

**Conceção, fabrico e caracterização duma plataforma para teste
pico-hídrico de rodas de água horizontais: caso de estudo dum
protótipo para a Casa da Seda**

Iago de Camargo Dalmarco

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial
Área de especialização de Engenharia Mecânica

Dezembro de 2019

Conceção, fabrico e caracterização duma plataforma para teste pico-hídrico de rodas de água horizontais: caso de estudo dum protótipo para a Casa da Seda

Iago de Camargo Dalmarco

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial
Área de especialização de Engenharia Mecânica

Orientador
Prof. Dr. Luís Miguel Cavaleiro Queijo

Coorientadores
Prof. Dr. Américo Vicente Teixeira Leite
Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima

Dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Aqui consolida-se um ciclo de 10 anos de vida como estudante da grande área da mecânica/engenharia. Desde 2010, com o Curso Técnico em Mecânica, pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), em 2012, o curso do ciclo básico da engenharia na Eng. Química, pela Universidade Regional de Blumenau (FURB) e, dois anos depois, a transferência pela afinidade para a Eng. Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e, desde setembro de 2017 ao presente, o mestrado pelo Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

Pelo contributo para a realização deste trabalho, assim dirijo minha gratidão.

Aos professores orientadores doutores Luís Queijo, Vicente Leite e Luiz Lima, pela autonomia dada para o desenvolvimento do projeto, atenção e partilha de experiências.

Aos colegas Luiz Fernandes, pela indicação da oportunidade a este projeto, Wellington Maidana, Gabriela Ribeiro, pelo auxílio na coleta dos dados experimentais ao longo dos testes, e aos demais colegas do Laboratório de Sistemas Eletromecatrônicos (LSE).

Aos técnicos do Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) Abílio e Jorge, e aos responsáveis do Laboratório de Geotecnia (LG), pela atenção, auxílio e partilha de experiências.

Ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) – pela receção, acolhimento e paciência – e demais servidores. Em parceria ao IPB, à UTFPR – em especial, ao campus Ponta Grossa –, pela oportunidade do intercâmbio no âmbito do programa de dupla diplomação.

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo incondicionais. Além dos familiares, colegas e demais com os quais compartilhou-se as experiências das atividades ao longo desta jornada.

RESUMO

O presente trabalho enquadra-se no contexto da recuperação do património histórico de um antigo moinho movido à roda de água horizontal e do contributo para torná-lo – hoje em dia um museu de divulgação da ciência (A Casa da Seda) – uma casa-modelo autossustentável baseada em fontes renováveis. Desenvolveu-se uma unidade em laboratório, inserida numa plataforma para testes pico-hidroelétricos, à cota do museu (3,5 m) e um protótipo de roda de água horizontal ao diâmetro dado pela largura da galeria que abrigá-la-á (1,2 m). Verificou e validou-se a eficiência do protótipo, aproximadamente 24% conforme ao alcançado pelas rodas clássicas. A análise decorreu de estimativas a partir da análise experimental do caudal volumico, à entrada da roda, e da potência elétrica, à saída do gerador conectado a reóstatos (ajuste manual do ponto ideal de operação). Numa primeira e adicional análise, o gerador também foi ligado à rede através de microinversores fotovoltaicos convencionais. Validou-se o ponto ideal funcionamento da roda para máxima eficiência (velocidade periférica da roda à metade da velocidade dos jatos), entretanto, sem extrair a máxima potência do gerador. Ao fim deste projeto estabelece-se uma unidade para testes de turbinas hidráulicas de ação – bem como da versão definitiva da roda a ser instalada na Casa da Seda. Sugerem-se futuras abordagens avaliando-se jatos de menor diâmetro, conexões à rede que extraíam maior potência e um sistema ajustável de multiplicação da velocidade da roda para o gerador elétrico.

Palavras-chave: Projeto mecânico. Roda de água horizontal. Sistemas pico-hídricos.

ABSTRACT

This work is established in the restoration of the historical heritage of an old mill based on a horizontal waterwheel and the contribution to make it – nowadays a museum for the dissemination of science (The Silk House) – a self-sustainable model house based on renewable sources. A laboratory unit, of a platform for pico-hydroelectric testing, at the museum's head (3,5 m), and a horizontal waterwheel prototype, at the diameter given by the width of the gallery that will house it (1,2 m), were built. The efficiency of the prototype was verified and validated, approximately 24% according to that achieved by the classical wheels. The analysis was based on estimates from the experimental analysis of the volume flow, the wheel input, and the electric power, on the generator connected to rheostats (manual adjustment for the ideal operating point). In a first and additional analysis, the generator was also connected to the grid by conventional photovoltaic micro inverters. The ideal wheel operating point has been validated for maximum efficiency (peripheral wheel speed at half jet speed), however, without extracting maximum generator power. At the end of this project is established a unit for testing hydraulic action turbines – as well as the definitive version of the wheel to be installed at the Silk House. Future approaches are suggested by evaluating smaller diameter jets, connections that extract more power and an adjustable wheel speed multiplication system for the generator.

Keywords: Mechanical design. Horizontal waterwheel. Pico-hydro systems.

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1-1 – Processo genérico de transformação da energia	1
Fig. 1-2 – A Casa da Seda e o rio Ferverça	3
Fig. 1-3 – A Casa da Seda: interior	3
Fig. 1-4 – Âmbito para instalação da plataforma	4
Fig. 2-1 – Exemplos – máquinas de deslocamento positivo: bombas.....	7
Fig. 2-2 – Exemplo: rodas de água verticais	10
Fig. 2-3 – Exemplo: roda de água horizontal	10
Fig. 3-1 – Esboço: tanque.....	14
Fig. 3-2 – Esboço inicial: estrutura de suporte da roda.....	14
Fig. 3-3 – Esboço inicial: protótipo.....	15
Fig. 3-4 – Esboço em CAD: estrutura de suporte e protótipo	17
Fig. 3-5 – Desenho em 3D: estrutura de suporte e protótipo	17
Fig. 3-6 – Montagem do conjunto	18
Fig. 3-7 – Protótipo de roda de água horizontal.....	19
Fig. 3-8 – Reservatório superior.....	20
Fig. 3-9 – Exemplo: componentes para o acoplamento tubo ao tanque.....	20
Fig. 3-10 – Reservatório superior: fixação interna dos tubos de descarga.....	20
Fig. 3-11 – Plataforma: estrutura básica.....	21
Fig. 3-12 – Protótipo: versão atual	21
Fig. 3-13 – Solução para suporte do gerador e multiplicação de velocidade.....	23
Fig. 3-14 – Sistema para o ajuste do jato ao longo do raio da roda	24
Fig. 3-15 – Sistema para o ajuste dos braços de suporte e dos jatos.....	24
Fig. 3-16 – Sistema para içamento da roda	25
Fig. 3-17 – Plataforma: versão atual	26
Fig. 4-1 – Cadeia de transformação da energia disponível até seu uso final	27
Fig. 4-2 – Análise bidimensional do escoamento sobre uma pá curva	28
Fig. 4-3 – Reservatório superior.....	30
Fig. 4-4 – Sistema de bombagem	31
Fig. 4-5 – Válvulas das linhas de descarga	31
Fig. 4-6 – Linhas de descarga a deixar o reservatório superior.....	35
Fig. 4-7 – Diagrama de Moody	36
Fig. 4-8 – Diagrama de Moody: obtenção do fator de atrito.....	37
Fig. 4-9 – Gráfico de perda do tubo: obtenção da perda de carga por atrito.....	38
Fig. 4-10 – Reservatório superior: comprimento das reentrâncias.....	39
Fig. 4-11 – Triângulo de velocidades sobre a pá do protótipo.....	42
Fig. 4-12 – Equipamentos para análise do aproveitamento elétrico	44
Fig. 4-13 – Eficiência vs. velocidade específica para diferentes perfis de rotor.....	45
Fig. 4-14 – Plataforma: cadeia de transformação da energia	47
Fig. 4-15 – Resultado: eficiência da roda vs. velocidade específica de rotação	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tab. 3-1 – Requisitos: plataforma	11
Tab. 3-2 – Matriz morfológica: plataforma.....	12
Tab. 3-3 – Matriz morfológica: estrutura de suporte	14
Tab. 3-4 – Matriz morfológica: protótipo	16
Tab. 3-5 – Processos de fabrico utilizados: estrutura de suporte	17
Tab. 3-6 – Matriz morfológica: gerador e estrutura de suporte	18
Tab. 3-7 – Processos de fabrico utilizados: protótipo	18
Tab. 3-8 – Modificação: aumento do número de pás.....	21
Tab. 3-9 – Modificação: sistema de multiplicação de velocidade	22
Tab. 3-10 – Modificações: suporte dos jatos.....	23
Tab. 3-11 – Modificação: sistema para içamento da roda.....	24
Tab. 4-1 – Valores iniciais adotados para os cálculos.....	29
Tab. 4-2 – Resultados: caudal volúmico	31
Tab. 4-3 – Resultados: velocidade de descarga.....	33
Tab. 4-4 – Resultados: comprimento das linhas de descarga.....	35
Tab. 4-5 – Resultados: cotas e perda de carga total	39
Tab. 4-6 – Resultados: potência e eficiência hidráulica.....	40
Tab. 4-7 – Resultado: relação de transmissão	44
Tab. 4-8 – Faixas de velocidade específica para várias máquinas hidráulicas	46
Tab. 4-9 – Caracterização do gerador em vazio.....	46
Tab. 4-10 – Resultado: estimativa da eficiência do sistema de transmissão.....	48
Tab. 4-11 – Estimativas para a eficiência do gerador	49
Tab. 4-12 – Resultados: protótipo e à sua saída	50

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

Abreviaturas

Aprox.	aproximadamente
a.C.	antes de Cristo
Det.	detalhe
Diâm.	diâmetro
Elétr.	elétrica(o)
Eq(s).	equação(ões)
e.g.	<i>exempli gratia</i> (por exemplo)
Fig.	figura
i.e.	<i>id est</i> (em outras palavras)
nº.	número
Pos.	posição
Qde.	quantidade
S.l.	<i>sine loco</i> – local da obra não encontrado
Séc.	século
Símb.	símbolo
s.n.	<i>sine nomine</i> – obra sem editor(a) encontrado(a)
Tab.	tabela
Unid.	unidade
vs.	<i>versus</i> (contra, frente ou em função)

Siglas

AC	<i>alternated current</i> (corrente alternada)
CAD	<i>computer aided design</i> (desenho auxiliado/assistido por computador)
DC	<i>direct current</i> (corrente contínua)
ESTiG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
GDL	graus de liberdade
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
LSE	Laboratório de Sistemas Eletromecatrónicos
LTM	Laboratório de Tecnologia Mecânica
SC	superfície de controlo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VC	volume de controlo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da secção transversal	γ	peso específico
D, d	diâmetro	δ	variação
e	espessura	ε	rugosidade
F	força	η	eficiência energética
f	fator de atrito	θ	ângulo de inclinação da pá
g	aceleração da gravidade	μ	média
H	perda de carga total	ρ	densidade do fluido
h	cota útil	σ	desvio padrão
I	corrente elétrica	Σ	somatório
k	fator de atrito	ν	viscosidade cinemática
l	comprimento	ϕ	ângulo de fase;
$\dot{m}$	caudal mássico		taxa de velocidade
N	número	ω	velocidade angular em rad/s
n	velocidade angular em rpm	Subscritos	
P	potência	A	ponto na superfície do fluido no reservatório superior
p	pressão	B	ponto de descarga
Q	caudal volúmico	disp	disponível
R	força de reação	e	elétrica
	resistência elétrica	ext	externo
r	raio	extr	extraída
Re	número de Reynolds	f	<i>friction</i> (atrito)
T	binário	g	global
t	tempo;	ger	gerador
	relação de transmissão;	h	hidráulica
U	velocidade periférica;	i	<i>in</i> (à entrada)
	tensão elétrica;	int	interno
u	incerteza relativa	m	mecânica;
V	velocidade média		<i>minor</i> (menor)
v	volume	máx	máximo(a)
W	velocidade relativa	méd	médio(a)
z	posição vertical	o	<i>out</i> (à saída)
Δz	cota disponível	p	primitivo;
Letras gregas			polos
α	ângulo de inclinação do jato;	r	reativa(o)
	fator de correção para fluxos não uniformes	t	transmissão

ÍNDICE

	AGRADECIMENTOS	v
	RESUMO	vii
	ABSTRACT.....	ix
	ÍNDICE DE FIGURAS	xi
	ÍNDICE DE TABELAS.....	xiii
	LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS.....	xv
	LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO	2
1.2	DESAFIOS E OBJETIVOS	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	5
2	REVISÃO TEÓRICA	7
2.1	MÁQUINAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO.....	7
2.2	MÁQUINAS DE FLUXO OU TURBOMÁQUINAS	8
2.2.1	Estrutura básica.....	8
2.2.2	Classificação	8
2.2.3	Rodas de água	9
3	CONCEÇÃO E FABRICO DA PLATAFORMA E DA RODA	11
3.1	CONCEÇÃO	11
3.1.1	Requisitos para o projeto	11
3.1.2	Matriz morfológica	12
3.1.2.1	Estrutura de suporte da roda	13
3.1.2.2	Roda de água protótipo	15
3.1.3	Pré-projeto conceitual do conjunto em CAD	16
3.2	FABRICO	17
3.2.1	Estrutura de suporte.....	17
3.2.2	Protótipo	18
3.2.3	Plataforma: estrutura básica	19
3.2.4	Modificações	21
3.2.4.1	Aumento do número de pás da roda	21
3.2.4.2	Sistema de multiplicação de velocidade	22
3.2.4.3	Sistema de suporte dos jatos	23
3.2.4.4	Sistema para içamento da roda	24
3.2.5	Plataforma: versão atual.....	25
4	CARACTERIZAÇÃO DA PLATAFORMA E DA RODA.....	27
4.1	ENERGIA DISPONÍVEL	29
4.1.1	Caudal volúmico (Q).....	30
4.1.2	Velocidade média do escoamento (V)	32
4.1.2.1	Determinação de V a partir de Q	32
4.1.2.2	Determinação de V a partir da equação de Bernoulli	32
4.1.2.3	Velocidade máxima do escoamento ($V_{máx}$)	33
4.1.3	Cota útil (h) e perda de carga total (H).....	34
4.1.3.1	Perda de carga por atrito, distribuída ou maior (h_f)	34
4.1.3.1.1	Comprimento das linhas de descarga (L).....	35
4.1.3.1.2	Determinação de f a partir do diagrama de Moody.....	36
4.1.3.1.3	Determinação de f a partir do gráfico de perda do fabricante do tubo	37

4.1.3.2	Perda de carga localizada ou menor (h_m).....	38
4.2	ENERGIA EXTRAÍDA	40
4.2.1	Binário da roda (T).....	40
4.2.1.1	Distância radial de descarga (r ou D)	40
4.2.1.2	Força da roda (F)	41
4.2.2	Velocidades da roda.....	43
4.2.2.1	Velocidade angular da roda (ω e n)	43
4.2.2.2	Velocidade tangencial da roda (U)	44
4.2.2.3	Taxa de velocidade (ϕ)	44
4.2.2.4	Velocidade específica da roda (n_s).....	45
4.2.2.5	Velocidade angular do gerador (n_{ger}).....	46
4.2.3	Potência (P) e eficiência (η_r) da roda	47
4.2.4	Potência (P_t) e eficiência (η_t) de transmissão.....	48
4.2.5	Potência (P_{ger}) e eficiência (η_{ger}) do gerador elétrico	48
4.3	RESULTADOS E ANÁLISE.....	50
5	CONCLUSÃO.....	53
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.2	TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS.....	56
	APÊNDICE A – Desenhos técnicos	59
	ANEXO A – Intervenção para pico-hídrica na Casa da Seda.....	78
	ANEXO B – Tubo e válvula.....	80
	ANEXO C – Reservatório	84
	ANEXO D – Chumaceira.....	87
	ANEXO E – Correia e polias	92
	ANEXO F – Gerador elétrico	95
	ANEXO G – Microinversores fotovoltaicos	97

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a energia disponível (Fig. 1-1) para a produção de trabalho mecânico era obtida a partir de fontes como do fluxo dos rios, riachos, quedas de água e do represamento dos mesmos. O aproveitamento (Fig. 1-1) dava-se para fins diversos: acionamento de serrações, de foles para fornos, moagem de cereais, artesanato, entre outras aplicações. A máquina adotada para o processo de transformação da energia hidráulica, disponível na natureza, em energia mecânica – posteriormente transformada em outras formas para uso final – foi a roda de água.

Como se pôde ver, o aproveitamento energético dos cursos de água dava-se para aplicações simples. Uma vez atendida a tarefa, i.e., extraída a energia necessária – seja para a moagem de cereais ou na insuflação de ar nos fornos, e.g. – muito mais não interessava. Embora pouco ponderado nos primórdios, um parâmetro intrínseco no processo de transformação da energia hidráulica em mecânica é a eficiência da máquina/dispositivo associado (Fig. 1-1).

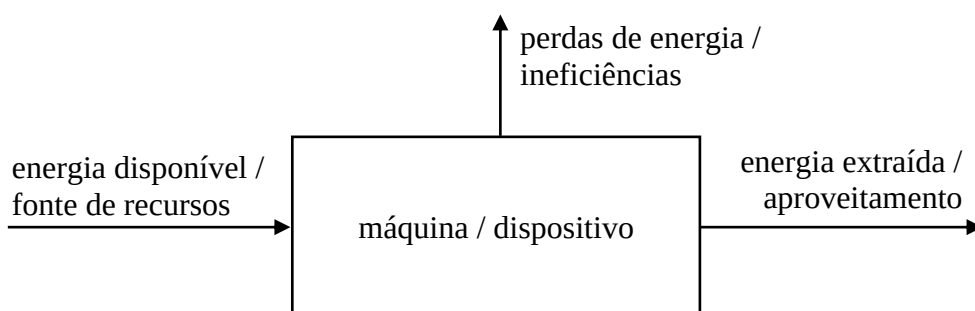


Fig. 1-1 – Processo genérico de transformação da energia

Com o advento da eletricidade, além da extração de trabalho mecânico, surge a possibilidade de se acoplar um gerador elétrico à máquina hidráulica, logo, o uso final da energia passa a se limitar ao desenvolvimento de novas tecnologias pela humanidade. A evolução desta máquina deu-se na forma das modernas turbinas hidráulicas. Neste contexto, surge também a necessidade de se conhecer a eficiência (ou rendimento) de tais máquinas, a fim de se avaliar as perdas de energia e ao se objetivar a maximização da performance. Tais questões estão intimamente relacionadas às esferas, entre outras, econômica e ambiental.

Dado um cenário de apelo às questões ambientais, energéticas e econômicas – i.e. desenvolvimento sustentável (sem o comprometimento das gerações futuras) –, cresce o interesse nas fontes renováveis de energia (e.g., solar, eólica, hidráulica e etc.). Assim sendo, no que toca a extração do máximo possível a partir da fonte de energia disponível, tal facto estimula a exploração de novas soluções tecnológicas, logo, o conhecimento da eficiência das máquinas/dispositivos responsáveis pela transformação em energia para o uso final desejado.

1.1 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento tecnológico atual – designadamente no âmbito da microgeração baseada em fontes renováveis de energia – e o devido apoio governamental permitirão conceber novas soluções energéticas inteligentes em aplicações de pequena dimensão. A disseminação dos sistemas de microgeração, mesmo que de baixa potência, deverá contribuir para a sustentabilidade a nível global, especialmente no setor residencial – microrredes são soluções modernas e constituem uma versão em pequena escala da rede elétrica convencional, integrando produção, distribuição, armazenamento e gestão da energia elétrica (DA SILVA, 2017).

A exploração da energia hídrica de pequena escala é uma alternativa às localidades de acesso restrito à rede pública de energia. Pequenos cursos de água ou represamentos/diques que apresentem uma potência disponível de até 5 kW enquadram-se num aproveitamento pico-hídrico (PAISH, 2002). No que toca o apoio governamental, o governo Português publicou o Decreto-Lei N.º 49/2015 (DIÁRIO DA REPÚBLICA, 2015) – o qual estabelece um regime especial para a adaptação de moinhos, azenhas ou outras infraestruturas hidráulicas equivalentes para produção de energia hidroelétrica, nomeadamente para autoconsumo.

A Casa da Seda

A Casa da Seda (Fig. 1-2) está localizada numa zona junto ao rio Fervença, onde se costumava tingir sedas no Séc. XVIII. Nos Séc. XIX e XX, funcionou como um moinho operado por uma roda de água horizontal. No final do Séc. XX, foi explorado para a fabricação de pães e biscoitos regionais, e até mesmo funcionou como taberna. Em 1990 foi comprada pelo Município de Bragança, o qual a recuperou em 2006, no âmbito de um programa de requalificação da zona ribeirinha. Atualmente é um museu para divulgação da ciência.

O museu, integrado ao Centro Ciência Viva, conta com recursos interativos aos visitantes para permitir a exposição da história da fabricação da seda. Neste contexto, encontra-se o Projeto *SilkHouse* (DA SILVA, 2017; DA SILVA et al., 2017). O mesmo, em processo de consolidação, fará da Casa da Seda um edifício-modelo com uma microrrede inteligente baseada em fontes de energia renováveis, nomeadamente pico-hídrica e fotovoltaica.

O rio Fervença, represado em um dique adjacente à Casa da Seda (Fig. 1-2), mostra-se um recurso potencial no que toca a exploração da energia hídrica de pequena escala.



Fig. 1-2 – A Casa da Seda e o rio Fervença
Fonte: Da Silva (2017).

A Casa da Seda é um pequeno edifício onde contrastam-se em alguns modernidade e parte da infraestrutura do antigo moinho – podem se destacar: um auditório (Fig. 1-3a) com parte do pavimento em vidro e uma galeria logo abaixo (Fig. 1-3b), um espaço devoluto e propício para a instalação de uma nova e moderna roda de água horizontal.



Fig. 1-3 – A Casa da Seda: interior
a) auditório com parte do pavimento em vidro; b) galeria para abrigar uma nova roda de água.
Fonte: Da Silva (2017).

1.2 DESAFIOS E OBJETIVOS

Uma nova roda de água na Casa da Seda representa a recuperação do património histórico do antigo moinho e tratar-se-á de um atrativo adicional aos visitantes. No contexto pico-hídrico, juntamente a outra turbina, completarão a gama de fontes energéticas da microrrede, notadamente nos períodos de indisponibilidade solar para o sistema fotovoltaico.

O interesse em avaliar os desafios, antes mesmo do desenvolvimento da versão definitiva duma nova roda de água horizontal para a Casa da Seda, leva à proposta de concepção e fabrico de um modelo em escala real para testes em âmbito laboratorial e, consequentemente, de uma plataforma para a realização dos mesmos. Adicionalmente, acabar-se-á por dotar a comunidade académica de uma estrutura em ambiente laboratorial que possibilite a realização de demais estudos em âmbito multidisciplinar, nomeadamente da mecânica e eletrotecnia.

Em suma, no tocante à continuidade do contexto principal da Casa da Seda, do estudo das fontes renováveis de energia e sua multidisciplinaridade, tais questões mostram-se presentes aquando do seu desmembramento em projetos subsequentes. Destacam-se os já citados trabalhos (DA SILVA, 2017; DA SILVA et al., 2017) e Da Rocha (2017) – projeto precursor para o estabelecimento da plataforma para testes de unidades pico-hídricas (Fig. 1-4).



Fig. 1-4 – Âmbito para instalação da plataforma
Fonte: Da Rocha (2017).

Tendo em vista a necessidade de se avaliar os desafios construtivos e o desempenho para a roda definitiva, a nível de produção de eletricidade e valendo-se das condições impostas pela Casa da Seda (i.e., cota disponível e espaço físico para abrigar a nova roda), tem-se como desafio no presente relatório: a conceção, fabrico e caracterização dum modelo de roda de água horizontal para a Casa da Seda e duma plataforma para testes do aproveitamento pico-hídrico.

O presente documento visa relatar o processo de conceção e fabrico duma plataforma para testes de rodas de água horizontais, bem como dum modelo preliminar de roda, para produção de eletricidade – de modo que roda e plataforma sejam caracterizados.

Definido o objetivo geral, para o seu alcance, definem-se os objetivos específicos:

- a) reconhecer os tipos de roda de água e as variáveis associadas ao seu funcionamento;
- b) apresentar o processo, seus desafios e soluções encontrados na conceção e fabrico da plataforma e do modelo preliminar de roda de água;
- c) enumerar as equações fundamentais relacionadas com o funcionamento das rodas de água e da plataforma, de modo a auxiliar no processo de caracterização.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O capítulo 1 apresenta o tema principal, acerca da transformação da energia hídrica através de máquinas de fluxo para um uso final, a questão do desempenho/eficiência destas máquinas e da importância ganha por este parâmetro no contexto da sustentabilidade em diferentes esferas. O tema é delimitado à microgeração a partir de fontes renováveis.

Ainda no primeiro capítulo, a motivação vem pelas questões de sustentabilidade, apoio governamental para a adaptabilidade de sítios de aproveitamento hídrico agora para geração de energia elétrica – onde se enquadra a Casa da Seda. Tais motivantes, adicionalmente ao propósito didático da experimentação, norteiam o desafio encontrado e justificam a sua escolha. Assim sendo, é possível a definição dos objetivos geral e, para o seu alcance, dos específicos.

No capítulo 2, a partir da bibliografia existente, apresentam-se conceitos e generalidades correlatos às máquinas hidráulicas, tais quais as rodas de água horizontais.

No capítulo 3 relata-se o processo, desafios e soluções encontrados na concepção e fabrico da plataforma para testes e do modelo preliminar (ou protótipo) de roda. Uma vez obtidas as estruturas, são dirigidos os testes para avaliação do seu funcionamento.

No capítulo 4, de modo a prever o desempenho do modelo de roda de água construído e a ser testado, enumeram-se as equações fundamentais associadas ao seu funcionamento. A definição de tais expressões, a identificação e a devida explanação das variáveis associadas procedem-se ao passo em que se desmembra a equação básica da eficiência energética.

Ainda no quarto capítulo, a solução das variáveis desconhecidas vem à medida em que os termos literais são substituídos pelos valores numéricos. Tais valores podem ser adotados, dados pelo caso em estudo da Casa da Seda ou experimentais (obtidos após os testes). Com as estruturas caracterizadas, faz-se uma análise comparativa a partir das informações da literatura.

No capítulo 5 tecem-se as conclusões. As questões analisadas e apreendidas são revistas. Os resultados obtidos da caracterização do modelo preliminar e de plataforma são lembrados. Além de melhorias, novas abordagens são sugeridas, seja na continuidade do projeto da Casa da Seda ou para novas pesquisas que venham a fazer uso da plataforma.

2 REVISÃO TEÓRICA

As rodas de água, na condição de máquinas que se utilizam da água (fluido) como meio de funcionamento (trabalho), podem ser chamadas de máquinas de fluido (BRAN; DE SOUZA, 1980). Máquina de fluido é o equipamento que promove a troca de energia entre um sistema mecânico e um fluido, o qual transforma energia mecânica em energia de fluido ou vice-versa (HENN, 2006) – dividem-se em (BRAN; DE SOUZA, 1980; HENN, 2006):

- a) máquinas de deslocamento positivo;
- b) máquinas de fluxo (ou turbomáquinas).

Em cada grupo descrito, as máquinas distinguem-se pela compressibilidade (variação da densidade com a pressão) do fluido de trabalho (MURTY, 2018).

- a) incompressível: estado líquido e gasoso (quando considerado incompressível) – máquinas hidráulicas, turbinas eólicas, ventiladores;
- b) compressível – estado gasoso – máquinas térmicas, compressores, sopradores.

2.1 MÁQUINAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO

Uma quantidade fixa de fluido de trabalho é confinada durante a sua passagem através da máquina e submetido a trocas de pressão em razão da variação no volume do recipiente em que se encontra contido. Embora não pertençam ao escopo do presente, exemplificam-se:

- a) motores a vapor;
- b) motores de combustão interna: ciclos Otto, Diesel e etc.
- c) compressores de pistão;
- d) bombas (Fig. 2-1):

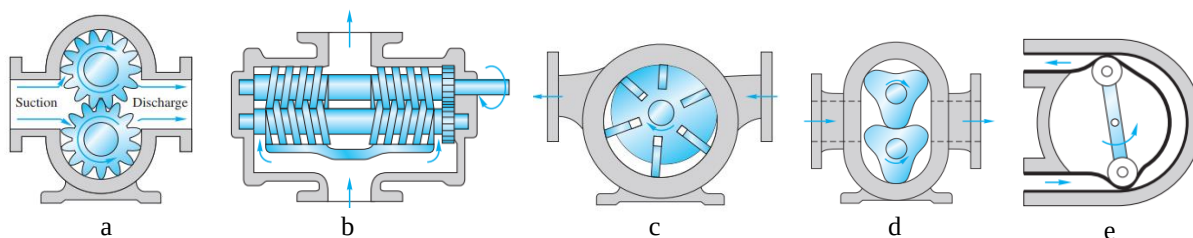


Fig. 2-1 – Exemplos – máquinas de deslocamento positivo: bombas
a) de engrenagens; (b) de parafuso; c) de palhetas; d) de lóbulos; e) peristálticas.
Fonte: White (2016).

Suas aplicações, frente às máquinas de fluxo (BRAN; DE SOUZA, 1980):

- a) predominantemente para altas pressões de trabalho;
- b) apresentam dispositivos (pistões, válvulas) com movimento alternativo;
- c) caudal intermitente, na maior parte dos casos.

2.2 MÁQUINAS DE FLUXO OU TURBOMÁQUINAS

Já nas máquinas de fluxo, ou turbomáquinas, o fluido não se encontra em momento algum confinado e sim num fluxo contínuo através da máquina, submetido a trocas de energia pelos efeitos dinâmicos. Frente àquelas de deslocamento positivo (BRAN; DE SOUZA, 1980):

- a) atingem altas velocidade e com uma construção simples, logo, pequenas dimensões e pouco peso – logo, elevada concentração de potência (potência específica);
- b) ausência de dispositivos de movimentos oscilatórios/alternativos;
- c) menor quantia de lubrificante, logo, menor custo de funcionamento/manutenção.

2.2.1 Estrutura básica

Os elementos construtivos fundamentais das máquinas de fluxo são aqueles onde ocorrem os fenômenos fluidodinâmicos essenciais para o funcionamento destas (HENN, 2006):

- a) rotor: onde ocorre a transformação da energia. É constituído por pás giratórias que dividem o espaço ocupado em canais, por onde circula o fluido. Sua existência é imprescindível para a caracterização duma máquina de fluxo;
- b) sistema diretor: onde há a coleta e o direcionamento do fluido para um caminho determinado. Em alguns tipos de máquinas não se faz presente (ventiladores axiais de uso doméstico, e.g.). Adicionalmente, pode fazer a transformação da energia:
 - numa bomba centrífuga, na forma dum difusor à sua saída, transforma parte da energia de velocidade do líquido em energia de pressão;
 - numa turbina hidráulica tipo Pelton, na forma dum injetor, transforma energia de pressão em energia de velocidade – fornecida ao rotor através de jatos convenientemente orientados.

2.2.2 Classificação

Vide Henn (2006), as máquinas de fluxo classificam-se entre três diferentes critérios:

- a) direção da conversão de energia, com as máquinas de fluxo:

- motoras: transformam energia de fluido em trabalho mecânico, onde a energia do fluido diminui na sua passagem pela máquina – tem-se aqui as turbinas.
- geradoras: recebem trabalho mecânico e o transformam em energia de fluido, onde a energia do fluido aumenta. Wilson e Korakianitis (2014) destacam que não há um termo abrangente para aquelas turbomáquinas absorvedoras de energia – tem-se aqui: as bombas (para líquidos); ventiladores/sopradores (fluido no estado gasoso e, geralmente, há um baixo incremento de pressão ao gás o qual considerado, na maioria dos casos, incompressível); compressores (pressurizam o gás, resultando num significativo incremento na sua densidade).

b) forma dos canais entre as pás do rotor, com as máquinas de fluxo de:

- ação (impulsão ou impacto): os canais do rotor constituem simples desviadores de fluxo, sem aumento ou diminuição da pressão do fluido que o atravessa;
- reação (ou sucção): os canais são constituídos pelas pás do rotor (em alguns casos móveis). Os canais têm a forma de injetores (ou bocais) nas turbinas e de difusores nas bombas e ventiladores. A pressão do fluido, que passa através do rotor, diminui nos injetores e aumenta nos difusores;

c) trajetória do fluido no rotor, com as máquinas de fluxo:

- axiais: a direção do escoamento é paralela ao veio do rotor (direção axial);
- radiais: o escoamento do fluido através do rotor percorre uma trajetória predominantemente perpendicular ao veio do rotor (direção radial) – e.g.;
- de fluxo misto: o escoamento assume um perfil aproximadamente cônico;
- tangenciais: fluido incide tangencialmente sobre o rotor.

