

Sistemas Hídricos de Captação de Energia para Redes de Sensores sem Fios

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Jorge Miguel Abreu Lopes

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES
E REDES DE ENERGIA



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

setembro | 2015

T/M
62
LOP Sis
+eo-R(2-ix.)

UNIVERSIDADE DA MADEIRA
BIBLIOTECA

Sistemas Hídricos de Captação de Energia para Redes de Sensores sem Fios

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Jorge Miguel Abreu Lopes

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES
E REDES DE ENERGIA

ORIENTADOR
Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo



Centro de Competência de Ciências Exatas e da Engenharia

Sistemas hídricos de captação de energia para redes de sensores sem fios

Jorge Miguel Abreu Lopes

Dissertação submetida à Universidade da Madeira para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações e de Redes de Energia

Orientador: Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

Dezembro 2015

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo o estudo de soluções de produção de energia elétrica a partir de fontes hídricas com o fim de alimentar nós sensores.

Foi feito um estudo geral relativamente a sistemas tradicionais de captura de energia hídrica de grande escala. Foram obtidas as equações de dimensionamento das turbinas de grande escala e das condutas de captura. Foram escolhidos os detalhes para a produção de um protótipo com as ferramentas disponíveis, tendo-se implementado dois sistemas de geração de energia hídrica de pequena escala.

O primeiro sistema estudado utilizou uma turbina tipo *Propeller*, a versão de pás fixas do sistema *Kaplan* que é muito mais comum, mas mais difícil de produzir à escala desejada. Neste sistema foi usada uma solução comercial, nomeadamente um eixo com rolamento estanque e uma hélice de *nylon* utilizados em modelismo. Foram testados vários caudais ao variar a diferença de altura entre o nível de água a montante e a jusante da turbina. Foi obtida uma eficiência máxima na ordem dos 62% na turbina, no sistema com bocal divergente.

O segundo sistema estudado utilizou uma turbina tipo *Pelton*. Para este caso foi decidido usar a tecnologia de impressão 3D para fabricar as turbinas, injetores e qualquer outro componente necessário. Foi assumido, propositadamente, que as equações para turbinas de grande escala se aplicavam a sistemas de muito pequena escala. Como tal, foi dimensionada uma turbina à escala seguindo uma forma próxima da geometria das turbinas encontradas em sistemas de grande escala. Foram impressas 19 turbinas distintas, divididas em 3 grupos de dimensão, de modo a testar o efeito de mudar características de desenho. Foi também testada uma turbina *Pelton* feita de metal usada num estudo anterior. Para cada turbina foram extraídos os dados de potência mecânica usando 4 diâmetros distintos de injetor. Destes testes, foi observado que a melhor eficiência nas turbinas de menor dimensão testadas foi de 37%, para as turbinas de dimensão intermédia foi de 42% e para a turbina impressa de maior dimensão foi de 41%. A turbina de metal obteve uma eficiência na ordem dos 48%.

De seguida foram escolhidas 2 turbinas de cada escala, para serem testadas usando um gerador trifásico desenvolvido para o efeito, um retificador e uma carga elétrica programável. Os testes foram realizados com 3 diâmetros de injetor. Destes foi observada uma eficiência máxima que variava entre os 25% para a turbina de menor escala e os 36% para a turbina de metal.

Posteriormente, a melhor turbina de cada escala foi testada usando um nó sensor desenvolvido para o efeito e 2 diâmetros de injetor. Nestes testes foi observado que a eficiência geral variava entre os 18,1%, para turbinas pequenas, e os 29,2%, para a turbina de metal.

Além da diferença de eficiência entre os dois sistemas, foi observado que o sistema tipo *Propeller* tinha uma gama de potência muito estreita relativamente ao sistema *Pelton*.

Refira-se que os dados para o sistema tipo *Propeller* foram capturados de forma completamente manual. Como a quantidade de testes realizados para o sistema tipo *Pelton* foi substancialmente superior, o sistema de captura de dados foi melhorado para permitir a captura semiautomática dos valores de potência mecânica e binário.

Palavras chave: Redes de Sensores Sem Fios, Energia Hídrica, *Pelton*, *Propeller*, Captação de Energia de Pequena Escala.

Abstract

This study aimed to develop very small scale hydropower solutions, small enough to effectively supply energy to wireless sensor network nodes.

Research was done on traditional, large scale, hydropower systems in order to obtain the equations and ratios for correctly dimensioning the turbines and penstock necessary for this study. Details were chosen for the fabrication of a prototype with the available tools. Two different systems were implemented.

The first one was a Propeller style system, similar to the more common Kaplan system, which is very difficult to fabricate at the required scale. For this system a commercial solution was used, namely an airtight axle and bearing tube and a nylon turbine used in scale models. Several flow rates were tested by varying the gross head between the water level upstream and downstream from the turbine. An efficiency of about 62% was obtained by using a divergent draft tube.

The second system was based on Pelton systems. In this case it was decided to use 3D printing technology for the fabrication of the turbines, injectors and any other required part. It was deliberately assumed that all of the large scale relations and equations apply directly to very small scale systems. Therefore a primary turbine was created following very closely the geometry of large scale turbines. 19 turbines were fabricated, divided in 3 size groups, in order to test the effect of changing design attributes. A small scale metal Pelton turbine that was used in a previous study was also tested. Each turbine was tested with a set of 4 injectors with different diameters and the data for mechanical power was extracted. From these tests it was found that the smaller scale turbines had a top efficiency of 37%, the average the sized turbines had a top efficiency of 42% and the larger scale turbine had a top efficiency of 41%. The metal turbine achieved an efficiency of about 48%.

2 turbines of each size group were chosen. These were tested using a hand made three phase generator, a rectifier and a programmable electrical load. The tests were made using 3 diameters of injectors. The maximum efficiency ranged from 25% for the smaller scale turbines and 36% for the metal turbine.

After that, the best turbine of each scale was tested using a developed sensor node and 2 injectors of different diameters. During these tests the overall efficiency ranged from 18.1% for the smaller turbines and 29.2% for the metal turbine.

When comparing the Propeller based system with the Pelton based system it was found that the Propeller system has a much narrower power curve when compared with a Pelton system.

It should be mentioned that the data for the Propeller based system was all captured manually. Since the amount of tests for the Pelton system was substantially larger it was decided to improve the dynamometer into a semi-automatic system.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Hydropower, Pelton, Propeller, Small Scale Energy Harvesting

Agradecimentos

Tenho a agradecer a várias pessoas que me ajudaram na elaboração deste projeto, tanto por ações e/ou por palavras.

Agradeço aos meus pais, irmãos, cunhados e família pela ajuda incondicional que me deram.

Agradeço o meu orientador, Doutor Joaquim Amândio Azevedo, pois como ele são poucas as pessoas tão pacientes e dedicadas ao seu trabalho.

Agradeço a ajuda dos professores Luís Gomes, Dionísio Barros e Gabriel Lira pela ajuda que deram em termos de conhecimentos.

Um agradecimento especial é devido aos meus colegas e amigos do laboratório, sem nenhuma ordem em particular: Filipe, Carlos, Pedro, Francisco, Daniel, Castro, Rodolfo, Élvio e Iuri pela sua ajuda fundamental.

Agradeço aos meus amigos que me ajudaram incondicionalmente com livros, conhecimento e na captura dos dados, sem nenhuma ordem em particular: Joana, José e Sílvia.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas que foram perguntando pelo trabalho e me desejaram sorte.

Finalmente agradeço a todos aqueles que com as suas críticas e ideias ajudaram a melhorar este trabalho.

Índice

Resumo	ii
Abstract.....	iv
Agradecimentos	vi
Índice	viii
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xvi
Lista de Acrónimos.....	xviii
Lista de Símbolos	xviii
1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. Sistemas de energia hídrica.....	3
2.1. Redes de sensores sem fios.....	3
2.2. Alimentação de Redes de Sensores Sem Fios	4
2.2.1. Sistemas de armazenamento de energia	4
2.2.2. Sistemas de captação de energia.....	5
2.2.3. Reguladores de tensão DC/DC	11
2.3. Sistemas hídricos	17
2.3.1. Propriedades físicas de fluidos	17
2.3.2. Classificação das turbinas.....	19
2.3.3. Propriedades gerais das turbinas.....	21
2.3.4. Turbina <i>Pelton</i>	23
2.3.5. Turbina <i>Francis</i>	27
2.3.6. Turbina <i>Propeller/Kaplan</i>	28
2.3.7. Perdas na conduta	29
2.4. Conclusão	32
3. Desenvolvimento do sistema	33
3.1. Requisitos do sistema	33
3.2. Sistema de controlo central.....	34
3.3. Comunicação	36
3.4. Conversor comutado.....	37
3.5. Alimentação e armazenamento.....	39

3.6.	Medição da potência mecânica.....	41
3.7.	Turbinas.....	46
3.7.1.	<i>Propeller</i>	46
3.7.2.	<i>Pelton</i>	50
3.8.	Gerador.....	55
3.9.	Carga variável.....	59
3.10.	Nó sensor.....	61
3.11.	Conclusão.....	64
4.	Testes e resultados.....	65
4.1.	Potência mecânica do sistema <i>Propeller</i>	65
4.1.1.	Condições de teste.....	65
4.1.2.	Perdas na tubagem.....	68
4.1.3.	Análise dos resultados.....	68
4.2.	Potência mecânica do sistema <i>Pelton</i>	74
4.2.1.	Condições de teste.....	74
4.2.2.	Comportamento da água ejetada.....	76
4.2.3.	Análise dos resultados.....	77
4.3.	Comparações entre os dois sistemas.....	83
4.4.	Gerador elétrico e retificador.....	83
4.5.	Potência elétrica com a turbina <i>Pelton</i>	85
4.5.1.	Sistema com a turbina, gerador e retificador.....	85
4.5.2.	Comportamento do gerador e retificador.....	87
4.6.	Potência elétrica com a turbina <i>Propeller</i>	89
4.7.	Conversor DC-DC comutado.....	89
4.8.	Nó sensor.....	90
4.8.1.	Testes de variação de carga.....	90
4.9.	Densidade de potência.....	93
4.10.	Conclusões.....	94
5.	Conclusões e trabalhos futuros.....	95
5.1.	Conclusão.....	95
5.2.	Trabalhos futuros.....	97
	Referências.....	99
	Anexo A. Tecnologias de produção de células fotovoltaicas.....	103
	Anexo B. Formas de onda dos reguladores de tensão comutados.....	105

Anexo C. Fluxograma do conta rotações simples com ecrã	107
Anexo D. Código Arduíno do conta rotações simples com ecrã	108
Anexo E. Fluxograma da interface de medição de potência mecânica	109
Anexo F. Código python da interface de medição de potência mecânica	110
Anexo G. Fluxograma do medidor de potência mecânica.....	125
Anexo H. Código Arduíno do medidor de potência mecânica	126
Anexo I. Fluxograma da interface da carga variável	128
Anexo J. Código python da interface da carga variável	129
Anexo K. Fluxograma do medidor de potência elétrica	151
Anexo L. Código Arduíno do medidor de potência elétrica.....	152
Anexo M. Fluxograma do medidor de rotações	155
Anexo N. Código Arduíno do medidor de rotações	156
Anexo O. Gráficos de potência mecânica do sistema <i>Propeller</i>	157
Anexo P. Fotografias do sistema <i>Propeller</i>	162
Anexo Q. Fotografias do sistema <i>Pelton</i>	166
Anexo R. Gráficos de potência mecânica do sistema <i>Pelton</i>	179
Anexo S. Gráficos dos testes de carga elétrica	211
Anexo T. Gráficos da relação entre potência mecânica e potência elétrica.....	223
Anexo U. Código do nó sensor	226
Anexo V. Gráficos dos testes com nó sensor.....	233

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Exemplo de uma bateria a ser recarregada e a fornecer energia à carga [8]...5	
Figura 2.2 – Modelo da estrutura de uma célula solar [13].....6	
Figura 2.3 – Célula solar policristalina [13].....7	
Figura 2.4 – Interações entre os fotões e os componentes da célula solar [14].....7	
Figura 2.5 – Modelo de uma célula solar [13].....7	
Figura 2.6 – Espectro captável de uma célula de silício amorfo e de uma célula monocristalina [12].....8	
Figura 2.7 – Ponto de máxima transferência de potência [13].....8	
Figura 2.8 – Dependência do ponto máximo de transferência com a radiação solar [13]. .8	
Figura 2.9 – Exemplo de uma turbina de eixo horizontal e de duas turbinas de eixo vertical [17] [15].....9	

Figura 2.10 – <i>Energy Harvesting Eel</i> [18].	10
Figura 2.11 – Turbinas para captação de energia para contadores inteligentes [19]: (a) representação virtual do sistema, (b) protótipo físico.	10
Figura 2.12 – Micro turbina hídrica [15].	11
Figura 2.13 – Micro turbina <i>Pelton</i> e micro turbina <i>Propeller</i> [16].	11
Figura 2.14 – Exemplos de duas topologias de reguladores lineares [22].	12
Figura 2.15 – Exemplos de reguladores DC-DC básicos [23]: a) Conversor redutor; b) Conversor elevador; c) conversor elevador-redutor; d) conversor elevador-redutor Cûk.	13
Figura 2.16 – Topologia <i>buck</i> [25].	13
Figura 2.17 – Topologia <i>boost</i> [25].	14
Figura 2.18 – Topologia <i>buck-boost</i> [25].	14
Figura 2.19 – Topologia Cûk [25].	15
Figura 2.20 – Ganho em relação ao fator de ciclo de um regulador <i>buck-boost</i> e de um regulador Cûk [21].	15
Figura 2.21 – Topologia Cûk com indutores acoplados [20].	16
Figura 2.22 – Topologia Cûk com magnetismo incorporado [27].	16
Figura 2.23 – Exemplo da topologia Cûk com magnetismo incorporado [21].	17
Figura 2.24 – Fluxo laminar e fluxo turbulento [30].	18
Figura 2.25 – Perfil da distribuição de velocidades num fluxo turbulento e evolução do perfil da velocidade média num fluxo laminar e num fluxo turbulento [29] [30].	19
Figura 2.26 – Sistema típico de turbina <i>Pelton</i> [32] [34].	19
Figura 2.27 – Sistema de turbina Francis [32] [34].	20
Figura 2.28 – Sistema de turbina <i>Propeller</i> [32] [34].	20
Figura 2.29 – Instalação típica de uma turbina de reação [32].	20
Figura 2.30 – Variação da eficiência com a velocidade específica [29].	21
Figura 2.31 – Domínio de aplicação das diferentes turbinas [30].	22
Figura 2.32 – Alturas relativas a uma instalação de uma turbina [30].	23
Figura 2.33 – Turbina <i>Pelton</i> [30].	24
Figura 2.34 – Turbina <i>Pelton</i> típica e velocidades características [31].	24
Figura 2.35 – Válvula de lança [31].	24
Figura 2.36 – Forças na turbina e nos baldes [36].	25
Figura 2.37 – Dimensões do balde da turbina [29].	25
Figura 2.38 – Valores típicos para os ângulos [36].	25
Figura 2.39 – Eficiências em função do rácio de velocidade de uma turbina <i>Pelton</i> [34].	26
.....	26
Figura 2.40 – Eficiência em função da carga [34].	26

Figura 2.41 – Rodas de turbinas <i>Francis</i> típicas, de acordo com a sua velocidade específica [30]	27
Figura 2.42 – Turbina <i>Francis</i> típica [29]	27
Figura 2.43 – Sistema de turbina <i>Propeller</i> ou <i>Kaplan</i> [39].	28
Figura 2.44 – Eficiência em função da percentagem da potência dimensionada [34].	28
Figura 2.45 – Formas típicas de tubos de sucção [29]	29
Figura 2.46 – Linha de energia num percurso de líquido ideal.	29
Figura 2.47 – Escoamento por um orifício.	30
Figura 2.48 – Linha de energia num percurso de líquido real.	30
Figura 2.49 – Perdas singulares num sistema hídrico.	31
Figura 3.1 – Arquitetura do sistema desenvolvido.	33
Figura 3.2 – Arduíno Fio [41].	34
Figura 3.3 – Sensores de tensão, corrente e magnetismo lidos pelo Arduíno Fio.	34
Figura 3.4 – Sensor de tensão.	35
Figura 3.5 – Sensor de corrente.	35
Figura 3.6 – Esquema da ligação do sensor de Hall.	36
Figura 3.7 – Módulo XBee S2.	36
Figura 3.8 – Tramas de transmissão e receção por XBEE.	36
Figura 3.9 – Subtramas de envio e receção.	37
Figura 3.10 – Circuito <i>driver</i> de controlo do componente de comutação.	38
Figura 3.11 – Duplicador de tensão capacitivo.	38
Figura 3.12 – Ponto de <i>bypass</i>	39
Figura 3.13 – Circuito de corte seletivo.	40
Figura 3.14 – Travão por corda [48].	41
Figura 3.15 – Esquema do medidor de binário: (A) manivela, (B) balanças de mola, (C) ganchos, (D) apoio móvel, (E) apoio fixo, (F) fio, (G) polia, (H) carris lineares de gaveta, (I) roda volante presa ao eixo sob teste, (J) estrutura principal.	41
Figura 3.16 – Medidor de binário montado.	42
Figura 3.17 – Contador de rotações por segundo.	42
Figura 3.18 – Circuito do medidor de rotações com ecrã.	42
Figura 3.19 – Verificação de valores de rotações por segundo.	43
Figura 3.20 – Materiais testados para a criação da roda volante.	43
Figura 3.21 – Célula de carga.	44
Figura 3.22 – Balanças de bolso.	44
Figura 3.23 – Células de carga montadas nos postes.	44

Figura 3.24 – Amplificador de pontes resistivas [42].	45
Figura 3.25 – Circuito implementado.....	45
Figura 3.26 – Interface de captura de dados.....	45
Figura 3.27 – No topo o conjunto de eixo impermeável, prendedor de eixo e apoio de gerador. Na parte inferior o cone, a turbina e uma moeda para escala.....	47
Figura 3.28 – Sistema <i>Propeller</i> : (A) detalhe do encapsulamento da turbina, (B) captura de água de entrada, (C) captura em aresta viva com 40 mm de diâmetro, (D) captura de água de saída, (E) tubo curvo com 45° e diâmetro de 40 mm, (F) gerador, (G) tubo curvo com 45° e diâmetro de 40 mm adaptado, (H) união de tubos, (I) tubo de vácuo, (J) apertador de eixo, (K) detalhe do apertador de eixo, (L) hélice, (M) cone, (N) eixo e rolamento impermeável.	48
Figura 3.29 – Bocal direito e bocal divergente.....	48
Figura 3.30 – Perdas de carga.....	49
Figura 3.31 – Perdas de carga com tubo de sucção divergente.....	49
Figura 3.32 – Criadores de vórtice.	50
Figura 3.33 – Turbina dimensionada.....	51
Figura 3.34 – Primeiro conjunto de turbinas <i>Pelton</i>	51
Figura 3.35 – Segundo conjunto de turbinas <i>Pelton</i>	52
Figura 3.36 – Turbinas para estudo do efeito do ângulo.	52
Figura 3.37 – Injetores e adaptador.	53
Figura 3.38 – Injetor dimensionado.....	53
Figura 3.39 – Sistema <i>Pelton</i> : (A) mangueira, (B) tanque principal, (C) tanque de compensação, (D) união em T, (F) injetor e turbina, (J) acoplamento turbina-gerador, (U) gerador, (V) captura em aresta viva.....	54
Figura 3.40 – Detalhes do sistema <i>Pelton</i> : (E) eixo, (G) turbina, (H) apoio móvel, (I) apoio fixo, (K) injetor e purga de bolhas de ar, (T) mecanismo de purga de bolhas de ar.	54
Figura 3.41 – Detalhe do interior do injetor e injetor explodido: (A) mangueira, (L) retentor do injetor, (M) injetor, (N) anel de borracha, (O) apoio do injetor, (P) tubo de apoio principal, (Q) entrada do mecanismo de purga de bolhas de ar, (R) êmbolo flutuante, (S) encapsulamento do mecanismo de purga de bolhas de ar.....	54
Figura 3.42 – Exemplo de bobinas concentradas [49].	55
Figura 3.43 – Gerador.....	56
Figura 3.44 – Gerador ligado a retificador trifásico.	56
Figura 3.45 – Modelo de uma fase do gerador.....	57
Figura 3.46 – Uma volta da bobina no estator [49].....	57
Figura 3.47 – Modelo linearizado de um gerador [49].....	58
Figura 3.48 – Ligação de fluxo em relação à largura relativa do enrolamento [49].	58
Figura 3.49 – Representação linear de um enrolamento em relação ao rotor.	59

Figura 3.50 – Carga de corrente constante [42].	59
Figura 3.51 – Circuito da carga variável.	60
Figura 3.52 – Teste de carga elétrica.	60
Figura 3.53 – Interface de captura de dados.	60
Figura 3.54 – Algoritmos de teste.	61
Figura 3.55 – Identificação dos componentes do nó sensor: (A) retificador, (B) conversor comutado, (C) <i>driver</i> , (D) sensor de corrente de entrada na bateria, (E) duplicador de tensão, (F) sensor de tensão, (G) interruptor de corte central, (H) sensor de corrente de saída da bateria, (I) bateria, (J) arduíno FIO e XBee, (K) retentor impermeável de cabos.	62
Figura 3.56 – Fluxograma do código do nó sensor.	63
Figura 4.1 – Sistema de testes da turbina <i>Propeller</i> : (A) tanque de estabilização, (B) tanque de captura, (C) medidor de binário e potência mecânica, (D) turbina, (E) Conduta, (F) tanque de saída, (G) tanque de recuperação de água, (H) bomba de água, (I) válvula de bola, (J) fonte de água externa, (K) mangueiras rígidas, (L) tubo de escapatória.	65
Figura 4.2 – Condições de medição do binário e da potência para uma queda bruta de 10 cm: a) sem tubo de sucção, b) com tubo de sucção direito, c) com tubo de sucção divergente.	66
Figura 4.3- Condições de medição do binário e da potência para uma queda bruta de 20 cm: a) sem tubo de sucção, b) com tubo de sucção direito, c) com tubo de sucção divergente.	67
Figura 4.4 – Condições de medição do binário e da potência para uma queda bruta de 30 cm: a) sem tubo de sucção, b) com tubo de sucção direito, c) com tubo de sucção divergente.	67
Figura 4.5 – Resultados para uma queda bruta de 10 cm sem bocal.	69
Figura 4.6 – Resultados para as montagens sem bocal.	69
Figura 4.7 – Resultados para as montagens com bocal reto.	70
Figura 4.8 – Resultados para as montagens com bocal divergente.	70
Figura 4.9 – Resultados para os sistemas com uma queda bruta de 10 cm.	71
Figura 4.10 – Resultados para os sistemas com uma queda bruta de 20 cm.	71
Figura 4.11 – Resultados para os sistemas com uma queda bruta de 30 cm.	72
Figura 4.12 – Entrada de ar no sistema e o sistema a descartar as bolhas de ar.	73
Figura 4.13 – Sistema a funcionar em pleno.	73
Figura 4.14 – Sistema de teste das turbinas <i>Pelton</i> : (A) fonte de água externa, (B) válvula de boia, (C) captura em aresta viva, (D) tanque de compensação, (E) queda bruta, (F) injetor, (G) tanque de captura, (H) medidor de binário de potência mecânica, (I) turbina, (J) saída de água, (K) válvula de bola.	74
Figura 4.15 – Medição de velocidade do jato.	75
Figura 4.16 – Potência para as várias turbinas com o injetor 3A.	76
Figura 4.17 – Efeito da carga no ângulo de saída da água.	76

Figura 4.18 – Resultados dos ensaios com uma turbina com tratamento e uma turbina sem tratamento.	77
Figura 4.19 – Resultados com e sem divisória central.	77
Figura 4.20 – Resultados da variação da eficiência em relação ao número de colheres. ...	78
Figura 4.21 – Influência do número de colheres na eficiência.	78
Figura 4.22 – Eficiência da turbina 7.	79
Figura 4.23 – Comparação da forma da curva de binário.	79
Figura 4.24 – Eficiência da turbina 5.	80
Figura 4.25 – Influência da dimensão e potência disponível na eficiência.	80
Figura 4.26 – Influência da dimensão na eficiência.	81
Figura 4.27 – Efeito do ângulo na turbina 8 e 9.	81
Figura 4.28 – Efeito do ângulo na turbina 10 e 11.	82
Figura 4.29 – Efeito do ângulo na turbina 12 e 13.	82
Figura 4.30 – Comparação entre as turbinas <i>Pelton</i> e a turbina <i>Propeller</i>	83
Figura 4.31 – Forma de onda da saída trifásica do gerador.	83
Figura 4.32 – Linearidade da tensão em relação à velocidade angular do gerador.	84
Figura 4.33 – Resistência interna equivalente do conjunto gerador e retificador em relação à corrente.	84
Figura 4.34 – Potência elétrica da turbina 8 para vários injetores.	85
Figura 4.35 – Relação entre a tensão e velocidade angular.	85
Figura 4.36 – Relação entre a corrente e o binário relativamente à velocidade angular. ...	86
Figura 4.37 – Eficiência dos sistemas relativamente à potência.	86
Figura 4.38 – Eficiência do gerador e retificador em relação à velocidade angular.	87
Figura 4.39 – Dependência entre a eficiência e a potência disponível.	88
Figura 4.40 – Eficiência do conjunto gerador e retificador em relação à velocidade angular.	88
Figura 4.41 – Potência elétrica para a turbina <i>Propeller</i>	89
Figura 4.42 – Eficiência do conversor DC- DC.	90
Figura 4.43 – Nó sensor.	90
Figura 4.44 – Relação entre a potência de entrada, potência de saída e a velocidade angular.	91
Figura 4.45 – Relação entre a velocidade angular, potência de entrada e fator de ciclo para a turbina 8 e injetor 5.	91
Figura 4.46 – Relação entre a velocidade angular, potência de entrada e fator de ciclo para a turbina A e injetor 5.	92
Figura 4.47 – Comparação entre a potência de entrada e a corrente de entrada.	92

Figura 4.48 – Efeito na potência de entrada em relação ao fator de ciclo.....	93
---	----

Índice de Tabelas

Tabela 2-1 – A melhor escolha de turbina de acordo com a velocidade específica [29] ..	21
Tabela 2-2 – Rácio das dimensões [29].....	25
Tabela 3-1 – Consumos dos componentes	39
Tabela 3-2 – Características de desenho dos injetores.	53
Tabela 4-1 – Valores de β para o sistema.	68
Tabela 4-2 – Eficiências da turbina no ponto de máxima transferência de potência.	72
Tabela 4-3 – Características reais dos injetores.	75
Tabela 4-4 – Eficiência máxima dos sistemas.....	86
Tabela 4-5 – Eficiência de pico do gerador para cada turbina.	87
Tabela 4-6 – Eficiência do sistema em relação à turbina e injetor.	93

Lista de Acrónimos

MPPT	<i>Maximum Power Point Transfer</i>
RSSF	Redes de Sensores Sem Fios
LDO	<i>Low Drop Out</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
OPAMP	Amplificador Operacional
DC	<i>Direct Current</i>
3D	Tridimensional
RPM	Rotações Por Minuto

Lista de Símbolos

A	Área
B	Campo magnético
C_v	Coefficiente de velocidade
C_p	Coefficiente de potência
C	Capacitância
D	Fator de ciclo, Diâmetro da turbina, Distância percorrida
d	Diâmetro do jato
f	Frequência
g	Aceleração da gravidade
H	Queda
H_t	Queda bruta
H_l	Perda de queda
H_e	Queda efetiva
H_u	Queda útil
I	Corrente Elétrica
K_v	Fator de forma de onda
k_λ	Fluxo de ligação
K	Fator de perda na conduta devido ao efeito de atrito
L	Indutância

l	Comprimento
N	Velocidade rotacional, Número de voltas no enrolamento
n_s	Velocidade específica adimensional
N_s	Velocidade específica não adimensional
p	Pressão
P	Potência
Q	Caudal
Re	Número de Reynolds
r_n	Raio do ponto médio das bobinas do gerador
U	Velocidade absoluta tangencial
V	Tensão elétrica
v	Velocidade
Z	Marca piezométrica, Número de colheres
β	Coefficiente de atrito, Ângulo
δ	Densidade relativa
γ	Peso volúmico
Δ	Espessura relativa
ΔH	Perda de queda
η	Eficiência
μ	Viscosidade
ρ	Massa volúmica ou densidade
τ	Binário
Φ	Fator de velocidade
ω	Velocidade angular
Ω	Resistência elétrica

1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas as razões que motivaram a elaboração deste trabalho, os objetivos a alcançar e a estrutura deste relatório.

1.1. Motivação

O tempo de vida de uma rede de sensores sem fios está ligado, de forma muito fundamental, à sua capacidade de se alimentar energeticamente. As fontes de energia tradicionais, como as baterias recarregáveis por energia solar, são adequadas para muitas das aplicações. No entanto, existem situações nos quais é difícil o acesso à energia solar, como exemplo tem-se uma rede de sensores utilizada para monitorizar parâmetros de uma floresta. Nesse caso, o acesso à energia solar implicaria a colocação dos painéis acima da copa das árvores, o que representaria custos extremamente elevados, não sendo viável para redes cujo tamanho dos sistemas deve ser reduzido. Nesses casos é necessário usar fontes menos comuns, como a energia eólica, a energia vibracional ou a energia de gradiente térmico. No entanto, a captação de energia por vibração ou por gradiente térmico tem apresentado eficiências muito baixas e são de difícil obtenção em muitas situações práticas. A energia eólica mostrou ser uma boa alternativa, mas trata-se de uma energia imprevisível, e que não existe em todos os locais de implementação de redes de sensores.

Na ausência de energia solar ou eólica é necessário olhar para outras fontes menos ortodoxas, à escala de captação para alimentar redes de sensores sem fios. A fonte estudada neste trabalho, a energia hídrica, é uma das fontes de energia mais limpas, das mais antigas e com mais potencial em grande escala. Em locais onde existe água, como pequenas ribeiras ou levadas, pode ser adequado utilizar esta fonte de energia para alimentar nós sensores. Além disso, ao contrário da maior parte das outras fontes de energia, a energia hídrica mantém-se por longos períodos de tempo, o que possibilita uma produção previsível e constante. No entanto, para a produção de pequena escala praticamente não existem estudos nesta área.

O presente estudo pretendeu responder às questões de viabilidade e dimensionamento, à escala adequada para a alimentação de nós sensores.

1.2. Objetivos

Como existe pouca informação relativa ao dimensionamento de turbinas hídricas em pequena escala, foi feita uma análise do efeito da geometria e de dimensão das turbinas e dos mecanismos de captação de água na eficiência do sistema.

De forma a se ter uma noção geral da adequação das turbinas às redes de sensores foi feito o estudo de duas classes de turbinas, uma para baixa queda e grande caudal e a outra para grande queda e baixo caudal. Para se obterem os valores de eficiência destas turbinas tornou-se necessário desenvolver uma ferramenta de medição, preferencialmente automática, da potência mecânica. Destas medições pretendeu-se extrair um conjunto de métricas de dimensionamento para turbinas de muito pequena escala.

O passo seguinte passou por acoplar às melhores turbinas um gerador trifásico adequadamente dimensionado. A medição da potência elétrica produzida por este sistema requereu a criação de uma outra ferramenta de medição automatizada.

A última etapa passou pelo dimensionamento e programação de um circuito elétrico que permitisse o carregamento de um conjunto de baterias, mantendo o sistema a funcionar no seu máximo ponto de eficiência.

1.3. Estrutura da dissertação

O presente documento está dividido em cinco capítulos, sendo estes:

1. Introdução – Este capítulo apresenta as necessidades que motivaram a realização deste estudo, possíveis soluções e os objetivos.
2. Sistemas de energia hídrica – Neste capítulo é apresentada toda a teoria necessária para a elaboração deste trabalho. São apresentadas informações relativas às redes de sensores sem fios, à sua alimentação energética, ao armazenamento de energia, aos estudos relativos a fontes de energia para redes de sensores sem fios, a reguladores de tensão, aos sistemas hídricos de grande escala e alguma teoria relativa a fluxos hídricos.
3. Desenvolvimento do sistema – Neste capítulo é feito todo o dimensionamento do nó sensor, das turbinas e dos sistemas de apoio, das ferramentas de medição, do gerador e regulador com procura do ponto de máxima transferência de potência.
4. Testes e resultados – Este capítulo contém a descrição dos testes e resultados obtidos, em conjunto com observações relativas aos mesmos.
5. Conclusões e trabalhos futuros – Neste último capítulo são apresentadas as conclusões tiradas durante os estudos realizados ao sistema e sugeridas melhorias relativamente a trabalhos futuros.

2. Sistemas de energia hídrica

Neste capítulo será apresentada a informação, resultante da pesquisa bibliográfica, relativa aos tópicos abordados nesta dissertação, nomeadamente a alimentação de redes de sensores sem fios (RSSF) e os sistemas hídricos de grande escala, que servirão de base ao estudo dos sistemas de pequena escala.

2.1. Redes de sensores sem fios

Um sensor é um dispositivo que converte grandezas físicas em grandezas elétricas mensuráveis. Estas medições podem ser feitas indiretamente sem contacto, como no caso da medição da radiação solar, ou com contacto, como no caso da medição da vibração de uma estrutura [1] [2].

Uma rede de sensores sem fios é, tipicamente, constituída por pequenos nós relativamente baratos e com capacidade limitada de processamento. Estes, normalmente, são equipados com múltiplos sensores, um processador, memória, sistema de alimentação, rádio e, possivelmente, atuadores. Devido à limitação de recursos há uma série de desafios a serem ultrapassados, sendo um destes a capacidade limitada de energia disponível.

Uma forma de lidar com esse problema pode ser através do uso de algoritmos eficientes de comunicação. De forma a cumprir a sua missão, os sensores devem conseguir comunicar uns com os outros para transmitir a informação para um ponto central com o mínimo de perdas e em tempo adequado [3] [4].

Um nó sensor sem fios é normalmente alimentado por baterias. Para aumentar a longevidade de um nó sensor também podem ser utilizados mecanismos de captação de energia do ambiente, sendo frequente a utilização de painéis solares [5].

Uma rede de sensores sem fios tem pouca ou nenhuma infraestrutura e é normalmente constituída por algumas dezenas ou até alguns milhares de nós sensores a trabalharem conjuntamente, com o fim de monitorizar e obter informações do ambiente que os rodeia. Uma rede pode ser estruturada, quando os sensores são colocados de forma organizada e ponderada, de modo a maximizar a área observada com o mínimo de sensores, ou não estruturada, quando os sensores são espalhados de forma densa e desorganizada. As vantagens de uma rede estruturada em relação a uma não estruturada advêm de uma redução no número de nós necessários para se observar uma zona, conseqüentemente reduzindo o custo de manutenção e eliminando as zonas não cobertas pelos sensores. A implementação desta topologia pode ser limitada por fatores geográficos, ambientais ou sociais, nomeadamente se existe terreno intransponível, ou se o ambiente local for perigoso, como a caldeira de um vulcão, ou se o local a monitorizar for um campo de batalha [4].

Algumas das muitas aplicações das redes de sensores são nas áreas militares, na monitorização biomédica, na domótica, no resgate durante desastres naturais, na observação da saúde de estruturas, no consumo de recursos, na exploração em ambientes perigosos ou remotos e na monitorização sísmica [3] [5] [6].

Um cenário futuro é um em que os sensores sem fios são tão baratos e pequenos que podem ser embutidos no material das estruturas ou pulverizados em zonas de interesse, criando, desta forma, uma rede digital que permite a observação muito detalhada de fenómenos locais [7].

2.2. Alimentação de Redes de Sensores Sem Fios

Com o aumento da popularidade e do uso de sensores sem fios em funções de monitorização ambiental começam a aparecer redes de sensores muito densas, com uma grande variedade de sensores e tecnologias de processamento local de dados. Tradicionalmente, essas redes são alimentadas com recurso a baterias. Isto faz com que o custo de manutenção da rede se torne problemático, devido ao custo da substituição das baterias, fazendo com que estas sejam financeiramente insustentáveis. Daqui nasce a necessidade de se obter energia a partir de fontes alternativas, obtidas no local de implementação do sensor, para suplementar ou substituir o uso de baterias [6] [5].

Nesta secção são abordados vários sistemas de armazenamento de energia, vários sistemas de captação de energia e reguladores de tensão.

2.2.1. Sistemas de armazenamento de energia

Existem vários tipos de sistemas de armazenamento de energia. Estes podem ser químicos, mecânicos, eletrostáticos, indutivos, etc. Em aplicações de redes de sensores sem fios a fonte primária de energia é, tipicamente, uma bateria.

