento dos discos (*b*) em que a vazão mássica do ar (\dot{m}_{bloq}) poderá percorrer dentro da TMD. A Figura 4.14 permite observar que quanto menor for o espaçamento entre discos e maior o número de discos dentro do rotor, maior serão os resultados das ordenadas Π_1 e abscissas Π_2 para cada uma das configurações dos discos. Demonstrando assim para ter um maior resultado de torque estático (*Torq_{célula}*) no sistema o espaçamento entre os discos deve ser menor e equidistante. A Tabela 4.7 detalha as equações potencias obtidas pelo método de Buckingham a partir dos dados experimentais do *Torq_{célula}* para cada uma das configurações dos discos no intervalo de pressões de 200 kPa até 400 kPa.

Tabela 4.7 – Equações obtidas pelo o teorema de Pi de Buckingham a partir de dados experimentais

Parte e Código		Equações a partir de $\Pi_1 = f(\Pi_2)$	$Torq_{célula}$ a partir do teorema de Pi de Buckingham (ver Equação 2.13)
Primeira	III	$\Pi_1 = 2,15 * 10^{-4} (\Pi_2)^{0,372}$	$Torq_{célula} = 4,35 * 10^{-5} \left(\frac{P_{eb} \dot{m}_{bloq} Vol^{0,66}}{\mu} \right)^{0,683}$
	III	$\Pi_1 = 3,16 * 10^{-6} (\Pi_2)^{0,78}$	$Torq_{célula} = 1,79 * 10^{-6} \left(\frac{P_{eb} \dot{m}_{bloq} Vol^{0,66}}{\mu} \right)^{0,889}$
	I	$\Pi_1 = 4,06 * 10^{-5} (\Pi_2)^{0,494}$	$Torq_{célula} = 1,24 * 10^{-5} \left(\frac{P_{eb} \dot{m}_{bloq} Vol^{0,66}}{\mu} \right)^{0,746}$
	0	$\Pi_1 = 3,42 * 10^{-5} (\Pi_2)^{0,465}$	$Torq_{célula} = 1,01 * 10^{-5} \left(\frac{P_{eb} \dot{m}_{bloq} Vol^{0,66}}{\mu} \right)^{0,732}$
Segunda	II	$\Pi_1 = 2,17 * 10^{-5} (\Pi_2)^{0,562}$	$Torq_{célula} = 1,61 * 10^{-5} \left(\frac{P_{eb} \dot{m}_{bloq} Vol^{0,66}}{\mu} \right)^{0,734}$
	IoI	$\Pi_1 = 5,92 * 10^{-5} (\Pi_2)^{0,469}$	$Torq_{célula} = 7,39 * 10^{-6} \left(\frac{P_{eb} \dot{m}_{bloq} Vol^{0,66}}{\mu} \right)^{0,781}$
	IOI	$\Pi_1 = 7,01 * 10^{-6} (\Pi_2)^{0,685}$	$Torq_{célula} = 3,25 * 10^{-6} \left(\frac{P_{eb} \dot{m}_{bloq} Vol^{0,66}}{\mu} \right)^{0,842}$

4.5.3 Comparação do $Torq_{célula}$ com o torque teórico $Torq_{pp}$

Além do $Torq_{célula}$ (ver Equação 3.10) foi calculado o torque teórico, a partir do modelo de placas planas definido como $Torq_{pp}$ (detalhado na Seção 2.3) o qual é calculado da Equação 2.8. A partir dessa equação foram obtidos os resultados da Tabela 4.8 usando apenas a pressão de entrada (P_{-eb}) da configuração de discos III.

Tabela 4.8 – Comparação de torques experimentale teórico

Pressão P_{-eb} [kPa]	Torque [N·m]		Diferença % de $Torq_{célula}$ com $Torq_{pp}$
	$Torq_{célula}$ Equação 3.10	$Torq_{pp}$ Equação 2.8	
200,377	$0,47 \pm 0,00028$	$0,51 \pm 0,1179$	8,51
251,999	$0,67 \pm 0,00034$	$0,65 \pm 0,1189$	2,98
302,861	$0,85 \pm 0,00040$	$0,78 \pm 0,1282$	8,23
351,719	$1,03 \pm 0,00046$	$0,90 \pm 0,1407$	12,62
399,400	$1,20 \pm 0,00052$	$1,01 \pm 0,1536$	15,83

Na Tabela 4.8 observa-se que a diferença entre as medidas de torque $Torq_{célula}$ e $Torq_{pp}$ foi de no máximo 15,83%. Sendo assim, o modelo de placa plana pode ser utilizado para modelar o comportamento aproximado da TMD existente no laboratório.

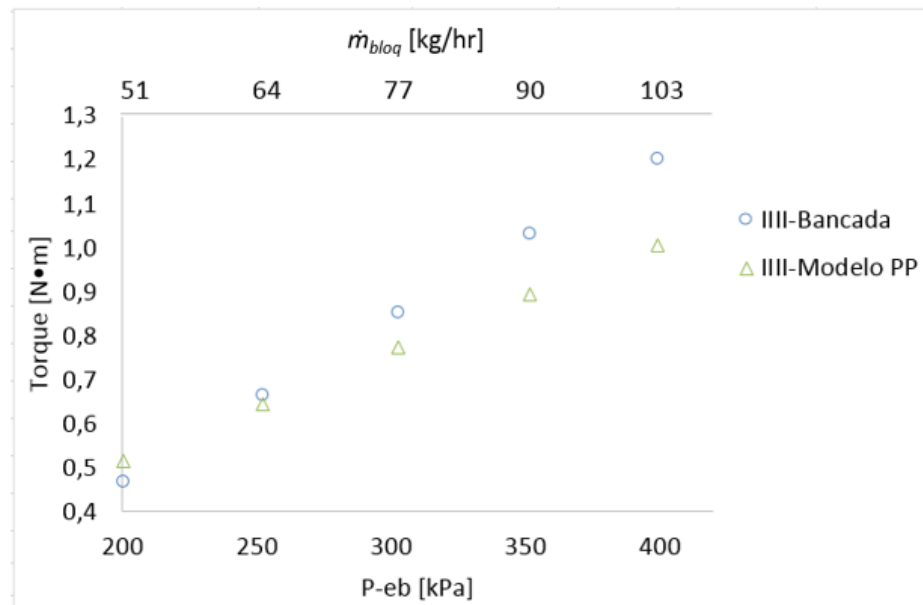


Figura 4.15 – Comparação dos torques $Torq_{célula}$ e $Torq_{pp}$ para a configuração de discos III

Na Figura 4.15 é possível distinguir o comportamento dos torques em função do aumento de pressão na entrada e o aumento da vazão mássica. Observa-se que o modelo de placas planas obteve valores inferiores do torque estático experimental (no intervalo de 250 kPa a 400 kPa), verificando-se que o método analítico de $Torq_{pp}$ pode ser utilizado para prever o comportamento no intervalo de estudo entre pressões de 200 kPa a 350 kPa com uma diferença máxima de 12,62%.

4.5.4 Validação da medição de torque do eletrodinamômetro

Nesta seção se compara o torque medido pela célula de carga $Torq_{célula}$ com o torque medido diretamente com um torquímetro o estático digital ($Torq_{torq}$). A instalação do torquímetro eletrônico é mostrado na Figura 4.16.



Figura 4.16 – Torquímetro instalado na turbina Tesla

Na Figura 4.16 observa-se que o $Torq_{torq}$ foi medido em um experimento usando a configuração de disco III, pois foi aquela que apresentou os maiores valores de $Torq_{célula}$ neste trabalho. A Tabela 4.9 compara o torque estático do eletrodinamômetro $Torq_{célula}$ com o obtido pelo torquímetro $Torq_{torq}$, para o intervalo de pressão de entrada P_{-eb} desde 200 kPa até 400 kPa.

Tabela 4.9 – Comparação entre valores de pressão e torque, utilizando o sensor de força e o torquímetro

Eletrodinamômetro		Torquímetro		Desvio relativo percentual da Pressão e do Torque [%]	
P_{-eb} [Pa]	$Torq_{célula}$ [N·m]	P_{-eb} [Pa]	$Torq_{torq}$ [N·m]	Pressão	Torque
200377,25	$0,47 \pm 0,00028$	199163,54	$0,45 \pm 0,00677$	0,61	3,45
251999,53	$0,67 \pm 0,00034$	250986,44	$0,65 \pm 0,00967$	0,40	3,20
302861,45	$0,85 \pm 0,00040$	301832,44	$0,83 \pm 0,01241$	0,34	3,11
351719,67	$1,03 \pm 0,00046$	351132,23	$1,00 \pm 0,01502$	0,17	2,98
399400,09	$1,20 \pm 0,00052$	399678,20	$1,17 \pm 0,01747$	0,07	3,08

Na Tabela 4.9 observa-se os desvios relativos percentuais que demonstram que os resultados obtidos pelo torquímetro são praticamente iguais aos resultados usando o eletrodinamômetro no qual a diferença máxima para a pressão foi de 0,61% e para o torque foi de 3,45%, o que significa que o procedimento de calibração em comparação com os resultados de torque foi realizado com exatidão, tendo uma diferença relativa de menos de 5%.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar experimentalmente o comportamento do torque estático em um protótipo de turbina de múltiplos discos (TMD) para diferentes configurações de rotor, variando o número de discos e o espaçamento entre eles. Para isto, primeiramente foi realizada a redução de ruídos elétricos e posterior calibração dos sensores instalados na TMD para diminuir as incertezas nas medições. Em seguida, os testes foram desenvolvidos num intervalo de pressões de entrada de 200 kPa até 400 kPa. O torque estático foi medido na velocidade angular zero do rotor para identificar os comportamentos básicos da turbina. Os resultados de torque demonstraram que existe uma tendência do torque estático aumentar à medida que aumenta a pressão de entrada, esse aumento foi desde 0,28 N·m na pressão de 200 kPa na configuração O, até 1,22 N·m na pressão de 400 kPa na configuração III o que representa um aumento de 4 vezes o seu valor inicial. O experimento mostrou uma dependência linear do torque estático com a pressão, como esperado para as turbinas com uma condição de bloqueio. Observou-se que todas as configurações de discos atingiram mais que o dobro do seu torque inicial quando a pressão de entrada aumentou, sendo o maior incremento o da configuração de disco III (0,86 N·m) e o menor o da configuração O (0,5 N·m).

Observou-se que a configuração III apresenta os maiores valores de torque se comparados aos das outras configurações nas mesmas condições de pressão de entrada no intervalo de 200 kPa até 350 kPa, demonstrando que o aumento no número de discos incide no incremento nos valores de torque para todas as configurações. Por outro lado, quando a posição do disco no rotor foi testada para as configurações II, IOI e IoI, observou-se uma menor variação no torque estático, sendo que os melhores resultados foram atingidos nas configurações IOI e IoI. Isto demonstra que a posição e o afastamento entre discos pode influenciar no aprimoramento do desempenho da TMD.

A partir da análise das configurações de discos, procedeu-se a utilizar a configuração III por apresentar os maiores valores de torque na maioria das pressões estudadas. Essa configuração foi utilizada para comparar os valores de torque experimental usando o sensor de força ($Torq_{célula}$) com valores de torque obtidos a partir de um torquímetro ($Torq_{torq}$) e pelo método teórico de placas planas ($Torq_{pp}$). Comparando o resultados de $Torq_{célula}$ com os de $Torq_{torq}$, observou-se uma diferença máxima de 3,45%, significando que todos os procedimentos de calibração e redução de ruídos elétricos feitos na TMD foram apropriados. Também, viu-se necessário comparar os valores de torque experimental com torque teórico, já

que se sabe que abordagens analíticas ajudam a entender melhor o comportamento da turbina, se comparou os valores de $Torq_{célula}$ com os valores de torque a partir do modelo de placas planas ($Torq_{pp}$), os quais apresentaram uma diferença máxima de 15,83% em relação aos resultados de $Torq_{célula}$. Desta forma, verificou-se que o método analítico $Torq_{pp}$ pode ser utilizado para definir os limites inferior do torque estático esperado usando o sensor de força ($Torq_{célula}$).

Os resultados pelo procedimento do teorema Pi de Buckingham satisfazem o princípio da homogeneidade dimensional e permitem o cálculo do torque a partir de dados experimentais através de equações simplificadas correspondentes para cada um das configurações dos discos da primeira e segunda parte do experimento para uma faixa de 200 kPa até 400 kPa.

Através da avaliação do comportamento da turbina observou-se que a vazão mássica medida do Venturi \dot{m}_{vent} e a vazão mássica medida no bloqueio \dot{m}_{bloq} não apresentaram uma variação significativa (a diferença máxima foi de 3% entre elas). Isto sugere utilizar só a Equação 4.9 para o cálculo da vazão mássica, o que permite um cálculo rápido e direto com os dados de entrada da TMD, sendo assim, não necessária a utilização do Venturi.

A partir da análise do número de Mach, constatou-se que o escoamento foi sônico na saída do bocal convergente e, portanto, o bocal se encontrava bloqueado para todas as configurações de discos estudadas neste trabalho. Os valores de número de Mach experimental apresentaram variação máxima de 2,8% se comparado com o número de Mach igual a 1.

Concluindo, pode-se dizer que as principais contribuições deste trabalho foram: (i) a melhoria na aquisição de dados na bancada experimental da TMD, reduzindo os ruídos elétricos em até 92,7%; (ii) viu-se que a vazão determinada através do bloqueio (\dot{m}_{bloq}) resultou em valores satisfatoriamente confiáveis, de maneira que o uso do Venturi pode ser dispensado; (iii) cumprindo com o objetivo principal este trabalho apresentou o comportamento do torque mediante diferentes configurações de discos, mostrando os maiores valores de torque nas configurações III e IIII; (iv) o presente trabalho demonstrou que rotores com a mesma quantidade de discos mas com espaçamentos diferentes influenciam de maneira significativa no torque estático da TMD (v) validou-se o método de Buckingham e o modelo de placa plana para predizer o torque ($Torq_{pp}$).

Como sugestão de trabalhos futuros, novos experimentos podem ser desenvolvidos tomando dados para diferentes valores de pressão mudando o ângulo do bocal e testando

diferentes tipos de bocais (quadrado ou retangular), para comprovar se existe uma melhora dos valores de torque e desempenho da TMD, com as mesmas configurações de disco usadas neste trabalho, com ou sem rotação dos discos.

Quanto ao uso de outros fluidos podem ser realizados estudos experimentais mais detalhados, incluindo fluidos não-newtonianos. Para isto seria necessário ter cuidado com a vedação dos equipamentos para não ter vazamentos em algumas partes da TMD.

Abordagens analíticas ou numéricas poderiam ajudar a entender melhor o comportamento da turbina, inclusive permitindo criar modelos analíticos validados para projetos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR, ISO 5167-1:2008, **Medição de vazão de fluídos por dispositivos de pressão diferencial, inserido em condutos forçados de seção transversal circular**, 2008.

Adams, T. M., **G104 – A2LA Guide for Estimation of Measurement Uncertainty in Testing**, 2002.

Batista, J. C., **Microgeração de Energia Elétrica Utilizando Turbina Tesla Modificada**, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, 2009.

Cairns, W., **The Tesla Disc Turbine**, Camden Miniature Steam Services Barrow Farm, Rode, Frome, Somerset. BA11 6PS, 2001.

Carvalho, J. F. T., **Predição Numérica do Torque em uma Turbina Tesla com Rotor Estacionário**; Dissertação, Universidade Federal Rio Grande do Sul, 2018.

Çengel, Y. A., **Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones**, 2ª Edición, McGraw-Hill, 2006.

Ermel, C., Thomazoni, A., Rech Ch., Vieira, J., Novo, G, Schneider, P. S., **Experimental Setup For a Bench Scale Multiple Disk Turbine (Tesla Turbine)**, 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM, Brazil, 2017.

Emran, A. T., **Tesla Turbine Torque Modeling For Construction of Dynamometer and Turbine**, Thesis Prepared for the Degree of Master of Science, University of North Texas, USA, 2011.

Furtado, G. F., **Análise da Técnica de Cancelamento de Ruído em Circuitos Analógicos**, Dissertação, Universidade Federal Rio Grande do Sul, 2015.

Galindo, D. J., **Análisis de Eficiencia en Turbina Tesla con Diferentes Configuraciones**, Maestria, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2016.

González, A. F., **Análisis Computacional del Torque en Función de la Tasa de Giro en la Turbina de Tesla de Aire**. Tesis de Ingeniería Civil Mecánico, Universidad de Chile, 2012.

Guha, Abhijit, Sengupta, Sayantan, **The Fluid Dynamics of Work Transfer in the Non-Uniform Viscous Rotating Flow Within a Tesla Disc Turbomachine**. Physics of Fluids. 26. 10.1063/1.4866263, 2014.

Harwood, P., **Further Investigation into Tesla Turbomachinery**, Senior Project Report, Mechanical Engineering Department, University of Newcastle, United Kingdom; 2008

Hibbeler, R. C., **Mecánica Vectorial para Ingenieros Estática**, Prentice Hall, 10^{ma} Edición, 2004.

Ho-Yan, B. P., **Tesla Turbine for Pico Hydro Applications**, Guelph Engineering Journal, vol. 4, pp. 1 - 8. ISSN: 1916-1107, 2011.

INMETRO, **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**, Instituto Nacional de Metrologia, Rio de Janeiro, 1998.

ISO GUM, **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements**, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2008.

Lawn, M. J. Jr., **An Investigation of Multiple-Disk Turbine Performance Parameters**, MSE Thesis, Mech, Engrg., Arizona State University, 1972.

Leaman, A. B., **The Design, Construction and Investigation of a Tesla Turbine**, University of Maryland, 1950.

Lezsovits, F., **Cogeneration in Industrial Steam Systems With Multiple-Disk Turbines**, Panel 5. Energy Efficiency in Industry, pp. 1045-1049, 2009

Logan, E. Jr., **Arizona State University Handbook of Turbomachinery**, 2ª Edition, Chapter 14 – Rice W., Tesla Turbomachinery. Marcel Dekker Inc. 2003.

Maidana, C. F., **Desenvolvimento de Turbinas de Múltiplos Discos Estudo de Modelos Analíticos e Análise Experimental**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Moran, M. J., Shapiro H. N., **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 4ª Edição, LTC, 2002.

Murata, S., Miyake, Y., Iemoto, Y., **A Study on a Disk Friction Pump: 1st Report, Theoretical Analysis for Flow between Corotating Disks**. Bulletin of Japanese Society Mech. Eng., vol. 19, pp. 168–178, 1976.

NAMAS, **The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement for Calibrations**. NIS 3003, Edition 8, May 1995.

Neckel, A. L., **Influência da Geometria Sobre o Rendimento de Bocais Injetores de Turbinas Tesla no escoamento Compressível Supersônico**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul, 2013.

Placo, G. M., Guimarães, N. L., Camillo, G. P., **Parâmetros de Funcionamento de uma Turbina de Tesla Operando a Ar Comprimido**, IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.

Potter, M. C., Wiggert D. C., Ramadam B. H., **Mecânica de Fluidos**, 4ª Edição, Cengage Learning, 2012.

Rice, W., **An Analytical and Experimental Investigation of Multiple-disk Turbines**, Journal of Engineering Power. 87(1), pp. 29–36, 1965.

Rodrigues, M. I., Lemma, A. F., **Diseño Experimental y Optimización de Procesos**, Carita Editora, 1ª Edição, 2012.

Rosa, E., **Solução de Navier-Stokes**, FEM, Universidade Estadual de Campinas, 2015.

Schneider, P., **Incertezas de Medição e Ajuste de Dados**, GESTE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

Tahil, W., **Theoretical Analysis of a Disk Turbine (1)**, Tesla Engine Builders Association. Dec. 1998, pp. 18–19, 1998.

Taylor, B. N., Kuyatt, C. E., **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement**, NIST-National Institute of Standard and Technology, 1994.

Tesla, N., **Turbine**, US Patent # 1-061-206, 1913.

Tesla, N., **Fluid Propulsion**, US Patent # 1-061-142, 1913.

Villa, C., Reyna, M.A., Villa, R., **Aproximación Difusa con Filtros de Orden Bajo a Filtros de Orden Alto Aplicados a Señales ECG**, Rev. Mex. Ing. Biom. 25(1), 25-33, 2004.

Vincent, D. R., **Theory and Performance of Tesla Turbines**, Tese de Doutorado (em ingles), University of California, Berkeley, 2012.

Von Haartman, M., Ostling, M., **Low-Frequency Noise in Advanced MOS Devices**, Dordrecht, Springer, 2007.

Weng, B., Blanco-Velasco M., Barner, K.E., **ECG Denoising Based on the Empirical Mode Decomposition**, Proceedings of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference, 2006.

White, M. F., **Mecânica dos Fluidos**, 4^a Edição, McGraw-Hill, 2002.

Wyllen, G. J. V., Sonntag, R. E., Borgnakke, R. E., **Fundamentos da Termodinâmica**, Edgard Blücher, 6^a Edição, São Paulo, 2003.

APÊNDICE A - Dedução de Equações

TENSÃO DE CISALHAMENTO τ_p

Considerando o perfil de velocidade entre placas planas apresentado na Figura 2.7 da seção 2.3.1, aplica-se a equação de Navier Stockes na componente x para um escoamento incompressível com viscosidade constante através da Equação A.1.

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (\text{A.1})$$

As hipóteses simplificativas assumidas para essa equação são:

- Escoamento incompressível;
- Regime permanente;
- Escoamento totalmente desenvolvido;
- Regime laminar;
- As dimensões da placa nas direções x e z são muito maiores do que em y ;
- O escoamento do fluido é observado apenas na direção x ;
- Desprezam-se as forças de campo.

Cabe de mencionar que se considera o gradiente de pressão na Equação A.1, fazendo todas as considerações anteriores temos a Equação A.2,

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (\text{A.2})$$

integrando a Equação A.2 temos a Equação A.3,

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} y + C_1 \quad (\text{A.3})$$

integrando a Equação A.3 temos a Equação A.4,

$$v = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2 \quad (\text{A.4})$$

Aplicando condiciones de contorno $y = 0$, $v = \frac{\partial v}{\partial y} = 0$ para a Equação A.3 e $y = \frac{b}{2}$, $v = 0$ para a Equação A.4 respectivamente, obtemos a Equação A.5 que é a lei da velocidade que tem a forma de uma parábola de Poiseville o que significa que o fluido se desloca devido a diferença de pressão,

$$v_y = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} \left[\frac{y^2}{2} - \frac{b^2}{8} \right] \quad (\text{A.5})$$

aplicando condiciones de contorno na Equação A.5 $v_y = V_{max}$ e $y = 0$, e isolando $\frac{dP}{dx}$ para substituir na Equação A.5, obtemos a uma nova Equação A.6.

$$v_y = -\frac{V_{max} 8}{b^2} \left[\frac{y^2}{2} - \frac{b^2}{8} \right] \quad (\text{A.6})$$

Segundo White, 2002, sabemos que para a tensão de cisalhamento, Equação A.7.

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy} \quad (\text{A.7})$$

Derivando a Equação A.6 respeito à Equação A.7, obtemos a Equação A.8,

$$\tau = \frac{\mu V_{max}}{b^2} y \quad (\text{A.8})$$

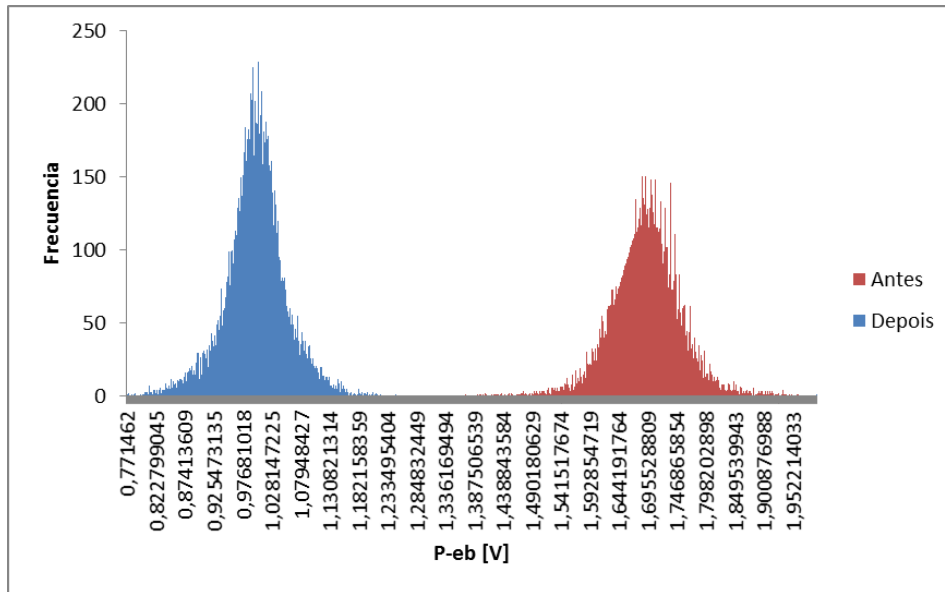
aplicando na Equação A.8 a velocidade média do fluido $V_{med} = \frac{3}{2} V_{max}$ [White 2002] e novas condições de contorno $y = \frac{b}{2}$, $\tau = \tau_p$, depois fazendo operações algébricas correspondentes obtém-se a tensão de cisalhamento τ_p que é dada pela Equação A.9, induzido pelo escoamento de um fluido em uma só superfície,

$$\tau_p = \frac{\mu V_{med} 6}{b} \quad (\text{A.9})$$

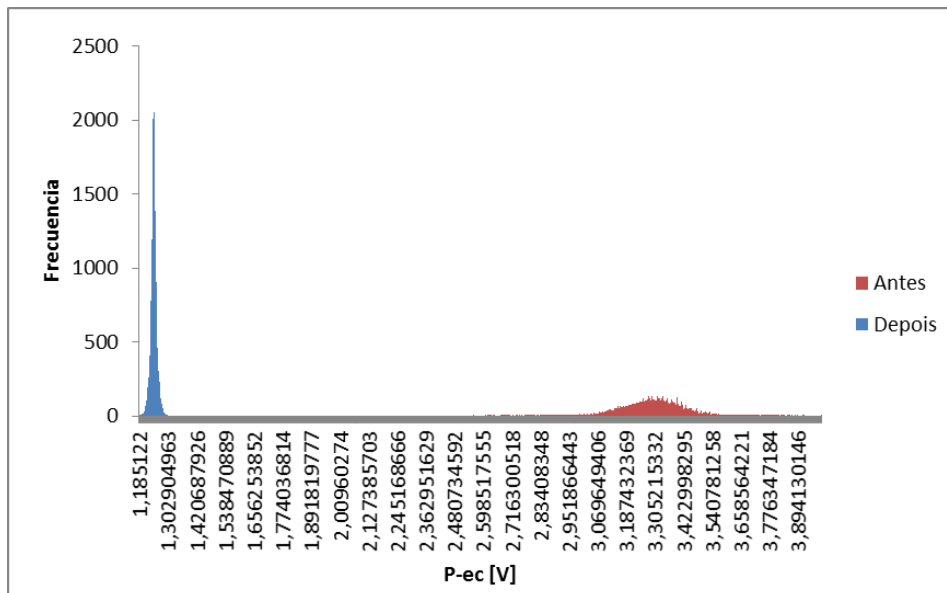
onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido, [kg/(m·s)], V_{med} é a velocidade média da vazão entre as placas, [m/s], e b é a distância entre dois discos, [m].

APÊNDICE B – Histogramas

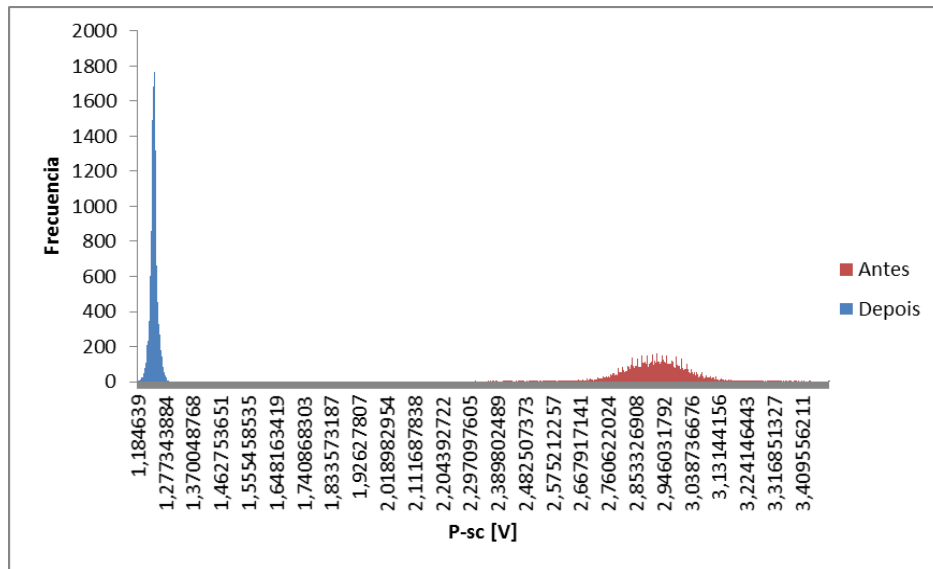
Na Figura B.1 apresenta-se os histogramas dos ruídos elétricos para cada sensor antes e depois das modificações. Cada histograma apresenta a acumulação ou tendência, a variabilidade ou dispersão e a forma da distribuição.