2.2.3 Rodas de água

Frente ao apresentado, as rodas de água podem ser classificadas como:

- a) máquinas de fluido – por utilizarem um fluido como meio de trabalho;
- b) máquinas de fluxo ou turbomáquinas – pelo fluxo contínuo através da máquina;
- c) máquinas hidráulicas – pelo escoamento incompressível;
- d) motoras – transformam a energia do movimento do fluido em energia mecânica;
- e) de ação – a roda se movimenta pelo impacto do fluido sobre suas pás;
- f) tangenciais: o fluxo atinge as pás tangencialmente.

Os primeiros registos do uso de rodas de água – horizontais, na forma dum rotor com pás – datam 70 a.C., com os Romanos e Chineses, para a moagem de grãos (MURTY, 2018).

A força motriz do fluxo sobre as máquinas motoras vem duma diferença de altura, que caracteriza a energia potencial gravitacional. Esta última desencadeia o fluxo (ou fluido em movimento) – e.g., caudal de um rio, escoamento através duma turbina e etc. O fluxo encontra as pás da turbina hidráulica e estas, por sua vez, são conectadas a um veio de onde se pode obter energia na forma de trabalho mecânico, ou elétrica quando o veio é acoplado a um gerador.

As rodas de água variam de tipologia consoante as características do curso de água em que são aplicadas e distinguem-se primeiramente quanto à orientação do seu plano de rotação:

a) vertical (Fig. 2-2) – classificadas quanto ao ponto de impacto do fluxo sobre as pás:

- superiores (a) (rodas de copos ou de queda): caudais reduzidos;
- médias (b): caudais intermédios e cotas variáveis ao longo da altura da roda;
- inferiores (c): cotas mínimas, logo, demanda caudais maiores.

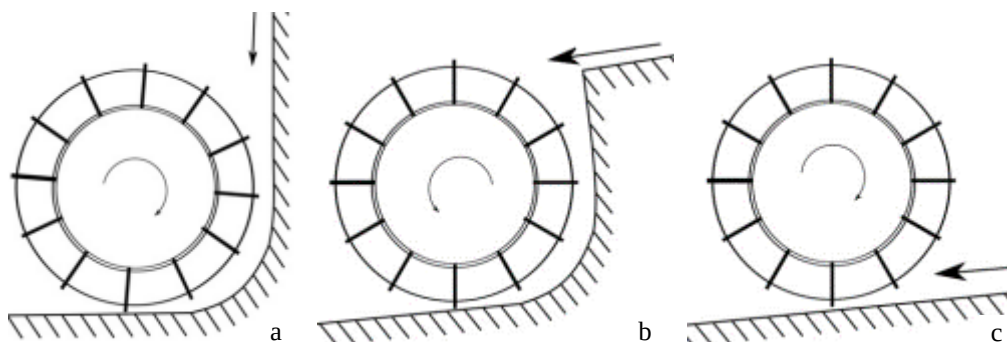


Fig. 2-2 – Exemplo: rodas de água verticais
a) superior; b) média; c) inferior.

Fonte: Pujol, T. e Montoro, L. (2010).

b) horizontal (Fig. 2-3): pioneiras nas azenhas, adotada pela facilidade de transmissão da potência (i.e., poucos mecanismos), assim, baixo custo de construção. Nas rodas clássicas, a eficiência não supera 24% (PUJOL et al., 2015).

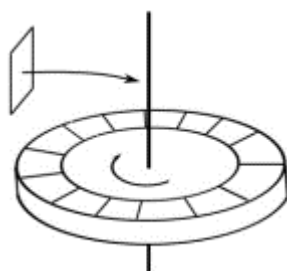


Fig. 2-3 – Exemplo: roda de água horizontal
Fonte: Pujol, T. e Montoro, L. (2010).

3 CONCEÇÃO E FABRICO DA PLATAFORMA E DA RODA

Neste capítulo relata-se o processo de concepção, fabrico e montagem da plataforma para testes e da roda de água, de modo que sejam dirigidos os testes para a caracterização de ambas as estruturas. Também, relatam-se os desafios e as soluções adotadas para contorná-los.

3.1 CONCEÇÃO

Para se estar apto para iniciar um desenvolvimento é necessária a identificação de um problema, em qualquer nível – seja no âmbito interno da indústria (um equipamento novo ou uma melhoria) ou diretamente com o cliente (um produto final) (MOTTA, 2010). Conforme exposto na seção introdutória deste relatório, foi identificado o desafio principal. No caso, conceber e fabricar um modelo preliminar de roda de água horizontal e a construção também de uma plataforma para, ao decorrerem os testes, emular as condições da Casa da Seda.

Ao enquadrar o projeto numa linha de execução, este trata-se duma criação, para atender a necessidade de se avaliar os desafios construtivos duma roda de água horizontal. Não se trata duma cópia e nem mesmo de uma inovação, pois rodas de água horizontais já existem.

Em todo desenvolvimento há um processo de informação, definição dos requisitos, criação dos conceitos do produto, avaliação das necessidades e decisão para o projeto definitivo (PAHL et al., 2007). Todavia, uma determinada metodologia acabou por não ser adotada desde princípio. Embora ocorram intrinsecamente, identificam e destacam-se algumas etapas.

3.1.1 Requisitos para o projeto

Uma vez inserido no contexto do projeto/desafio principal e enquadrada a sua linha de execução, decorreram-se alguns encontros e discussões com os orientadores. Assim sendo, foram verificados pontos de interesse, condições de trabalho e requisitos para o projeto:

Tab. 3-1 – Requisitos: plataforma

Requisito	Observações
Local para instalação da plataforma	
Laboratório de Geotecnia (LG), ESTiG, IPB	No local já se encontravam a estrutura desenvolvida por Da Rocha (2017) e o tanque para receber a água dos testes para diferentes unidades pico-hídricas (Fig. 1-4);
Local e recursos para fabrico	
Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM),	- Localizado na mesma escola - Encomendas quando necessário e junto a fornecedores
Cota disponível (Δz) a ser emulada	
3,5 m	- Trata-se da diferença de altura entre o nível de água do reservatório superior da plataforma e o ponto de descarga da água - Deve emular a cota disponível na Casa da Seda, vide proposta de intervenção (Anexo A)

Requisito	Observações
Diâmetro máximo da roda ($D_{m\acute{a}x}$)	
1,2 m entre as pontas das pás	Em função do espaço físico da galeria da Casa da Seda destinada a receber a roda definitiva
Circuito de descarga	
Anexo A	Na Casa da Seda pretende-se instalar uma tubagem de admissão da água do rio Fervença com um diâmetro interno de 200 mm e, alguns metros a jusante no circuito, uma derivação em 4 tubos menores e idênticos, logo, 50 mm – para formarem 4 pontos de ataque sobre a roda, dispostos em 90° uns dos outros
Diâmetro interno (d_{tubo}): 53 mm	Pela disponibilidade junto ao fornecedor, o mais próximo de 50 mm
Anexo B	Informações técnicas do tubo utilizado
Gerador elétrico	
300 W e operação a 300 rpm	- Já se encontrava disponível - Cedido para os primeiros testes - Informações técnicas vide Anexo F

3.1.2 Matriz morfológica

A morfologia do projeto é o estudo da estrutura do produto (conjuntos e componentes) (Tab. 3-2), para satisfação de necessidades e/ou solução de problemas técnicos. Cada item deve ser analisado e selecionado conforme critérios pré-determinados (MOTTA, 2010).

Tab. 3-2 – Matriz morfológica: plataforma

Função	Posição	Características/Origem
Estrutura de suporte		
Manter a roda no interior do tanque e a uma dada distância da superfície da água, para a livre rotação da roda durante os testes	Assente sobre o tanque	O seu processo de conceção é objetivo do presente trabalho
Protótipo		
Transformar energia hidráulica em mecânica (trabalho de veio)	- Acoplada a um veio - Girar livremente no interior do tanque	O seu processo de conceção é objetivo do presente trabalho
Reservatório superior		
Manter o nível de água à dada altura	Assente sobre uma estrutura para o seu de suporte e elevação	- Típico contentor para produtos de limpeza/químicos em geral - Reaproveitamento de um contentor pré-existente para outra finalidade - Informações técnicas vide Anexo C
Estrutura de suporte do reservatório superior		
Elevação e suporte do reservatório superior	Assente sobre a pequena construção no LG (Detalhe A, Fig. 3 1)	- Estrutura metálica, para cargas da ordem de 1 m³ de água do reservatório superior - Concebido em projeto paralelo

Função	Posição	Características/Origem
Circuito de bombagem		
Enviar água do reservatório inferior para o reservatório superior	Uma bomba centrífuga, conectada ao reservatório inferior (tanque), é conectada via tubagens para a descarga no reservatório superior	- Professores e académicos da eletrotecnia: bomba, sistema eletroeletrónico de controlo e de alimentação - Empresa terceirizada: tubagem para conexão do tanque inferior à bomba centrífuga e desta para a descarga no reservatório superior, bem como demais componentes hidráulicos deste circuito - Observação: um nível mínimo de água no interior do tanque serve para manter a bomba com água no seu interior, de modo que a bomba trabalhe “afogada”
Circuito de descarga		
Conduzir água do reservatório superior, a regressar por gravidade, até os pontos de descarga sobre a roda	- Extremidade superior: conectada ao reservatório superior - Extremidade inferior: posicionadas para a descarga sobre a roda através de suportes fixados na estrutura de suporte da roda	- Tubagem: tubo flexível em PVC (Anexo B) - Controlo do fluxo de saída: válvulas do tipo de esfera em PVC (Anexo B) - Aquisição dos materiais: junto à fornecedores - Montagem e adaptações: académico e auxiliar do IPB

Findadas as primeiras diligências, deu-se procedência na conceção da estrutura para suporte dos modelos a serem testados e do modelo preliminar (ou protótipo) de roda de água.

3.1.2.1 Estrutura de suporte da roda

Iniciou-se pela retirada das medidas necessárias – através dum esboço do tanque (Fig. 3-1). Um esboço fornece uma noção/ideia principal dos modelos de conceção da estrutura. O esboço vem duma pesquisa técnica das variáveis dos elementos de máquina/estruturais, principais medidas e informações que influenciam no projeto (PAHL et al., 2007).

Função	Posição	Características/Origem
Esforço axial/peso da roda	Fixada sobre o perfil em U	- Adquiridas
Esforço radial/oscilação horizontal da roda	Fixada no suporte inferior, abaixo do perfil em U	- Catálogo: Anexo D
Suporte inferior		
- Suporte à chumaceira 2 - Em “V”, para a travagem da oscilação horizontal do veio	Abaixo e travados ao perfil central	Chapas dobradas
Veio		
Transmitir a potência mecânica da roda para o gerador	- Na vertical - Apoia-se, através de um ressalto no seu diâmetro principal, sobre a chumaceira 1	- Extremidade superior: acopla-se ao gerador - Extremidade inferior: acopla-se a roda - Diâmetro superior: dado pelo acoplamento ao gerador - Diâmetro inferior: dado pelo diâmetro interno da chumaceira

3.1.2.2 Roda de água protótipo

Os requisitos:

- resistência mecânica satisfatória para o impacto da água não deformar as pás e garantir a devida transferência da energia mecânica das pás até o veio;
- criação de um anel externo, para privilegiar a fixação de várias pás;
- requisitos para a máxima eficiência não foram considerados, por se tratar de um modelo preliminar, para avaliação dos desafios associados ao contexto do projeto;
- minimização do tempo de fabrico: poucas e curtas etapas de realização e elementos estruturais de geometria simples e de fácil repetibilidade.

A seguir, o pré-projeto conceitual:

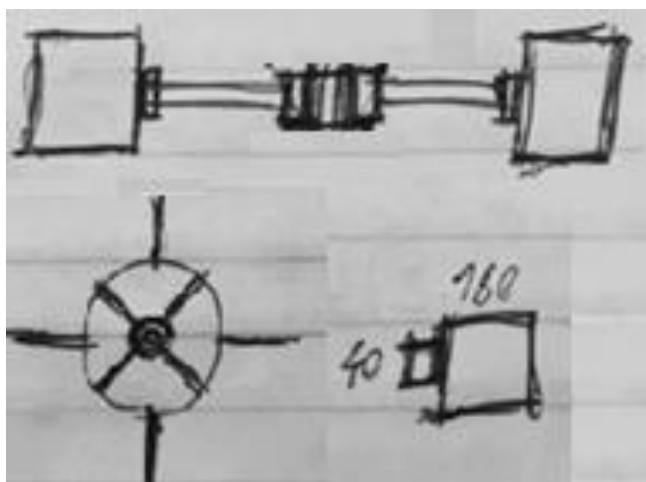


Fig. 3-3 – Esboço inicial: protótipo

Logo, a matriz morfológica:

Tab. 3-4 – Matriz morfológica: protótipo

Função	Posição	Características/Origem
Anel externo		
Onde se aparafusam os suportes de cada pá	Soldado aos braços	- Diâmetro interno do anel externo: $d_{\text{int,anel ext}} = (l_{\text{chapa,anel ext}})/\pi$ - Comprimento da chapa do anel externo ($l_{\text{chapa,anel ext}}$): aproveitou-se dos materiais disponíveis no LTM, onde não se encontravam chapas maiores do que 2 m de comprimento - Espessura da chapa: compatível para a obtenção do formato de anel - Altura do anel externo: largura da chapa razoável para a soldadura dos braços e para estes não restringirem os parafusos para fixação das pás
Anel interno		
Acoplamento da roda ao veio	Soldado aos braços	- Espessura da parede (e_{anel}): deve conferir uma resistência suficiente - Diâmetro externo: $d_{\text{ext,anel int}} = d_{\text{int,anel int}} + 2e_{\text{anel}}$ - Diâmetro interno ($d_{\text{int,anel int}}$): praticamente igual ao diâmetro externo do veio (d_{veio}) ao qual este será acoplado - Comprimento: o suficiente para sobressair a altura dos braços e para receber um furo radial para a pinagem/travagem da roda ao veio
Braços		
Conexão do anel externo ao anel interno	Soldado aos anéis interno e externo	- Geometria dos braços: perfil tubular quadrado - Braço maior (4 unidades): $l_{\text{braço maior}} = (d_{\text{int,anel ext}} - d_{\text{ext,anel int}})/2$ - Braço médio (4 unidades): dispostos na metade do arco formado entre os braços maiores, numa dimensão em que fosse possível o seu encaixe ajustado, mas para não deformar a circunferência do anel externo - Braço menor (8 unidades): dispostos na metade do arco formado entre os braços maiores e médios, numa dimensão em que fosse possível o seu encaixe ajustado, mas para não deformar a circunferência do anel externo
Suporte da pá		
Conexão da pá ao anel externo	Aparafusado ao anel externo e à pá	- Geometria: perfil L, de modo a prover suporte para a fixação da pá e para a fixação ao anel externo; fácil repetibilidade para os demais suportes - Comprimento: um pouco menor do que a altura do anel externo para, aquando acompanhar a inclinação da pá, não sobressair a este anel; fornecer um suporte resistente para a pá e, consequentemente, sobre o anel externo - Inclinação (θ): para a pá anterior não obstruir a incidência do jato sobre a pá subsequente. Numa pesquisa informacional, encontrou-se uma empresa de indústria e comércio de rodas de água. Embora a carecer de maiores informações, encontrou-se a inclinação de 20° em relação ao plano azimutal da roda (coordenadas cilíndricas – radial, angular e azimutal);
São impactadas pelos jatos e fixam-se ao longo do anel externo	Aparafusadas ao suporte da pá	- Comprimento – aproximadamente igual à metade da diferença entre o diâmetro máximo (predefinido para o projeto) e o diâmetro externo do anel externo: $l_{\text{pá}} \cong (d_{\text{máx}} - d_{\text{ext anel int}})/2$ - Geometria da pá: tubo em PVC em meia-cana – fácil repetibilidade para o fabrico das demais pás e também por um perfil que se acredita conservar a quantidade de movimento dos jatos de água mais do que uma pá plana, e.g..

3.1.3 Pré-projeto conceitual do conjunto em CAD

Vide Fig. 3-4, com auxílio de computador, um segundo esboço pôde ser obtido:

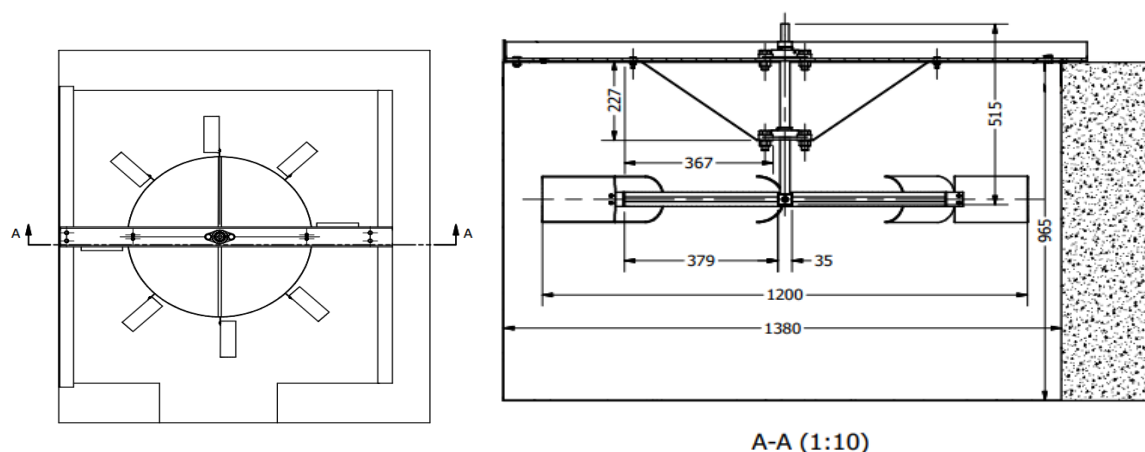


Fig. 3-4 – Esboço em CAD: estrutura de suporte e protótipo

Vide Fig. 3-5, com auxílio do *software* CAD Autodesk® Inventor 2017, procedeu-se o desenho tridimensional (3D). Embora realizada *a posteriori* do já iniciado fabrico das estruturas, o desenho em 3D foi útil na divulgação do trabalho ao longo da sua execução:

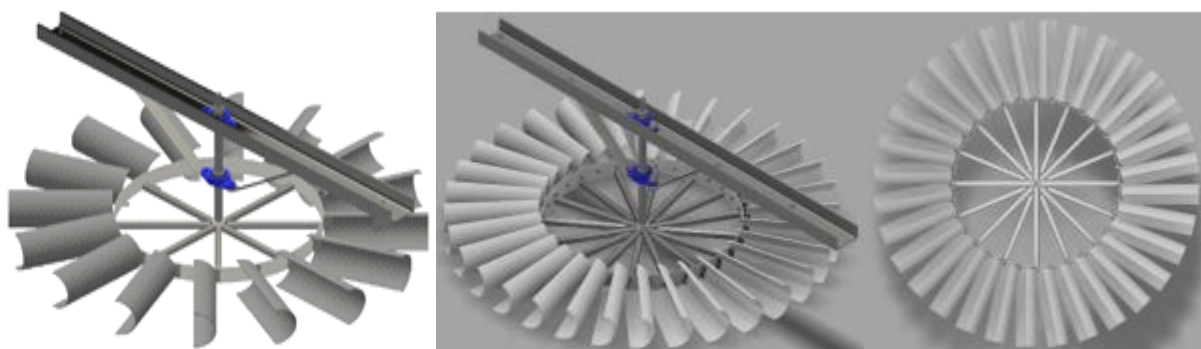


Fig. 3-5 – Desenho em 3D: estrutura de suporte e protótipo

Vide Apêndice A, a partir do 3D, procede-se o detalhamento do projeto – vistas ortográficas dos componentes contemplados no planeamento (vide normas de desenho técnico), além da ficha técnica da estrutura do produto. A ficha técnica (estrutura ou engenharia do produto) deve mostrar de forma clara todas as informações sobre o produto (MOTTA, 2010).

3.2 FABRICO

A seguir, descrevem-se os processos de fabrico, a montagem do modelo preliminar de roda (protótipo), da sua estrutura de suporte, além da disposição dos demais elementos.

3.2.1 Estrutura de suporte

Tab. 3-5 – Processos de fabrico utilizados: estrutura de suporte

Processo de fabrico/Tipo	Componente/Parte
Maquinagem/torneamento	Diâmetro externo do veio
Maquinagem/corte	Comprimento: - do veio - do perfil central

Processo de fabrico/Tipo	Componente/Parte
Maquinagem/furação	- dos perfis em L: distante, próximo e próximo inferior - Diversos furos nos perfis - No veio, furo radial passante, na respetiva extremidade para a travagem à roda - No veio, para a travagem à peça de acoplamento ao gerador
Maquinagem/limagem	Rebarbas do corte
Soldadura/MIG	Perfis em L: próximo e inferior próximo
Conformação/corte e dobramento	Suporte inferior

Tab. 3-6 – Matriz morfológica: gerador e estrutura de suporte

Componente/Parte	Características/Origem
Gerador elétrico	Nesta etapa não se ponderou a compatibilidade da velocidade de rotação a ser alcançada pela roda, que viesse a ser testada, com a do gerador fornecido - Diretamente acoplado ao veio (Detalhe A, Fig. 3-6b) - Peças específicas para acoplamento de veio ao gerador, previamente disponíveis
Estrutura de suporte do gerador	- Para manter a estabilidade da posição do gerador - Construída o mais próximo possível do gerador, por questões de rigidez da estrutura, para a economia de material e de etapas de fabrico - Adoção de uniões aparafusadas para possíveis modificações futuras



Fig. 3-6 – Montagem do conjunto
a) visão geral; b) estrutura de suporte do gerador.
Det. A: acoplamento do veio direto ao gerador.

3.2.2 Protótipo

Tab. 3-7 – Processos de fabrico utilizados: protótipo

Processo de fabrico/Tipo	Componente/Parte
Anel externo (Fig. 3-7a)	
Conformação/corte	Obtenção da tira a partir da chapa cortada
Conformação/calandragem	Obtenção do formato de circunferência
Soldadura/MIG	- Ligação das extremidades longitudinais da chapa, logo, para a formação do anel externo - União dos braços aos anéis interno e externo
Maquinagem/furação	Ao longo do diâmetro externo (no eixo radial), no plano angular e na metade da altura do anel (no eixo azimutal) – para fixação das pás
Anel interno	
Maquinagem/torneamento	Diâmetro externo
Maquinagem/furação	Diâmetro interno, para receber o veio
Maquinagem/corte	Plano transversal, obtenção do comprimento

Processo de fabrico/Tipo	Componente/Parte
Maquinagem/limagem	Rebarbas do corte
Braços	
Maquinagem/corte	Plano transversal dos perfis, obtenção do comprimento
Maquinagem/limagem	Rebarbas do corte dos perfis
Soldadura/MIG	União de cada braço aos anéis interno e externo
Suporte da pá	
Maquinagem/corte	Plano transversal dos perfis, obtenção do comprimento
Maquinagem/limagem	Rebarbas do corte dos perfis
Maquinagem/furação	2 furos em uma das abas para fixação da pá e 1 furo na outra aba para fixação no anel externo
Pá	
Maquinagem/corte	Planos transversal e longitudinal dos tubos em PVC para obtenção do comprimento e meia-cana, respetivamente
Maquinagem/limagem	Rebarbas do corte
Maquinagem/furação	2 furos em cada pá para fixação dos suportes



Fig. 3-7 – Protótipo de roda de água horizontal
a) anel externo e braços maiores; b) versão inicial.

3.2.3 Plataforma: estrutura básica

Vide Fig. 3-8a, tem-se o reservatório superior. A água chega até este através da bomba centrífuga acoplada ao tanque (ou reservatório inferior). Inscrições na face externa, as quais sobrepõem o nível de água revelado pelo material translúcido, auxiliam na orientação da cota atingida. Quando o nível é estabilizado (i.e., deixa de oscilar ao longo do tempo), pressupõe-se o alcance dum regime permanente – condição ideal para a diligência dos testes.

Vide Fig. 3-8b, o circuito de descarga para a roda acoplado ao reservatório superior:

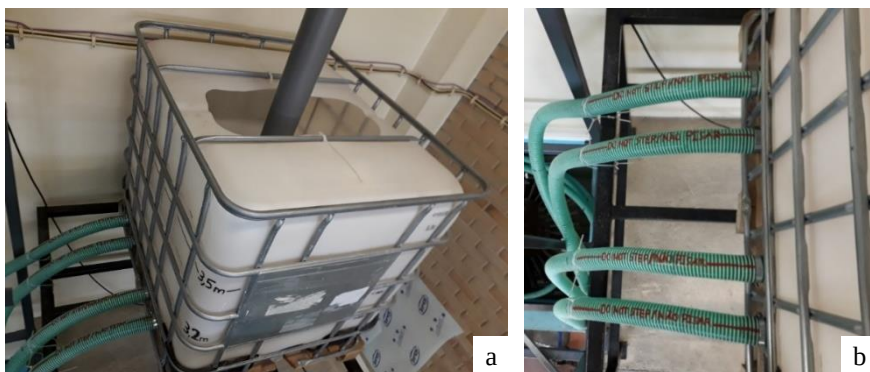


Fig. 3-8 – Reservatório superior
a) visão geral; b) conexão do reservatório aos tubos de descarga.

A tubagem de descarga conecta-se à válvula reguladora de fluxo e ao reservatório superior pelo acoplamento ao canhão macho (Fig. 3-9a). O canhão atravessa furos na parede do reservatório (Fig. 3-10) e em placas metálicas, usadas para conferir maior resistência à parede.



Fig. 3-9 – Exemplo: componentes para o acoplamento tubo ao tanque
a) canhão macho; b) batente.
Fonte: Hidraulicart (2016).

O canhão fixa-se à parede pelo batente (Fig. 3-9b) na parte interna do reservatório:



Fig. 3-10 – Reservatório superior: fixação interna dos tubos de descarga

Vide Fig. 3-11, a versão básica que se atingiu numa primeira etapa da plataforma para a futura diligência de testes. Pela figura, embora o circuito de bombagem da água do tanque ainda estar incompleto, a plataforma já apresenta os seus elementos principais:



Fig. 3-11 – Plataforma: estrutura básica

3.2.4 Modificações

A seguir, descrevem-se as modificações/melhorias que se mostraram necessárias após a realização dos primeiros testes com o modelo preliminar e/ou na operação da plataforma.

3.2.4.1 Aumento do número de pás da roda

Tab. 3-8 – Modificação: aumento do número de pás

Desafio	Requisitos	Solução
Minimizar o intervalo entre as pás. Logo, cada pá que o jato de água vem a encontrar trata-se de um instante de energia absorvido pela roda, braços, veio e assim por diante.	- Minimização do tempo de fabrico: a) poucas e curtas etapas de realização; b) elementos estruturais de geometria simples e de fácil repetibilidade.	Adição de 16 pás ao intervalo entre as pás: Fig. 3-12 e Apêndice A (desenhos técnicos).



Fig. 3-12 – Protótipo: versão atual

3.2.4.2 Sistema de multiplicação de velocidade

Tab. 3-9 – Modificação: sistema de multiplicação de velocidade

Desafio	Requisitos	Solução
- Através da gravação de vídeo, o protótipo não ultrapassou 70 rpm – fator condicionante para a geração de eletricidade, uma vez que os geradores elétricos apresentam uma rotação específica para produzir aquilo que foi projetado com máxima eficiência; - Testes foram realizados com o gerador desconectado de cargas (livre deste tipo de resistência) – para a verificação da rotação máxima que a roda poderia alcançar. Até então, a versão da plataforma era a do gerador diretamente acoplado ao veio (Fig. 3-11).	Rotação final: compatível com aquela de operação do gerador (300 rpm).	- Sistema de multiplicação de velocidade (Fig. 3-13); - Relação de transmissão de referência: 5:1 – adotou-se 5,6:1 pelos componentes disponíveis junto ao fornecedor; - Anexo E: catálogo técnico dos componentes adotados. - Conjunto polias-correia sincronizadoras: a) para evitar deslizamentos na transmissão, frente às correias lisas/trapezoidais; b) permite certo afastamento das unidades movida (gerador) e motriz (veio da roda); c) menor ruído frente às engrenagens.
Conceção duma estrutura de suporte do gerador que não interfira no sistema.	- Rigidez/resistência estrutural: a) prover estabilidade à estrutura frente às vibrações e ao peso do gerador; b) manter a posição do gerador para garantir o tensionamento da correia sincronizadora; - Minimização do tempo de fabrico (e subitens já enumerados).	Estrutura em trave Perfis em L aparafusados (Fig. 3 13): a) furações no perfil central/base da trave: aproveitou-se alguns furos já existentes, dado o esforço para furação <i>in loco</i> dum aço de maior dureza; b) perfis verticais: o mais próximos possível do sistema de transmissão, para a diminuição do vão, logo, perfis horizontais mais curtos e maior rigidez c) perfis horizontais: afastamento vertical que acompanha os furos já existentes da base do gerador alargamento dos furos da base do gerador: para aumentar a rigidez da estrutura; - Polia menor acoplada ao gerador (maior velocidade); polia maior acoplada ao veio da roda de água (menor velocidade). Abaixo do ressalto do veio, na região oposta àquela destinada ao acoplamento do gerador; furos radiais nas polias, para fixação aos veios através de parafusos. Neste caso, os parafusos funcionam como chavetas e os furos, tanto na polia quanto no veio, como o rasgo para recebê-las; - Plano de transmissão o mais baixo possível em relação ao perfil U – para a manutenção da estabilidade do veio da roda, uma vez que o veio é apoiado em chumaceiras fixadas no perfil U e no suporte inferior próximo à roda.



Fig. 3-13 – Solução para suporte do gerador e multiplicação de velocidade

3.2.4.3 Sistema de suporte dos jatos

Tab. 3-10 – Modificações: suporte dos jatos

Desafio	Requisitos	Solução
Facilitar a tarefa de ajuste dos jatos.	- Aumentar os graus de liberdade do jato: ao término da estrutura básica (Fig. 3 11), o grau de liberdade do jato era de apenas 1 (GDL 1) – inclinação em relação ao plano radial da roda – coordenadas cilíndricas (radial, angular e azimutal) - Minimização do tempo de fabrico: a) poucas e curtas etapas de realização b) reaproveitamento de materiais remanescentes de etapas anteriores de fabrico	- Vide Fig. 3 14, sistema de posicionamento dos jatos ao longo do raio da roda: a) deslizante sobre os braços perpendiculares ao perfil em U (Detalhe B) b) deslizante sobre o perfil em U (Detalhe A)
- Flexibilizar a plataforma para testes com os jatos em diferentes posições; - Eliminar o constrangimento dos constantes deslocamentos ao LTM para o apanhamento de ferramentas para a regulagem da posição dos jatos sempre que necessário.	- Aumentar os graus de liberdade dos jatos - Dispensar o uso de ferramentas para liberação/aperto dos parafusos: a) agilizar o processo de ajuste dos jatos b) independência de ferramentas - Ergonómicos: a) melhorar a qualidade da pega para manipulação dos parafusos b) minimização do esforço para realização da tarefa - Minimização do tempo de fabrico (e subitens já enumerados)	- Manípulos soldados à cabeça dos parafusos (Detalhes B, C e D, Fig. 3 15): a partir de segmentos de perfis remanescentes, com superfícies e arestas polidas - Sistema de posicionamento dos jatos com 3 GDL: a) ajustável ao longo do raio da roda e na distância da roda (altura), deslizante sobre os braços perpendiculares ao perfil estrutural central (em U) (Detalhe B) b) ajustável ao longo do raio da roda e na distância da roda (altura), deslizante sobre o perfil estrutural central (em U) (Detalhe C) c) ajustável na inclinação dos jatos em relação ao plano radial da roda (Detalhe D)

Desafio	Requisitos	Solução
Eliminar o constrangimento dos braços perpendiculares ao perfil U, aquando da necessidade de aceder ao interior do tanque para remover/installar o modelo a ser testado.	- Idem aos requisitos do desafio anterior, porém, a questão ergonómica postural – facilitar a remoção/colocação do modelo a ser testado no interior do tanque - Minimização do tempo de fabrico (e subitens já enumerados)	Suporte que permite o deslizamento e recolhimento total do braço para próximo do perfil U (Detalhe A, Fig. 3 15): a) acesso a parte do tanque para a fácil remoção/colocação da roda b) construído com partes de perfis remanescentes

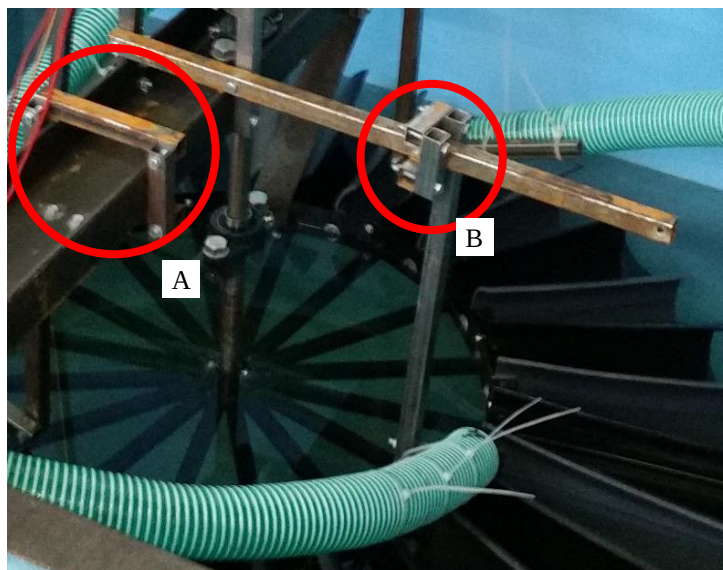


Fig. 3-14 – Sistema para o ajuste do jato ao longo do raio da roda
Det. (ajuste radial) – A: jatos perpendiculares ao perfil central; B: jatos paralelos ao perfil central.