Uma bateria é um dispositivo que converte a energia potencial química armazenada no seu interior, através de um processo de redução-oxidação eletroquímica, em energia elétrica aos seus terminais. Para baterias recarregáveis o processo é reversível. Nas reações de redução-oxidação não eletroquímicas, como a oxidação ou a combustão, a transferência de eletrões ocorre diretamente e é emitido calor. Como uma bateria eletroquímica converte energia química em energia elétrica diretamente não é sujeita às limitações do ciclo de Carnot ditadas pela segunda lei da termodinâmica, como é o caso de uma máquina de combustão ou máquina de calor. Consequentemente, é possível obter maiores eficiências de conversão de energia com baterias [8] [9].

Uma bateria é normalmente composta por células, cada uma delas com um cátodo e um ânodo. Estes são, respetivamente, o terminal negativo, que é oxidado e no processo fornece eletrões ao circuito elétrico, e o terminal positivo, que aceita eletrões do circuito elétrico. Um outro componente da bateria é o eletrólito. Este serve como condutor iónico e permite a transferência de cargas positivas dentro da célula entre o ânodo e o cátodo. Este costuma ser um líquido, como a água ou outro tipo de solvente, com sais, ácidos ou alcalinos dissolvidos para permitir a condutividade iónica. Existem também baterias com um eletrólito sólido, que se comporta como condutor iónico à temperatura de trabalho da bateria [8].

Numa rede de sensores sem fios normalmente são usados dois tipos de baterias, as primárias e as secundárias. Uma bateria que não pode ser recarregada facilmente ou de forma efetiva é classificada como sendo uma bateria primária. Estas são usadas uma vez e descartadas quando a sua energia é esgotada. São muito usadas em aparelhos portáteis e costumam ter uma boa longevidade, grande densidade energética com pouca corrente de descarga, pouca manutenção e facilidade de uso [8].

Tendo em conta que os sensores sem fios tendem a consumir muito pouca energia e que as baterias primárias comerciais tendem a ser baratas relativamente à sua capacidade, o uso destas pode ser vantajoso numa rede de sensores cujo acesso físico é fácil ou a duração da sua função é curta. As vantagens destas baterias também incluem a capacidade de colocar os sensores em lugares sem fontes externas e ambientais de energia (lugares sem luz, energia térmica ou vibracional), não requerem materiais exóticos de encapsulamento, são relativamente

independentes de variáveis ambientais, são previsíveis no seu comportamento e permitem colocar em funcionamento uma rede de sensores rapidamente [10].

As baterias secundárias são as que podem ser facilmente recarregadas, ao fazer-se passar corrente na direção oposta à da corrente de descarga. Estas podem ser usadas como armazenamento temporário para colmatar falhas de uma fonte primária, como é o caso das baterias das fontes de alimentação ininterruptas, ou como fonte primária, como é o caso das baterias nos telemóveis. Estas baterias são caracterizadas por apresentarem uma grande densidade de energia, grande capacidade de descarga, curvas de descarga planas e bom desempenho em temperaturas baixas. De modo geral, comparativamente às baterias primárias, estas têm uma densidade de energia mais baixa e a sua capacidade de retenção de carga é inferior [8] [10]. Na Figura 2.1 é mostrado um exemplo de uma bateria recarregável a ser carregada e a fornecer energia a uma carga.

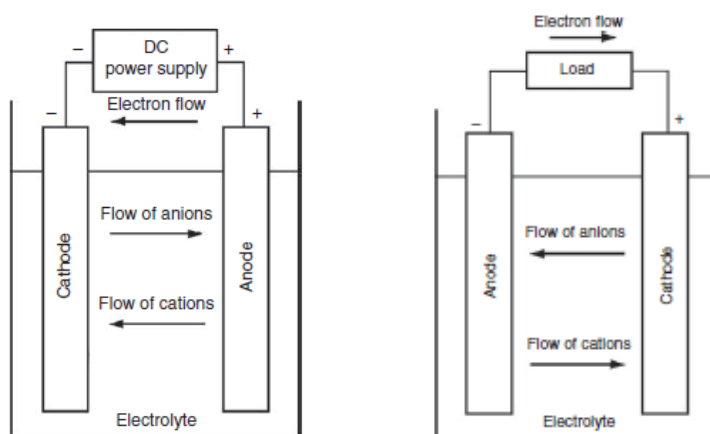


Figura 2.1 – Exemplo de uma bateria a ser recarregada e a fornecer energia à carga [8].

2.2.2. Sistemas de captação de energia

A captação de energia do ambiente pode ser dividida em dois tipos, o *energy harvesting* e o *energy scavenging*. O termo *energy harvesting* aplica-se a situações onde a fonte de energia ambiental é bem caracterizada e regular, enquanto o termo *energy scavenging* aplica-se a situações onde a fonte de energia é desconhecida ou irregular. A diferença entre estes dois tipos é pouco significativa, mas reflete um aspeto muito importante na implementação de sistemas de sensores alimentados pelo ambiente, nomeadamente o do correto dimensionamento do sistema de alimentação, relativamente ao ambiente onde este vai ser implementado, pelo engenheiro que está a criar o sistema. Como normalmente ambos os termos são usados de forma indistinta na literatura, o ato de capturar energia do ambiente será doravante identificado como captação de energia ambiental em qualquer um dos dois cenários [10].

O desenvolvimento de tecnologias de sensores sem fios tem avançado a uma velocidade muito maior que a velocidade de desenvolvimento de baterias primárias. Em certas aplicações o uso destas já não é adequado, existindo também pressões regulamentares para a limitação de materiais perigosos ou nocivos nas baterias. Consequentemente, torna-se fundamental o desenvolvimento de aplicações de captação de fontes alternativas de energia [5].

Em certas aplicações torna-se fundamental o uso de fontes de energia externas ao próprio sensor, nomeadamente a energia oriunda do meio circundante. Quando uma rede é demasiado extensa, como a aplicação de pequenos sensores numa floresta para a prevenção de fogos e deteção de poluição, os sensores estão colocados em lugares remotos ou de difícil acesso, o que

implica a captação de energia do ambiente para a operação da rede por longos períodos de tempo. Noutras situações os sensores são colocados em instalações industriais com funcionamento contínuo ou em sistemas biomédicos, como desfibrilhadores e *pacemakers*. Neste último caso são requeridas cirurgias invasivas para a substituição da bateria. Uma alternativa poderá ser a alimentação dos sistemas eletrónicos a partir da energia do próprio corpo [10] [5].

Seguidamente são abordadas algumas fontes comuns de alimentação de nós sensores sem fios.

2.2.2.1. Solar

Uma fonte de energia muito popular para alimentação de nós sensores é a utilização de painéis solares fotovoltaicos. Estes permitem a conversão da energia da radiação solar em energia elétrica e são usados numa miríade de sensores terrestres e flutuantes. Podem ser colocados em florestas, montanhas, desertos, superfícies oceânicas, ilhas remotas e ambientes domésticos e industriais [5] [6].

Algumas das tecnologias mais comuns usadas em painéis solares para redes de sensores sem fios são as células monocristalinas, policristalinas, filmes finos amorfos e filmes finos de telureto de cádmio. A eficiência destes sistemas encontra-se na ordem dos 15% a 20% para células monocristalinas, 10 a 13% para células policristalinas, 8 a 10% para células de filme fino amorfo e 8 a 13% para células de filme fino CdTe [11]. Podem ser obtidas mais informações relativas a cada uma destas tecnologias no Anexo A.

Na Figura 2.2 é representada a estrutura típica de uma célula fotovoltaica e na Figura 2.3 é mostrado um exemplo de uma célula fotovoltaica policristalina. É de notar o posicionamento dos contactos frontais responsáveis pela passagem da corrente e os cristais característicos desta tecnologia. A luz que incide no material é absorvida na região mais próxima da superfície e é convertida em pares eletrão-lacuna. Se estes não forem recombinados ao atingirem a junção são separados por um campo elétrico [12].

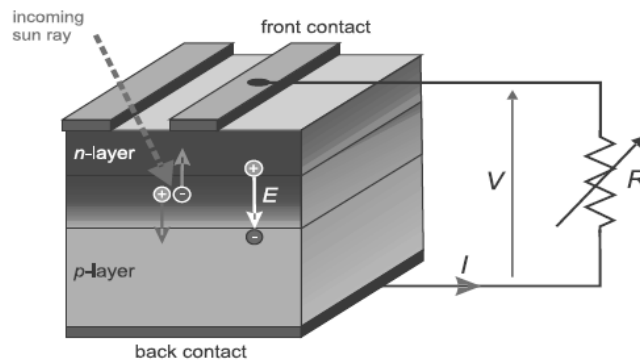


Figura 2.2 – Modelo da estrutura de uma célula solar [13].

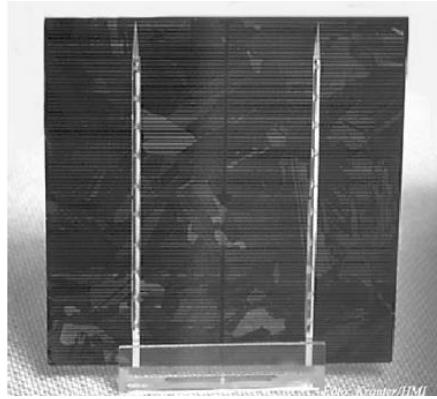


Figura 2.3 – Célula solar policristalina [13].

Na Figura 2.4 são representadas as interações entre os fótons e os vários componentes da célula solar. Somente a interação 3 é a desejada, sendo as restantes vistas como perdas [14].

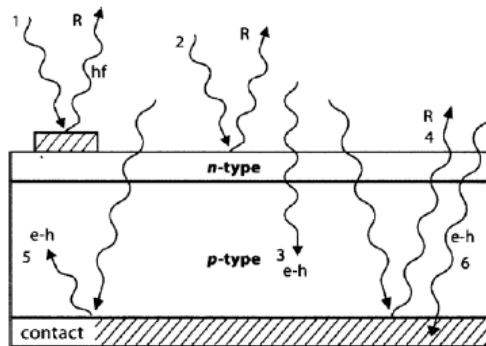


Figura 2.4 – Interações entre os fótons e os componentes da célula solar [14].

Uma célula solar pode ser modelada, como representado na Figura 2.5, como uma fonte de corrente limitada em tensão, cuja corrente aumenta com a intensidade de radiação incidente, sendo que a tensão tende a manter-se constante.

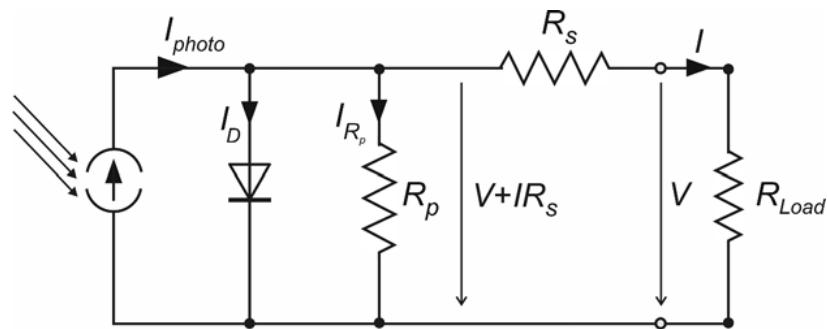


Figura 2.5 – Modelo de uma célula solar [13].

Cada tecnologia tem sensibilidade a diferentes gamas espectrais de radiação incidente. Um exemplo disto pode ser visto na Figura 2.6, onde é feita a comparação entre uma célula com tecnologia de silício amorfo e uma célula de silício cristalino. Embora uma célula de silício cristalino tenha uma gama espectral mais larga e uma eficiência maior, uma célula de silício amorfo é mais adequada para aplicações interiores, visto que a sua resposta espectral é mais próxima à emissão espectral de uma lâmpada fluorescente branca [11].

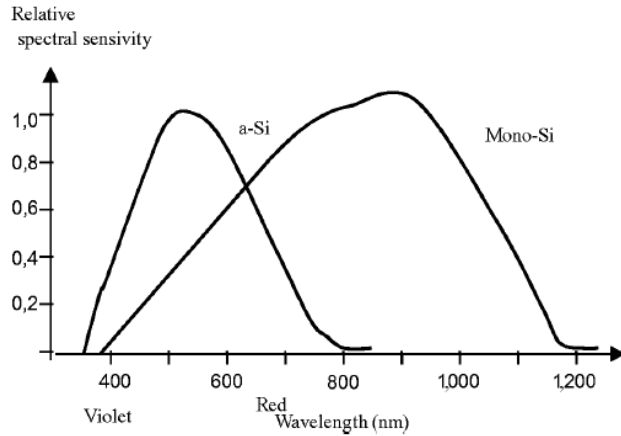


Figura 2.6 – Espectro captável de uma célula de silício amorfo e de uma célula monocristalina [12].

O facto destes painéis funcionarem como fontes de corrente dificulta a extração da máxima potência. O ponto de máxima transferência de potência depende tanto da tensão como da corrente, como representado na Figura 2.7, e da radiação solar, como mostrado na Figura 2.8. Consequentemente, é necessário o uso de algoritmos de procura do ponto de máxima transferência de potência e de um sistema de armazenamento de energia, de modo a se tirar o máximo de proveito desta fonte.

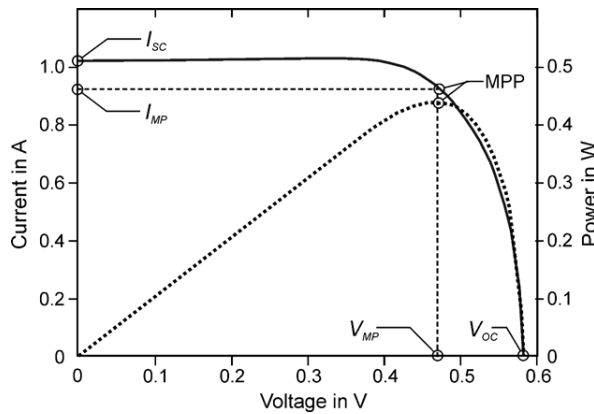


Figura 2.7 – Ponto de máxima transferência de potência [13].

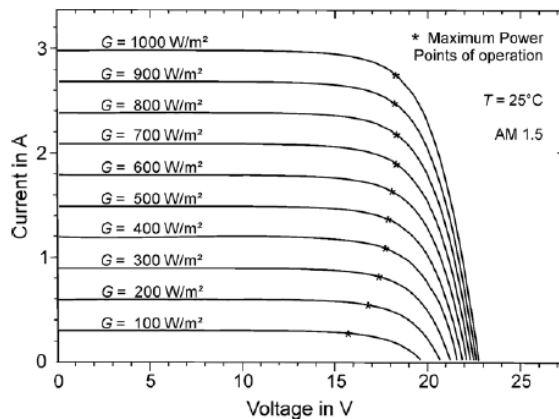


Figura 2.8 – Dependência do ponto máximo de transferência com a radiação solar [13].

Algumas das desvantagens desta tecnologia prendem-se com as suas limitações físicas, nomeadamente a impossibilidade de alimentação à noite, o que implica o uso de baterias, e a baixa eficiência de conversão de energia. A utilização em meios como as florestas requer uma

boa escolha ou manipulação do local, de modo a permitir o acesso à luz solar, e a necessidade de acesso para permitir a limpeza da superfície dos painéis, o que pode ser complicado em lugares remotos [5] [6].

2.2.2.2. Eólico

Sistemas eólicos são extensivamente usados para a produção de energia em grandes e médias escalas, nomeadamente para redes elétricas e em pequenas aplicações móveis, por exemplo em embarcações. Para o uso em redes de sensores sem fios esta fonte de energia é adequada para sensores terrestres ou flutuantes. Estes podem ser colocados em ambientes remotos, como florestas, montanhas, rios, lagos e superfícies oceânicas.

A quantidade de potência mecânica disponível numa turbina eólica é dada por [15] [16]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.1)$$

onde A é a área da turbina apresentada ao vento, v a velocidade do vento e ρ é a densidade do ar.

A potência elétrica é dependente do coeficiente de potência, C_p , da eficiência do sistema de transmissão de energia, η_t e da eficiência do gerador, η_g . Esta relação é dada por [15]:

$$P_e = \eta_t \eta_g C_p P_w \quad (2.2)$$

O limite máximo para o valor de C_p é 59,3%, também conhecido como limite de Betz. Para pequenas turbinas o valor de C_p é bem menor, devendo-se essa redução em grande parte às perdas por fricção. Tipicamente uma turbina de pequena escala tem um C_p na ordem dos 10%-30% [5] [16] [17].

As turbinas eólicas podem ser classificadas de acordo com o seu eixo de rotação. Estas podem ser turbinas de eixo horizontal e ou de eixo vertical. No primeiro tipo, o eixo de rotação é paralelo ao solo e deve estar constantemente apontado na direção do vento. Este é o tipo mais comum e mais usado em aplicações de grande dimensão. O segundo tipo, de eixo vertical, não é tão eficiente como o de eixo horizontal, mas é mais usado em pequena escala e tem algumas vantagens em algumas situações. Estes sistemas são, em geral, mais simples de construir, são omnidirecionais e respondem mais rapidamente a variações bruscas de direção do vento. Estas turbinas podem ainda ser subdivididas em turbinas que usam forças de sustentação, como a forma das asas da turbina Darrieus, ou turbinas que usam forças de arrasto, como os semicilindros das turbinas Savonius. Exemplos de uma turbina de eixo horizontal e de duas turbinas de eixo vertical são apresentados na Figura 2.9 [15] [16] [17].

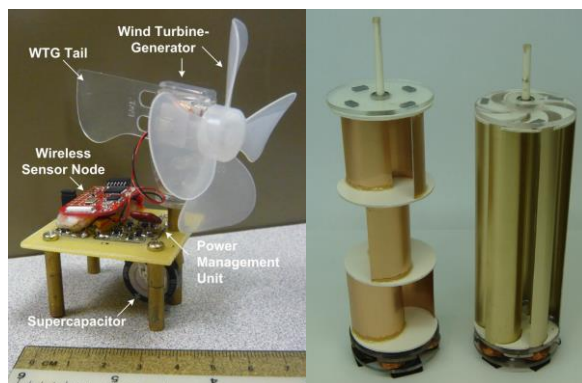


Figura 2.9 – Exemplo de uma turbina de eixo horizontal e de duas turbinas de eixo vertical [17] [15].

A energia eólica por natureza é imprevisível. Isto implica que a potência disponível pode variar rapidamente, podendo mesmo deixar de existir durante períodos longos. Isto implica o uso de baterias de grande capacidade. A melhor forma de se aproveitar este recurso consiste em usar esta energia para suplementar a captação de energia de outras fontes, como a solar [7].

2.2.2.3. Hídrico

Os sistemas hidroelétricos baseiam-se na captura da energia da água em movimento e são uma das formas mais antigas para gerar energia em média e grande escala, na ordem dos kW a MW. A tecnologia por trás da geração de energia hidroelétrica em grande escala está bem estabelecida. Para fins de alimentação de sistemas de pequena escala, na ordem de alguns W, há poucos sistemas, sendo estes em geral sistemas improvisados ou uma miniaturização direta de sistemas de grande escala [5] [7].

Os sistemas hídricos de pequena escala encontrados na bibliografia são os apresentados em [16], [15], [18] e [19]. O sistema apresentado em [18] é composto por tiras que, por efeito do movimento da água, turbulência e da sua forma, criam eletricidade devido à deformação dos materiais piezoelétricos, sendo este sistema representado na Figura 2.10.

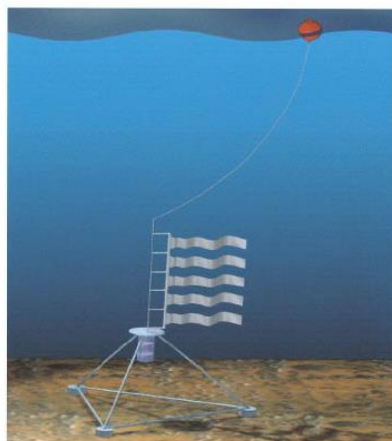


Figura 2.10 – *Energy Harvesting Eel* [18].

Os sistemas apresentados em [15] e [19] são mais convencionais e baseiam-se no uso de pequenas turbinas em linha com uma conduta de água. O sistema em [19], apresentado na Figura 2.11, é feito à medida, tendo como função principal alimentar um contador de água inteligente.

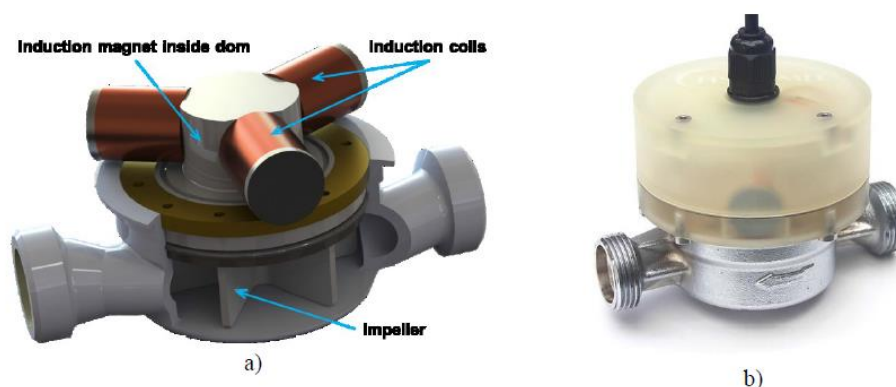


Figura 2.11 – Turbinas para captação de energia para contadores inteligentes [19]: (a) representação virtual do sistema, (b) protótipo físico.

O sistema apresentado em [15] usa um gerador hídrico como uma de três fontes de energia para o sistema, sendo um gerador desenvolvido e patenteado pela Vulcano para alimentar um esquentador inteligente. Nesse trabalho, o gerador é colocado em linha com um sistema de irrigação, como mostra a Figura 2.12. A saída elétrica é de corrente contínua.



Figura 2.12 – Micro turbina hídrica [15].

O sistema apresentado em [16] é ainda mais convencional. Este usa duas turbinas que são normalmente encontradas em sistemas hídricos de grande escala, uma turbina *Pelton* e uma turbina *Propeller*, para gerar energia para alimentar um sensor sem fios convencional. As turbinas encontram-se representadas na Figura 2.13.



Figura 2.13 – Micro turbina *Pelton* e micro turbina *Propeller* [16].

Dos sistemas indicados somente os apresentados em [16] referem diretamente a sua eficiência, e o apresentado em [19] indica alguns parâmetros que permitem calcular a eficiência. Os restantes não fornecem informação suficiente para a calcular.

Segundo [16] a eficiência de um sistema *Pelton* de pequena dimensão varia entre os 1,7% e os 29,5%. Por sua vez o sistema *Propeller* tem uma eficiência que varia entre os 4,3% e os 5,5%.

Em [19] tem-se que, com um caudal de 20 l/min e uma queda de pressão de 2,2 bar, é obtida uma potência de 720 mW. Estes valores podem ser convertidos em m^3/s e em metros de altura piezométrica, obtendo-se um caudal igual a $0,00033m^3/s$ e uma queda útil de 22,44 m. Tem-se, então, uma potência hídrica disponível de 72,57 W e uma eficiência de 1%.

2.2.3. Reguladores de tensão DC/DC

As fontes de energia renováveis tendem a ser variáveis no tempo, apresentam níveis de tensão inadequados para a carga e funcionam no seu ponto máximo apenas em condições específicas. Para ser obtido o máximo de eficiência no carregamento de baterias e na alimentação de circuitos são usados reguladores de tensão, sendo que estes podem ser lineares ou comutados. Estes dispositivos são colocados entre a fonte de energia, que pode variar de

forma arbitrária, e a carga. Como toda a energia passa pelo circuito de regulação este deve introduzir o mínimo possível de perdas [20] [21].

Os reguladores lineares controlam a tensão à saída, reduzindo-a, dissipando a diferença de tensão sob a forma de calor. São dispositivos ou circuitos relativamente simples, baratos, pequenos, leves, com baixo ruído e boa resposta a variações de tensão da entrada. No entanto são relativamente ineficientes, na ordem dos 20% a 60%. Em especial, para diferenças elevadas de tensão, estão limitados a baixas potências, baixas tensões, só têm a capacidade de reduzir a tensão de entrada, só é possível criar reguladores não inversores e para a conversão AC-DC é necessário transformadores de baixas frequências, que tendem a ser grandes e pesados. Estes reguladores são particularmente úteis para suavizar a tensão à saída de um regulador comutado ou quando a eficiência é secundária relativamente à complexidade e custo de implementação [20] [22]. Na Figura 2.14 são representados dois tipos de reguladores lineares, o regulador em série e o regulador *shunt*. Um exemplo de um componente regulador linear muito popular é o LM317 e a família de reguladores fixos 78xx.

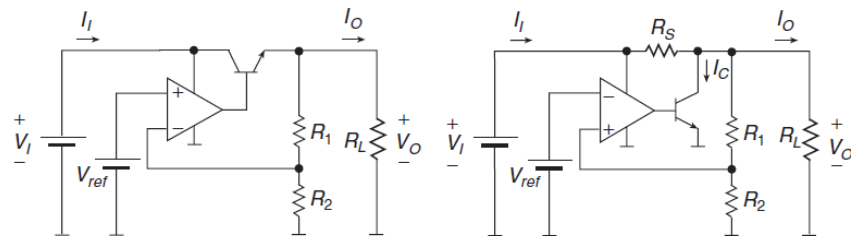


Figura 2.14 – Exemplos de duas topologias de reguladores lineares [22].

Os reguladores comutados conseguem regular a tensão de saída de uma forma elevatória ou redutora, com um mínimo de perdas. Isto é conseguido usando-se componentes de comutação que trocam rapidamente entre o estado ligado e desligado, perdendo o mínimo de energia no estado intermédio, de forma a criar uma onda quadrada de alta frequência que por sua vez passa por componentes de filtragem. Outra forma de ver um regulador de tensão comutado consiste em considerar as comutações como uma forma de deslocar os componentes de armazenamento temporário de energia, como condensadores e bobinas, pelo circuito de forma controlada. Em geral, estes reguladores são baseados em quatro topologias básicas, nomeadamente os reguladores redutor, elevador, redutor-elevador e conversor Cûk, representados na Figura 2.15. O uso de frequências de comutação elevadas permite o uso de elementos indutivos mais pequenos, reduzindo, desta forma, o custo e a dimensão geral do regulador. Isto é vantajoso em aplicações onde o espaço e o peso são importantes. A desvantagem do uso de altas frequências é o facto dos reguladores comutados serem fontes de ruído eletromagnético [20] [22] [23] [24].

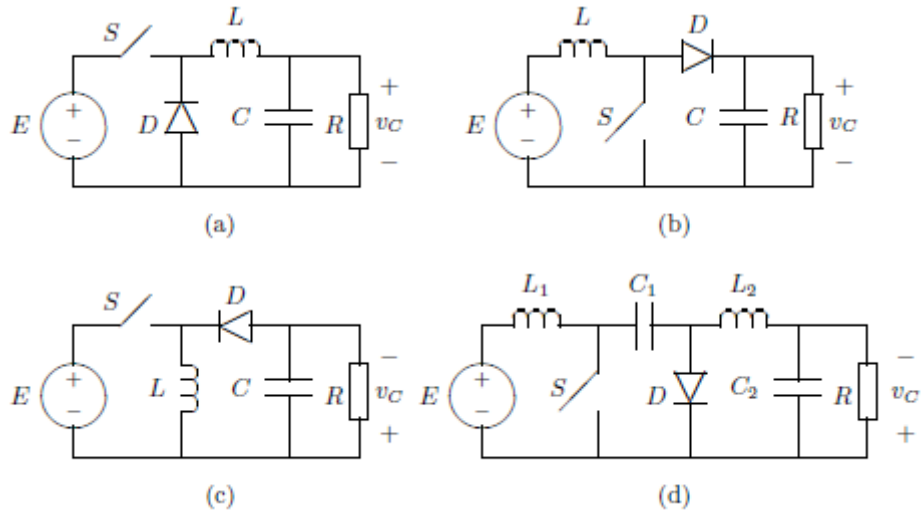


Figura 2.15 – Exemplos de reguladores DC-DC básicos [23]: a) Conversor redutor; b) Conversor elevador; c) conversor elevador-redutor; d) conversor elevador-redutor Cúk.

O resultado final é uma saída de tensão contínua com um *ripple* característico e dependente da carga, da escolha de componentes e da frequência de comutação [20] [24].

As formas de onda características de cada regulador podem ser consultadas no Anexo B.

Um exemplo de um regulador comutado simples é o regulador redutor, também conhecido como *buck*. Neste caso a tensão média de saída é inferior à tensão de entrada, sendo o circuito comum para esta topologia o apresentado na Figura 2.16 [25].

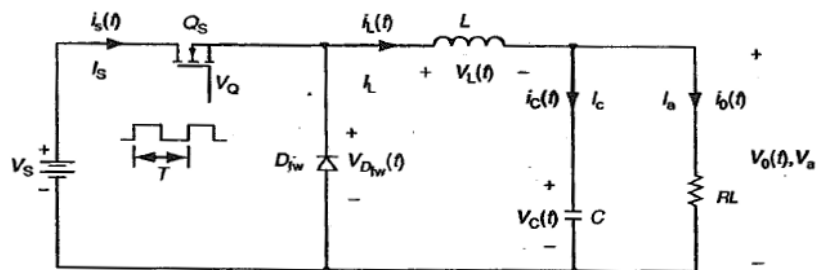


Figura 2.16 – Topologia *buck* [25].

A função de transferência do conversor redutor em modo não lacunar e sem perdas é dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = D \quad (2.3)$$

com V_o a tensão de saída do regulador, V_i a tensão de entrada e D o fator de ciclo da onda de controlo do elemento de comutação.

Esta topologia tem como vantagens uma eficiência alta, simplicidade, baixo *stress* no elemento comutador, capacidade de lidar com curto circuitos na carga e baixo *ripple* na tensão de saída. Algumas das desvantagens são a corrente de entrada pulsada, que pode causar interferência eletromagnética (implicando o uso de um filtro de entrada), a possibilidade de destruir a carga devido a sobretensão (caso o elemento comutador falhe e fique em modo de condução), a exigência que o condensador de saída tenha uma resistência parasita muito baixa (de forma a reduzir o *ripple* da tensão de saída) e o facto de exigir um elemento comutador não referenciado à massa [22] [24] [25].

Um outro conversor comutado simples é o conversor elevador, conhecido também por *boost*. A sua topologia é apresentada na Figura 2.17.

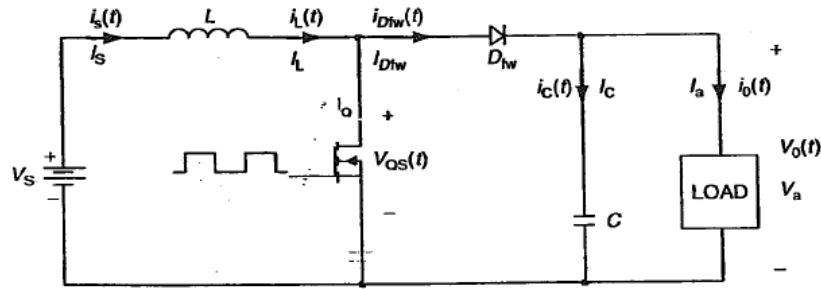


Figura 2.17 – Topologia *boost* [25].

A função de transferência desta topologia é dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.4)$$

As vantagens desta topologia são a sua simplicidade, grande eficiência, ter o elemento comutador referenciado à massa e ter baixo *ripple* de corrente de entrada. As desvantagens são a fraca capacidade de evitar que transitórios perigosos cheguem à carga, os picos elevados de corrente que causam elevado *stress* nos elementos de comutação, a grande sensibilidade a variações de fator de ciclo, o elevado *ripple* de corrente na saída, a necessidade de existir uma carga, visto que sem esta a tensão do condensador de saída vai aumentando até este se danificar e a impossibilidade de lidar com curto circuitos na carga e sobrecargas [22] [24] [25].

Caso seja necessário obter tensões de saída que sejam superiores ou inferiores à tensão de entrada é usada a topologia redutora-elevadora, também conhecida por *buck-boost*. Esta é apresentada na Figura 2.18.

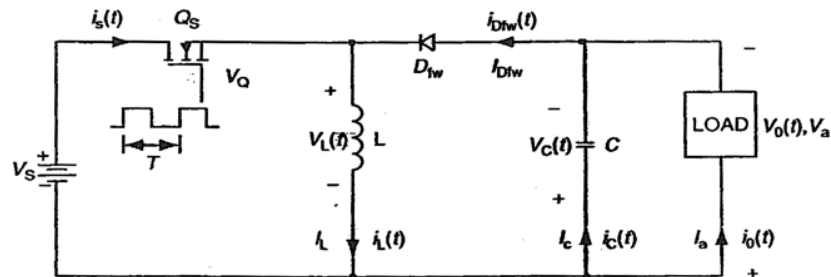


Figura 2.18 – Topologia *buck-boost* [25].

A função de transferência desta topologia é dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{D}{1 - D} \quad (2.5)$$

É de notar que a tensão de saída é invertida relativamente à tensão de entrada.

As vantagens do regulador redutor-elevador são a sua simplicidade, a capacidade de inverter a tensão de entrada sem o uso de transformadores e a capacidade de responder a curto-circuitos e sobrecargas. As desvantagens passam por ter um elemento comutador não referenciado à massa, existirem correntes pulsantes de entrada e de saída que aumentam a quantidade de interferência eletromagnética e o *ripple* da tensão de saída e existir uma tensão de saída inversa indesejável em certos casos [21] [22] [24] [25].

Em todos estes sistemas há um dos lados cuja corrente é pulsante. Este fenómeno reduz a vida útil de uma bateria e emite ruído eletromagnético que pode ser inadequado para a aplicação. Consequente, é desejável reduzir ao máximo esse *ripple*. A topologia Cûk aparece como uma solução, estando esta representada na Figura 2.19. Esta pode ser vista como a combinação de um conversor elevador seguido de um conversor redutor separados por um condensador de armazenamento intermédio [21] [25].

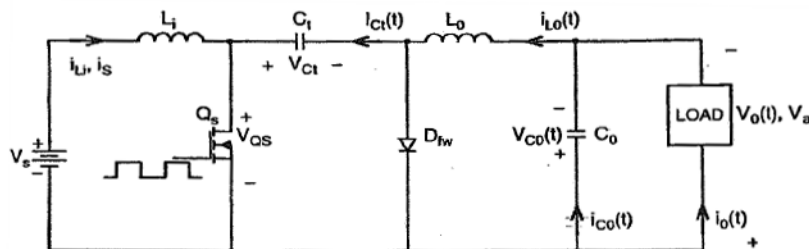


Figura 2.19 – Topologia Cûk [25].

A função de transferência desta topologia é igual à do regulador redutor-elevador e é dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{D}{1-D} \quad (2.6)$$

A principal vantagem deste conversor resulta da redução do *ripple* de entrada e de saída devido ao uso das indutâncias em série com a entrada e com a saída, que fazem com que a corrente não seja pulsada. Desta forma, é fortemente reduzida a emissão de ruído eletromagnético. Como o *ripple* é menor torna-se também possível reduzir a dimensão dos componentes de filtragem e, dessa forma, reduzir a dimensão e custo do conversor. A eficiência desta topologia também tende a ser melhor do que a de um redutor-elevador tradicional, como se pode verificar na Figura 2.20 [21] [24] [25].

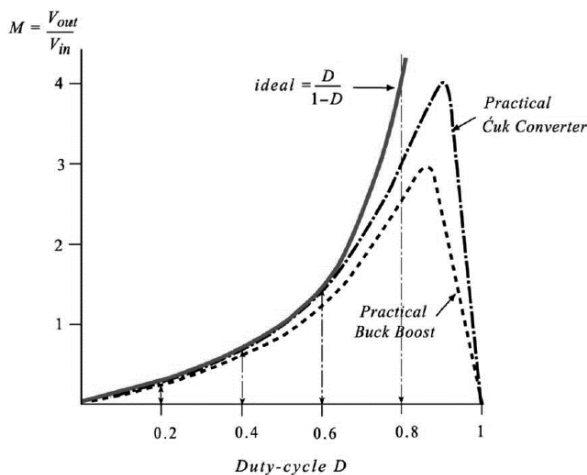


Figura 2.20 – Ganho em relação ao fator de ciclo de um regulador *buck-boost* e de um regulador Cûk [21].

É de notar que em qualquer conversor com capacidade redutora-elevadora o ganho de tensão não é fisicamente infinito. Este sobe até um valor limite e depois decresce rapidamente à medida que o fator de ciclo se aproxima de 1 [21].

Algumas das desvantagens desta topologia são a necessidade de se utilizarem elementos comutadores que suportem uma corrente igual à soma da corrente de entrada com a corrente de saída, maior quantidade e complexidade de componentes, a inversão da tensão de saída e a

necessidade de um condensador de transferência que suporte o elevado *ripple* de corrente e tenha poucas perdas [21] [24] [25].