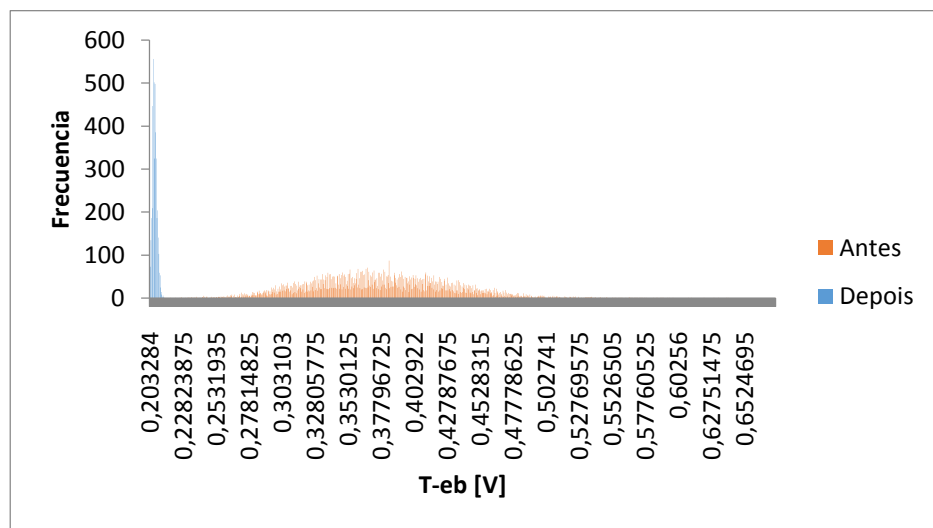
a)



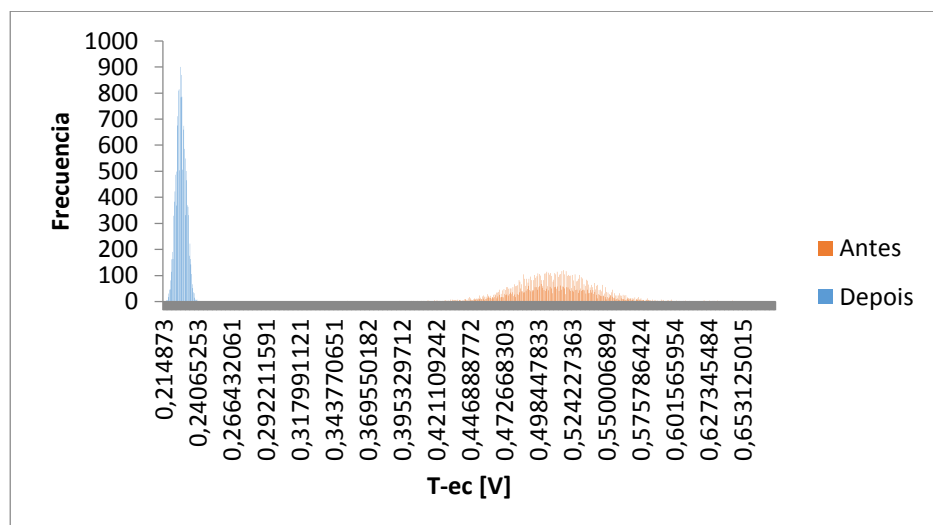
b)



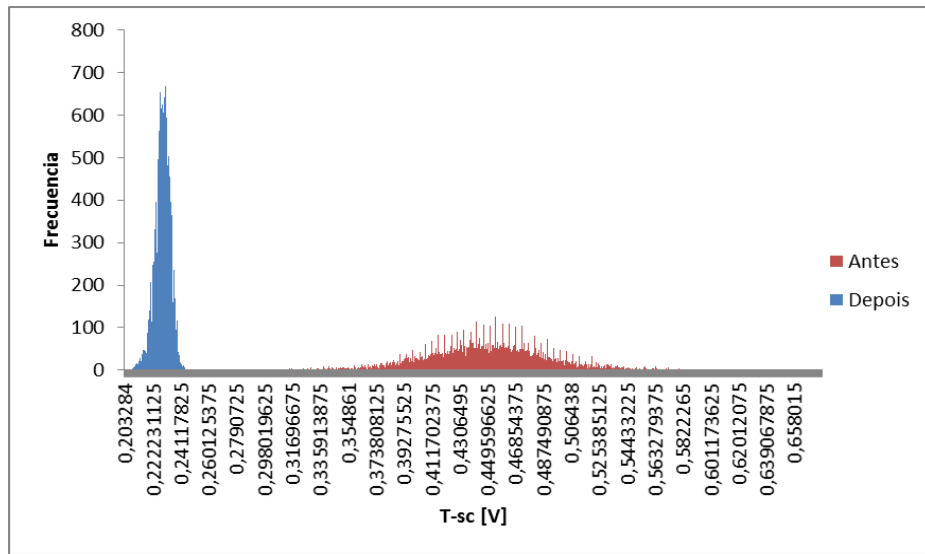
c)



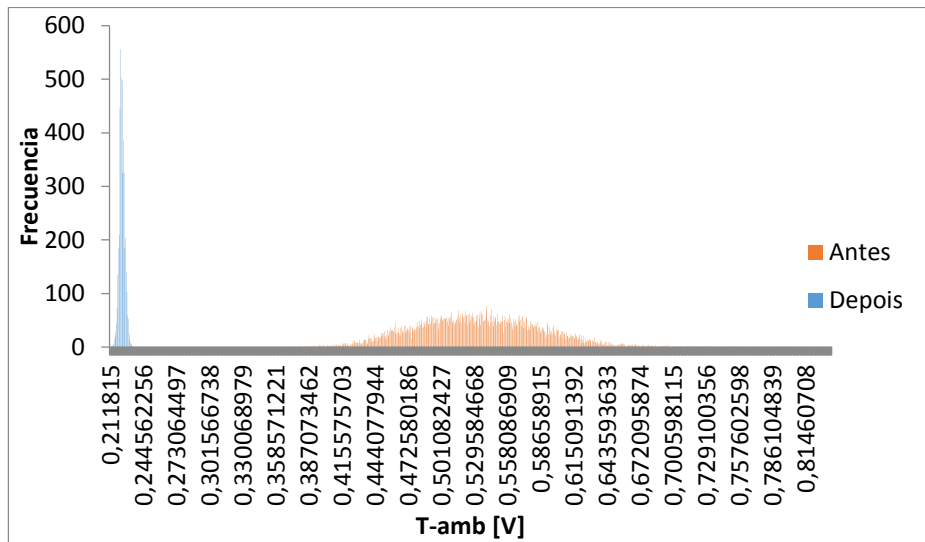
d)



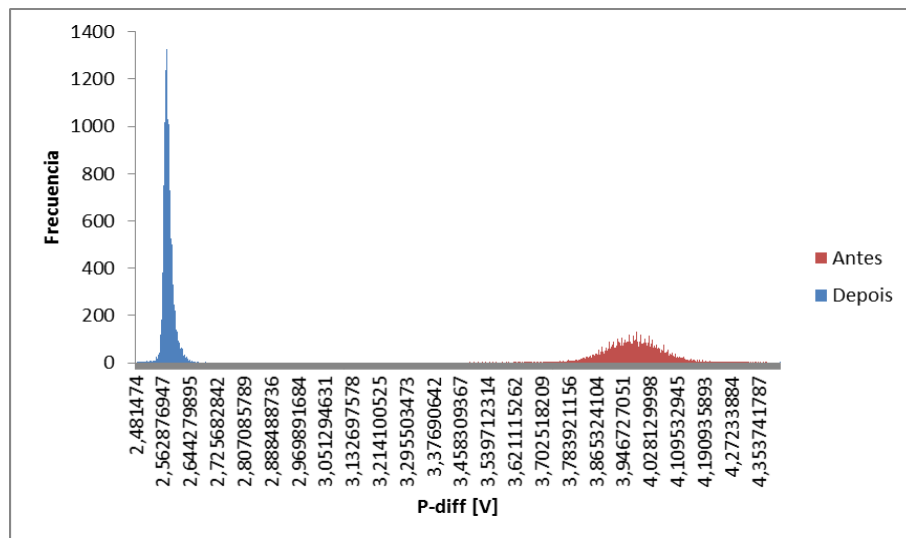
e)



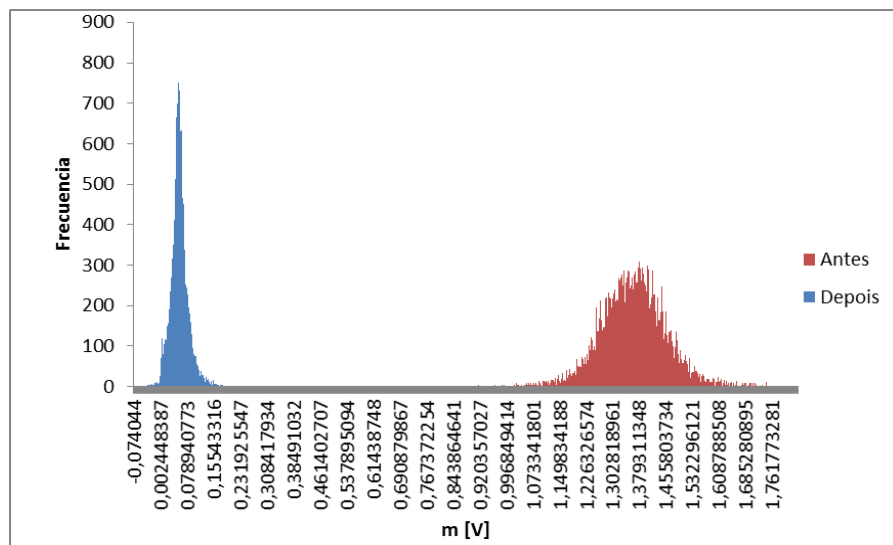
f)



g)



h)



i)

Figura B.1 – Comparação de histogramas de antes e depois do ruído elétrico, de: a) Pressão de entrada do bocal, b) Pressão de entrada da carcaça, c) Pressão na saída da carcaça, d) Temperatura na entrada do bocal, e) Temperatura na entrada da carcaça, f) Temperatura na saída da carcaça, g) Temperatura no ambiente do laboratório, h) Pressão diferencial, i) Sensor de força

APÊNDICE C – Calibrações

C.1 - Calibração da pressão entrada do bocal *P-eb*

Conforme mencionado na seção 3.3, a pressão da entrada do bocal utilizada na bancada experimental foi calibrada com a utilização de um sensor padrão transdutor de pressão *S-10* para ter um conjunto de pressões que foram verificados através da Tabela C.1, que apresenta os valores obtidos durante o processo de calibração.

Tabela C.1 - Pressão da entrada do bocal fornecida pelo sensor padrão S-10, em função da tensão elétrica do sensor do bocal

Padrão <i>S-10</i> [kPa]	Calibrando <i>P-eb</i> [V]
-0,086	0,99540
103,263	1,40682
203,978	1,80738
304,146	2,20854
403,089	2,60437
503,252	3,00401
603,338	3,40324
704,048	3,80322
802,951	4,20133
903,978	4,60507
1002,87	4,99352

As informações da Tabela C.1 foram utilizadas para gerar a Figura C.1.

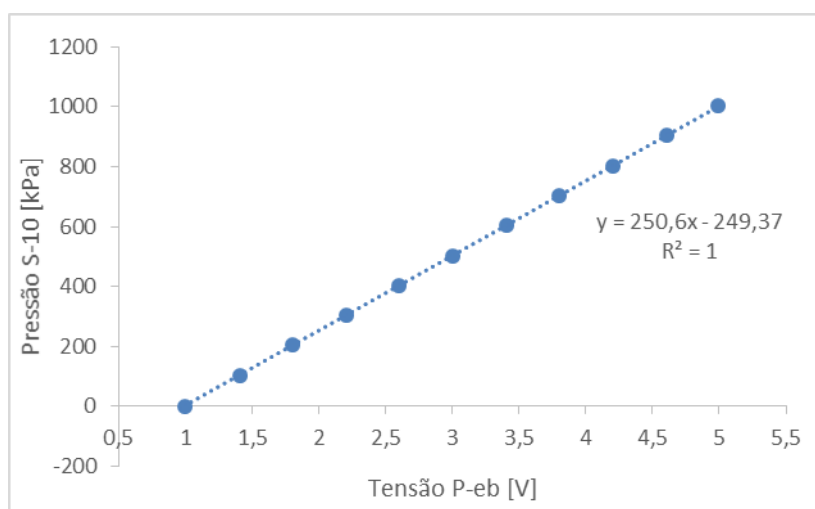


Figura C.1 – Curva de operação do sensor de pressão de entrada do bocal *P-eb*

C.2 - Calibração da pressão entrada da carcaça *P-ec*

Conforme mencionado na seção 3.3, a pressão da entrada da carcaça utilizada na bancada experimental foi calibrada com a utilização de um sensor padrão transdutor de pressão *S-10* para ter um conjunto de pressões que foram verificados através da Tabela C.2 que apresenta os valores obtidos durante o processo de calibração.

Tabela C.2 -. Pressão da entrada da carcaça fornecida pelo sensor padrão *S-10*, em função da tensão elétrica do sensor da entrada da carcaça

Pressão <i>S-10</i> [kPa]	Calibrando <i>P-ec</i> [V]	Pressão <i>S-10</i> [kPa]	Calibrando <i>P-ec</i> [V]
-0,1530	1,26228	155,6270	3,22622
13,4357	1,43218	171,7179	3,42788
29,1065	1,63259	187,8378	3,62951
44,0100	1,82567	203,6153	3,82710
60,3399	2,02676	220,3129	4,03451
76,2524	2,22799	235,4075	4,21909
92,0110	2,42664	252,4417	4,43175
107,7848	2,62530	268,3253	4,62746
123,9388	2,82867	284,6795	4,82924
140,2740	3,03373	301,0237	5,03053

As informações da Tabela C.2 foram utilizadas para gerar a Figura C.2.

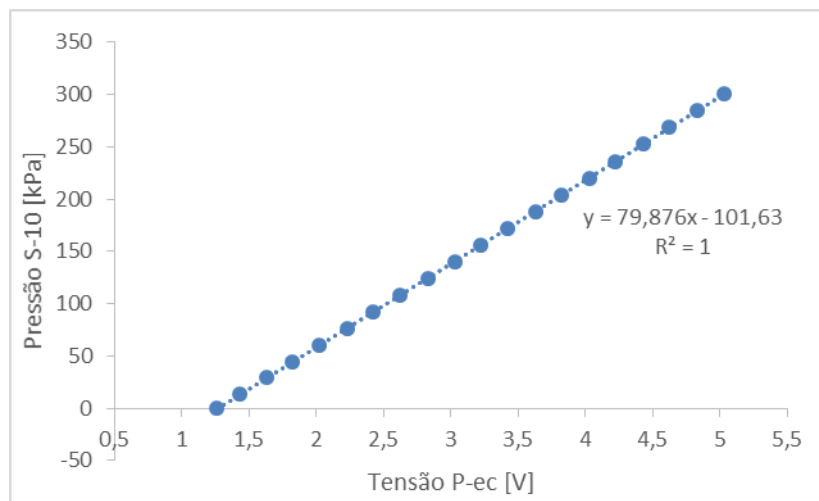


Figura C.2 – Curva de operação do sensor de pressão de entrada da carcaça *P-ec*

C.3 - Calibração da pressão saída da carcaça *P-sc*

Conforme mencionado na seção 3.3, a pressão de saída da carcaça utilizada na bancada experimental foi calibrada com a utilização de um sensor padrão transdutor de pressão *S-10* para ter um conjunto de pressões que foram verificados através da Tabela C.3 que apresenta os valores obtidos durante o processo de calibração.

Tabela C.3 – Pressão da saída da carcaça fornecida pelo sensor padrão *S-10*, em função da tensão elétrica do sensor da saída da carcaça

Pressão <i>S-10</i> [kPa]	Calibrando <i>P-sc</i> [V]	Pressão <i>S-10</i> [kPa]	Calibrando <i>P-sc</i> [V]
-0,1530	1,25601	155,6270	3,22056
13,4357	1,42588	171,7179	3,42258
29,1065	1,62551	187,8378	3,62272
41,2012	1,81885	203,6153	3,82088
60,3399	2,02024	220,3129	4,02801
76,2524	2,22250	235,4075	4,21467
92,0110	2,42087	252,4417	4,42515
107,7848	2,61892	268,3253	4,62043
123,9388	2,82133	284,6795	4,82167
140,274	3,02772	301,0237	5,02310

As informações da Tabela C.3 foram utilizadas para gerar a Figura C.3.

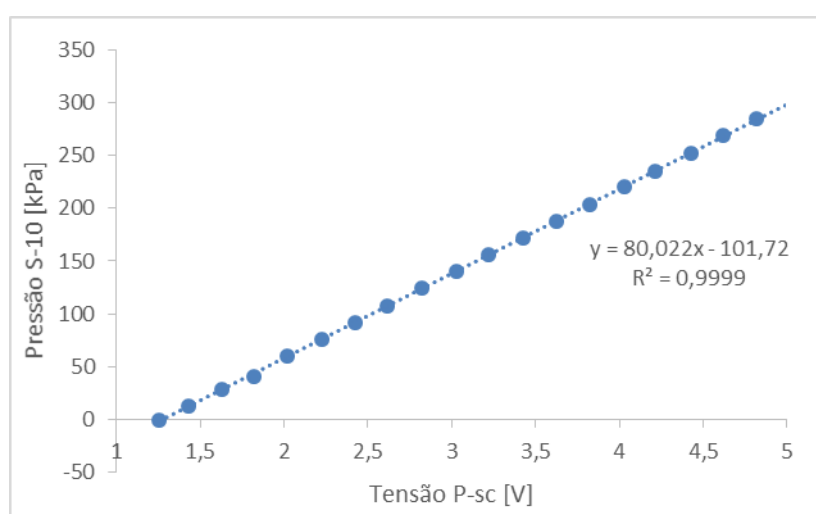


Figura C.3 – Curva de operação do sensor de pressão de saída da carcaça *P-sc*

C.4 - Calibração da temperatura entrada do bocal *T-eb*

Conforme mencionado na seção 3.3, a temperatura de entrada do bocal utilizada na bancada experimental foi calibrada com a utilização de um sensor de temperatura *PT-100* e o Agilent para ter um conjunto de temperaturas padrões que foram verificados através da Tabela C.4 que apresenta os valores obtidos durante o processo de calibração.

Tabela C.4 - Temperatura da entrada do bocal fornecida pelo Agilent, em função da tensão elétrica no sensor de temperatura K

Temperatura no Agilent [°C]	Calibrando <i>T-eb</i> [V]
26,08678	0,261687
31,86691	0,320123
36,84468	0,369395
41,82650	0,418012
46,34164	0,463165
53,05733	0,527019
56,61752	0,563333
62,01865	0,617604
66,30510	0,663567

As informações da Tabela C.4 foram utilizadas para gerar a Figura C.4.

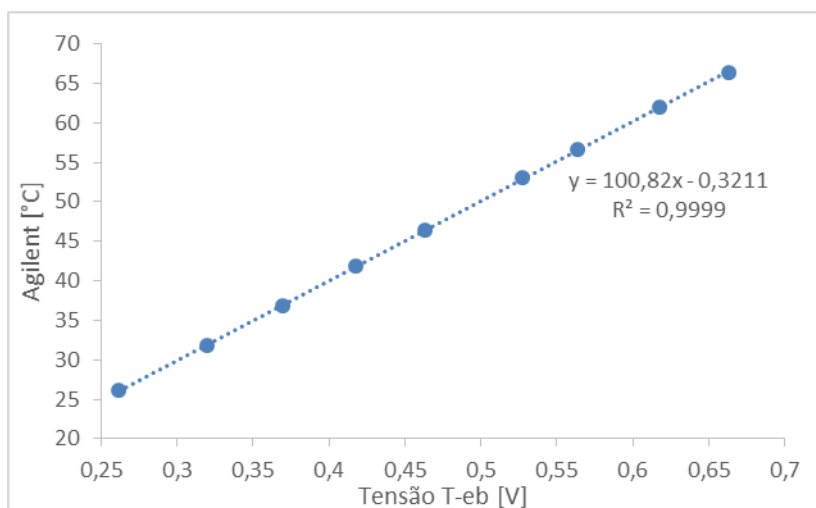


Figura C.4 – Curva de operação do sensor de temperatura da entrada do bocal *T-eb*

C.5 – Calibração da temperatura entrada da carcaça *T-ec*

Conforme mencionado na seção 3.3, a temperatura de entrada na carcaça utilizada na bancada experimental foi calibrada com a utilização de um sensor de temperatura *PT-100* e o Agilent para ter um conjunto de temperaturas padrões que foram verificados através da Tabela C.5 que apresenta os valores obtidos durante o processo de calibração.

Tabela C.5 – Temperatura da entrada da carcaça fornecida pelo Agilent, em função da tensão elétrica no sensor de temperatura K

Temperatura no Agilent [°C]	Calibrando <i>T-ec</i> [V]
26,08678	0,271450
31,86691	0,327120
36,84468	0,377356
41,82650	0,422978
46,34164	0,468639
53,05733	0,532524
56,61752	0,563807
62,01865	0,618742
66,30510	0,665282

As informações da Tabela C.5 foram utilizadas para gerar a Figura C.5.

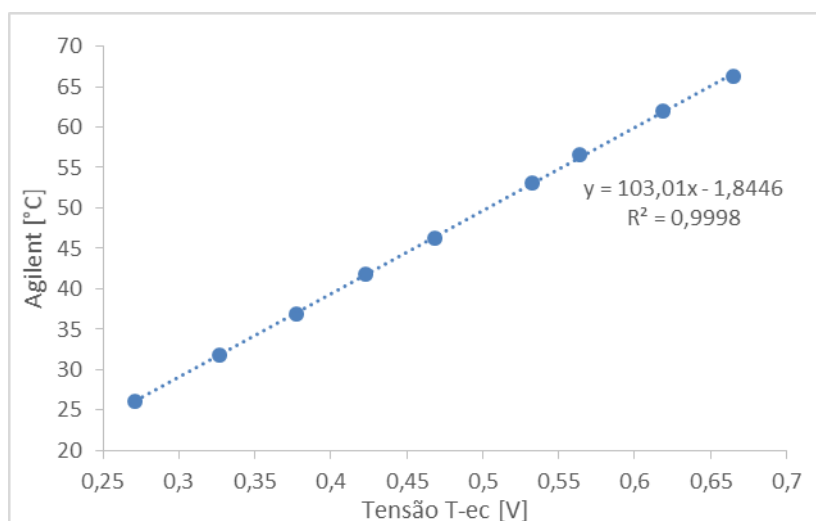


Figura C.5 – Curva de operação do sensor da temperatura da entrada da carcaça *T-ec*

C.6 – Calibração da temperatura saída da carcaça $T-sc$

Conforme mencionado na seção 3.3, a temperatura de saída da carcaça utilizada na bancada experimental foi calibrada com a utilização de um sensor de temperatura $PT-100$ e o Agilent para ter um conjunto de temperaturas padrões que foram verificados através da Tabela C.6 que apresenta os valores obtidos durante o processo de calibração.

Tabela C.6 – Temperatura de saída fornecida pelo Agilent, em função da tensão elétrica no sensor de temperatura K

Temperatura no Agilent [°C]	Calibrando $T-sc$ [V]
26,08678	0,278877
31,86691	0,336537
36,84468	0,385251
41,82650	0,441115
46,34164	0,483291
53,05733	0,546639
56,61752	0,581453
62,01865	0,639611
66,30510	0,676618

As informações da Tabela C.6 foram utilizadas para gerar a Figura C.6.

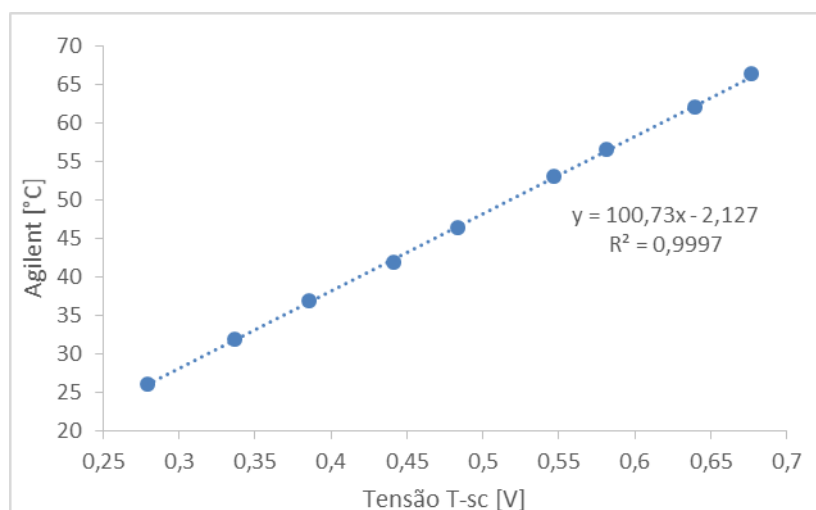


Figura C.6 – Curva de operação do sensor da temperatura saída da carcaça $T-sc$

C.7 – Calibração da temperatura ambiente T_{-amb}

Conforme mencionado na seção 3.3, a temperatura ambiente utilizada na bancada experimental foi calibrada com a utilização de um sensor de temperatura $PT-100$ e o Agilent para ter um conjunto de temperaturas padrões que foram verificados através da Tabela C.7 que apresenta os valores obtidos durante o processo de calibração.

Tabela C.7 – Temperatura de saída fornecida pelo Agilent, em função da tensão elétrica no sensor de temperatura K

Temperatura no Agilent [°C]	Calibrando T_{-amb} [V]
26,08678	0,296006
31,86691	0,352677
36,84468	0,402160
41,82650	0,453616
46,34164	0,496302
53,05733	0,561318
56,61752	0,594279
62,01865	0,651436
66,30510	0,688458

As informações da Tabela C.7 foram utilizadas para gerar a Figura C.7.

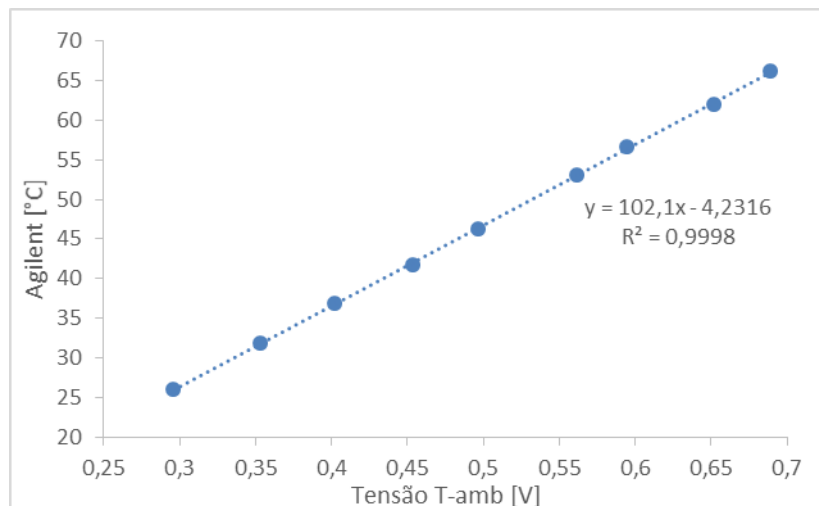


Figura C.7 – Curva de operação do sensor da temperatura ambiente T_{-amb}

C.8 – Calibração do sensor de força m

Conforme mencionado na seção 3.3, o sensor de força utilizado na bancada experimental foi calibrado com a utilização de um conjunto de pesos padrões que foram verificados através de uma balança digita. A Tabela C.8 apresenta os valores obtidos durante o processo de calibração.

Tabela C.8 – Massas impostas ao dispositivo, em função da tensão elétrica fornecida pelo sensor de força

Peso padrão [g]	Calibrando sensor de força m [V]
29,91	0,12941680
91,97	0,40086286
118,37	0,51794216
155,49	0,68046590
181,89	0,79616208
243,95	1,06266915
330,69	1,45329649
482,67	2,12141405
656,44	2,88380341
804,23	3,53234805
956,21	4,31151680

As informações da Tabela C.8 foram utilizadas para gerar a Figura C.8.

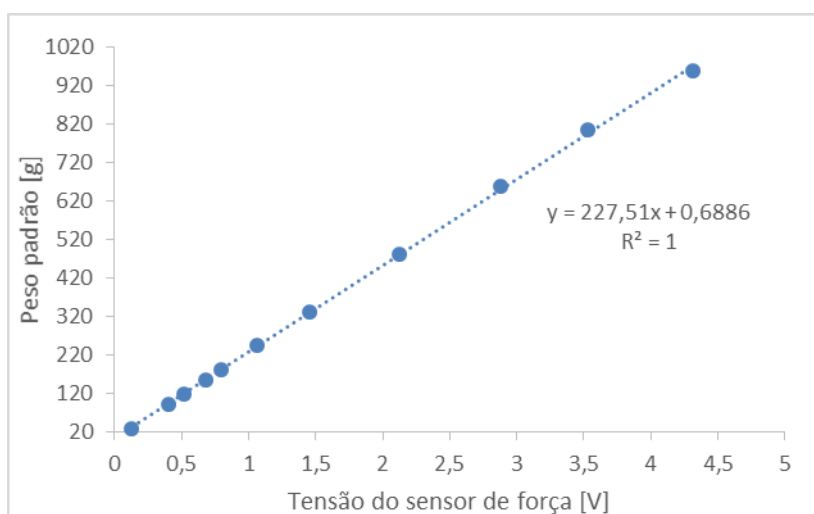


Figura C.8 – Curva de operação do sensor de força m

C.9 – Diagrama de bloco

A Figura C.9 apresenta o diagrama de blocos utilizado no software LabView™, o qual contém o código de fonte gráfica que pode se associar a um fluxograma de funcionamento da turbina Tesla.