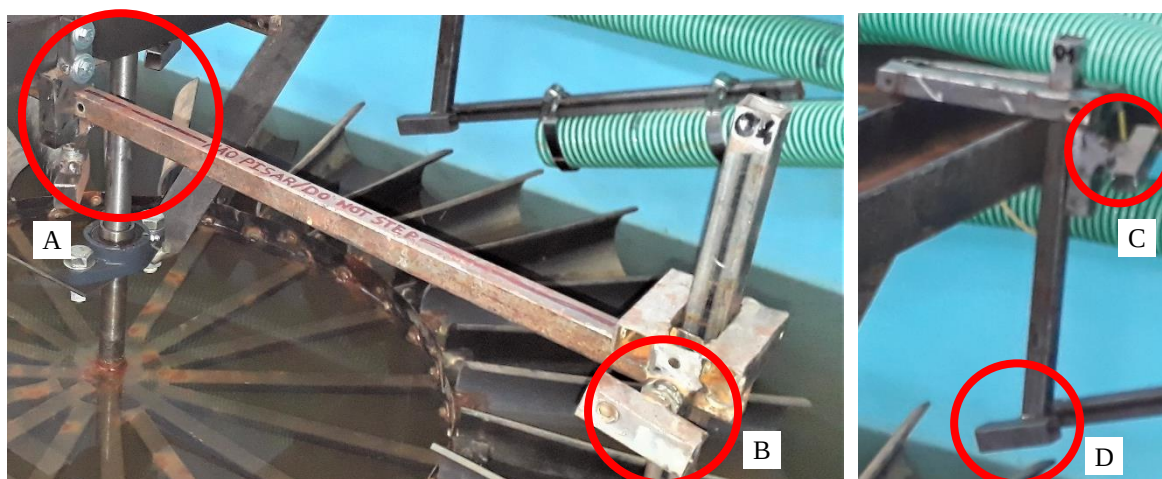


Fig. 3-15 – Sistema para o ajuste dos braços de suporte e dos jatos
Fig. – à esq.: jatos paralelos ao perfil central; à dir.: jatos paralelos ao perfil central.
Det. – A: recolhimento do braço; B: ajuste da posição radial e azimuthal do jato.

3.2.4.4 Sistema para içamento da roda

Tab. 3-11 – Modificação: sistema para içamento da roda

Desafio	Requisitos	Solução
O processo de remoção/colocação do modelo a ser testado no interior do tanque demandava uma ergonomia desfavorável e exigia demasiado esforço o acoplamento da	- Resistência mecânica: resistir ao peso do modelo a ser testado; - Ergonómico (postural):	- Sistema com corda e par de roldanas para o içamento da roda (Fig. 3 16): a) princípio de funcionamento

Desafio	Requisitos	Solução
roda ao veio.	a) minimização do esforço para colocação/remoção do parafuso do acoplamento; b) minimização do esforço para colocação da roda na devida posição junto ao veio; - Minimização do tempo de fabrico do sistema (e subitens já enumerados.	semelhante ao das pontes rolantes; b) como adaptação às roldanas, utilizou-se um par de suportes de rodízios. - Funcionamento: a) uma das extremidades da corda é presa a um perfil tubular quadrado superior; b) passa pelo rodízio conectado à roda e por outro rodízio junto ao perfil superior c) na outra extremidade da corda faz-se o controle da altura aquando da roda em suspensão (para içar a roda, puxa-se na direção vertical, no sentido do piso)

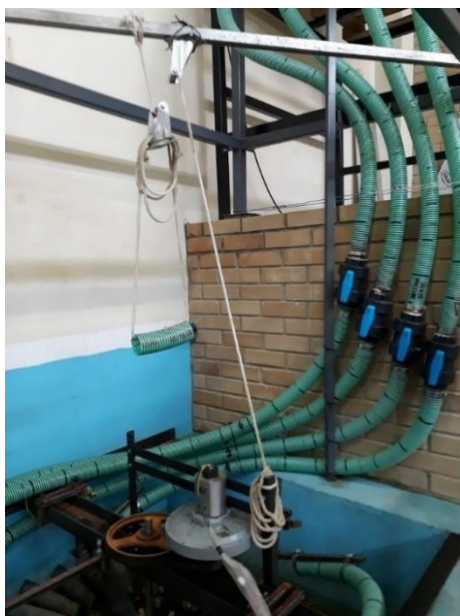


Fig. 3-16 – Sistema para içamento da roda

3.2.5 Plataforma: versão atual

Vide Fig. 3-17, a versão atual da plataforma para testes de rodas de água. O circuito de bombagem se deriva (Detalhe A, Fig. 3-17a) para dois reservatórios superiores: para testes de turbinas de reação (à esq. da derivação) e para testes de rodas de água horizontais (à dir.).

Pela Fig. 3-17b, a vista superior da roda e da sua estrutura de suporte sobre o tanque.



Fig. 3-17 – Plataforma: versão atual
a) visão geral; b) vista superior do protótipo montado à estrutura de suporte.
Det. A: derivação da tubagem para as unidades da plataforma.

4 CARACTERIZAÇÃO DA PLATAFORMA E DA RODA

De modo a se caracterizar o funcionamento da roda de água horizontal construída, enumeram-se, a seguir, algumas equações e parâmetros associados ao seu funcionamento.

A eficiência energética (η) (rendimento ou desempenho) duma máquina, na tarefa de transformar uma forma de energia em outra, traduz-se matematicamente na seguinte fração:

$$\eta = \frac{\text{energia extraída}}{\text{energia disponível}} \quad (4.1)$$

Em outras palavras, a eficiência duma máquina/dispositivo indica o quanto que se está a transformar uma dada forma de energia disponível (E_{disp}) numa outra – seja numa etapa intermediária da cadeia de transformação da energia ou da energia no seu uso final (E_{extr}).

A forma de energia disponível abordada neste projeto é a potencial gravitacional. A energia potencial gravitacional vem pela diferença de altura entre a superfície da água elevada e o ponto de descarga da mesma. A partir do momento que o fluido entra em queda (movimento), com o escoamento pela tubagem e ao atingir as pás da roda, tem-se energia cinética. O impacto da água sobre as pás leva a uma transformação da energia cinética do fluido na rotação do veio ao qual a roda se encontra acoplada, nomeadamente trabalho de veio.

A cadeia até então descrita não apresenta a mesma quantidade de energia do que aquela inicialmente disponível. Além do processo de transformação predominante, a energia se dá também de outras formas, nomeadamente perdas. As perdas vêm na forma da resistência das paredes e elementos hidráulicos da tubagem junto ao fluido, vazamentos ao longo da tubagem, acessórios instalados na tubagem, resistência nas chumaceiras que suportam a roda e entre outras formas associadas às ineficiências do processo. Vide Fig. 4-1, tem-se uma ilustração da extensão desta cadeia de transformação e de algumas ineficiências associadas ao processo:

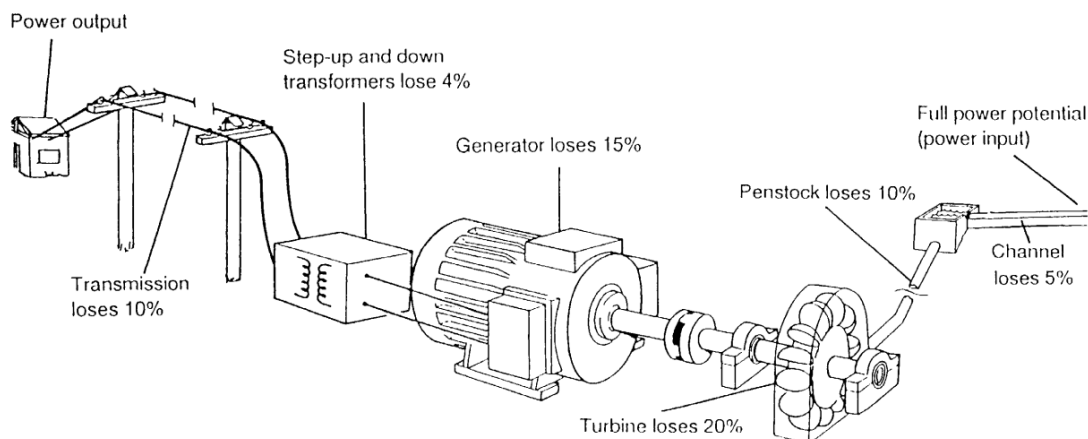


Fig. 4-1 – Cadeia de transformação da energia disponível até seu uso final
Fonte: Harvey (1993).

Vide Harvey (1993), o efeito da eficiência dos diferentes processos associados à transformação da energia para o seu uso final (E_{extr}) é dado pelo produto entre uma eficiência global (η_g), associada ao processo em análise, com a forma de energia disponível (E_{disp}):

$$E_{extr} = \eta_g E_{disp} \quad (4.1a)$$

η_g é dada pelo produto da eficiência dos diferentes estágios/etapas que contemplam o sistema em análise. Harvey (1993) indica um valor típico para η_g de 50%. No caso em estudo:

$$\eta_g = \eta_h \eta_r \eta_t \eta_{ger} \eta_e \quad (4.2)$$

Vide Eq. 4.2, têm-se as eficiências:

- a) η_h , hidráulica – associada às perdas de carga no circuito de descarga;
- b) η_r , da roda – máquina de fluxo em estudo e de principal interesse;
- c) η_t , da transmissão – sistema de multiplicação de velocidade para o gerador;
- d) η_{ger} , do gerador – capacidade em transformar energia cinética em elétrica;
- e) η_e , elétrica – dos elementos do circuito elétrico após o gerador.

Deseja-se conhecer a quantidade de energia que pode ser extraída através do modelo de roda de água preliminar – nomeadamente pelo perfil de pá adotado. Para tanto, faz-se um balanço energético sobre a pá, aplicando-se um volume de controlo (VC) na sua superfície, de modo a contabilizar as formas de energia associadas ao processo. Em um primeiro estudo, uma análise bidimensional faz-se pertinente dado o perfil predominante do escoamento.

Pela Fig. 4-2, tem-se a aplicação de um VC para o balanço de energia sobre o perfil de uma pá curva. Um VC é definido por uma superfície de controlo (SC). Com um balanço energético permite-se analisar aquilo que está a atravessar as SC do VC adotado.

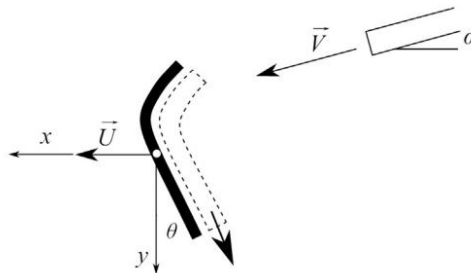


Fig. 4-2 – Análise bidimensional do escoamento sobre uma pá curva
Fonte: Pujol et al. (2015).

Vide Fig. 4-2, um fluxo de velocidade V e com uma inclinação do jato (α) acede ao VC e impacta a pá, com uma inclinação θ , o escoamento acompanha a superfície da pá. Pelo princípio da conservação da quantidade de movimento, há uma transferência de energia do movimento do fluido para as pás, a resultar na rotação da roda a uma velocidade periférica U .

Ao se desmembrar a equação da eficiência energética, busca-se por demais expressões que contenham as variáveis associadas ao caso em estudo. A correlação destas permitirá uma análise da influência dos parâmetros sobre a eficiência da roda de água horizontal. Vide Tab. 4-1, alguns valores iniciais adotados ou de requisitos de projeto que auxiliarão neste processo.

Tab. 4-1 – Valores iniciais adotados para os cálculos

Grand.	Valor	Unid.	Comentários
D_máx	1,20	m	Diâm. máximo da roda
g	9,81	m/s ²	Aceleração da gravidade
ρ	1.000	kg/m ³	Densidade da água a 10°C (FOX et al., 2015)
ν	1,01E-06	m ² /s	Viscosidade cinemática da água a 10°C (FOX et al., 2015)
α	20	°	Inclinação do jato
θ	20	°	Inclinação da pá
D_ext	1,15	m	Diâm. até o plano de análise ext.
r_ext	0,57	m	Raio até o plano de análise ext.
D_int	0,65	m	Diâm. até o plano de análise int.
r_int	0,33	m	Raio até o plano de análise int.

4.1 ENERGIA DISPONÍVEL

O fluxo impacta as pás da roda a uma velocidade adquirida ao longo da queda/diferença de altura experimentada. Conforme Fox et al. (2015), a fração de energia adquirida pelo fluido ao longo do seu escoamento vem na forma da potência hidráulica (P_h):

$$P_h = \rho Q g \Delta z \quad (4.3)$$

Onde se conhece:

- a) ρ , densidade do fluido;
- b) g , aceleração da gravidade;
- c) Δz , cota disponível – aproximadamente 3,5 m, vide Anexo A: desde o nível da superfície do rio até o ponto de admissão (1,12 m) mais desde o nível do canal da turbina de sucção até o ponto de descarga (2,35 m) – deve-se observar a incerteza da cota no momento da realização dos testes, uma vez que o nível de água no reservatório superior acaba por sofrer pequenas variações.

Logo, vide Eq. 4.3, para a obtenção de P_h deve-se determinar o caudal volúmico, Q .

4.1.1 Caudal volúmico (Q)

O caudal volúmico (Q) de uma linha de fluxo pode ser obtido avaliando-se tempo (t) para o fluxo desta mesma linha encher um reservatório de volume conhecido (v), dado por:

$$Q = \frac{v}{t} \quad (4.4)$$

O valor de Q foi obtido experimentalmente para auxiliar na verificação analítica.

Na diligência dos primeiros testes, pôde-se verificar que se lidava com um caudal considerável para obtê-lo a partir dum reservatório de pequeno volume (e.g., balde) – uma vez que o espaço de tempo (t) para enchê-lo seria curto. Outra adversidade foi o acesso ao ponto de descarga. Com a Eq. 4.4, o procedimento adotado para a determinação de Q foi o seguinte:

- a) um regime permanente de operação na plataforma é estabelecido com a cota estabilizada de 3,5 m (Fig. 4-3, esq.) – i.e., sem variações da cota ao longo do tempo;



Fig. 4-3 – Reservatório superior

- b) fixa-se o ponto de operação da bomba centrífuga – marca-se o *setpoint* do inversor de controlo (Fig. 4-4a) do motor acoplado à bomba centrífuga (Fig. 4-4b);



Fig. 4-4 – Sistema de bombagem
a) inversor de controlo; b) motor e bomba centrífuga.

c) desliga a bomba, esvazia o reservatório superior e fecha-se a válvula (Fig. 4-5);



Fig. 4-5 – Válvulas das linhas de descarga

d) retoma-se ao ponto de operação anteriormente fixado no inversor;

e) cronometra-se o tempo de enchimento do reservatório superior;

f) marca-se o tempo (t) quando o nível atinge a marca de 1 m³ (v) (Fig. 4-3, dir.).

Tab. 4-2 – Resultados: caudal volúmico

Grand.	Eq.	Linha de descarga/Valor				Unid.	Comentários
		1	2	3	4/Outro		
v					1,00	m ³	Volume no reservatório superior
f		35,6	35,5	35,3	35,1	Hz	Frequência de operação do inversor da motobomba
t_1		85,53	89,05	95,07	104,80	s	Tempo para enchimento do reservatório superior
t_2		85,26	89,38	95,02	104,50		
t_3		84,88	88,84	96,13	105,42		
t_4		85,51	89,59	95,94	104,07		
μ		85,30	89,22	95,54	104,70		Média
σ		0,303	0,335	0,577	0,567		Desvio padrão
u		0,355	0,375	0,604	0,542	%	Erro relativo
Q	4.4	1,17E-02	1,12E-02	1,05E-02	9,55E-03	m ³ /s	Caudal volúmico por linha
		4,2E+04	4,0E+04	3,8E+04	3,4E+04	l/h	
		11,7	11,2	10,5	9,55	l/s	
u		0,355	0,375	0,604	0,542	%	
Q_tot					4,30E-02	m ³ /s	Somatório do caudal de cada linha
					43,0	l/s	
u					0,2	%	

4.1.2 Velocidade média do escoamento (V)

A velocidade de descarga (ou do jato) influi diretamente na velocidade de rotação da roda. Em termos de produção de eletricidade, o conhecimento da velocidade de rotação é um parâmetro determinante para as etapas subsequentes do projeto. Isto se deve ao facto de que a velocidade V condiciona diretamente a tensão do gerador e, consequentemente, a compatibilidade operacional do inversor fotovoltaico (LEITE et al., 2016a, 2016c, 2016d).

4.1.2.1 Determinação de V a partir de Q

Q também é dado por (FOX et al., 2015; WHITE, 2016):

$$Q = A V \therefore V = \frac{Q}{A} \quad (4.5)$$

Onde se conhece:

- a) Q , caudal volúmico – obtido experimentalmente (Tab. 4-2);
- b) A , área da secção transversal interna da tubagem de descarga – a qual o escoamento cruza e considerando-se que é idêntica à área da secção transversal do escoamento, considerando-se todo o perímetro interno da tubagem recoberto pelo escoamento:
 - o diâmetro do jato (d_j) adotado é de 53 mm, considerando-o idêntico ao diâmetro interno do tubo de descarga (d_{tubo}). Até então não se fez uso de bocais (para a redução do diâmetro do jato, logo, aumento da velocidade de descarga;
 - dada pelo diâmetro interno do tubo (d_{tubo}) adotado para o circuito de descarga.

4.1.2.2 Determinação de V a partir da equação de Bernoulli

Uma análise clássica do momento linear num escoamento é a relação entre pressão, velocidade e altura. Esta relação vem através da equação de Bernoulli. Esta equação é comumente aplicada em escoamentos através de condutas. Neste caso, são adotadas as hipóteses de escoamento incompressível (densidade do fluido constante) e de regime permanente (propriedades do escoamento constantes ao longo do tempo) (WHITE, 2016):

$$\left(\frac{p}{\gamma} + z + \alpha \frac{V^2}{2g} \right)_A - H = \left(\frac{p}{\gamma} + z + \alpha \frac{V^2}{2g} \right)_B \quad (4.6)$$

Onde:

- a) p_i , pressão estática nos pontos em análise – costuma-se admitir, para casos como o em estudo, $p_A = p_B = p_{atm}$;
- b) γ , peso específico do fluido – dado por $\gamma = \rho g$;
- c) z_i , altura vertical nos pontos – a diferença entre os pontos leva à cota disponível (Δz), o que define a força motriz do escoamento;
- d) α , fator de correção de energia cinética – em problemas envolvendo escoamentos turbulentos em condutas, costuma-se adotar $\alpha \approx 1$ (WHITE, 2016);
- e) V_i , velocidade média do fluxo nos pontos – costuma-se admitir o fluido estático na superfície para casos de grandes reservatórios (e.g., rios), logo, $V_A = 0$. No entanto, para o caso da plataforma do laboratório, há um sistema de recirculação onde a água é descarregada no reservatório superior com uma velocidade proporcionada pela bomba centrífuga anexa ao tanque, logo, $V_A > 0$.

Aplicando-se as hipóteses acima descritas, a Eq. 4.6 fica:

$$V = V_B = \sqrt{V_A^2 + 2 g (\Delta z - H)} \quad (4.6a)$$

Onde se desconhece H , perda de carga total.

4.1.2.3 Velocidade máxima do escoamento ($V_{m\acute{a}x}$)

Vide Eq. 4.6a, com $H = 0$:

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2 g \Delta z} \quad (4.6b)$$

A Eq. 4.6b foi descoberta por Torricelli em 1644 e diz que a velocidade de descarga é igual à velocidade que uma partícula pode atingir em queda livre sem atrito (WHITE, 2016).

Tab. 4-3 – Resultados: velocidade de descarga

Grand.	Linha de descarga/Valor			Unid.	Comentários
	1	2	3	4/Outro	
d_A				125 mm	Diâm. int. do tubo de descarga em A (fabricante)
				0,125 m	
A_A				1,23E-02 m ²	Área da secção transversal, $A = (\pi d_{tubo}^2)/4$
d_B				53 mm	
				0,053 m	
A_B				2,21E-03 m ²	
V_A	0,96	0,91	0,85	0,78 m/s	Eq. 4.5
u	0,355	0,375	0,604	0,542 %	
V	5,31	5,08	4,74	4,33 m/s	Eq. 4.6a
u	0,355	0,375	0,604	0,542 %	
V_máx				8,24 m/s	Eq. 4.6b
u				0,02 %	

Grand.	Linha de descarga/Valor			Unid.	Comentários
	1	2	3	4/Outro	
Q _{máx}				1,8E-02	m ³ /s f(Q _{máx})
				18,2	l/s
N _j				4	linhas Número de linhas de descarga
Q _{tot,máx}				7,3E-02	m ³ /s f(N _j)
				72,7	l/s
u				0,02	%

4.1.3 Cota útil (h) e perda de carga total (H)

Ao se ponderar as perdas de carga no circuito hidráulico, surge a cota útil (h):

$$h = \Delta z - H \quad (4.7)$$

Estimou-se H a partir de V. Manipulando-se a Eq. (4.6b), tem-se:

$$h = \frac{v^2 - v_A^2}{2g} \therefore H = \Delta z - h \quad (4.6c)$$

A movimentação do fluido ao longo do circuito de descarga está sujeita à interação com a parede interna do tubo e a superfície de demais elementos hidráulicos existentes na mesma linha do circuito. Tais fatores inferem na movimentação sem restrições do fluido.

Para todos os sistemas de condutas/tubagens, tem-se as perdas maiores ou por atrito (h_f) – em função do comprimento do tubo e a sua rugosidade superficial – e as perdas menores ou locais (h_m) – em função da existência de elementos hidráulicos no circuito (WHITE, 2016).

4.1.3.1 Perda de carga por atrito, distribuída ou maior (h_f)

O atrito ocorre pela interação da viscosidade do fluido com a rugosidade da parede do tubo. A viscosidade é uma propriedade inerente a todos os fluidos e está associada à resistência ao seu escoamento. A rugosidade superficial trata-se da heterogeneidade apresentada pela superfície sobre onde o fluido escoa. Em suma, quanto menos viscoso o fluido e mais lisa a superfície por onde este escoa: menor a resistência ao movimento do fluido.

A perda de carga h_f representa a energia convertida de mecânica para térmica por efeitos de atrito. Para escoamentos completamente desenvolvidos (propriedades constantes ao longo do escoamento) em linhas de diâmetro constante, h_f depende apenas dos detalhes do escoamento através do tubo e independe da orientação da linha/tubagem (FOX et al., 2015):

$$h_f = f \frac{L}{d_{\text{tubo}}} \frac{v^2}{2g} \quad (4.8)$$

Vide Eq. 4.8, proposta por Weisbach em 1850 (WHITE, 2016), conhece-se:

- a) L, comprimento total da linha de descarga, – medição *in loco*;
- b) V – obtida a partir do caudal volúmico experimental.

Na Eq. 4.8, desconhece-se f, fator de atrito de Darcy (ou apenas fator de atrito), 4 vezes o fator de atrito de Fanning (menos utilizado), obtido experimentalmente (FOX et al., 2015).

4.1.3.1.1 Comprimento das linhas de descarga (L)

Obteve-se L pelo somatório do trecho de tubo do reservatório superior até a válvula (Fig. 4-6a), aproximadamente igual em cada linha, (Secção 1) e pelo comprimento desde a torneira até o ponto de descarga. De cada válvula até o ponto de ataque, tem-se diferentes comprimentos de tubo para o alcance do respetivo ponto de cada jato (Fig. 4-6b) (Secção 2).

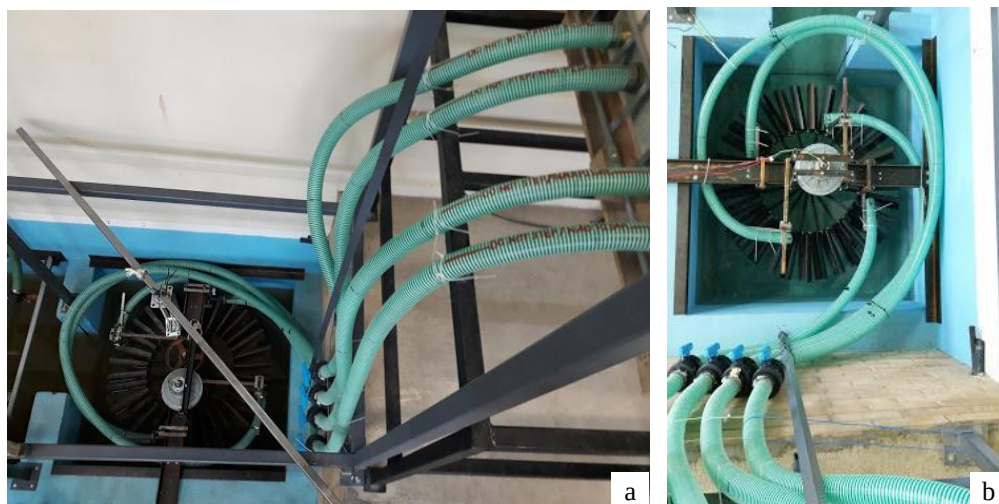


Fig. 4-6 – Linhas de descarga a deixar o reservatório superior
a) à montante da válvula; b) à jusante da válvula.

Tab. 4-4 – Resultados: comprimento das linhas de descarga

Grand.	Linha de descarga/Valor				Unid.	Descrição/Observações
	1	2	3	4/Outro		
Secção 1 (S1) – desde o reservatório até a válvula						
L_div				13	cm/divisão	Comprimento da escala padrão
δ				0,50	cm/divisão	Incerteza da medição (metade da menor escala)
u				3,8	%	Incerteza relativa
L_S1,div				18	divisões	
				234	cm	
u				0,91	%	
L_S1,ad	8	5	10	8	cm	Comprimento adicional (menor do que a escala padrão)
u	6,3	10	5,0	6,3	%	
L_S1,tot	242	239	244	242	cm	Comprimento total
u	0,9	0,9	0,9	0,9	%	
Secção 2 (S2) – desde a válvula até a descarga						
L_S2,div	12	19	28	35	divisões	
	156	247	364	455	cm	
u	1.1	0.88	0.73	0.65	%	

Grand.	Linha de descarga/Valor				Unid.	Descrição/Observações
	1	2	3	4/Outro		
L_S2,ad	10	3	0	11	cm	
u	5,0	17	-	4,5	%	
L_S2,tot	166	250	364	466	cm	
u	1,1	0,9	0,7	0,6	%	
Comprimento total das linhas de descarga						
L	408	489	608	708	cm	Comprimento da linha
	4,08	4,89	6,08	7,08	m	
u	0,69	0,64	0,56	0,52	%	

4.1.3.1.2 Determinação de f a partir do diagrama de Moody

Os resultados foram plotados por Moody, em 1944, num hoje chamado diagrama de Moody (Fig. 4-7). O diagrama de Moody é provavelmente a mais famosa e usada figura em mecânica dos fluidos. Pode ser usada para tubos circulares e não-circulares, tubos fechados ou em canal aberto. O diagrama apresenta de forma clara o atrito para os escoamentos laminar e turbulento em tubos, incluindo o efeito da rugosidade dos mesmos (WHITE, 2016).

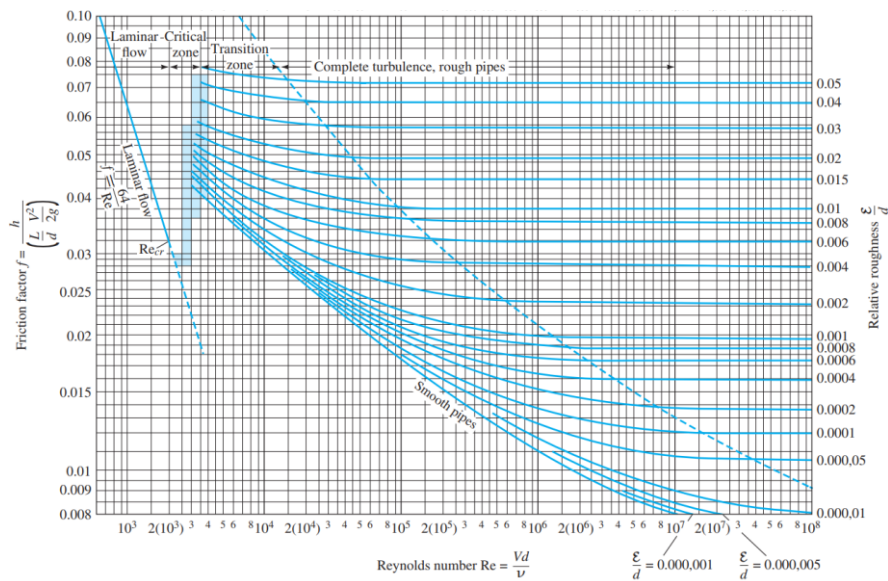


Fig. 4-7 – Diagrama de Moody
Fonte: White (2016).

Para determinar h_f a partir deste diagrama considera-se o escoamento completamente desenvolvido e, condições conhecidas, desenvolvem-se as seguintes etapas (FOX et al., 2015):

- número de Reynolds (Re) – determina o regime laminar ou turbulento ($Re \geq 2.300$) do escoamento (Eq. 4.9), onde ν é a viscosidade cinemática ($1,30E-6 \text{ m}^2/\text{s}$ à 10°C):

$$Re = \frac{V d_{\text{tubo}}}{\nu} \quad (4.9)$$

- b) rugosidade do tubo (ε) – valor vide tabelas apropriadas, ou verificado, através de equipamentos específicos (rugosímetro), junto à superfície interna do tubo;
- c) cruzar os valores de Re (abscissas) e $\varepsilon/d_{\text{tubo}}$ (rugosidade relativa, ordenadas à direita) sobre a curva apropriada no mapa de Moody e obter f (ordenadas à esquerda);
- d) aplicar o valor f na Eq. 4.8 e, finalmente, obter a perda de carga por atrito (h_f).

Vide Fig. 4-8, a aplicação dos procedimentos acima enumerados para obtenção de f .

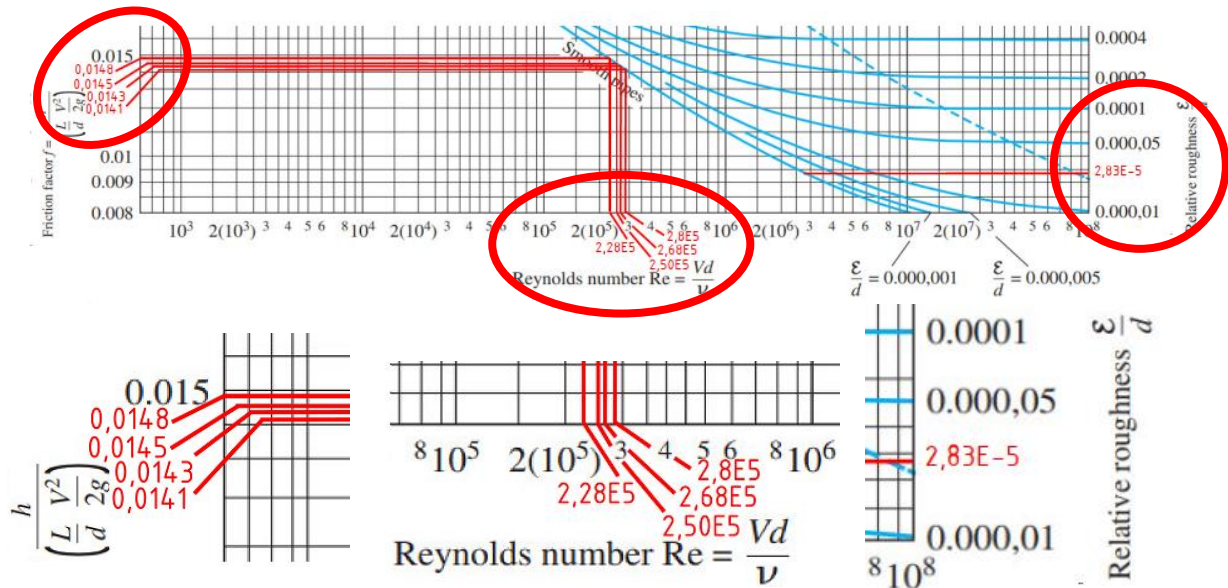


Fig. 4-8 – Diagrama de Moody: obtenção do fator de atrito
Fonte: adaptado de White (2016).