Existem várias formas de reduzir o *ripple* de saída do conversor Cûk, sendo a mais comum a que passa por aumentar a frequência de comutação, visto que o *ripple* da tensão de saída é inversamente proporcional ao quadrado da frequência de comutação. Tendo em conta que há limites práticos e físicos para a frequência de comutação, torna-se necessária uma aproximação alternativa. Outro método para reduzir o *ripple* consiste no uso de indutores acoplados, ou seja, as bobinas do conversor passam a usar o mesmo núcleo magnético e o mesmo número de enrolamentos, fazendo com que a indutância efetiva vista da entrada e da saída seja o dobro, causando uma redução do *ripple* da tensão para metade. Afinando esse rácio é possível remover por completo o *ripple* da saída. Esta topologia e as ondas características são mostradas na Figura 2.21 [21] [25] [26].

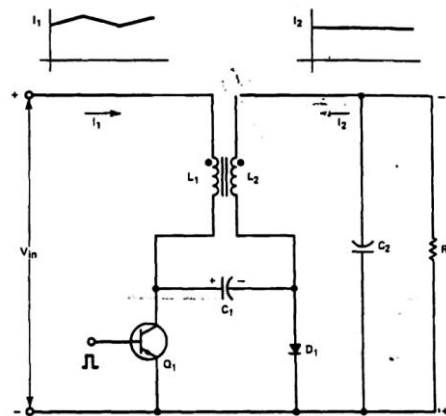


Figura 2.21 – Topologia Cûk com indutores acoplados [20].

Uma extensão desta topologia implica o uso de um transformador de isolamento. Se este for incorporado no mesmo material magnético das bobinas tem-se o conversor Cûk com magnetismo incorporado apresentado na Figura 2.22 com as curvas características de corrente de entrada e saída [20] [24] [26] [27].

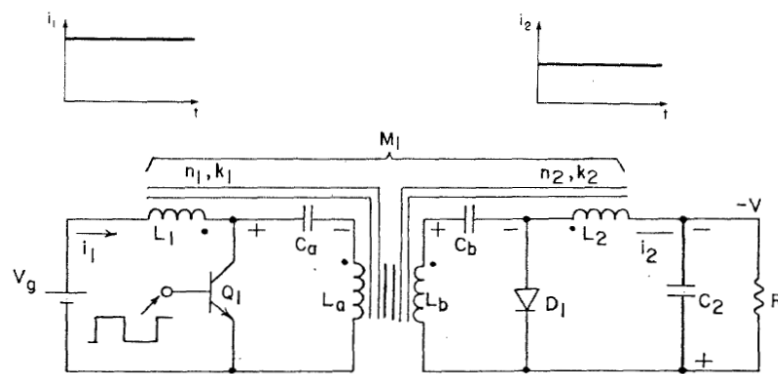


Figura 2.22 – Topologia Cûk com magnetismo incorporado [27].

É de notar que nesta variante é possível obter a condição de *ripple* nulo tanto na entrada como na saída, um rácio fixo de ganho no transformador de isolamento diferente de 1, uma redução da dimensão geral e a possibilidade de reorientar a saída de forma a não ficar invertida em relação à entrada [20] [21] [25] [26].

Na Figura 2.23 é apresentado um exemplo dos elementos magnéticos do conversor bobinados num só núcleo magnético e inseridos no circuito.

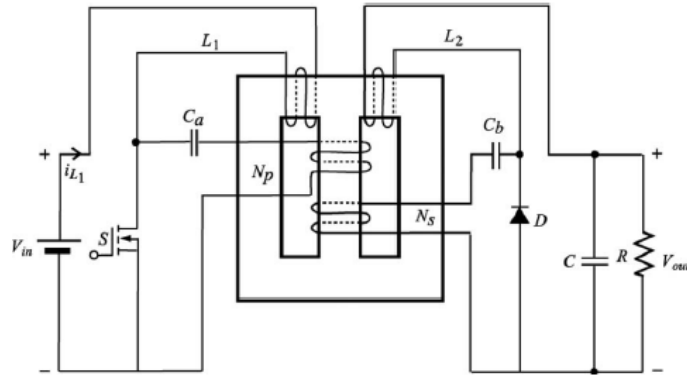


Figura 2.23 – Exemplo da topologia Cûk com magnetismo incorporado [21].

2.3. Sistemas hídricos

Nesta secção serão abordadas as propriedades físicas da água, de modo a permitir perceber os fenómenos que têm influência sobre as turbinas hídricas abordadas neste trabalho. Serão também abordadas as equações que governam a escolha e o desenho das turbinas hídricas.

2.3.1. Propriedades físicas de fluidos

Do ponto de vista da mecânica dos fluidos toda a matéria consiste em apenas dois estados: fluido e sólido. A diferença entre estes reside na resistência a forças de cisalhamento ou *stress* tangencial. Um sólido consegue resistir a estas forças enquanto um fluido move-se e deforma-se facilmente com uma quantidade mínima de força. Um fluido só está em repouso quando está num estado de *stress* tangencial nulo [28] [29].

Um fluido, por sua vez, pode ser classificado como gases e líquidos. Um líquido é composto por moléculas próximas umas das outras, juntas através de fortes forças de coesão. Este tende a reter o seu volume e irá formar uma superfície livre se for sujeito a uma força gravítica e não estiver confinado por cima. Por sua vez um gás é composto por moléculas espaçadas com forças de coesão negligenciáveis. Consequentemente, este é livre de se expandir até encontrar uma barreira intransponível. Um gás não tem volume definido e quando deixado sem confinamento tende a criar um meio hidrostático [28] [29].

Existem casos particulares de sólidos, como o asfalto, que se comportam como líquidos, líquidos que se comportam como sólidos até serem sujeitos a forças tangenciais fortes e misturas de gases e líquidos no mesmo fluido, como no caso da água com bolhas de ar presas [28].

As propriedades mais importantes a ter em conta dos fluidos são a sua massa volúmica, peso volúmico, compressibilidade e viscosidade.

Para definir o peso e a massa de uma unidade de fluido são usados os valores de peso volúmico e a massa volúmica, representados, respetivamente, pelos símbolos γ e ρ . A massa volúmica também é conhecida como densidade de um fluido. γ pode ser obtido através de ρ através de:

$$\rho = \gamma \times g \quad (2.7)$$

com g sendo a aceleração da gravidade [29] [30].

Para a água a uma temperatura de 4 °C estes parâmetros apresentam os seus valores máximos, dados por $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ e $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$. A densidade relativa ou gravidade específica é tida como o rácio da massa volúmica do fluido relativamente à massa volúmica da água e é definida pelo símbolo δ . Estes valores não variam substancialmente em fluidos não compressíveis, como a água [28] [30]. Um fluido compressível reduz o seu volume quando exposto a uma pressão externa. Em geral, os líquidos são considerados fluidos não compressíveis [28].

A viscosidade é uma propriedade de qualquer fluido real resistir a forças de deformação. Um fluido muito viscoso, como óleo ou mel, vai resistir a forças externas, enquanto que a água ou o álcool se deformam facilmente. A unidade para o coeficiente de viscosidade é o μ , o qual é dependente da temperatura e da pressão. A viscosidade de um líquido diminui com o aumento da temperatura. A viscosidade é um fator de bastante interesse em sistemas hídricos, uma vez que o movimento de líquidos viscosos numa conduta fechada causa o aparecimento de forças resistentes a esse movimento e, conseqüentemente, isto traduz-se em perdas de energia e numa redução de eficiência global [28] [29] [30].

Um último fator a ter em conta quando é desenvolvido qualquer sistema hídrico é a tensão de saturação do vapor de um líquido. Quando a pressão a que o líquido está sujeito desce abaixo de um determinado valor para uma determinada temperatura este entra em ebulição. Quando isto acontece aparecem bolsas de vapor que podem interferir com o bom funcionamento do sistema [28] [30] [31].

Um fator muito importante para determinar se um fluido se encontra em fluxo laminar ou fluxo turbulento é o número de Reynolds. Este é calculado através de [30]:

$$R_e = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (2.8)$$

em que v é a velocidade do fluido em m/s e l é o comprimento da conduta em m.

A transição entre regime turbulento e laminar acontece para valores na ordem de 2000. Fluxos com valores abaixo deste valor tendem a ser laminares, sendo que nesse regime os efeitos da viscosidade se sobrepõem aos efeitos cinéticos. Para valores acima o fluxo tende a ser turbulento, o que implica o aparecimento de flutuações aleatórias do módulo, direção e sentido da velocidade. Na Figura 2.24 está representado um exemplo destes fenómenos.

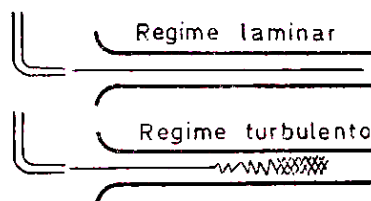


Figura 2.24 – Fluxo laminar e fluxo turbulento [30].

Um fluxo turbulento permite uma maior homogeneidade da velocidade média dentro de uma conduta e uma menor influência da viscosidade relativamente aos efeitos cinéticos. Exemplos da distribuição das velocidades dentro de uma conduta são apresentados na Figura 2.25 [28] [29] [30].

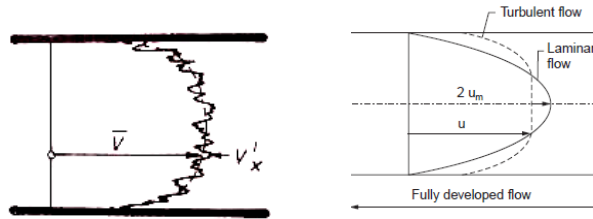


Figura 2.25 – Perfil da distribuição de velocidades num fluxo turbulento e evolução do perfil da velocidade média num fluxo laminar e num fluxo turbulento [29] [30].

2.3.2. Classificação das turbinas

Uma turbina hídrica é um dispositivo mecânico que converte a energia cinética de um líquido, normalmente água, em energia rotacional. Esta, por sua vez, é usada em máquinas mecânicas rotativas ou convertida em energia elétrica através de um gerador. As turbinas hídricas podem ser divididas em dois grupos: as turbinas impulsivas e as reativas [29] [32] [33].

Uma turbina impulsional converte a energia cinética de um jato de água de alta velocidade em energia mecânica. Estas turbinas são muito adequadas para baixos caudais e altas quedas. Como exemplo destas têm-se as turbinas *Pelton*, apresentadas na Figura 2.26 [29] [32] [33].

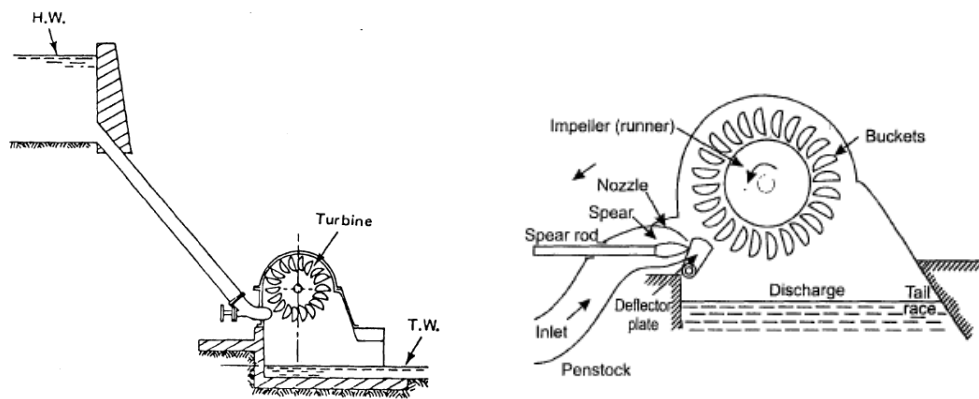


Figura 2.26 – Sistema típico de turbina *Pelton* [32] [34].

A turbina reativa usa a ação combinada da energia de pressão e da energia cinética da água de forma progressiva. Esta família pode ser sucessivamente dividida em vários tipos de turbinas, nomeadamente as turbinas radiais, mistas e axiais. As radiais são usadas em quedas e caudais moderados, as axiais em quedas baixas com muito caudal e as mistas em situações intermédias. Alguns exemplos destas são as turbinas radiais *Francis* e as turbinas axiais *Propeller*, apresentadas na Figura 2.27 e Figura 2.28, respetivamente. Um exemplo de instalação encontra-se esquematizado na Figura 2.29 [29] [32] [33].

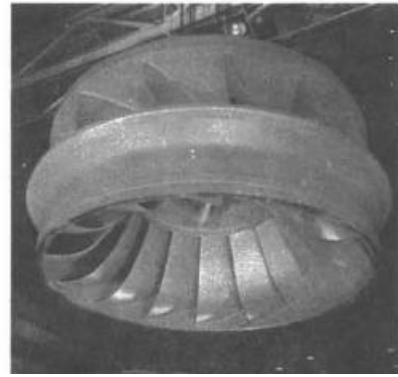
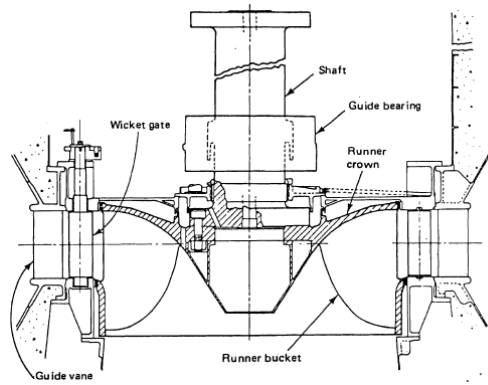


Figura 2.27 – Sistema de turbina Francis [32] [34].

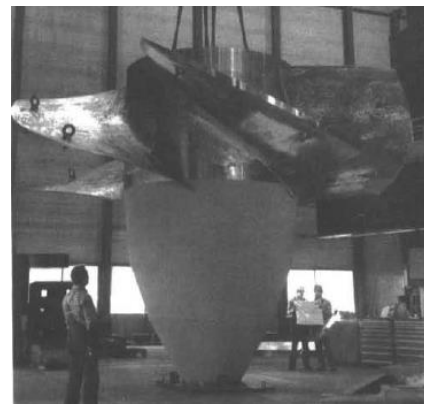
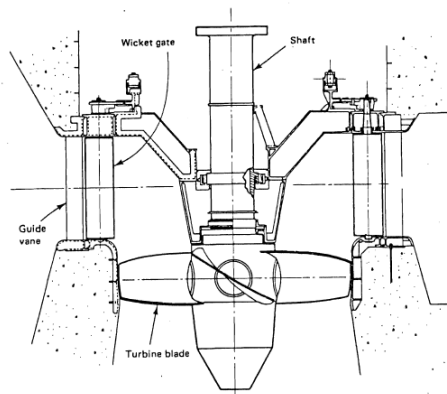


Figura 2.28 – Sistema de turbina *Propeller* [32] [34].

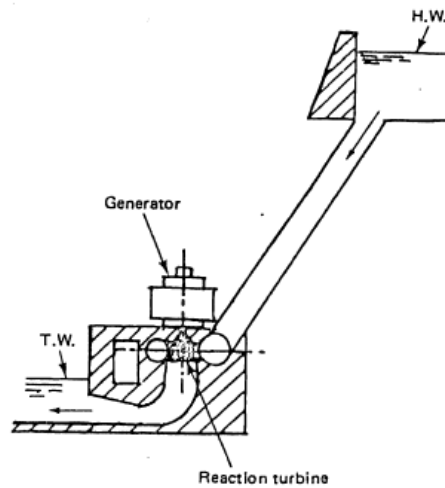


Figura 2.29 – Instalação típica de uma turbina de reação [32].

O método de orientação do eixo de cada uma destas turbinas depende da localização, da aplicação e da escolha de diversas opções, como o uso de múltiplos injetores que fazem com que uma turbina *Pelton* deixe de ser usada com eixo horizontal e passe a ser montada com eixo vertical [30].

2.3.3. Propriedades gerais das turbinas

Existem várias propriedades que são gerais para todas as turbinas e ajudam a escolher a mais adequada para a situação, sendo uma destas a velocidade específica. Esta é uma grandeza adimensional, muito útil, definida através de [29] [30] [35]:

$$n_s = \frac{N\sqrt{P}}{\sqrt{\rho}(gH)^{\frac{5}{4}}} \quad (2.9)$$

em que P é a potência em watts, H a queda em metros, g é a aceleração da gravidade em m/s^2 , ρ é a densidade da água em kg/m^3 e N é a velocidade de rotação em rotações por segundo. Visto que g e ρ são constantes é prática comum omitir estes parâmetros e ficar com [29] [30] [36]:

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (2.10)$$

sendo que o valor obtido através desta equação não é adimensional. A partir do valor de N_s é possível escolher uma turbina através da Tabela 2-1 [29].

Tabela 2-1 – A melhor escolha de turbina de acordo com a velocidade específica [29]

Velocidade específica dimensional em unidades SI.	Tipo de turbina com melhor eficiência para estes valores
8-29	Turbina <i>Pelton</i> com um jato
26-40	Turbina <i>Pelton</i> com duplo jato
40-67	Turbina <i>Pelton</i> com múltiplos jatos
67-450	Turbina de fluxo radial tipo Francis ($H < 350m$)
364-910	Turbina de fluxo axial tipo <i>Kaplan</i> ($H < 60m$)

Na Figura 2.30 é apresentado um gráfico onde se observa a influência da velocidade específica na eficiência de cada tipo de turbina.

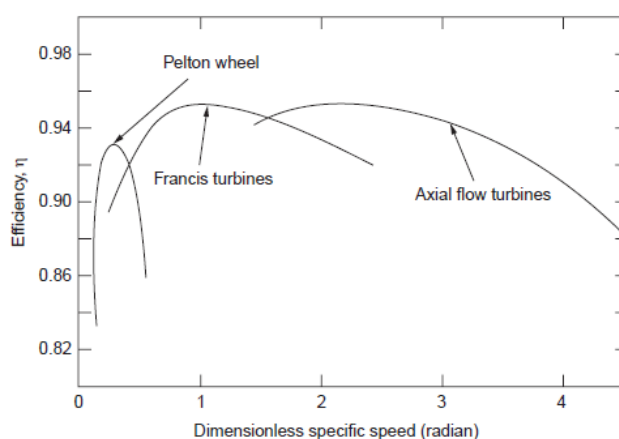


Figura 2.30 – Variação da eficiência com a velocidade específica [29].

Tendo em conta que P , Q e H estão relacionados por [29] [35]:

$$P = \rho g Q H \quad (2.11)$$

com Q o caudal em m^3/s .

O domínio das turbinas puramente radiais, como as turbinas *Pelton*, são as altas quedas e baixo caudal. O domínio das turbinas axiais, como as turbinas *Kaplan* e *Propeller*, são as baixas quedas e alto caudal, e o espaço intermédio é o domínio das turbinas mistas como as turbinas Francis [30]. A zona de operação de cada turbina encontra-se representada na Figura 2.31.

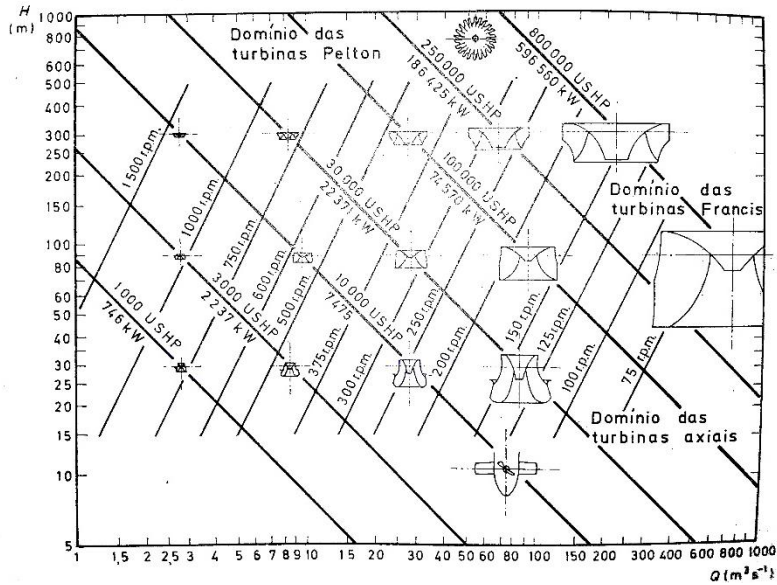


Figura 2.31 – Domínio de aplicação das diferentes turbinas [30].

Uma equação muito importante é a da continuidade, sendo definida por:

$$Q = U_1 A_1 = U_2 A_2 \quad (2.12)$$

em que U_1 e A_1 são a velocidade e a área de uma secção arbitrária da tubagem e U_2 e A_2 são a velocidade e a área de outra secção arbitrária da tubagem. Esta equação indica que, num escoamento de um líquido não compressível, o caudal é sempre constante independentemente da variação do diâmetro da conduta. Isto implica que se houver um estreitamento do canal a velocidade do líquido aumenta e vice-versa. Isto permite calcular a velocidade do fluido em vários pontos de um canal e os seus efeitos.

A potência presente numa secção de um canal hídrico é dada por [36]:

$$P_e = \gamma Q H \quad (2.13)$$

em que γ é o peso volúmico da água em N/m^3 .

A queda bruta entre dois reservatórios é dada pela diferença de altura entre a superfície do líquido num reservatório, a jusante, e a superfície do outro reservatório, a montante [30]:

$$H_t = Z_m - Z_j \quad (2.14)$$

Como há perdas pelo caminho, relacionadas com a superfície da tubagem, curvas e estreitamentos, a queda útil é dada por [30]:

$$H_t = Z_m - Z_j - \Delta H \quad (2.15)$$

em que ΔH é a perda da queda.

A eficiência de uma turbina hídrica, η , é dada por:

$$\eta = \frac{P}{\gamma Q (H_e - H_s)} = \frac{P}{\gamma Q H_u} \quad (2.16)$$

ou [36]:

$$P = \eta\gamma QH_u \quad (2.17)$$

em que H_u é a queda útil, também conhecida por queda efetiva, H_e . Na Figura 2.32 são definidos graficamente estes valores.

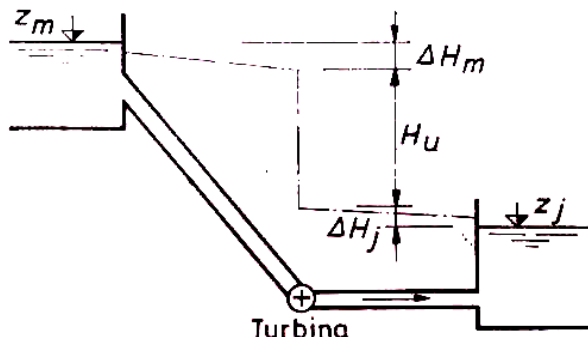


Figura 2.32 – Alturas relativas a uma instalação de uma turbina [30].

As equações de dimensionamento de sistemas hídricos apresentam uma boa aproximação à realidade. No entanto, devido a variações imprevistas nas variáveis é possível que ocorra um mau dimensionamento. De modo a evitá-lo, são realizados testes com modelos. Um modelo à escala real pode custar muito dinheiro, pelo que, geralmente, são aplicadas as leis de similaridade. Estas implicam que se uma turbina de tamanho menor for geometricamente e dinamicamente semelhante, então os resultados obtidos nos testes podem ser aplicados à turbina maior. Duas turbinas são geometricamente semelhantes se a única diferença física entre as duas for a escala. Os ângulos, o número de baldes, as lâminas das hélices e as lâminas das diretrizes devem ser iguais nas duas turbinas. O acabamento da superfície também deve ser semelhante. A semelhança dinâmica advém da igualdade dos rácios das forças em cada ponto da turbomáquina para as duas máquinas.

Esta lei da similaridade tem as suas limitações, visto que, à medida que a diferença de escala vai crescendo, crescem também as perdas devido às forças viscosas, visto que estas não mudam a sua dimensão. Há também a dificuldade acrescida de equalizar o acabamento das superfícies, tornando-se impossível em certos casos. Os modelos à escala tendem também a comportar-se de maneira diferente relativamente a fenómenos de cavitação. Consequentemente, os modelos feitos à escala tendem a ter um rendimento inferior.

2.3.4. Turbina Pelton

A turbina *Pelton* é normalmente usada em grandes quedas e baixos caudais, ou seja, é uma turbina com uma velocidade específica baixa. Neste caso, um, ou mais jatos, aplicam, de uma forma tangencial ao diâmetro D , um jato focado de água contra os baldes, feitos de um material resistente e polido, presos ao longo da periferia de uma roda. Este tipo de sistema está representado na Figura 2.33 [29] [30] [37].

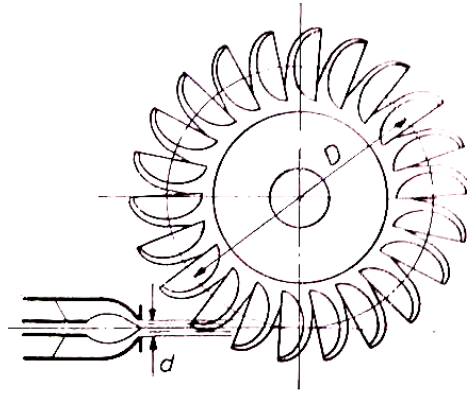


Figura 2.33 – Turbina *Pelton* [30].

De forma a maximizar a captação da energia cinética do jato, a velocidade relativa da água à saída dos baldes deve ser muito próxima de zero. Para ajudar a criar esta situação os baldes devem ter a forma de duas meias elipsoides, com uma lâmina central que permite à água transmitir o máximo da sua energia cinética de forma progressiva, como pode ser observada na Figura 2.34 [29] [30].

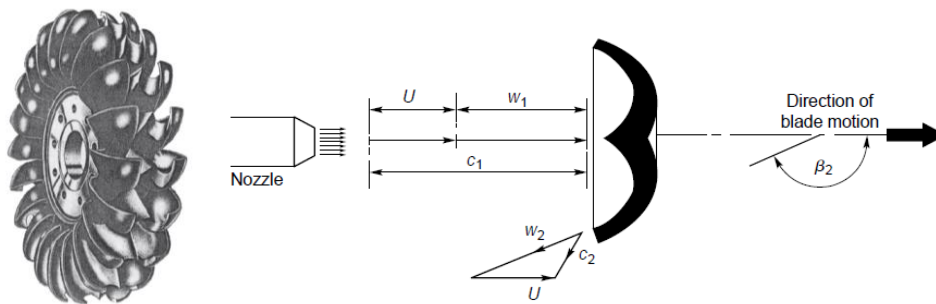


Figura 2.34 – Turbina *Pelton* típica e velocidades características [31].

Na figura, U representa a velocidade absoluta tangencial do balde, C_1 é a velocidade absoluta do jato, C_2 é a velocidade absoluta da água à saída do balde, W_1 e W_2 são, respetivamente, a velocidade do jato e da água à saída do balde relativamente ao balde.

Idealmente o ângulo β_2 deveria ser de 180° para a máxima transferência de energia. No entanto, na realidade esse valor é 165° , para impedir a interferência da água com os outros baldes, fazendo com que esta se escoe pelos lados [29] [37].

O controlo do caudal é feito usando uma válvula de lança, como é apresentado na Figura 2.35.

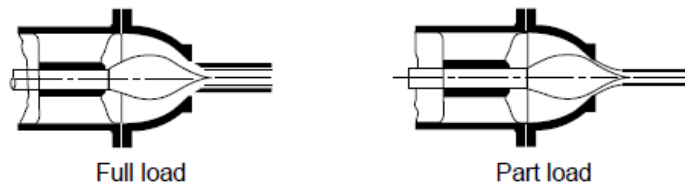


Figura 2.35 – Válvula de lança [31].

A quantidade de baldes ou colheres recomendada é calculada através de [29] [38]:

$$Z = (D/2d) + 15 \quad (2.18)$$

sendo D o diâmetro do rotor e d o diâmetro do jato, como representado na Figura 2.33.

Este deve ser um valor suficientemente elevado de forma a evitar vibrações devido às variações de força no rotor, fenómeno observável na Figura 2.36, mas suficientemente baixo de forma a manter baixa a complexidade do sistema.

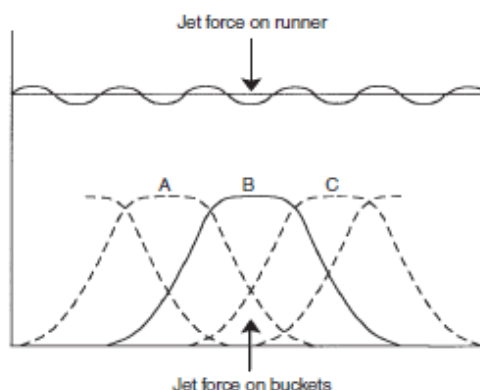


Figura 2.36 – Forças na turbina e nos baldes [36].

As restantes dimensões dos baldes podem ser obtidas através da Figura 2.37.

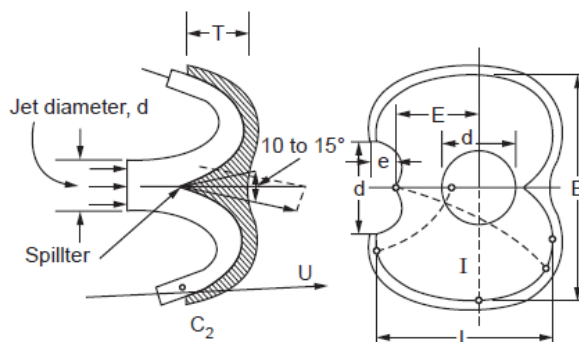


Figura 2.37 – Dimensões do balde da turbina [29].

Todas as dimensões são dependentes do diâmetro do injetor ou da roda da turbina, verificando-se as relações apresentadas na Tabela 2-2.

Tabela 2-2 – Rácio das dimensões [29]

D/d	B/d	L/d	T/d	Largura do recorte
14-16	2,8-4	2,5-2,8	0,95	$1,1d+5\text{mm}$

Os ângulos típicos do escape da água e da colher relativamente ao raio, para uma turbina com 24 baldes, são apresentados na Figura 2.38.

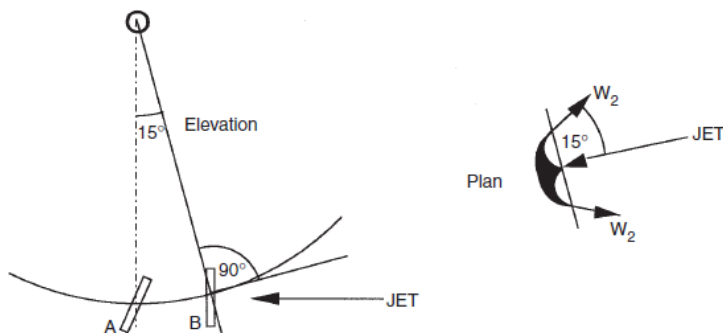


Figura 2.38 – Valores típicos para os ângulos [36].

A velocidade teórica do jato é dada por [31]:

$$V_1 = \sqrt{2gH_u} \quad (2.19)$$

Uma velocidade mais realista é dada por [29] [37]:

$$v = C_v \sqrt{2gH_u} \quad (2.20)$$

em que C_v é o coeficiente de velocidade do jato que varia entre 0,98 e 0,99 [29].

O rácio entre a velocidade dos baldes e a velocidade do jato é dado pelo fator de velocidade [36]:

$$\Phi = U/v \quad (2.21)$$

O ponto de maior transferência de energia ocorre, teoricamente, quando Φ é igual a 0,5, sendo que na realidade tal ocorre aproximadamente para 0,45 [29] [34].

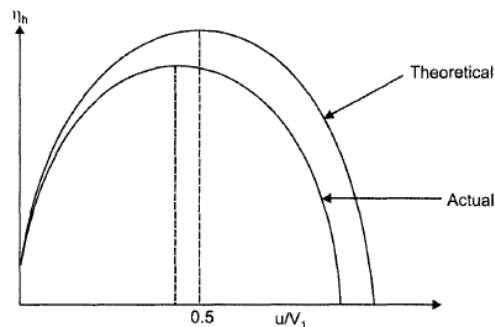


Figura 2.39 – Eficiências em função do rácio de velocidade de uma turbina *Pelton* [34].

O rácio D/d tem valores ótimos quando [36]:

$$(D/d) = (206/N_s) \quad (2.22)$$

em que N_s é a velocidade específica não adimensional.

As perdas num sistema *Pelton* advêm dos acabamentos da turbina, dos compromissos geométricos, das perdas de queda no bucal do jato, das perdas por atrito no canal e das perdas viscosas no canal [34].

A curva de eficiência de um sistema *Pelton* é relativamente plana em relação à carga imposta sobre o eixo [34].

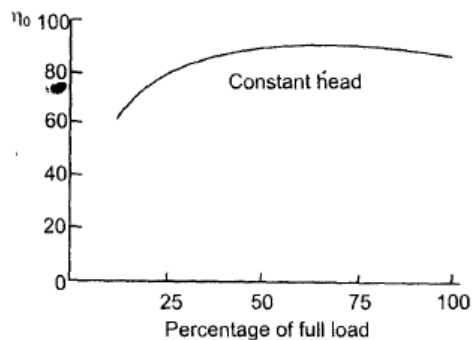


Figura 2.40 – Eficiência em função da carga [34].

Para garantir uma máxima eficiência deve haver um ajuste da velocidade do jato em relação à velocidade tangencial da turbina. A dependência entre a velocidade tangencial, U , e a velocidade angular, N , em rotações por minuto é dada por [29]:

$$U = \frac{\pi DN}{60} \quad (2.23)$$

Pela equação (2.13) tem-se que a única forma de regular a potência é manipulando o caudal. Como a velocidade do jato é somente dependente da queda, isto implica que a área do jato deve ser modificada. Se a saída do jato tiver uma área constante e não manipulável, então a única forma de regular o caudal consiste em colocar perdas de queda pelo percurso, sob a forma de válvulas.

2.3.5. Turbina Francis

A turbina Francis ocupa a gama intermédia de utilização, representado na Figura 2.31, e pode ser adaptada para um largo espectro de quedas e caudais, simplesmente mudando a sua geometria. Um exemplo desta flexibilidade é apresentado na Figura 2.41. Consequentemente, é uma turbina muito usada em grandes aplicações [29] [30].

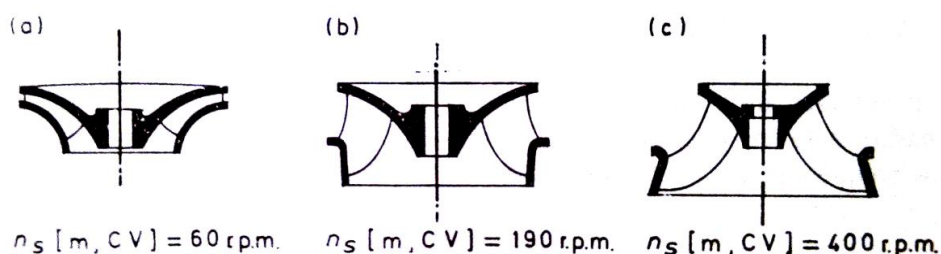


Figura 2.41 – Rodas de turbinas Francis típicas, de acordo com a sua velocidade específica [30]

A turbina é colocada num involucro em espiral com lâminas de guia que adicionam uma componente rotacional ao fluxo e controlam o caudal [37]. O sistema encontra-se representado na Figura 2.42.

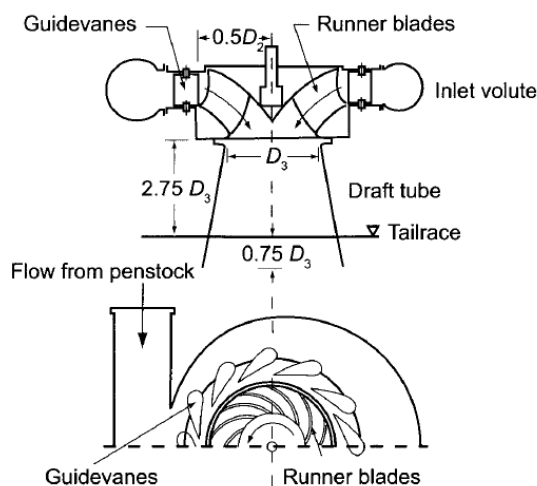


Figura 2.42 – Turbina Francis típica [29]

Esta turbina é pouco comum para microprodução de energia visto ter uma geometria complexa, o que implica uma maior dificuldade de a fabricar a essa escala [39].