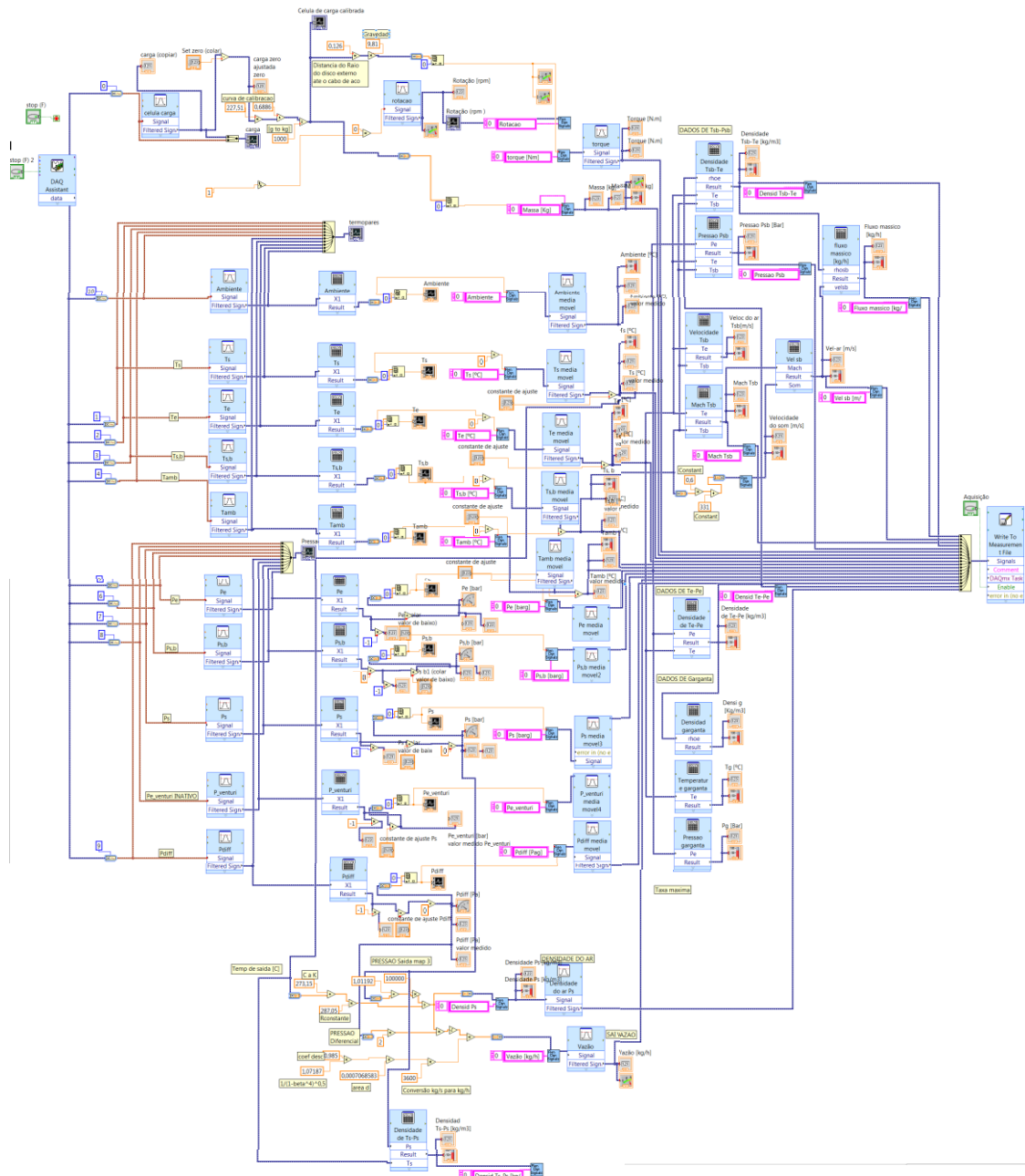
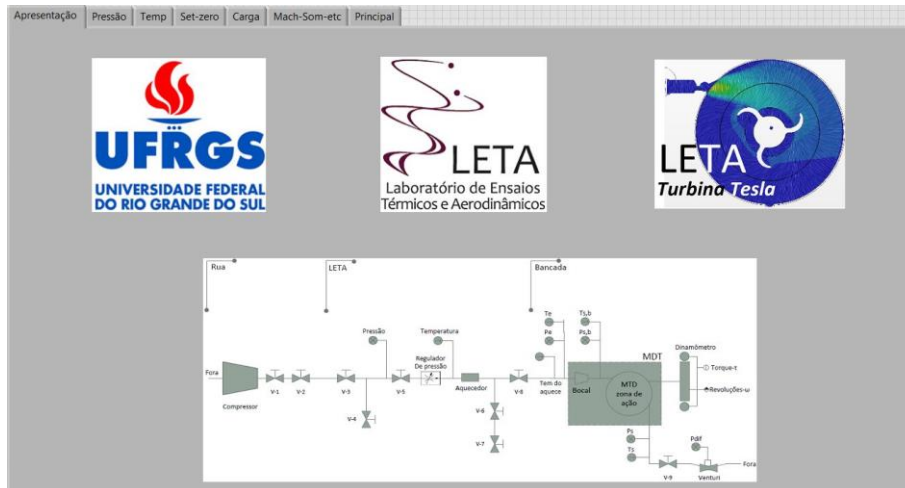


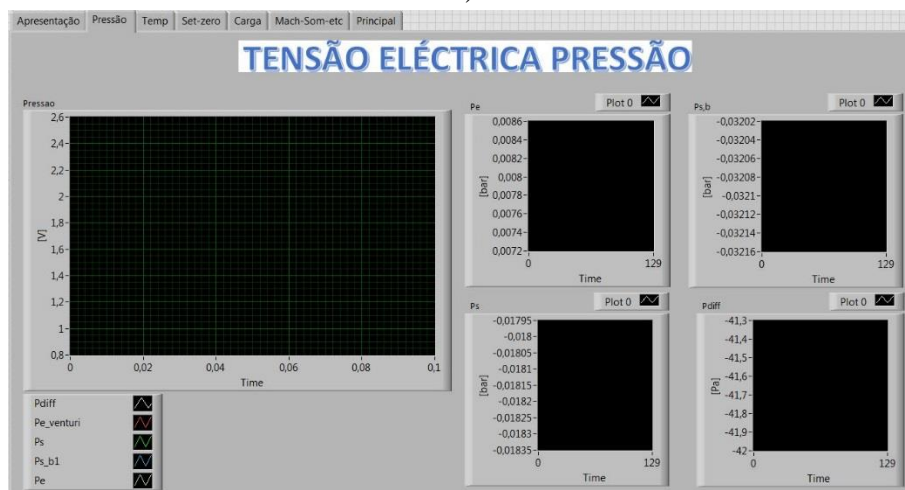
Figura C.9 – Diagrama de blocos do funcionamento da TMD da bancada

C.10 – Painel frontal

A Figura C.10 apresenta as diferentes telas para a obtenção dos dados da turbina Tesla.



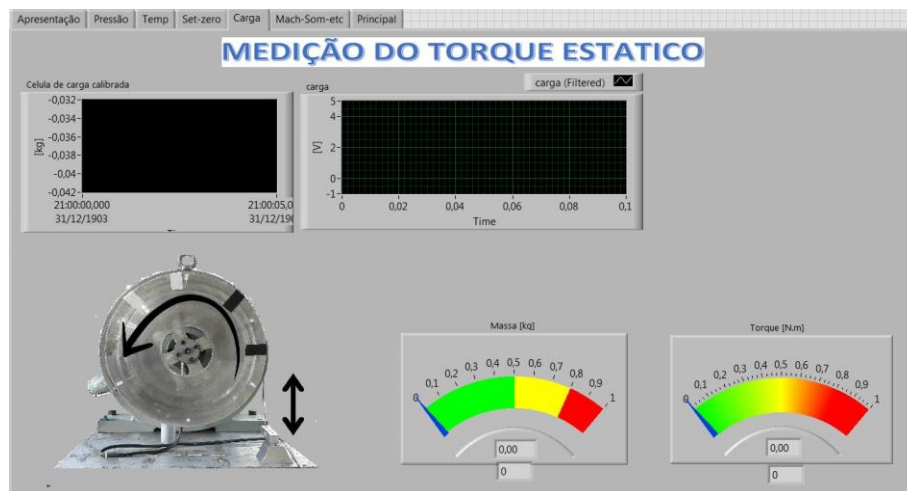
a)



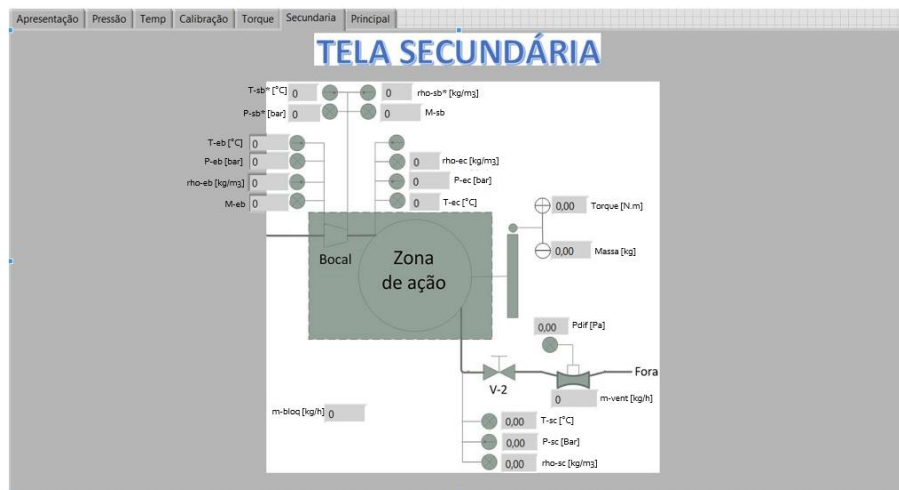
b)

The screenshot shows the 'CALIBRAÇÃO DOS SENSORES' screen. It is divided into two main sections: 'Temperatura' and 'Célula Carga'. The 'Temperatura' section includes input fields for measured values and adjustment constants for Te, Ts,b, Ts, Tamb, and Ambiente. The 'Célula Carga' section includes input fields for 'carga (copiar)', 'Set zero (colar)', and 'carga zero', with a 'resultado' field. Below these sections, there is a 'Pressão' section with input fields for 'Pe (colar valor de baixo)', 'Ps_b1 (colar valor de baixo)', 'Ps (colar valor de baixo)', and 'Pd,ff (ps) valor medido', each with a 'resultado' field. An image of a person using a caliper is shown in the bottom right corner.

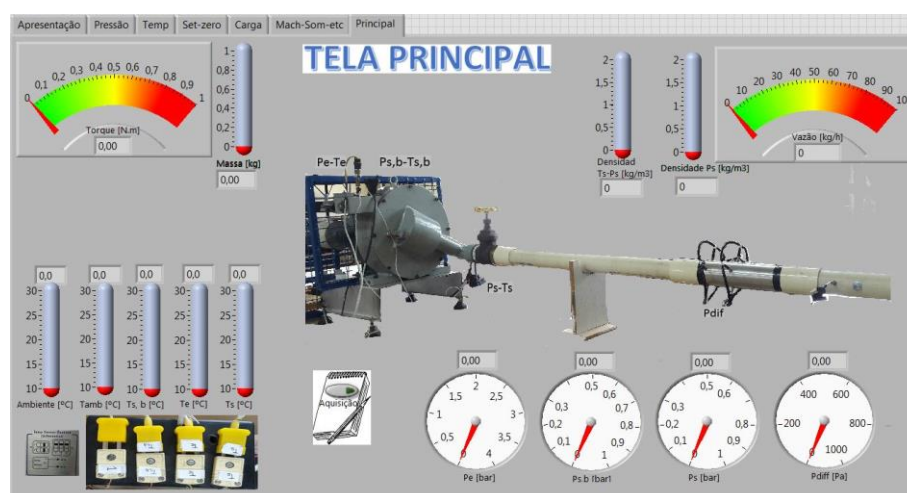
c)



d)



e)



f)

Figura C.10 – a) Tela inicial, b) Tensão elétrica da pressão, c) Calibrado dos sensores, d) Medição do torque estático, e) Tela secundária f) Tela principal

APÊNDICE D – Planilha de Incerteza

Conforme mencionado na seção 3.2.1, procedeu-se ao preenchimento das planilhas de cálculo de incerteza das medições que correspondem a cada medidor de sensor instalado na bancada experimental da turbina Tesla. A Figura D.1 apresenta os valores obtidos.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO DE PRESSÃO "P-eb"													
FONTES DE INCERTEZAS							DADOS DE ENTRADA E SAÍDA						
Nro.	Símbolo	Fontes de Incerteza	Valor		Distribuição		Coeficiente de Sensibilidade Ci	Entrada		Saída		% Contribuição	
			±	Unidade	Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor		Incerteza Padronizada u(xi)	Unidade	Grau de Liberdade vi	Incerteza Padronizada ui(y)		Unidade
1	DP	Desvio Padrão das medições	0,03	bar	Normal	1	1	0,03	bar	2	0,03	bar	42,26
2	RF	Ruídos de Fundo	0,00	bar	Retangular	1,73	1	0,00	bar	10000000	0,00	bar	0,38
3	PR	Padrão de Referência de Incerteza Herdada	0,03	bar	Normal kp	2	1	0,01	bar	10000000	0,01	bar	20,66
4	RT	Repetitividade	0,03	bar	Normal kp	2,6	1	0,01	bar	10000000	0,01	bar	19,37
5	RD	Reprodutibilidade	0,03	bar	Normal kp	2,6	1	0,01	bar	10000000	0,01	bar	17,33
MEDIÇÕES							CÁLCULOS						
Nro.	VVC [bar]	Leituras			MÉDIA (x̄)	Erro de Indicação (EI)	Desvio Padrão Amostral (xi)	Entrada		Saída			
		1	2	3				Incerteza Padronizada Combinada, u(y)	Grau de Liberdade vi	Incerteza Expandida da Medição U: ±	Unidade		
1	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,0	0,0	0,0003	1	0,03	0,09	bar		
2	0,59	0,58	0,61	0,66	0,6	0,0	0,0393	2	5,23	ou			
3	1,03	1,04	1,10	1,13	1,1	0,1	0,0461	3	2,6	8793,1	Pa		
4	1,55	1,56	1,61	1,65	1,6	0,1	0,0437						
5	1,70	1,71	1,75	1,72	1,7	0,0	0,0199						
6	1,87	1,88	1,89	1,89	1,9	0,0	0,0070						
7	2,04	2,04	2,03	2,09	2,1	0,0	0,0330						
8	2,52	2,53	2,55	2,57	2,5	0,0	0,0239						
9	2,68	2,68	2,70	2,74	2,7	0,0	0,0266						
10	2,91	2,91	2,95	2,96	2,9	0,0	0,0270						
OBSERVAÇÕES													
A incerteza expandida de medição relatada, é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência kp=2,59, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95,45%.													

a)

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO DE PRESSÃO "P-ec"													
FONTES DE INCERTEZAS							DADOS DE ENTRADA E SAÍDA						
Nro.	Símbolo	Fontes de Incerteza	Valor		Distribuição		Coeficiente de Sensibilidade Ci	Entrada		Saída		% Contribuição	
			±	Unidade	Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor		Incerteza Padronizada u(xi)	Unidade	Grau de Liberdade vi	Incerteza Padronizada ui(y)		Unidade
1	DP	Desvio Padrão das medições	0,04	bar	Normal	1	1	0,037	bar	2	0,037	bar	72,13
2	RF	Ruídos de Fundo	0,00	bar	Retangular	1,73	1	0,000	bar	10000000	0,000	bar	0,04
3	PR	Padrão de Referência de Incerteza Herdada	0,03	bar	Normal kp	2	1	0,013	bar	10000000	0,013	bar	25,53
4	RT	Repetitividade	0,00	bar	Normal kp	3,5	1	0,001	bar	10000000	0,001	bar	1,22
5	RD	Reprodutibilidade	0,00	bar	Normal kp	3,5	1	0,001	bar	10000000	0,001	bar	1,09
MEDIÇÕES							CÁLCULOS						
Nro.	VVC [bar]	Leituras			MÉDIA (x̄)	Erro de Indicação (EI)	Desvio Padrão Amostral (xi)	Entrada		Saída			
		1	2	3				Incerteza Padronizada Combinada, u(y)	Grau de Liberdade vi	Incerteza Expandida da Medição U: ±	Unidade		
1	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,0	0,0	0,0001	1	0,04	0,14	bar		
2	0,59	0,652	0,67	0,703	0,7	0,1	0,0261	2	2,53	ou			
3	1,03	1,17	1,198	1,19	1,2	0,2	0,0143	3	3,5	13640,56	Pa		
4	1,55	1,766	1,778	1,816	1,8	0,2	0,0260						
5	1,70	1,933	1,973	2,008	2,0	0,3	0,0376						
6	1,87	2,124	2,158	2,178	2,2	0,3	0,0274						
7	2,04	2,309	2,338	2,373	2,3	0,3	0,0318						
8	2,52	2,855	2,889	2,906	2,9	0,4	0,0260						
9	2,68	3,032	3,059	3,153	3,1	0,4	0,0636						
10	2,91	3,289	3,329	3,401	3,3	0,4	0,0571						
OBSERVAÇÕES													
A incerteza expandida de medição relatada, é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência kp=3,5, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95,45%.													

b)

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO DE PRESSÃO "P-sc"													
FONTES DE INCERTEZAS							DADOS DE ENTRADA E SAÍDA						
Nro.	Símbolo	Fontes de Incerteza	Valor		Distribuição		Coeficiente de Sensibilidade Ci	Entrada		Saída		% Contribuição	
			±	Unidade	Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor		Incerteza Padronizada u(xi)	Unidade	Grau de Liberdade vi	Incerteza Padronizada ui(y)		Unidade
1	DP	Desvio Padrão das medições	0,04	bar	Normal	1	1	0,037	bar	2	0,037	bar	72,76
2	RF	Ruídos de Fundo	0,00	bar	Retangular	1,73	1	0,000	bar	10000000	0,000	bar	0,04
3	PR	Padrão de Referência de Incerteza Herdada	0,03	bar	Normal kp	2	1	0,013	bar	10000000	0,013	bar	25,69
4	RT	Repetitividade	0,00	bar	Normal kp	3,51	1	0,000	bar	10000000	0,000	bar	0,79
5	RD	Reprodutibilidade	0,00	bar	Normal kp	3,51	1	0,000	bar	10000000	0,000	bar	0,71
MEDIÇÕES							CÁLCULOS						
Nro.	VVC [bar]	Leituras			MÉDIA (x̄)	Erro de Indicação (EI)	Desvio Padrão Amostral (xi)	Entrada		Saída			
		1	2	3				Incerteza Padronizada Combinada, u(y)	Grau de Liberdade vi	Incerteza Expandida da Medição U: ±	Unidade		
1	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,0	0,0	0,0003	1	0,04	0,14	bar		
2	0,59	0,63	0,63	0,68	0,6	0,1	0,0273	2	2,53	ou			
3	1,03	1,14	1,12	1,16	1,1	0,1	0,0185	3	3,51	13704,72	Pa		
4	1,55	1,72	1,67	1,74	1,7	0,2	0,0373						
5	1,70	1,88	1,85	1,92	1,9	0,2	0,0353						
6	1,87	2,07	2,02	2,11	2,1	0,2	0,0425						
7	2,04	2,25	2,19	2,29	2,2	0,2	0,0472						
8	2,52	2,78	2,71	2,80	2,8	0,2	0,0501						
9	2,68	2,95	2,87	2,98	2,9	0,3	0,0596						
10	2,91	3,10	3,02	3,15	3,1	0,2	0,0638						
OBSERVAÇÕES													
A incerteza expandida de medição relatada, é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência kp=3,51, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95,45%.													

c)

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO TEMPERTATURA "T-eb"													
FONTES DE INCERTEZAS							DADOS DE ENTRADA E SAÍDA						
Nro.	Símbolo	Fontes de Incerteza	Valor		Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor	Coeficiente de Sensibilidade Ci	Entrada		Grau de Liberdade vi	Saída		
			±	Unidade				Incerteza Padronizada u(xi)	Unidade		Incerteza Padronizada ui(y)	Unidade	% Contribuição
1	DP	Desvio Padrão das medições	0,16	°C	Normal	1	1	0,16	°C	2	0,16	°C	44,01
2	RF	Ruídos de Fundo	0,00	°C	Retangular	1,73	1	0,00	°C	1000000000	0,00	°C	0,36
3	PR	Padrão de Referência de Incerteza Herdada	0,03	°C	Normal kp	2	1	0,02	°C	1000000000	0,02	°C	4,12
4	RT	Repetitividade	0,25	°C	Normal kp	2,5	1	0,10	°C	1000000000	0,10	°C	27,19
5	RD	Reprodutibilidade	0,22	°C	Normal kp	2,5	1	0,09	°C	1000000000	0,09	°C	24,32
MEDIÇÕES							CÁLCULOS						
Nro.	VVC [°C]	Leituras			MÉDIA (x̄)	Erro de Indicação (EI)	Desvio Padrão Amostral (xi)	1	Incerteza Padronizada Combinada, uc(y)	0,21	Incerteza Expandida da Medição U: ±	0,52	°C
1	26,09	26,46	26,77	26,33	26,5	0,4	0,2228	2	Graus efetivos de Liberdade, Veff	5,75		ou	
2	31,87	32,77	32,26	32,33	32,5	0,6	0,2779	3	Fator de abrangência, kp	2,5		0,52	K
3	36,84	36,68	36,74	36,75	36,7	-0,1	0,0384						
4	41,83	42,31	42,15	42,67	42,4	0,5	0,2636						
5	46,34	48,56	48,18	48,59	48,4	2,1	0,2273						
6	53,06	53,94	54,29	54,48	54,2	1,2	0,2741						
7	56,62	56,44	56,32	56,85	56,5	-0,1	0,2757						
8	62,02	64,3	64,36	64,77	64,5	2,5	0,2550						
9	66,31	67,03	67,47	67,38	67,3	1,0	0,2311						
							OBSERVAÇÕES						
							A incerteza expandida de medição relatada, é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência kp=2,50, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência aproximadamente 95,45%.						

d)

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO TEMPERTATURA "T-ec"													
FONTES DE INCERTEZAS							DADOS DE ENTRADA E SAÍDA						
Nro.	Símbolo	Fontes de Incerteza	Valor		Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor	Coeficiente de Sensibilidade Ci	Entrada		Grau de Liberdade vi	Saída		
			±	Unidade				Incerteza Padronizada u(xi)	Unidade		Incerteza Padronizada ui(y)	Unidade	% Contribuição
1	DP	Desvio Padrão das medições	0,19	°C	Normal	1	1	0,19	°C	2	0,19	°C	54,30
2	RF	Ruídos de Fundo	0,00	°C	Retangular	1,73	1	0,00	°C	1000000000	0,00	°C	0,26
3	PR	Padrão de Referência de Incerteza Herdada	0,02	°C	Normal kp	2	1	0,01	°C	1000000000	0,01	°C	2,80
4	RT	Repetitividade	0,24	°C	Normal kp	2,96	1	0,08	°C	1000000000	0,08	°C	22,50
5	RD	Reprodutibilidade	0,21	°C	Normal kp	2,96	1	0,07	°C	1000000000	0,07	°C	20,13
MEDIÇÕES							CÁLCULOS						
Nro.	VVC [°C]	Leituras			MÉDIA (x̄)	Erro de Indicação (EI)	Desvio Padrão Amostral (xi)	1	Incerteza Padronizada Combinada, uc(y)	0,22	Incerteza Expandida da Medição U: ±	0,66	°C
1	26,09	25,96	25,58	25,72	25,8	-0,3	0,1937	2	Graus efetivos de Liberdade, Veff	3,44		ou	
2	31,87	32,17	32,04	32,58	32,3	0,4	0,2826	3	Fator de abrangência, kp	2,96		0,66	K
3	36,84	37,68	37,49	37,88	37,7	0,8	0,1935						
4	41,83	42,81	42,87	42,69	42,8	1,0	0,0922						
5	46,34	47,56	47,86	47,50	47,6	1,3	0,1945						
6	53,06	53,44	53,22	53,23	53,3	0,2	0,1222						
7	56,62	55,44	55,29	55,53	55,4	-1,2	0,1181						
8	62,02	63,40	63,94	63,32	63,6	1,5	0,3361						
9	66,31	66,03	66,40	66,02	66,2	-0,2	0,2172						
							OBSERVAÇÕES						
							A incerteza expandida de medição relatada, é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência kp=2,96, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência aproximadamente 95,45%.						

e)

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO TEMPERTATURA "T-sc"													
FONTES DE INCERTEZAS							DADOS DE ENTRADA E SAÍDA						
Nro.	Símbolo	Fontes de Incerteza	Valor		Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor	Coeficiente de Sensibilidade Ci	Entrada		Grau de Liberdade vi	Saída		
			±	Unidade				Incerteza Padronizada u(xi)	Unidade		Incerteza Padronizada ui(y)	Unidade	% Contribuição
1	DP	Desvio Padrão das medições	0,19	°C	Normal	1	1	0,19	°C	2	0,19	°C	38,32
2	RF	Ruídos de Fundo	0,0059	°C	Retangular	1,73	1	0,00	°C	1000000000	0,00	°C	0,70
3	PR	Padrão de Referência de Incerteza Herdada	0,02	°C	Normal kp	2	1	0,01	°C	1000000000	0,01	°C	2,04
4	RT	Repetitividade	0,35	°C	Normal kp	2,3	1	0,15	°C	1000000000	0,15	°C	31,11
5	RD	Reprodutibilidade	0,31	°C	Normal kp	2,3	1	0,14	°C	1000000000	0,14	°C	27,83
MEDIÇÕES							CÁLCULOS						
Nro.	VVC [°C]	Leituras			MÉDIA (x̄)	Erro de Indicação (EI)	Desvio Padrão Amostral (xi)	1	Incerteza Padronizada Combinada, uc(y)	0,28	Incerteza Expandida da Medição U: ±	0,64	°C
1	26,09	26,22	26,34	26,15	26,2	0,2	0,0961	2	Graus efetivos de Liberdade, Veff	9,59		ou	
2	31,87	32,09	32,29	31,89	32,1	0,2	0,2017	3	Fator de abrangência, kp	2,3		0,64	K
3	36,84	37,05	37,32	37,07	37,1	0,3	0,1482						
4	41,83	42,73	42,19	42,78	42,6	0,7	0,3257						
5	46,34	47,02	46,87	46,49	46,8	0,5	0,2752						
6	53,06	53,47	53,38	53,08	53,3	0,2	0,2043						
7	56,62	57,01	57,08	57,3	57,1	0,5	0,1541						
8	62,02	62,92	62,61	62,97	62,8	0,8	0,1973						
9	66,31	66,69	66,29	66,77	66,6	0,3	0,2563						
							OBSERVAÇÕES						
							A incerteza expandida de medição relatada, é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência kp=2,3, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência aproximadamente 95,45%.						

f)

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO TEMPERTATURA "T-amb"														
FONTES DE INCERTEZAS						DADOS DE ENTRADA E SAÍDA								
Nro.	Símbolo	Fontes de Incerteza	Valor		Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor	Coeficiente de Sensibilidade Ci	Entrada		Grau de Liberdade vi	Saída		% Contribuição	
			±	Unidade				Incerteza Padronizada u(x)	Unidade		Incerteza Padronizada u(y)	Unidade		
1	DP	Desvio Padrão das medições	0,28	°C	Normal	1	1	0,28	°C	2	0,28	°C	59,74	
2	RF	Ruídos de Fundo	0,0045	°C	Retangular	1,73	1	0,00	°C	1000000000	0,00	°C	0,55	
3	PR	Padrão de Referência de Incerteza herdada	0,02	°C	Normal	kp	2	0,01	°C	1000000000	0,01	°C	2,12	
4	RT	Repetitividade	0,29	°C	Normal	kp	3,11	0,09	°C	1000000000	0,09	°C	19,84	
5	RD	Reprodutibilidade	0,26	°C	Normal	kp	3,11	0,08	°C	1000000000	0,08	°C	17,75	
MEDIÇÕES						CÁLCULOS								
Nro.	VVC [°C]	Leituras			MÉDIA (x̄)	Erro de Indicação (EI)	Desvio Padrão Amostral (xi)	1		Incerteza Expandida da Medição U: ±				
1	26,09	26,49	26,99	26,36	26,6	0,5	0,3350	Incerteza Padronizada Combinada, uc(y)		0,31	Incerteza Expandida da Medição U: ±	0,96	°C	
2	31,87	32,41	33,09	32,15	32,6	0,7	0,4888	2		2,88		OU		
3	36,84	37,42	38,24	37,37	37,7	0,8	0,4888	3		3,11		0,96	K	
4	41,83	43,16	43,31	43,11	43,2	1,4	0,1067							
5	46,34	47,49	47,03	46,86	47,1	0,8	0,3270							
6	53,06	54,00	54,70	54,50	54,4	1,3	0,3593							
7	56,62	57,58	57,49	56,75	57,3	0,7	0,4529							
8	62,02	62,55	62,16	62,46	62,4	0,4	0,2087							
9	66,31	67,36	67,95	67,30	67,5	1,2	0,3624							
OBSERVAÇÕES														
A incerteza expandida de medição relatada, é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência kp=3,11, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência aproximadamente 95,45%.														

g)

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO DE PRESSÃO "P-dif"															
FONTES DE INCERTEZAS						DADOS DE ENTRADA E SAÍDA									
Nro.	Símbolo	Fontes de Incerteza	Valor		Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor	Coeficiente de Sensibilidade Ci	Entrada		Grau de Liberdade vi	Saída		% Contribuição		
			±	Unidade				Incerteza Padronizada u(x)	Unidade		Incerteza Padronizada u(y)	Unidade			
1	DP	Desvio Padrão das medições	3,79	Pa	Normal	1	1	3,79	Pa	2	3,79	Pa	11,22		
2	RF	Ruídos de Fundo	0,03	Pa	Retangular	1,73	1	0,02	Pa	1000000000	0,02	Pa	0,05		
3	PR	Padrão de Referência de Incerteza da pressão diferencial	50,00	Pa	Normal	kp	2	25,00	Pa	1000000000	25,00	Pa	74,11		
4	RT	Repetitividade	5,20	Pa	Normal	kp	2	2,60	Pa	1000000000	2,60	Pa	7,71		
5	RD	Reprodutibilidade	4,65	Pa	Normal	kp	2	2,33	Pa	1000000000	2,33	Pa	6,90		
MEDIÇÕES						CÁLCULOS									
Nro.	VVC [Pa]	Leituras			MÉDIA (x̄)	Erro de Indicação (EI)	Desvio Padrão Amostral (xi)	1		Incerteza Expandida da Medição U: ±					
1	11000	204,00	208,00	201,0	204,3	-10795,7	3,5119	Incerteza Padronizada Combinada, uc(y)		25,52	Incerteza Expandida da Medição U: ±	51,0	Pa		
2	16000	286,00	298,00	290,0	291,3	-15708,7	6,1101	2		4132,20				OU	
3	24000	440,00	432,00	445,0	439,0	-23561,0	6,5574	3		2					
4	30000	551,00	552,00	548,0	550,3	-29449,7	2,0817								
5	41000	746,00	750,00	750,0	748,7	-40251,3	2,3094								
6	47000	871,00	866,00	870,0	869,0	-46131,0	2,6458								
OBSERVAÇÕES															
A incerteza expandida de medição relatada, é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência kp=2, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência aproximadamente 95,45%.															

h)