Contudo, existem equações para obtenção do fator de atrito, sob dadas condições (WHITE, 2016) – todavia, a apresentação destas afastaria o trabalho do seu escopo principal.

4.1.3.1.3 Determinação de f a partir do gráfico de perda do fabricante do tubo

Os fabricantes de tubos comerciais podem fornecer os gráficos característicos da perda de carga dos seus produtos, os quais costumam acompanhar o catálogo. Tais valores são obtidos experimentalmente e, assim, plotados em função de parâmetros do escoamento, e.g.: velocidade média do escoamento, diâmetro interno e caudal volúmico.

Um primeiro resultado da perda de carga total veio a partir da velocidade de descarga (V). E esta veio do caudal volúmico obtido experimentalmente (Secção 4.1.1, início). Outro caminho adotado foi através do gráfico de perda de carga do tubo utilizado (Anexo B).

Através do gráfico de perda, fornecido pelo fabricante, entrou-se com os dados de Q (em l/h), d_{tubo} e V , logo, obteve-se a perda associada ao tubo (em m de cota/ m de tubo). Finalmente, restou corrigir a escala ($1/100$ no gráfico) e multiplicar pelo comprimento da linha.

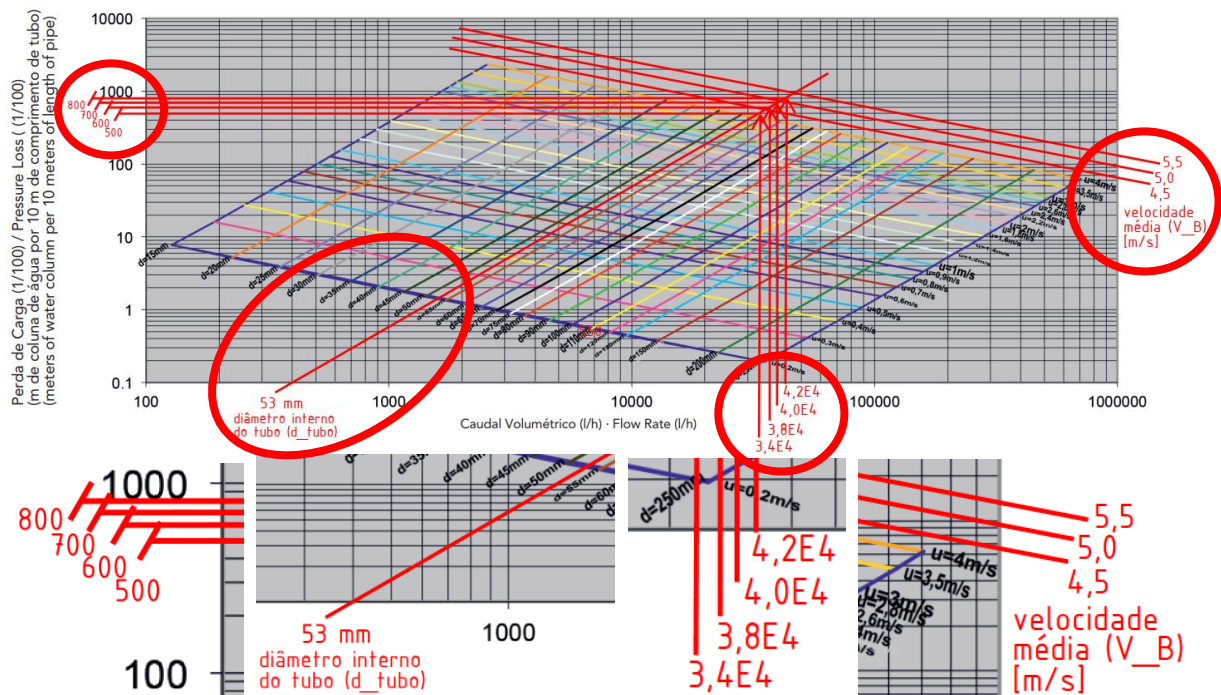


Fig. 4-9 – Gráfico de perda do tubo: obtenção da perda de carga por atrito
Fonte: adaptado de Heliflex ([201-?]).

4.1.3.2 Perda de carga localizada ou menor (h_m)

h_m vem da existência de um ou vários elementos no circuito (WHITE, 2016), como:

- a) entradas e saídas do tubo – na plataforma, na parte interna do reservatório superior, há uma reentrância do canhão macho (que acopla o tubo ao reservatório superior);
- b) expansão e contração repentinas;
- c) expansão e contração graduais (é o caso dos difusores e bocais, respectivamente) – para o caso em estudo não se fez uso de bocais, que inferem na velocidade de descarga. Contudo, quando usado, seu efeito nas perdas deve ser contabilizado;
- d) curvas, cotovelos, derivações e outros acoplamentos – o efeito da curvatura da linha de descarga sobre a perda de carga não foi considerado. Entretanto, aqueles trechos da tubagem que apresentam um perfil aproximadamente circunferencial foram contabilizados no comprimento total da linha de descarga (L);
- e) válvulas (abertas ou parcialmente fechadas) – no caso em estudo, fez-se uso de uma (1) válvula de esfera em cada linha de descarga, folha de dados vide Anexo B.

Apesar da designação, tais perdas podem não ser “menores” (e.g., uma válvula parcialmente fechada pode influir severamente tanto quanto um tubo longo). h_m é dado por:

$$h_m = \Sigma K \frac{v^2}{2g} \quad (4.10)$$

Vide Eq. 4.10, K é o coeficiente de perda de cada componente utilizado (os quais podem ser somados se pertencem à uma linha de diâmetro constante). K é adimensional e pode ser obtido de tabelas da literatura e/ou do fabricante. Os valores de K vêm em função do diâmetro nominal do componente e/ou do tubo ao qual este deve de ser acoplado.

No caso da válvula de esfera, como já apresentada (Anexo B), $K = 0,5$ quando h_m contém o termo g , caso contrário, $K = 0,05$ (ÇENGEL; CIMBALA, 2018; FOX et al., 2015).

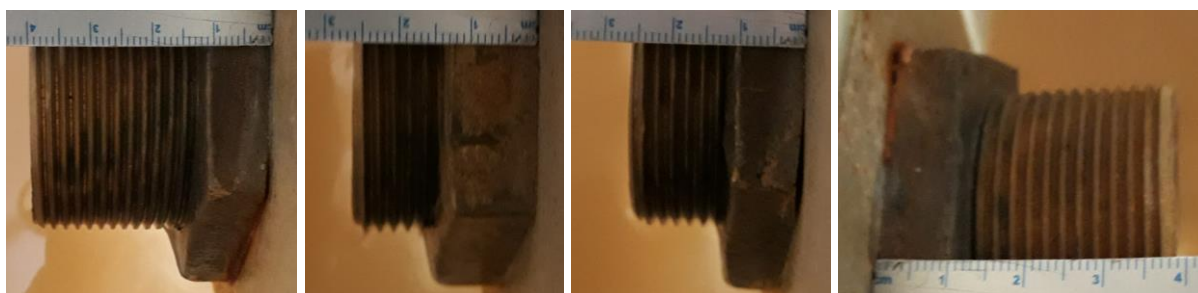


Fig. 4-10 – Reservatório superior: comprimento das reentrâncias

Tab. 4-5 – Resultados: cotas e perda de carga total

Grand.	Linha de descarga/Valor				Unid.	Descrição/Observações
	1	2	3	4/Outro		
Δz				3,46	m	Cota disponível
$\delta_{\text{medição}}$				0,005		Incerteza distância entre A e B (metade da menor escala)
δ_{testes}				0,025		Variação do nível no reservatório superior durante os testes
$\Sigma \delta$				0,030		
u				0,87	%	
h	1,39	1,40	1,40	1,41	m	
u	0,710	0,750	1,21	1,08	%	
H	2,07	2,06	2,06	2,05	m	
u	1,53	1,54	1,67	1,64	%	
PERDA MENOR OU LOCAL						
Reentrância						
l_{reent}	40	26		26	39 mm	Comprimento
δ					0,5	Incerteza da medição (metade da menor escala)
u	1,25	1,92		1,92	1,28%	
d					2 pol	Diâmetro interno do canhão macho
					50,8mm	
t					2	Espessura da parede do canhão macho
t/d					0,04-	
l/d	0,79	0,51		0,51	0,77	
K_{reent}					0,5	Coeficiente de perda, vide gráfico (WHITE, 2016)
h_m	0,70	0,70		0,70	0,70m	Eq. 4.10
Válvula de esfera						
$K_{\text{válv}}$					0,5 -	Vide tabela (WHITE, 2016)
h_m	0,70	0,70		0,70	0,70m	
$h_{m,\text{tot}}$	1,39	1,40		1,40	1,41m	
u	0,710	0,750		1,21	1,08%	
PERDA MAIOR OU DISTRIBUÍDA						
h_f	0,674	0,666		0,66	0,64m	$f(H, h_m)$
u	4,91	5,02		5,86	5,75%	

Tab. 4-6 – Resultados: potência e eficiência hidráulica

Grand.	Eq.	Linha de descarga / Valor				Unid.	Descrição/Observações
		1	2	3	4/Outro		
P _{h,máx}	4.3				617	W	f(V _{máx})
u					0,9	%	
P _h	4.3	160,2	153,6	144,0	132,0	W	f(V)
u		0,8	0,8	1,4	1,2	%	
η _h	4.1	0,26	0,2	0,2	0,2	-	f(P _h , P _{h,máx})
u		1,2	1,2	1,6	1,5	%	
P _{h,máx,tot}					2.468	W	f(N _j)
u					0,87	%	
P _{h,tot}					589,7	W	f(P _h)
u					0,53	%	
η _{h,tot}	4.1				0,2	-	f(P _h , P _{h,máx}) _{tot}
u					2,73	%	

4.2 ENERGIA EXTRAÍDA

A fração de energia extraída do veio (ao qual uma série de pás da roda estão acopladas) durante a sua rotação vem na forma da potência mecânica da roda (P) (FOX et al., 2015):

$$P = \omega T \quad (4.11)$$

Onde se conhece a distância radial de descarga (r) e se desconhece:

- a) ω , velocidade angular da roda;
- b) T, binário.

4.2.1 Binário da roda (T)

T é dado pelo produto da distância radial de descarga (r) e da força da roda (F):

$$T = r F \quad (4.12)$$

4.2.1.1 Distância radial de descarga (r ou D)

Trata-se da distância entre o centro do veio da roda e o eixo do jato. Em termos do raio (r) ou do diâmetro (D), tem-se dois pontos de ataque: raio interno (r_{int}) e raio externo (r_{ext}).

$$\begin{aligned} r_{\text{int}} &= D_{\text{máx}} - l_{\text{pá}} + d_j \therefore D_{\text{int}} = 2 r_{\text{int}} \\ r_{\text{ext}} &= D_{\text{máx}} - d_j \therefore D_{\text{ext}} = 2 r_{\text{ext}} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Onde:

- a) diâmetro máximo da roda (D_{máx}) – imposto como requisito de projeto (1,2 m);
- b) comprimento da pá (l_{pá}) – adotado para o fabrico do protótipo da roda (0,3 m);

- c) diâmetro do jato (d_j) – dado pelo diâmetro interno da tubagem (d_{tubo}) (0,053 m) – lembra-se que, até então, a utilização de bocais ainda não é avaliada.

4.2.1.2 Força da roda (F)

A força da roda (F) (Eq. 4.11) é a força de reação da pá ou da roda (R) ao impacto do fluxo, porém no sentido oposto (logo, $F = -R$). No estudo de Pujol et al. (2015) analisou-se a eficiência mecânica de uma roda de água horizontal em casos de diferentes perfis de pá. Para a estimativa analítica da força que impulsiona a roda aplicou-se o teorema do balanço de momentos. A quantidade de movimento, como força motriz, vem na forma do produto entre o caudal mássico do fluido ($\dot{m}$) e uma velocidade relativa (W) a partir do escoamento sobre a pá.

Logo, pela Eq. 4.14 vide Pujol et al. (2015), a força responsável pela movimentação da roda é parte da quantidade de movimento removida do jato de água que está a incidir as pás – i.e., uma vez que se tem uma quantidade de matéria em movimento a entrar na pá (i) e a deixá-la (o), a diferença destas parcelas é a força para mover a pá e, consequentemente, a roda:

$$R = (\sum \dot{m} W)_o - (\sum \dot{m} W)_i \therefore F = -R = (\sum \dot{m} W)_i - (\sum \dot{m} W)_o \quad (4.14)$$

Onde:

- a) $\dot{m}_i$, caudal mássico de entrada – dado por $\dot{m}_i = \rho A V = \rho Q$, na hipótese de que o fluxo de descarga encontra uma série de pás consecutivas;
- b) $\dot{m}_o$, caudal mássico de saída – num caso ideal, tem-se um fluxo único de entrada e saída (conservação da massa), $\dot{m}_i = \dot{m}_o$.

Na prática, na análise bidimensional não há conservação da massa no escoamento sobre a pá. Isto se deve ao facto de que, ao atingir a pá, além da direção predominante do escoamento, este também se projeta em direções aleatórias (respingos). Logo, um fenómeno difícil de se estimar. Aplicando-se as hipóteses descritas, a Eq. 4.14 fica:

$$F = \rho Q (W_i - W_o) \quad (4.15)$$

Onde W_i é a velocidade do fluido a aceder o VC em relação à pá e W_o é a deixar o VC em relação à pá – num escoamento sem atrito ao longo da superfície da pá, $W_i = W_o$.

Quando o fluxo atinge a pá, surge uma velocidade relativa – observa-se que agora tem-se em movimento a pá/roda e o fluxo a atingi-la. Ao iniciar o escoamento do fluido sobre a pá, vem a velocidade relativa de entrada (W_i) e, ao deixar a pá, uma velocidade de saída (W_o).

Conforme a Fig. 4-11, decompondo-se V_i na direção da rotação (x):

$$W_i = V_i \cos \alpha - U \quad (4.16)$$

Onde:

- a) α , inclinação do jato – adotou-se aproximadamente 20° . Onde observou-se o ajuste do perfil do escoamento ao perfil da pá, variando-se também a distância do jato em relação ao plano de rotação da roda (ao longo da direção azimutal da roda);
- b) V_i , velocidade do fluxo a aceder a pá (V_i) – idem à $V_B = V$;
- c) U , velocidade periférica.

A velocidade relativa de saída (imediatamente antes de deixar a pá) (W_o) apresenta um módulo menor que o de W_i – pelo atrito do escoamento do fluido com a superfície da pá. Macintyre (1983) sugere um fator k menor que a unidade para descrever este efeito:

$$W_o = k W_i \quad (4.17)$$

Logo, em analogia à Fig. 4-2 e atribuindo-se os parâmetros associados à velocidade, tem-se a Fig. 4-11 – onde apresenta-se uma análise bidimensional do escoamento sobre a pá.

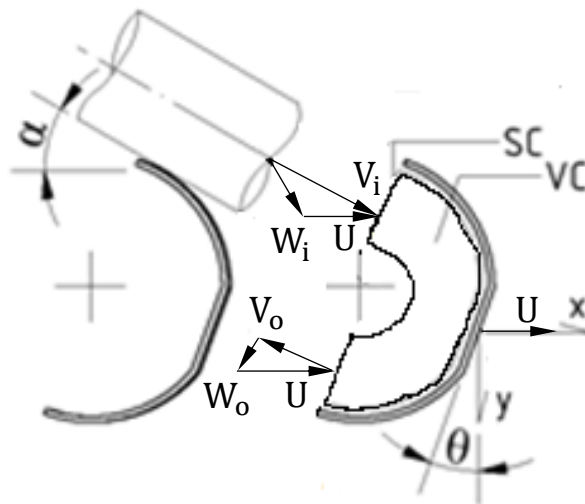


Fig. 4-11 – Triângulo de velocidades sobre a pá do protótipo

A partir da Fig. 4-11 e das Eqs. 4.16 e 4.17, e aplicando-se na Eq. 4.14a:

$$\begin{aligned} F &= \rho Q [(V \cos \alpha - U_r)_i - (k W_i)_o] \\ \therefore F &= \rho Q [V_i \cos \alpha (1 - k) + U_r (k - 1)] \end{aligned} \quad (4.18)$$

Se a força para movimentar uma pá está associada à quantidade de movimento extraída de um jato e a potência mecânica é diretamente proporcional à força, 4 jatos quadruplicam a potência extraída. Regressa-se ao início da Secção 4.2 (Eq. 4.11) e, com F e r , tem-se T .

Pela mesma Eq. 4.11 vem a potência da roda (P), podendo-se obtê-la pelos mesmo meios que aqueles enumerados para as velocidades angular e periférica. Uma vez que existe o interesse na avaliação do aproveitamento elétrico a partir da roda, na sequência, discorre-se a continuidade da cadeia a partir da potência mecânica produzida pela roda de água.

4.2.2 Velocidades da roda

A seguir, alguns tipos de velocidades associadas à rotação da roda.

4.2.2.1 Velocidade angular da roda (ω e n)

ω , no plano de rotação da roda, é a razão entre a velocidade tangencial ou periférica (U) num dado ponto ao longo do raio da roda e a distância radial (r) – entre o ponto e o veio.

$$\omega = \frac{U}{r} \quad (4.19)$$

Em rotações por minuto (rpm) (n):

$$n = \frac{60 U}{\pi D} \therefore U = \frac{n \pi D}{60} \quad (4.19a)$$

Em radianos por segundo (rad/s) (ω):

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} \quad (4.19b)$$

Vide Eq. 4.19, para a determinação do valor de ω e/ou n :

- a) verificando-se o número de rotações num dado espaço de tempo – por observação direta, a olho nu, ou com o auxílio de equipamentos específicos (e.g., taquímetro);
- b) estimativas a partir da resposta de equipamentos acoplados à roda, uma vez conhecendo-se as características operacionais o tal equipamento – e.g.:

- gerador elétrico, com tensões de trabalho associadas à velocidade de rotação;
- dinamómetro, associando-se o parâmetro mensurado (força) com a velocidade.

Determinou-se a velocidade angular da roda (n) a partir da relação de transmissão (t) (Tab. 4-7), do sistema de multiplicação de velocidade, e das aferições à saída do gerador, com um equipamento de análise de potência – *Power Analyser*, da marca Fluke® (Fig. 4-12).



Fig. 4-12 – Equipamentos para análise do aproveitamento elétrico

Tab. 4-7 – Resultado: relação de transmissão

Grandeza	Valor	Unidade	Descrição / Observações
d _{p,1}	254,68	mm	Diâm. primitivo da polia maior (fabricante)
d _{p,2}	45,48	mm	Diâm. primitivo da polia menor (fabricante)
t	5,60	-	Relação de transmissão

Onde, vide Tab. 4-7:

$$t = \frac{d_{p,1}}{d_{p,2}} \quad (4.20)$$

Logo, para a estimativa da rotação da roda, n :

$$n = \frac{n_{ger}}{t} \quad (4.21)$$

4.2.2.2 Velocidade tangencial da roda (U)

O fluxo advém da tubagem e atinge o ponto de descarga com velocidade V – obtida na secção anterior (da eq. de Bernoulli ou a partir do caudal volúmico) – e, ao atingir a pá, pelo princípio da conservação da quantidade de movimento, confere a esta uma velocidade U .

4.2.2.3 Taxa de velocidade (ϕ)

Teoricamente, a eficiência duma turbina de ação é máxima quando a velocidade da pá (U) é metade da velocidade do jato (V) (MURTY, 2018). Isto pode ser expresso em termos duma taxa de velocidade ϕ – logo, num caso ideal, $\phi = 0,5$ – considerando-se perdas de energia pelo atrito do escoamento sobre a pá e as melhores condições de operação, a taxa de velocidade é, em turbinas Pelton, 0,43-0,48 (MURTY, 2018), 0,45-0,46 (MACINTYRE, 1983). Logo:

$$\phi = \frac{U}{V} \quad (4.22)$$

4.2.2.4 Velocidade específica da roda (n_s)

Trata-se de um dos parâmetros de maior utilidade no dimensionamento de máquinas hidráulicas. A tipologia da máquina, quanto a trajetória do fluido no rotor, é fortemente influenciada pela velocidade específica. Após um processo de análise dimensional – em vista da associação de variáveis de interesse – uma expressão útil de n_s é (MURTY, 2018):

$$n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{(g h)^{0,75}} \quad (4.23)$$

Onde se conhece Q – experimental e que permitiu estimar a cota útil h – e busca-se estimar n . Pela mesma equação, para um alto valor de n_s – em função de caudais elevados e/ou baixas cotas – uma larga área é requerida para recepção do fluxo. Neste caso há um melhor enquadramento de máquinas axiais – a área é proporcional ao quadrado do diâmetro do rotor.

Em contrapartida, para máquinas enquadradas em baixos valores de n_s tem-se baixos caudais – logo, cotas elevadas. Nesta faixa ajustam-se melhor as máquinas de escoamento radial – a área para recepção do fluxo, dada pelo produto com a altura da pá, é linearmente proporcional.

Assim sendo, a medida em que se aumenta a velocidade específica, os perfis que melhor se ajustam para uma mudam de puramente radiais, para mistos e puramente axiais – no sentido do aumento da eficiência da máquina, como é mostrado na Fig. 4-13 (MURTY, 2018).

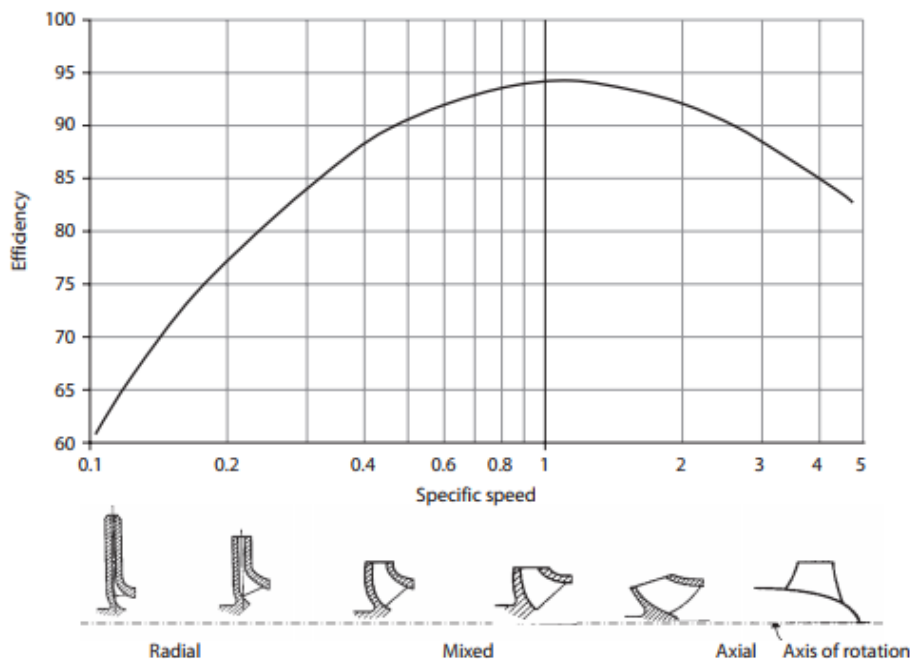


Fig. 4-13 – Eficiência vs. velocidade específica para diferentes perfis de rotor
Fonte: Murty (2018).

Logo, n_s é útil na seleção daquela tipologia apropriada para a maior eficiência.

Tab. 4-8 – Faixas de velocidade específica para várias máquinas hidráulicas

Turbomachine	Specific Speed ^a Range
Pelton wheel	0.03–0.3
Francis turbine	0.3–2.0
Kaplan turbine	2.0–5.0
Centrifugal pumps	0.2–2.5
Axial flow pumps	2.5–5.5
Radial flow compressors	0.5–2.0
Axial flow compressors, blowers	1.5–20.0
Axial flow steam and gas turbines	0.4–2.0

Fonte: Murty (2018).

4.2.2.5 Velocidade angular do gerador (n_{ger})

A rotação da turbina, do rotor ou do veio a ele/ela acoplado está relacionada com a velocidade síncrona do gerador conectado ao sistema – n_{ger} é dado por (MURTY, 2018):

$$n_{ger} = \frac{120 f}{N_p} \quad (4.24)$$

Onde:

- a) N_p , número de polos – é uma característica construtiva do gerador e pôde ser obtido alternativamente pela caracterização prévia, em laboratório, do gerador (Tab. 4-9).
- b) f , frequência de corrente alternada produzida pelo gerador – vide Tab. 4-9.

Tab. 4-9 – Caracterização do gerador em vazio

n_{ger}^*	U_{ac}^*	$(n_{ger}/U_{ac})^*$	U_{dc}^*	$(n_{ger}/U_{dc})^*$	f^*	$(f/n_{ger})^*$	N_p
rpm	Vac	rpm/Vac	Vdc	rpm/Vdc	Hz	Hz/rpm	polos
50	5,60	8,93	6,80	7,35			
100	11,10	9,01	14,40	6,94			
150	16,70	8,98	22,10	6,79	25,10	0,17	20,08
200	22,00	9,09	29,70	6,73	33,50	0,17	20,10
250	27,30	9,16	37,40	6,68	41,80	0,17	20,06
300	33,00	9,09	45,10	6,65	50,10	0,17	20,04
μ		9,04		6,86		0,17	20,00
σ		0,08		0,26		0,00	0,03
u [%]		0,93		3,83		0,13	0,13

Fonte: testes anteriores.

$$n_{ger} = U_{ac}/dc \left(\frac{n_{ger}}{U_{ac}/dc} \right)^* \quad (4.25)$$

Onde U_{ac}/dc (U_{ac} ou U_{dc}) é a tensão aferida à saída do gerador. Adicionalmente:

$$f = n_{\text{ger}} \left(\frac{f}{n_{\text{ger}}} \right)^* \quad (4.26)$$

4.2.3 Potência (P) e eficiência (η_r) da roda

A eficiência da roda (η_r) é dada por:

$$\eta_r = \frac{P}{P_h} \quad (4.27)$$

No caso em estudo (Fig. 4-14) tem-se a potência em várias formas:

- a) P_h (potência hidráulica útil) para P (potência da roda), impacto dos sobre as pás;
- b) P , transmitida para os braços e, depois, para o veio;
- c) ainda P , no veio – apoiado sobre chumaceiras fixadas na estrutura de suporte e a estrutura de suporte apoiada/fixa sobre o tanque – é acoplada a polia maior;
- d) P para potência mecânica à entrada do gerador (ou potência de transmissão) (P_t), através duma correia sincronizadora até a polia menor, acoplada ao gerador elétrico, para a multiplicação da velocidade;
- e) P_t para potência elétrica à saída do gerador elétrico (P_{ger});
- f) P_{ger} , já como eletricidade, para o seu aproveitamento/uso final na forma de cargas – sejam elas apenas reóstatos (para testes) ou microinversores fotovoltaicos para intermediar a conexão com a rede elétrica e etc.

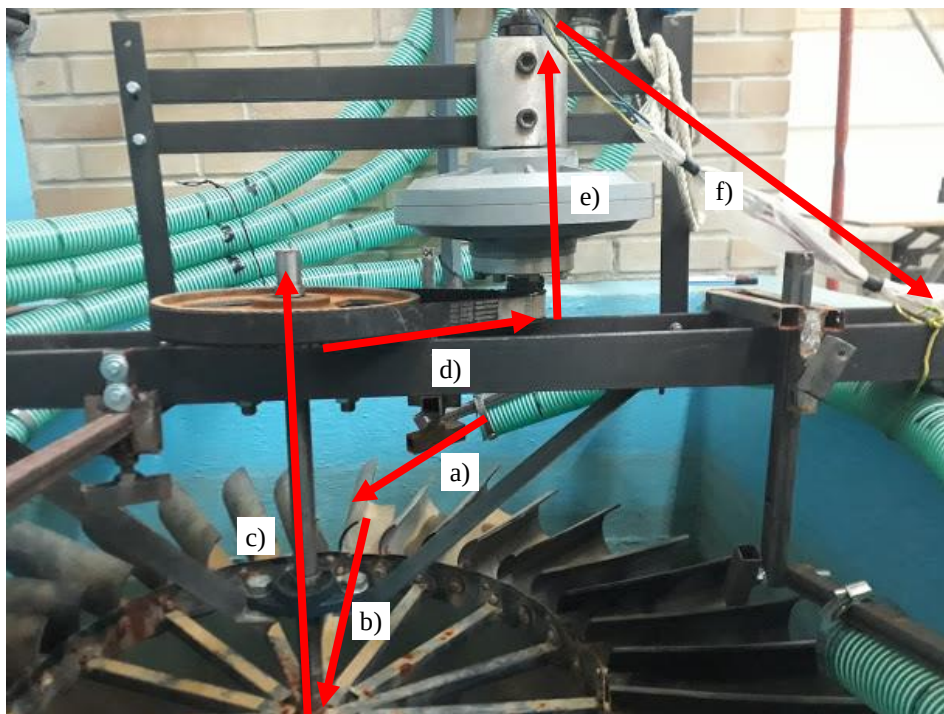


Fig. 4-14 – Plataforma: cadeia de transformação da energia

Conforme a cadeia descrita na Fig. 4-14, a livre rotação da roda é permitida por rolamentos acoplados às chumaceiras. Estes elementos também influem na perda de rendimento da roda, em função do atrito – todavia, a sua influência é desprezível em relação à magnitude das ineficiências associadas ao impacto dos jatos sobre as pás da roda, e.g. Logo, admite-se uma mesma potência ao longo de toda extensão do veio, onde é experimentada a potência P .

4.2.4 Potência (P_t) e eficiência (η_t) de transmissão

A potência na ponta superior do veio da roda (P) é transmitida para o gerador através duma correia. Pode-se atribuir uma potência de transmissão (P_t) associada à ponta do veio do gerador. Neste trecho da cadeia também ocorre ineficiência no processo, logo, pode-se atribuir uma expressão para a eficiência do sistema de transmissão (η_t), dada pela seguinte equação:

$$\eta_t = \frac{P_t}{P} \quad (4.28)$$

Na plataforma faz-se uso de polias e correia sincronizadoras. A correia em si apresenta uma eficiência maior ou igual à 98%, todavia, a eficiência de sistemas de transmissão no todo, e devidamente mantidos, varia entre 95% e 98% (MOTT; VAVREK; WANG, 2018).

Tab. 4-10 – Resultado: estimativa da eficiência do sistema de transmissão

Grand.	Valor	Unid.	Descrição / Observações
$\eta_{t,méd}$	0,97	-	Eficiência de transmissão média, a partir dos valores limiares da literatura
σ	0,02		
u	2,2	%	

A incógnita P_t é obtida analisando-se a potência elétrica à saída do gerador (P_{ger}). Adotou-se a análise da potência mecânica da roda através do gerador elétrico tendo em vista o contexto do projeto, i.e., avaliação do potencial de conexão à rede/produção de energia elétrica.

Logo:

$$P = \frac{P_t}{\eta_t} \quad (4.28a)$$

4.2.5 Potência (P_{ger}) e eficiência (η_{ger}) do gerador elétrico

O gerador elétrico, que entra em movimento através da correia, é colocado em carga. utilizando-se reóstatos e microinversores fotovoltaicos. Neste sentido, cria-se uma resistência à passagem dos elétrons – os quais se movimentam a partir da rotação da roda. E, bem como no processo mecânico, o processo elétrico também apresenta suas ineficiências (e.g., efeito Joule – pelo aquecimento do condutor em função da sua resistência à passagem da corrente).

No processo mecânico, desconsiderou-se as perdas pela resistência dos rolamentos em função da magnitude irrisória em relação às perdas associadas à roda de água e o impacto do jato sobre as pás. Analogamente, para o processo elétrico desconsidera-se as ineficiências do circuito frente àsquelas do gerador utilizado – logo, o gerador vem com a sua eficiência (η_{ger}).

Conforme Leite et al. (2012), nos sistemas convencionais o gerador elétrico opera a uma velocidade constante, a fim de aproximar a velocidade de rotação o mais próximo possível da velocidade nominal do gerador. Esta regulação de velocidade é conseguida usando dispositivos mecânicos complexos que ajustam o fluxo de água para que o grupo turbina-gerador satisfaça as variações da potência. Ao contrário dos sistemas convencionais, com as novas abordagens para sistemas pico-hidroelétricos ligados à rede (Leite et al., 2016b), é possível estes sistemas operarem a velocidade variável. Isto é particularmente importante para melhorar a eficiência do sistema e quando é expectável a variação do caudal de água.