2.3.6. Turbina *Propeller/Kaplan*

Para quedas baixas e caudal elevado é adequado o uso de turbinas puramente axiais. As duas turbinas mais populares, desta categoria, são a *Kaplan* e a *Propeller*. A turbina *Kaplan* tem lâminas que podem ser orientadas dinamicamente, enquanto na turbina *Propeller* as lâminas são fixas. A principal vantagem de se poderem orientar as lâminas é a capacidade de se manter uma velocidade de rotação constante, independentemente da velocidade da água. Se um sistema for instalado num local onde a queda e a carga são relativamente constantes é mais vantajoso usar turbinas *Propeller*. Para controlar o caudal e criar um vórtice para ajudar na rotação da turbina, remover o choque de entrada e remover as componentes tangenciais do fluxo à saída da turbina, são usadas lâminas de guia na entrada, como representado na Figura 2.43 [29] [39]

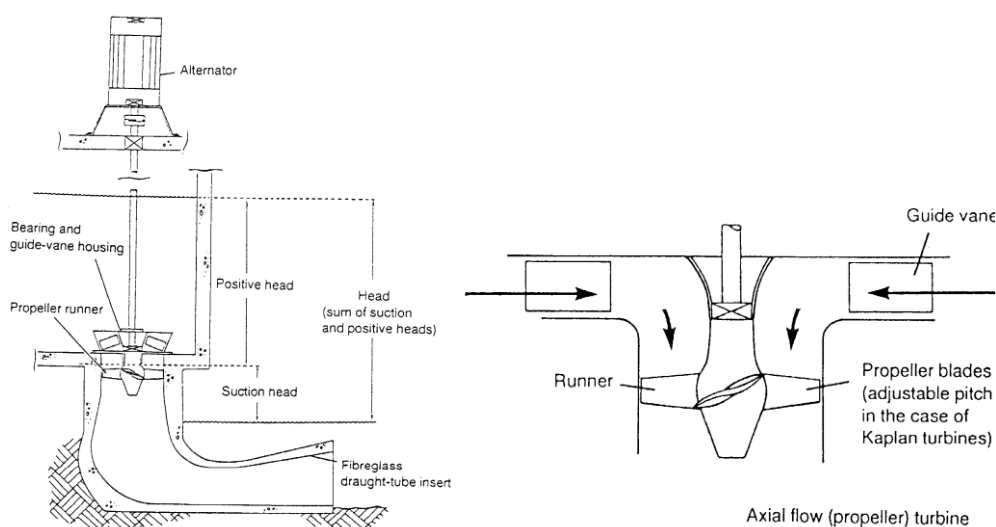


Figura 2.43 – Sistema de turbina *Propeller* ou *Kaplan* [39].

Na Figura 2.44 observa-se que a gama de eficiência é estreita para as turbinas *Propeller*, com hélices e guias de fluxo fixas.

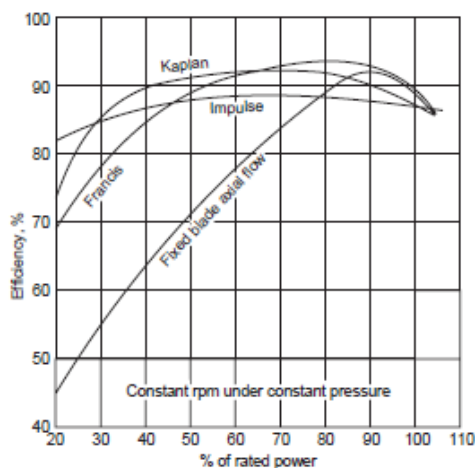


Figura 2.44 – Eficiência em função da percentagem da potência dimensionada [34].

Isto implica que o sistema de controlo de carga e o sistema de admissão da água devem ser bem dimensionados para permitir a captura da potência máxima.

As hélices em sistemas de grande escala têm uma forma torcida para permitir compensar os fenômenos de diferença de velocidade tangencial em relação à axial. Para sistemas de menor custo ou menor tamanho é possível e comum usar turbinas sem este cuidado. No entanto, haverá sempre uma perda associada à qualidade do material e à escolha da geometria [34] [39].

Nestas turbinas a água sai ainda com muita da sua energia cinética. Se esta for despejada diretamente para o ar há uma perda de queda total do sistema que pode chegar aos 45% da queda real. Para mitigar esse efeito e capturar alguma dessa energia é criada uma pressão negativa junto à turbina, usando um tubo de sucção a jusante desta. Este pode ter um diâmetro constante, mas é mais comum e adequado usar uma tubagem com um ângulo de expansão que permite converter ainda mais energia cinética em energia de pressão. Alguns exemplos do tubo de sucção estão representados na Figura 2.45 [29] [35].

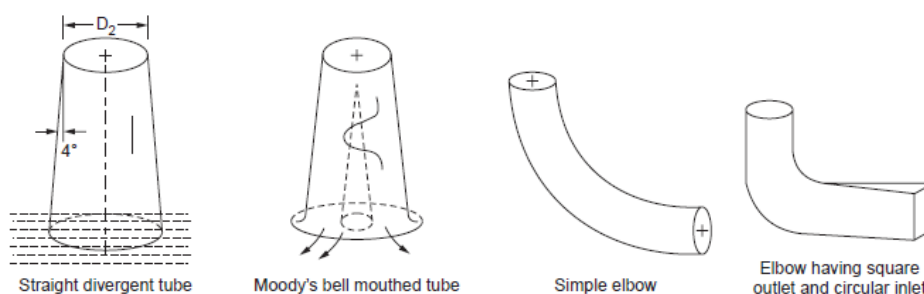


Figura 2.45 – Formas típicas de tubos de sucção [29]

A extremidade a jusante deve estar sempre dentro de água e a sua superfície não pode ser porosa, ou seja, não deve permitir a entrada de ar.

No entanto, há limites no uso desta técnica. Um tubo de sucção muito longo pode provocar um aumento de perdas por atrito na superfície e existe, também, um aumento na possibilidade do aparecimento de fenômenos de cavitação junto da turbina, que podem provocar danos [35].

2.3.7. Perdas na conduta

Num líquido perfeito a percorrer uma conduta sem perdas tem-se que, à medida que o líquido desce na conduta, a energia potencial é convertida em energia cinética, como é representado na Figura 2.46 [30].

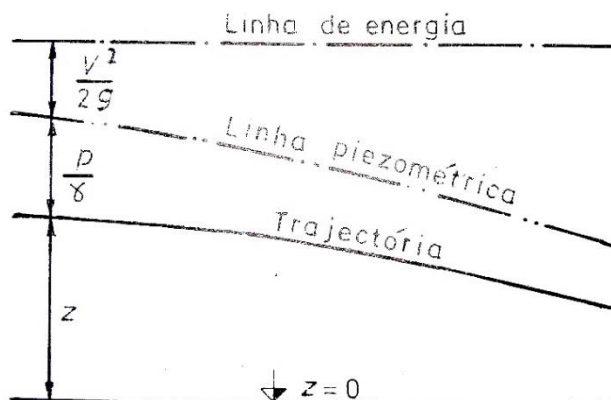


Figura 2.46 – Linha de energia num percurso de líquido ideal.

Define-se a linha piezométrica como sendo:

$$\text{Linha piezométrica} = z + \frac{p}{\gamma} \quad (2.24)$$

em que p é a pressão nesse ponto e z é a altura física desse ponto.

Define-se também a linha de energia:

$$\text{Linha de energia} = \frac{v^2}{2g} \quad (2.25)$$

em que v é a velocidade do líquido e g é a aceleração da gravidade.

Pelo teorema de Bernoulli tem-se:

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\gamma} = \text{constante} \quad (2.26)$$

que indica que a energia mecânica total por unidade de peso de líquido é constante ao longo de cada trajetória [30]. Consequentemente quando o valor de z atinge zero a energia potencial inicial é igual à energia cinética da água. A partir disto tem-se a fórmula de Torricelli definida por:

$$V_p = \sqrt{H2g} \quad (2.27)$$

em que V_p é a velocidade de saída da água de um orifício com uma queda H , como representado na Figura 2.47.

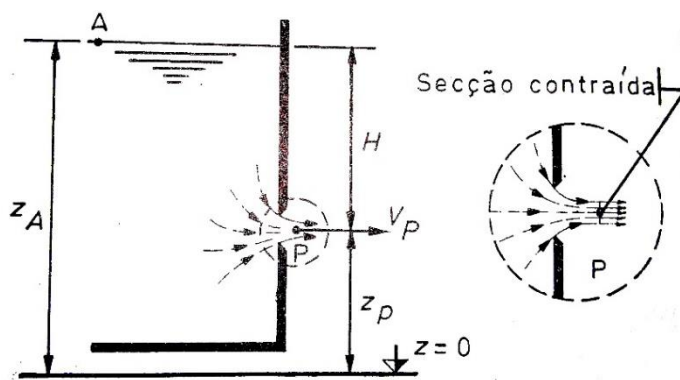


Figura 2.47 – Escoamento por um orifício.

Num sistema real há perdas de energia no percurso do líquido devido a fenômenos de atrito nas superfícies do percurso, singularidades, como curvas e contrações, e devido a fenômenos viscosos e turbulentos. Este fenômeno é representado pela linha de energia a descer na Figura 2.48

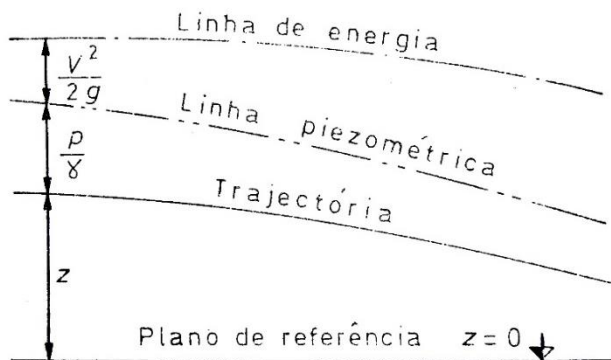


Figura 2.48 – Linha de energia num percurso de líquido real.

Isto implica que para considerar as perdas deve ser adicionada a componente de perda de queda, H_L , de forma a equilibrar os dois termos da equação de energia disponível:

$$\frac{v_m^2}{2g} + z_m + \frac{p_m}{\gamma} = \frac{v_j^2}{2g} + z_j + \frac{p_j}{\gamma} + H_L \quad (2.28)$$

com o índice m a representar o ponto a montante e j o ponto a jusante. É de notar que H_L , também conhecido por ΔH , é a perda de queda efetiva causada pelas características físicas da tubagem.

Na Figura 2.49 é apresentado um diagrama com as perdas singulares num percurso hídrico

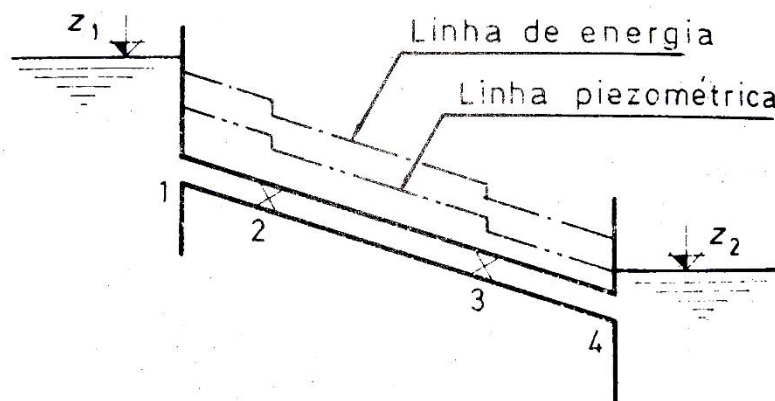


Figura 2.49 – Perdas singulares num sistema hídrico.

Em cada ponto há uma perda de queda efetiva cujo valor é dado por [29]:

$$h_l = K_n \frac{v^2}{2g} \quad (2.29)$$

em que K_n é o coeficiente de resistência nesse ponto, dado a partir de [40], v é a velocidade do líquido e g é a aceleração da gravidade. O fator K_n é independente do fator de fricção e do número de Reynolds, e pode ser tratado como uma constante em qualquer condição de fluxo [29].

A diferença de cotas entre os dois reservatórios da Figura 2.49 é igual à perda de carga na tubagem, sendo dada por [30]:

$$z_1 - z_2 = JL + \frac{v^2}{2g} (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) \quad (2.30)$$

em que L é o comprimento da tubagem, v é a velocidade do líquido e J é a perda de carga unitária no percurso da tubagem, ignorando as perdas pontuais, segundo a lei de resistência de Gauckler-Manning que é dada por:

$$J = \left(\frac{Q}{KAR^{2/3}} \right)^2 \quad (2.31)$$

em que Q é o caudal, K é a constante de atrito na superfície, A é a área e R é o raio hidráulico da tubagem.

A partir disto tem-se que [30]:

$$z_1 - z_2 = \left(\frac{Q}{KAR^{2/3}} \right)^2 L + \frac{Q^2}{2gA^2} (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) = \beta Q^2 \quad (2.32)$$

ou

$$Q = \sqrt{\frac{Z_1 - Z_2}{\beta}} \quad (2.33)$$

em que Q é o caudal, Z_1 e Z_2 são as cotas do nível da água a montante e a jusante, respetivamente, e β é a soma total das perdas na conduta.

Uma boa aproximação de fluxos hídricos em condutas fechadas é um circuito eletrónico onde o fator K é análogo à resistência elétrica, H à potência elétrica e v , em função do caudal Q e da área A da conduta, à corrente que percorre o circuito [29].

2.4. Conclusão

Num mundo cada vez mais interconectado há cada vez mais a necessidade de se obterem dados do mundo físico. A alimentação desses sistemas pode advir de várias fontes, como a energia solar, a energia eólica ou a energia hídrica.

As fontes hídricas de grande escala têm uma grande capacidade de produção de energia. Foram estudados os principais parâmetros de podem afetar a implementação de sistemas para aplicações em baixa potência.

No dimensionamento das condutas e sistemas de captação de água aferiu-se o cuidado a ter de modo a reduzir ao mínimo as perdas e otimizar o espaço ocupado pelo sistema.

Das turbinas apresentadas, as que mais mostram potencial para a alimentação de RSSF são as turbinas *Pelton* e *Propeller*.

3. Desenvolvimento do sistema

Neste capítulo apresenta-se o dimensionamento de dois sistemas de captação de energia hídrica, um sistema *Pelton* e um sistema *Propeller*, e o desenvolvimento dos mecanismos de medição da potência mecânica, do sistema de conversão de energia mecânica em energia elétrica, do mecanismo de medição de potência elétrica, do conversor de tensão para adaptar o sistema de captura ao sistema de armazenamento e do sistema de controlo.

3.1. Requisitos do sistema

Pretendia-se dimensionar um sistema hídrico que tivesse uma potência elétrica na saída do regulador de tensão na ordem dos 500 mW. Este valor foi escolhido por se encontrar dentro da gama de potência requerida por um nó sensor sem fios, que era a carga que se pretendia alimentar com o sistema hídrico a ser dimensionado.

O sistema de captação de energia hídrica devia ter o mínimo de perdas e ser o mais compacto possível. Deviam também ser evitados reguladores comutados com correntes pulsadas, de forma a reduzir os efeitos do ruído eletromagnético no sistema.

O diagrama do sistema é apresentado na Figura 3.1.

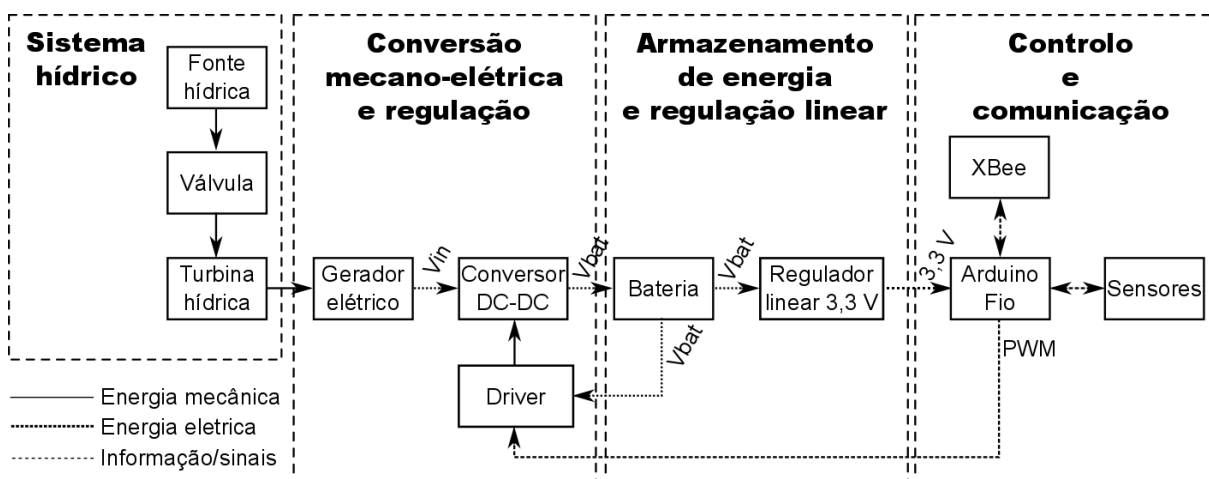


Figura 3.1 – Arquitetura do sistema desenvolvido.

O sistema está dividido em quatro blocos: o sistema hídrico, o sistema de conversão de energia mecânica em energia elétrica, o sistema de armazenamento e regulação e o sistema de controlo e comunicação. Os tipos de ligações necessárias estão representados por linhas de preenchimento diferente.

Da esquerda para a direita tem-se a fonte hídrica, neste caso representando a captação de água de uma fonte como uma levada ou uma ribeira, que transfere energia mecânica para a turbina hídrica, passando por uma válvula. A turbina converte a energia cinética e de pressão da água em energia mecânica rotacional que alimenta o gerador elétrico. Este converte a energia mecânica em energia elétrica que é retificada e adaptada às necessidades do sistema de armazenamento de energia através de um retificador e de um conversor comutado controlado pelo sistema de controlo. O regulador linear converte o nível de tensão presente na bateria numa tensão adequada ao restante sistema, nomeadamente 3,3 V. O controlo é feito usando um módulo Arduino Fio. Este lê a velocidade rotacional do gerador, a tensão da bateria, a corrente

de entrada na bateria e a corrente de saída. Com estes parâmetros, o programa no Arduino decide quando devem ser carregadas as baterias e qual o fator de ciclo mais adequado para o conversor comutado. Neste sistema, o controlo de carga e o módulo XBee, a funcionar como carga, são alimentados diretamente da bateria. Durante os testes o módulo XBee funcionou como transmissor de informação relativo ao sistema de controlo de carga.

De modo a dimensionar adequadamente o sistema fez-se uma análise iterativa bidirecional, ou seja, começou-se da direita, dimensionando o sistema de controlo e comunicação, escolhendo uma solução de armazenamento de energia que suportasse o sistema durante um tempo apreciável e escolheu-se o circuito de controlo de carga e de controlo do gerador, ou seja, um regulador DC-DC comutado controlado. Após isto, passou-se para o dimensionamento a começar da esquerda. Tendo a potência necessária para carregar o sistema de armazenamento, as perdas esperadas do regulador DC-DC comutado e dos geradores, foram dimensionados os dois sistemas hídricos, um para baixas quedas e grande caudal e um para grandes quedas e baixo caudal. Os resultados deste dimensionamento serviram de base ao projeto dos geradores elétricos.

3.2. Sistema de controlo central

De forma a simplificar o processo de programação e inserção dos nós numa rede de sensores foi decidido usar um Atmega328p da Atmel, com o *firmware* Arduino, presente numa placa Arduino Fio [41]. Este está representado na Figura 3.2.

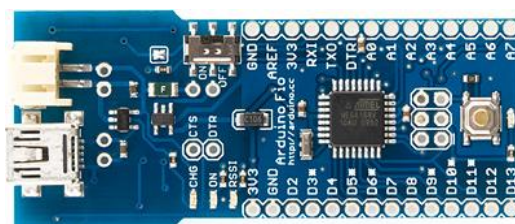


Figura 3.2 – Arduino Fio [41].

Algumas das vantagens desta placa são o conector para módulos XBee, o regulador linear de 3,3 V, a disponibilidade de inúmeras bibliotecas e uma capacidade de geração de sinais *PWM* adequada às necessidades do regulador comutado.

Na Figura 3.3 é apresentado o diagrama de ligações entre o Arduino Fio e os sensores usados para o funcionamento do sistema.

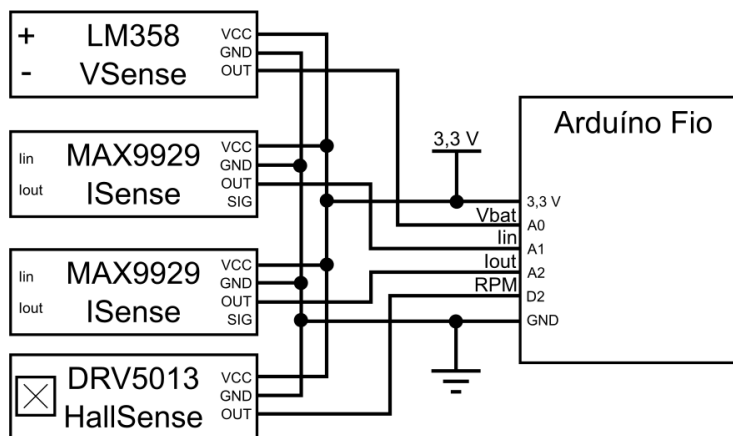


Figura 3.3 – Sensores de tensão, corrente e magnetismo lidos pelo Arduino Fio.

O sensor de tensão usa um circuito constituído por um AMPOP LM358 [42], numa montagem *Sallen-Key* e um divisor resistivo. Esta permite filtrar o sinal de tensão, removendo o ruído das comutações do conversor DC-DC, e protege as portas ADC do microcontrolador. Esse circuito é apresentado na Figura 3.4.

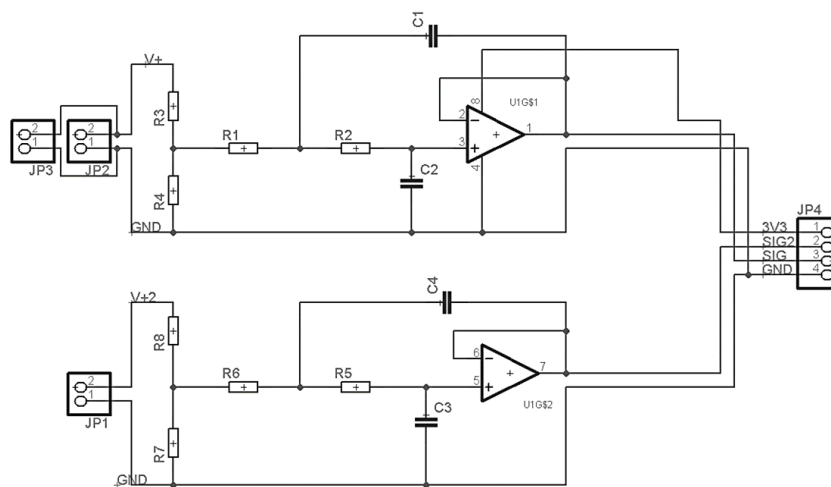


Figura 3.4 – Sensor de tensão.

Refira-se que este circuito permite ler duas tensões diferentes, através do conector JP1 e do conector JP2, sendo o conector JP3 uma ligação auxiliar na outra ponta da placa de circuito impresso. Do lado direito tem-se o conector JP4 com a alimentação de 3,3 V e os dois sinais analógicos de saída.

Para medir a corrente é usado o circuito integrado MAX9929 [43], com uma resistência de *shunt* adequadamente calculada. O circuito está apresentado na Figura 3.5.

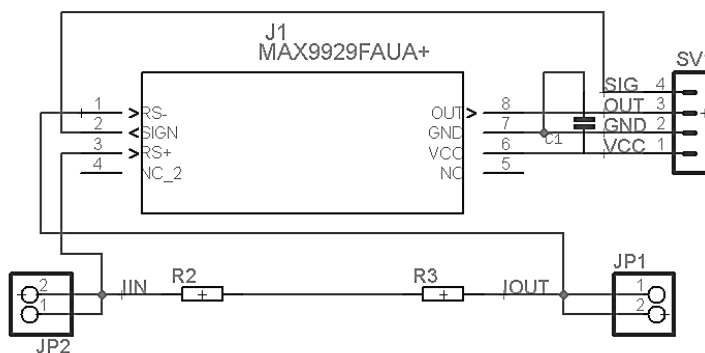


Figura 3.5 – Sensor de corrente.

O MAX9929 cria uma tensão em OUT igual a 50 vezes a diferença de tensão entre os pinos RS+ e RS-.

Foi decidido deixar espaço, na placa de circuito impresso, para duas resistências de *shunt* em série, de forma a permitir uma maior flexibilidade na escolha das mesmas. O espaçamento é tal que permite soldar somente uma resistência.

O sensor de Hall DRV5013 [44] foi montado na ponta de uma sonda impermeabilizada, que por sua vez foi colocada no exterior do invólucro do gerador de modo a permitir medir a velocidade de rotação do gerador. Esta montagem permite observar a existência de água, se a turbina parou devido a uma carga excessiva ou alguma outra situação anómala. Um esquema típico é apresentado na Figura 3.6.

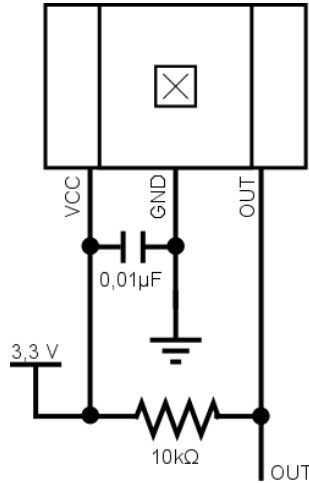


Figura 3.6 – Esquema da ligação do sensor de Hall.

3.3. Comunicação

Para estabelecer a comunicação sem fios e servir de carga ao sistema foram escolhidos os módulos XBee S2 da Digi International [45]. Estes são simples de trabalhar, programar, funcionam bem em redes de sensores sem fios e estavam disponíveis no laboratório. Um destes é representado na Figura 3.7, com um conector RPSMA para ligação a uma antena externa. Refira-se que estes módulos são relativamente simples de configurar, têm capacidades de funcionamento em malha e consomem pouca potência.



Figura 3.7 – Módulo XBee S2.

As tramas típicas de comunicação dos módulos XBEE estão representadas na Figura 3.8.

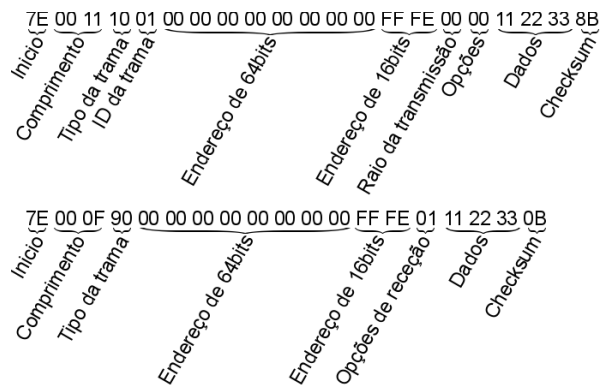


Figura 3.8 – Tramas de transmissão e receção por XBEE.

No campo de dados é enviada uma subtrama de fácil interpretação, adaptação e expansão. Um exemplo da sua composição é apresentado na Figura 3.9.

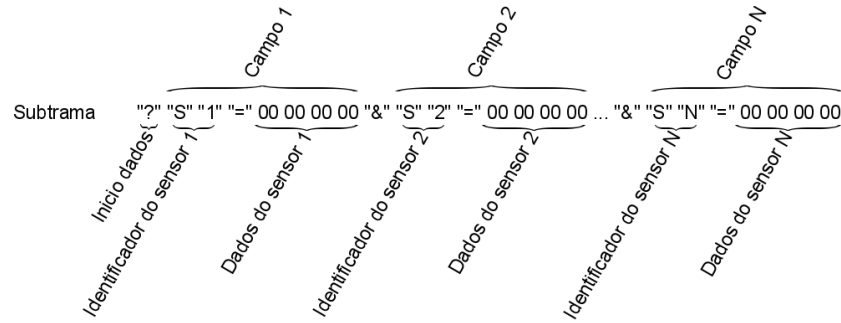


Figura 3.9 – Subtramas de envio e recepção.

Esta subtrama começa com um ponto de interrogação. De seguida são encontrados os campos de dados de cada sensor, separados por um “&”. Cada campo é constituído por um indentificador do sensor, o símbolo de igual e os dados enviados, sob a forma de caracteres ASCII.

A trama completa usada para a captura de dados de funcionamento durante este trabalho contém seis campos. Estes são o estado do sistema, o fator de ciclo, a tensão da bateria, a corrente de entrada na bateria, a corrente de saída da bateria e o período de rotação.

3.4. Conversor comutado

A escolha do regulador comutado adveio da necessidade de existir o mínimo de perturbações de corrente, tanto na entrada como na saída. Como tal, foi dimensionado um regulador elevador-redutor Cúk, como apresentado na Figura 2.19. Este não apresenta pulsações abruptas de corrente, tem uma gama de controlo mais larga que um regulador elevador-redutor normal e tem o elemento comutador referenciado à massa primária. No entanto, este inverte a tensão de saída, pelo que é necessário ter um cuidado acrescido no controlo do elemento comutador.

Os componentes principais, L_i , L_o , C_i e C_o foram obtidos através de [21], ignorando as componentes parasíticas, considerando um fator de ciclo típico inferior a 0,6 e superior a 0,4, uma tensão de entrada de 5 V, uma corrente de entrada de 200 mA, *ripples* de corrente de entrada e de saída iguais a 10% e *ripple* de tensão à saída de 1%. Os valores de L_i , L_o e C_i são respetivamente:

$$L_i = \frac{V_{in}D}{\Delta I_{Li}f_s} = \frac{5 \text{ V} \times 0,6}{(0,2 \text{ A} \times 10\%) \times 50 \text{ kHz}} = 3 \text{ mH} \quad (3.1)$$

$$L_o = \frac{V_{out}}{\Delta I_{Lo}f_s} (1 - D) = \frac{V_{in}D}{\Delta I_{Lo}f_s} = \frac{5 \text{ V} \times 0,6}{(0,2 \text{ A} \times 10\%) \times 50 \text{ kHz}} = 3 \text{ mH} \quad (3.2)$$

$$C_i = \frac{I_{in}(1 - D)}{\Delta V_{Ci}f_s} = \frac{0,2 \text{ A} \times (1 - 0,6)}{1 \text{ V} \times 50 \text{ kHz}} = 1,6 \text{ } \mu\text{F} \quad (3.3)$$

É de notar que C_i , representado na Figura 2.19, serve como mecanismo de transferência de energia e, como tal, o valor de ΔV_{C_i} não deve ser muito baixo. É também importante que o valor da resistência parasítica deste seja baixo. Quanto a C_o , foi obtido:

$$C_o > \frac{12,5 \times (1 - D_{min})}{L_o f_s^2} = \frac{12,5 \times (1 - 0,4)}{3 \text{ mH} \times 50 \text{ kHz}^2} = 1 \mu\text{F} \quad (3.4)$$

No sistema dimensionado o condensador C_o foi substituído por um conjunto de baterias com uma tensão nominal de saída de 4,8V.

O controlo do componente de comutação, neste caso um *MOSFET* tipo N modelo FDC645N [46], é feito através de um *driver* do tipo *totem-pole*. Este é apresentado na Figura 3.10.

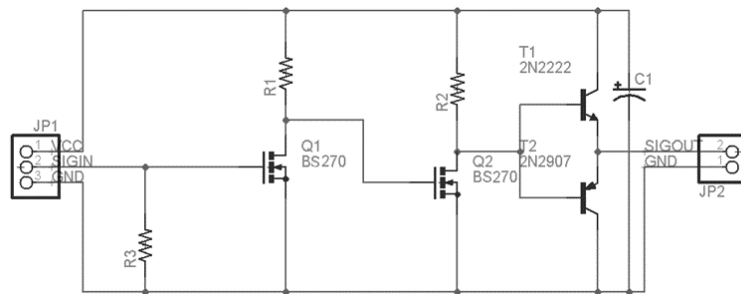


Figura 3.10 – Circuito *driver* de controlo do componente de comutação.

Neste foi usado um *MOSFET* BS270 na entrada do circuito, para permitir reduzir a corrente de saída da porta do microcontrolador e para aumentar a velocidade de comutação. Como este andar inverte o sinal foi usado um segundo *MOSFET*, o que permitiu refinar ainda mais a forma de onda que controla os dois TBJ do *totem-pole*. Esse par é constituído por um transístor NPN, que coloca na *gate* do *MOSFET* uma tensão V_{GS} igual à tensão da bateria do sistema, e um transístor PNP que liga a *gate* à massa do sistema e descarrega rapidamente o condensador presente na *gate* do *MOSFET*. Isto permite ter uma onda de controlo da *gate* com tempos de subida e de descida muito rápidos, aumentando a eficiência geral do regulador DC-DC.

Como são necessários cerca de 2 V de tensão V_{GS} e como todo o sistema de controlo é referenciado à massa do lado secundário do regulador foi usado um duplicador de tensão capacitivo, baseado num LT1054, para alimentar o *driver*. O circuito deste está representado na Figura 3.11.

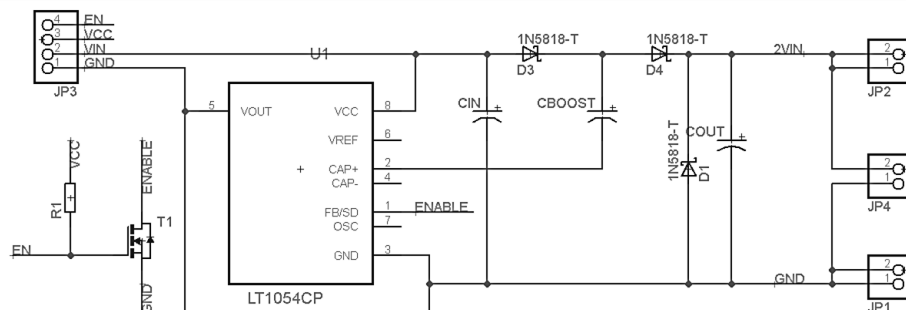


Figura 3.11 – Duplicador de tensão capacitivo.

Com este circuito é criada uma tensão de saída duas vezes igual à da bateria. Esta diferença de potencial permite ao *driver* colocar uma tensão V_{GS} na *gate* do *MOSFET* do regulador DC-DC igual à tensão da bateria.

Entre o gerador trifásico e o regulador encontra-se uma ponte retificadora passiva trifásica, constituída por díodos *Schottky*, cuja escolha adveio da necessidade de se ter o mínimo de complexidade, quando comparada com uma ponte ativa, e uma queda de tensão em série nos díodos baixa.

Assumindo que o conversor DC-DC tem uma eficiência de 85% (valor típico para reguladores deste tipo), a potência à entrada do conversor deve ser igual a:

$$P_{\text{entrada regulador}} = \frac{0,5 \text{ W}}{0,85} = 0,588 \text{ W} \quad (3.5)$$

e a potência de entrada da ponte retificadora, na saída do gerador é dada por:

$$\begin{aligned} P_G &= P_{\text{entrada regulador}} + 2V_D \frac{P_{\text{entrada regulador}}}{V_{\text{entrada regulador}}} \\ &= 0,588 \text{ W} + 2 \times 0,25 \text{ V} \times \frac{0,588 \text{ W}}{5 \text{ V}} = 0,647 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.5. Alimentação e armazenamento

A alimentação do sistema passa pela utilização de um regulador linear, modelo MIC5219, presente na placa do Arduíno Fio. Para o usar sem influência do carregador de baterias foi feito um *bypass* ao controlador de carregamento de células de lítio presente na placa. Este ponto é indicado na Figura 3.12 com uma seta vermelha e o regulador linear é indicado pela seta amarela.

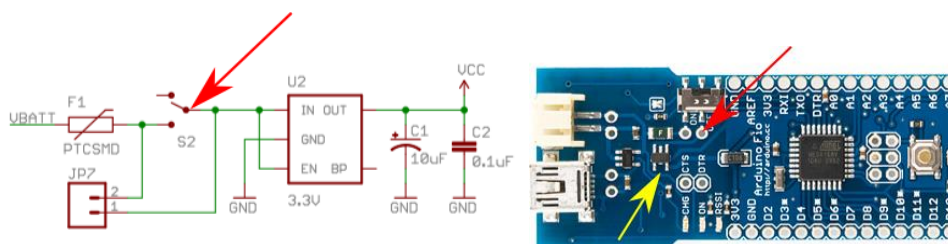


Figura 3.12 – Ponto de *bypass*.

A Tabela 3-1 apresenta os consumos de cada componente utilizado em vários estados de funcionamento.