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO DO SENSOR DE FORÇA "m"													
FONTES DE INCERTEZAS						DADOS DE ENTRADA E SAÍDA							
Nro.	Símbolo	Fontes de Incerteza	Valor		Distribuição de Probabilidade	Fator Divisor	Coeficiente de Sensibilidade Ci	Entrada		Grau de Liberdade vi	Saída		% Contribuição
			±	Unidade				Incerteza Padronizada u(x)	Unidade		Incerteza Padronizada u(y)	Unidade	
1	DP	Desvio Padrão das medições	0,06	g	Normal	1	1	0,056	g	2	0,056	g	27,27
2	RF	Ruídos de Fundo	0,14	g	Retangular	1,73	1	0,082	g	1000000000	0,082	g	40,26
3	PR	Padrão de Referência de Incerteza da sensor de força	0,10	g	Normal	kp	2	0,050	g	1000000000	0,050	g	24,47
4	RT	Repetitividade	0,02	g	Normal	kp	2,08	0,009	g	1000000000	0,009	g	4,22
5	RD	Reprodutibilidade	0,02	g	Normal	kp	2,08	0,008	g	1000000000	0,008	g	3,78
MEDIÇÕES						CÁLCULOS							
Nro.	VVC [g]	Leituras			MÉDIA (x̄)	Erro de Indicação (EI)	Desvio Padrão Amostral (xi)	1		Incerteza Expandida da Medição U: ±			
1	29,91	30,10	30,02	30,00	30,0	0,132	0,0482	Incerteza Padronizada Combinada, uc(y)		0,11	Incerteza Expandida da Medição U: ±	0,23	g
2	91,97	92,16	92,13	92,14	92,1	0,174	0,0113	2		32,45		OU	
3	243,95	244,15	244,14	244,13	244,1	0,190	0,0051	3		2,08		0,00023	Kg
4	155,49	155,65	155,64	155,63	155,6	0,149	0,0064						
5	181,89	181,08	181,24	181,18	181,2	-0,726	0,0796						
6	118,37	118,59	118,43	118,49	118,5	0,137	0,0803						
7	330,69	330,18	330,26	330,22	330,2	-0,470	0,0378						
8	482,67	482,09	482,23	482,06	482,1	-0,541	0,0922						
9	656,44	656,70	656,53	656,53	656,6	0,146	0,0965						
10	804,23	804,60	804,53	804,52	804,5	0,320	0,0410						
11	956,21	956,50	956,41	956,37	956,4	0,215	0,0658						
OBSERVAÇÕES													
A incerteza expandida de medição relatada, é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência kp=2,08, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência aproximadamente 95,45%.													

i)

Figura D.1 – Planilha de cálculo de incerteza da medição de: a) Pressão de entrada do bocal, b) Pressão de entrada da carcaça, c) Pressão na saída da carcaça, d) Temperatura na entrada do bocal, e) Temperatura na entrada da carcaça, f) Temperatura na saída da carcaça, g) Temperatura no ambiente do laboratório, h) Pressão diferencial, i) Sensor de força

APÊNDICE E – Dados das Grandezas Medidas

Tabela E.1 – Dados medidos da configuração do disco O

<i>P-eb</i>		<i>T-eb</i>		<i>T-amb</i>		<i>P-ec</i>		<i>T-ec</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[K]	±	[Pa]	±	[K]	±
203088,46	8793,1	296,81	0,52	296,52	0,96	103623,29	13640,5	296,31	0,66
252221,82		297,13		296,53		104300,36		295,77	
299759,22		296,72		296,99		105095,72		296,17	
349545,19		296,64		297,05		106061,80		295,86	
402056,07		296,90		297,11		107221,40		294,58	

<i>P-sc</i>		<i>T-sc</i>		<i>P-dif</i>		<i>m</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[Pa]	±	[kg]	±
102467,37	13704,7	296,66	0,64	144,04	51,05	0,24	0,00021
102459,52		296,78		215,94		0,34	
102512,55		296,37		307,57		0,44	
102554,95		296,69		415,86		0,54	
102628,50		297,55		548,79		0,65	

Tabela E.2 – Dados medidos da configuração do disco I

<i>P-eb</i>		<i>T-eb</i>		<i>T-amb</i>		<i>P-ec</i>		<i>T-ec</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[K]	±	[Pa]	±	[K]	±
202489,67	8793,1	297,00	0,52	297,00	0,96	102771,15	13640,5	296,67	0,66
251692,47		296,74		297,04		102967,00		296,41	
302794,59		296,56		297,10		103221,36		296,36	
351323,29		296,39		296,96		103554,31		295,08	
398852,58		296,38		296,64		103941,66		293,25	

<i>P-sc</i>		<i>T-sc</i>		<i>P-dif</i>		<i>m</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[Pa]	±	[kg]	±
102628,81	13704,7	296,65	0,64	150,18	51,05	0,33	0,00021
102669,48		296,39		228,38		0,48	
102715,16		296,21		327,79		0,63	
102756,92		296,04		436,18		0,77	
102813,37		296,03		558,44		0,92	

Tabela E.3 – Dados medidos da configuração do disco II

<i>P-eb</i>		<i>T-eb</i>		<i>T-amb</i>		<i>P-ec</i>		<i>T-ec</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[K]	±	[Pa]	±	[K]	±
202797,58	8793,1	297,52	0,52	297,45	0,96	101977,24	13640,5	297,65	0,66
252311,31		297,30		297,46		102103,73		297,34	
304053,02		297,04		297,50		102312,49		296,91	
352975,65		296,86		297,69		102539,56		295,57	
401980,88		296,76		297,62		102835,61		293,54	

<i>P-sc</i>		<i>T-sc</i>		<i>P-dif</i>		<i>m</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[Pa]	±	[kg]	±
101937,65	13704,7	297,17	0,64	144,47	51,05	0,29	0,00021
101987,78		296,95		225,11		0,44	
102051,75		296,69		326,84		0,58	
102113,63		296,51		440,24		0,72	
102172,36		296,41		569,71		0,86	

Tabela E.4 – Dados medidos da configuração do disco IOI

<i>P-eb</i>		<i>T-eb</i>		<i>T-amb</i>		<i>P-ec</i>		<i>T-ec</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[K]	±	[Pa]	±	[K]	±
201515,98	8793,1	296,42	0,52	296,76	0,96	102675,80	13640,5	296,37	0,66
252849,56		295,91		296,74		102839,95		295,76	
300645,78		295,59		296,92		103080,90		295,31	
352584,43		295,73		297,08		103382,12		294,28	
399788,17		295,97		296,97		103744,19		292,48	

<i>P-sc</i>		<i>T-sc</i>		<i>P-dif</i>		<i>m</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[Pa]	±	[kg]	±
102638,48	13704,7	296,07	0,64	142,17	51,05	0,30	0,00021
102679,31		295,56		226,20		0,46	
102738,19		295,14		318,39		0,61	
102791,32		295,48		437,70		0,79	
102859,25		295,72		560,70		0,95	

Tabela E.5 – Dados medidos da configuração do disco IoI

<i>P-eb</i>		<i>T-eb</i>		<i>T-amb</i>		<i>P-ec</i>		<i>T-ec</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[K]	±	[Pa]	±	[K]	±
201605,01	8793,1	296,57	0,52	297,19	0,96	102444,85	13640,5	296,42	0,66
251834,32		296,44		297,28		102481,37		296,17	
302329,05		296,27		297,49		102766,73		295,80	
351142,51		296,22		297,47		102720,37		294,75	
401480,00		296,28		297,31		102983,32		292,81	

<i>P-sc</i>		<i>T-sc</i>		<i>P-dif</i>		<i>m</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[Pa]	±	[kg]	±
102681,08	13704,7	296,22	0,64	139,91	51,05	0,34	0,00028
102718,20		296,09		218,22		0,49	
102766,73		295,92		316,21		0,64	
102814,30		295,87		424,34		0,79	
102857,64		295,93		552,85		0,93	

Tabela E.6 – Dados medidos da configuração do disco III

<i>P-eb</i>		<i>T-eb</i>		<i>T-amb</i>		<i>P-ec</i>		<i>T-ec</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[K]	±	[Pa]	±	[K]	±
202309,57	8793,1	297,12	0,52	297,64	0,96	101500,81	13640,5	296,92	0,66
251520,61		296,80		297,41		101685,82		296,04	
300359,57		296,59		297,68		101806,66		295,95	
350161,43		296,86		297,97		101992,62		294,77	
402270,57		297,33		297,63		102261,57		293,77	

<i>P-sc</i>		<i>T-sc</i>		<i>P-dif</i>		<i>m</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[Pa]	±	[kg]	±
101811,58	13704,7	296,77	0,64	156,53	51,05	0,29	0,00028
101892,12		296,45		236,32		0,46	
101893,22		296,24		331,06		0,64	
102017,14		296,51		442,85		0,81	
102081,09		297,38		578,71		1,00	

Tabela E.7 – Dados medidos da configuração do disco III

<i>P-eb</i>		<i>T-eb</i>		<i>T-amb</i>		<i>P-ec</i>		<i>T-ec</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[K]	±	[Pa]	±	[K]	±
200377,25	8793,1	296,76	0,52	297,6	0,96	101632,64	13640,5	296,4	0,66
251999,53		296,43		297,6		101618,86		296,0	
302861,45		296,03		297,2		101693,35		295,1	
351719,67		296,15		297,4		101779,32		294,4	
399400,09		296,98		297,4		101971,71		292,7	

<i>P-sc</i>		<i>T-sc</i>		<i>P-dif</i>		<i>m</i>	
[Pa]	±	[K]	±	[Pa]	±	[kg]	±
101887,60	13704,7	296,4	0,64	144,76	51,05	0,38	0,00028
101929,60		296,1		227,72		0,54	
101975,73		295,7		330,56		0,70	
102033,68		295,8		444,02		0,84	
102082,16		296,6		569,28		0,98	

APÊNDICE F – Dados das Grandezas Calculadas por Equacionamento

Tabela F.1 – Dados calculados da configuração do disco O

ρ_{-eb}		V_{-eb}		M_{-eb}			
[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
2,39	0,104	77,89	15,180	345,34	0,2792	0,226	0,044
2,96	0,104	77,84	10,700	345,52	0,2791	0,225	0,031
3,52	0,104	78,13	8,384	345,29	0,2788	0,226	0,024
4,11	0,104	77,87	7,043	345,24	0,2788	0,226	0,020
4,72	0,104	77,75	6,236	345,39	0,2787	0,225	0,018

P_{-sb}^*		T_{-sb}^*		ρ_{-sb}^*		V_{-sb}		M_{-sb}			
[Pa]	±	[K]	±	[kg/m ³]	±	[m/s]	±	C som [m/s]	±	Mach	±
107287,93	4661	247,34	0,40	1,51	0,066	308,11	59,89	315,25	0,255	0,98	0,190
133244,19	4661	247,61	0,40	1,88	0,066	306,97	42,21	315,42	0,255	0,97	0,134
158357,34	4661	247,27	0,40	2,23	0,066	308,13	33,08	315,20	0,254	0,98	0,105
184658,36	4661	247,20	0,40	2,60	0,066	307,07	27,80	315,16	0,254	0,97	0,088
212398,90	4661	247,42	0,40	2,99	0,066	306,62	24,62	315,30	0,254	0,97	0,077

\dot{m}_{bloq}		ρ_{-ec}		ρ_{-sc}		\dot{m}_{vent}		$Torq_{célula}$	
[kg/h]	±	[kg/m ³]	±	[kg/m ³]	±	[kg/h]	±	[N·m]	±
51,46	2,25	1,22	0,146	1,20	0,148	50,81	9,53	0,29	0,00025
63,87	2,25	1,23	0,147	1,20	0,148	62,20	8,27	0,42	0,00028
75,96	2,26	1,24	0,147	1,21	0,147	74,30	7,64	0,54	0,00031
88,59	2,27	1,25	0,147	1,21	0,148	86,37	7,47	0,66	0,00034
101,86	2,28	1,27	0,147	1,20	0,147	99,11	7,61	0,79	0,00039

Tabela F.2 – Dados calculados da configuração do disco I

ρ_{-eb}		V_{-eb}		M_{-eb}			
[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
2,38	0,10	80,01	15,03	345,45	0,28	0,232	0,04
2,96	0,10	80,25	10,59	345,30	0,28	0,232	0,03
3,56	0,10	79,91	8,24	345,19	0,28	0,231	0,02
4,13	0,10	79,44	7,01	345,09	0,28	0,230	0,02
4,69	0,10	79,20	6,29	345,09	0,28	0,229	0,02

P_{-sb}^*		T_{-sb}^*		ρ_{-sb}^*		V_{-sb}		M_{-sb}			
[Pa]	±	[K]	±	[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
106971,61	4661	247,50	0,40	1,51	0,07	316,07	59,27	315,35	0,25	1,00	0,19
132964,55	4661	247,28	0,40	1,87	0,07	316,47	41,77	315,21	0,25	1,00	0,13
159960,87	4661	247,14	0,40	2,26	0,07	315,13	32,50	315,12	0,26	1,00	0,10
185597,69	4661	246,99	0,40	2,62	0,07	313,28	27,66	315,03	0,26	0,99	0,09
210706,55	4661	246,98	0,40	2,97	0,07	312,32	24,84	315,02	0,26	0,99	0,08

\dot{m}_{bloq}		ρ_{-ec}		ρ_{-sc}		\dot{m}_{vent}		$Torq_{célula}$	
[kg/hr]	±	[kg/m ³]	±	[kg/m ³]	±	[kg/h]	±	[N·m]	±
51,29	2,25	1,21	0,147	1,21	0,15	51,93	9,37	0,41	0,0003
63,78	2,26	1,21	0,147	1,21	0,15	64,07	8,15	0,59	0,0003
76,75	2,26	1,21	0,147	1,21	0,15	76,80	7,59	0,77	0,0004
89,08	2,27	1,22	0,148	1,21	0,15	88,64	7,49	0,95	0,0004
101,13	2,29	1,24	0,149	1,21	0,15	100,32	7,65	1,13	0,0005

Tabela F.3 – Dados calculados da configuração do disco II

ρ_{-eb}		V_{-eb}		M_{-eb}			
[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
2,38	0,10	79,04	15,18	345,75	0,28	0,23	0,04
2,96	0,10	79,29	10,58	345,62	0,28	0,23	0,03
3,57	0,10	79,27	8,20	345,47	0,28	0,23	0,02
4,15	0,10	79,25	6,98	345,37	0,28	0,23	0,02
4,72	0,10	79,17	6,27	345,31	0,28	0,23	0,02

P_{-sb}^*		T_{-sb}^*		ρ_{-sb}^*		V_{-sb}		M_{-sb}			
[Pa]	±	[K]	±	[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
107134,27	4661	247,93	0,40	1,51	0,07	311,69	59,87	315,62	0,25	0,99	0,19
133291,47	4661	247,75	0,40	1,88	0,07	312,68	41,75	315,51	0,25	0,99	0,13
160625,67	4661	247,53	0,40	2,26	0,07	312,61	32,36	315,37	0,25	0,99	0,10
186470,61	4661	247,39	0,40	2,63	0,07	312,53	27,59	315,28	0,25	0,99	0,09
212359,18	4661	247,30	0,40	2,99	0,07	312,22	24,75	315,22	0,25	0,99	0,08

\dot{m}_{bloq}		ρ_{-ec}		ρ_{-sc}		\dot{m}_{vent}		$Torq_{célula}$	
[kg/hr]	±	[kg/m ³]	±	[kg/m ³]	±	[kg/h]	±	[N·m]	±
51,32	2,25	1,19	0,146	1,20	0,15	50,71	9,49	0,36	0,0003
63,88	2,25	1,20	0,146	1,20	0,15	63,34	8,16	0,54	0,0003
77,01	2,26	1,20	0,147	1,20	0,15	76,38	7,58	0,71	0,0004
89,43	2,27	1,21	0,147	1,20	0,15	88,70	7,49	0,88	0,0004
101,86	2,28	1,22	0,148	1,20	0,15	100,95	7,68	1,06	0,0005

Tabela F.4 – Dados calculados da configuração do disco IOI

ρ_{-eb}		V_{-eb}		M_{-eb}			
[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
2,37	0,10	79,03	15,38	345,11	0,28	0,23	0,04
2,98	0,10	79,39	10,54	344,81	0,28	0,23	0,03
3,55	0,10	79,21	8,30	344,63	0,28	0,23	0,02
4,16	0,10	79,21	6,97	344,71	0,28	0,23	0,02
4,71	0,10	79,12	6,27	344,85	0,28	0,23	0,02

$P-sb^*$		$T-sb^*$		$\rho-sb^*$		$V-sb$		$M-sb$			
[Pa]	±	[K]	±	[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
106457,22	4661	247,01	0,40	1,50	0,07	311,65	60,67	315,04	0,26	0,99	0,19
133575,82	4661	246,59	0,40	1,89	0,07	313,10	41,59	314,77	0,26	0,99	0,13
158825,69	4661	246,33	0,40	2,25	0,07	312,38	32,75	314,60	0,26	0,99	0,10
186263,94	4661	246,44	0,40	2,64	0,07	312,36	27,51	314,68	0,26	0,99	0,09
211200,81	4661	246,64	0,40	2,99	0,07	312,02	24,74	314,80	0,26	0,99	0,08

\dot{m}_{bloq}		$\rho-ec$		$\rho-sc$		\dot{m}_{vent}		$Torq_{célula}$	
[kg/hr]	±	[kg/m ³]	±	[kg/m ³]	±	[kg/h]	±	[N·m]	±
51,09	2,25	1,21	0,147	1,21	0,15	50,57	9,59	0,37	0,0003
64,16	2,26	1,21	0,147	1,21	0,15	63,86	8,18	0,56	0,0003
76,33	2,27	1,22	0,147	1,21	0,15	75,84	7,64	0,75	0,0004
89,50	2,28	1,22	0,149	1,21	0,15	88,89	7,51	0,97	0,0004
101,44	2,29	1,24	0,149	1,21	0,15	100,60	7,67	1,16	0,0005

Tabela F.5 – Dados calculados da configuração do disco IoI

$\rho-eb$		$V-eb$		$M-eb$			
[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
2,37	0,10	78,40	15,47	345,20	0,28	0,23	0,04
2,96	0,10	78,38	10,69	345,12	0,28	0,23	0,03
3,56	0,10	78,59	8,27	345,02	0,28	0,23	0,02
4,13	0,10	78,39	7,00	344,99	0,28	0,23	0,02
4,72	0,10	78,29	6,24	345,03	0,28	0,23	0,02

$P-sb^*$		$T-sb^*$		$\rho-sb^*$		$Vel-sb$		$M-sb$			
[Pa]	±	[K]	±	[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
106504,26	4661	247,14	0,40	1,50	0,07	309,17	61,01	315,12	0,26	0,98	0,19
133039,48	4661	247,03	0,40	1,88	0,07	309,10	42,16	315,05	0,26	0,98	0,13
159714,93	4661	246,89	0,40	2,26	0,07	309,92	32,63	314,96	0,26	0,98	0,10
185502,19	4661	246,85	0,40	2,62	0,07	309,15	27,62	314,93	0,26	0,98	0,09
212094,57	4661	246,90	0,40	2,99	0,07	308,73	24,62	314,97	0,26	0,98	0,08

\dot{m}_{bloq}		$\rho-ec$		$\rho-sc$		\dot{m}_{vent}		$Torq_{célula}$	
[kg/hr]	±	[kg/m ³]	±	[kg/m ³]	±	[kg/h]	±	[N·m]	±
51,10	2,25	1,20	0,15	1,21	0,15	50,17	9,65	0,41	0,0003
63,85	2,26	1,21	0,15	1,21	0,15	62,68	8,26	0,60	0,0003
76,67	2,27	1,21	0,15	1,21	0,15	75,49	7,63	0,78	0,0004
89,06	2,28	1,22	0,15	1,21	0,15	87,48	7,49	0,96	0,0004
101,82	2,29	1,23	0,15	1,21	0,15	99,86	7,64	1,14	0,0005

Tabela F.6 – Dados calculados da configuração do disco III

ρ_{-eb}		V_{-eb}		M_{-eb}			
[kg/m ³]	±	[m/s]	±	C som [m/s]	±	Mach	±
2,37	0,10	80,16	14,79	345,52	0,28	0,23	0,04
2,95	0,10	80,19	10,50	345,33	0,28	0,23	0,03
3,53	0,10	80,04	8,29	345,21	0,28	0,23	0,02
4,11	0,10	80,08	7,05	345,37	0,28	0,23	0,02
4,72	0,10	79,72	6,29	345,64	0,28	0,23	0,02

P_{-sb}^*		T_{-sb}^*		ρ_{-sb}^*		V_{-sb}		M_{-sb}			
[Pa]	±	[K]	±	[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
106876,46	4661	247,60	0,40	1,50	0,07	317,80	58,34	315,41	0,25	1,008	0,19
132873,76	4661	247,33	0,40	1,87	0,07	317,96	41,42	315,24	0,25	1,009	0,13
158674,49	4661	247,16	0,40	2,24	0,07	318,00	32,73	315,13	0,26	1,009	0,10
184983,90	4661	247,39	0,40	2,61	0,07	317,82	27,81	315,28	0,25	1,008	0,09
212512,22	4661	247,77	0,40	2,99	0,07	317,40	24,84	315,52	0,25	1,006	0,08

\dot{m}_{bloq}		ρ_{-ec}		ρ_{-sc}		\dot{m}_{vent}		$Torq_{célula}$	
[kg/hr]	±	[kg/m ³]	±	[kg/m ³]	±	[kg/h]	±	[N·m]	±
51,23	2,25	1,19	0,15	1,20	0,15	52,79	9,20	0,36	0,0003
63,73	2,26	1,20	0,15	1,20	0,15	64,92	8,06	0,57	0,0003
76,13	2,26	1,20	0,15	1,20	0,15	76,87	7,58	0,78	0,0004
88,71	2,27	1,21	0,15	1,20	0,15	88,92	7,49	1,00	0,0004
101,84	2,28	1,21	0,15	1,20	0,15	101,53	7,68	1,22	0,0005

Tabela F.7 – Dados calculados da configuração do disco III

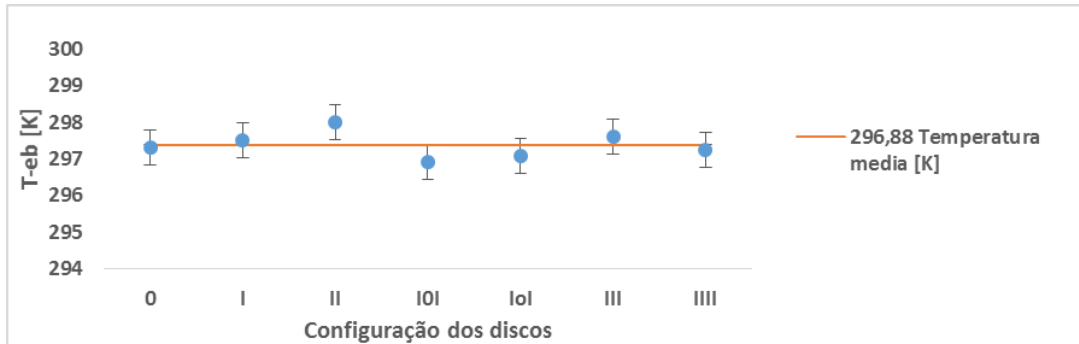
ρ_{-eb}		V_{-eb}		M_{-eb}			
[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
2,35	0,10	79,95	15,34	345,3	0,2792	0,23	0,0444
2,96	0,10	79,71	10,55	345,1	0,2794	0,23	0,0306
3,57	0,10	79,87	8,21	344,9	0,2796	0,23	0,0238
4,14	0,10	79,75	7,00	345,0	0,2796	0,23	0,0203
4,69	0,10	79,65	6,32	345,4	0,2792	0,23	0,0183

P_{-sb}^*		T_{-sb}^*		ρ_{-sb}^*		V_{-sb}		M_{-sb}			
[Pa]	±	[K]	±	[kg/m ³]	±	[m/s]	±	c som [m/s]	±	Mach	±
105855,65	4661	247,3	0,40	1,49	0,065	315,29	60,500	315,2	0,25	1,000	0,19
133126,76	4661	247,0	0,40	1,88	0,065	314,33	41,610	315,0	0,25	0,998	0,13
159996,19	4661	246,7	0,40	2,26	0,066	314,97	32,380	314,8	0,25	1,000	0,10
185807,10	4661	246,8	0,40	2,62	0,066	314,49	27,600	314,9	0,25	0,999	0,08
210995,79	4661	247,5	0,40	2,97	0,065	314,10	24,880	315,3	0,25	0,996	0,07

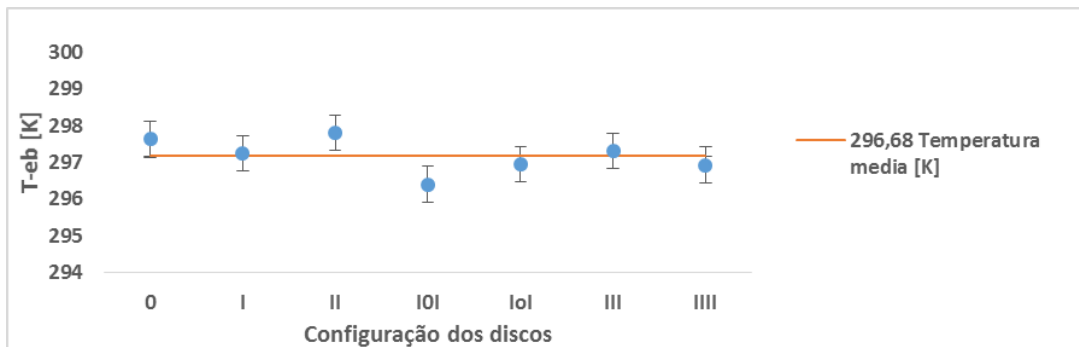
\dot{m}_{bloq}		ρ_{-ec}		ρ_{-sc}		\dot{m}_{vent}		$Torq_{célula}$	
[kg/hr]	±	[kg/m ³]	±	[kg/m ³]	±	[kg/h]	±	[N·m]	±
50,78	2,248	1,195	0,1469	1,198	0,1479	50,82	9,49	0,47	0,0003
63,89	2,256	1,197	0,1471	1,200	0,1480	63,78	8,14	0,67	0,0003
76,84	2,266	1,201	0,1475	1,202	0,1482	76,92	7,58	0,85	0,0004
89,22	2,275	1,205	0,1479	1,203	0,1482	89,15	7,50	1,03	0,0005
101,17	2,283	1,214	0,1487	1,200	0,1478	100,83	7,67	1,20	0,0005

APÊNDICE G – Comparação das Grandezas Medidas para Diferentes Configurações de Discos

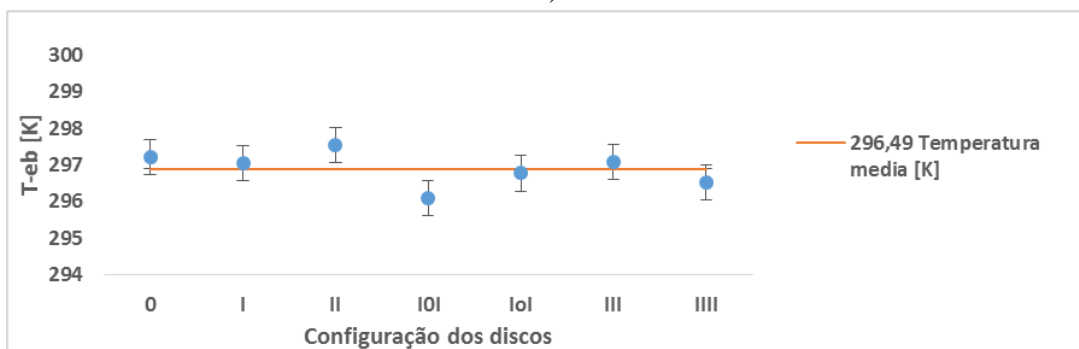
G.1 – Temperatura de entrada do bocal (T_{-eb})



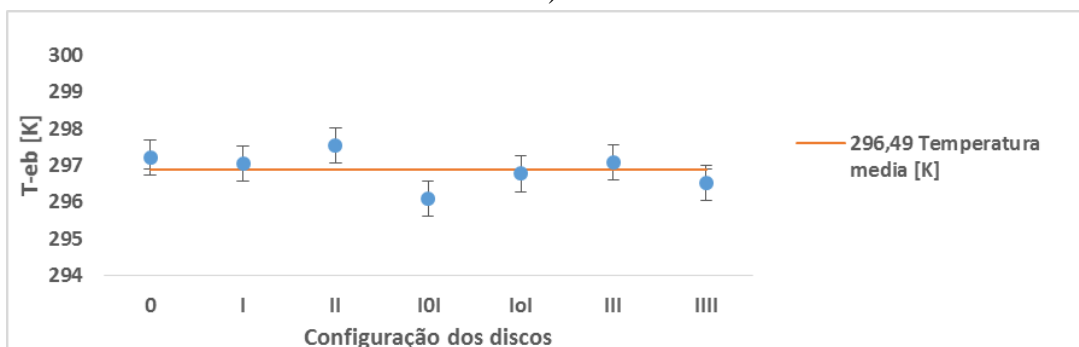
a)



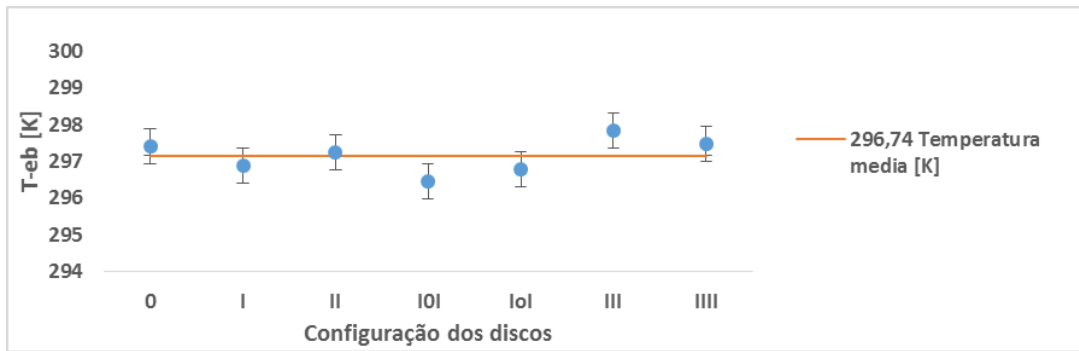
b)



c)



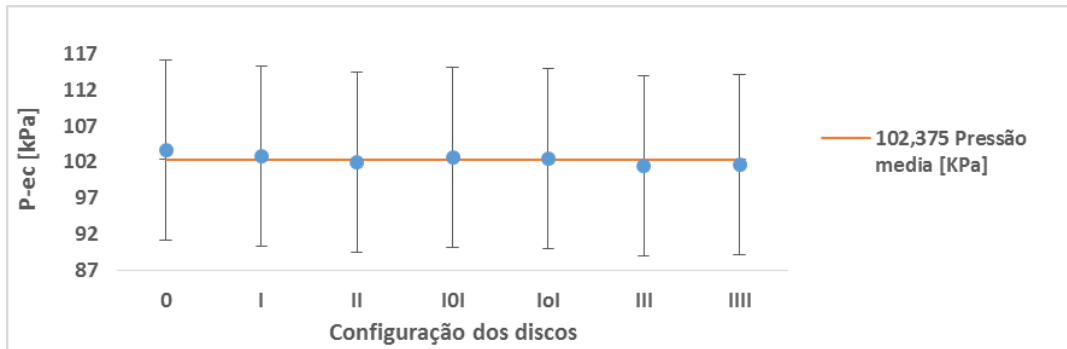
d)