A ligação à rede usando inversores fotovoltaicos convencionais tem algumas vantagens importantes, como a conformidade com os requisitos de ligação à rede, ampla gama de produtos (até 5 kW) e, entre outras, constitui uma solução *plug-and-play* (Leite et al., 2016b).

O efeito de η_{ger} na transformação da potência mecânica em potência elétrica vem por:

$$\eta_{\text{ger}} = \frac{P_{\text{ger}}}{P_t} \quad (4.29)$$

Onde se conhece η_{ger} , eficiência do gerador (estimada, vide Tab. 4-11), e P_{ger} , potência elétrica à saída do gerador (aferida com instrumento, vide Fig. 4-12). Logo:

Tab. 4-11 – Estimativas para a eficiência do gerador

Grand.	Valor	Unid.	Descrição/Observações
$\eta_{\text{ger,máx}}$	0,8790	-	Eficiência máx. do gerador (testes)
$\eta_{\text{ger,mín}}$	0,8550		Eficiência mín. do gerador (testes)
$\eta_{\text{ger,méd}}$	0,8670		Média
σ	0,0170		Desvio padrão
u	1,96	%	Incerteza relativa

$$P_t = \frac{P_{\text{ger}}}{\eta_{\text{ger}}} \quad (4.29a)$$

4.3 RESULTADOS E ANÁLISE

Tab. 4-12 – Resultados: protótipo e à sua saída

Grand.	Eq.	Cargas/Condição de teste																Unid.
		Marca dos microinversores, r_ext						Número de reóstatos, r_ext				r_int	Jatos individuais, r_ext (1)					
		BONc	BON	INVc	INV	GWLc	GWL	3c	3	2c	2	1c	2c	nº 1	nº 2	nº 3	nº 4	
DADOS EXPERIMENTAIS																		
Uac		30,73	30,65	30,08	29,63	23,40	23,73	21,93	21,80	15,75	15,85	15,55	19,38	23,05	19,70	18,80	18,63	V
σ		0,17	0,44	0,51	0,56	0,23	0,21	0,10	0,14	0,25	0,10	0,21	0,61	0,07	0,00	0,14	0,21	
Udc		40,13	40,03	39,45	38,78	29,87	29,60	27,48	27,18	18,69	19,31	18,50	24,45	29,72	24,00	23,64	23,37	V
σ		0,10	0,29	0,25	0,57	0,19	0,52	0,24	0,17	0,28	0,10	0,21	0,12	0,40	0,00	0,28	0,15	
Iac		0,30	0,29	0,29	0,32	0,51	0,50	2,98	2,78	4,53	4,23	4,35	3,57	0,98	1,00	1,04	1,05	A
σ		0,01	0,01	0,05	0,05	0,01	0,02	0,05	0,05	0,21	0,05	0,05	0,03	0,02	0,06	0,00	0,01	
Idc		0,26	0,26	0,26	0,28	0,55	0,55	3,49	3,47	5,37	5,28	5,38	4,38	0,92	1,11	1,13	1,13	A
σ		0,03	0,02	0,05	0,04	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	
P_ger		12,00	12,00	11,50	13,00	18,00	18,00	100,00	100,00	115,00	112,50	112,50	115,00	30,00	30,00	28,00	28,00	W
σ		0,00	0,00	3,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,77	5,00	5,00	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	
ESTIMATIVAS																		
P_t	4.29a	13,84	13,84	13,26	14,99	20,76	20,76	115,34	115,34	132,64	129,76	129,76	132,64	34,60	34,60	32,30	32,30	W
P	4.28a	14,34	14,34	13,75	15,54	21,51	21,51	119,52	119,52	137,45	134,46	134,46	137,45	35,86	35,86	33,47	33,47	W
n_ger(Udc)	4.25	275	275	271	266	205	203	188	186	128	132	127	168	204	165	162	160	rpm
n_ger(Uac)		278	277	272	268	212	215	198	197	142	143	141	175	208	178	170	168	rpm
ω_ger	4.19b	29,10	29,03	28,48	28,05	22,16	22,47	20,76	20,64	14,92	15,01	14,73	18,35	21,83	18,66	17,80	17,64	rad/s
f	4.26	46,03	45,92	45,26	44,48	34,26	33,96	31,53	31,18	21,44	22,15	21,22	28,05	34,09	27,53	27,12	26,81	Hz
n_ger	4.24	276,20	275,51	271,56	266,91	205,58	203,74	189,16	187,06	128,65	132,92	127,31	168,30	204,54	165,20	162,73	160,89	rpm
n	4.21	49,62	49,50	48,57	47,84	37,79	38,31	35,41	35,20	25,43	25,60	25,11	31,29	37,22	31,81	30,36	30,08	rpm
ω	4.19b	5,20	5,18	5,09	5,01	3,96	4,01	3,71	3,69	2,66	2,68	2,63	3,28	3,90	3,33	3,18	3,15	rad/s
n_s	4.23	1,43	1,43	1,40	1,38	1,09	1,11	1,02	1,02	0,74	0,74	0,73	0,90	1,08	0,92	0,88	0,87	-
T	4.12	2,76	2,77	2,70	3,10	5,44	5,36	32,24	32,42	51,61	50,17	51,13	41,95	9,20	10,76	10,53	10,63	N·m
F	4.11	4,81	4,82	4,71	5,41	9,48	9,35	56,21	56,53	89,98	87,47	89,16	128,48	16,04	18,77	18,35	18,53	N
U	4.19a	2,98	2,97	2,92	2,87	2,27	2,30	2,13	2,11	1,53	1,54	1,51	1,07	2,24	1,91	1,82	1,81	m/s
φ	4.22	0,56	0,56	0,55	0,54	0,43	0,43	0,40	0,40	0,29	0,29	0,28	0,20	0,42	0,38	0,38	0,42	-
W_i	4.16	2,01	2,02	2,08	2,12	2,72	2,69	2,87	2,88	3,47	3,46	3,49	3,92	2,76	2,86	2,63	2,26	m/s
η_r	4.27	2,43	2,43	2,33	2,63	3,65	3,65	20,27	20,27	23,31	22,80	22,80	23,31	18,73	19,53	19,45	21,22	%

Nota – Abreviações utilizadas:

c – com condensador.

r_ext – ponto de ataque dos jatos no raio externo da roda.

r_int – ponto de ataque dos jatos no raio interno da roda.

BON – marca BE-ON®.

INV – marca Involar®.

(1) Teste com 2 reóstatos e com condensador.

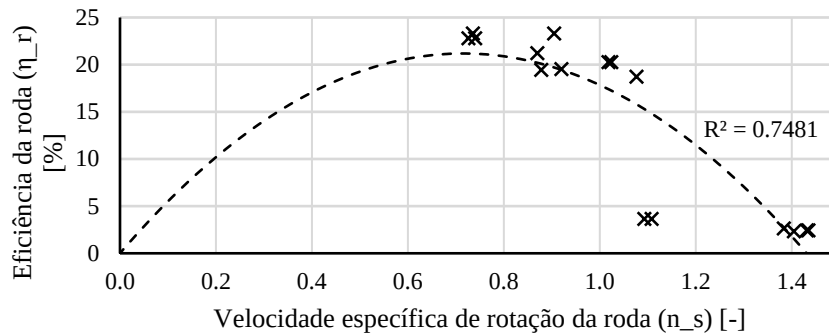


Fig. 4-15 – Resultado: eficiência da roda vs. velocidade específica de rotação

A curva teórica dada pela literatura mostra a máxima eficiência que uma dada tipologia de máquina hidráulica pode alcançar à uma dada velocidade específica. Dadas tipologias têm maior aproveitamento em eficiência em certas faixas de velocidade específica.

Conforme a Tab. 4-12, os parâmetros dos testes na plataforma levaram a uma faixa de n_s de 0,73-1,43. Neste caso, vide Tab. 4-8, a tipologia que melhor enquadrar-se-ia para o caso em estudo seria uma turbina Francis. Uma roda de água horizontal pode ter o seu princípio de funcionamento considerado análogo ao duma turbina Pelton n_s de 0,03-0,3 (Tab. 4-8) – isto justifica o trabalho com eficiências afastadas daquelas correspondentes à faixa atual de n_s .

Teoricamente, a maior eficiência duma máquina hidráulica é alcançada em $n_s \cong 1$. Vide Tab. 4-12, a maior eficiência atingida pelo protótipo foi de 23,31% – próximo aos 24%, vide Pujol et al. (2015) – o que pode ser considerado um valor satisfatório para as presentes condições. A maior eficiência do protótipo foi a mesma atingida para o raio de descarga tanto na porção interna quanto na externa da roda, para uma mesma condição de carga.

Aquando do uso de microinversores como carga, estes colocaram o protótipo muito próximo à faixa teórica ideal de operação de turbinas de ação, no que toca a taxa de velocidade (ϕ). No entanto, estes extraíram pouca potência ($\eta_r < 4\%$). O uso de condensadores representou um caso adicional de carga elétrica nos testes, sem efeitos expressivos para a presente análise.

O contributo energético mínimo anual da roda vem de 70% dos dias do ano, pelas paragens para manutenção e redução do caudal do rio. A potência que chega à roda de água depende da eficiência do circuito hidráulico. A potência que será entregue para o uso final depende da eficiência da interface para conexão à rede (microinversor, e.g.).

5 CONCLUSÃO

Por meio do presente documento permitiu-se a apreciação duma série de desafios à construção e estabelecimento duma unidade pico-hídrica. Os resultados da caracterização e os desafios construtivos no estabelecimento da plataforma configuram uma importante referência, seja para o direcionamento do projeto às etapas subsequentes e/ou na indicação de melhorias relativamente ao que já existe no que toca os procedimentos adotados.

Agora com uma eficiência máxima atingida pelo protótipo e validada frente à literatura, tem-se uma estimativa devidamente amparada/sustentada no tocante ao contributo da roda de água para a Casa da Seda. Entretanto, uma forma mais eficiente de conexão à rede deve ser avaliada e melhor explorada. Para tanto, a solução inovadora de microinversores fotovoltaicos mostrou-se interessante pelo fato de adaptar uma carga ótima à roda de água – sem a necessidade de variá-la manualmente como quando a carga foi dada por reóstatos.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se um processo constante de melhorias ao longo do trabalho junto à plataforma, seja durante o processo de montagem ou após os primeiros testes. As dificuldades e/ou restrições foram pertinentes à evolução do projeto, oportunidades de aprendizado e experiência – imprescindíveis para a melhoria contínua. Salienta-se que este vem na continuidade de produções que já delineavam etapas executadas e aqui relatadas.

No contexto dum projeto real, a multidisciplinaridade identificada ao longo deste projeto mostrou-se engrandecedora – num ambiente entre as áreas da eletrotecnia e mecânica.

Em particular à mecânica, conhecimentos de suas diversas áreas foram exercitados:

- a) processos de fabrico: maquinagem; conformação mecânica; soldadura;
- b) mecânica dos fluidos: perda de carga em tubagens e elementos anexos; determinação de caudal volúmico e velocidade do escoamento e etc.;
- c) elementos de máquinas: elementos de fixação, de transmissão e etc.

Um procedimento de desenvolvimento do projeto poderia ter sido melhor definido ou claramente adotado desde o princípio do projeto. O projeto poderia alcançar um estágio muito mais avançado a ponto de já haver uma roda de água instalada na Casa da Seda, a partir de um modelo validado, seja experimental (através da unidade para teste) e/ou computacionalmente.

O processo de fabrico de algumas partes da plataforma deu-se no LTM, sua montagem, instalação e testes deram-se no LG. Dentro deste cenário encontraram-se algumas restrições: afastamento dos laboratórios dentro da mesma escola; indisponibilidade de algumas máquinas do LTM (para a utilização do LTM demanda-se pela presença de um responsável, além deste laboratório atender ao horário de expediente). Isto exigiu planeamento no sentido do deslocamento de máquinas e ferramentas do LTM para a plataforma (no LG) ou mobilizar os componentes para proceder as respetivas modificações no próprio LTM. Fatores “logísticos” foram condicionantes na tomada de decisão para a realização de determinada tarefa/ação.

O mesmo ocorreu para o acompanhamento e suporte na realização dos testes, na questão da disponibilidade daqueles competentes da área da eletrotecnia (demanda de pessoal).

5.2 TRABALHOS FUTUROS

No sentido da manutenção dum aspeto uniforme à plataforma e para a proteção contra a corrosão – principalmente em caso da continuidade da sua utilização – sugere-se a pintura dos principais elementos estruturais, nomeadamente aqueles em constante contacto com a água.

Salienta-se a importância de tornar o protótipo e a unidade testes o mais adaptáveis possível. No sentido de privilegiar a praticidade na variação dos parâmetros em estudo – e, assim, minimizando-se tempo e esforço para os testes em diferentes cenários – sugere-se:

- a) fixação das pás: um modelo de roda de água com sistema de engate (fixação) rápido das pás ao anel externo, bem como do ajuste da inclinação das mesmas;
- b) bocais de engate rápido: para o teste de bocais de diferentes diâmetros para o aumento da velocidade de descarga da água sobre as pás da roda;
- c) aperfeiçoamento do sistema de içamento da roda: sistema criado para facilitar a remoção/colocação do modelo a ser testado. Substituir os atuais suportes de rodízios por roldanas específicas e melhorar o apoio do perfil transversal;
- d) aperfeiçoar o sistema de fixação da tubagem próximo do ponto de descarga: atualmente a tubagem encontra-se fixada por abraçadeiras metálicas. Verificar a necessidade de um sistema para o fácil ajuste da fixação da tubagem neste ponto;
- e) sistema de cota variável: verificar a possibilidade de um sistema de elevação do reservatório superior. Neste caso, num modelo de reservatório que contenha um menor volume de água (menor peso), mas que seja possível de ser içado e permita testes em cotas mais elevadas. Observar também as tubagens anexadas a este reservatório, que sejam adaptáveis à variação da altura do mesmo;

f) sistema de multiplicação de velocidade variável: o câmbio CVT dos automóveis serve de modelo interessante a se replicar. Nestes moldes, tal sistema permite uma mudança fluida e sem paragens da velocidade à entrada do gerador – em vista da compatibilização da velocidade com o mesmo e/ou com microinversor.

A bomba centrífuga, que atende ao reservatório da unidade de testes de rodas de água, também atende a uma unidade de testes de turbinas de reação (ou sucção – provocada pela coluna de água à jusante da turbina). Após a derivação para o reservatório superior de cada unidade existe uma válvula controladora de fluxo – i.e., para os testes com a roda, abre-se a respetiva válvula e fecha-se aquela da outra unidade e vice-versa. Sugere-se aperfeiçoar a forma de controlo destas válvulas – até então, demanda-se o deslocamento até estas para manipulá-las lembrando que ficam em um sítio distante do piso, próximas ao teto do laboratório.

O modelo de roda de água horizontal atual não é o definitivo a ser destinado para a Casa da Seda, todavia este contempla os componentes fundamentais duma futura versão que venha a ser desenvolvida. Sublinha-se reavaliar, em benefício da eficiência da roda/sistema:

- a) a geometria das pás: observar a minimização dos respingos – os quais caracterizam uma perda de energia, no contexto da conservação da transferência da quantidade de movimento sobre as mesmas;
- b) o número de pás: verificar o efeito da variação do número de pás;
- c) o diâmetro dos bocais/jatos – para o aumento da velocidade de descarga – observar a perda de carga originada pela redução da área no ponto de descarga da tubagem;
- d) a multiplicação da velocidade para o gerador: observar que, quando em carga, surge uma resistência à rotação do gerador e, logo, da roda. Verificar o efeito dessa redução da rotação na compatibilidade da rotação de operação do gerador.

No tocante ao sistema da plataforma como um todo, a emulação das condições da Casa da Seda em âmbito laboratorial não se restringe apenas ao contexto hidráulico. Em termos da avaliação da forma final da energia, sugere-se novos testes de ligação à rede elétrica em benefício da maximização da energia extraída – seja com outros inversores fotovoltaicos, como inicialmente já feito, e/ou com outros componentes que mostrarem pertinente o seu estudo.

REFERÊNCIAS

Livros

BRAN, R.; DE SOUZA, Z. **Máquinas de fluxo: turbinas, bombas e ventiladores**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1980.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid mechanics: fundamentals and applications**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2018.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J.; MITCHELL, J. W. **Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics**. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

HARVEY, A. **Micro-hydro design manual: a guide to small-scale water power schemes**. London: Intermediate Technology Publications, 1993.

HENN, É. A. L. **Máquinas de fluido**. 2. ed. Santa Maria: Editora da UFSM, 2006.

MACINTYRE, A. J. **Máquinas motrizes hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.

MOTT, R. L.; VAVREK, E. M.; WANG, J. **Machine elements in mechanical design**. 6. ed. New York: Pearson, 2018.

MOTTA, R. **Projetos mecânicos**. 2010. Apostila, Disciplina de Projetos Mecânicos (Curso Técnico em Mecânica) – Departamento Regional de Santa Catarina, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Florianópolis, 2010.

MURTY, V. D. **Turbomachinery: concepts, applications, and design**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2018.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (EDS.). **Engineering design: a systematic approach**. 3. ed. London: Springer, 2007.

WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

WILSON, D. G.; KORAKIANITIS, T. **The design of high-efficiency turbomachinery and gas turbines**. 2. ed. Cambridge: MIT, 2014.

Artigos e outros trabalhos acadêmicos

DA ROCHA, B. R. M. **Estudo e concepção de estrutura de testes para pico-hídrica**. 2017. Dissertação (Mestrado em Eng. Industrial, Ramo Eng. Mecânica) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2017.

DA SILVA, W. M. **Concepção de um sistema autossustentável para um edifício de divulgação de ciência: a Casa da Seda**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial, Ramo Engenharia Eletrotécnica) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2017.

DA SILVA, W. M.; LEITE, V.; FERREIRA, A.; QUEIJO, L.; BATISTA, J.; BONALDO, J.; GONÇALVES, E. Design of a self-sustainable system based on renewable energy sources for a small museum of science dissemination: The House of Silk. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE EMPREENDEDORISMO, ENERGIA, AMBIENTE E TECNOLOGIA (CIEEMAT), 3., 2017, Bragança.

LEITE, V.; FERREIRA, A.; COUTO, J.; BATISTA, J. A practical approach for grid-connected pico-hydro systems using conventional photovoltaic inverters. In: IEEE INTERNATIONAL ENERGY CONFERENCE (ENERGYCON) 2016a, Leuven.

_____. Abordagens para a ligação à rede de sistemas pico-hidroelétricos. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE EMPREENDEDORISMO, ENERGIA, MEIO AMBIENTE E TECNOLOGIA (CIEEMAT), 2., 2016b, Angra dos Reis.

_____. Compatibility analysis of grid-connected pico-hydro systems using conventional photovoltaic inverters. In: EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS (EPE), 18., 2016c, Karlsruhe.

_____. Grid-connection approaches for pico-hydro systems. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE EMPREENDEDORISMO, ENERGIA, MEIO AMBIENTE E TECNOLOGIA (CIEEMAT), 2., 2016d, Angra dos Reis.

LEITE, V.; FIGUEIREDO, T.; PINHEIRO, T.; FERREIRA, A.; BATISTA, J. Dealing with the very small: first steps of a picohydro demonstration project in an university campus. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE EMPREENDEDORISMO, ENERGIA, MEIO AMBIENTE E TECNOLOGIA (ICREPQ), 2., 2012, Santiago de Compostela.

PAISH, O. **Small hydro power**: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. l.], v. 6, n. 6, p. 537–556, 2002.

PUJOL, T.; MONTORO, L. High hydraulic performance in horizontal waterwheels. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 35, p. 2543–2551, 2010.

PUJOL, T.; VASHISHT, A. K.; RICART, J.; CULUBRET, D.; VELAYOS, J. Hydraulic efficiency of horizontal waterwheels: laboratory data and CFD study for upgrading a western Himalayan watermill. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 83, p. 576–586, 2015.

Referências complementares

DIÁRIO DA REPÚBLICA. **Decreto-Lei nº. 49/2015**. 2015. p. 1804–1806.

HIDRAULICART. **Acessórios em latão**. 2016. Disponível em: <hidraulicart.pt/loja-online/acessorios-latao/>. Acesso em: 1 jul. 2019.

PRIBERAM INFORMÁTICA. **Dicionário Priberam da Língua Portuguesa**. 2018. Disponível em: <dicionario.priberam.org/>. Acesso em: jul. 2019.

TUFANO, D. **Guia prático da nova ortografia**. 1. ed. São Paulo: Melhoramentos, 2008.

Divulgações do projeto

DALMARCO, I. et al. **Prototipagem de uma roda de água horizontal para um edifício de divulgação da ciência**: a Casa da Seda. In: Escola de Verão & Simpósio de Dupla Diplomação (DD2018), 1., 3-5 jul. 2018, Bragança. Resumo. 1 p.

DALMARCO, I. et al. **Prototyping a horizontal water wheel for electricity generation in a small museum**: The House of Silk. In: Congreso Iberoamericano de Ciudades Inteligentes (ICSC-CITIES), 1., 26-27 sep. 2018, Soria. Artigo. 6 p

SILVA, M. et al. **Designing innovative home energy systems for smart cities**: the SilkHouse Project. In: Congreso Iberoamericano de Ciudades Inteligentes (ICSC-CITIES), 1., 26-27 sep. 2018, Soria. Artigo. 17 p.

Normativas – Formatação do documento

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 6024**: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento: apresentação. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 6028**: informação e documentação: resumo: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Normas de apresentação tabular**. 3. ed. Rio de Janeiro, 1993.

INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA. **Regulamento**: Mestrado em Engenharia Industrial. Bragança: Escola Superior de Tecnologia e Gestão, 17 fev. 2010. 21 p. Disponível em: <apps2.ipb.pt/webdocs/portal/download?docId=675>. Acesso em: 29 jun. 2019.

Normativas – Desenhos técnicos

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7165**: símbolos gráficos de solda para construção naval e ferroviária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 8402**: execução de caracter para escrita em desenho técnico. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 8403**: aplicação de linhas em desenhos técnicos: tipos de linhas: larguras das linhas. Rio de Janeiro, 1984.

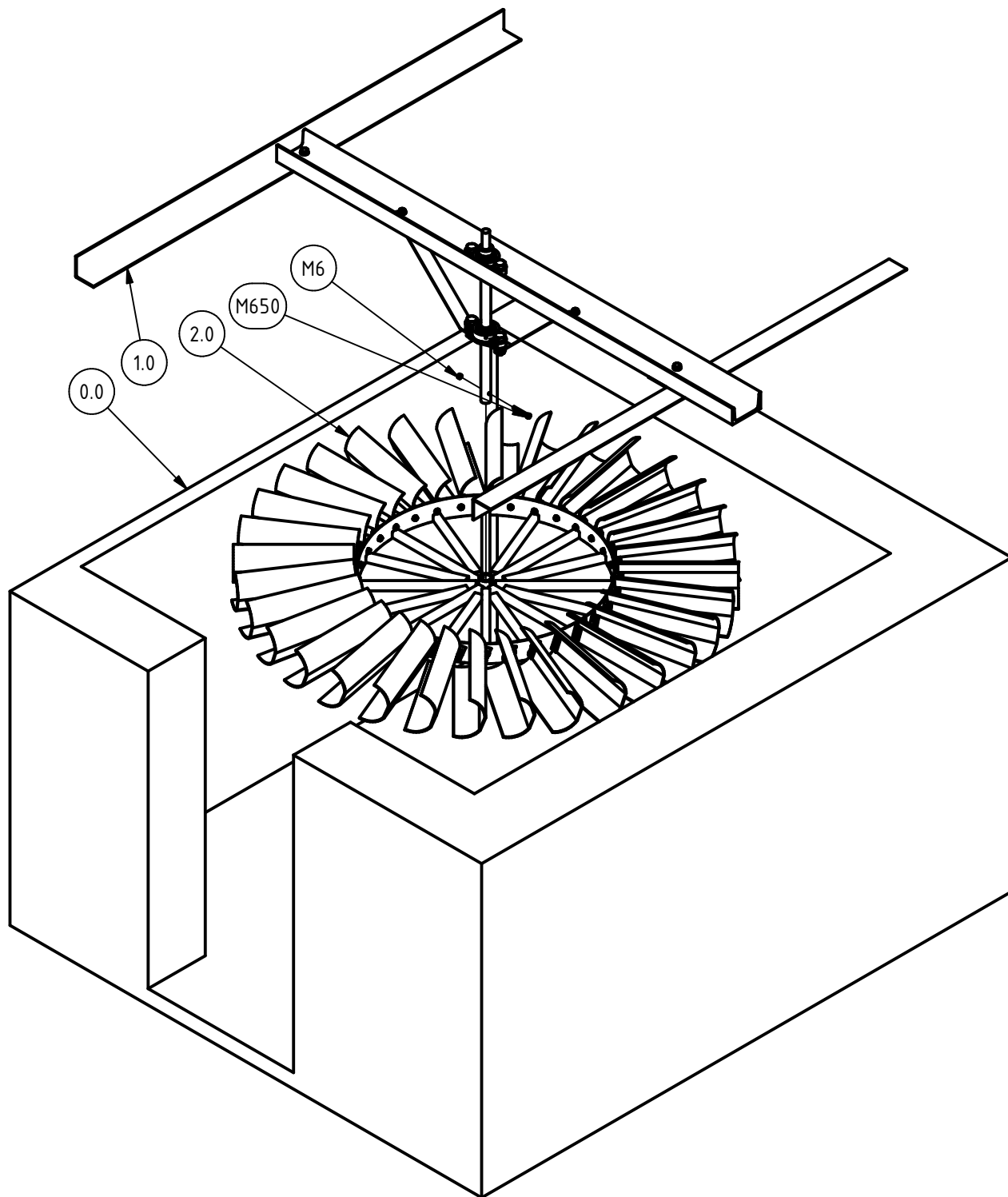
_____. **NBR 10067**: princípios gerais de representação em desenhos técnicos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 10068**: folha de desenho: leiaute e dimensões. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10126**: cotagem em desenho técnico. Rio de Janeiro, 1987.

APÊNDICE A– Desenhos técnicos

Na sequência das próximas páginas (18), o desenho dos conjuntos/grupos construtivos – nomeadamente do modelo preliminar da roda de água e da sua estrutura de suporte sobre o tanque, os quais receberam uma análise com maior atenção no planeamento para o fabrico – bem como dos seus respetivos componentes, lista de materiais e detalhamento da montagem.



M650	Parafuso	Cabeça sextavada - M6 x 1 x 50
M6	Porca	Sextavada - M6 x 1
2.0	Modelo preliminar/Protótipo	Grupo construtivo 2 de 2
1.0	Estrutura de suporte	Grupo construtivo 1 de 2
0.0	Tanque	Betão
POS.	DENOMINAÇÃO	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS



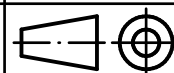
ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco
ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima

PROJETO:
Plataforma para teste de rodas de água horizontais
GRUPO CONSTRUTIVO:
Conjunto final
CATEGORIA DO DESENHO: Montagem

PESO: -

UNID.: mm

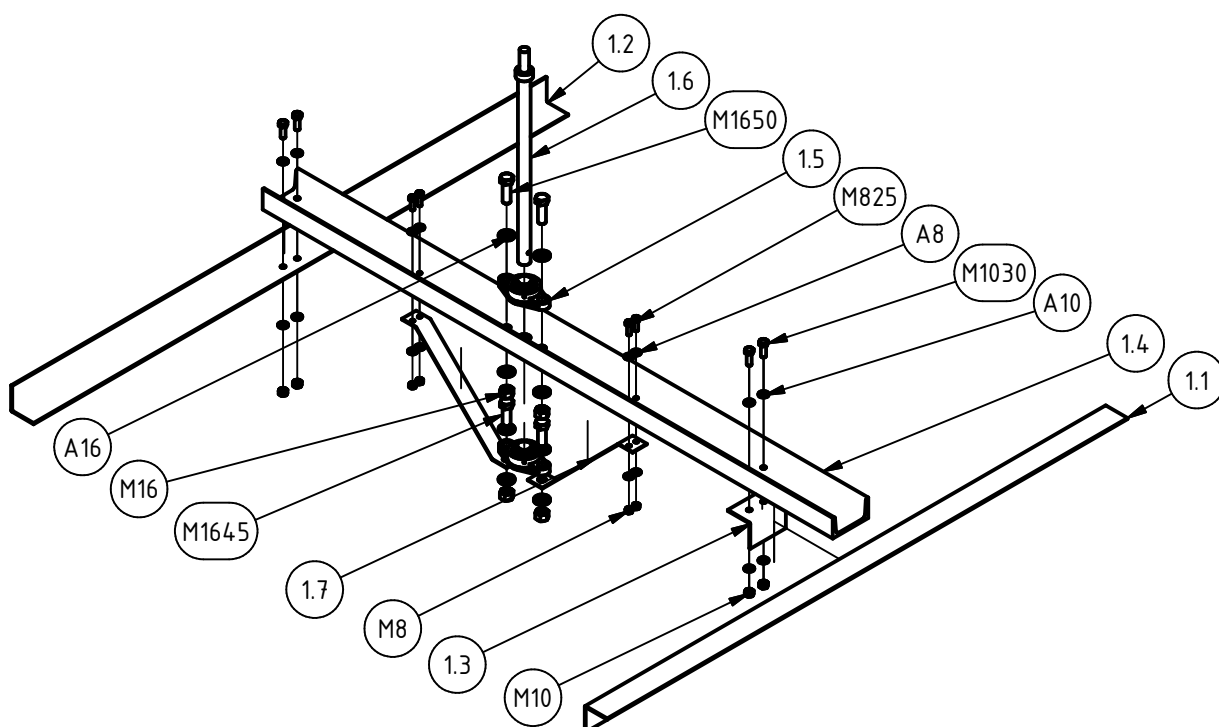
ESC.: 1:15



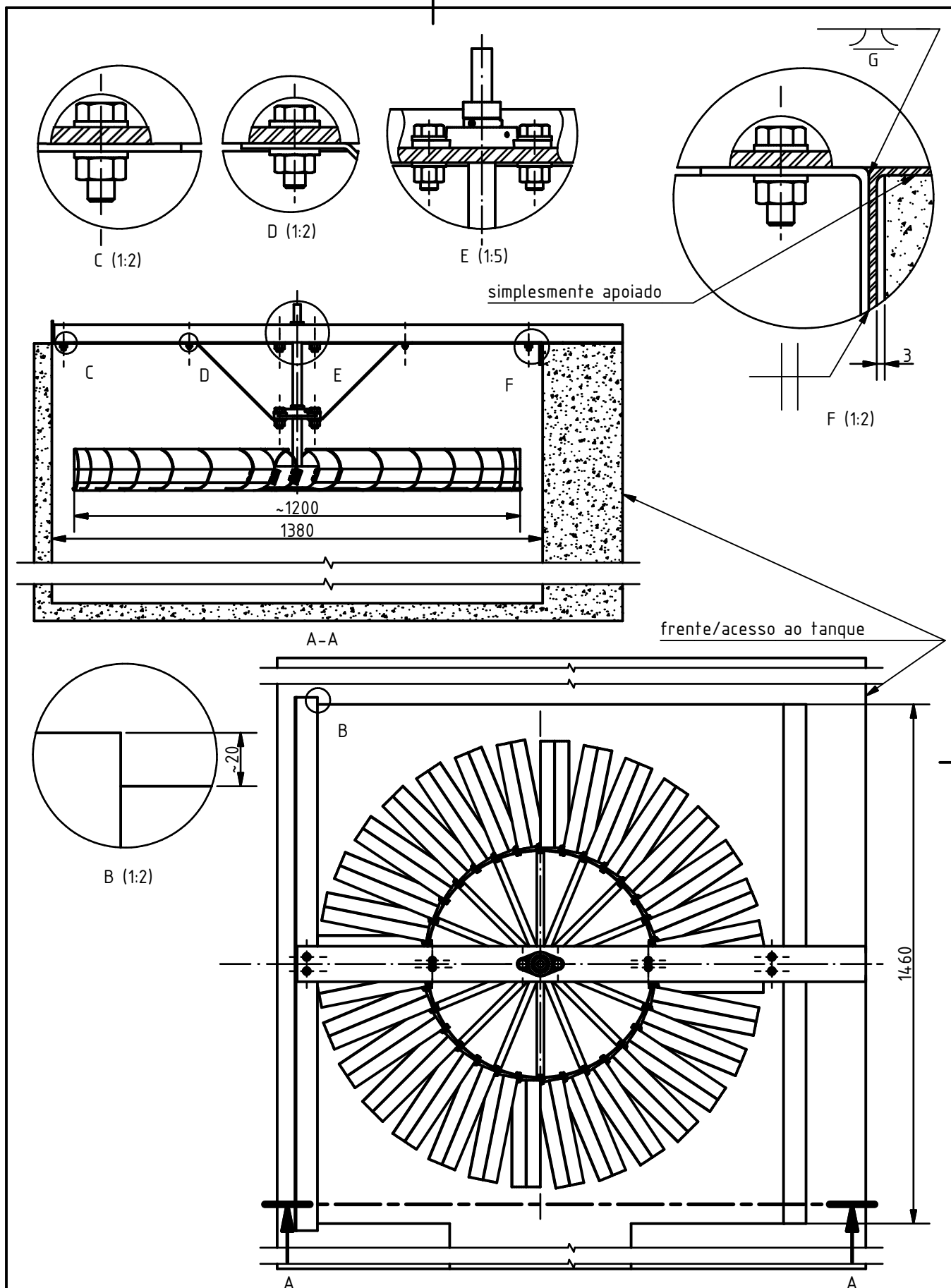
DATA: 2019-05-22

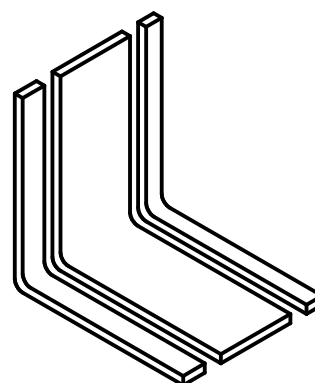
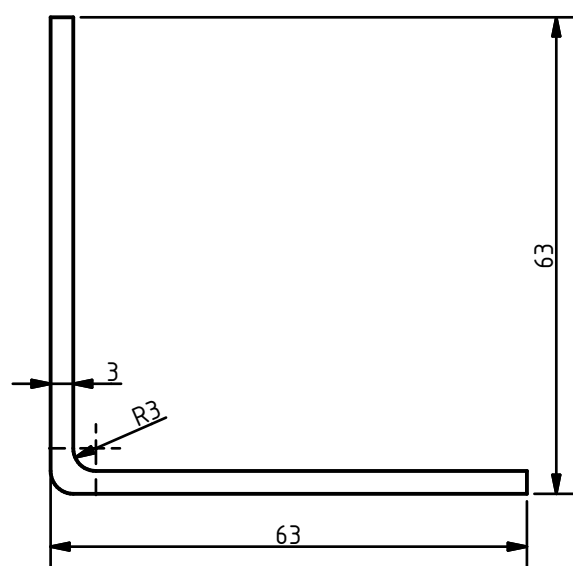
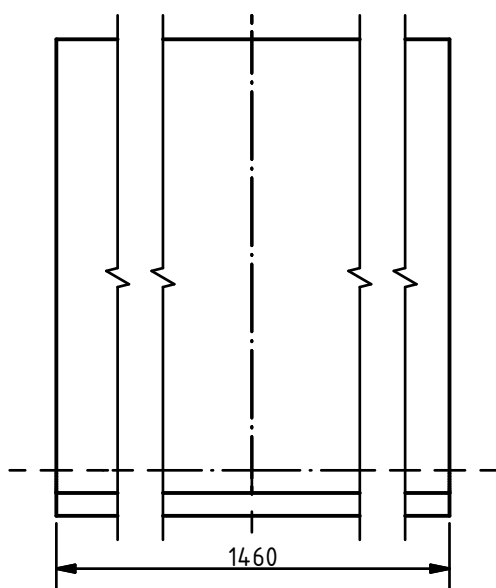
DES. Nº: 1 de 18