Tabela 3-1 – Consumos dos componentes

Nome	Quantidade	Corrente individual (mA)	Corrente (mA)	Tensão (V)	Potência (mW)
ATMEGA328P	1	3	3	3,3	9,9
ATMEGA328P Power down	1	0,001	0,001	3,3	0,0033
ATMEGA328P Power save	1	0,00075	0,00075	3,3	0,002475
LM358	1	1	1	3,3	3,3
MAX9929	2	0,115	0,230	3,3	0,759
Xbee ON	1	40	40	3,3	132
Xbee idle	1	15	15	3,3	49,5
Xbee power-down	1	0,001	0,001	3,3	0,0033
Driver	1	3	3	4,8	14,4

Foi decidido usar baterias de Ni-MH visto serem relativamente baratas, fáceis de obter e mais resistentes a erros de carga. De forma a alimentar o sistema foi criado um pacote de 4 baterias em série, o que gerava uma tensão nominal de 4,8 V, com uma tensão mínima de 4,4 V e uma tensão de pico de 5,6 V.

Para manter o máximo de flexibilidade na utilização, foi decidido manter o sistema sempre ativo. O consumo total em corrente dos componentes, em modo ativo, alimentados com 3,3 V é de 44,23 mA. Esta corrente dá origem a uma potência perdida no regulador linear de:

$$(4,8 - 3,3) \times 44,23 = 66,35 \text{ mW} \quad (3.7)$$

dando uma potência total consumida, à entrada do regulador linear, de 226,71 mW. Isto faz com que a eficiência geral após a bateria seja de 71%.

Utilizando baterias com uma capacidade de 2000 mAh estimou-se a autonomia:

$$\frac{2000 \times 4,8}{226,71} = 42,34 \text{ horas} = 1,76 \text{ dias} \quad (3.8)$$

ou seja, este conjunto de baterias consegue alimentar o sistema durante um dia e meio.

As válvulas de solenoide disponíveis precisam de uma pressão de água de pelo menos 1 bar, ou seja, uma queda de pelo menos 10 m, para poderem funcionar adequadamente. As válvulas de bola controladas por servos simples deram resultados mistos ou inadequados. Por este motivo neste trabalho não foi implementado um sistema de controlo automático de caudal.

Como alguns sensores não ofereciam controlo de adormecimento foi criado um conjunto de pequenos módulos de corte de energia que permitem desligar e ligar seletivamente secções do circuito de forma a poupar energia. Estes não foram usados no protótipo desenvolvido. O diagrama de um destes módulos está representado na Figura 3.13.

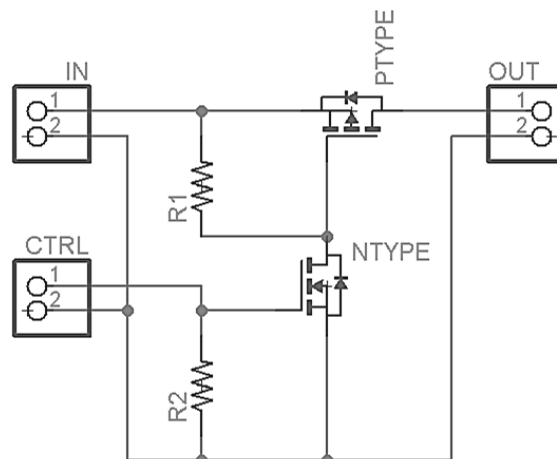


Figura 3.13 – Circuito de corte seletivo.

3.6. Medição da potência mecânica

O mecanismo de medição da potência mecânica usado neste trabalho é uma variante do dispositivo conhecido por dinamômetro de travão por corda, apresentado na Figura 3.14 [47] [48].

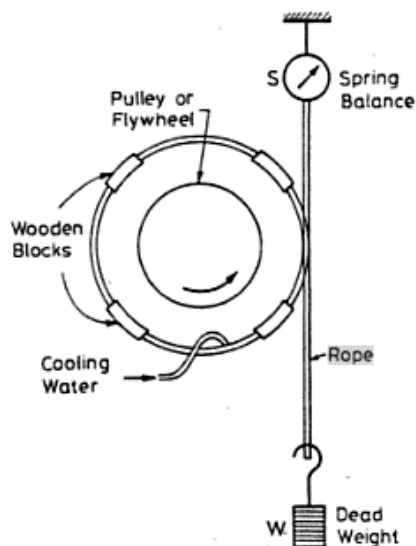


Figura 3.14 – Travão por corda [48].

Como as potências envolvidas no projeto são pequenas foi suprimido o uso de água de arrefecimento e foi usada uma segunda balança de molas para aplicar o mesmo efeito do peso.

Na Figura 3.15 é apresentado um diagrama do dinamômetro implementado e na Figura 3.16 é mostrada a sua montagem.

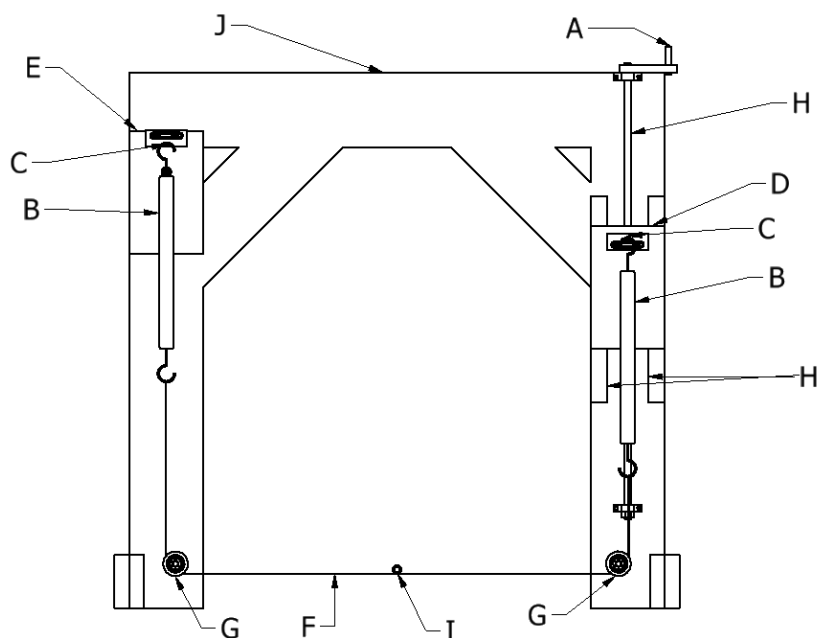


Figura 3.15 – Esquema do medidor de binário: (A) manivela, (B) balanças de mola, (C) ganchos, (D) apoio móvel, (E) apoio fixo, (F) fio, (G) polia, (H) carris lineares de gaveta, (I) roda volante presa ao eixo sob teste, (J) estrutura principal.



Figura 3.16 – Medidor de binário montado.

A manivela, no lado direito, permite mover a balança da direita de forma ascendente ou descendente, esticando ou alargando a mola e aplicando uma força de travagem ao eixo. O binário é dado por:

$$\tau = (F_1 - F_2) \times r \quad (3.9)$$

com τ o binário, em Nm, F_1 e F_2 as forças medidas nas balanças, em N, e r o raio da roda volante em metros.

Para a medição da velocidade angular foi usado um sensor de efeito de *Hall* com saída *latching*, ligado a um Arduíno com um ecrã, apresentado na Figura 3.17, e programado para a contagem do número de impulsos por segundo (fluxograma no Anexo C e código no Anexo D).

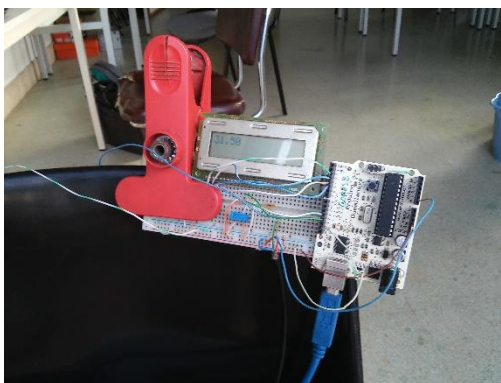


Figura 3.17 – Contador de rotações por segundo.

O circuito do contador de rotações está representado na Figura 3.18.

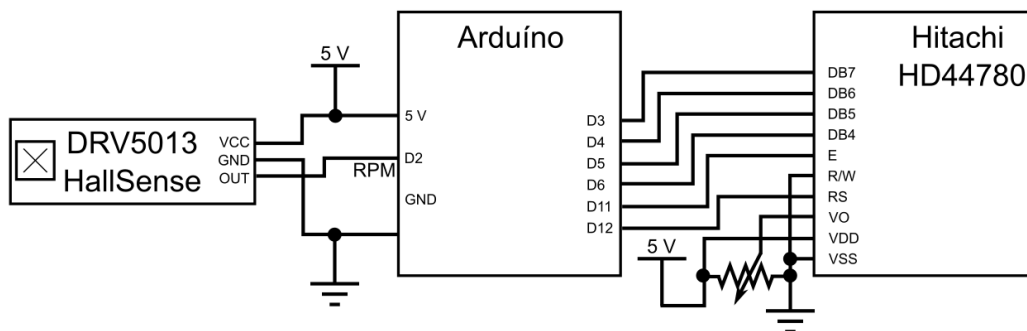


Figura 3.18 – Circuito do medidor de rotações com ecrã.

O sistema de medição de velocidade foi testado usando um osciloscópio, como mostra a Figura 3.19.



Figura 3.19 – Verificação de valores de rotações por segundo.

A potência mecânica, P , é dada por:

$$P = \tau\omega \quad (3.10)$$

em que ω é a velocidade angular em rad/s.

Foram testados vários materiais para a criação da roda volante, representados na Figura 3.20, e para a corda.



Figura 3.20 – Materiais testados para a criação da roda volante.

Foi decidido usar um eixo de aço inox polido, com 10 mm de diâmetro (componente à esquerda na Figura 3.20), pelas suas características rígidas, escorregadias, imunidade à corrosão e apresentar um diâmetro pequeno, que permite observar o binário com mais detalhe ao usar-se a gama de medição completa das balanças de mola. Para o fio foi escolhido um fio genérico de algodão, com 0,2 mm de diâmetro pelas suas características escorregadias, flexibilidade e por não derreter quando exposto a temperaturas elevadas. A boa qualidade da superfície do fio também teve que ser assegurada, visto que a existência de fibras soltas no fio causava efeitos de travagem súbita e inesperada, algo que foi detetado quando foi usado um fio de algodão com uma superfície degradada.

É importante notar que, sempre que o eixo ficasse molhado ou o fio apresentasse sinais de degradação, era necessário proceder à troca do fio e à limpeza do eixo.

Inicialmente, o procedimento de captura de dados envolvia duas pessoas. A primeira pessoa tinha como função movimentar a manivela ao mesmo tempo que observava a velocidade de rotação no ecrã do Arduíno. A cada variação de 2 Hz os valores de força nos dois dinamómetros eram lidos. A segunda pessoa fazia uma verificação no osciloscópio da velocidade de rotação e registava os valores da velocidade e das forças numa folha de cálculo, preparada com as equações apropriadas para calcular o binário e a potência, e que fazia automaticamente um gráfico. Isto permitia verificar rapidamente a existência de valores incorretos. A necessidade da

segunda pessoa advinha da necessidade de isolar o material elétrico sensível à água, como o computador e o osciloscópio.

Este processo era muito moroso e não permitia observar fenômenos rápidos, como o fim da curva de binário e a existência de choque de entrada e cavitação. Em consequência disso foi decidido implementar uma melhoria no sistema colocando duas células de carga, semelhantes às da Figura 3.21, removidas de duas balanças de precisão de bolso, apresentadas na Figura 3.22.



Figura 3.21 – Célula de carga.



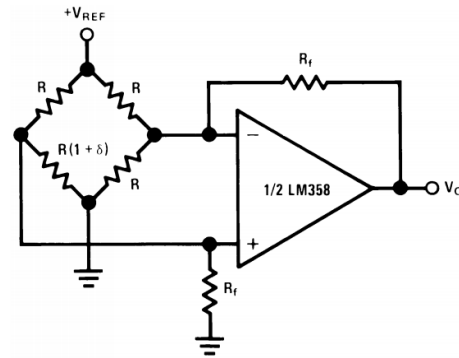
Figura 3.22 – Balanças de bolso.

As células de carga foram colocadas no lugar dos ganchos das balanças, ponto C da Figura 3.15, como indica a Figura 3.23.



Figura 3.23 – Células de carga montadas nos postes.

As células de carga tinham pontes Wheatstone resistivas coladas na sua periferia. Para ler as variações de resistência foi implementado o circuito representado na Figura 3.24, presente na folha de características do amplificador operacional LM358 [42].



For $\delta \ll 1$ and $R_f \gg R$

$$V_O \cong V_{REF} \left(\frac{\delta}{2} \right) \frac{R_f}{R}$$

Figura 3.24 – Amplificador de pontes resistivas [42].

O circuito de captura e filtragem usado foi o representado na Figura 3.25.

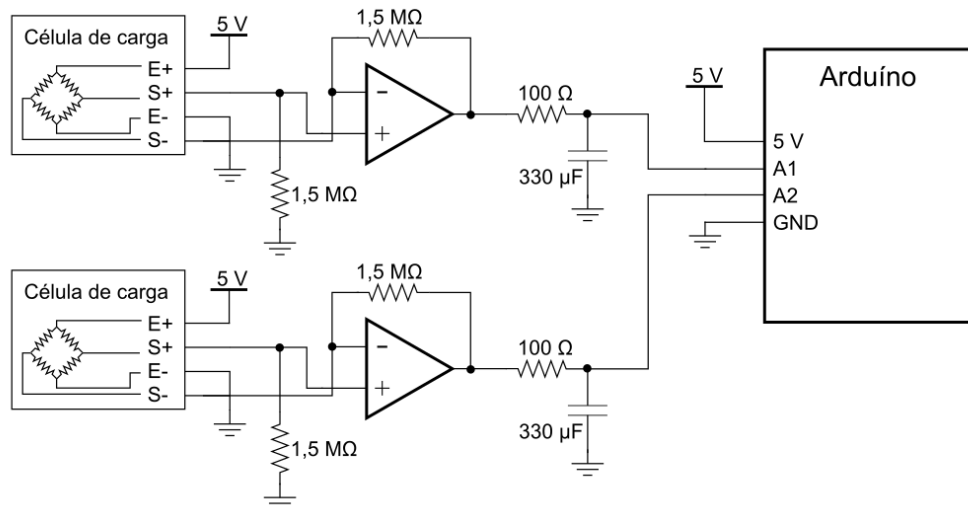


Figura 3.25 – Circuito implementado.

Para comunicar e capturar os dados foi implementada uma interface gráfica, representada na Figura 3.26, desenvolvida em Python.



Figura 3.26 – Interface de captura de dados.

A janela está dividida em 4 secções. A do topo tem o botão para ativar a ligação por protocolo série aos sensores, uma caixa para introdução do valor do diâmetro do eixo e uma zona para a exibição de mensagens. Logo abaixo desta é apresentada a força medida no primeiro sensor, a força no segundo sensor, a diferença entre os dois sensores, o binário, as rotações por segundo, as rotações por minuto, a velocidade angular, a potência em watts e a potência em miliwatts. Na secção seguinte encontram-se os botões de controlo, o botão para a remoção da tara, o botão de calibração do primeiro sensor, o botão de calibração do segundo sensor e o botão para mostrar a janela dos gráficos. Na última secção é exibida uma caixa para o nome do ficheiro onde devem ser gravados os dados e os botões para parar e iniciar a captura de dados.

O fluxograma do código e o código desta interface estão disponíveis, respetivamente, no Anexo E e no Anexo F.

É de notar que a interface é constituída por duas entidades independentes que se interligam, a interface gráfica visível em si e o agente, que tem como função fazer todo o trabalho de captura de dados, calibração e armazenamento.

Posteriormente foi decidido colocar os amplificadores operacionais junto aos sensores, de forma a reduzir o efeito de captação de ruído eletromagnético ambiental que ocorria nos cabos longos.

Tendo a capacidade de captura semiautomática de dados, foi possível observar pequenos detalhes na curva de torque e de potência e fazer capturas de forma mais rápida, sem a ajuda secundária.

As balanças de molas usadas para criar carga tinham um peso que devia ser removido das medidas. Para essa função foi usado o botão de remoção da tara, ou seja, foi considerar a medida nesse momento como sendo o zero, de forma a remover a tara. Este processo foi repetido periodicamente de forma a garantir que as deformações das células de carga, causadas por mudanças de temperatura ambiente, não causavam medições erradas.

A calibração da escala era feita usando um peso de 2 N. De forma periódica este era pendurado de uma das células de carga e era pressionado o botão “Afina” desse lado. Isto permitia compensar qualquer variação geométrica nos sensores causada por fatores externos.

O código do microcontrolador, neste caso um Arduíno uno, encontra-se disponível no Anexo G, sob a forma de fluxograma, e no Anexo H em código.

3.7. Turbinas

Para dimensionar o gerador faltava dimensionar a componente de velocidade angular, que dependia diretamente das características da turbina e da fonte de energia cinética. Como tal, e considerando que os geradores do tipo que foi usado tendem a ter uma eficiência na ordem dos 80% [49], considerou-se que a potência mecânica deveria ser da ordem dos 800 mW. Com este valor procedeu-se ao dimensionamento das turbinas e do gerador.

3.7.1. Propeller

Para a turbina *Propeller* foi decidido não imprimir a turbina, visto que a impressora disponível não tinha uma resolução adequada e o material não tinha rigidez suficiente quando impresso com a espessura necessária. Assim, foi adquirida uma turbina cujo diâmetro é o mais próximo da tubagem disponível de PVC, com 40 mm de diâmetro externo e 36 mm de diâmetro interno. A turbina em questão é uma turbina fabricada pela Graupner e é usada em de barcos de

modelismo, do modelo 2308.40L [50]. A turbina é feita em *nylon* com 40 mm de diâmetro e um passo de 21 mm, ou seja, num caso ideal sem carga a turbina avança 21 mm por cada volta do eixo. Esta foi montada num eixo com rolamentos à prova de água, estilo *stuffing box*, para barcos de modelismo. Os componentes podem ser observados na Figura 3.27.

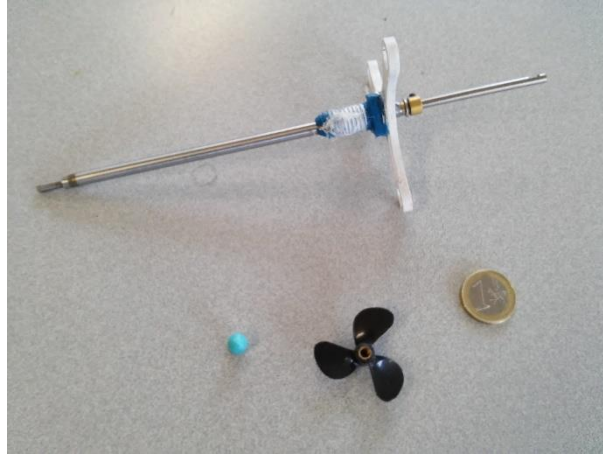


Figura 3.27 – No topo o conjunto de eixo impermeável, prendedor de eixo e apoio de gerador. Na parte inferior o cone, a turbina e uma moeda para escala.

Para uma potência mecânica de 0,8 W, assumindo uma eficiência de 80% e usando um valor comum para o rácio de fluxo de 0,5, tem-se que a queda útil é dada por (2.17):

$$\begin{aligned}
 P &= \mu\gamma QHu \\
 &= \mu \times \gamma \times A \times (\text{rácio de fluxo}) \times \sqrt{2 \times g \times Hu} \times Hu \\
 \Rightarrow Hu &= \left(\frac{P}{\mu \times \gamma \times A \times (\text{rácio de fluxo}) \times \sqrt{2 \times g}} \right) \\
 &= \left(\frac{0,8}{0,8 \times 9800 \times \left(\frac{0,04^2 - 0,008^2}{4} \right) \times \pi \times 0,5 \times \sqrt{2 \times 9,8}} \right)^{\frac{2}{3}} \\
 &= 0,11 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

A velocidade de rotação da turbina é dada por:

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{\text{Rácio de fluxo} \times \sqrt{2 \times g \times Hu}}{\text{Passo da turbina}} = \frac{0,5 \times \sqrt{2 \times 9,8 \times 0,11}}{0,021} \\
 &= 36,61 \text{ Hz} = 230 \text{ rad/s}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Calculando a velocidade específica, tem-se de (2.10):

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{36,6\sqrt{0,8}}{0,11^{\frac{5}{4}}} = 578 \tag{3.13}$$

que segundo a tabela 2-1 encontra-se a meio da gama indicada para turbinas deste género.

Para o dimensionamento do gerador foi usada a velocidade angular de 230 rad/s, do sistema *Propeller*.

O sistema desenvolvido está representado na Figura 3.28.

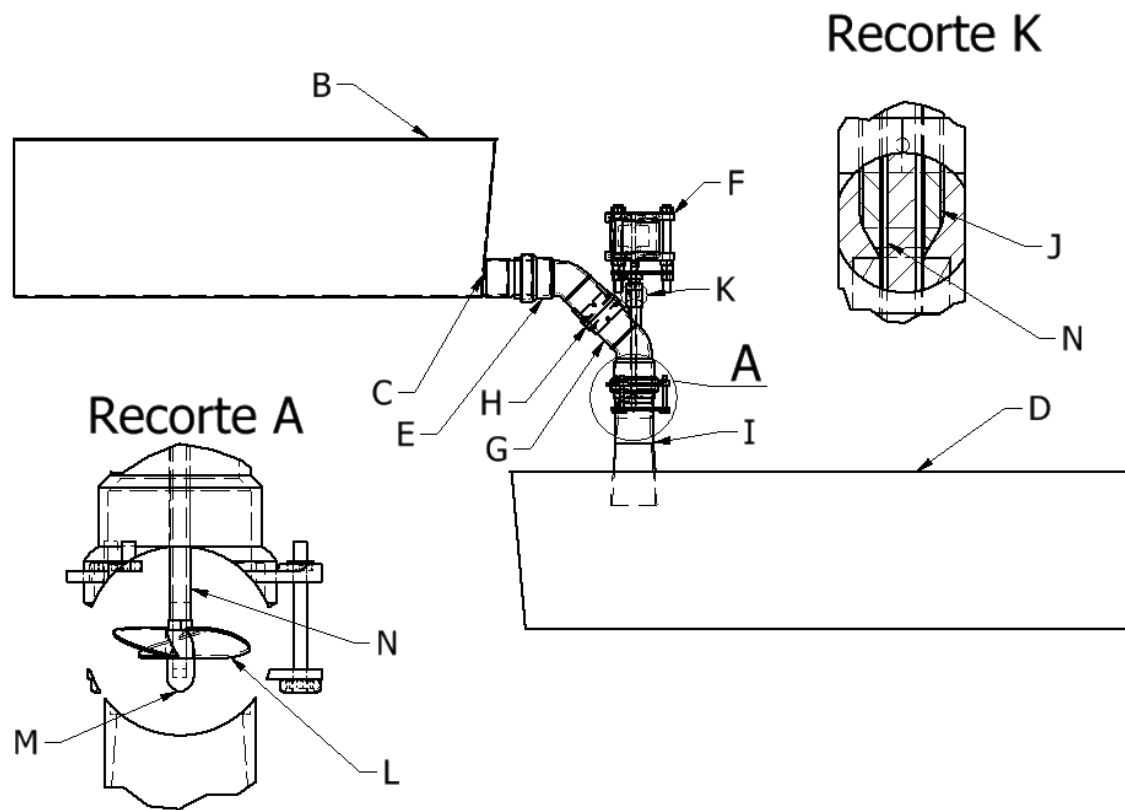


Figura 3.28 – Sistema *Propeller*: (A) detalhe do encapsulamento da turbina, (B) captura de água de entrada, (C) captura em aresta viva com 40 mm de diâmetro, (D) captura de água de saída, (E) tubo curvo com 45° e diâmetro de 40 mm, (F) gerador, (G) tubo curvo com 45° e diâmetro de 40 mm adaptado, (H) união de tubos, (I) tubo de vácuo, (J) apertador de eixo, (K) detalhe do apertador de eixo, (L) hélice, (M) cone, (N) eixo e rolamento impermeável.

A estrutura foi escolhida para ser equiparável à usada em [16], mas com curvas menos bruscas e melhores mecanismos de vedação.

Para este sistema foi decidido testar o efeito de mudar a geometria do bocal de saída. Para tal foi criado um bocal a direito e um bocal divergente (Figura 3.29).



Figura 3.29 – Bocal direito e bocal divergente.

As perdas de carga conhecidas e calculáveis estão representadas na Figura 3.30. É de notar que K_F é dependente da saída usada.

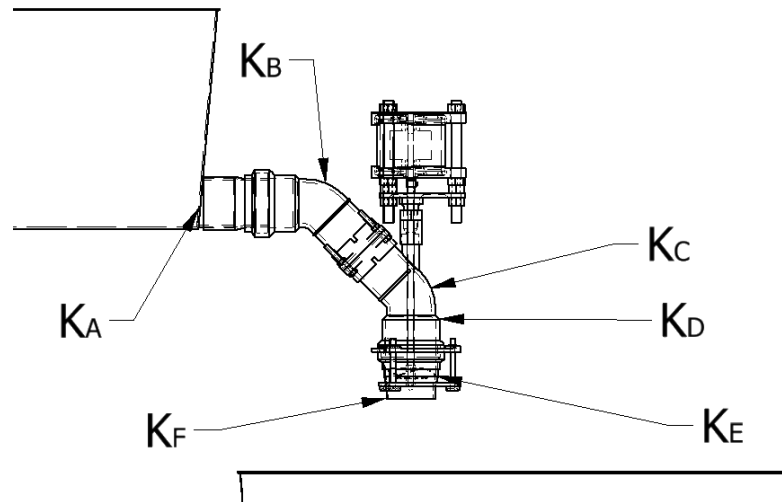


Figura 3.30 – Perdas de carga.

O valor das perdas no sistema sem cone divergente é dado por [40]

$$\begin{aligned}
 H_l &= \frac{v^2}{2g} (K_A + K_B + K_C + K_D + K_E + K_F) \\
 &= \frac{(0,5 \times \sqrt{2} \times 9,8 \times 0,11)^2}{2g} (0,5 + 0,16 + 0,16 \\
 &\quad + 0,206 + 0,118 + 1) = 0,059 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Com a perda de queda estimada tem-se que a queda bruta deverá ser na ordem dos 0,17 m para o sistema sem tubo de sucção divergente.

A aplicação de um tubo de sucção divergente, como indicado na Figura 3.31, faz com que aumentasse para o dobro a área à saída, criando um abrandamento da água na saída e reduzindo o efeito do fator K_F . Neste cenário a perda de queda reduz-se para 0,038 m e uma queda bruta na ordem dos 0,14 m.

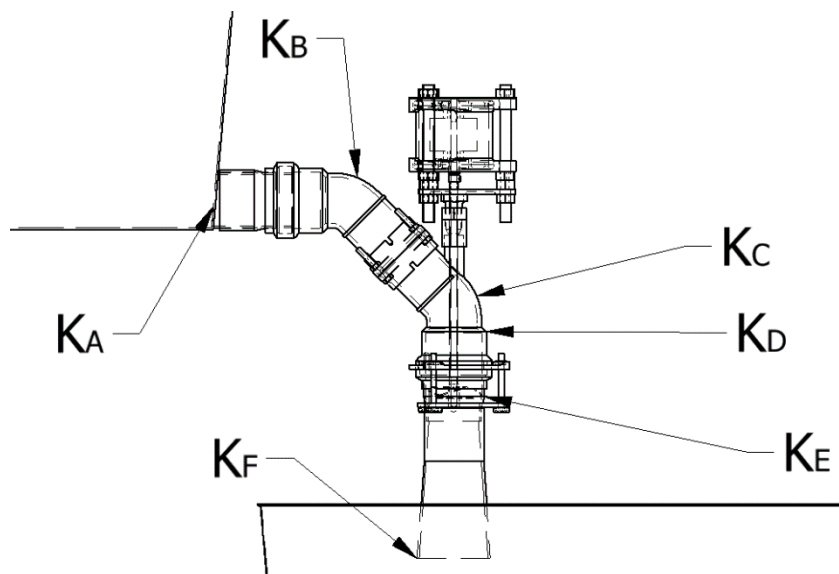


Figura 3.31 – Perdas de carga com tubo de sucção divergente.

Durante os testes preliminares, os mecanismos para a criação de vórtice apresentados na Figura 3.32 não permitiram melhorar o desempenho do sistema, tendo um efeito negativo por aumentarem as perdas de queda, possivelmente devido à ocupação de uma porção apreciável da área da tubagem. Desta forma, foram suprimidos nos testes finais.

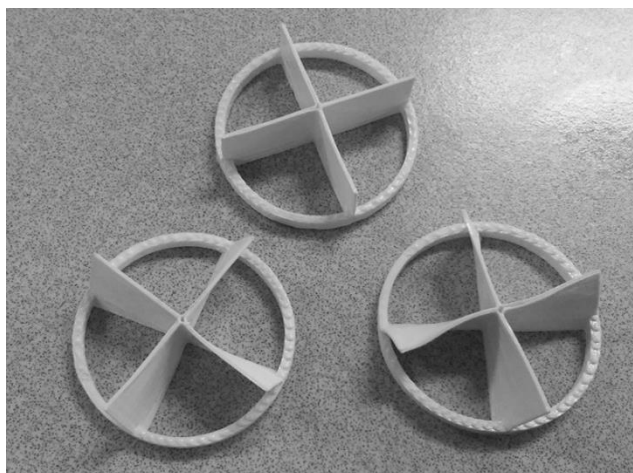


Figura 3.32 – Criadores de vórtice.

3.7.2. Pelton

As turbinas *Pelton* foram impressas numa impressora 3D. Como é requerido que estas sejam de pequena dimensão, foi feito um estudo físico de resistência e qualidade de acabamento relativamente ao valor do diâmetro, D . Para isso construiu-se uma série de componentes da turbina, em várias escalas, sendo cada um destes componentes inspecionado para determinar a sua viabilidade para uso contínuo. Depois deste estudo foi concluído que a dimensão mínima para D seria na ordem dos 30 mm, de forma a garantir uma qualidade de superfície e resistência de suporte adequados. Com este parâmetro foi calculado o diâmetro do orifício do injetor, através dos rácios da tabela 2-2, o qual variou entre os 1,87 mm e os 2,14 mm. Foi escolhido o valor 2,14 mm de forma a facilitar o fabrico dos componentes.

O caudal é dado por [34]:

$$Q = Av = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 C_v \sqrt{2gH} \quad (3.15)$$

Tendo a potência mecânica, assumindo uma eficiência de 85% e o diâmetro do injetor, foi possível calcular a queda efetiva manipulando a equação (2.17):

$$\begin{aligned} P = \eta\gamma QH_e \Leftrightarrow H_e = \frac{P}{\eta\gamma Q} \Leftrightarrow H_e = \frac{P}{\eta \times \gamma \times \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times C_v \times \sqrt{2gH_e}} \Leftrightarrow H_e \\ = \left(\frac{P}{\eta \times \gamma \times \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times C_v \times \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

sendo obtida uma queda efetiva de 3,38 m.

Colocando estes valores na equação (2.20) tem-se que a velocidade do jato é igual a 7,96 m/s. A velocidade tangencial u da turbina, dada pela equação (2.21) e Figura 2.39, é de 3,59

m/s e a velocidade rotacional, obtida a partir da equação (2.22), é de 2285 RPM, 38 Hz ou 239,3 rad/s.

Usando a equação (2.10) obteve-se a velocidade específica:

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{38RPS \sqrt{\frac{0,81}{0,85} W}}{3,38^{\frac{5}{4}} m} = 8,1 \quad (3.17)$$

o que segundo a tabela 2-1 se encontrava no limite inferior da gama adequada para este tipo de turbina.

O diâmetro da mangueira, 25 mm externo e 18 mm interno, foi escolhido por ser um diâmetro padrão, existirem uniões e acessórios disponíveis no laboratório e apresentar um aumento de área substancial em relação à área do injetor, permitindo uma diminuição das perdas na conduta de alimentação.

Na Figura 3.33 está representado um esquema de uma turbina *Pelton* usada neste sistema. Esta é uma réplica, à escala, de uma turbina de grandes dimensões e usa os valores determinados anteriormente.

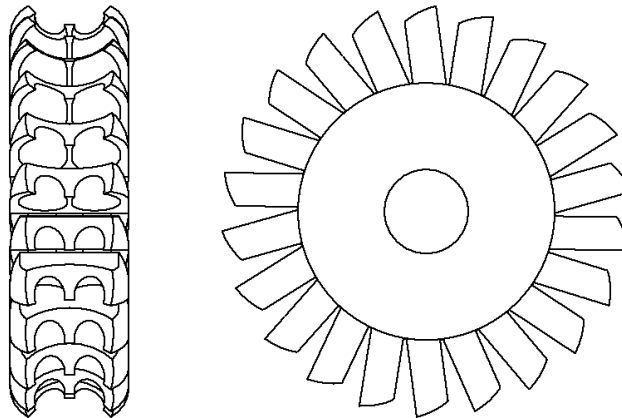


Figura 3.33 – Turbina dimensionada.

No total foram criadas 19 turbinas *Pelton* para este trabalho. Estas são apresentadas na Figura 3.34 e na Figura 3.35 juntamente com a turbina de metal usada em [16]. Estas foram numeradas à medida que foram sendo fabricadas.



Figura 3.34 – Primeiro conjunto de turbinas *Pelton*.

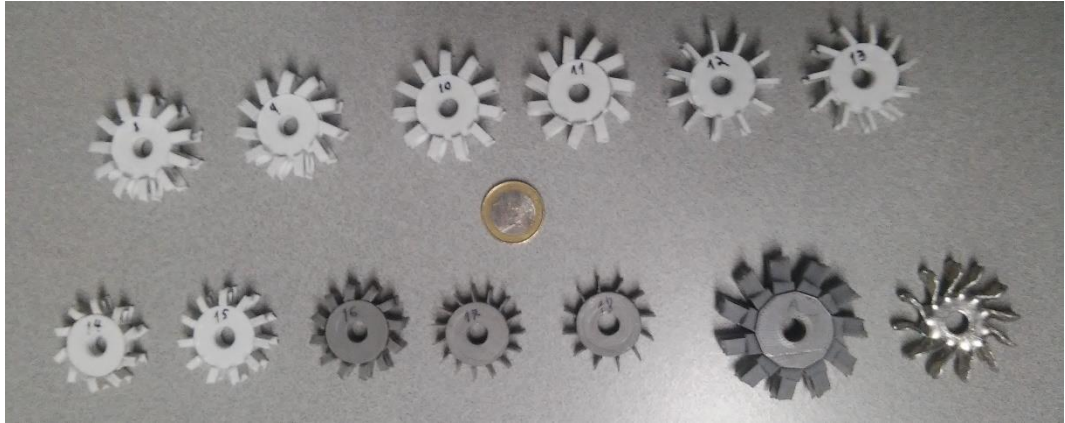


Figura 3.35 – Segundo conjunto de turbinas *Pelton*.

O primeiro conjunto é constituído por turbinas cujo diâmetro é de 27 mm. Cada uma possui parâmetros chave diferentes. A turbina 1 tem 19 pás. As turbinas 2 e 3, de 22 pás, têm o mesmo desenho e serviram para testes qualitativos. Com a turbina 2 foi tido um cuidado especial em criar a rosca bem alinhada com o eixo, sendo que pás com defeitos foram excluídas, e esta foi completamente envernizada numa estrutura rotativa para garantir uma cobertura homogênea. A turbina 3 recebeu um tratamento oposto: o eixo não ficou bem alinhado, a superfície foi deixada rugosa e algumas pás posicionadas de forma irregular. A turbina 4 não tem o separador central característico das turbinas *Pelton*, servindo para verificar se é mesmo necessário o passo extra de criar o separador de jato. A turbina 5 tem uma redução ainda maior no número de pás, para 15 e serviu para aferir o efeito de se ter menos pás. A turbina 6 e a turbina 7 têm superfícies planas e serviram para avaliar se era mesmo necessário utilizar todas as curvas de projeto de grande escala para pequena escala.

As turbinas 8, 9, 10, 11, 12 e 13 serviram para aferir o efeito do aumento do diâmetro, de 27 mm para 31 mm, e o efeito do ângulo de inclinação das colheres, ou seja, o ângulo que cada colher faz relativamente ao raio da turbina. Esta diferença pode ser observada na Figura 3.36. As turbinas 8 e 9 têm a divisória central, as turbinas 10 e 11 não têm divisória central e as turbinas 12 e 13 têm paredes baixas e não têm divisória central.



Figura 3.36 – Turbinas para estudo do efeito do ângulo.

As turbinas 14, 15, 16, 17 e 18 têm um diâmetro igual ao das turbinas do primeiro conjunto e serviram para complementar dados relativamente ao efeito do número de colheres, geometria e da inclinação das pás relativamente ao raio.

A turbina A (de maior dimensão na Figura 3.35) é um protótipo desenvolvido no início da tese e serviu para observar o efeito de um aumento acentuado de diâmetro, para 37 mm, sendo comparável à turbina *Pelton* de metal usada em [16], cujo diâmetro é de 35 mm.