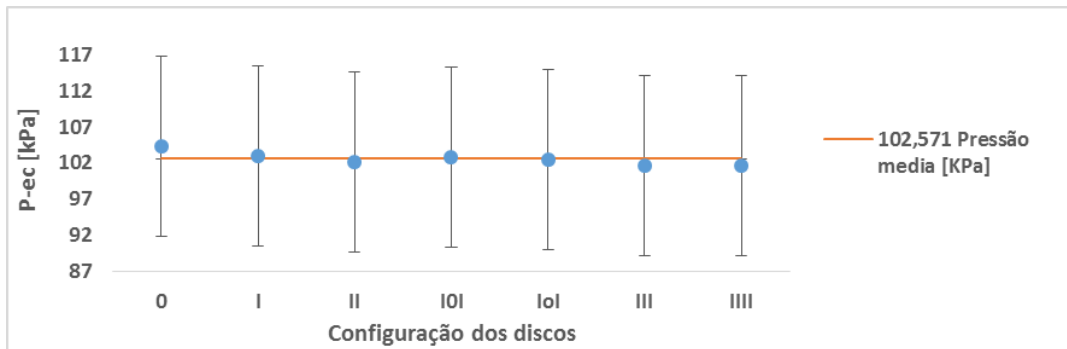
e)

Figura G.1 – Temperatura de entrada vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

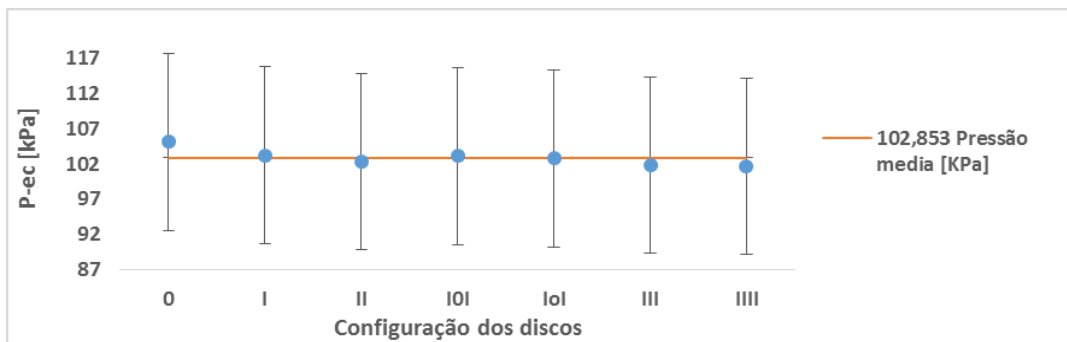
G.2 – Pressão de entrada da carcaça (P_{-ec})



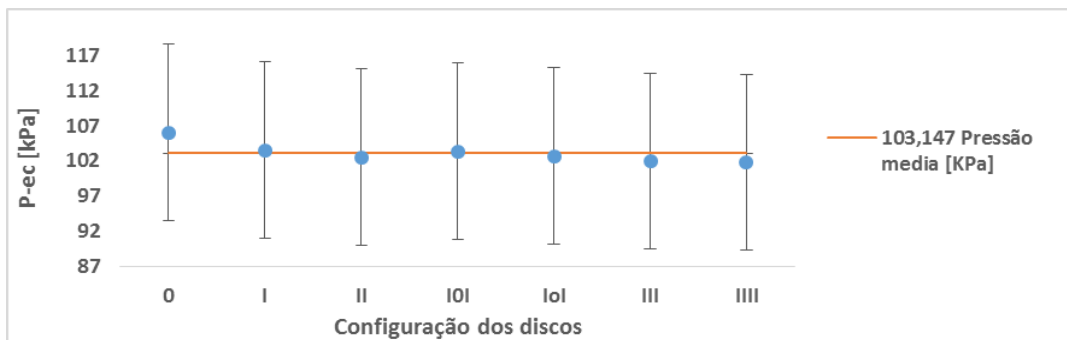
a)



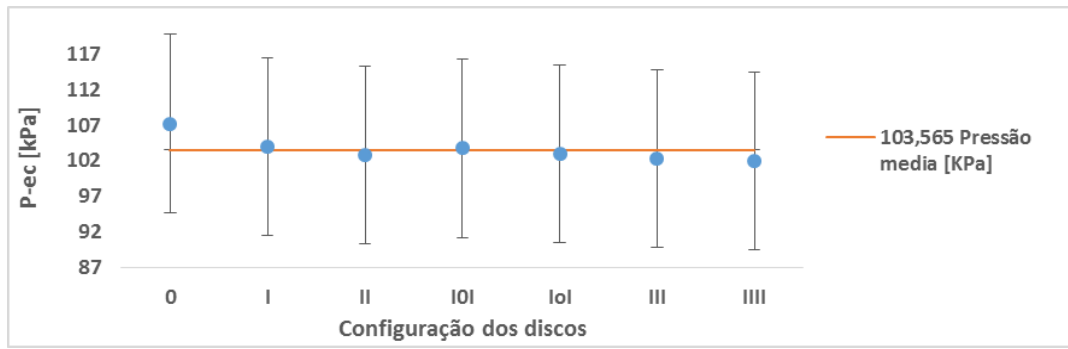
b)



c)



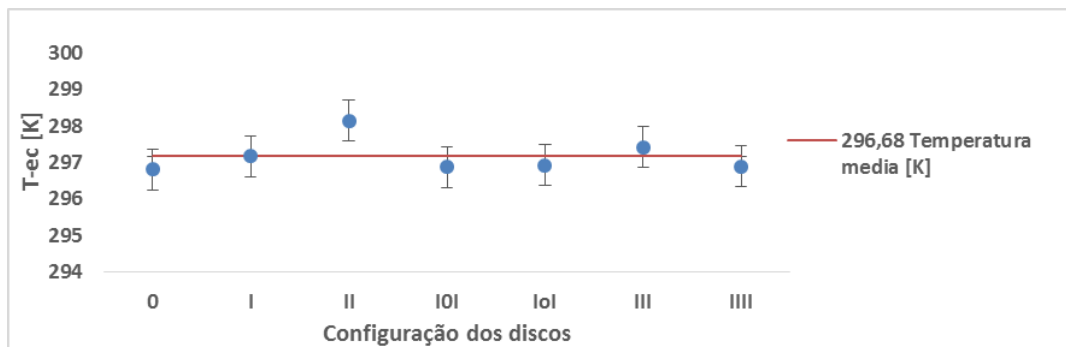
d)



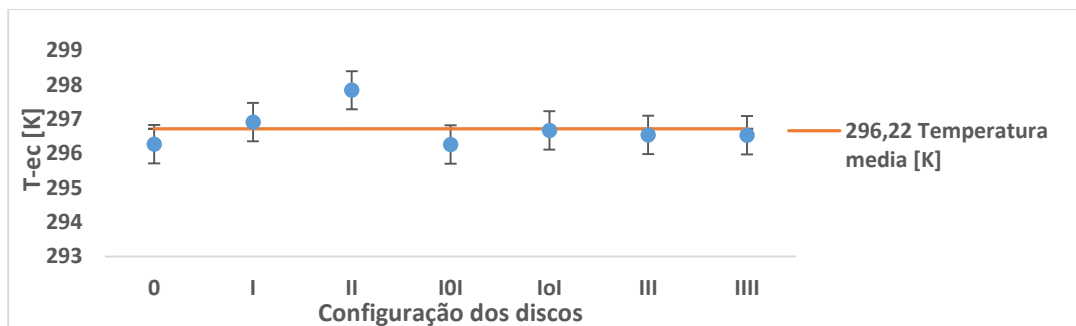
e)

Figura G.2 – Pressão de entrada da carcaça vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

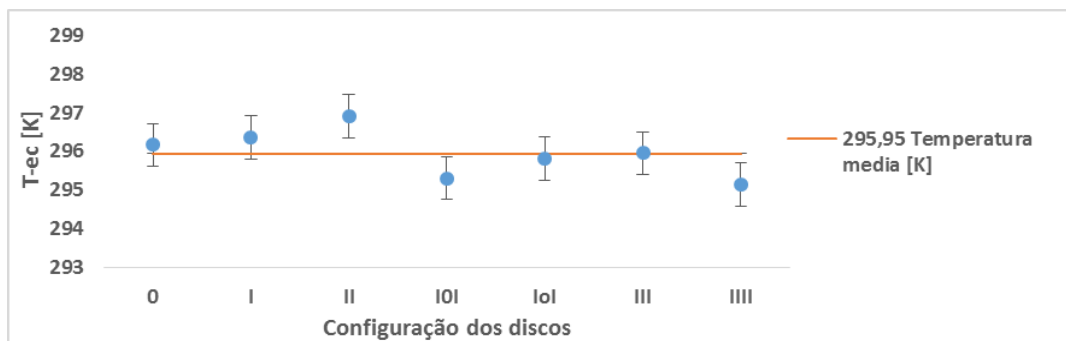
G.3 – Temperatura de entrada da carcaça (T_{-ec})



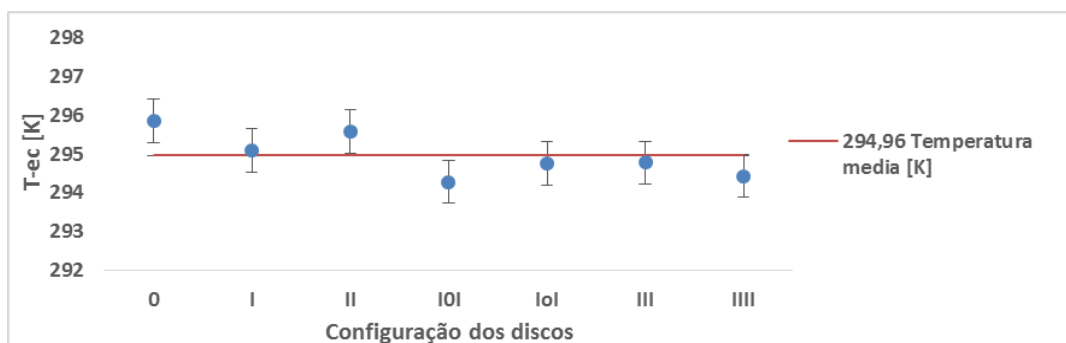
a)



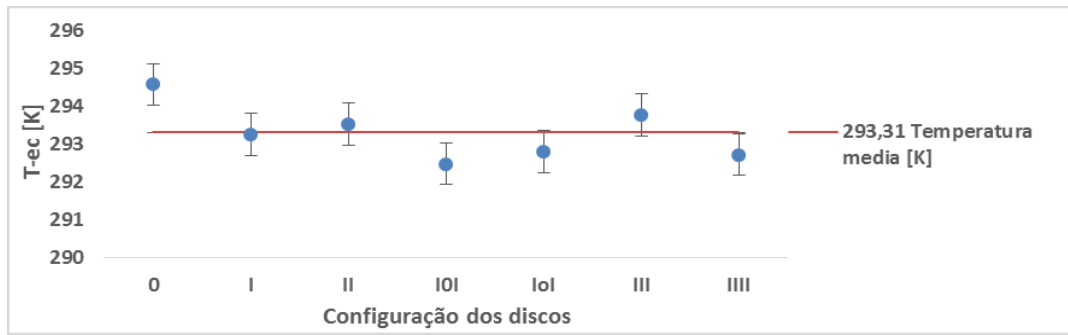
b)



c)



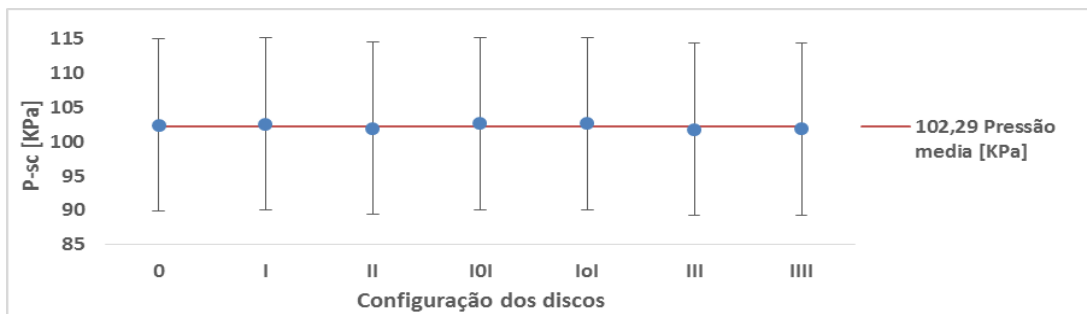
d)



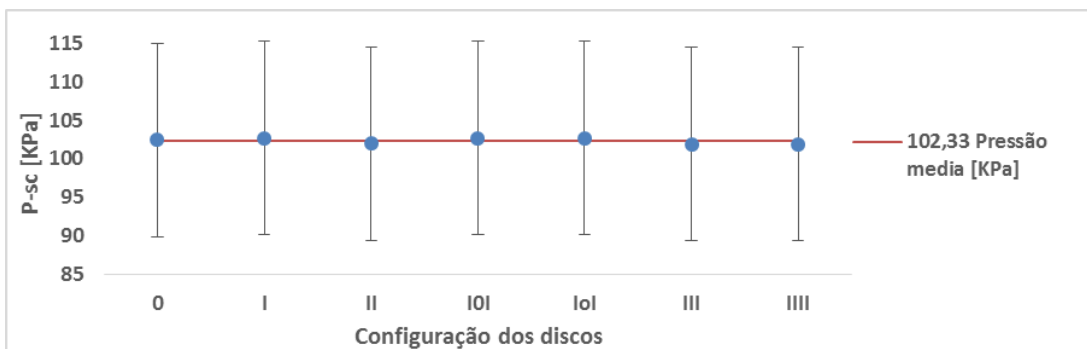
e)

Figura G.3 – Temperatura na entrada da carcaça vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

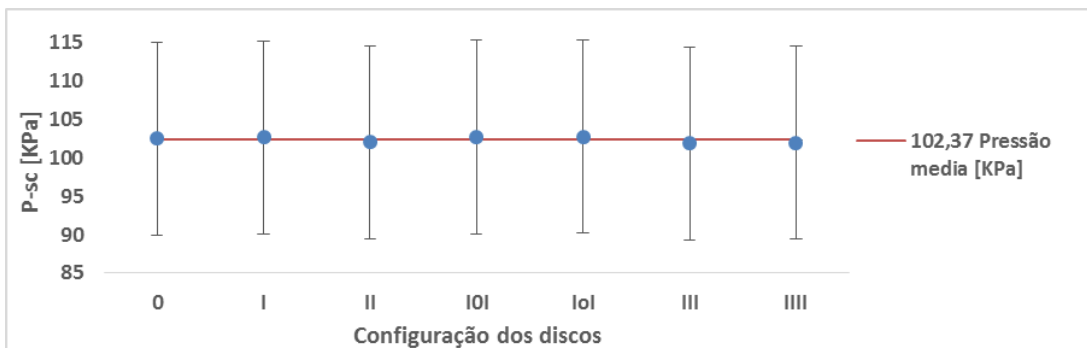
G.4 – Pressão de saída da carcaça (P_{-sc})



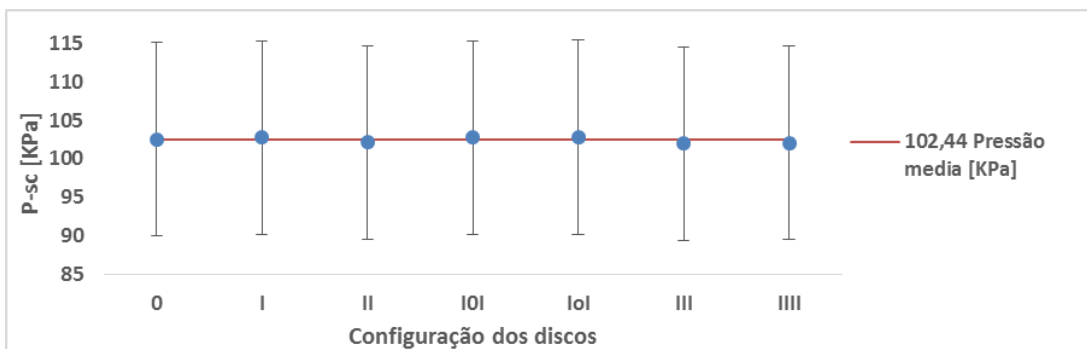
a)



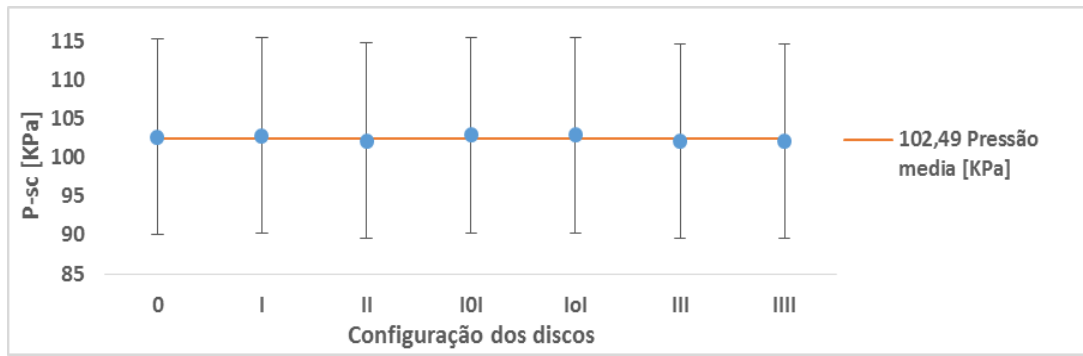
b)



c)



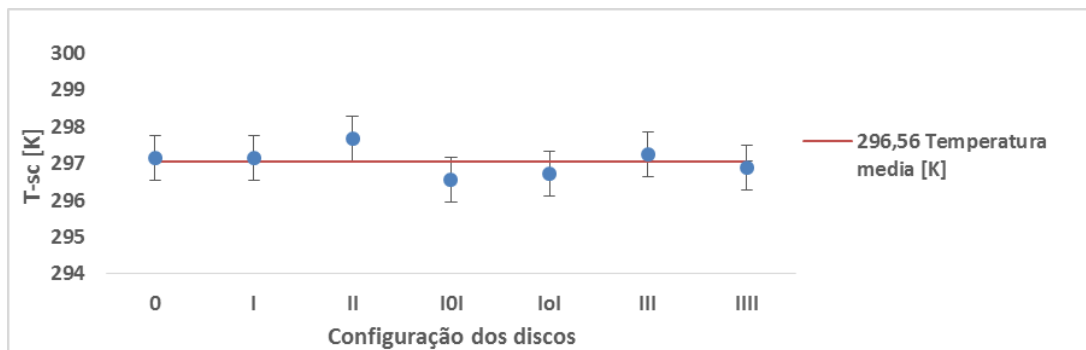
d)



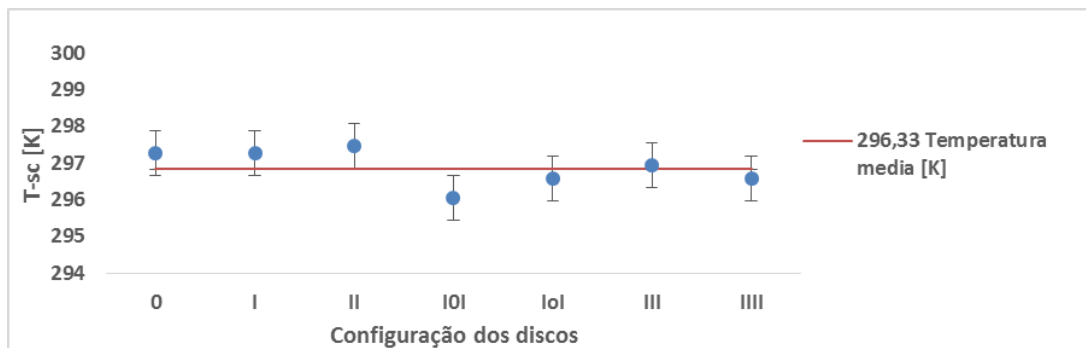
e)

Figura G.4 – Pressão da saída carcaça vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

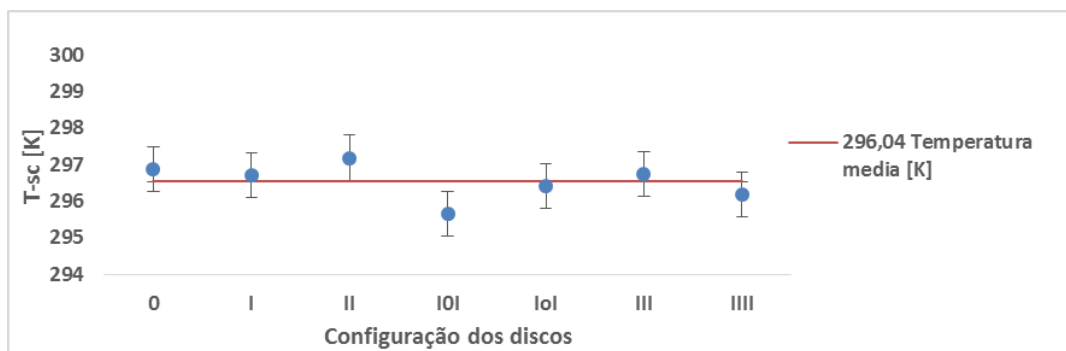
G.5 – Temperatura de saída da carcaça (T_{sc})



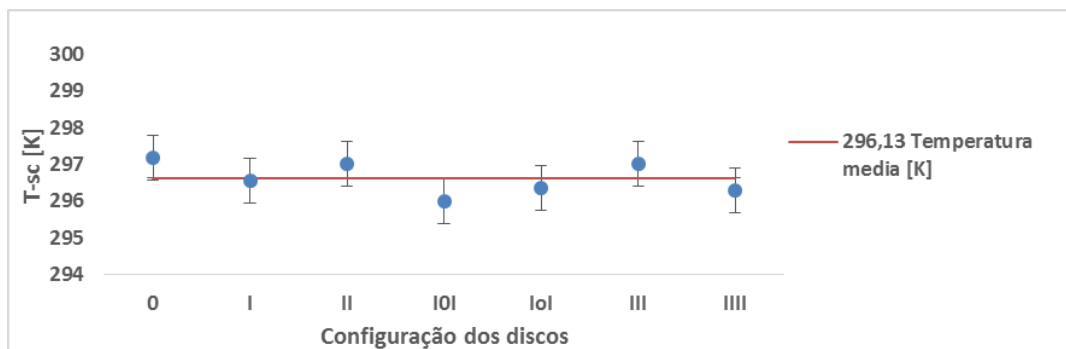
a)



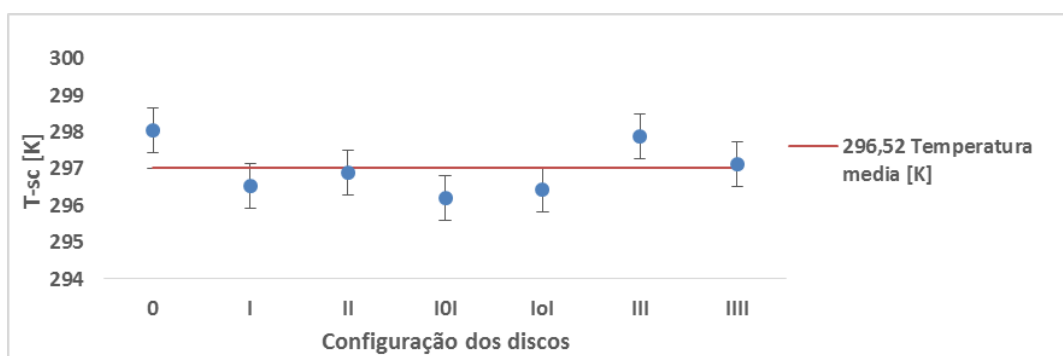
b)



c)



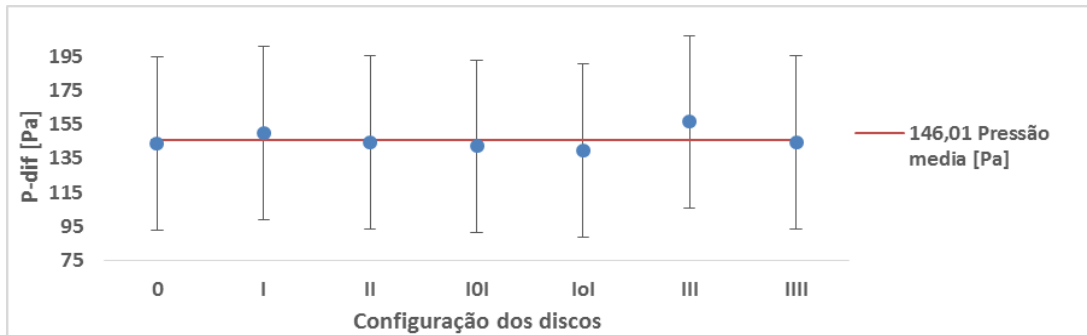
d)



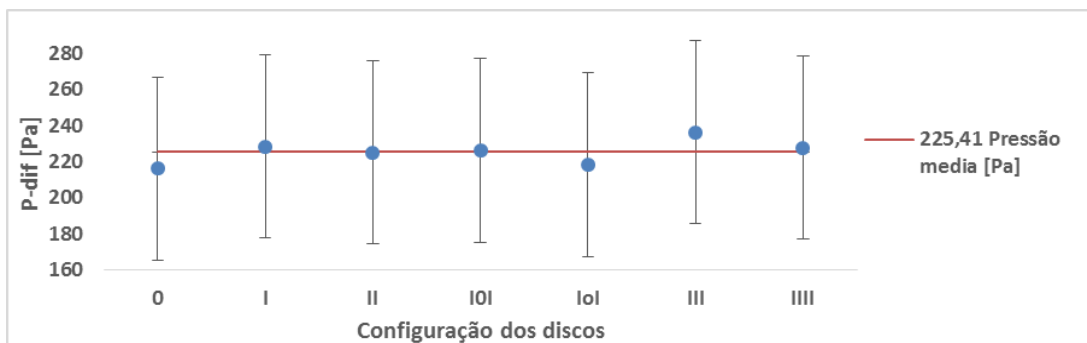
e)

Figura G.5 – Temperatura da saída da carcaça vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

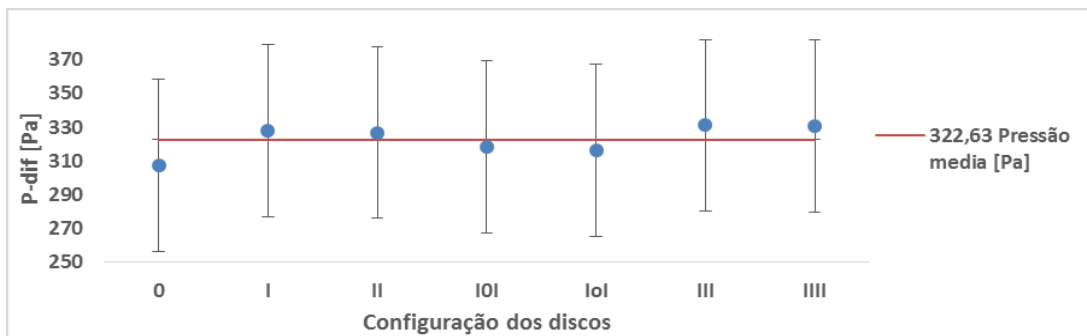
G.6 – Pressão diferencial (*P-dif*)



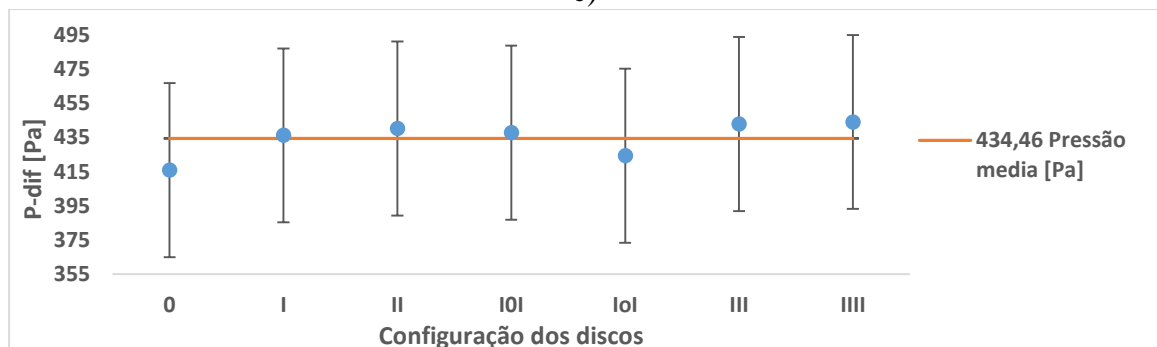
a)



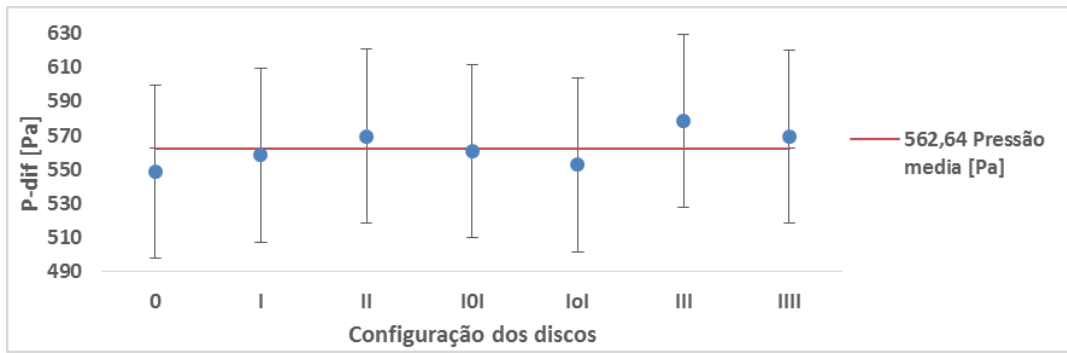
b)



c)