REV.: 1013 2355



M825	Parafuso	4	Cabeça sextavada - M8 x 1,25 x 25
M8	Porca	4	Sextavada - M8 x 1,25
M1650	Parafuso	2	Cabeça sextavada - M16 x 2 x 50
M1645	Parafuso	2	Cabeça sextavada - M16 x 2 x 45
M16	Porca	3	Sextavada - M16 x 2
M1030	Parafuso	4	Cabeça sextavada - M10 x 1,5 x 30
M10	Porca	4	Sextavada - M10 x 1,5
A8	Anilha	8	Plana - M8
A16	Anilha	8	Plana - M16
A10	Anilha	8	Plana - M10
1.7	Suporte inferior	2	Dobrado
1.6	Veio	1	Maquinado - 35 (diâm. ext.) x 515 (comprim.)
1.5	Chumaceira	2	Rolamento de esferas
1.4	Perfil U	1x1599 mm	Laminado a quente - Normalizado - U 100 (larg.)
1.3	Perfil L inferior	1x100 mm	Dobrado - Adquirido - L 63 x 63 x 3 (esp.)
1.2	Perfil L distante	1x1500 mm	Dobrado - Adquirido - L 63 x 63 x 3 (esp.)
1.1	Perfil L próximo	1x1460 mm	Dobrado - Adquirido - L 63 x 63 x 3 (esp.)
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS

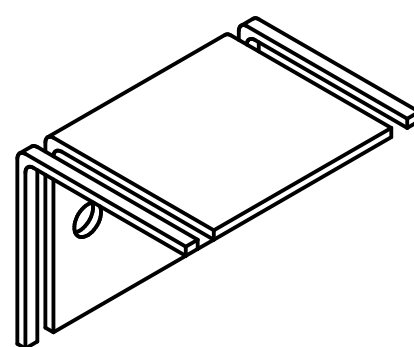
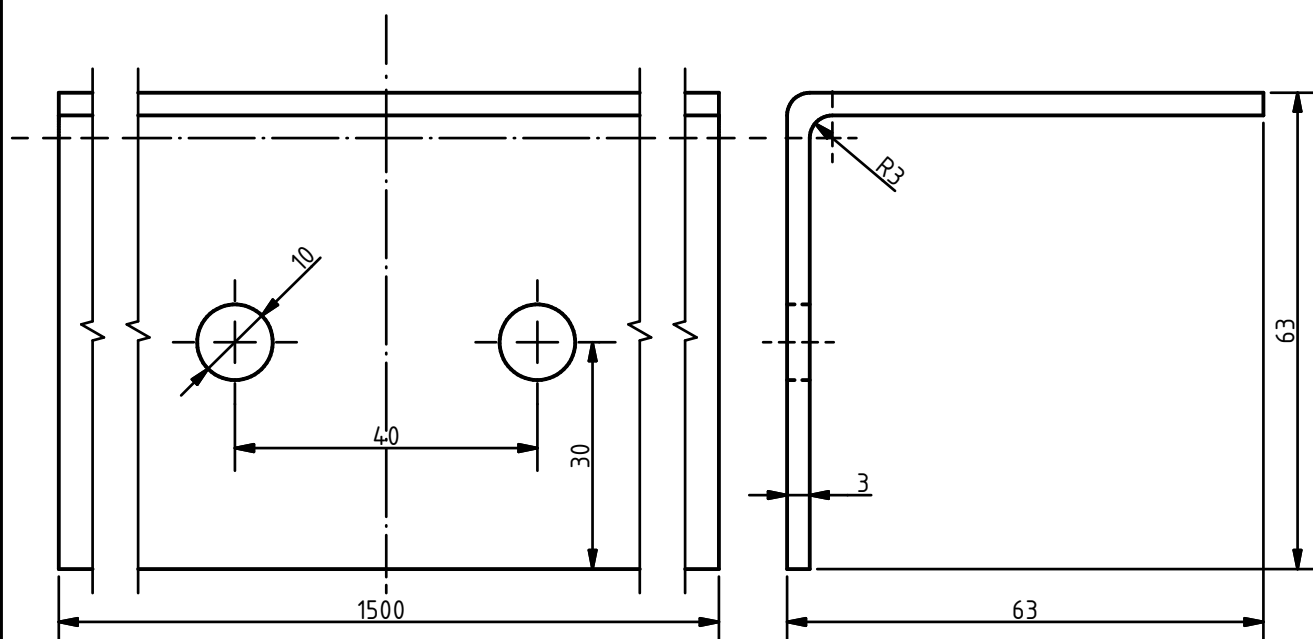




(1:2)

Observação: limar/remover rebarbas

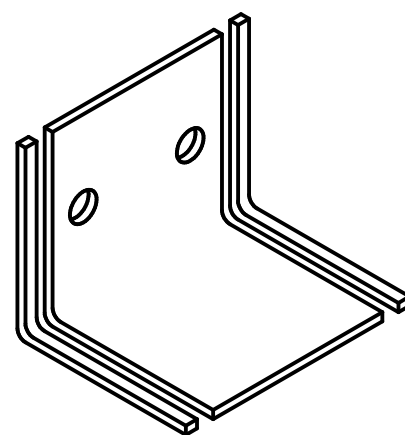
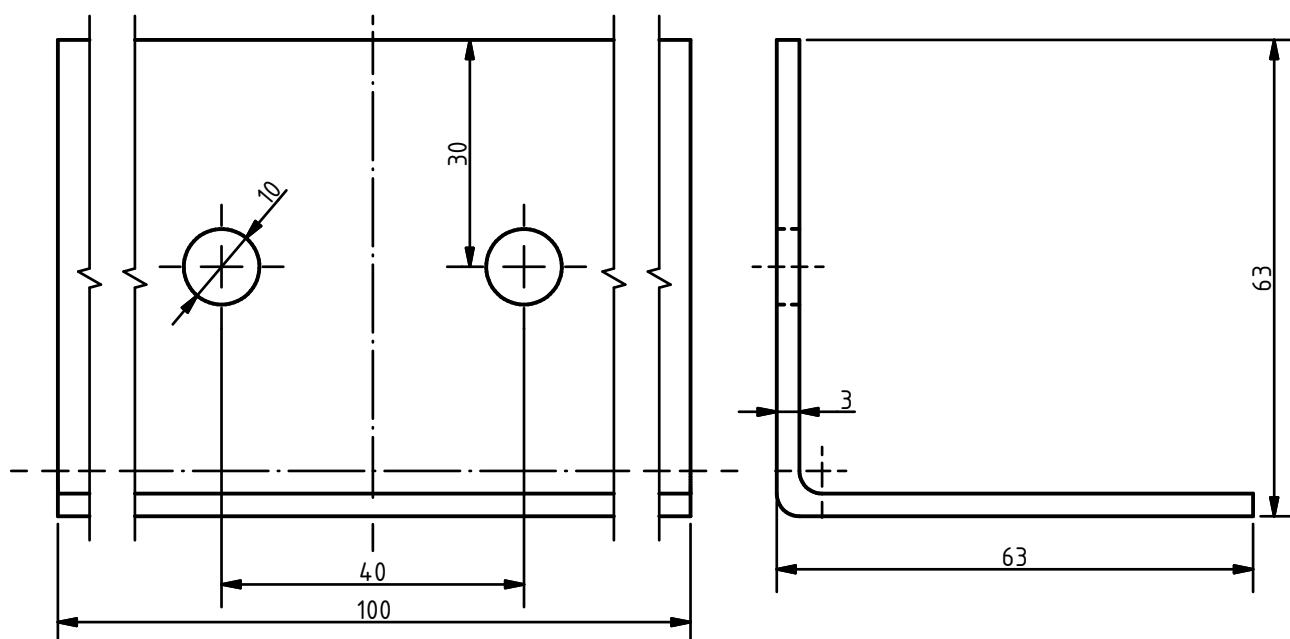
1.1	Perfil L próximo	1460 mm	Dobrado - Adquirido - L 63 x 63 x 3 (esp.)	
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS	
		ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima		PESO: -
				UNID.: mm
		PROJETO: Plataforma para teste de rodas de água horizontais GRUPO CONSTRUTIVO: 1.0 - Estrutura de suporte da roda CATEGORIA DO DESENHO: Componente		ESC.: 1:1
				DATA: 2019-05-22
				DES. Nº: 4 de 18
				REV.: 0927 2345



(1:2)

Observação: limar/remover rebarbas

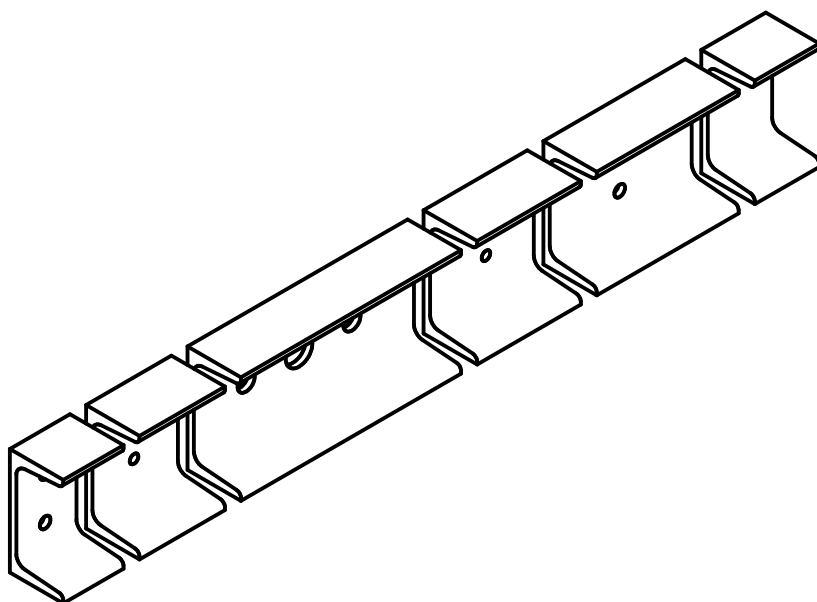
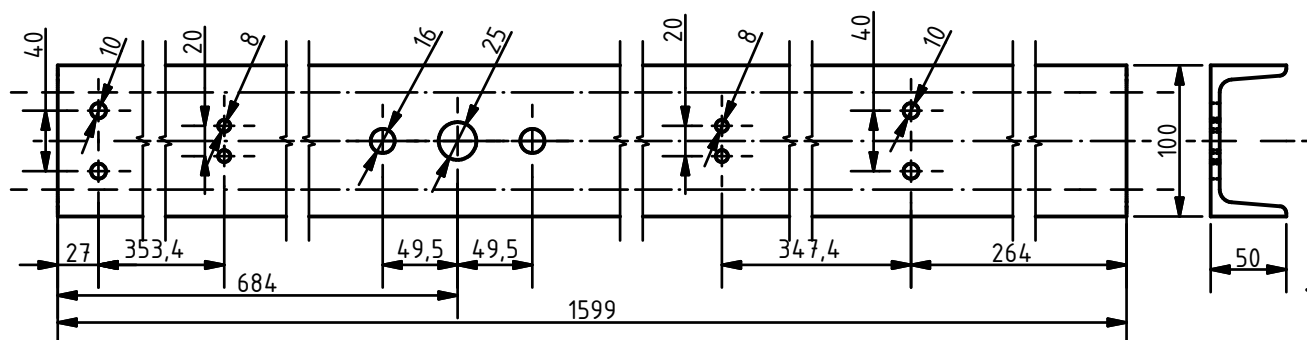
1.2	Perfil L distante	1500 mm	Dobrado - Adquirido - L 63 x 63 x 3 (esp.)		
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS		
		ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima		PESO: -	
				UNID.: mm	
		PROJETO: Plataforma para teste de rodas de água horizontais GRUPO CONSTRUTIVO: 1.0 - Estrutura de suporte da roda CATEGORIA DO DESENHO: Componente		ESC.: 1:1	
					DATA: 2019-05-22
					DES. Nº: 5 de 18
		REV.: 0927 2345			



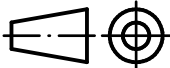
(1:2)

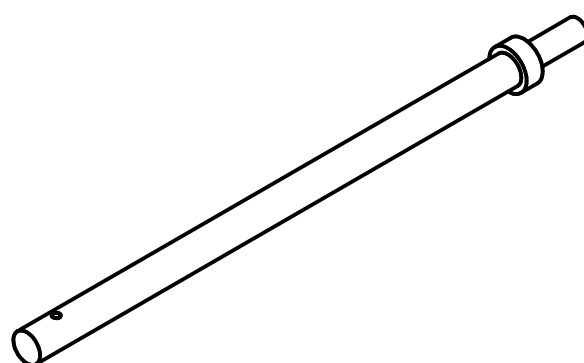
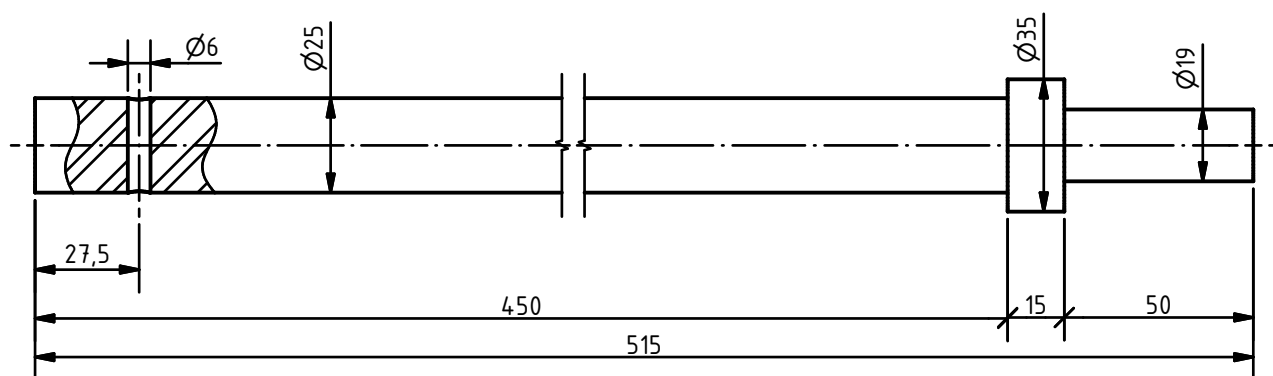
Observação: limar/remover rebarbas

1.3	Perfil L inferior	100 mm	Dobrado - Adquirido - L 63 x 63 x 3 (esp.)		
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS		
		ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco		PESO: -	
		ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima		UNID.: mm	
		PROJETO:		ESC.: 1:1	
		Plataforma para teste de rodas de água horizontais			
		GRUPO CONSTRUTIVO:			DATA: 2019-05-22
		1.0 - Estrutura de suporte da roda			DES. Nº: 6 de 18
CATEGORIA DO DESENHO: Componente		REV.: 0927 2344			



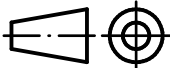
Observação: limar/remover rebarbas

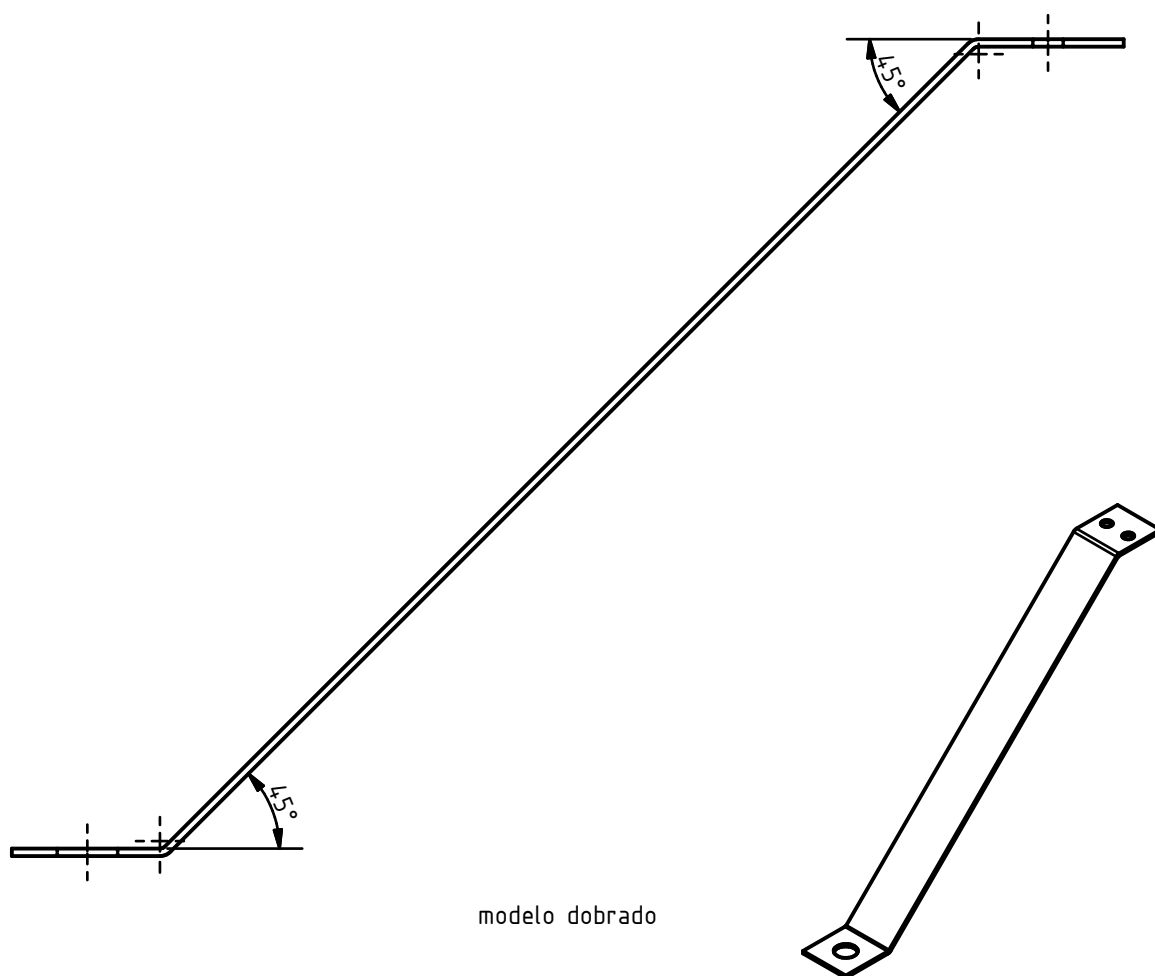
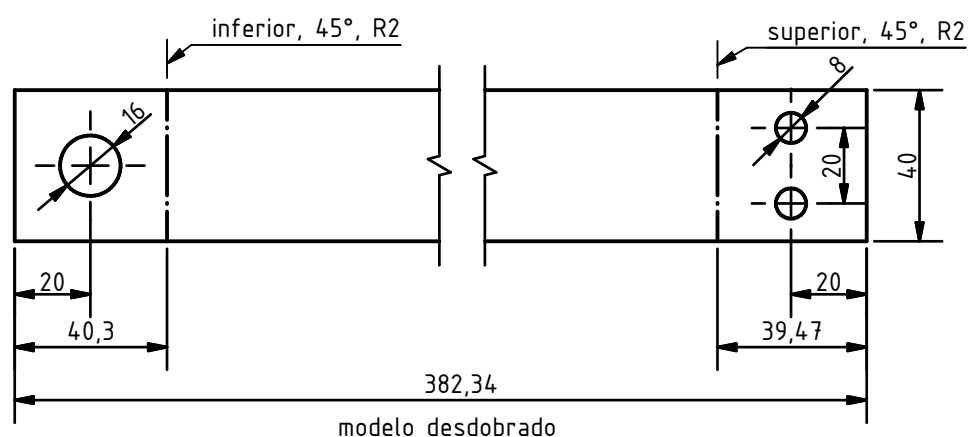
1.4	Perfil U	1x1599 mm	Laminado a quente - Normalizado - U 100 (larg.)
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS
			PESO: -
			UNID.: mm
			ESC.: 1:5
			
			DATA: 2019-05-22
ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima			DES. Nº: 7 de 18
PROJETO: Plataforma para teste de rodas de água horizontais GRUPO CONSTRUTIVO: 1.0 - Estrutura de suporte da roda CATEGORIA DO DESENHO: Componente			REV.: 1013 2355



(1:5)

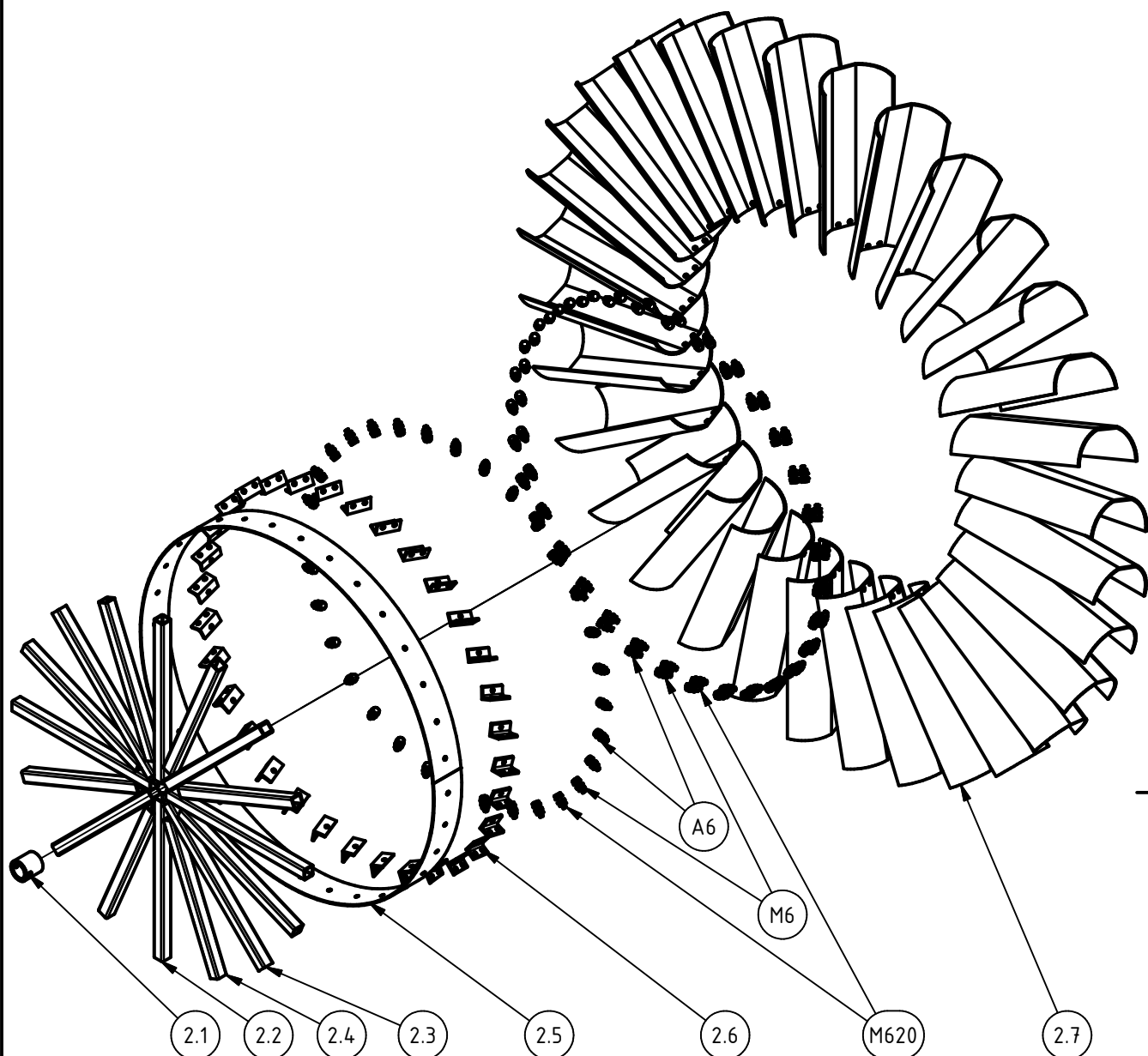
Observação: limar/remover rebarbas

1.6	Veio	1	Maquinado - 35 (diâm. ext.) x 515 (comprim.)	PESO: -
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS	UNID.: mm
				ESC.: 1:2
				
ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima				DATA: 2019-05-22
PROJETO: Plataforma para teste de rodas de água horizontais GRUPO CONSTRUTIVO: 1.0 - Estrutura de suporte da roda CATEGORIA DO DESENHO: Componente				DES. Nº: 8 de 18
				REV.: 1013 2355

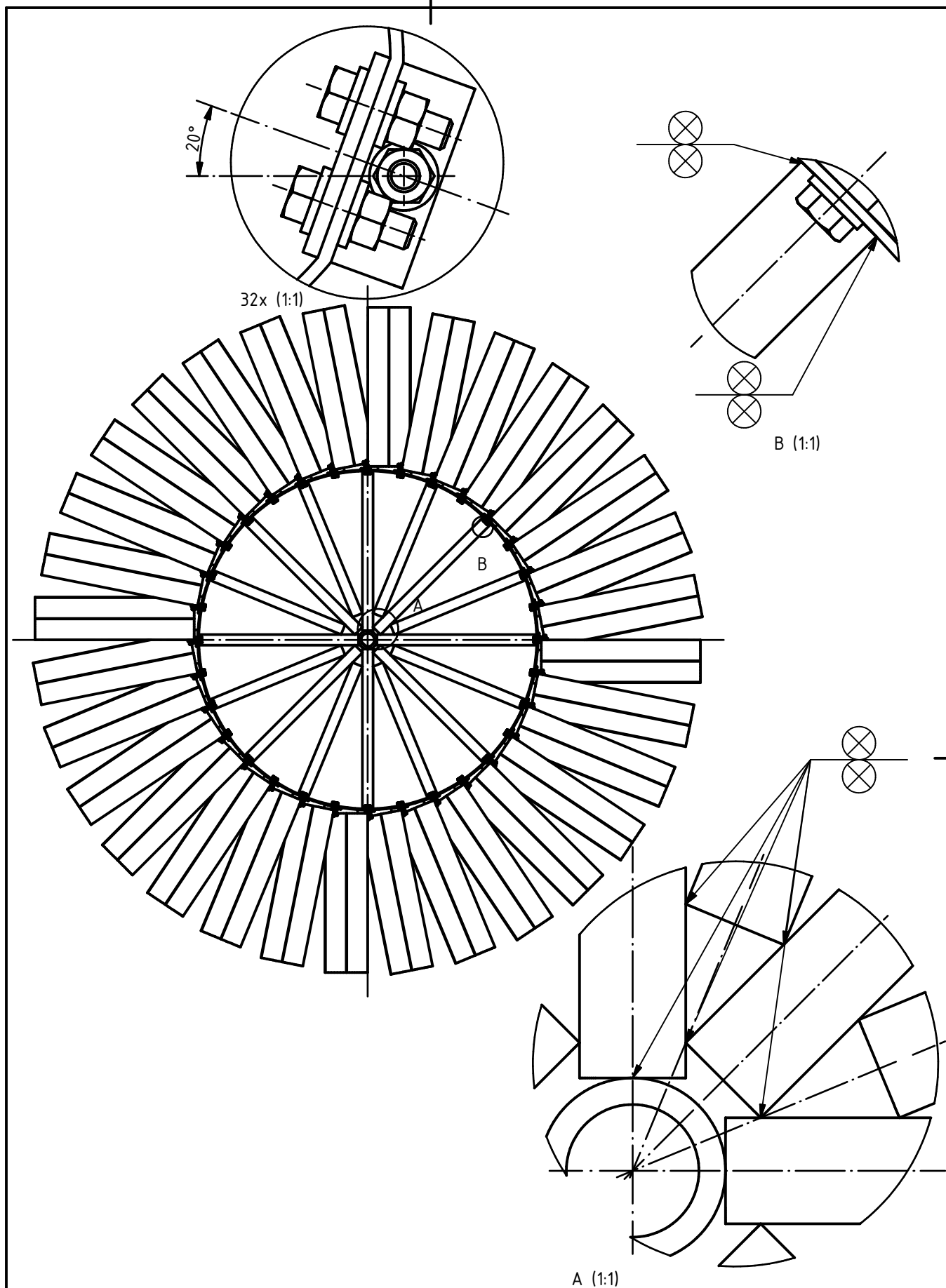


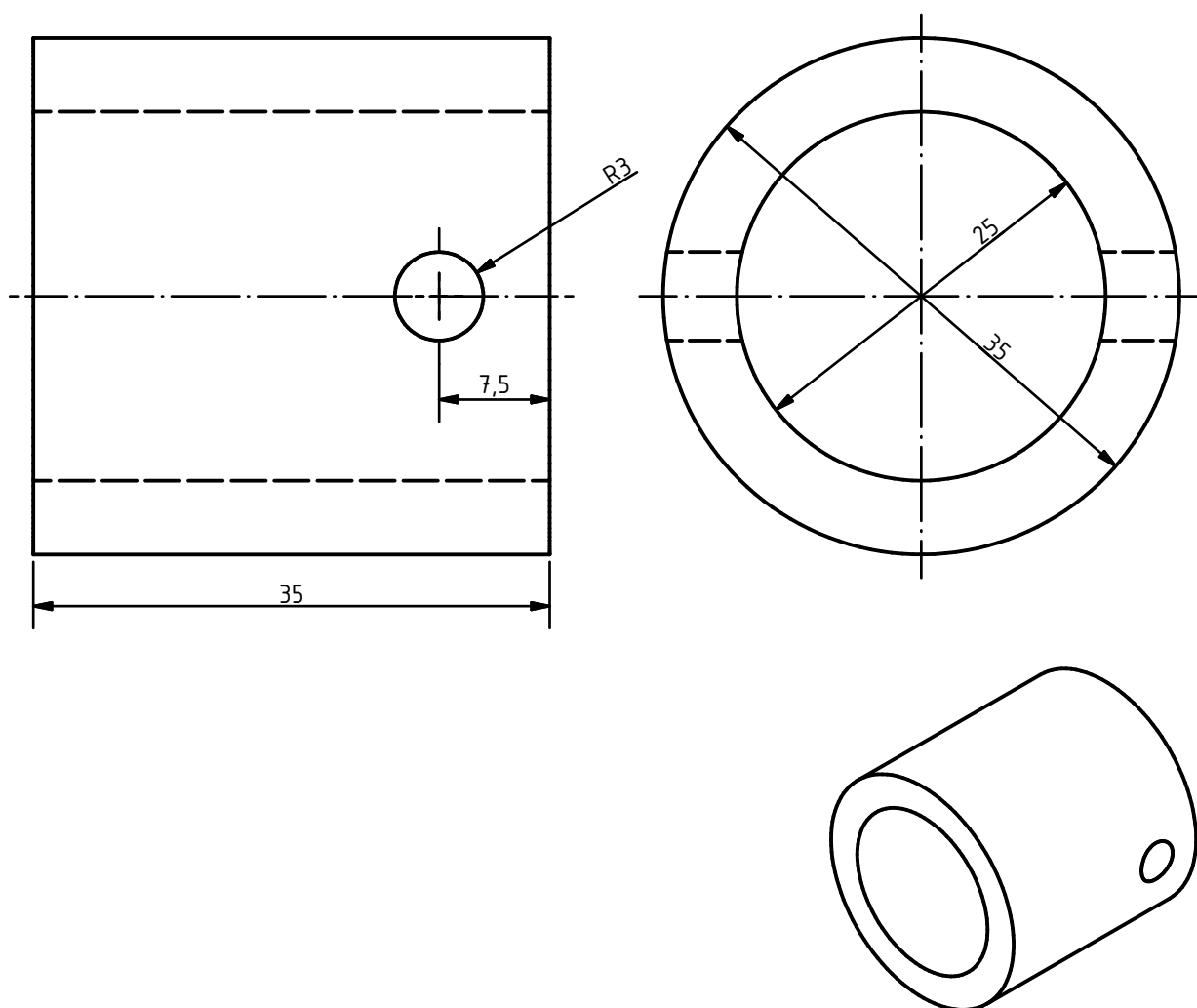
Observação: limar/remover rebarbas

1.7	Suporte inferior	2	Dobrado
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS
		ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco	
		ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima	
		PROJETO:	
		Plataforma para teste de rodas de água horizontais	
		GRUPO CONSTRUTIVO:	
		1.0 - Estrutura de suporte da roda	
		CATEGORIA DO DESENHO: Componente	
		PESO: -	
		UNID.: mm	
		ESC.: 1:2	
		DATA: 2019-05-22	
		DES. Nº: 9 de 18	
		REV.: 1013 2355	