Em conjunto com estas turbinas foi também impresso um conjunto de injetores para criar jatos com diâmetros diferentes. Estes são representados na Figura 3.37.



Figura 3.37 – Injetores e adaptador.

Os injetores usam curvas suaves para reduzir os efeitos de estrangulamento de canal e cavitação. Esse detalhe é representado na Figura 3.38.

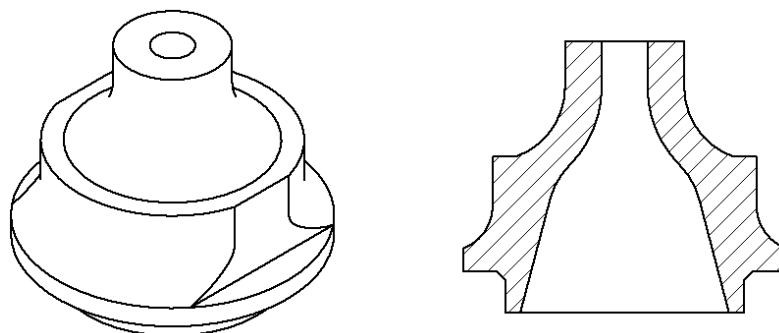


Figura 3.38 – Injetor dimensionado.

O diâmetro do orifício dos injetores encontra-se tabelado na Tabela 3-2. O injetor 3A foi dimensionado para se aproximar do diâmetro utilizado anteriormente no dimensionamento do injetor.

Tabela 3-2 – Características de desenho dos injetores.

Injetor	Diâmetro interno por desenho (mm)
1	1
2	1,5
3	2
3A	2,1
4	2,5
5	3
6	3,5
7	4
8	4,5

O sistema desenvolvido é apresentado na Figura 3.39, com detalhes na Figura 3.40 e na Figura 3.41.

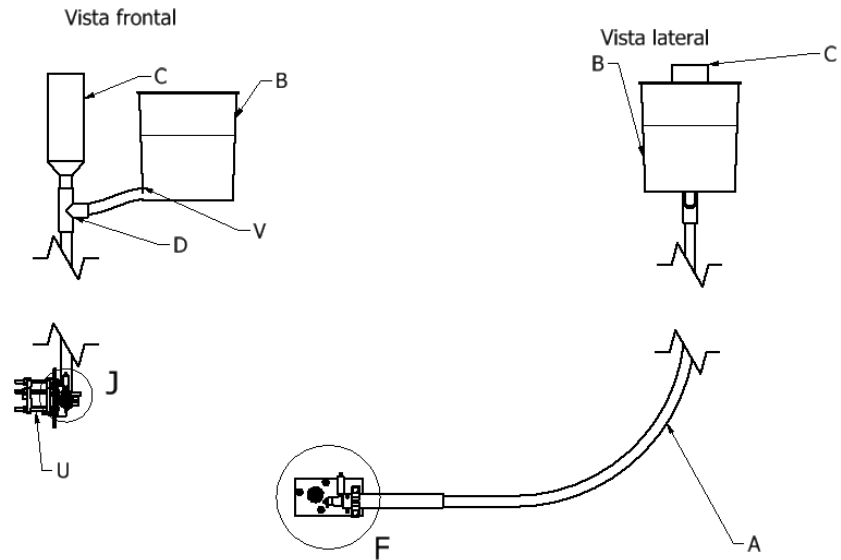


Figura 3.39 – Sistema *Pelton*: (A) mangueira, (B) tanque principal, (C) tanque de compensação, (D) união em T, (F) injetor e turbina, (J) acoplamento turbina-gerador, (U) gerador, (V) captura em aresta viva.

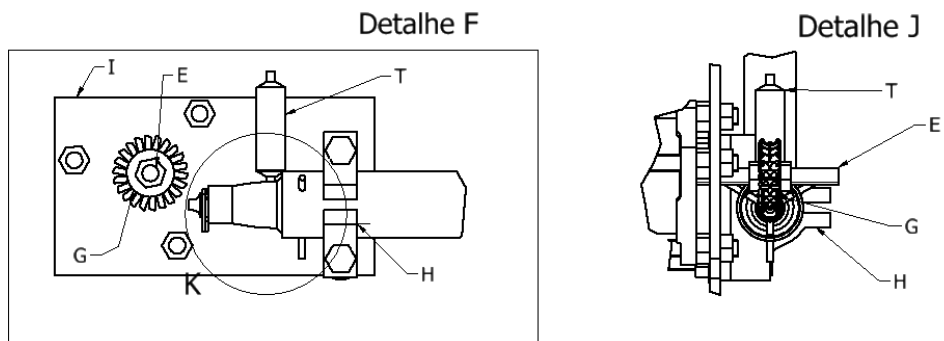


Figura 3.40 – Detalhes do sistema *Pelton*: (E) eixo, (G) turbina, (H) apoio móvel, (I) apoio fixo, (K) injetor e purga de bolhas de ar, (T) mecanismo de purga de bolhas de ar.

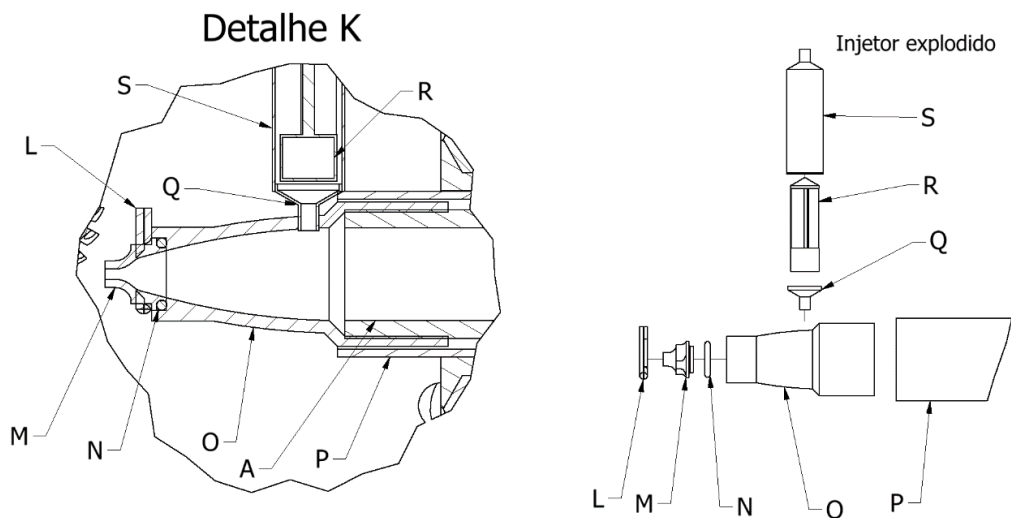


Figura 3.41 – Detalhe do interior do injetor e injetor explodido: (A) mangueira, (L) retentor do injetor, (M) injetor, (N) anel de borracha, (O) apoio do injetor, (P) tubo de apoio principal, (Q) entrada do mecanismo de purga de bolhas de ar, (R) êmbolo flutuante, (S) encapsulamento do mecanismo de purga de bolhas de ar.

Para os injetores assentarem bem contra o apoio O foi usado um anel de borracha vedante, representado pela letra N, e três molas de retenção, que se prenderam entre os três postes de L e três parafusos apertados em P, para aplicar pressão homogeneamente.

A captação de água é representada por B na Figura 3.39. O orifício da captação é em aresta viva e é representado por V. A água percorre um pequeno segmento descendente e dirige-se para um tanque de compensação, C, colocado logo na descida vertical da água.

A utilização deste pequeno tanque permitia uma melhor resposta dinâmica do sistema e uma melhor facilidade em purgar as bolhas de ar presentes na tubagem quando o sistema arrancava depois de seco. As dimensões deste são fundamentais quando o sistema está sujeito a variações frequentes de caudal, algo que não ocorreu no sistema implementado. Consequentemente, não foi feito o dimensionamento do tanque.

Foi criada uma válvula de purga de ar, representada por T na Figura 3.40, com seringas de plástico. Esta foi eventualmente melhorada com um flutuador interno, molas de retenção, um vedante de silicone e realocizada para uma posição mais afastada de modo a não interferir com a cobertura. É de notar que esta cumpre o objetivo secundário de ser uma válvula anti pressão negativa. Quando a válvula de controlo de caudal é fechada repentinamente ocorre a criação de uma pressão negativa. Nesta situação a válvula abre e deixa entrar ar.

O suporte da turbina e do gerador tem a capacidade de se inclinar e deslocar para acomodar turbinas com diâmetros diferentes.

3.8. Gerador

O gerador usado neste trabalho é do tipo radial síncrono com ímanes permanentes, núcleo de ar e enrolamentos concentrados como exemplificado na Figura 3.42.



Figura 3.42 – Exemplo de bobinas concentradas [49].

As vantagens de ser um gerador com núcleo de ar são um custo menor de construção, independência do uso de materiais ferromagnéticos e não ter alguns dos efeitos magnéticos negativos de máquinas com núcleos ferromagnéticos. O uso de bobinas concentradas é vantajoso no sentido em que simplifica a construção, baixa o custo e reduz as perdas resistivas quando comparado com uma montagem de bobinas sobrepostas. Este gerador encontra-se representado na Figura 3.43.

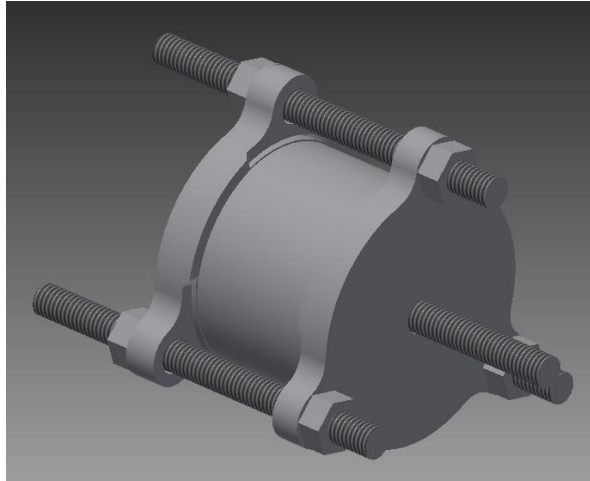


Figura 3.43 – Gerador.

Foi decidido dimensionar o gerador para que este pudesse ser ligado, após a retificação, diretamente ao conjunto de baterias, o que permitia testar o efeito do regulador no sistema. As especificações elétricas esperadas, após a retificação, são uma saída de tensão contínua de 5 V e uma potência elétrica de 647 mW, a potência elétrica contando com as perdas típicas do regulador de tensão comutado. Observando o percurso que a corrente segue no retificador trifásico, mostrado na Figura 3.44 com linhas sólidas, tem-se que [51]:

$$V_{Lp} = \frac{V_{dc} \times \pi}{3\sqrt{3}} + 2 \times V_D = \frac{5 \times \pi}{3\sqrt{3}} + 2 \times 0,25 = 3,5V \quad (3.18)$$

$$I_{linhap} = \frac{P_{rms}}{V_{Lp}} = \frac{0,647}{3,5} = 0,184A \quad (3.19)$$

$$I_{phasep} = \frac{I_{linhap}}{\sqrt{3}} = 0,106A \quad (3.20)$$

em que V_{Lp} é a tensão de pico na linha de saída do gerador, V_{dc} é a tensão contínua aos terminais do retificador, V_D é a queda de tensão no diodo, I_{linhap} é a corrente de pico na linha de saída do gerador, P_{rms} é a potência média requerida do sistema elétrico e I_{phasep} é a corrente de pico por fase.

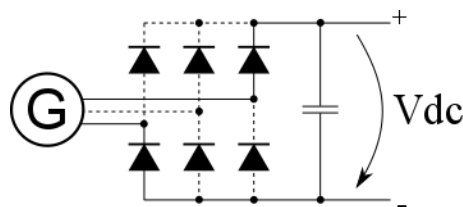


Figura 3.44 – Gerador ligado a retificador trifásico.

Há que ter em consideração as perdas internas nas bobinas do gerador no dimensionamento do sistema. Na Figura 3.45 é apresentado um modelo simplificado de uma das fases do gerador. A componente a ter em atenção quando o gerador se encontra a fornecer potência à carga R_L é a queda de tensão V_{perda} na resistência interna da bobina, R_G . Desta forma tem-se:

$$V_G = V_{Perda} + V_L = R_G \frac{I_{linhap}}{\sqrt{3}} + V_L \quad (3.21)$$

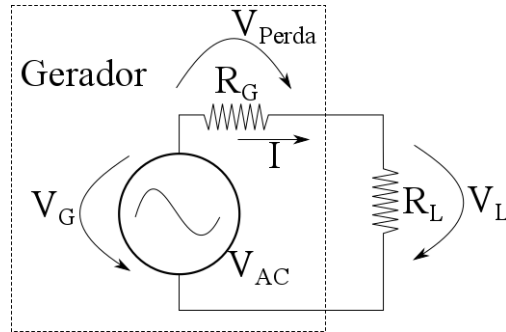


Figura 3.45 – Modelo de uma fase do gerador.

A tensão de pico do gerador é definida por [49]:

$$E_p = 2qNBk_\lambda r_n l \omega_m \quad (3.22)$$

em que q é o número de bobinas por fase, N é o número de enrolamentos por bobina, B é a densidade do campo magnético em tesla, k_λ é o fator de ligação de fluxo, r_n é o raio médio do estator em metros, l é o comprimento elétrico ativo de cada bobina em metros e ω_m é a velocidade angular mecânica em radianos por segundo. Os parâmetros l e r_n são exemplificados na Figura 3.46.

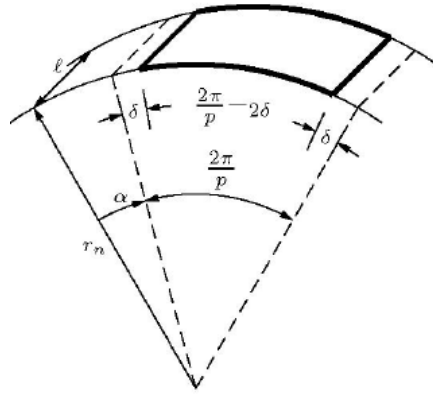


Figura 3.46 – Uma volta da bobina no estator [49].

A resistência de cada bobina, cujo fio tem um diâmetro de 0,4 mm, é dada por:

$$\begin{aligned} R_{CuN} &= N \times 2 \times (l + le) \times \frac{\rho}{A} = N \times 2 \times (20mm + 25mm) \times 0,136 \Omega / m \\ &= N \times 0,01224\Omega \end{aligned} \quad (3.23)$$

Juntando a equação (3.21) com a equação (3.22) tem-se que:

$$R_G \frac{I_{linhap}}{\sqrt{3}} + V_{Lp} = 2qNBk_\lambda r_n l \omega_m \quad (3.24)$$

Adicionando o valor da resistência de cada bobina tem-se:

$$2 \times N \times 0,01224\Omega \times \frac{I_{linhap}}{\sqrt{3}} + V_{Lp} = 2qNBk_{\lambda}r_n l \omega_m \quad (3.25)$$

Resolvendo em ordem a N obtém-se

$$N = \frac{V_{Lp}}{2qBk_{\lambda}r_n l \omega_m - 2 \times 0,01224\Omega \times \frac{I_{linhap}}{\sqrt{3}}} \quad (3.26)$$

Tendo $q = 2$, $B = 0,087$ T no centro de cada enrolamento, valor obtido através de um simulador *online* [52], $k_{\lambda} = 0,95$ obtido através da Figura 3.48, $r_n = 22$ mm, $l = 20$ mm e $\omega_m = 230$ rad/s foi calculado que cada enrolamento devia ter aproximadamente 112 voltas. Este valor foi arredondado para 121 voltas, para permitir um melhor rácio entre largura e espessura das bobinas.

Seja k definido por:

$$k = \frac{\Delta}{\Delta_{max}} \quad (3.27)$$

em que a variável Δ é definida na Figura 3.47, e representa um modelo linearizado das bobinas e ímanes de um gerador. O parâmetro Δ_{max} é igual à largura máxima que uma bobina pode ter num gerador com bobinas concentradas.

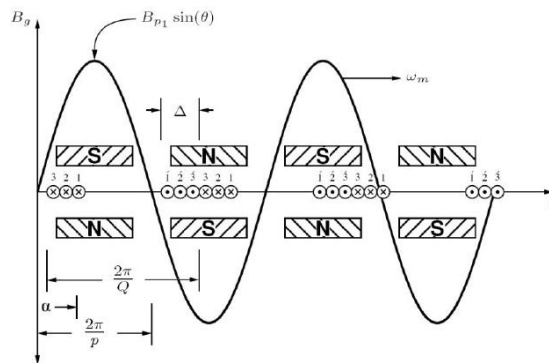


Figura 3.47 – Modelo linearizado de um gerador [49].

Pela Figura 3.48, para que k_{λ} seja o maior possível, k deve ser aproximadamente 0,185.

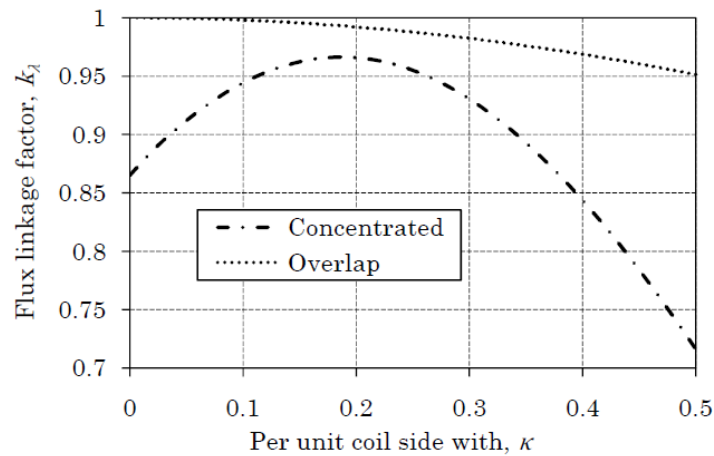


Figura 3.48 – Ligação de fluxo em relação à largura relativa do enrolamento [49].

No gerador dimensionado Δ_{max} é igual a 23 mm, o que implica que Δ , a largura lateral da bobina, deve ser de aproximadamente 4,26 mm. Como os enrolamentos foram colocados da forma o mais compacta possível, foi exequível uma secção de 11 por 11 fios, perfazendo um total de 121 voltas. Tendo um valor Δ igual a 4,43 mm os valores de k e k_λ foram recalculados, ficando $k = 0,192$ e $k_\lambda = 0,966$, que está dentro dos parâmetros esperados. Uma bobina do gerador é representada na Figura 3.49 em conjunto com alguns ímanes do rotor de forma linearizada.

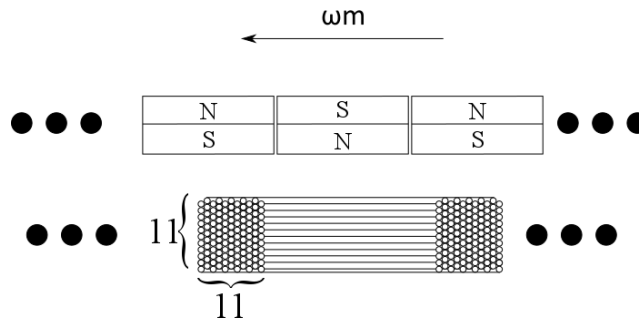
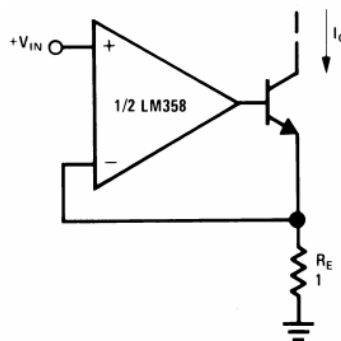


Figura 3.49 – Representação linear de um enrolamento em relação ao rotor.

3.9. Carga variável

Como o objetivo de testar a turbina acoplada ao gerador foi criada uma carga cujo valor pode variar de forma controlada e remotamente. O desenho desta foi baseado numa carga de corrente fixa presente na folha de características do AMPOP LM358 [42] apresentado na Figura 3.50.



$I_0 = 1 \text{ amp/volt } V_{IN}$
(Increase R_E for I_0 small)

Figura 3.50 – Carga de corrente constante [42].

Para que esta pudesse ser controlada facilmente por uma porta PWM do microcontrolador foi usado um filtro passa baixo RC de primeira ordem com uma frequência de corte de 1,6 Hz. Esta frequência de corte tão baixa foi escolhida para garantir um sinal DC suave na saída. A afinação da sensibilidade foi feita através de um potenciômetro a funcionar como divisor resistivo variável. O circuito completo pode ser observado na Figura 3.51.

Foi decidido usar um FET no lugar do TBJ de forma a reduzir a corrente consumida e permitir controlar potências maiores com os FET de potência disponíveis.

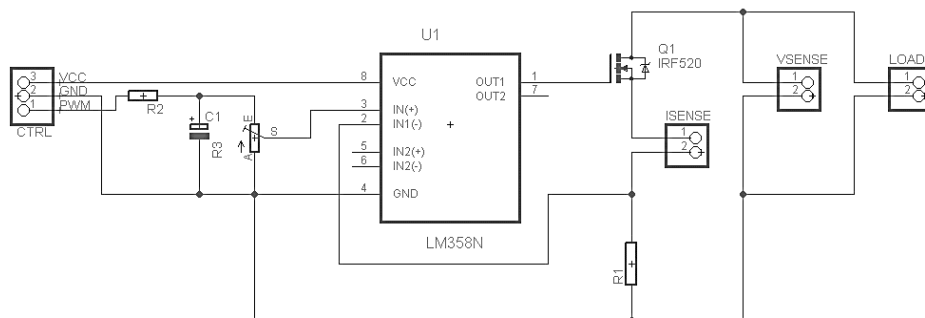


Figura 3.51 – Circuito da carga variável.

É de notar que, para garantir o funcionamento adequado do circuito nesta aplicação, foi usado o duplicador de tensão capacitivo para alimentar este circuito com 10 V de tensão. A porta ISENSE permite ligar um sensor de corrente e a porta VSENSE permite ligar um sensor de tensão, que servem para capturar dados e monitorizar o funcionamento da carga. A porta LOAD é onde fica ligada a saída do retificador.

O sistema de teste de carga elétrica está representado na Figura 3.52.

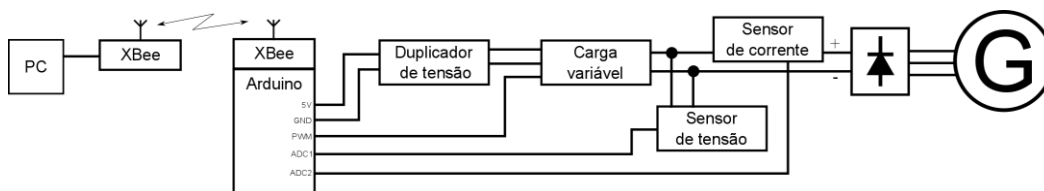


Figura 3.52 – Teste de carga elétrica.

A transmissão de dados foi feita através de rádios XBee. Isto permitiu obter medições sem se correr o risco de danificar equipamentos sensíveis e caros com a água. O fluxograma e o código do sistema de teste da carga encontram-se no Anexo K e no Anexo L, respetivamente.

O conta rotações usado foi uma variante do conta rotações com ecrã apresentado na secção 3.6. O fluxograma e o código podem ser consultados no Anexo M e no Anexo N, respetivamente.

Para o controlo e captura de dados foi adaptada a interface do medidor de binário. A Figura 3.53 apresenta a nova interface.

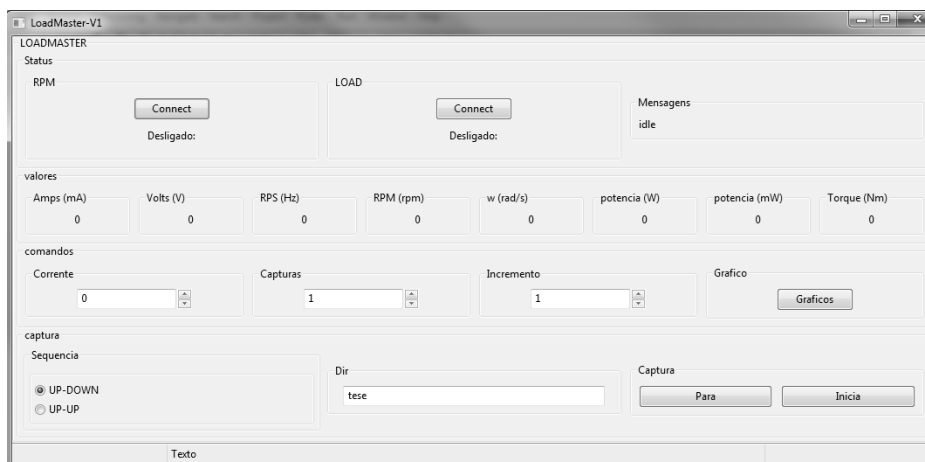


Figura 3.53 – Interface de captura de dados.

A interface encontra-se dividida em 4 secções. A do topo contém os botões que controlam a ligação com o sensor de rotações e a ligação sem fios com a carga variável. Existe também uma caixa de texto para mensagens relativas ao funcionamento do programa. Logo abaixo encontra-se a informação relativa à captura, nomeadamente a corrente medida, a tensão medida, as rotações por segundo, as rotações por minuto, a velocidade angular, a potência em watt, a potência em miliwatt e o binário em newton metro. Na secção seguinte é possível encontrar o controlo manual da corrente de carga, o número de capturas para o sistema automático, o incremento de corrente e o botão para mostrar a janela dos gráficos. Na última secção é apresentada a escolha do algoritmo de teste, o nome do ficheiro para guardar os dados e os botões de início e fim da captura automática. O fluxograma da interface encontra-se no Anexo I e o código no Anexo J.

Para testar o sistema de forma automática foi usado um de dois testes. Em cada um destes a corrente de carga era variada segundo as rampas apresentadas na Figura 3.54.

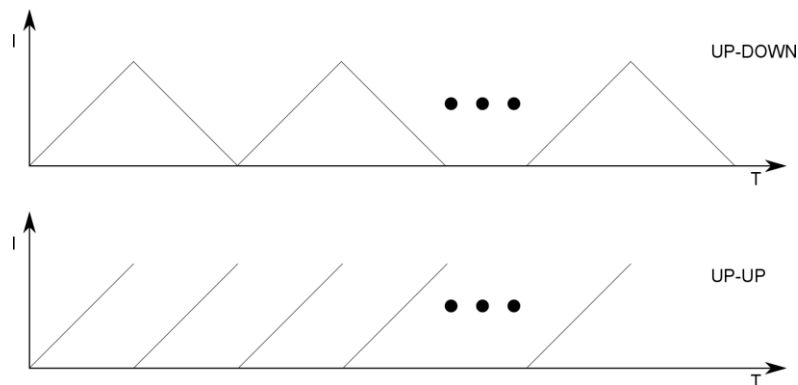


Figura 3.54 – Algoritmos de teste.

Na rampa identificada por “*UP-DOWN*” a corrente era elevada progressivamente até chegar a um ponto onde a corrente lida não subia mais. Após isto a corrente era reduzida progressivamente. Isto permitia observar os efeitos da inércia nas medições.

Conhecendo o rácio adequado de captura, em que a influência da inércia não é significativo, era usada a rampa “*UP-UP*”, o que permitia reduzir o tempo de captura para metade, relativamente ao algoritmo anterior.

3.10. Nó sensor

Por fim efetuou-se a montagem do nó sensor. Normalmente este género de nó é usado para capturar variáveis ambientais. Para fins de estudo do sistema de carregamento e controlo de carga, neste trabalho o nó sensor capturou e forneceu dados relativos à velocidade rotacional, à tensão da bateria, à corrente de entrada na bateria, à corrente de saída da bateria e ao estado atual. Foi também decidido dotar o nó sensor da capacidade de efetuar testes de carga de forma autónoma.

Como a potência varia muito pouco em sistemas hídricos, foi feita uma medida da corrente de entrada, da corrente de saída e da tensão na bateria a cada segundo. Esta cadência de captura e resposta é lenta devido à necessidade de compensar as características inerciais do gerador e devido à estabilidade da fonte de potência hídrica.

Para fins do algoritmo de MPPT era somente usada a corrente de entrada na bateria. Como a tensão da bateria varia muito pouco com a potência que lhe é injetada há uma proporção direta entre esta e a corrente de entrada. Isto permitiu simplificar os cálculos e a programação.

Para encontrar o ponto de máxima transferência de potência foi feito um varrimento do fator de ciclo e a corrente de entrada na bateria é observada. O algoritmo de perturbação e observação do MPPT inicia no ponto em que a corrente de entrada na bateria é a mais elevada.

Devido à falta de uma válvula controlável eletronicamente adequada para este trabalho foi usada uma válvula manual. Consequentemente, todo o controlo de funcionamento da turbina foi manual, ou seja, desde que a válvula permanecesse aberta e existisse água na tubagem a turbina encontrava-se em funcionamento.

O sistema de controlo de carga pode carregar a bateria somente quando esta se encontra descarregada ou, usando um condensador no lugar da bateria, manter o sistema em funcionamento contínuo sem o uso de bateria. Neste trabalho foi decidido implementar somente o método de carregamento sucessivo e sequencial da bateria.

O carregamento da bateria é iniciado quando a tensão por célula é de 1,1 V e finaliza quando a tensão por célula atinge os 1,4 V. É esperado que a corrente de entrada da bateria cause uma sobrelevação de tensão que causa uma leitura errada da tensão real na bateria. Isto não é problemático desde que as resistências parasitas em série sejam baixas.

Foram também colocadas no código final algumas rotinas utilitárias. Estas são as rotinas de controlo manual do fator de ciclo, início de carregamento manual, paragem de carregamento e uma rotina de varrimento de fator de ciclo. Todas estas são ativáveis remotamente. Isto permite uma fácil captura das características dinâmicas do sistema durante os testes e o controlo manual em caso de emergência.

A caixa do nó sensor foi adaptada para permitir a sua montagem no tubo de apoio do injetor da turbina *Pelton*. Todos os orifícios feitos para a passagem de cabos têm um retentor impermeável de cabos. A tampa contém 3 luzes LED de diagnóstico, cujas resistências foram sobredimensionadas de forma a reduzir a corrente consumida por estes para cerca de 1 mA. Os vários componentes são apresentados na Figura 3.55.

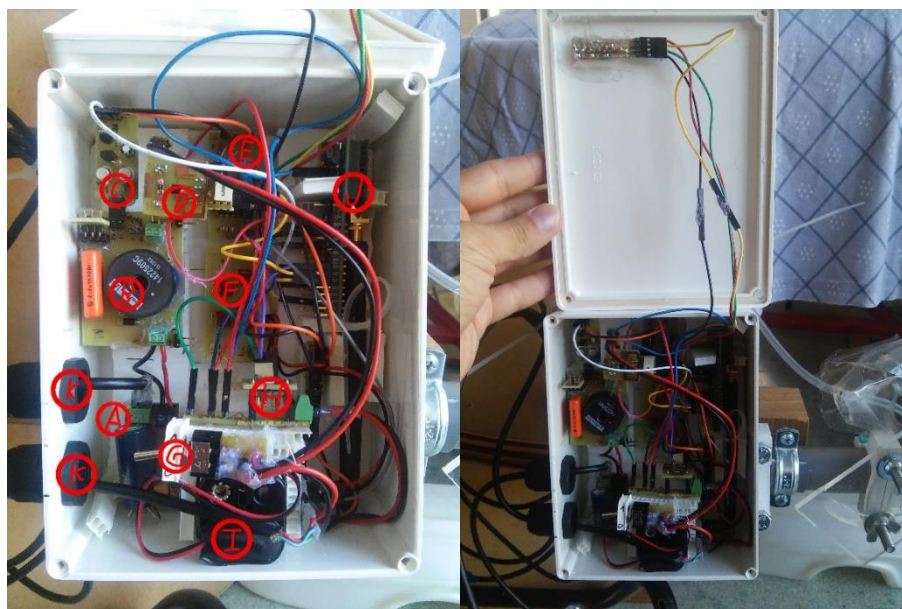


Figura 3.55 – Identificação dos componentes do nó sensor: (A) retificador, (B) conversor comutado, (C) *driver*, (D) sensor de corrente de entrada na bateria, (E) duplicador de tensão, (F) sensor de tensão, (G) interruptor de corte central, (H) sensor de corrente de saída da bateria, (I) bateria, (J) arduíno FIO e XBee, (K) retentor impermeável de cabos.

O fluxograma do código aplicado no nó sensor é apresentado na Figura 3.56. O código pode ser consultado no Anexo U.

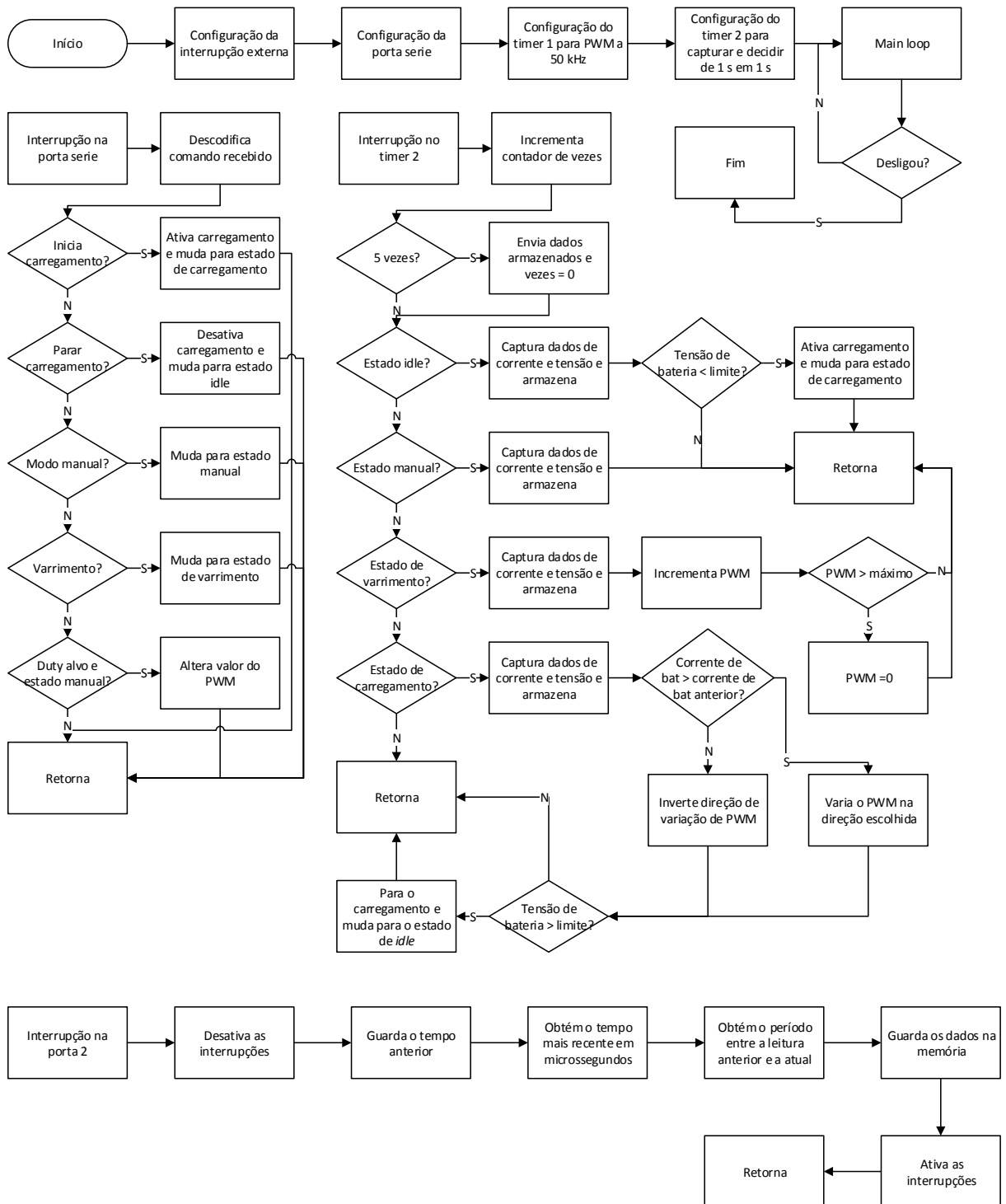


Figura 3.56 – Fluxograma do código do nó sensor.

3.11. Conclusão

Neste capítulo foram dimensionados os componentes relativos ao sistema final e ferramentas de teste. Foi decidido dimensionar o sistema de forma a atingir uma potência elétrica na ordem dos 500 mW.

O sistema de controlo central baseia-se na plataforma Arduino, permitindo uma grande flexibilidade de programação e controlo. Os sensores foram escolhidos para permitirem um controlo adequado e a obtenção de valores que permitissem observar o comportamento do sistema.