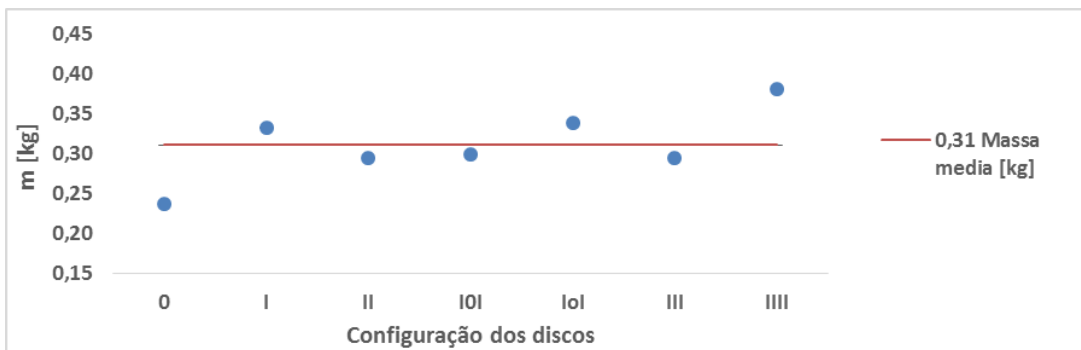


d)

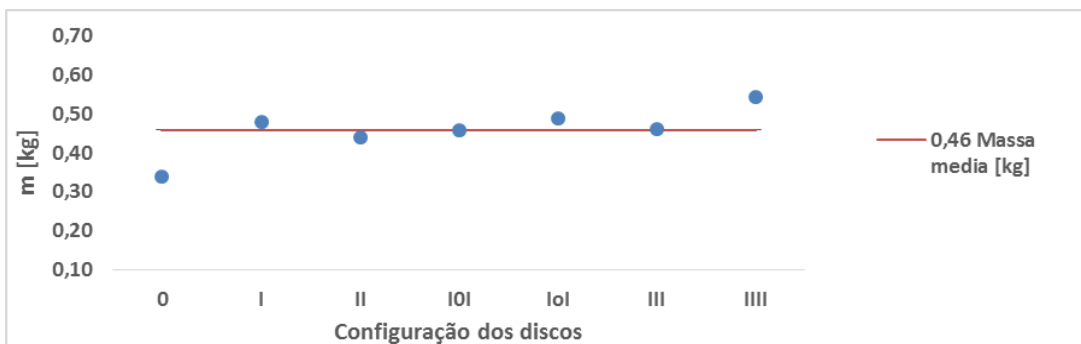


e)

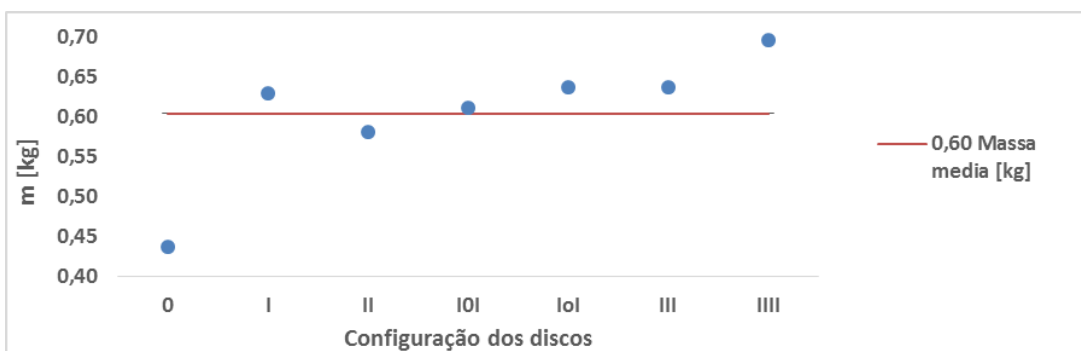
Figura G.6 – Pressão diferencial vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

G.7 – Sensor de força (m)

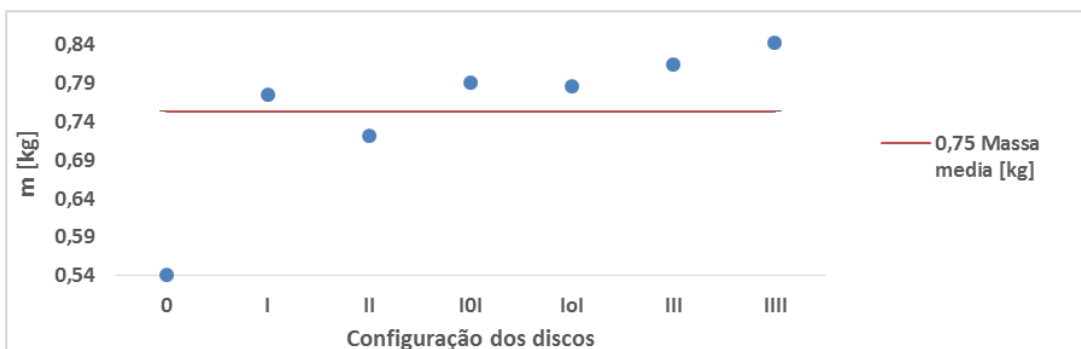
a)



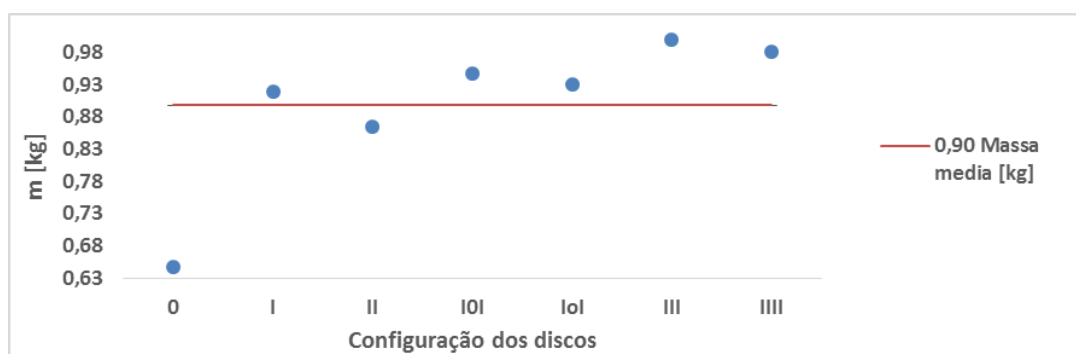
b)



c)



d)

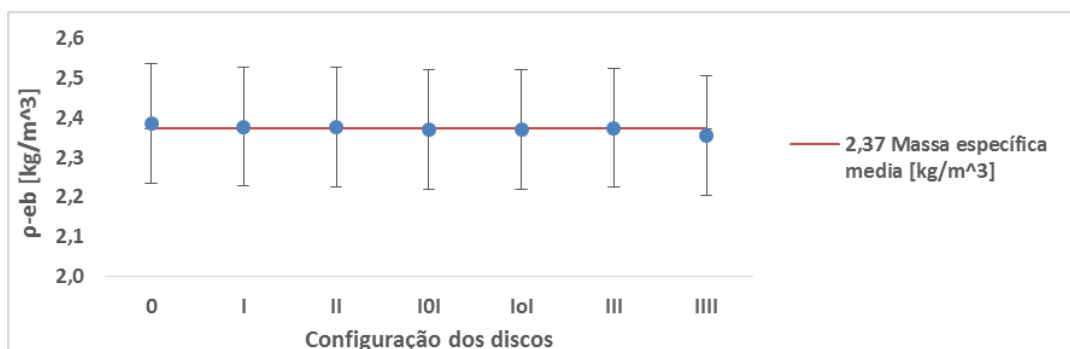


e)

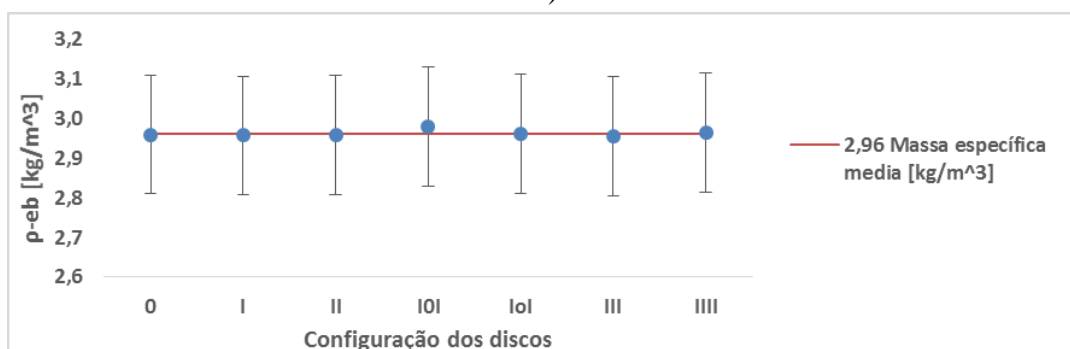
Figura G.7 – Massa do sensor de força vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

APÊNDICE H – Comparação das Grandezas Calculadas por Equacionamentos para Diferentes Configurações de Discos

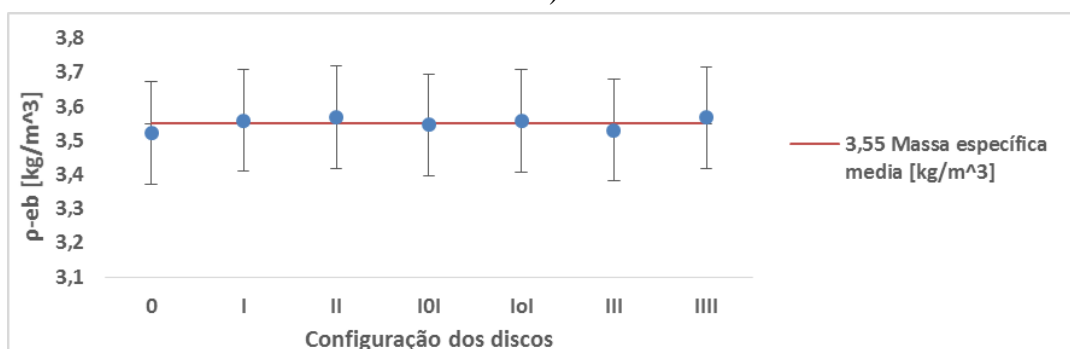
H.1 – Massa especificada entrada do bocal ($\rho\text{-eb}$)



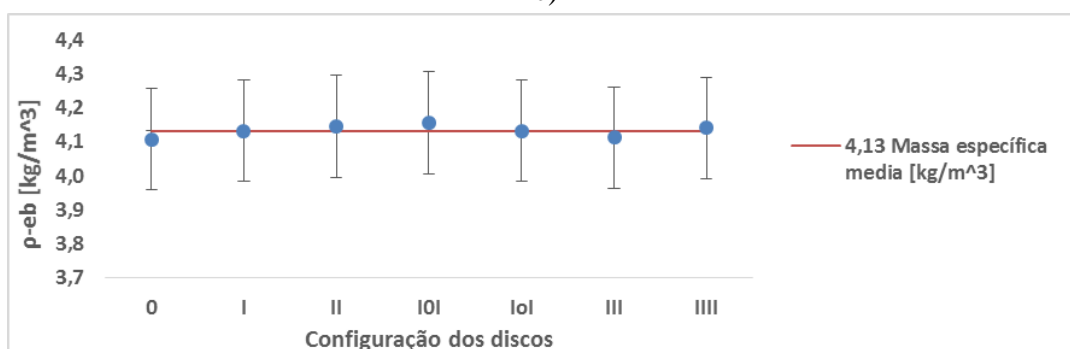
a)



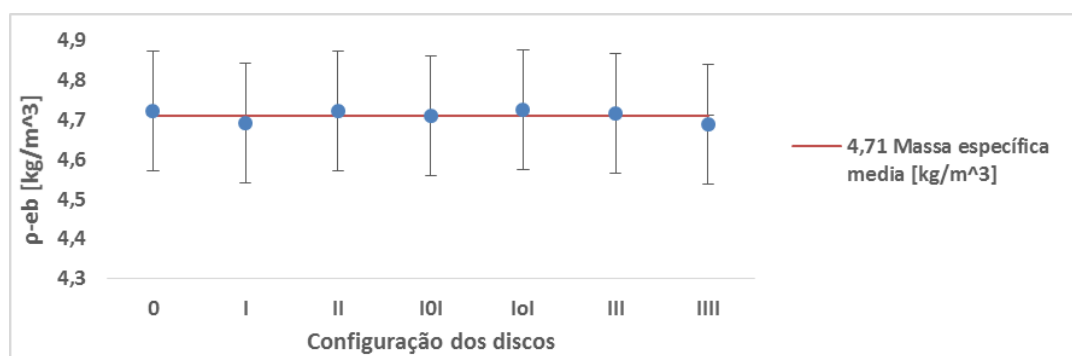
b)



c)



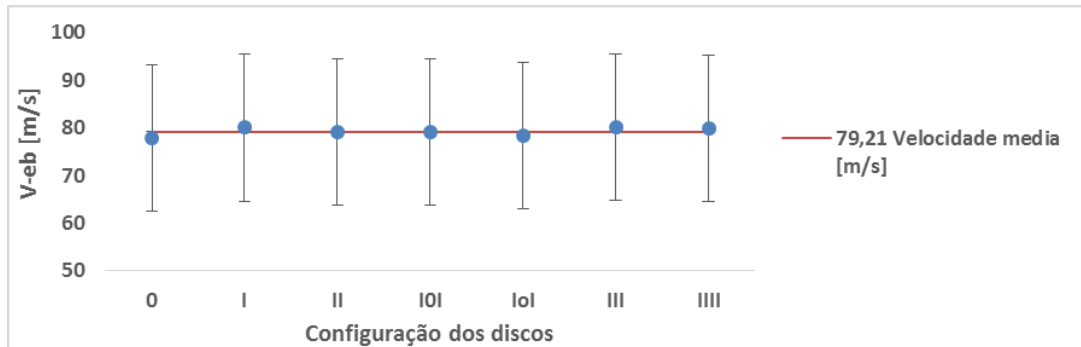
d)



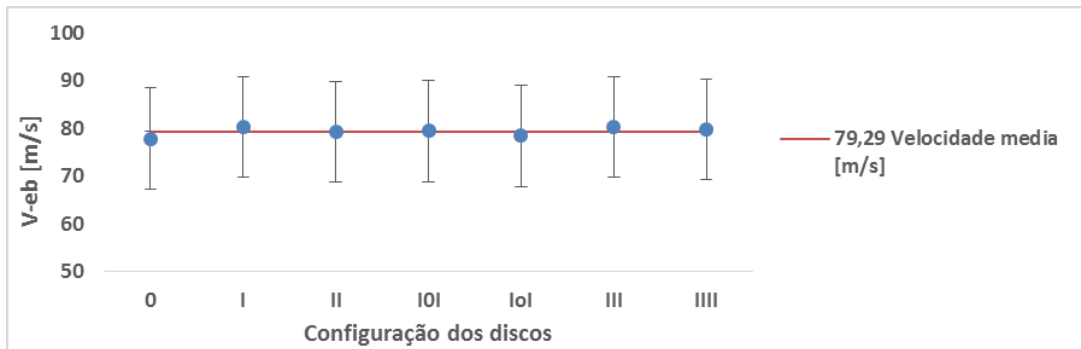
e)

Figura H.1 – Massa específica na entrada do bocal vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa e) 400,83kPa

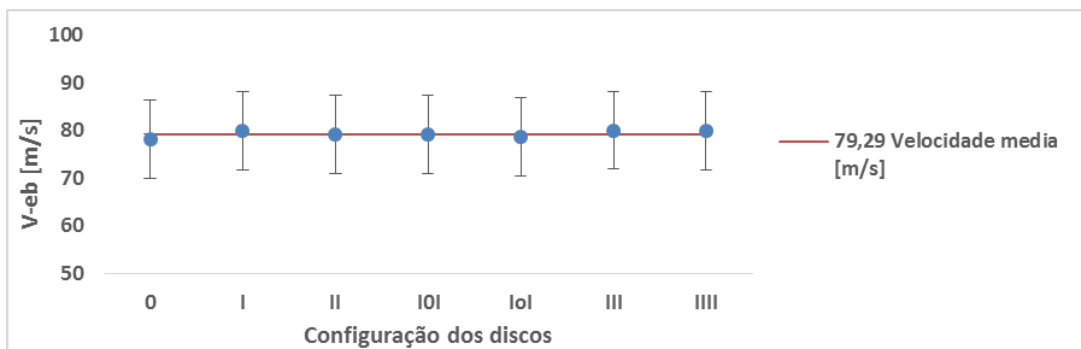
H.2 – Velocidade do ar na entrada do bocal (V_{-eb})



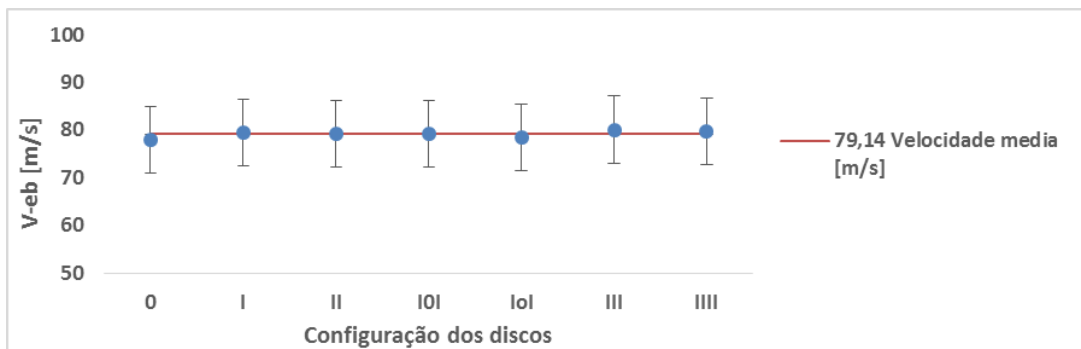
a)



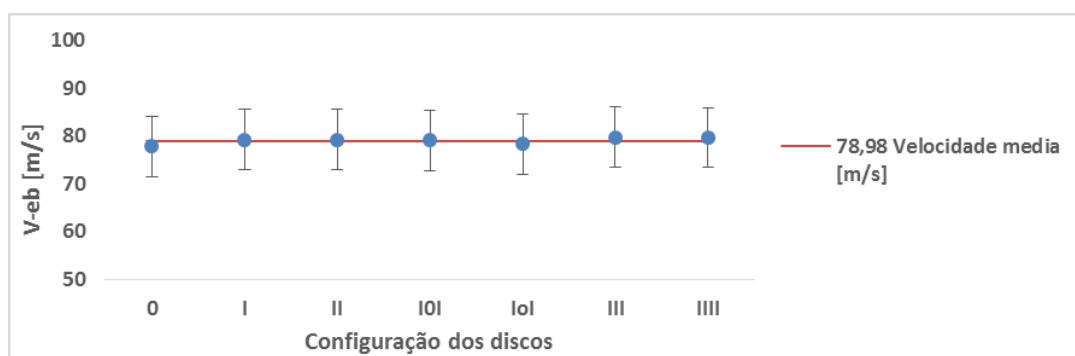
b)



c)



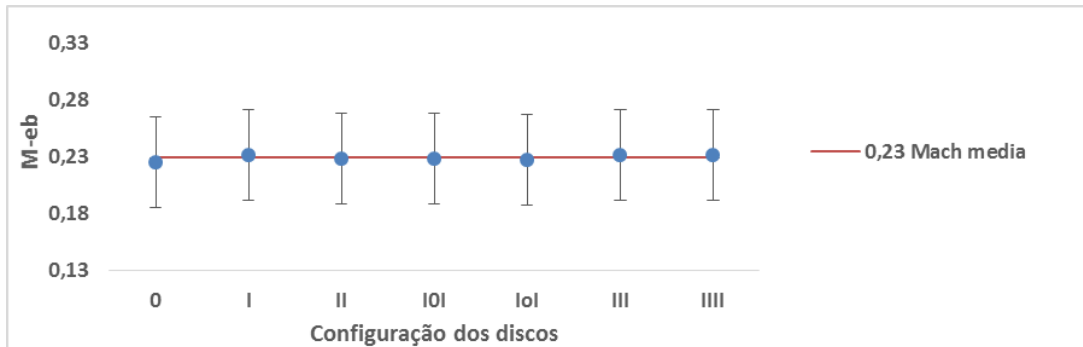
d)



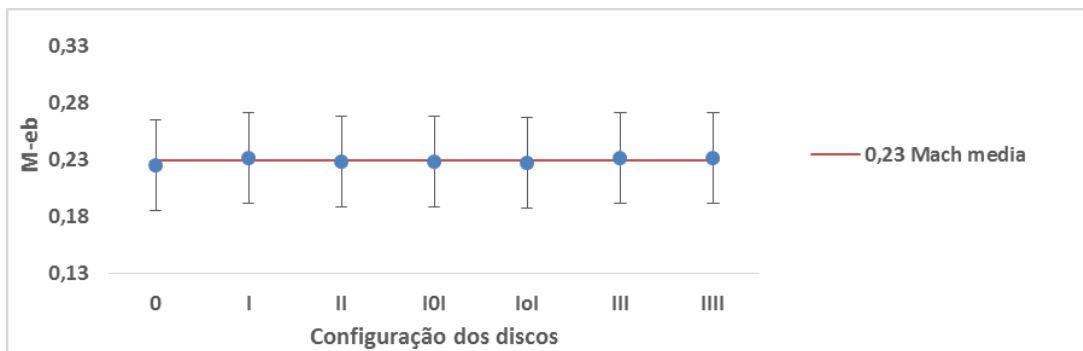
e)

Figura H.2 – Velocidade de ar na entrada do bocal vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

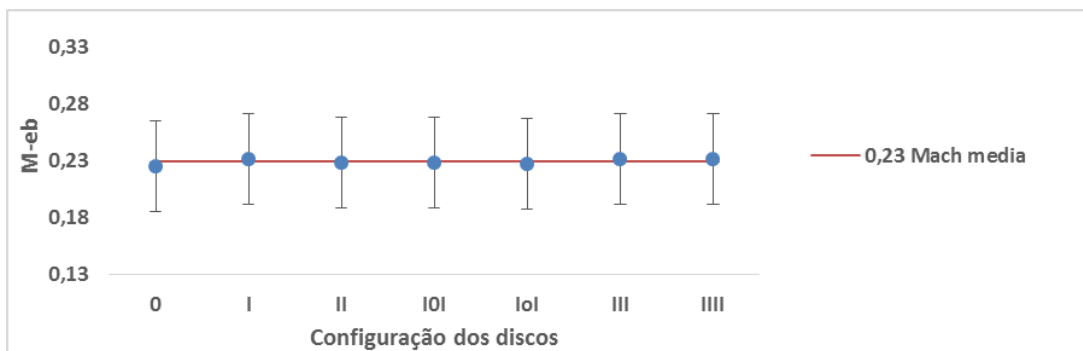
H.3 – Número de Mach na entrada do bocal (M_{-eb})



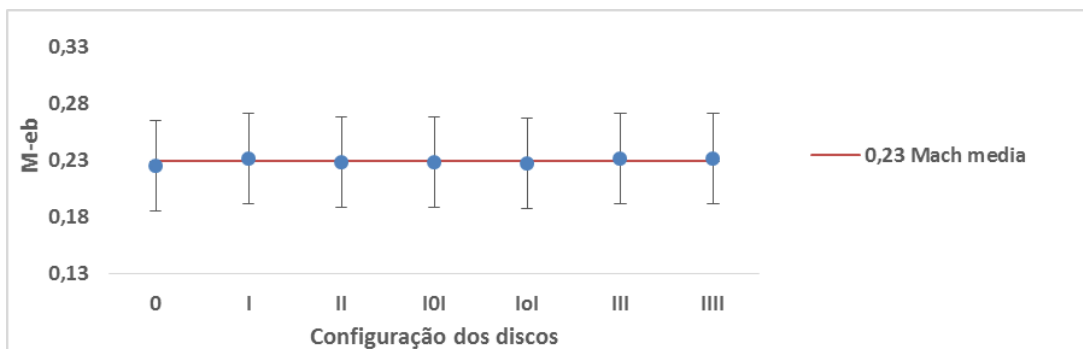
a)



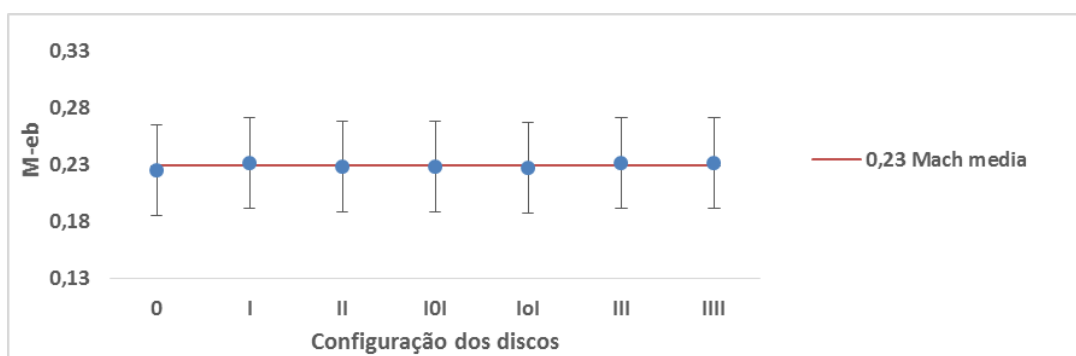
b)



c)



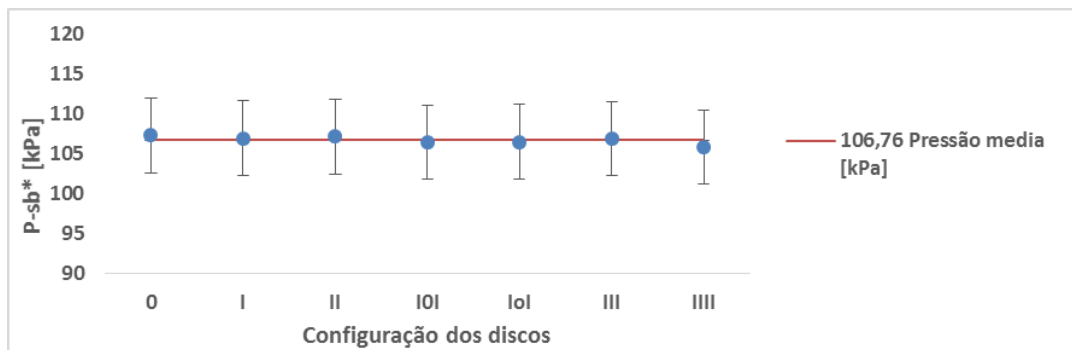
d)



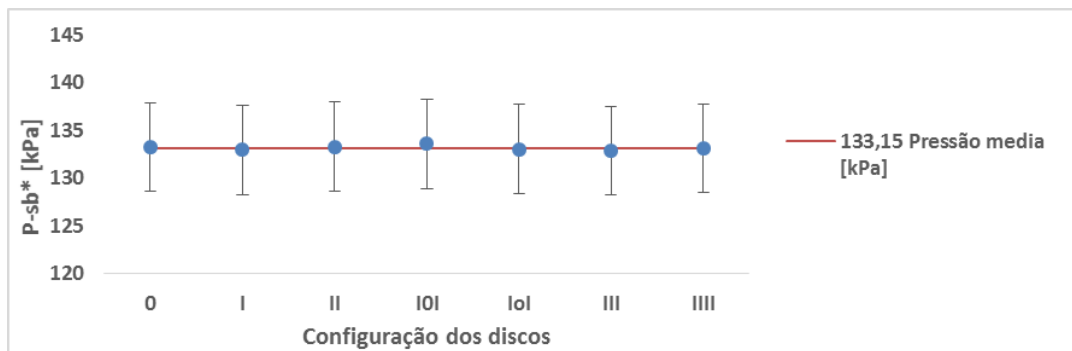
e)

Figura H.3 – Número de Mach na entrada do bocal vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

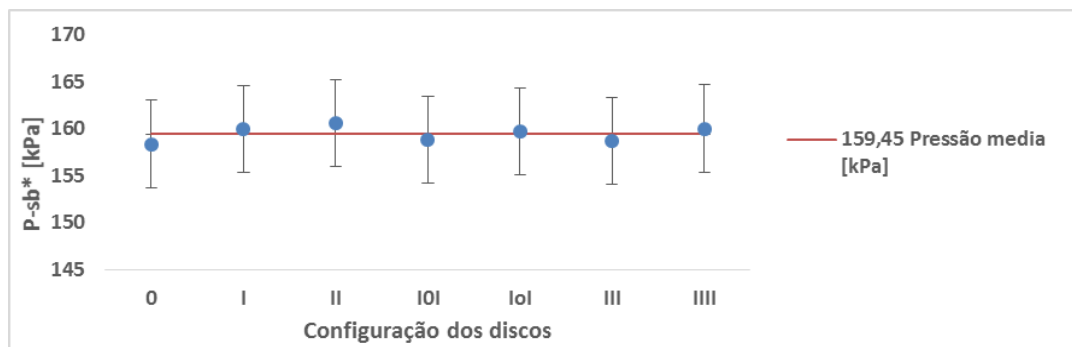
H.4 – Pressão crítica na saída do bocal ($P\text{-}sb^*$)



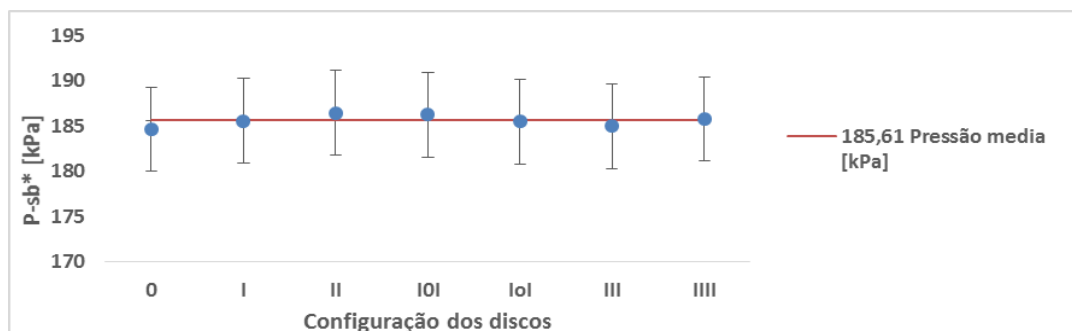
a)