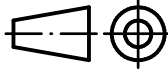


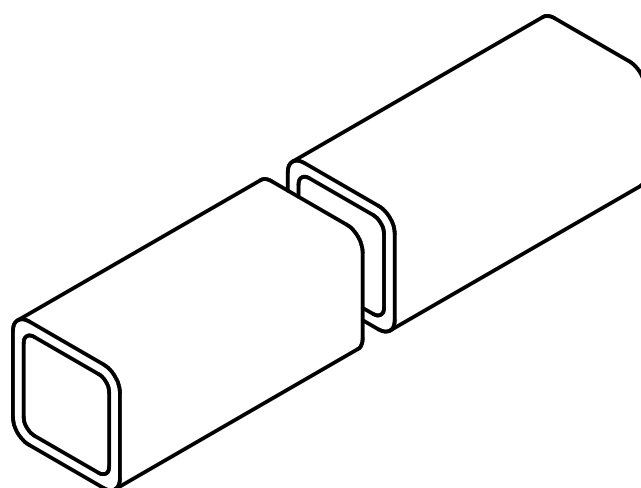
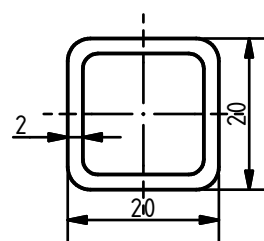
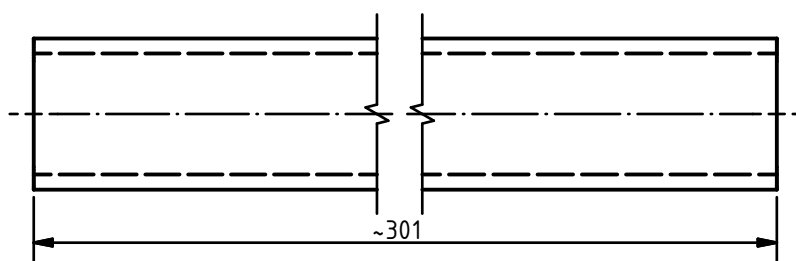
A6	Anilha	192	Plana - M6
M6	Porca	96	Sextavada - M6 x 1
M620	Parafuso	96	Cabeça sextavada - M6 x 1 x 20
2.7	Pá	32x300 mm	Tubo PVC 1/2-cana - 120 (diâm. ext.) x 300 (comprim.) x 2,5 (esp.)
2.6	Suporte da pá	32x40 mm	Perfil L - 20 x 20 x 3 (esp.)
2.5	Anel externo	1	Chapa calandrada - 2000 x 60 x 2 (esp.)
2.4	Braço menor	8x~268 mm	Tubo quadrado - 20 x 20 x 2 (esp.)
2.3	Braço médio	4x~294 mm	Tubo quadrado - 20 x 20 x 2 (esp.)
2.2	Braço maior	4x~301 mm	Tubo quadrado - 20 x 20 x 2 (esp.)
2.1	Anel interno	1	Maquinado - 35 (diâm. ext.) x 30 (comprim.)
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS



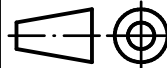


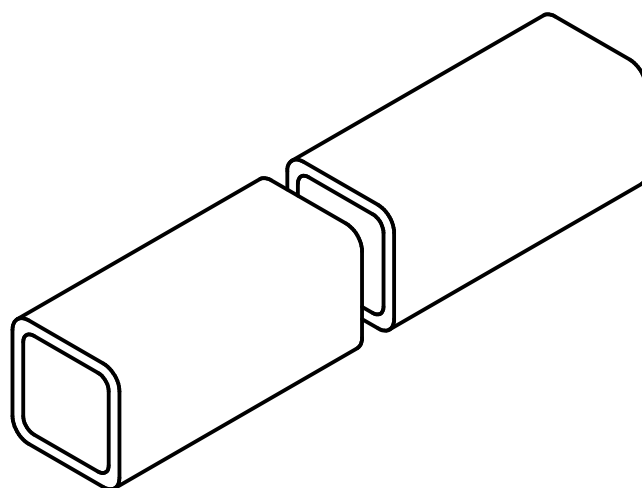
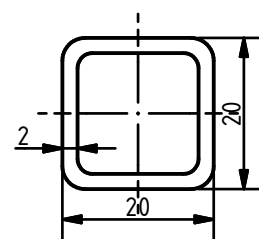
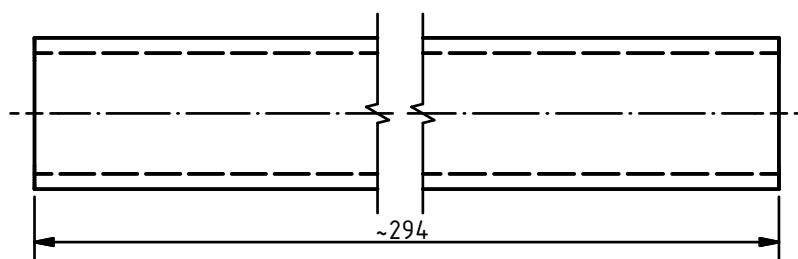
Observação: limar/remover rebarbas

2.1	Anel interno	1	Maquinado - 35 (diâm. ext.) x 30 (comprim.)	PESO: -
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS	UNID.: mm
				ESC.: 2:1
				
				DATA: 2019-05-22
				DES. Nº: 12 de 18
ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima PROJETO: Plataforma para teste de rodas de água horizontais GRUPO CONSTRUTIVO: 2.0 - Modelo preliminar/Protótipo CATEGORIA DO DESENHO: Componente				REV.: 1013 0400

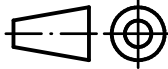


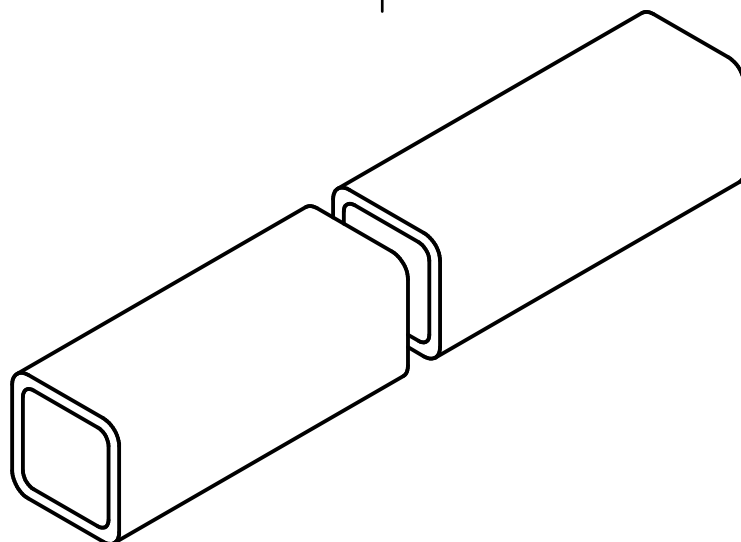
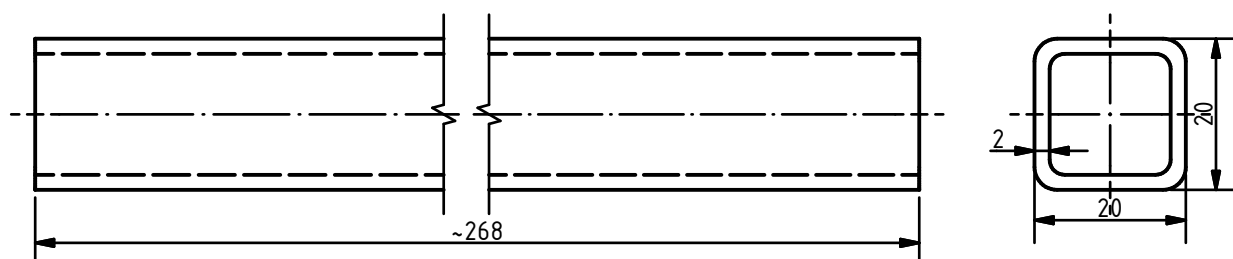
Observação: limar/remover rebarbas

2.2	Braço maior	4x~301 mm	Tubo quadrado - 20 x 20 x 2 (esp.)		
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS		
	ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima		PESO: -		
			UNID.: mm		
	PROJETO: Plataforma para teste de rodas de água horizontais GRUPO CONSTRUTIVO: 2.0 - Modelo preliminar/Protótipo CATEGORIA DO DESENHO: Componente		ESC.: 1:1		
					
			DATA: 2019-05-22		
			DES. Nº: 13 de 18		
		REV.: 1013 1630			



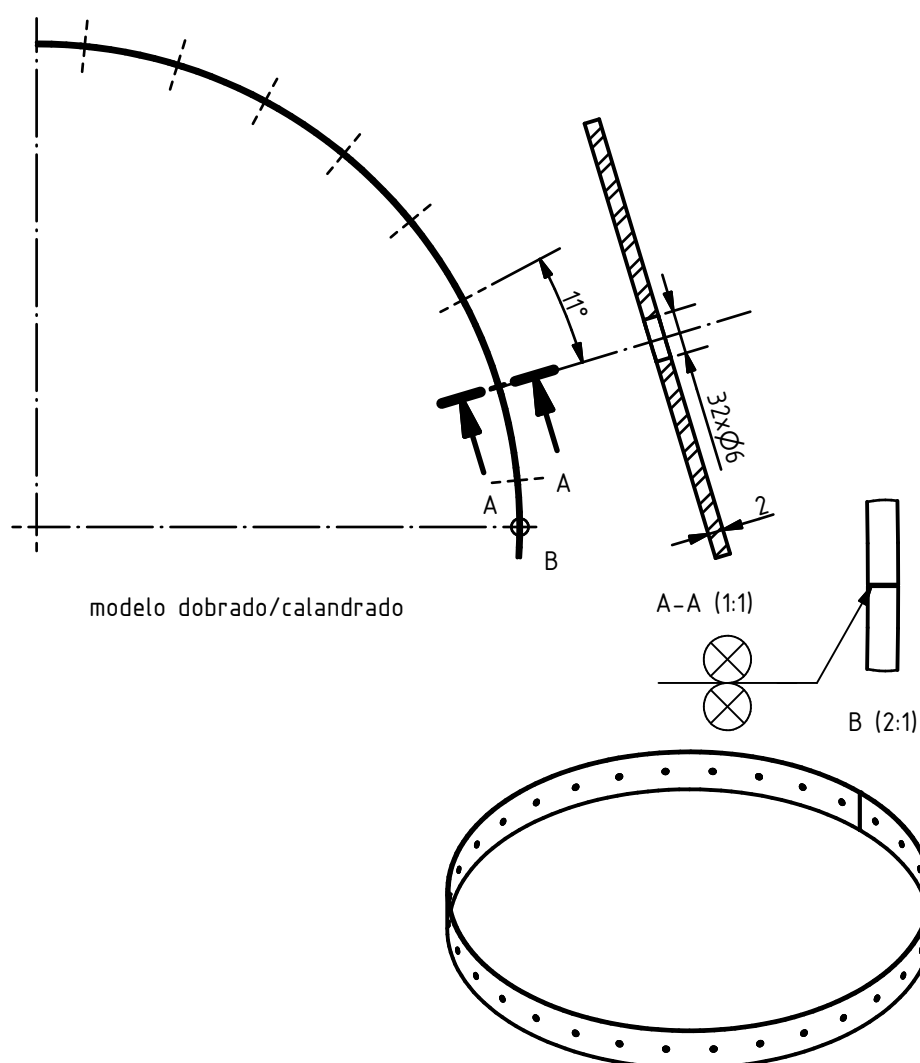
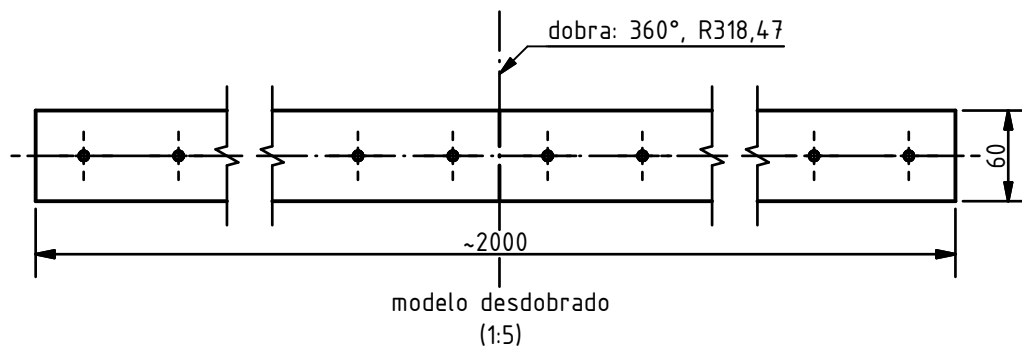
Observação: limar/remover rebarbas

2.3	Braço médio	4x~294 mm	Tubo quadrado - 20 x 20 x 2 (esp.)
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS
			PESO: -
			UNID.: mm
			ESC.: 1:1
			
			DATA: 2019-05-22
ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima			DES. Nº: 14 de 18
PROJETO: Plataforma para teste de rodas de água horizontais GRUPO CONSTRUTIVO: 2.0 - Modelo preliminar/Protótipo CATEGORIA DO DESENHO: Componente			REV.: 1013 1630

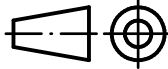


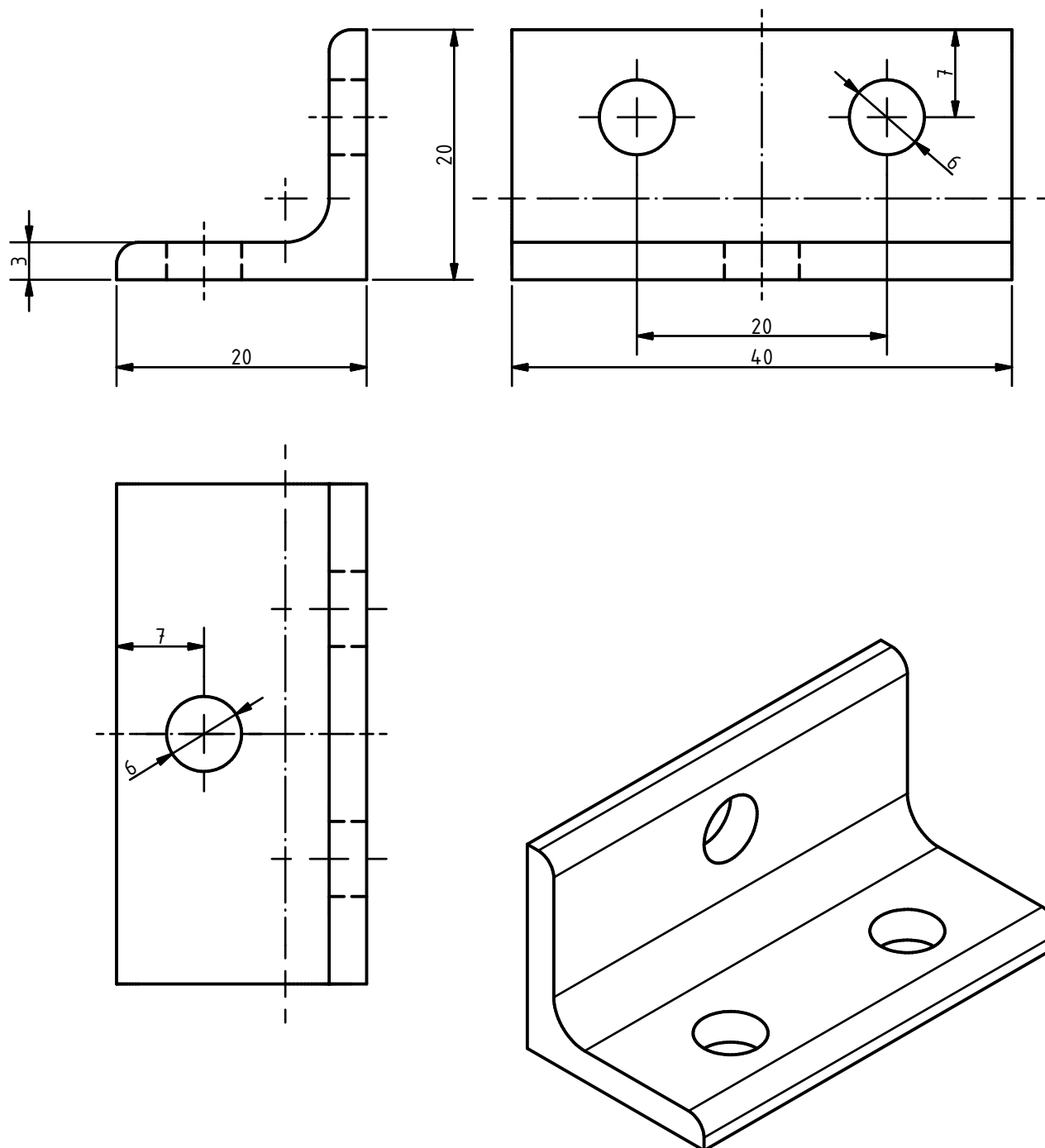
Observação: limar/remover rebarbas

2.4	Braço menor	8x~268 mm	Tubo quadrado - 20 x 20 x 2 (esp.)	
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS	
		ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco		PESO: -
		ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima		UNID.: mm
		PROJETO:		ESC.: 1:1
		Plataforma para teste de rodas de água horizontais		
		GRUPO CONSTRUTIVO:		
		2.0 - Modelo preliminar/Protótipo		DATA: 2019-05-22
		CATEGORIA DO DESENHO: Componente		DES. Nº: 15 de 18
				REV.: 1013 1630



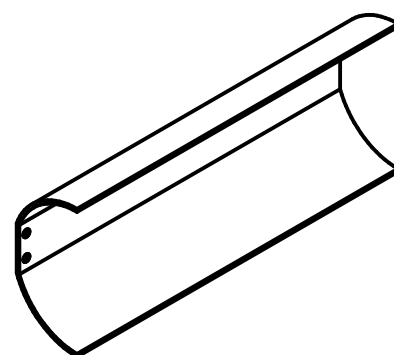
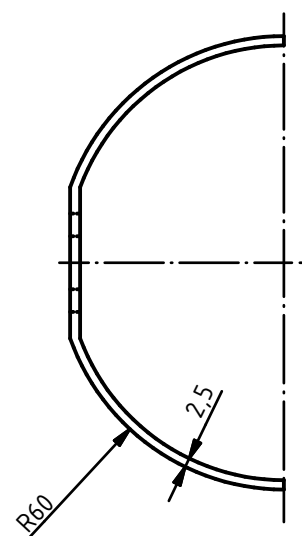
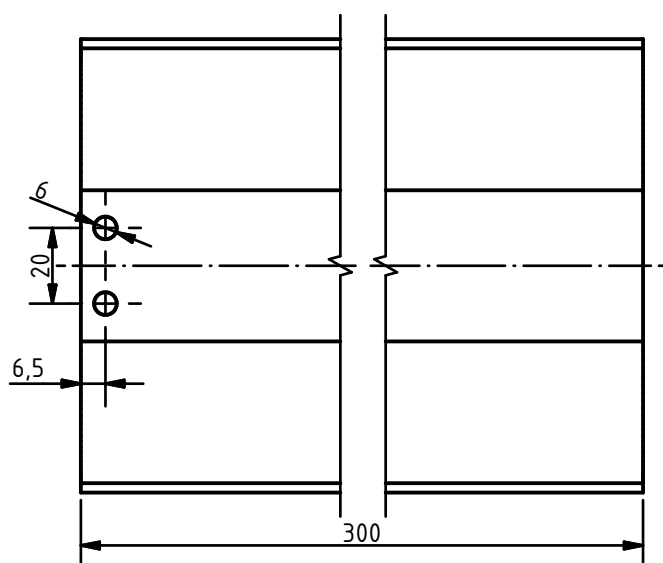
Observação: limar/remover rebarbas

2.5	Anel externo	~2000 mm	Chapa calandrada - 2000 x 60 x 2 (esp.)
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS
 ipb Instituto Politécnico de Bragança ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima PROJETO: Plataforma para teste de rodas de água horizontais GRUPO CONSTRUTIVO: 2.0 - Modelo preliminar/Protótipo CATEGORIA DO DESENHO: Componente PESO: - UNID.: mm ESC.: 1:10  DATA: 2019-05-22 DES. Nº: 16 de 18 REV.: 1013 1850			



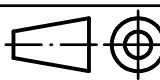
Observação: limar/remover rebarbas

2.6	Suporte da pá	32x40 mm	Perfil L - 20 x 20 x 3 (esp.)
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS
		ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco	
		ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima	
		PROJETO:	
		Plataforma para teste de rodas de água horizontais	
		GRUPO CONSTRUTIVO:	
		2.0 - Modelo preliminar/Protótipo	
		CATEGORIA DO DESENHO: Componente	
		PESO: -	
		UNID.: mm	
		ESC.: 2:1	
		DATA: 2019-05-22	
		DES. Nº: 17 de 18	
		REV.: 1014 0130	



Observação: limar/remover rebarbas

(1:5)

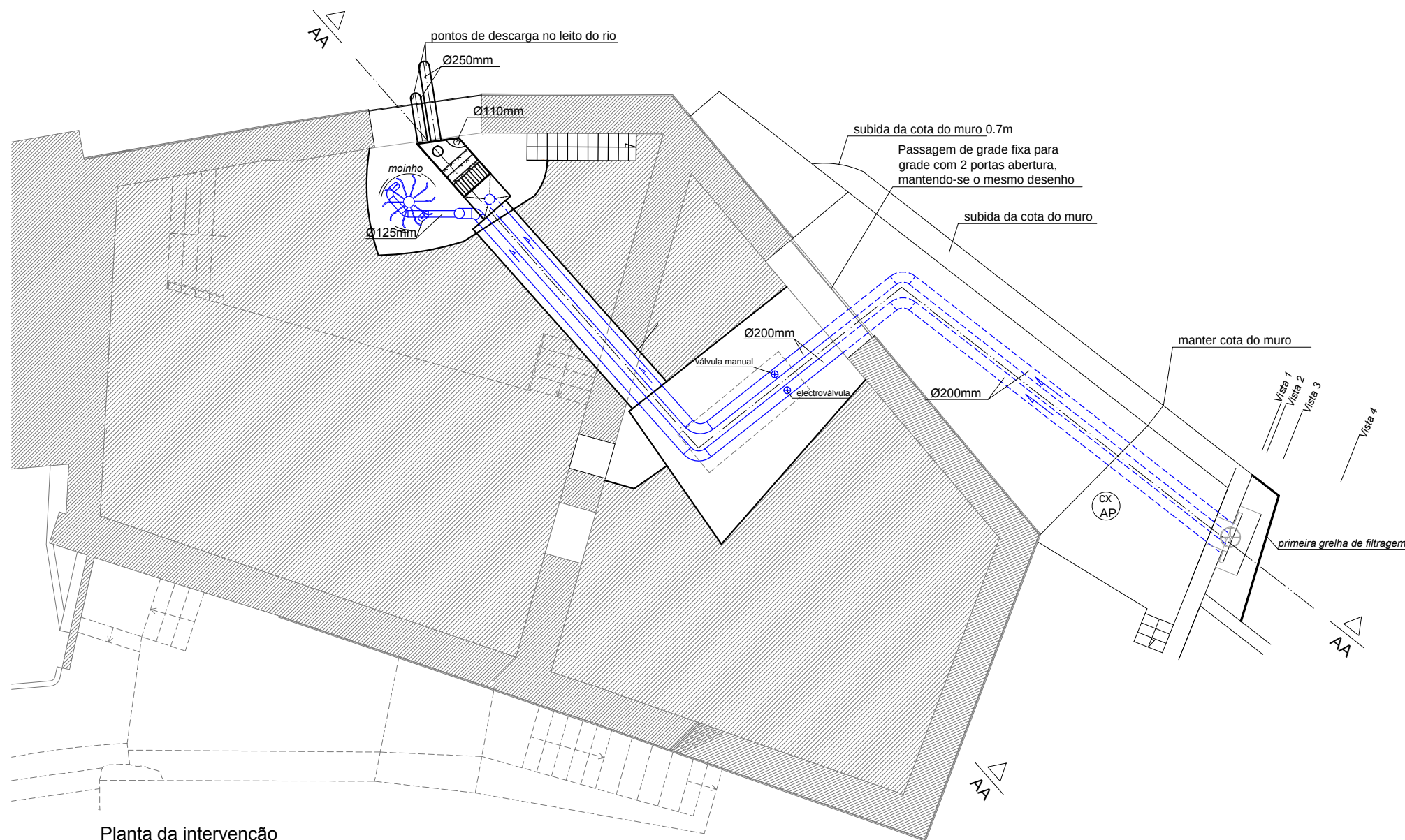
2.7	Pá	32x300 mm	Tubo PVC 1/2-cana - 120 (diâm. ext.) x 300 (comprim.) x 2,5 (esp.)
POS.	DENOMINAÇÃO	QDE.	DIMENSÕES E COMENTÁRIOS
		ACADÉMICO: Iago de Camargo Dalmarco	
		ORIENTADORES: Luís Queijo, Vicente Leite. e Luiz Lima	
		PROJETO:	
		Plataforma para teste de rodas de água horizontais	
		GRUPO CONSTRUTIVO:	
		2.0 - Modelo preliminar/Protótipo	
		CATEGORIA DO DESENHO: Componente	
		PESO: -	
		UNID.: mm	
		ESC.: 1:2	
			
		DATA: 2019-05-22	
		DES. Nº: 18 de 18	
		REV.: 1014 0130	

ANEXO A – Intervenção para pico-hídrica na Casa da Seda

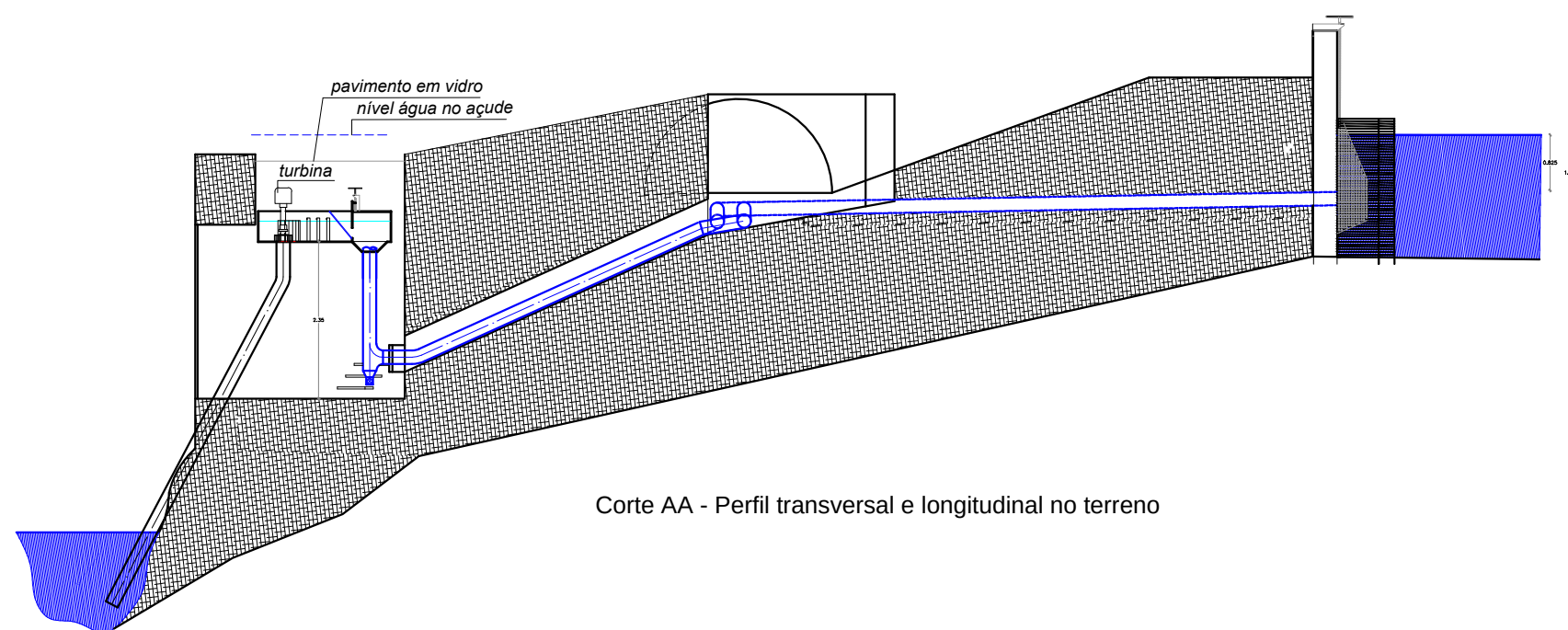
Na próxima página, o desenho da proposta de intervenção na Casa da Seda.

Fonte:

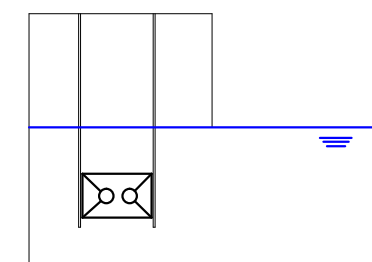
PROPOSTA de intervenção local na Casa da Seda: planta baixa e detalhamento. Bragança, out. 2017. p. 1. Escala 1:50.