Para funcionar como carga do sistema de captação de energia foi escolhido um módulo XBee, funcionando como um nó de uma rede de sensores sem fios. Este módulo também serviu como mecanismo de transmissão de dados do sistema de teste.

Para permitir a máxima transferência de potência foi utilizado um regulador de tensão comutado do tipo Cük, que permite reduzir os efeitos de ruído eletromagnético do *ripple* da corrente de entrada e de saída. A alimentação da eletrónica, que funciona a 3,3 V, é feita através de um regulador linear presente na placa Arduino Fio. As baterias escolhidas são do tipo Ni-MH devido a serem relativamente baratas, comuns e resistentes a erros de carga.

Como a potência mecânica disponível é uma métrica importante, foi decidido implementar um sistema de medição portátil e de fácil montagem. Este foi baseado num sistema de medição de potência mecânica existente. Posteriormente foi melhorado para permitir a captura semiautomática dos valores e o seu registo num computador.

Foram implementados dois modelos de turbina, uma turbina *Propeller* para baixas quedas e grande caudal e uma turbina *Pelton* para grandes quedas e baixo caudal. Para o sistema *Propeller* foi usada uma turbina e um rolamento impermeável, utilizados em barcos de modelismo. Posteriormente foi calculada a queda necessária para se atingir a potência mecânica requerida. No caso do sistema *Pelton* foi decidido usar uma impressora 3D e dimensionar uma turbina usando as equações para grande escala, assumindo que estas funcionam adequadamente para a escala usada no trabalho. Foi decidido fabricar um conjunto de variantes do desenho, inicialmente concentradas em detalhes geométricos e posteriormente na influência do diâmetro da turbina. No total foram fabricadas 19 turbinas e 9 injetores com diferentes diâmetros.

Para converter a potência mecânica em potência elétrica foi dimensionado e fabricado um gerador trifásico com bobinas com núcleo de ar. Estes são fáceis de fabricar e não estão sujeitos a determinados fenómenos eletromagnéticos negativos. O fabrico do invólucro em plástico confere imunidade à corrosão. A retificação da onda trifásica foi feita com uma ponte trifásica passiva de díodos.

Para permitir testar o conjunto da turbina, gerador e retificador foi criada uma carga dinâmica, controlada remotamente, com a capacidade de captura dos valores de tensão, corrente e velocidade angular. Todos os dados foram capturados por uma interface gráfica semelhante à criada para o sistema de medição da potência mecânica.

4. Testes e resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados do estudo realizado com os sistemas de geração hídricos para pequena escala. De modo a aferir as características de cada componente do sistema, foram realizados testes em cada secção do mesmo. Para o sistema *Propeller* e para o sistema *Pelton* fizeram-se testes de potência mecânica e elétrica. A partir destes dados foi determinada a eficiência de cada mecanismo.

4.1. Potência mecânica do sistema *Propeller*

Com o sistema *Propeller* pretendia-se avaliar a eficiência do mesmo para diferentes caudais.

4.1.1. Condições de teste

O esquema de testes do sistema *Propeller* é apresentado em forma de diagrama na Figura 4.1. O tanque de captura é um recipiente paralelepípedo de plástico, modificado para funcionar como uma levada (B) e o tanque de saída (F) é um balde fundo, de forma a reduzir o efeito do impacto da corrente de água, que saia da tubagem de escape da turbina, com o fundo. Este conjunto foi montado em cima de um tanque de recuperação com uma capacidade de 1000 L (G). A água era reciclada usando uma bomba de água (H). Para as experiências de baixa queda esta tinha caudal suficiente para manter o sistema a funcionar de forma constante. Para maiores quedas era necessário o suplemento de água da rede. De modo a remover ao máximo as bolhas de ar e a turbulência criada pela bomba de recirculação de água e a inserção de água da rede foi usado outro recipiente paralelepípedo como tanque de estabilização (A). Para as experiências de baixa queda esta tinha caudal suficiente para manter o sistema a funcionar de forma constante. Para maiores quedas era necessário o suplemento de água da rede. De modo a remover ao máximo as bolhas de ar e a turbulência criada pela bomba de recirculação de água e a inserção de água da rede foi usado outro recipiente paralelepípedo como tanque de estabilização (A).

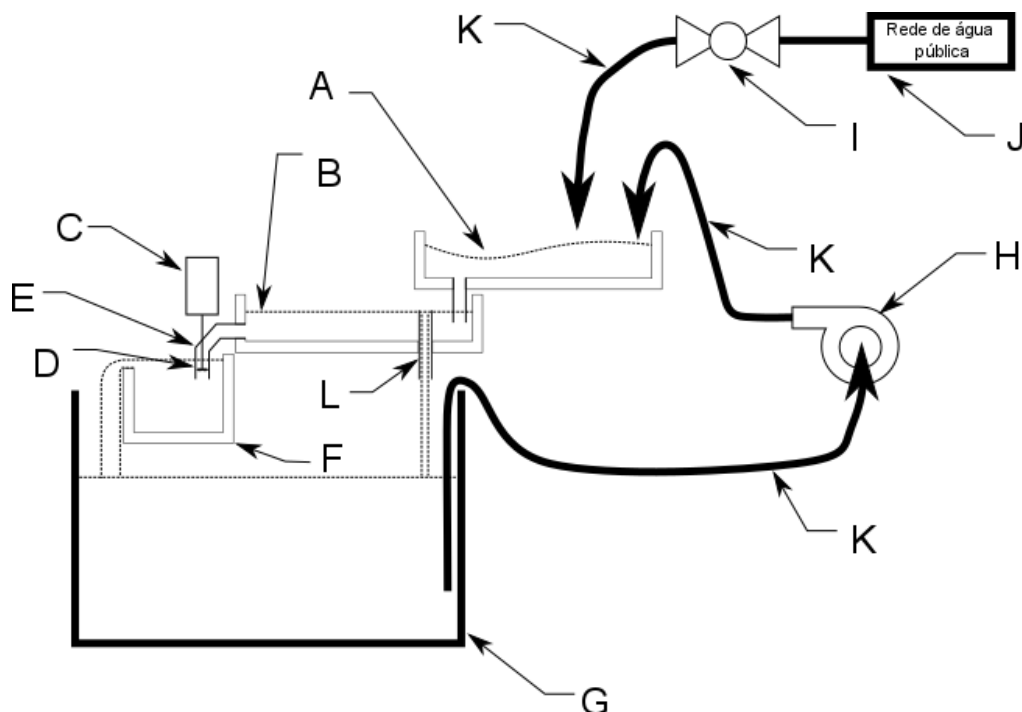


Figura 4.1 – Sistema de testes da turbina *Propeller*: (A) tanque de estabilização, (B) tanque de captura, (C) medidor de binário e potência mecânica, (D) turbina, (E) Conduta, (F) tanque de saída, (G) tanque de recuperação de água, (H) bomba de água, (I) válvula de bola, (J) fonte de água externa, (K) mangueiras rígidas, (L) tubo de escapatória.

É de notar que o nível máximo de água era garantido através do tubo de escapatória (L), e que a válvula (I) estava aberta no mínimo possível para manter o sistema em funcionamento constante. A bomba (H) estava a funcionar no seu máximo e as mangueiras (K) são sólidas de forma a impedir que colapsassem e mudem as condições de teste. Todas as imagens relativas a estes testes podem ser observadas no Anexo P.

Na Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4 são representados os testes efetuados com este sistema. Foram efetuados testes com 3 quedas diferentes, 10 cm, 20 cm e 30 cm, sem tubo de sucção, (a), com tubo de sucção direito, (b), e com tubo de sucção divergente, (c). Foi também medido o caudal presente em cada montagem sem a turbina presente.

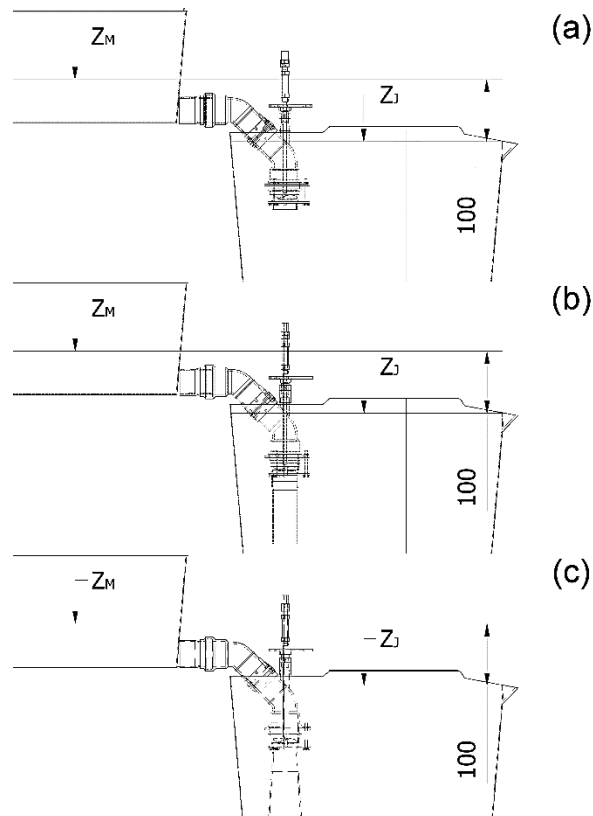


Figura 4.2 – Condições de medição do binário e da potência para uma queda bruta de 10 cm: a) sem tubo de sucção, b) com tubo de sucção direito, c) com tubo de sucção divergente.

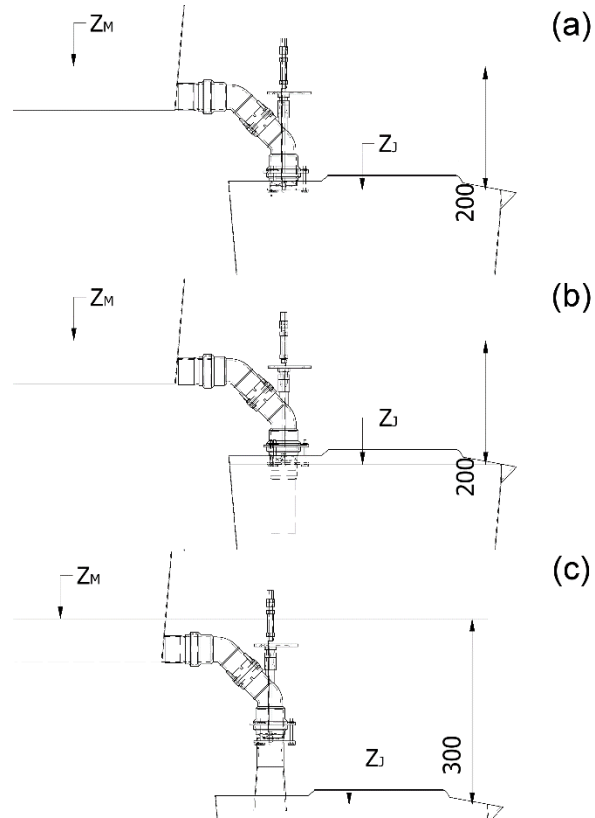


Figura 4.3- Condições de medição do binário e da potência para uma queda bruta de 20 cm: a) sem tubo de sucção, b) com tubo de sucção direito, c) com tubo de sucção divergente.

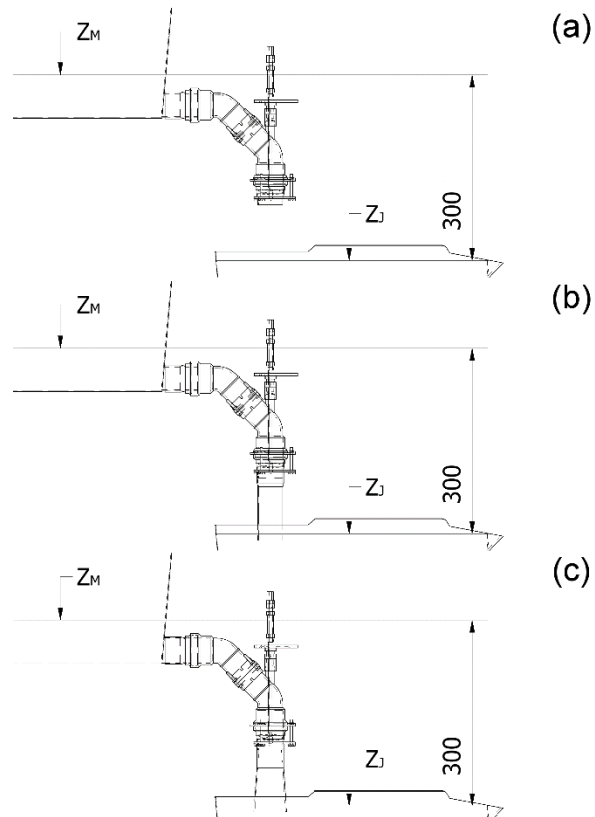


Figura 4.4 – Condições de medição do binário e da potência para uma queda bruta de 30 cm: a) sem tubo de sucção, b) com tubo de sucção direito, c) com tubo de sucção divergente.

O teste sem tubo com uma queda de 30 cm, Figura 4.4 (a), serviu para observar o efeito de se ter a saída fora de água.

No teste sem tubo com uma queda de 20 cm e nos testes com tubo divergente e tubo direito a 30 cm a saída da água encontrava-se praticamente ao nível da água a jusante.

A medição do binário da turbina foi feita usando o sistema de medição da potência mecânica antes deste ser convertido para o mecanismo semiautomático. Como os gráficos apresentavam uma dependência em relação à velocidade angular foi decidido aumentar a carga imposta à turbina progressivamente, e manualmente capturar o valor do binário sempre que a velocidade angular atingia um múltiplo inteiro de 2 Hz. A captura foi terminada quando a turbina para de rodar.

4.1.2. Perdas na tubagem

Os testes sem turbinas serviram para aferir as perdas efetivas na tubagem de forma a permitir calcular corretamente a queda útil. Estas experiências permitiram obter o fator β da tubagem, como indicado pela equação (2.32). Com esse valor foi possível obter, experimentalmente, a queda efetiva e determinar a eficiência da turbina. Os fatores β de cada montagem são indicados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Valores de β para o sistema.

Queda bruta	Sem bocal	Com bocal direito	Com bocal divergente
10 cm	117×10^3	116×10^3	95×10^3
20 cm	110×10^3	108×10^3	92×10^3
30 cm	291×10^3	107×10^3	96×10^3

É de notar uma coerência destes resultados para diferentes quedas, com a exceção da queda sem bocal a 30 cm. Nesse caso, o sistema estava sujeito a uma queda bruta diferente. Usando os valores anteriores obteve-se, usando a equação (2.33), uma queda bruta de 12 cm, um resultado bastante inferior à diferença de altura entre o nível da água a montante e a saída da água do sistema. Consequentemente, para este caso particular, concluiu-se que as equações para o cálculo das perdas na conduta não funcionam e como tal não podem ser calculadas nem a altura efetiva nem e a eficiência da turbina.

4.1.3. Análise dos resultados

A Figura 4.5 apresenta as curvas de potência e de binário para o sistema, testado com um bocal reto e uma queda de 10 cm. Todos os gráficos relativos aos dados capturados estão disponíveis no Anexo O.

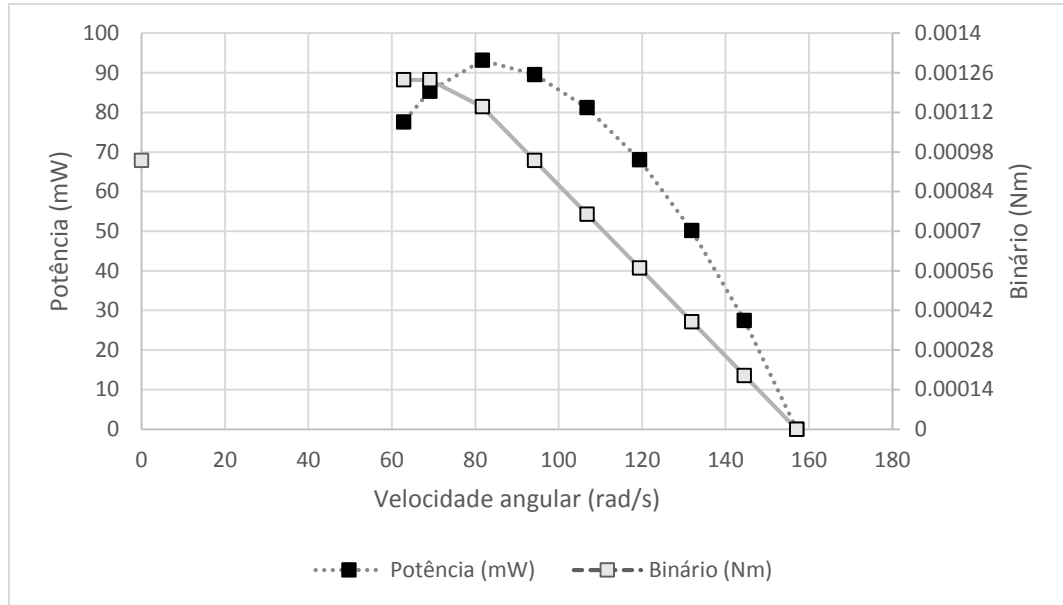


Figura 4.5 – Resultados para uma queda bruta de 10 cm sem bocal.

É de notar que a partir do momento que a curva de binário chega ao topo o sistema para rapidamente, ou seja, a partir desse momento a potência disponível cai rapidamente para zero. Por este motivo, a curva a partir desse ponto é de difícil captura usando o sistema de captura de binário em modo manual. O último ponto capturado, a zero rotações por segundo, é o binário de bloqueio.

A queda rápida no binário deve-se ao efeito de perda de sustentação, devido à separação do fluxo de água da superfície da hélice a jusante [29] [53].

Os gráficos das potências são apresentadas na Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8 agrupados por montagem.

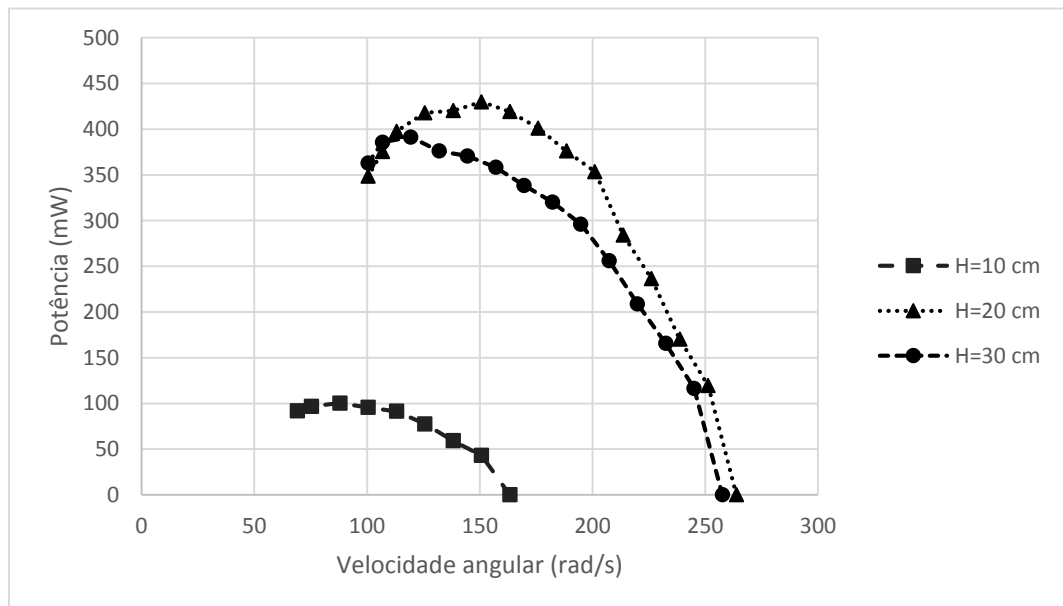


Figura 4.6 – Resultados para as montagens sem bocal.

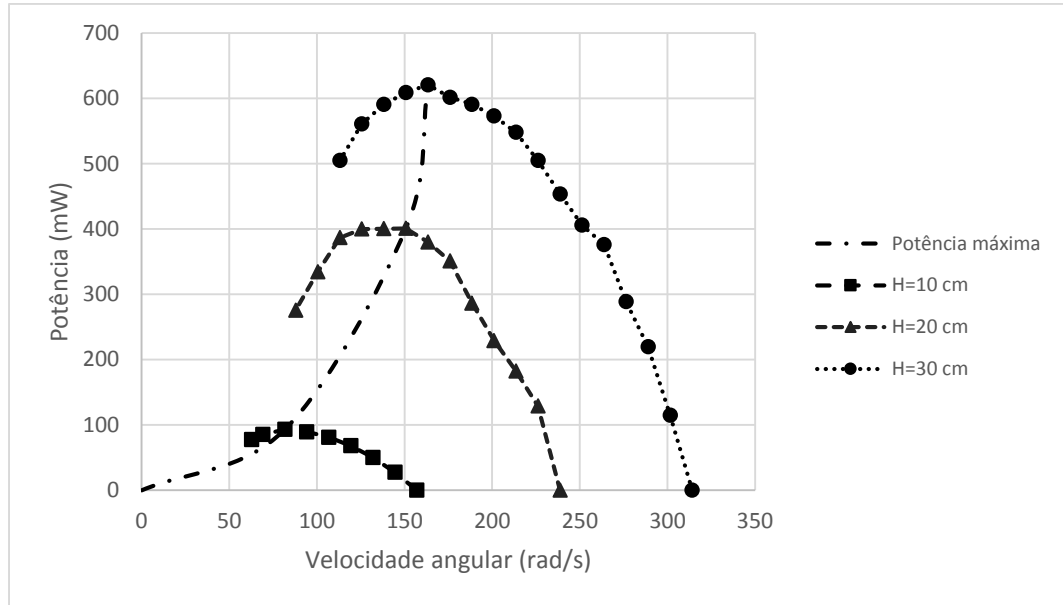


Figura 4.7 – Resultados para as montagens com bocal reto.

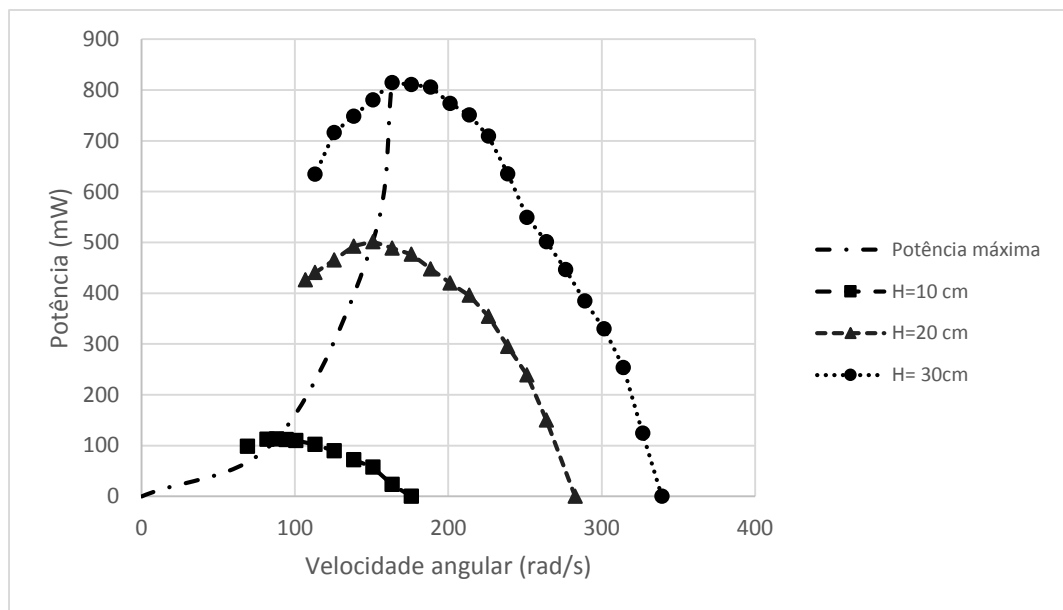


Figura 4.8 – Resultados para as montagens com bocal divergente.

Nos gráficos do sistema com bocal divergente e com bocal reto é adicionada uma linha para ligar os valores de potência máxima. É de notar que estes seguem uma curva que se assemelha a uma exponencial. Isto era esperado visto que dois dos termos da equação de potência, equação (2.13), são proporcionais à queda, nomeadamente o termo H (a queda) e Q (o caudal que é dependente da velocidade v que, por sua vez, depende de H através de (2.27)).

Para comparar melhor o desempenho dos sistemas foram elaborados gráficos em que estes estão agrupados por queda. Estes são apresentados na Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11.

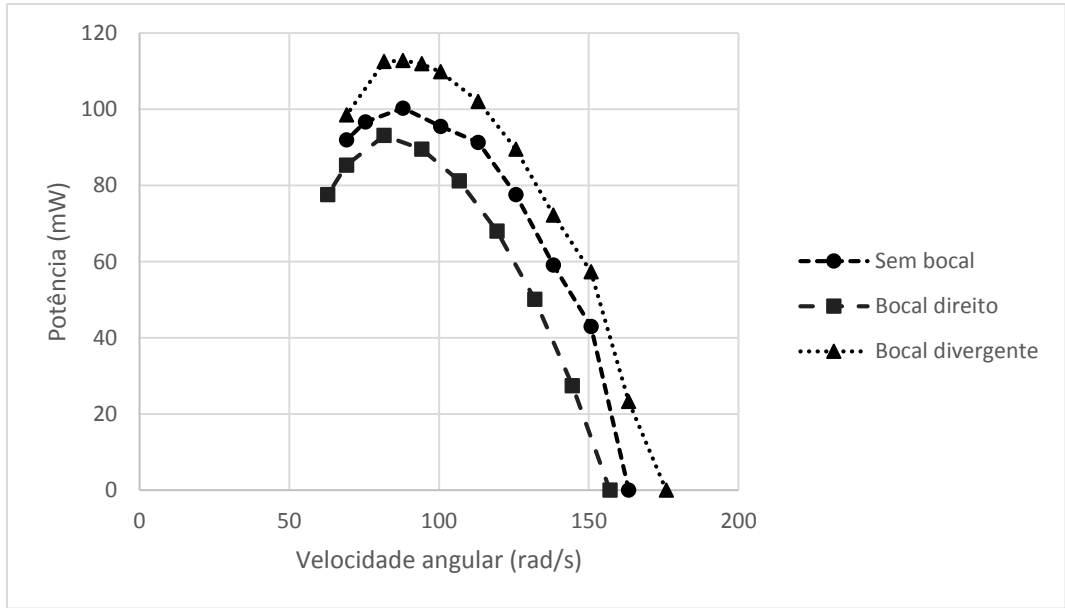


Figura 4.9 – Resultados para os sistemas com uma queda bruta de 10 cm.

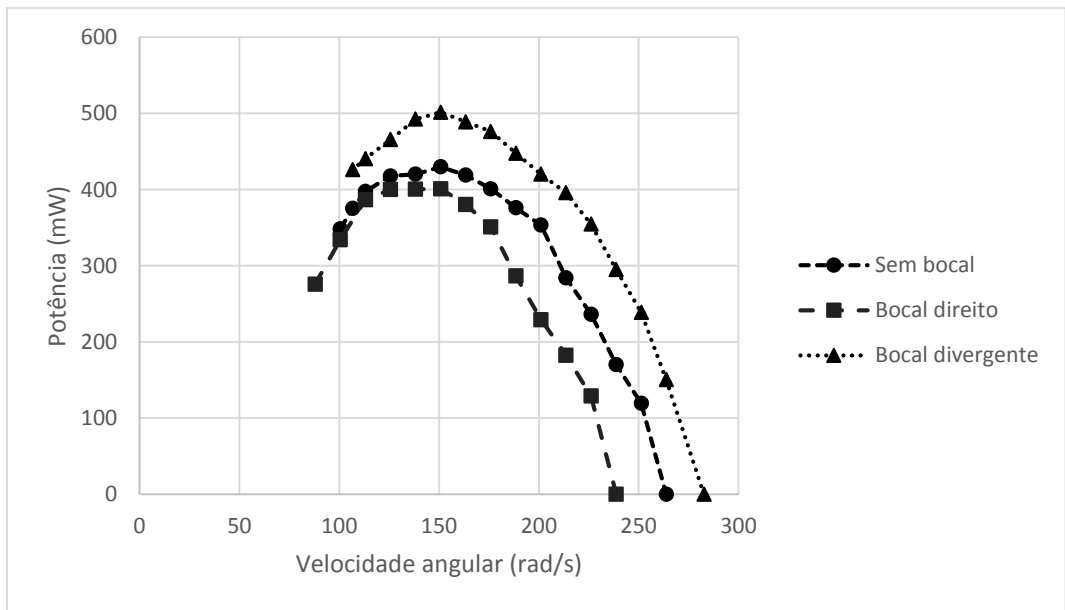


Figura 4.10 – Resultados para os sistemas com uma queda bruta de 20 cm.

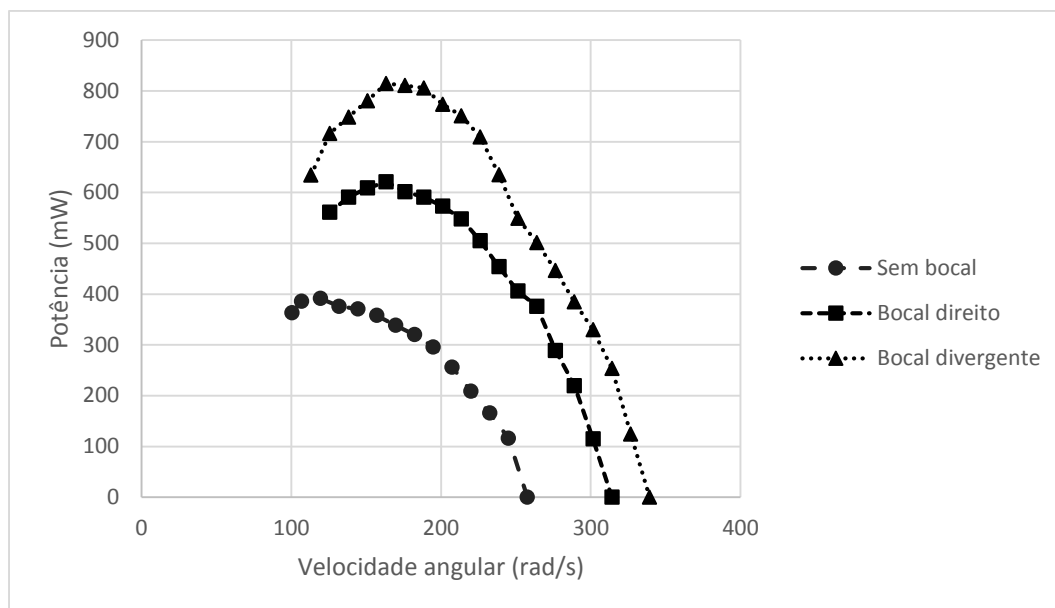


Figura 4.11 – Resultados para os sistemas com uma queda bruta de 30 cm.

A partir destes resultados chegou-se à conclusão que ter mais tubagem no percurso adiciona mais perdas de queda e diminui a potência captável, sendo que o tubo de vácuo divergente aumenta a eficiência geral do sistema para todas as quedas. No entanto, é importante que nestes sistemas não ocorra uma descarga descontrolada, como ocorre com o sistema sem bocal para uma queda de 30 cm.

Caso só seja possível uma descarga fora da água pode ser esperada uma potência semelhante ou inferior à obtida caso a marca piezométrica a jusante se encontrasse ao nível da saída da água do sistema.

Foi medido o caudal usando o método de balde e cronómetro. Neste, um volume de teste foi colocado no percurso do jato e é obtido o tempo até este encher. O teste foi repetido várias vezes e o tempo médio foi registado. O caudal foi determinado dividindo o volume de teste pelo tempo de enchimento [39]. No ponto de máxima potência, no ponto de máxima rotação e com a turbina completamente parada, foi observado que o caudal era afetado. O caudal menor ocorria na situação em que era extraída a máxima potência do sistema. Para diferentes caudais tinha-se perdas e quedas efetivas diferentes, variando também a potência disponível. Desta forma, a apresentação de curvas de eficiência implicava também a medição do caudal para todos os pontos. Como tal, na Tabela 4-2 são somente apresentadas as eficiências da turbina quando estava a funcionar em situação de máxima potência. Estes valores são relativos à potência disponível com a queda útil presente.

Tabela 4-2 – Eficiências da turbina no ponto de máxima transferência de potência.

	Sem bocal	Com bocal direito	Com bocal divergente
10 cm	43,4%	37,3%	38,4%
20 cm	60,7%	54,3%	62,3%
30 cm	Não disponível	40,9%	56,0%

Para apresentar as curvas de eficiência para as várias situações de carga seria necessário um medidor de caudal com medição contínua.

É de notar que a eficiência máxima da turbina ocorria para um ponto na ordem dos 20 cm de queda bruta e era praticamente independente da montagem. A geometria da conduta e o formato do bocal influenciavam, principalmente, a queda útil e, conseqüentemente, a potência capturada.

Um detalhe fundamental a ter em conta com este sistema é a entrada de ar na conduta devido à pressão negativa a que este está sujeito. Refira-se que inicialmente existia um espaço muito pequeno entre o eixo e o apertador do eixo, através do qual entravam bolhas de ar que impediam o bom funcionamento da hélice. Esse espaço foi preenchido com silicone e o apertador foi fixado ao eixo.

Note-se também que ter uma altura de água acima da tubagem de captura. A partir do momento que ocorra um abaixamento do nível, como representado na Figura 4.12, o sistema irá admitir ar e parar de funcionar até que o ar seja expelido pelo fundo. Isto ocorre porque o ar não fica preso na conduta, devido ao grande caudal presente, e é forçado para a saída. Este fenómeno é representado na Figura 4.12.



Figura 4.12 – Entrada de ar no sistema e o sistema a descartar as bolhas de ar.

É representado na Figura 4.13 o sistema a funcionar corretamente com uma saída sem bolhas de ar.



Figura 4.13 – Sistema a funcionar em pleno.

4.2. Potência mecânica do sistema *Pelton*

Para o sistema *Pelton* pretendeu-se avaliar a eficiência do sistema com diferentes injetores.

4.2.1. Condições de teste

O esquema de teste do sistema *Pelton* está representado na Figura 4.14. Como o teste deste sistema requeria muito pouco caudal e uma queda elevada, reciclar a água com a bomba usada nos testes anteriores tornou-se muito pouco prático e pouco eficiente. Como tal, foi decidido usar um recipiente, (G), cujo nível era mantido através de uma válvula de boia alimentada pela rede de água, (A). O tanque de compensação, (D), é uma garrafa de água transparente com o fundo cortado e um gargalo que encaixava na tubagem. Foi observado que este tinha a capacidade de manter o sistema livre de bolhas e compensar rapidamente os efeitos de abertura e fecho da válvula de controlo manual, representada por (K). A queda bruta, (E), foi de 4,27 m em todos os testes. A turbina sob teste, (I), era movimentada por um jato formado pelo injetor (F). A energia mecânica era transmitida para o medidor de binário e de potência (H).

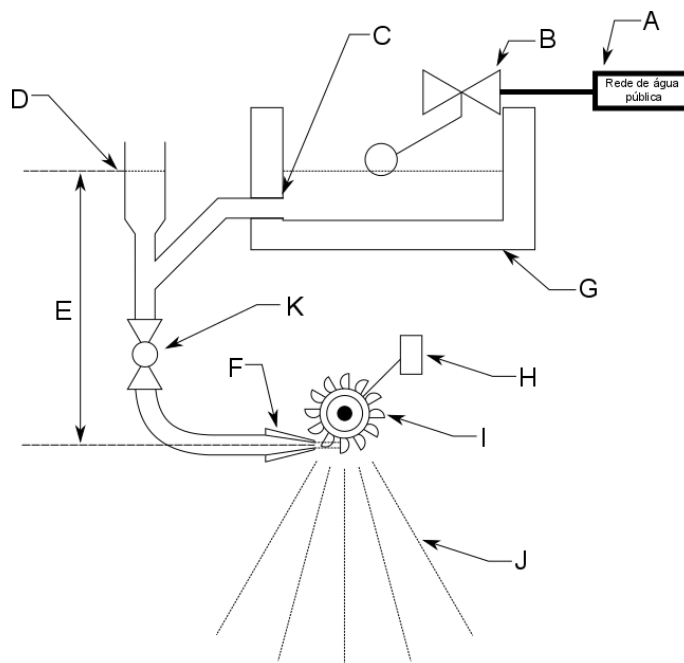


Figura 4.14 – Sistema de teste das turbinas *Pelton*: (A) fonte de água externa, (B) válvula de boia, (C) captura em aresta viva, (D) tanque de compensação, (E) queda bruta, (F) injetor, (G) tanque de captura, (H) medidor de binário de potência mecânica, (I) turbina, (J) saída de água, (K) válvula de bola.