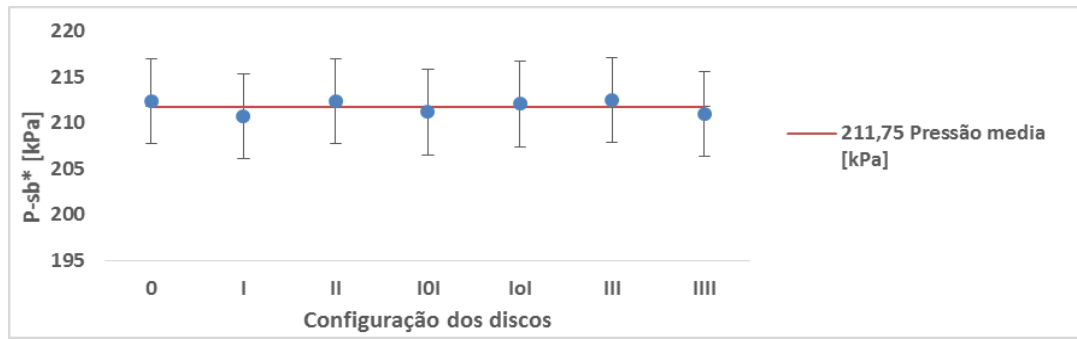
b)



c)



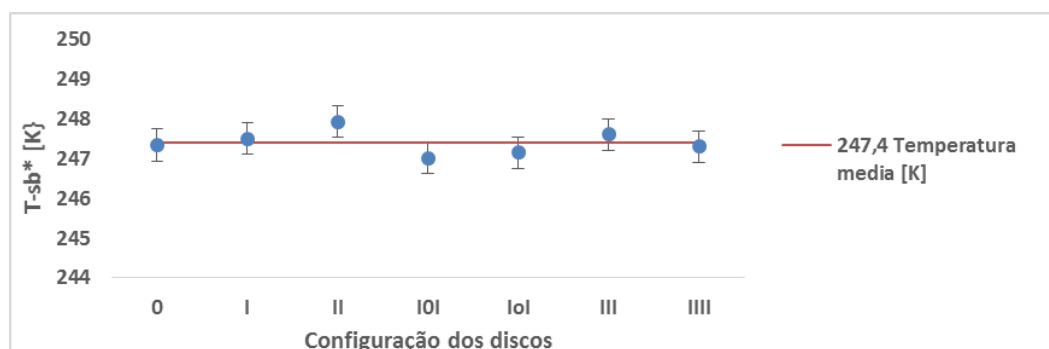
d)



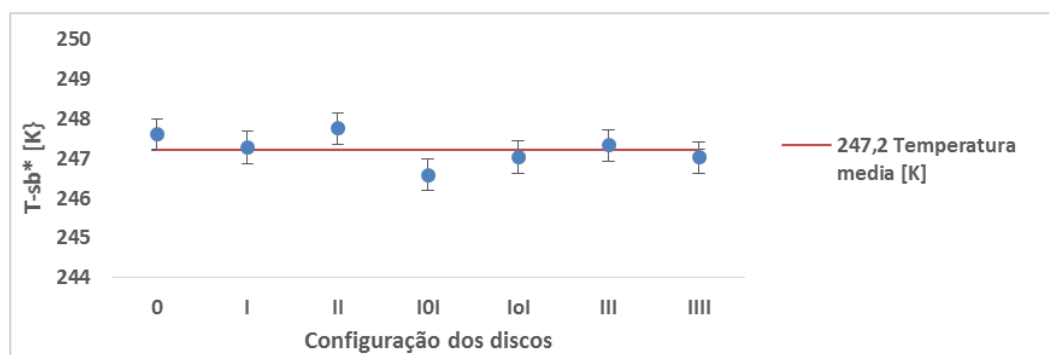
e)

Figura H.4 – Pressão crítica na saída do bocal vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

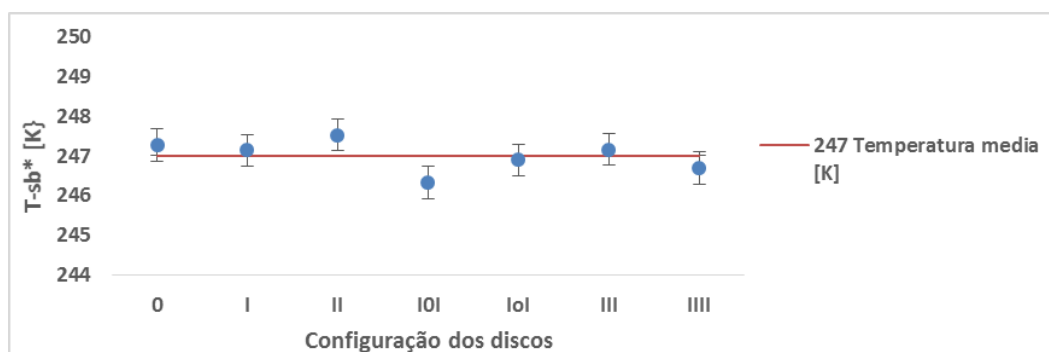
H.5 – Temperatura crítica na saída do bocal (T_{sb}^*)



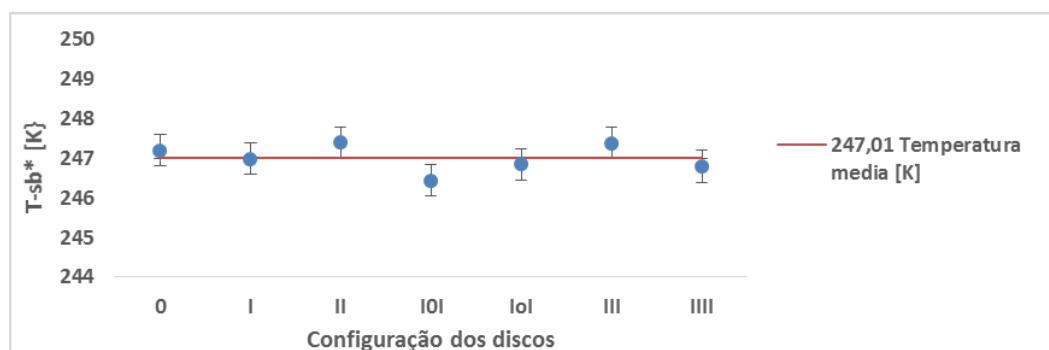
a)



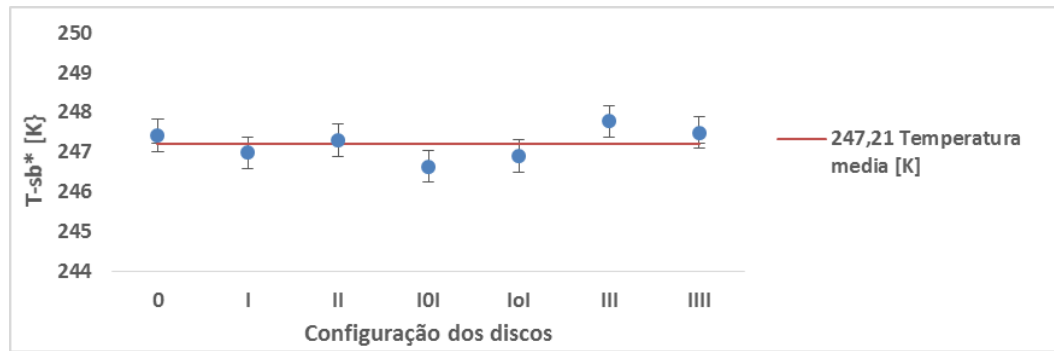
b)



c)



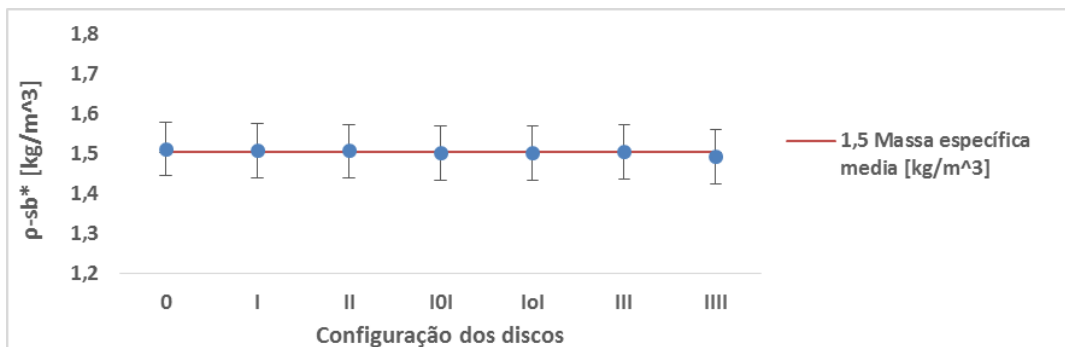
d)



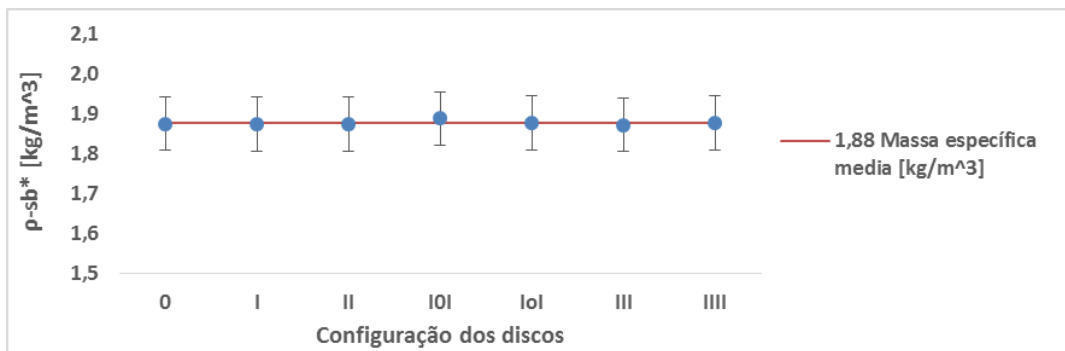
e)

Figura H.5 – Temperatura crítica na saída do bocal vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

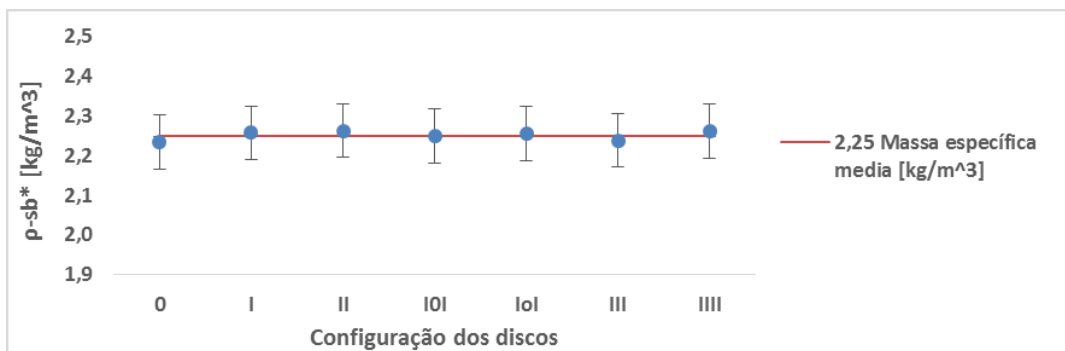
H.6 – Massa específica crítica na saída do bocal ($\rho\text{-sb}^*$)



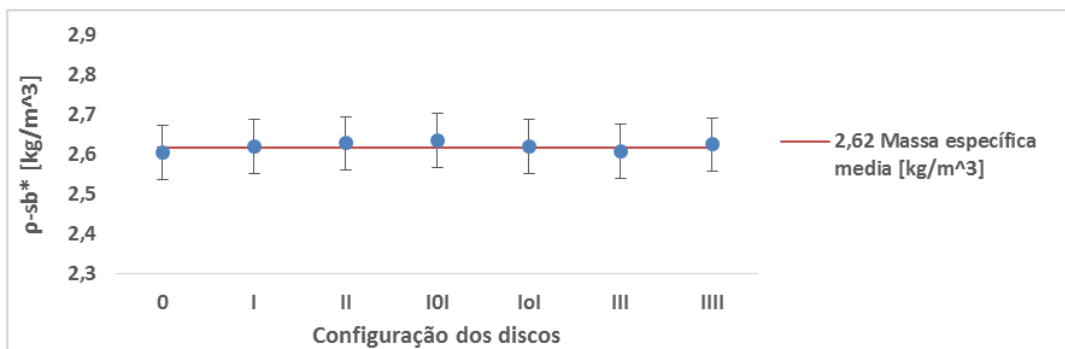
a)



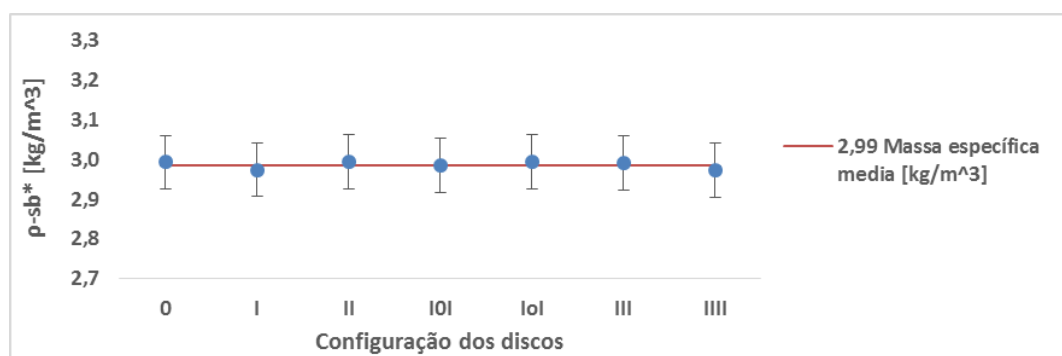
b)



c)



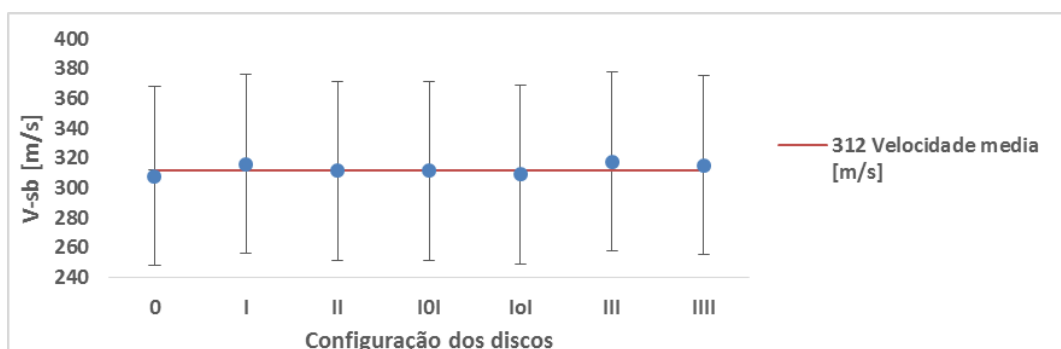
d)



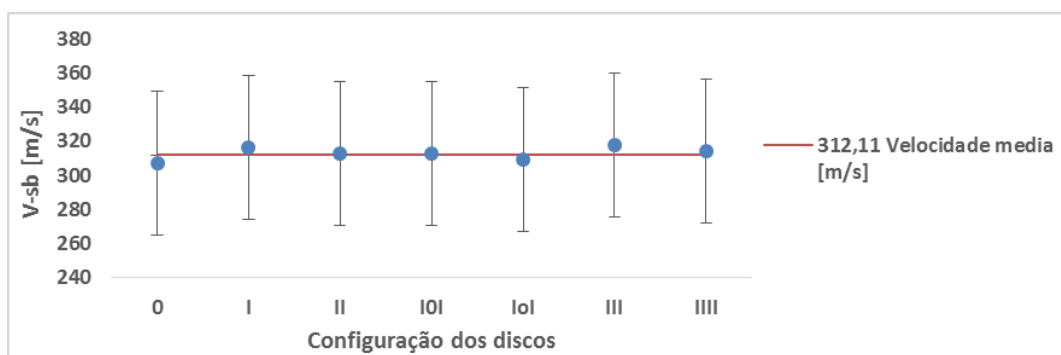
e)

Figura H.6 – Massa específica crítica na saída do bocal vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

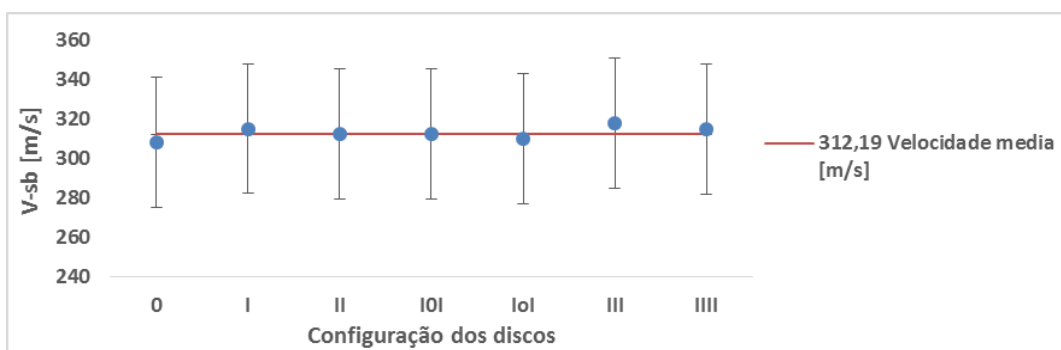
H.7 – Velocidade do ar na saída do bocal (V_{sb})



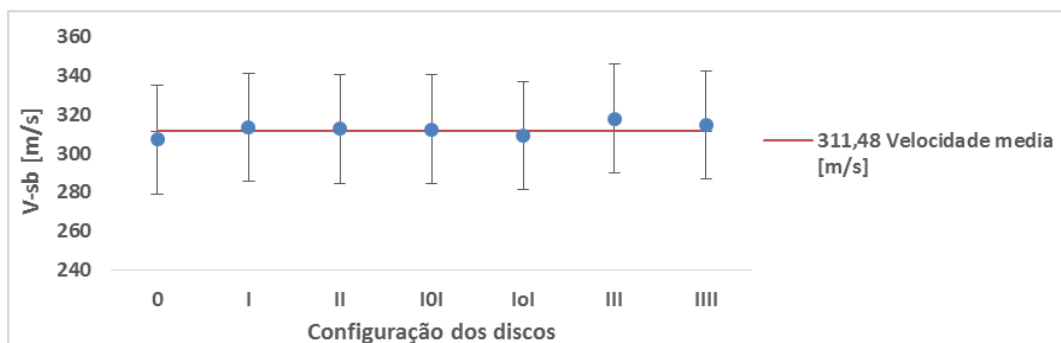
a)



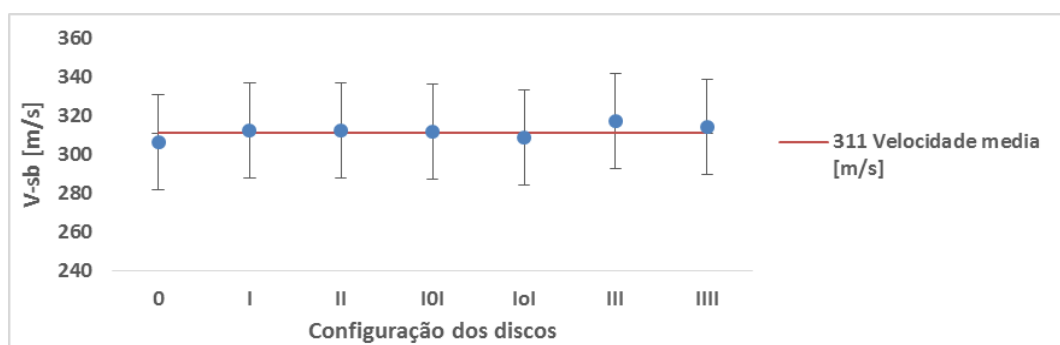
b)



c)



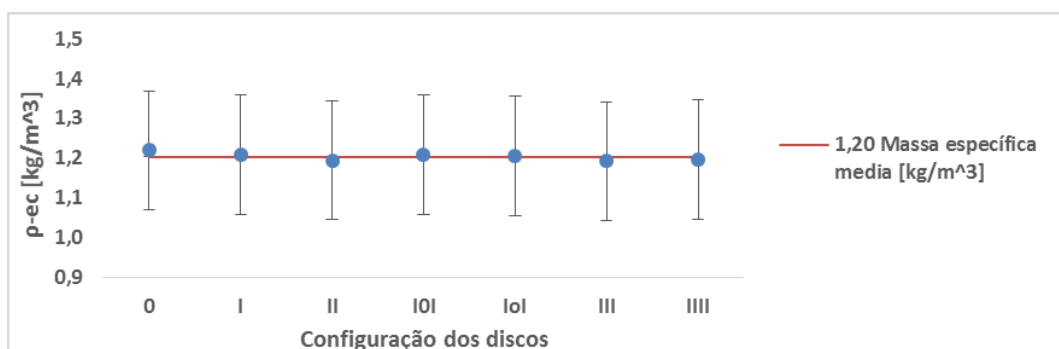
d)



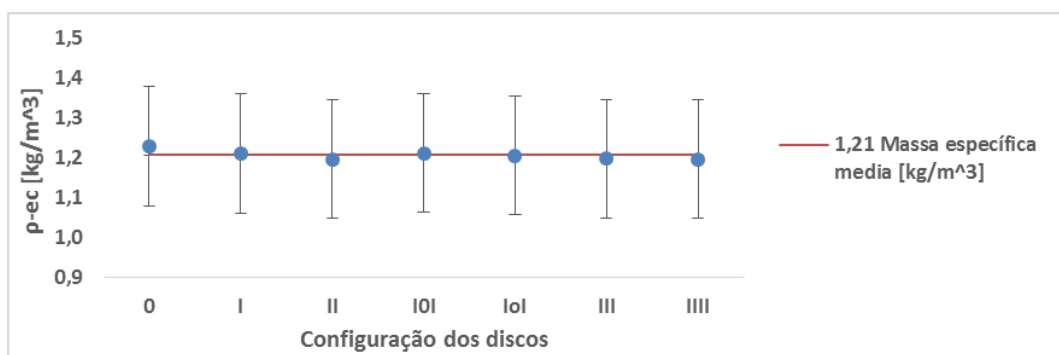
e)

Figura H.7 – Velocidade de saída do ar no bocal vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,8kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

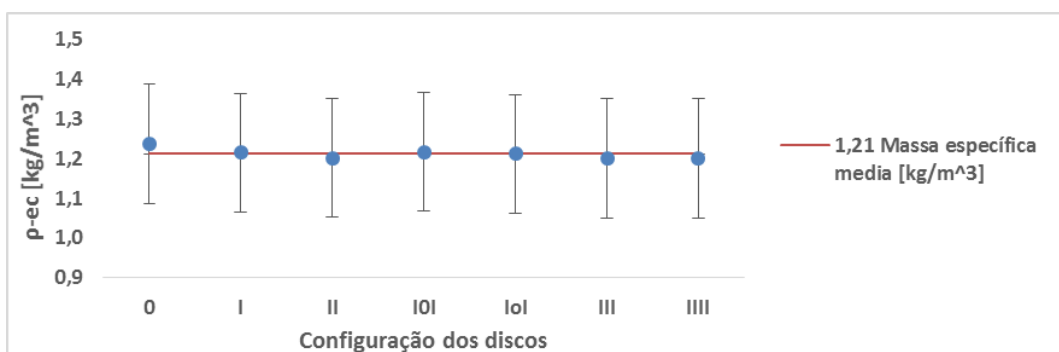
H.8 – Massa específica da entrada da carcaça (ρ_{ec})



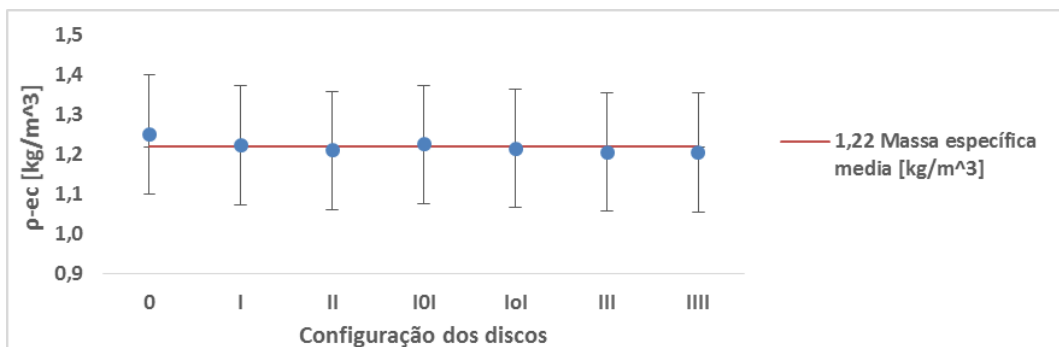
a)



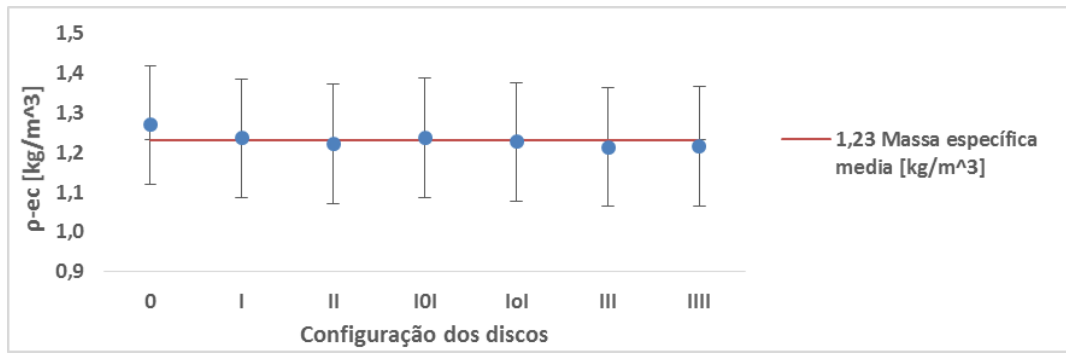
b)



c)



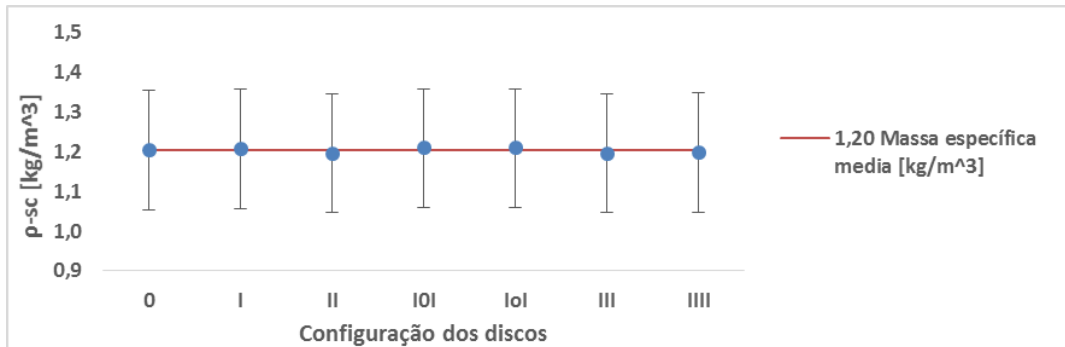
d)



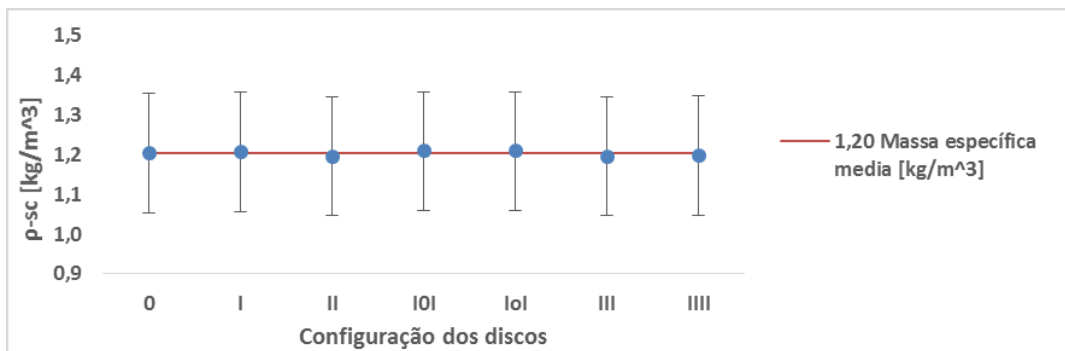
e)

Figura H.8 – Massa específica na entrada da carcaça vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

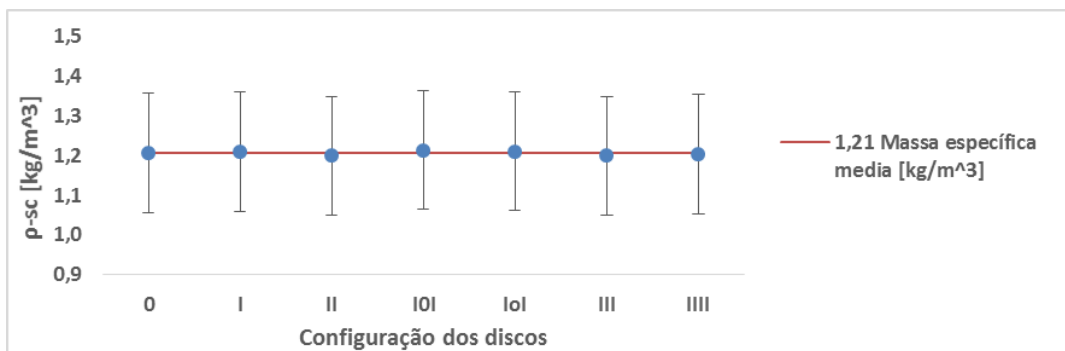
H.9 – Massa específica saída da carcaça (ρ -sc)



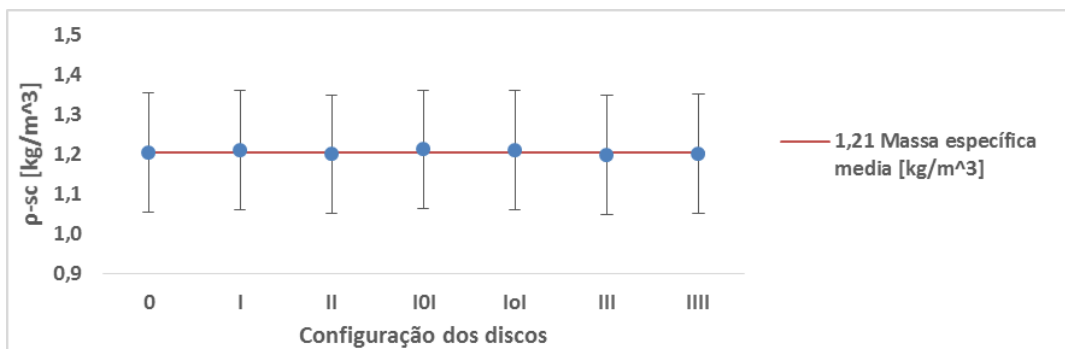
a)