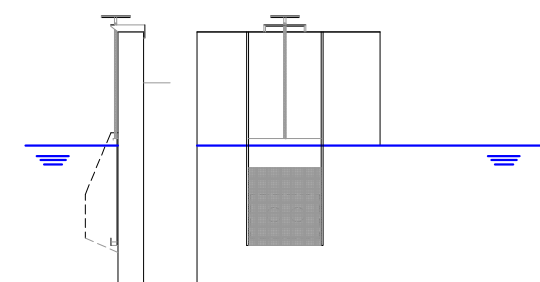
Planta da intervenção



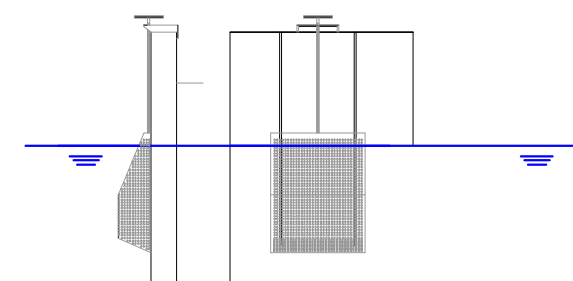
Corte AA - Perfil transversal e longitudinal no terreno



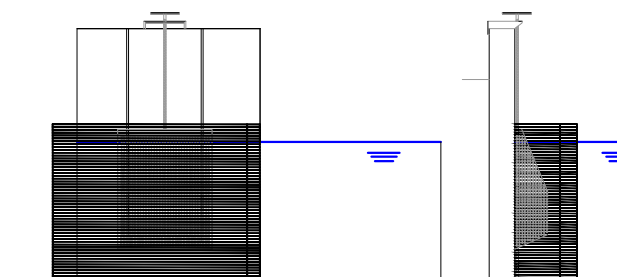
Vista 1 - Entrada de água para tubagens Ø200mm



Vista 2 - Chapa exterior com orifícios (rede inox #15mm)



Vista 3 - Chapa exterior com orifícios (furações com Ø20mm)



Vista 4 - Primeira grelha de filtragem (barras de ferro Ø20mm com espaçamento 30mm)

0 2.5m

ANEXO B – Tubo e válvula

Nas próximas páginas (3), informações dos elementos hidráulicos utilizados.

Fonte:

Heliflex Tubos e Mangueiras, S.A. **Catálogo geral Heliflex**: heliflex sl. Gafanha da Encarnação, 2017. p. 112. Disponível em: <heliflex.pt/assets/docs/downloads/Heliflex-CatalogoGeral2017-V2.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2019.

_____. **Gráfico de perda de carga**: heliflex. [S.l.], [201-?]. p. 1. Disponível em: <heliflex.pt/assets/docs/heliflex_perda_de_carga.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2019.

Plásticos Industriais Matos, S.A. **Válvulas de esfera em PVC**: válvulas roscadas. Marinha grande, 21 mar. 2019. p. 2. Disponível em: <plimat.pt/images/pdf/_download/Cap.4.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2019.

heliflex sl



CARACTERÍSTICAS:

Tubo flexível reforçado com espiral rígida, leve, com grande flexibilidade e resistência à abrasão.

UTILIZAÇÃO:

Utilizado para sucção ligeira em eletrobombas e motobombas.

TEMPERATURA DE UTILIZAÇÃO: -5/+55°C

APRESENTAÇÃO:

Coc verde transparente com espiral branca.

Nota: outras cores e diâmetros disponíveis sob consulta.

FEATURES:

Flexible hose reinforced with rigid helix, light, with great flexibility and good abrasion resistance.

APPLICATIONS:

Used for light suction and conveying water with electropumps and motopumps.

TEMPERATURE RANGE: -5/+55°C

PRESENTATION:

Colour: transparent green with white spiral.

Note: other colours and diameters available upon request.

CARACTERÍSTICAS:

Supon souple en PVC renforcé d'une spirale en PVC rigide, léger, très flexible et bonne résistance à l'abrasion.

APPLICATIONS:

Donc l'aspiration légère avec électro et motopompes.

TEMPÉRATURE D'EMPLOI: -5/+55°C

PRÉSENTATION:

Couleur: vert transparent avec spirale blanche.

Nota: autres couleurs, diamètres et longueurs disponibles sous demande.

CARACTERÍSTICAS:

Tubo flexible con espiral rígida con gran flexibilidad y resistencia a la abrasión.

UTILIZACIÓN:

Utilizado para succión ligera en electrobombas y motobombas.

TEMPERATURA DE UTILIZACIÓN: -5/+55°C

PRESENTACIÓN:

Color verde transparente con espiral blanca.

Nota: otros colores y diámetros disponibles bajo consulta.



Grupo Group	Ø Int. Inside (mm)	Espesura Thickness (mm)	Peso Weight (kg/m)	Vácuo Vacuum (bar)	Raio de Curvatura Bend Radius (mm)
230 011	020	2,6	0,230	0,65	100
230 011	025	2,7	0,270	0,65	125
230 011	030	2,8	0,340	0,65	150
230 011	032	3,3	0,335	0,65	160
230 011	035	3,1	0,425	0,65	160
230 011	038	3,4	0,480	0,65	200
230 011	040	3,2	0,500	0,65	200
230 011	042	3,4	0,590	0,65	210
230 011	050	3,6	0,740	0,65	250
230 011	053	3,8	0,800	0,65	265
230 011	060	3,5	0,850	0,65	300
230 011	070	3,9	1,060	0,65	375
230 011	075	4,0	1,160	0,65	375
230 011	090	4,4	1,430	0,65	450
230 011	100	4,6	1,850	0,65	550
230 011	110	6,0	1,925	0,65	550

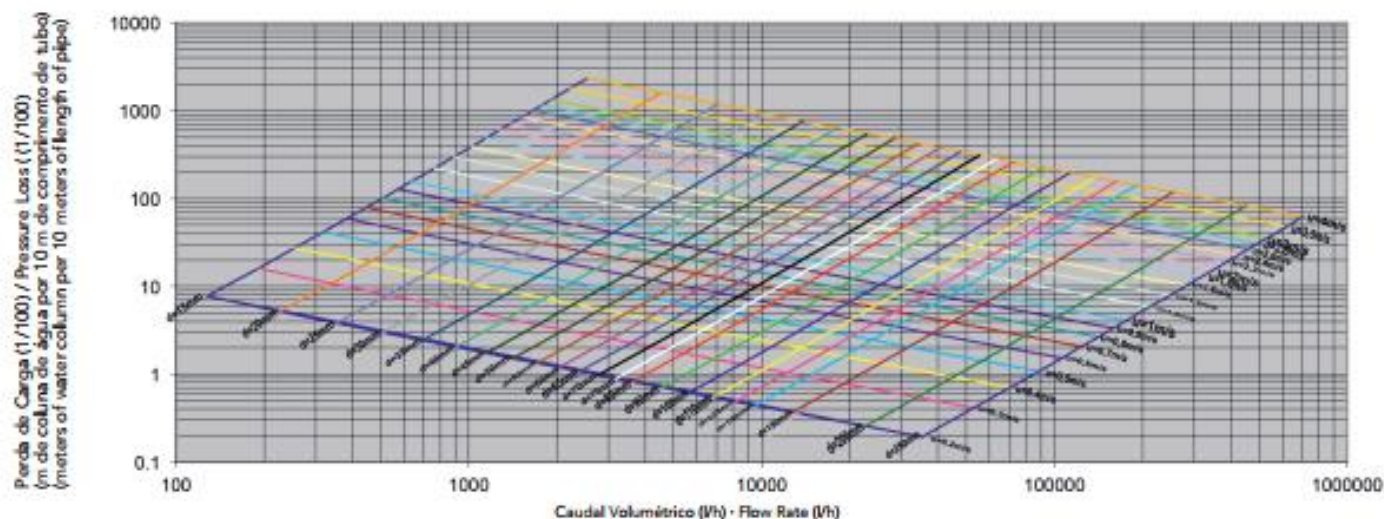


ATENÇÃO - ATTENTION - ATTENTION - ATENCIÓN

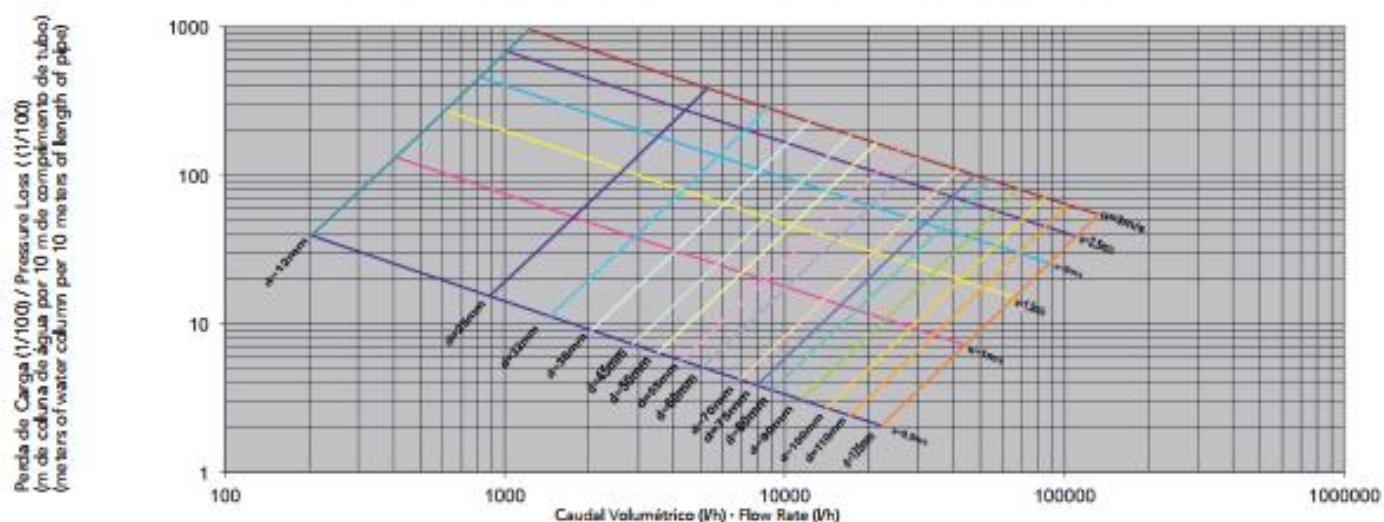
- Leve
- Grande flexibilidade
- Para sucção ligeira
- Léger
- Grande souplesse
- Pour aspiration léger
- Light
- Great flexibility
- For light suction
- Ligera
- Grand flexibilidad
- Para aspiración ligera



PERDA DE CARGA EM FUNÇÃO DO CAUDAL – HELIFLEX / PRESSURE LOSS – HELIFLEX



PERDA DE CARGA EM FUNÇÃO DO CAUDAL – AGROFLAT / PRESSURE LOSS – AGROFLAT



Válvulas roscadas

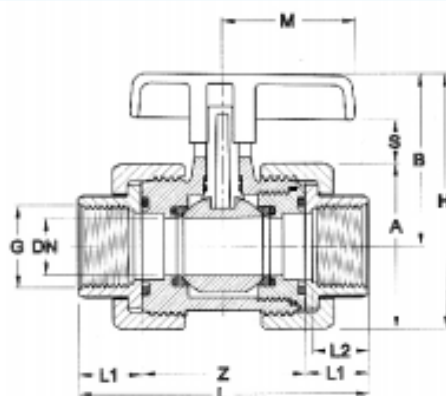
Tapped valves

Vannes filetées

Válvulas roscadas



01 61 1077 000



G	DN	A	B	H	L	M	S	Z	L1	L2	Gr	Quant	Nº Código
"3/8	15	48	46	70	84	35	10	44	20	15	130	B 40	01 61 1077 038
"1/2	15	48	46	70	84	35	10	44	20	15	130	B 40	01 61 1077 012
"3/4	15	48	46	70	88	35	10	44	22	16	130	B 40	01 61 1076 034
"3/4	20	68	71	105	112	54	18	66	23	16	354	C 40	01 61 1077 034
1"	25	68	71	105	126	54	18	66	30	19	360	C 40	01 61 1077 100
1"1/4	32	95	93	141	149	65	21	88	30,5	21	817	C 16	01 61 1077 114
1"1/2	40	95	93	141	157	65	21	88	34,5	22	854	C 16	01 61 1077 150
2"	50	115	107	164	190	74	23	102	44	26	1433	C 10	01 61 1077 200
2"1/2	65	151	122	197	214	100	25	116	49	31	2530	C 4	01 61 1077 250
3"	80	185	148	240	249	123	30	130	59	35	3860	C 3	01 61 1077 300
4"	80	185	148	240	230	123	30	130	50	35	3800	C 3	01 61 1077 400

ANEXO C – Reservatório

Nas próximas páginas (2), parte do catálogo do produto utilizado como reservatório.

Fonte:

Schütz GmbH & Co. KGaA. **Schütz Ecobulck**: product diversity. Brochure. Selters, jun. 2019. p. 16-17. Disponível em: <schuetz-packaging.net/downloads/broschueren/broschuere-schuetz-ecobulk/brochure-schuetz-ecobulk-en.pdf?cid=4w7>. Acesso em: 29 jul. 2019.

Product Diversity.

Type	Certification (optional)	Volume Dimensions	Label plates
 Maximum density 1.6	Hazardous goods certification ■ UN 31HA1/Y	LX 1000 1,000 litres (275 gal) 1,200 x 1,000 x 1,160 (LxWxH)	4-field  6-field  8-field  12-field 
 Maximum density 1.9	Hazardous goods certification ■ UN 31HA1/Y Food safety certification ■ SCHÜTZ FOODCERT  Technical cleanliness ■ SCHÜTZ CLEANCERT  Ex-zone certification ■ for zones 1 and 2	MX 640 640 litres (170 gal) 1,200 x 800 x 1,000 (LxWxH) MX 820 820 litres (220 gal) 1,200 x 1,000 x 1,000 (LxWxH) MX 1000 1,000 litres (275 gal) 1,200 x 1,000 x 1,160 (LxWxH) MX 1250 1,250 litres (330 gal) 1,200 x 1,000 x 1,350 (LxWxH)	4-field  6-field  8-field  12-field 
 Maximum density 1.6	Hazardous goods certification ■ UN 31HA1/Y Food safety certification ■ SCHÜTZ FOODCERT  Technical cleanliness ■ SCHÜTZ CLEANCERT  Ex-zone certification ■ for zones 1 and 2	SX-EX 1000 1,000 litres (275 gal) 1,200 x 1,000 x 1,160 (LxWxH)	4-field  6-field  8-field  12-field 

Due to the modular structure and variety of their components and technical features, SCHÜTZ ECOBULKS can be ideally configured for an extensive range of filling goods and applications.

Tubular steel frame	PE-HD inner bottle	Filling opening	Outlet valve	Pallet
Robust tubular steel grid frame 	2-layer ■ UV protection (optional)	DN 150 S 165 x 7 AG DN 225 S 245 x 6 AG	Integrated butterfly valve DN 50 	No bottom plate, 4-way entry wood  plastic composite 
Robust tubular steel grid frame 	2-layer ■ UV protection (optional) SCHÜTZ 3 3-layer conductive or antistatic outer layer ■ UV protection (optional) SCHÜTZ 6 6-layer EVOH permeation barrier ■ conductive or antistatic outer layer (optional) ■ UV protection (optional)	DN 150 S 165 x 7 AG DN 225 S 245 x 6 AG DN 400 with clamp-ring lid	Integrated butterfly valve DN 50 Screwable ball valve DN 50 Screwable butterfly valve DN 50 DN 150	With integrated bottom plate, 4-way entry steel frame  steel skid  plastic skid  full-plastic-skid 
Robust tubular steel grid frame with additional steel case 	2-layer ■ UV protection (optional) SCHÜTZ 6 6-layer EVOH permeation barrier ■ UV protection (optional)	DN 150 S 165 x 7 AG DN 225 S 245 x 6 AG	Earthed integrated butterfly valve DN 50 Earthed screwable butterfly valve DN 50	With integrated bottom plate, 4-way entry steel frame  steel skid 

ANEXO D – Chumaceira

Nas próximas páginas (4), a folha de dados dos elementos utilizados.

Fonte:

Schaeffler Technologies AG & Co. KG. **Carcaça UCFL205 para rolamento**. Folha de dados. 3 p. Disponível em: <medias.uk.ina.com/medias/pt!hp.ec.br.dp/UCFL*UCFL205>. Acesso em: 2 jun. 2019.

_____. **Mancal tensor UC205**. Folha de dados. 2 p. Disponível em: <medias.uk.ina.com/medias/pt!hp.ec.br.dp/UCFL*UCFL205*UC*UC205>. Acesso em: 2 jun. 2019.

Unidades de carcaça UCFL205 (Linha de produtos UCFL)

carcaças para rolamento tipo flange com dois furos, ferro gusa, pinos roscados no anel interno, vedação RSR

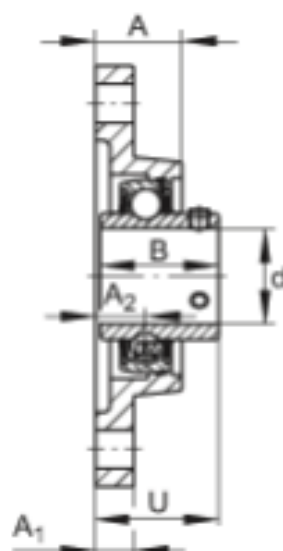
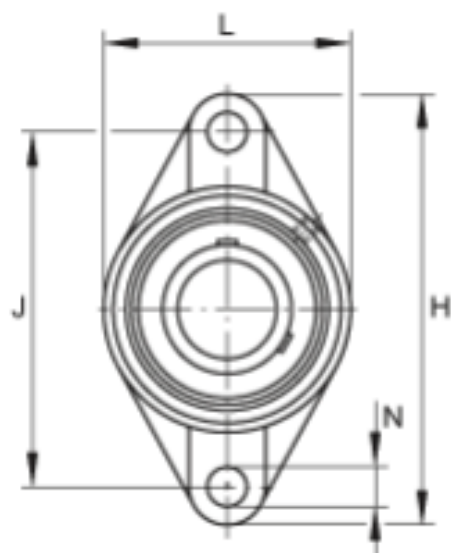
A presente folha de dados é apenas um resumo de medidas e capacidades de carga do produto selecionado. É imprescindível observar todas as indicações constantes nestas folhas de resumo. Maiores informações sobre muitos produtos podem ser encontradas no item de menu "Descrição". Além disso, você também pode solicitar o envio de material informativo abrangente através da seleção de catálogo

(https://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/en/news_media/index.jsp) ou através do telefone +49 (91 32) 82 - 28 97.

d	25 mm
H	130 mm
U	35,8 mm

A	27 mm
A ₁	15 mm
A ₂	16 mm
B	34,1 mm
J	99 mm
L	68 mm
N	16 mm

m	0,64 kg	Massa
	FL205	Denominação carcaça
	UC205	Denominação rolamento de fixação rápida



Mancal tensor UC205 (Linha de produtos UC)

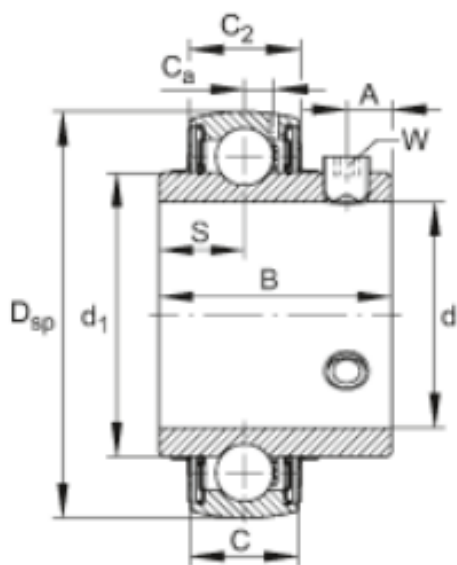
anel externo esférico, fixação mediante pinos roscados, vedação RSR de ambos os lados

A presente folha de dados é apenas um resumo de medidas e capacidades de carga do produto seleccionado. É imprescindível observar todas as indicações constantes nestas folhas de resumo. Maiores informações sobre muitos produtos podem ser encontradas no item de menu "Descrição". Além disso, você também pode solicitar o envio de material informativo abrangente através da seleção de catálogo (https://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/en/news_media/index.jsp) ou através do telefone +49 (91 32) 82 - 28 97.

d	25 mm
Dsp	52 mm
B	34,1 mm

A	5 mm
C	17 mm
C2	17,6 mm
Ca	4,2 mm
d1	33,83 mm
S	14,3 mm
W	3 mm

m	0,2 kg	Massa
Cr	14900 N	capacidade de carga dinâmica, radial
C _{0r}	7800 N	capacidade de carga estática, radial
C _{ur}	410 N	carga limite de fadiga, radial
f ₀	13,8	Fator de cálculo



ANEXO E – Correia e polias

Nas próximas páginas (2), parte do catálogo dos elementos utilizados.

Fonte:

Rolisa – Rolamentos, Peças e Acessórios para a Indústria, Lda. **Transmissões:** correias sincronizadoras. Catálogo técnico. Maia, 2007. p. 138. Disponível em: <rolisa.pt/ficheiros/catalogo_rolisa.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2019.

_____. **Transmissões:** polias dentadas para correias sincronizadoras. Catálogo técnico. Maia, 2007. p. 119. Disponível em: <rolisa.pt/ficheiros/catalogo_rolisa.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2019.

Correias Sincronizadoras



CORREIA XL PASSO 1/5" (5,080 mm)

Tipo	Nº Dentes	Perímetro	
		Polegadas	mm
60 XL	30	6,00	152,40
70 XL	35	7,00	177,80
80 XL	40	8,00	203,20
90 XL	45	9,00	228,60
100 XL	50	10,00	254,00
102 XL	51	10,20	259,08
106 XL	53	10,60	269,24
108 XL	54	10,80	274,32
110 XL	55	11,00	279,40
116 XL	58	11,60	294,64
120 XL	60	12,00	304,80
130 XL	65	13,00	330,20
140 XL	70	14,00	355,60
148 XL	74	14,80	375,92
150 XL	75	15,00	381,00
160 XL	80	16,00	406,40
170 XL	85	17,00	431,80
180 XL	90	18,00	457,20
190 XL	95	19,00	482,60
200 XL	100	20,00	508,00
210 XL	105	21,00	533,40
220 XL	110	22,00	558,80
230 XL	115	23,00	584,20
240 XL	120	24,00	609,60
250 XL	125	25,00	635,00
260 XL	130	26,00	660,40
270 XL	135	27,00	685,80
280 XL	140	28,00	711,20
290 XL	145	29,00	736,60
300 XL	150	30,00	762,00
316 XL	158	31,60	802,64
330 XL	165	33,00	838,20
344 XL	172	34,40	873,76
380 XL	190	38,00	965,20

CORREIA L PASSO 3/8" (9,525 mm)

Tipo	Nº Dentes	Perímetro	
		Polegadas	mm
124 L	33	12,37	314,33
150 L	40	15,00	381,00
187 L	50	18,75	476,25
210 L	56	21,00	533,40
225 L	60	22,50	571,50
240 L	64	24,00	609,60
255 L	68	25,50	647,70
270 L	72	27,00	685,80
285 L	76	28,50	723,90
300 L	80	30,00	762,00
322 L	86	32,25	819,15
345 L	92	34,50	876,20
367 L	98	36,75	933,45
390 L	104	39,00	990,60
420 L	112	42,00	1066,80
450 L	120	45,00	1143,00
480 L	128	48,00	1219,20
510 L	136	51,00	1295,40
540 L	144	54,00	1371,60
600 L	160	60,00	1524,00

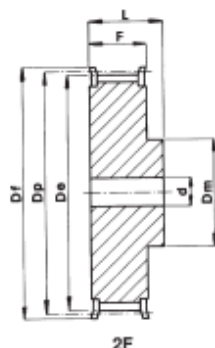
Largura Unificada

Tipo	Polegadas	mm
XL 025	1/4	6,35
XL 031	5/16	7,94
XL 037	3/8	9,52

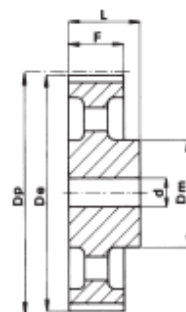
Largura Unificada

Tipo	Polegadas	mm
L 050	1/2	12,70
L 075	3/4	19,05
L 100	1	25,40

Polias Dentadas para Correias Sincronizadoras



2F



4

L 050 PASSO 3/8" (9,525 mm)

Material	Código	Tipo	Dentes	Dp	De	Df	Dm	F	L	d	Nº Flange	Kg
AÇO	10 L 050	2F	10	30,32	29,56	36	20	19,0	28	8	300	0,11
	11 L 050	2F	11	33,35	32,59	38	24	19,0	30	8	301	0,14
	12 L 050	2F	12	36,38	35,62	42	24	19,0	30	8	302	0,17
	13 L 050	2F	13	39,41	38,65	44	28	19,0	30	8	303	0,21
	14 L 050	2F	14	42,44	41,68	48	28	19,0	30	8	304	0,24
	15 L 050	2F	15	45,48	44,72	51	34	19,0	30	8	305	0,29
	16 L 050	2F	16	48,51	47,75	54	36	19,0	32	8	306	0,33
	17 L 050	2F	17	51,54	50,78	57	36	19,0	32	10	307	0,38
	18 L 050	2F	18	54,57	53,81	60	40	19,0	32	10	308	0,44
	19 L 050	2F	19	57,61	56,84	63	40	19,0	32	10	309	0,47
	20 L 050	2F	20	60,64	59,88	66	40	19,0	32	10	310	0,51
	21 L 050	2F	21	63,67	62,91	71	45	19,0	32	10	311	0,60
	22 L 050	2F	22	66,70	65,94	75	45	19,0	32	10	312	0,64
	23 L 050	2F	23	69,73	68,97	79	55	19,0	32	10	313	0,78
	24 L 050	2F	24	72,77	72,00	79	55	19,0	32	10	313	0,81
	25 L 050	2F	25	75,80	75,04	83	58	19,0	32	10	314	0,89
	26 L 050	2F	26	78,83	78,07	87	58	19,0	32	12	315	0,94
	27 L 050	2F	27	81,86	81,10	87	58	19,0	32	12	315	0,99
	28 L 050	2F	28	84,89	84,13	91	58	19,0	32	12	316	1,04
	30 L 050	2F	30	90,96	90,20	97	70	19,0	32	12	318	1,17
	32 L 050	2F	32	97,03	96,26	103	70	19,0	32	12	320	1,41
	33 L 050	2F	33	100,05	99,29	106	70	19,0	32	12	321	1,49
	34 L 050	2F	34	103,08	102,32	111	70	19,0	32	12	322	1,57
	35 L 050	2F	35	106,12	105,35	111	70	19,0	32	12	322	1,62
	36 L 050	2F	36	109,15	108,39	115	70	19,0	32	12	323	1,70
	40 L 050	2F	40	121,29	120,51	127	70	19,0	32	12	327	2,03
	42 L 050	2F	42	127,34	126,58	135	70	19,0	32	12	328	2,21
	44 L 050	2F	44	133,40	132,64	140	70	19,0	32	12	330	2,38
	45 L 050	2F	45	136,44	135,67	143	70	19,0	32	12	331	2,48
	48 L 050	2F	48	145,53	144,77	152	70	19,0	32	12	334	2,78
FUNDIÇÃO	50 L 050	4	50	151,60	150,83	-	70	19,0	32	14	-	1,74
	52 L 050	4	52	157,66	156,90	-	70	19,0	32	14	-	1,80
	56 L 050	4	56	169,79	169,02	-	70	19,0	32	14	-	1,87
	57 L 050	4	57	172,82	172,06	-	70	19,0	32	14	-	1,88
	60 L 050	4	60	181,91	181,15	-	75	19,0	42	14	-	2,41
	72 L 050	4	72	218,29	217,53	-	75	19,0	42	14	-	2,82
	84 L 050	4	84	254,68	253,92	-	75	19,0	42	14	-	3,08
	96 L 050	4	96	291,06	290,30	-	75	19,0	42	14	-	3,42

ANEXO F – Gerador elétrico

Na próxima página, a folha de dados do gerador elétrico utilizado.

Fonte:

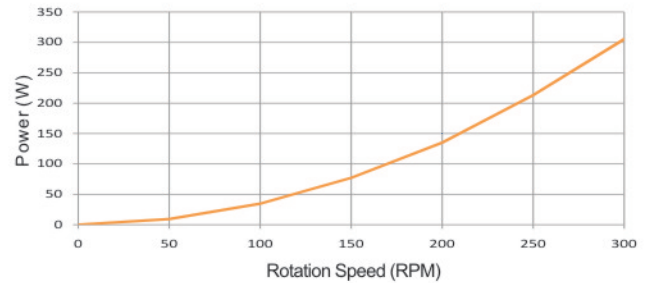
Qiangsheng Magnets Co., Ltd. **AFPMG260 – 0,3 kW/300 rpm**. Folha de dados. 1 p.
Disponível em: <qm-magnet.com/Product.html>. Acesso em: 11 mar. 2019.

AFPMG260-0.3KW/300RPM

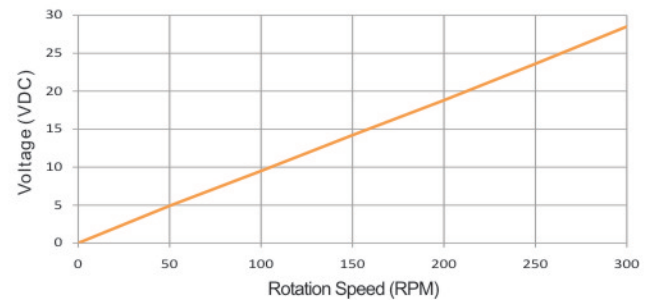
Technical Parameters

No.	Parameter	Units	Data
1	Rated output power	KW	0.3
2	Rated speed	RPM	300
3	Rated output voltage	VDC	28
4	Rated current	A	10.71
5	Phase resistance	Ω	1.79
6	Output wire square section	mm ²	6
7	Efficiency		>85%
8	Winding type		Y
9	Insulation resistance		100Mohm Min(500V DC)
10	Voltage withstand	ma	<5 ma
11	Insulation		H class
12	Start torque	Nm	<0.1
13	Temperature rise	℃	<80
14	Max. working temperature	℃	<120
15	Generator diameter	mm	260
16	Shaft diameter	mm	30
17	Housing material		Aluminum Alloy
18	Shaft material		Steel or stainless steel
19	Bearing		NSK or SKF
20	Weight	Kg	11
21	Design lifetime	Year	>20

Speed-Power Curve



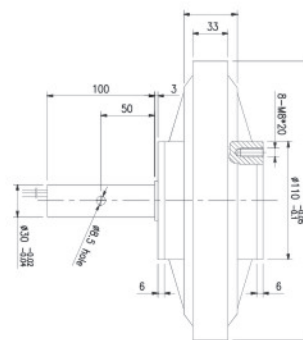
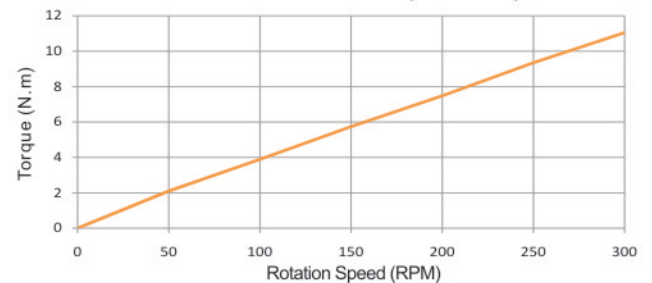
Speed-Voltage Curve



Testing Data

Speed (RPM)	Load voltage (VDC)	Load current (A)	Load power (W)	Torque (N.m)	Efficiency (%)
300	28.5	10.71	305.2	11.05	87.9
250	23.6	9.03	213.1	9.35	87.1
200	18.8	7.19	135.2	7.48	86.3
150	14.2	5.43	77.1	5.74	85.5
100	9.5	3.64	34.6	3.89	84.9
50	4.9	1.88	9.2	2.1	83.8

Speed-Torque Curve



ANEXO G – Microinversores fotovoltaicos

Abaixo, as informações técnicas dos microinversores fotovoltaicos utilizados:

<i>Parameters</i>	<i>Unit</i>	<i>Microinverters</i>		
		BE-ON® (BON)	GWL®	INVOLAR® (INV)
<i>Maximum input power</i>	W			280
<i>Operating range</i>	V	20-50		22-48
<i>Peak power tracking range</i>	V	24-40	20-40	28-40
<i>Maximum input DC voltage</i>	V		50	50
<i>Maximum input current</i>	A			10
<i>Maximum DC short circuit current</i>	A			15
<i>Rated output power</i>	W	250	235	245
<i>Nominal voltage</i>	V	230		200-240
<i>Nominal output current</i>	A			
<i>Maximum output current</i>	A	1.36	1.02	1.06
<i>Nominal frequency</i>	Hz		50	50/60
<i>Power factor</i>	-		>0.99	0.99