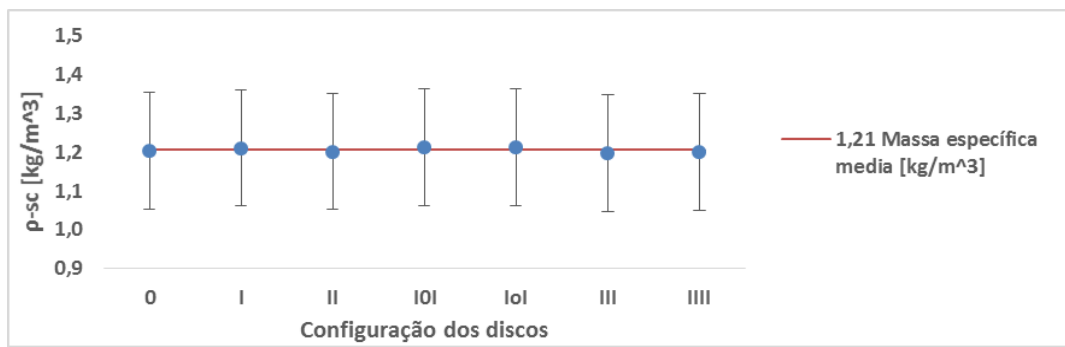
b)



c)



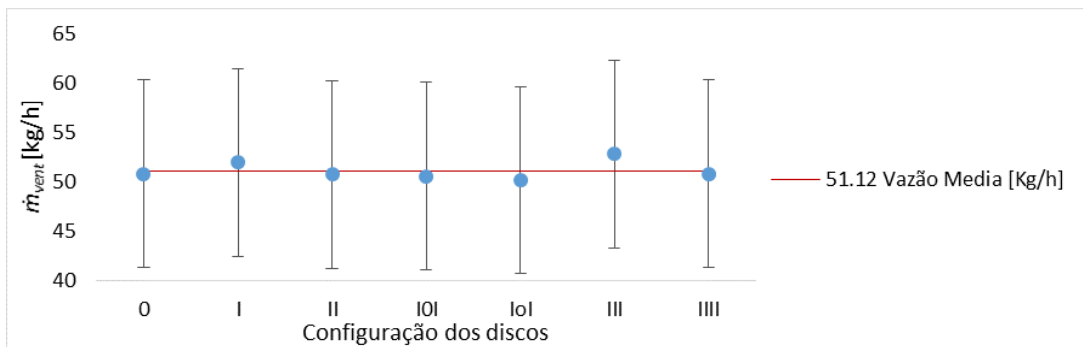
d)



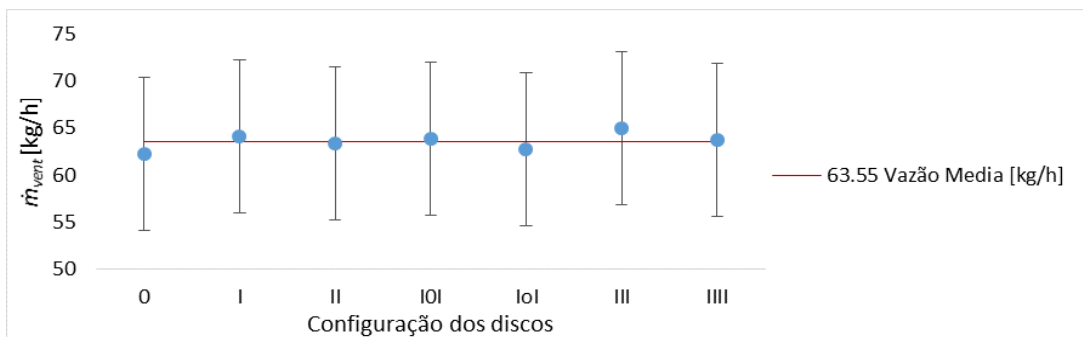
e)

Figura H.9 – Massa específica na saída da carcaça vs Configuração dos discos, com uma pressão de entrada média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,8kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

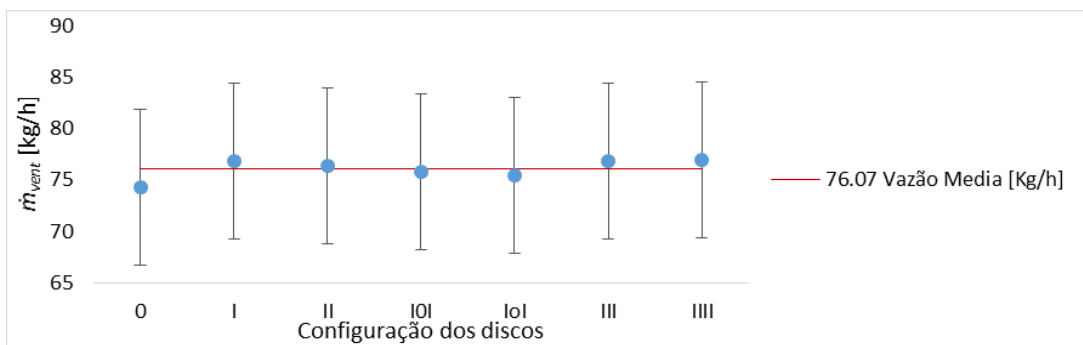
H.10 – Vazão medida pelo Venturi (\dot{m}_{vent})



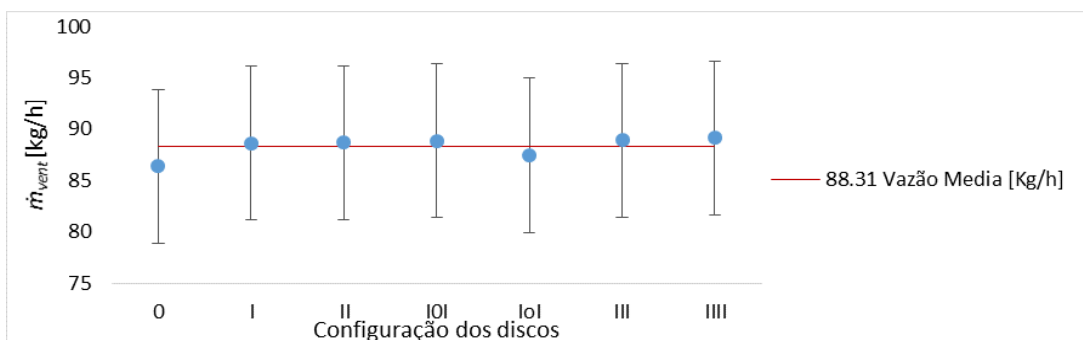
a)



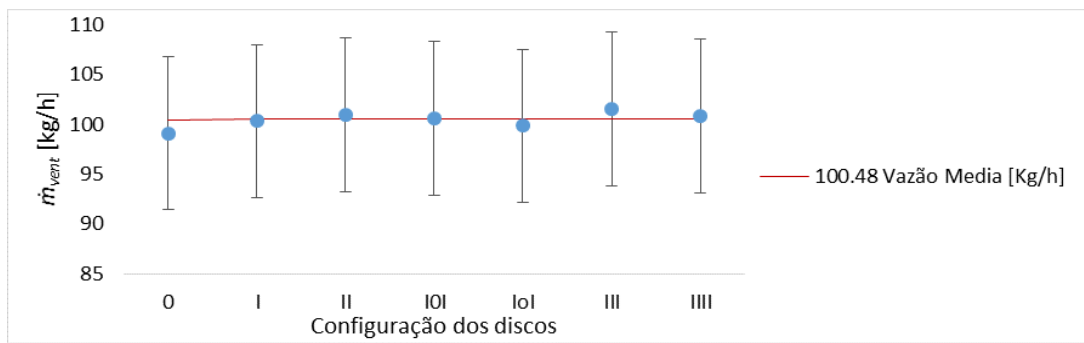
b)



c)



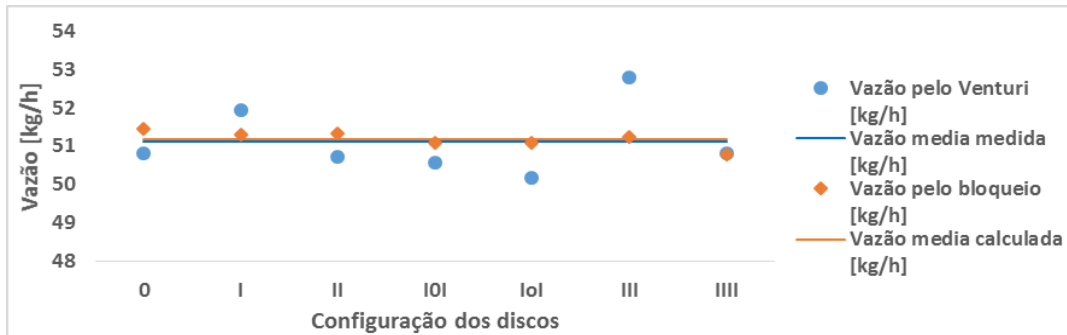
d)



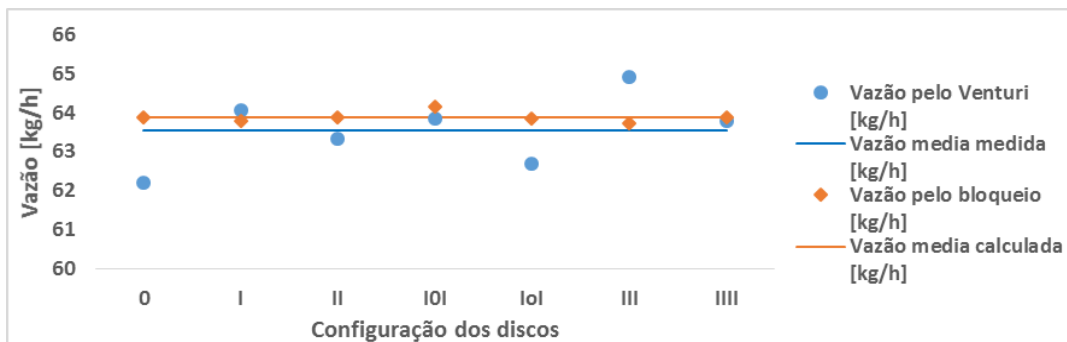
e)

Figura H.10 – Vazão medida pelo Venturi vs Configuração dos discos, na qual tem uma pressão de ar média de a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

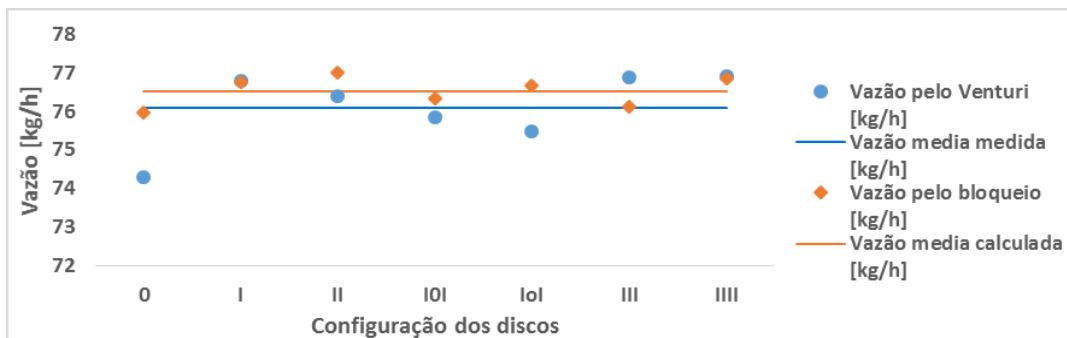
H.11 – Verificação de vazão \dot{m}_{vent} e \dot{m}_{bloq}



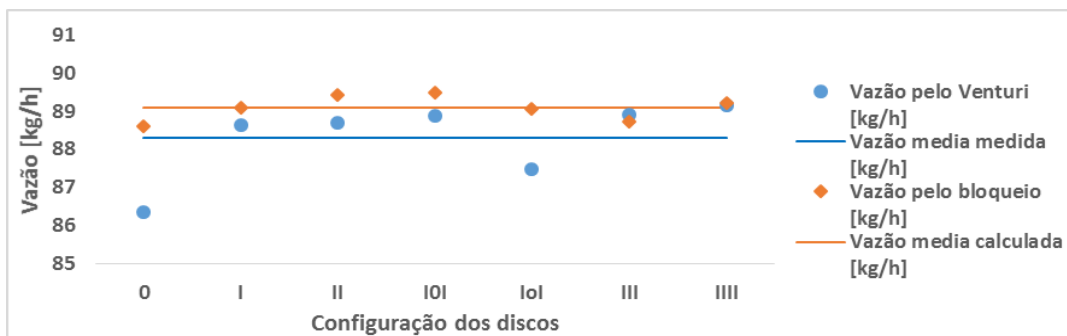
a)



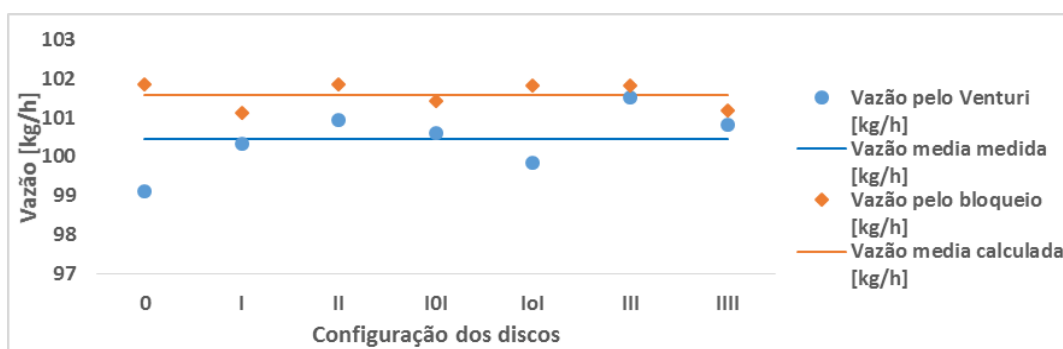
b)



c)



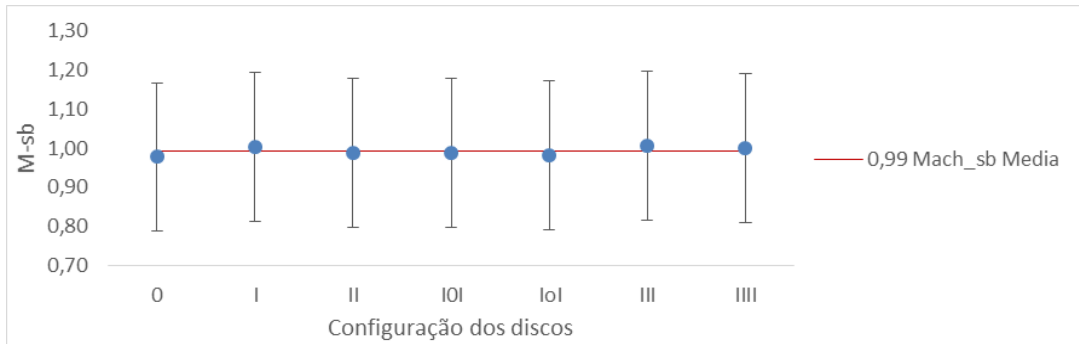
d)



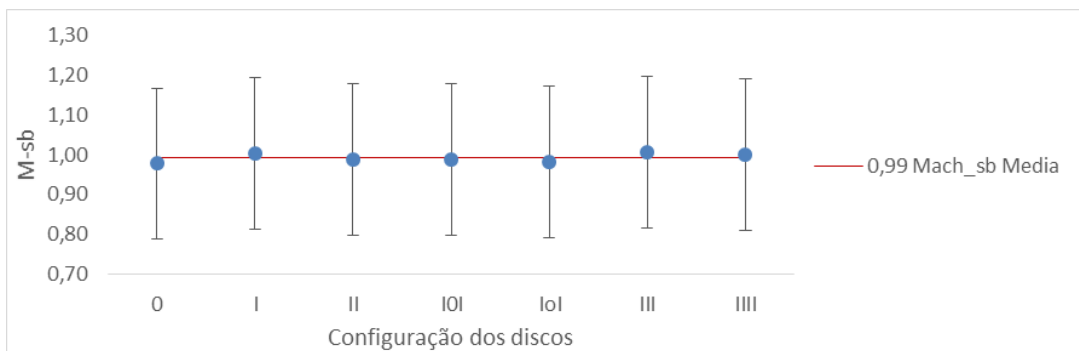
e)

Figura H.11 – Vazão medido e vazão calculado vs Configuração dos discos, para uma pressão de ar média de: a) 202,02kPa, b) 252,06kPa, c) 301,82kPa, d) 351,35kPa, e) 400,83kPa

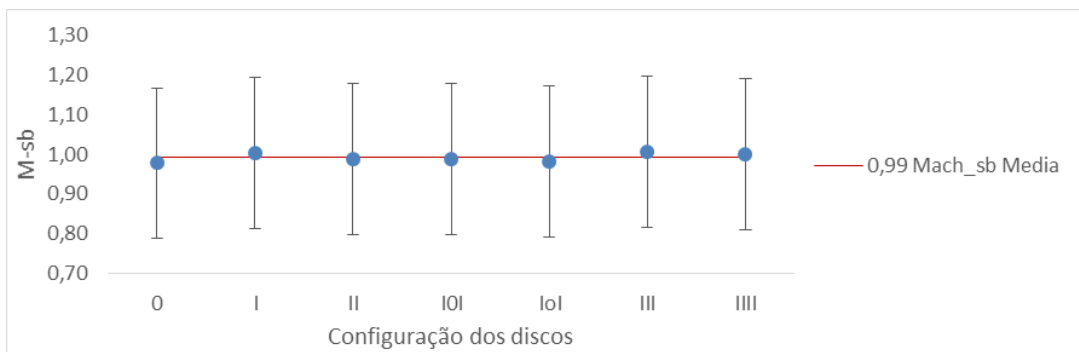
H.12 – Bloqueio na saída do bocal (M_{-sb})



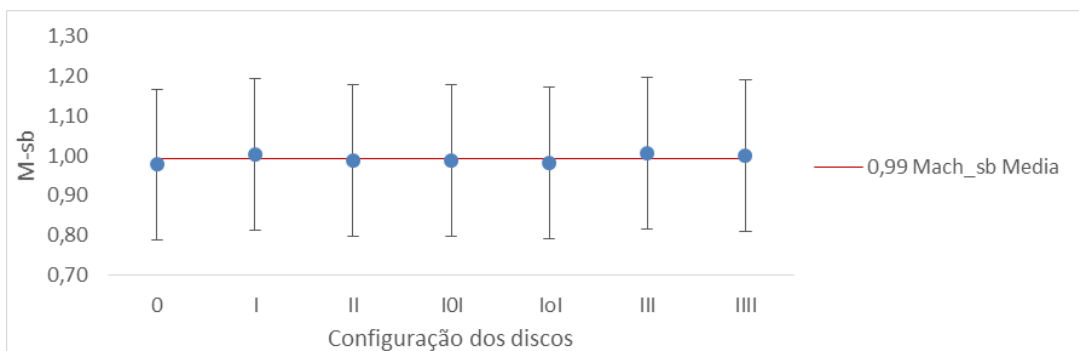
a)



b)



c)



d)

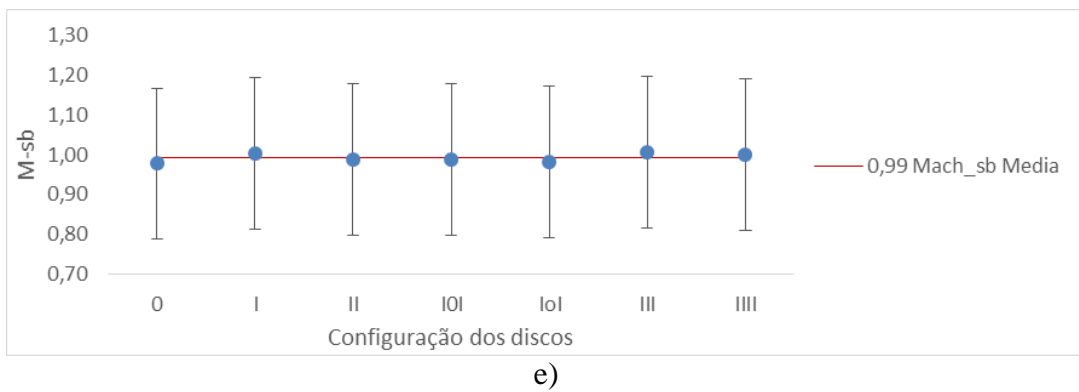


Figura H.12 – Número de Mach da saída do bocal vs Configuração dos discos, para pressão de entrada de ar média de: a) 202,02kPa, b) 252,1kPa, c) 301,8kPa, d) 351,8 kPa, e) 400,8kPa

ANEXO I – Sistema de Medição

I.1 – Sensores e instrumentos da bancada experimental

TAG	Descrição	Tipo	Fabricante	Modelo	Faixa de operação	Incerteza	Conector	Fluido de trabalho	Tensão de alimentação	Sinal de saída	Conexão	Observações
T-amb T-eb T-ec T-sc	Sensor de Temperatura: Ambiente do LETA, Entrada do bocal, Entrada da carcaça, Saída da carcaça	Tempor (Cr-AI)	-----	Tipo K	73 - 1523 [K]	2,2 [K]	Conector para tempor tamanho miniatura	Uso genérico	5V corrente contínua	-6,45mV - 48,88mV	Rosca M6	AD597 Ultimaker Temperature, Control Board K - Thermocouple; Signal Amplifier.
P-eb	Sensor de Pressão - Entrada do Bocal	PS-10B	Fueitch	PS-10B	0 - 1000000 [Pa]	5000 [Pa]	AMP Superseal 3 vias	Qualquer fluido: óleo, combustível, água, turbo, contrapressão no escapamento	12V corrente contínua	1V - 5V	1/8" NPT	1 - Medição manométrica (não mede vácuo); 2 - Corpo em aço inox; 3 - IP67.
P-ec P-sc	Sensor de Pressão: Entrada da Carcaça e Saída da Carcaça	PSE550	-----	-----	0 - 300000 [Pa]	-----	AMP Superseal 3 vias de 0,15mm2	Qualquer fluido: óleo, combustível, água, turbo, contrapressão no escapamento;	12V corrente contínua	1V - 5V	Rosca M6	1 - Medição manométrica (não mede vácuo); 2 - Corpo PBT; 3 - Sensor de nylon e IP40.
m	Sensor de Força - Medição de Massa	Célula de carga	Bonad	Bnd Ic5.0	0 - 1 [kg]	0,0001 [kg]	AMP Superseal 4 vias	Uso genérico	5V corrente contínua	0V - 5V	Externa	1 - IP65; 2 - Corpo de Alumínio com resina acrílica para proteção; 3 - Capacidade de resolução muito alto.
P-dif	Sensor de Pressão Diferencial	MPXV7002	-----	MPXV700 2DP Case1351	-2 - 2 [kPa]	50 [Pa]	AMP Superseal 3 vias de 0,15mm2	Aire, gases não corrosivos, gases incombustíveis	5V corrente contínua	5V	Rosca M6	1 - Medição manométrica (não mede vácuo); 2 - Trabalha de -60°C +10°C.
----	Sensor de Pressão de referência	-----	WIK-A	S-10	0 - 1000000 [Pa]	3000 [Pa]	-----	Qualquer fluido, óleo, combustível, água, turbo.	24V corrente contínua	1V - 5V	Rosca M12x1	1 - Resistência contra vácuo; 2 - Grau de proteção: IP65, IP67 e IP68.
----	Sensor de Temperatura de referência	-----	-----	PT-100	-200°C - 650°C	0,3 [K]	-----	Uso genérico	24V corrente contínua	-----	Externa	-Agilent modelo 34970A

I.2 – Aquisição de Dados

Para fazer a leitura dos sinais elétricos enviados pelos diferentes sensores instalados na bancada experimental foi utilizado um conversor SCB-68. Este conversor é um bloco de conectores de 68 pines de entrada e saída, blindado como se mostra na Figura I.2a. O conversor pode ser usado por diversos dispositivos (DAQ), da família National Instruments para converter os sinais analógicos a digitais para posteriormente serem processados no NI PCIe-6363, Figura I.2b, através dum cabo blindado.

A placa de aquisição apresentada na Figura I.2b é conectada ao computador através de uma entrada padrão PCI-express, possui taxa de amostragem multicanal de até 1 milhão de amostras por segundo, com 32 canais analógicos de entrada e 16 bits de resolução.



a)



b)

Figura I.2 – a) conversor modelo NI SCB-68A, b) placa de aquisição NI PCIe-6363

I.3 – Torquímetro Estático Digital

Para a medição do torque estático é utilizado um torquímetro digital portátil da Lutron, modelo TQ-8800, Figura I.3, sendo o aparelho fixado ao eixo de rotação da TMD. Sua capacidade máxima é de 147,1 N·cm, apresentando uma resolução no modo “High” de 0,1 N·cm, uma exatidão de escala de $\pm 1,5\% + 5$ dígitos e taxa de amostragem de 0,125 s.

FEATURES	
* Professional torque meter with 15 Kg-cm torque probe, full set.	* RS 232 computer interface.
* 3 kind display unit select button of Kg-cm, LB-inch and Newton-cm in the front panel.	* Super large LCD display, easy readout.
* Peak value measurement	* Microcomputer circuit, high performance.
* Data hold button to freeze the desired reading.	* Separate torque probe, easy operation.
* Peak hold measurement to hold the peak value.	* Meter can accept 3 kind torque probes (15, 50, 100 Kg-cm). Change new probe, new calibration are not necessary.
* High/Low resolution select by push button.	* Auto shut off saves battery life.
* Fast/Low sampling select by push button.	* Built-in low battery indicator.
* Record Maximum and Minimum readings with recall.	* Heavy duty & compact housing case.
	* Complete set with the hard carrying case.

GENERAL SPECIFICATIONS			
Display	61 mm x 34 mm super large LCD display. 15 mm (0.6") digit size.	Operating temperature	0°C to 50°C (32°F to 122°F).
Measurement	Torque value, peak hold, data hold, Max. & min. value.	Operating humidity	Less than 80% RH.
Display unit	Kg-cm/LB-inch/Newton-cm.	Power supply	Alkaline or heavy duty type DC 9V battery, 006P, MN1604 (PP3) or equivalent.
Sensor	Exclusive torque sensor.	Power consump.	Approx. DC 20 mA.
Circuit	Exclusive microcomputer circuit.	Weight	<i>Meter</i> 230 g (0.50 LB). <i>Probe</i> 600 g (1.32 LB)
Data hold	Freeze the desired reading.	Dimension	<i>Meter</i> : 180 x 72 x 32 mm (7.1 x 2.8 x 1.3 inch). <i>Torque probe</i> : Round 48 mm Dia. x 160 mm.
Peak hold	To hold the peak value.		
Memory	Maximum & Minimum value.		
Power off	Auto shut off, saves battery life, or manual off by push button.		
Sampling time	Fast/Slow select.	Accessories included	Instruction manual..... 1 PC. 15 Kg torque probe..... 1 PC. Carrying Case..... 1 PC.
Data output	Isolated RS 232 serial output.	Optional accessories	* Software (Windows version, data record & data acquisition)SW-U101-WIN * RS232 cableUPCB-01
Sensor type select	Accept 3 type torque probes (15 Kg-cm, 50 Kg-cm and 100 Kg-cm). Change probe, new calibration are not necessary. 15 Kg-cm probe is the standard accessory, others is optional.		

DISPLAY UNIT/RESOLUTION			
Unit	Max. range	High resolution	High resolution
Kg-cm	15 Kg-cm	0.01 Kg-cm	0.1 Kg-cm
LB-inch	12.99 LB-inch	0.01 LB-inch	0.1 LB-inch
Newton-cm	147.1 Newton-cm	0.1 Newton-cm	1 Newton-cm

Figura I.3 – Especificações técnica do torquímetro estático

I.4 – Agilent

A calibração das temperaturas foi feita pelo sistema de aquisição, modelo 34970A, fabricada pela Agilent/HP, Figura I.4, que possui três módulos com encaixes para placas de aquisição, sendo o conjunto conectado ao computador através de uma porta padrão serial, mesmo após o aterramento da bancada experimental a máxima taxa de aquisição foi de 1 amostra por segundo. Este valor foi considerado adequado para a proposta do experimento, já que a turbina foi operada de tal forma que permanecesse em regime permanente durante a aquisição dos dados experimentais.



Figura I.4 – Sistema de aquisição Agilent 34970A utilizado para a calibração das temperaturas utilizadas na bancada experimental

I.5 - Critério de Rejeição de Chauvenet

O critério de Chauvenet pode ser utilizado no caso em que alguns valores medidos em um experimento extrapolem a tendência dominante. Estes valores podem ser medições erradas, mas não podem ser descartados sem recorrer a este critério para sua eliminação. Considerando uma amostra “ n ” se aplica o critério de Chauvenet calculando o desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão, conforme os valores da Tabela I.5, para assim eliminar os pontos duvidosos.

O critério baseia-se em identificar o maior desvio da amostra, o que implica em calcular o desvio d_i de cada evento em relação à medida $d_i = x_i - x$. O critério de eliminação depende do parâmetro d_{max}/σ , na Equação I.5.

$$\frac{d_i}{\sigma} > \frac{d_{max}}{\sigma} \quad (I.5)$$

Onde d_{max} é o maior desvio e σ o desvio padrão da amostra, experimental ou ainda convencional. Os valores de d_{max}/σ são encontrados na Tabela I.5.

Tabela I.5 - Critério de rejeição de Chauvenet [Fonte: Schneider, 2007]

Número de leituras n	$\frac{d_{max}}{\sigma}$	Número de leituras n	$\frac{d_{max}}{\sigma}$
2	1,15	15	2,13
3	1,38	20	2,24
4	1,54	25	2,33
5	1,65	30	2,39
6	1,73	40	2,49
7	1,80	50	2,57
8	1,86	100	2,81
9	1,93	300	3,14
10	1,96	500	3,29
		1000	3,48