Na medição de binário deste sistema foi usado o método semiautomático, como apresentado na secção 3.6.

Foi efetuada uma sequência de testes, com todas as turbinas criadas, com o injetor com o diâmetro mais próximo do valor calculado, neste caso o injetor 3A (Tabela 3-2). Posteriormente foram testados mais 3 injetores de diâmetros superiores, nomeadamente, os injetores 4, 5 e 7.

A qualidade dos jatos foi observada visualmente. Estes apresentavam uma boa coerência, mas com algum enevoamento. Isto implicava turbulência que podia dever-se principalmente ao acabamento interior do injetor. No entanto, foi também observado que o jato se mantinha coerente a uma distância superior a 1 m. Tendo em conta que a distância horizontal entre o injetor e a turbina era da ordem dos 2 centímetros considera-se que o jato era suficientemente

coerente para ser usado nesta aplicação. As fotografias destes testes podem ser consultadas no Anexo Q.

O diâmetro real dos injetores foi determinado experimentalmente através do caudal e da velocidade. Para determinar o caudal foi usada a técnica do balde e do cronómetro. A velocidade do jato foi determinada através da distância horizontal que este percorria, quando projetado na horizontal, através das equações de trajetória de projeteis [54]. As grandezas medidas estão representadas na Figura 4.15.

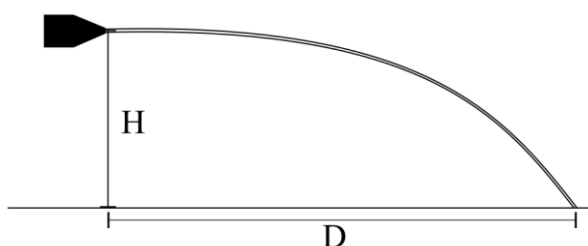


Figura 4.15 – Medição de velocidade do jato.

A velocidade do jato é dada por:

$$V_{jato} = \frac{D}{\sqrt{\frac{2H}{g}}} \quad (4.1)$$

O diâmetro interno real do jato foi obtido dividindo o caudal medido pela velocidade calculada. A queda bruta foi medida fisicamente com uma fita métrica enquanto a queda efetiva foi calculada manipulando a equação (2.19). A potência disponível foi calculada em função do caudal e da queda efetiva através da equação (2.13).

Todos os valores calculados são apresentados, para cada injetor, na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 – Características reais dos injetores.

Injetor	Diâmetro interno por desenho (mm)	Diâmetro interno real (mm)	Queda bruta (m)	Queda efetiva (m)	Caudal (m ³ /s)	Potência disponível (mW)
1	1	0,74	4,27	1,55	0,0000024	36,0
2	1,5	1,248	4,27	3,01	0,0000094	277,8
3	2	1,89	4,27	3,29	0,0000226	727,6
3A	2,1	2,14	4,27	3,69	0,0000305	1103,3
4	2,5	2,29	4,27	3,69	0,0000349	1261,3
5	3	2,92	4,27	3,69	0,0000568	2052,5
6	3,5	3,34	4,27	3,69	0,0000745	2692,2
7	4	3,99	4,27	3,61	0,0001056	3734,8
8	4,5	4,63	4,27	3,55	0,0001405	4892,5

Na Figura 4.16 é apresentado um exemplo dos gráficos de potência obtidos com todas as turbinas de menor diâmetro e com o injetor 3A. É de notar a grande variação dos resultados obtidos ao variarem-se algumas das características geométricas das turbinas.

Todos os gráficos relativos aos resultados podem ser consultados no Anexo R.

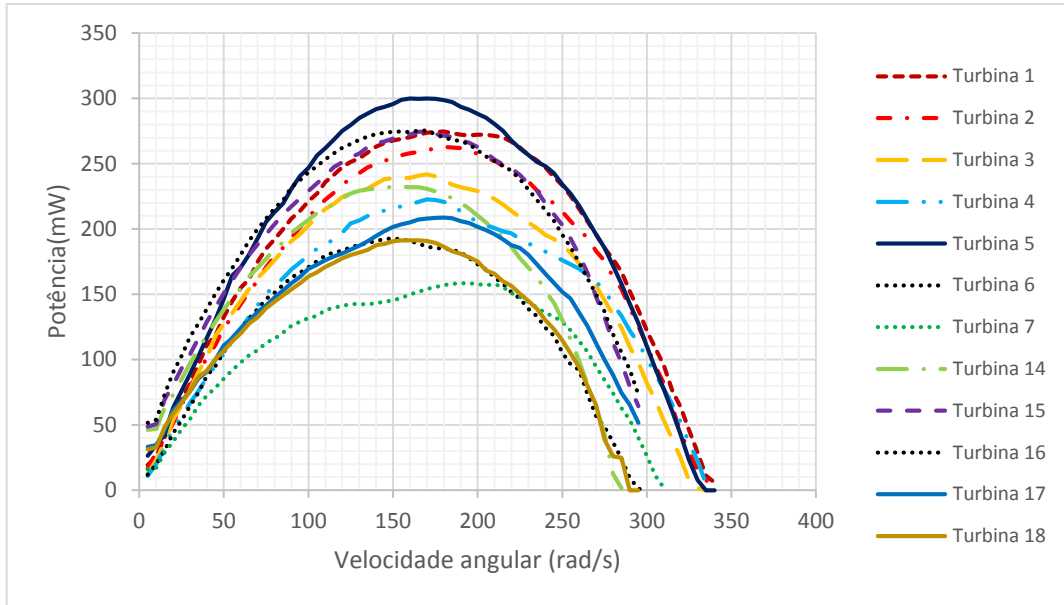


Figura 4.16 – Potência para as várias turbinas com o injetor 3A.

4.2.2. Comportamento da água ejetada

Durante os testes foi possível observar em alguns dos sistemas os vários pontos de funcionamento. Quando a carga no eixo era nula muita da água projetada pelo injetor seguia em frente como se a turbina não estivesse lá. À medida que a carga era imposta sobre o eixo a água ejetada das turbinas com divisória dividia-se em dois jatos que se deslocavam na direção do jato principal até atingirem trajetórias paralelas ao eixo da turbina. Neste ponto ocorria o máximo ponto de transferência. Aplicando mais carga fazia com que os jatos de saída se deslocassem mais na direção do injetor. Quando a turbina era parada a água descartada percorria duas trajetórias iguais ao ângulo de saída das colheres. Estes fenômenos estão representados na Figura 4.17.

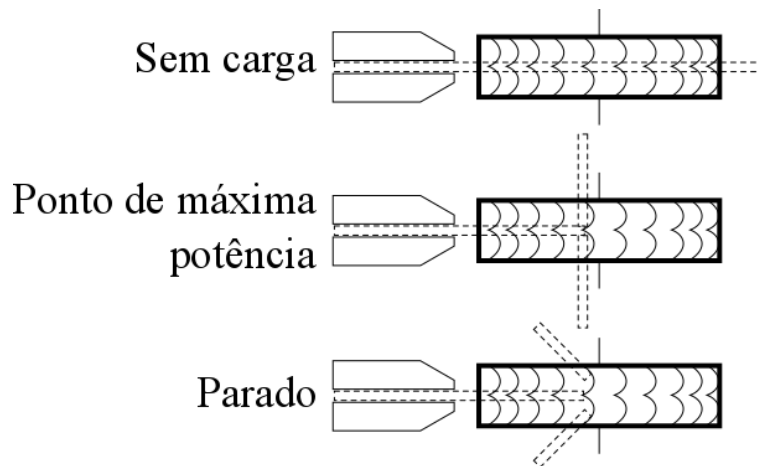


Figura 4.17 – Efeito da carga no ângulo de saída da água.

4.2.3. Análise dos resultados

A Figura 4.18 apresenta as curvas de potência relativas à turbina com a qual foi tido algum cuidado com o acabamento da superfície, indicada como turbina tratada, e uma turbina idêntica em que não houve esse cuidado, indicada como turbina não tratada.

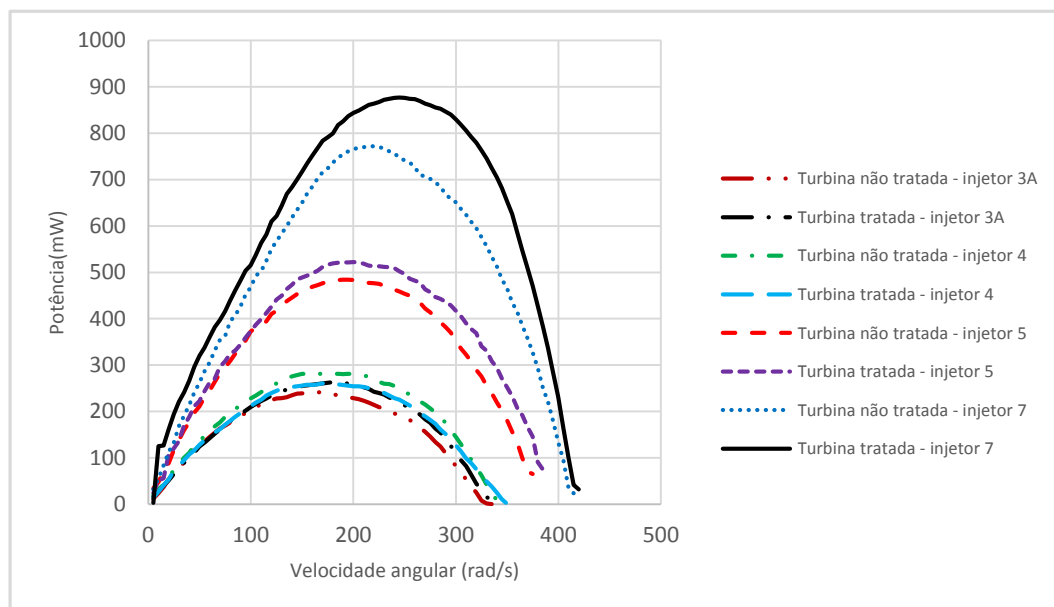


Figura 4.18 – Resultados dos ensaios com uma turbina com tratamento e uma turbina sem tratamento.

Do gráfico é possível concluir que o cuidado com a qualidade de superfície aumenta a potência captada e, conseqüentemente, a eficiência.

A Figura 4.19 apresenta os efeitos da supressão da divisória central das colheres da turbina.

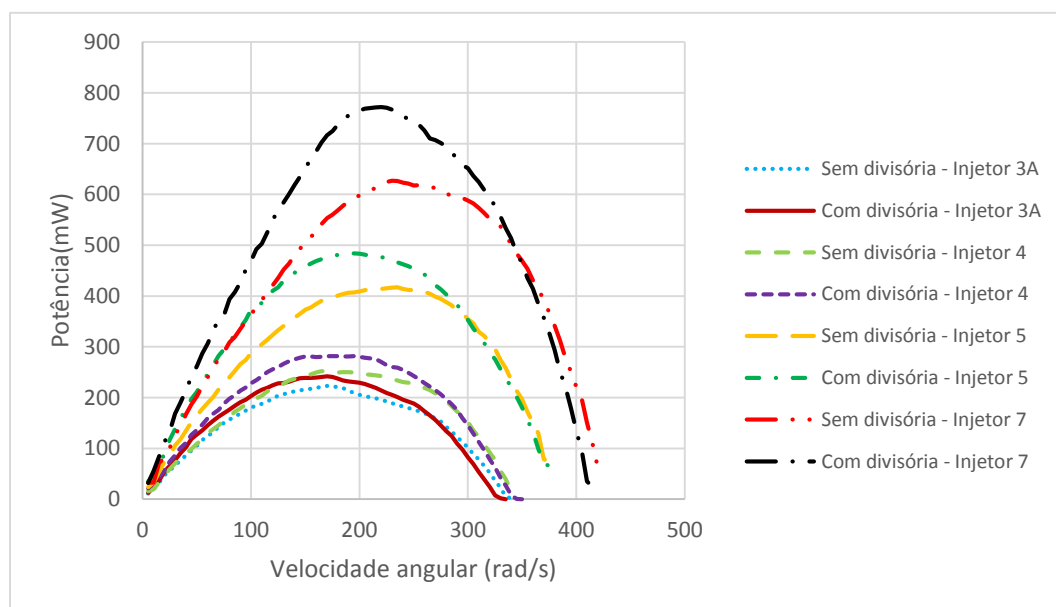


Figura 4.19 – Resultados com e sem divisória central.

A Figura 4.19 permitiu concluir que a divisória central tem um papel importante. Incorporar um separador de jato melhora a forma da curva de potência, que fica mais

arredondada e centrada no ponto esperado, a metade da velocidade do jato. É de notar que em todas as situações os sistemas sem divisórias tinham o seu pico de potência para rotações mais elevadas. Outro detalhe peculiar é a existência de instabilidade no topo da curva, facilmente visível na curva do injetor 3A na turbina sem divisória. Durante os testes preliminares com o sistema de captura manual foi notado que era muito difícil manter manualmente esse ponto de operação.

Na bibliografia são encontradas sempre turbinas de grande escala com mais de vinte pás e a equação de dimensionamento (2.18) indica que esse número tem que ser no mínimo 15. No entanto, segundo a Figura 4.20, esse não é o caso em sistemas de pequena escala. As turbinas com menos pás apresentaram melhores resultados. Pensa-se que os efeitos viscosos da água a esta escala são suficientemente relevantes para reduzirem a eficiência do sistema quando este não tem espaço entre os baldes para escoar a água.

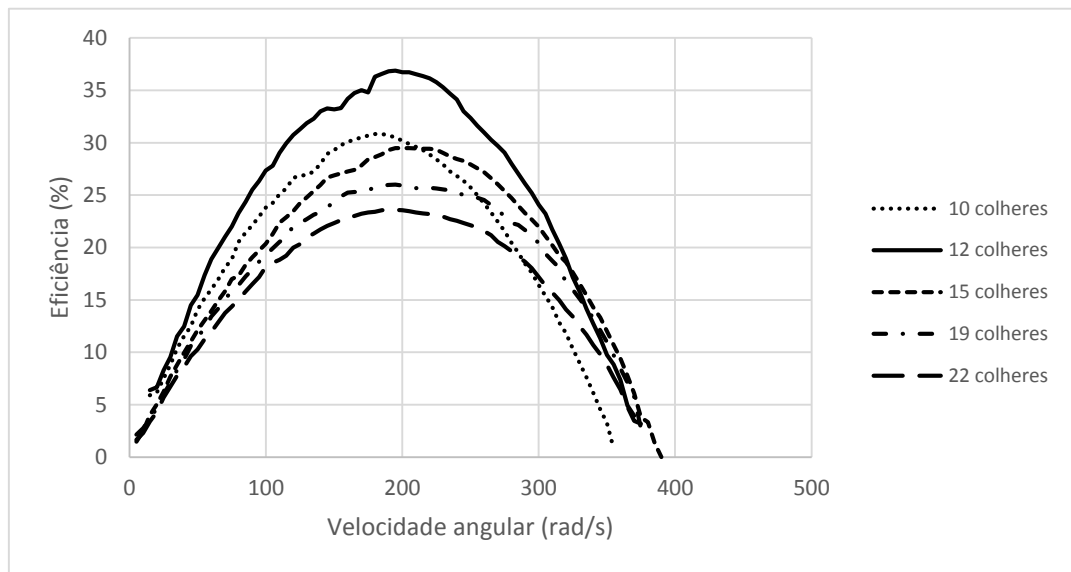


Figura 4.20 – Resultados da variação da eficiência em relação ao número de colheres.

Para 3 dos injetores testados o número ótimo de colheres foi de 12, como observado na Figura 4.21. Abaixo deste valor parte do jato era desperdiçado no espaço entre duas colheres.

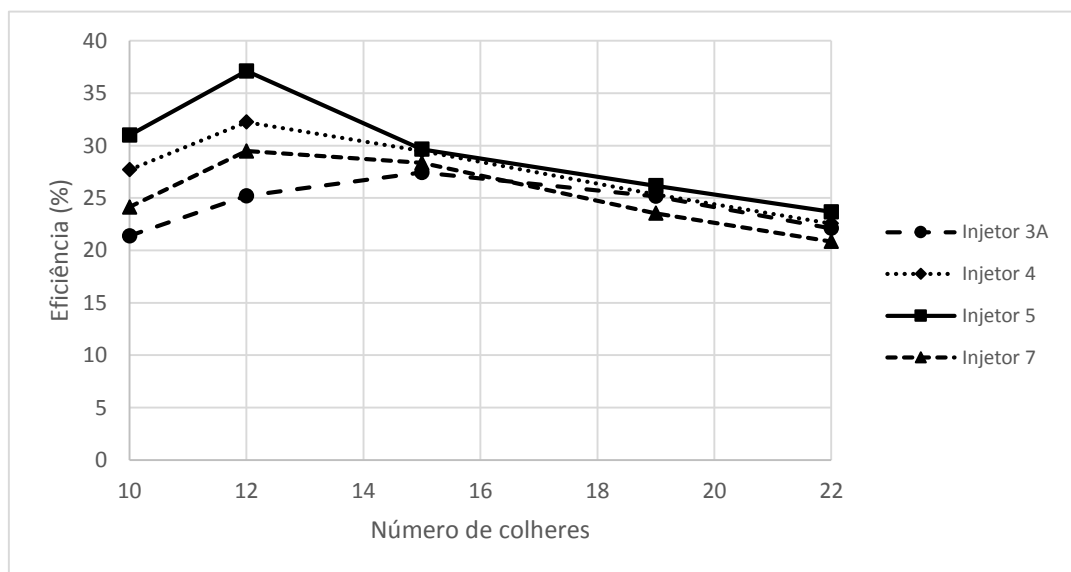


Figura 4.21 – Influência do número de colheres na eficiência.

É possível observar nos gráficos quando uma turbina começava a entrar em choque de entrada. Quando a curva da potência deixa de ser simétrica e tende para o lado direito, lado das altas rotações, começa a aparecer este fenômeno. Isto é claramente notório nos gráficos da turbina 7 na Figura 4.22.

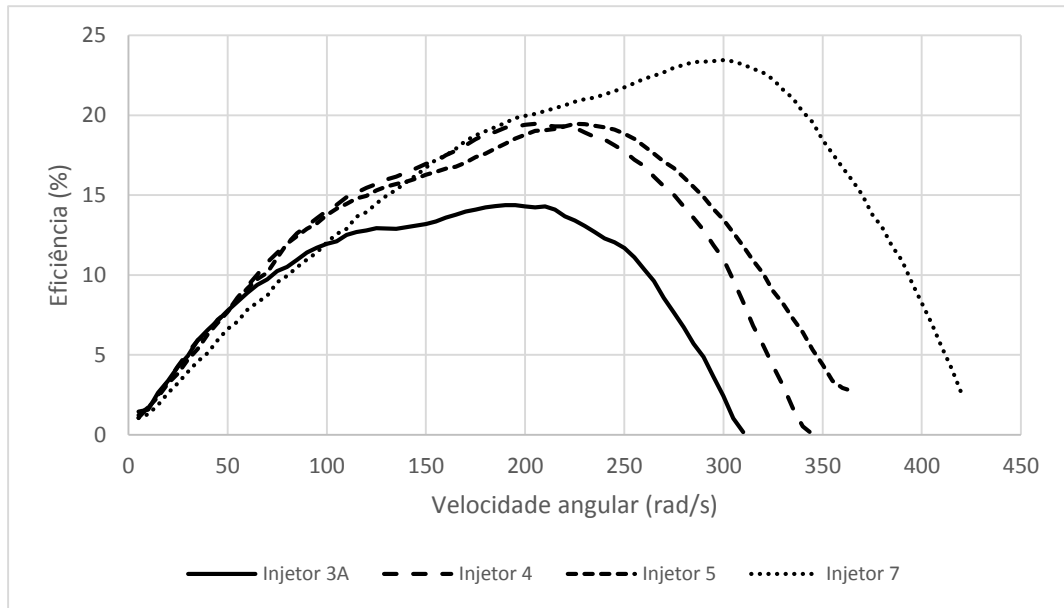


Figura 4.22 – Eficiência da turbina 7.

Na Figura 4.23 estão representadas as curvas de binário da turbina 7 e da turbina 5 com o injetor 5. Nestas é fácil notar os efeitos do choque de entrada. A turbina 5 tem uma curva de binário que aparenta uma reta, enquanto a curva da turbina 7 apresenta alguma ondulação.

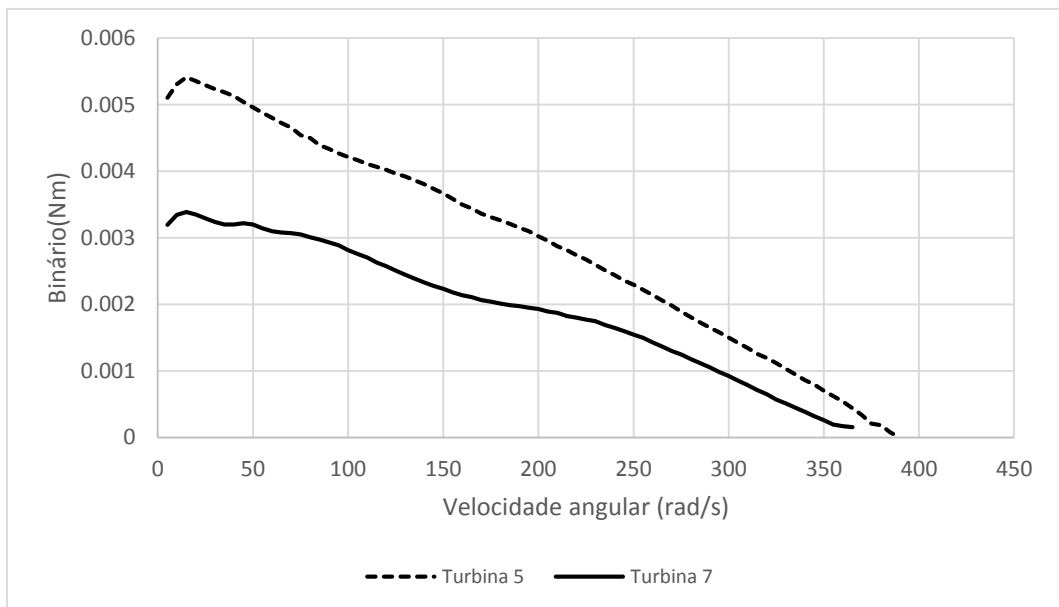


Figura 4.23 – Comparação da forma da curva de binário.

Segundo os gráficos de eficiência das turbinas com divisória central, como, por exemplo, o mostrado na Figura 4.24, um jato ligeiramente sobredimensionado melhora a eficiência. Um grande aumento faz perder eficiência pois torna-se difícil escoar a quantidade de água que lhe é projetada.

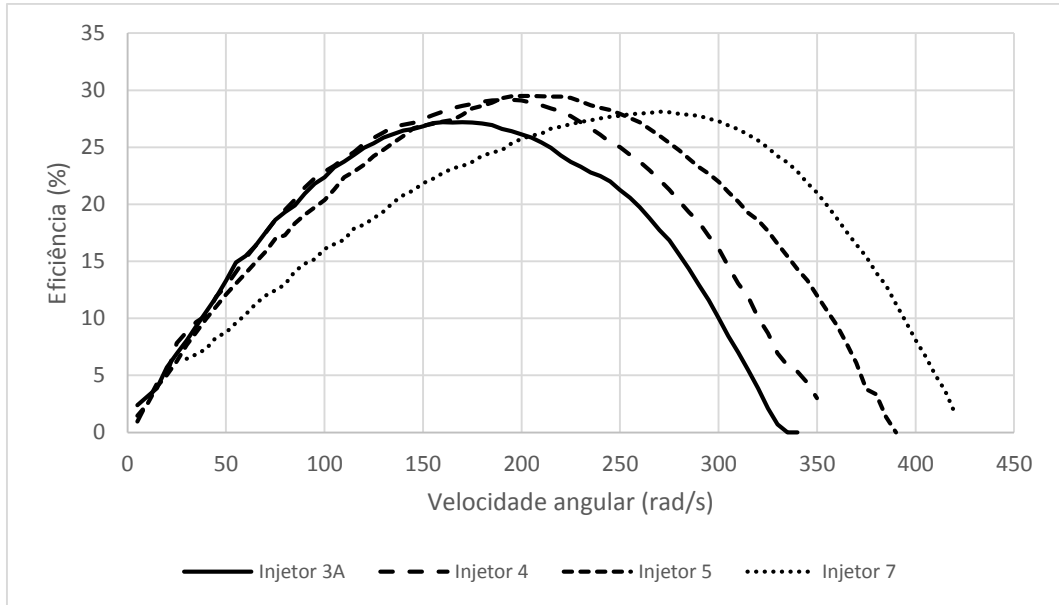


Figura 4.24 – Eficiência da turbina 5.

Comparando a Figura 4.22 e a Figura 4.24 há um outro detalhe a observar. A eficiência da turbina 5 tem um pico nos 29% e depois baixa com um jato de diâmetro superior. No entanto, a turbina 7, que estava sujeita completamente a choque de entrada, ainda não chegou ao seu limite de eficiência, podendo até apresentar eficiências superiores com um jato de diâmetro superior, à custa de um maior consumo de água.

Nos testes relativos à dependência da eficiência em relação à dimensão, usando a turbina 8, turbina 15 e a turbina A, muito semelhantes entre si em número de colheres e geometria, foi observado que quanto maior era o diâmetro da roda mais eficiente era a turbina. Isto é observado na Figura 4.25.

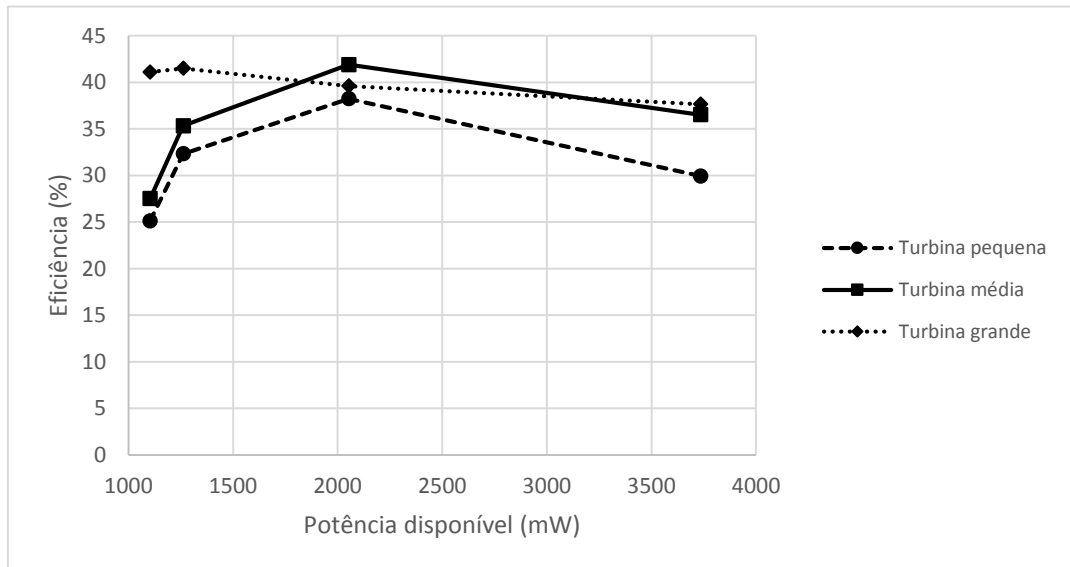


Figura 4.25 – Influência da dimensão e potência disponível na eficiência.

As curvas são apresentadas em função da potência disponível, a qual é dependente da queda e do caudal presente no injetor.

O que também pode ser notado é que com o aumento do diâmetro da turbina era reduzida a velocidade angular em aberto, e o ponto de máxima transferência de potência ocorria para velocidades mais baixas, como é observado na Figura 4.26. Pelo que se concluiu que é importante adequar a turbina ao gerador ou vice-versa.

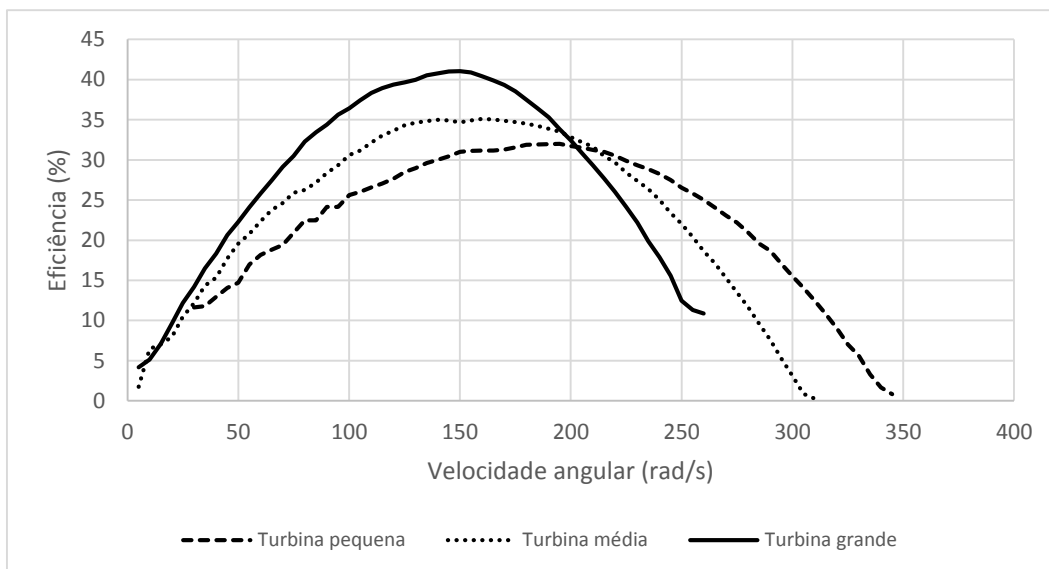


Figura 4.26 – Influência da dimensão na eficiência.

Na maioria dos desenhos de turbinas *Pelton* de grande escala é observado um ângulo entre as colheres e o raio da turbina. Este ângulo é exemplificado na Figura 3.36, usando as turbinas impressas. Nos testes para averiguar a influência desta característica de desenho em sistemas de pequena escala foi observado que o avanço resultante deste ângulo era prejudicial à eficiência da turbina. Essa influência é observada na Figura 4.27, Figura 4.28 e Figura 4.29.

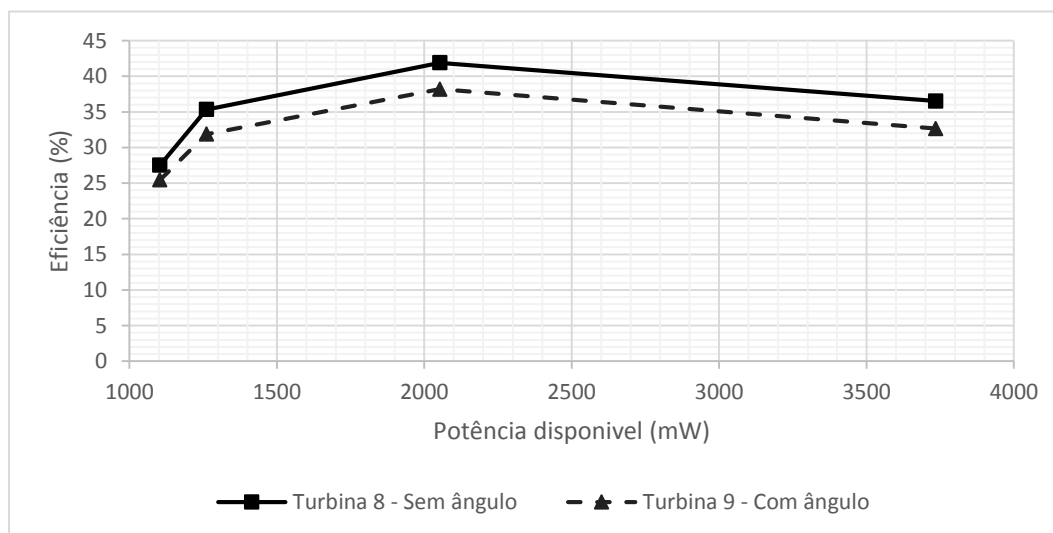


Figura 4.27 – Efeito do ângulo na turbina 8 e 9.

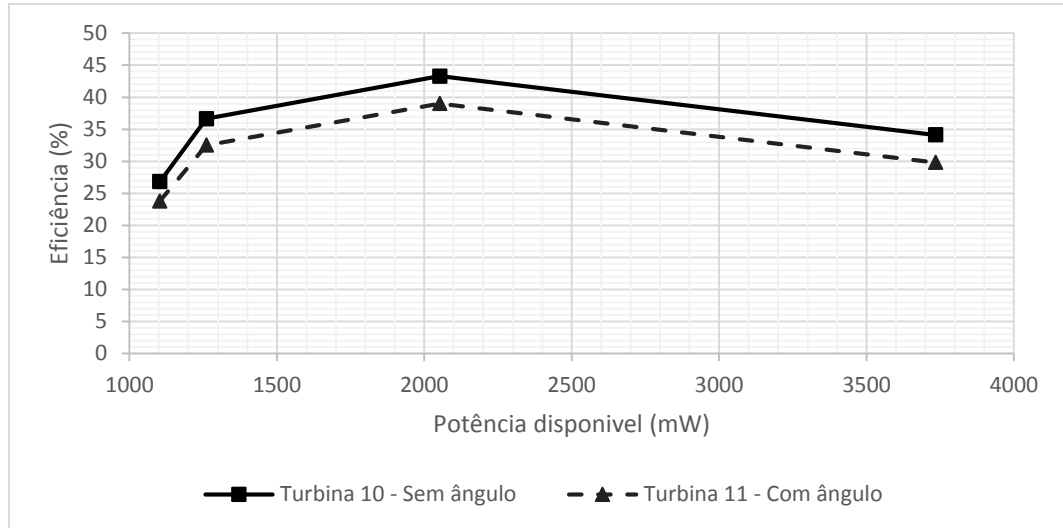


Figura 4.28 – Efeito do ângulo na turbina 10 e 11.

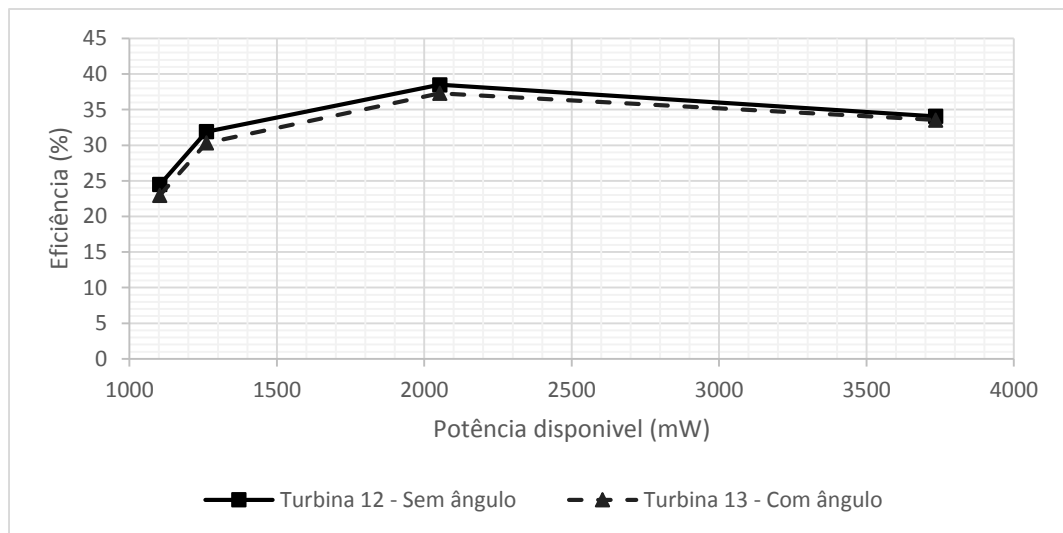


Figura 4.29 – Efeito do ângulo na turbina 12 e 13.

Em virtude dos resultados presentes no Anexo R foi ainda possível concluir que o teste da turbina 7, com pás planas localizadas perto do eixo, em relação à turbina 7 invertida revelou que a orientação não influenciava substancialmente os resultados.

Foi também observado que no teste da turbina 6, com pás planas avançadas relativamente às da turbina 7, revelou ser uma turbina relativamente adequada para cargas em baixas rotações, cuja eficiência máxima rivaliza com outras turbinas com geometrias mais elaboradas.

Em termos de superfície de impacto do jato as turbinas 6 e 7 são iguais. Onde estas divergem é no avanço da pá, ou seja, a superfície de impacto da turbina 6 está mais próxima do injetor do que a superfície da turbina 7. Isto leva a crer que a maior parte do trabalho do jato nas turbinas com divisória central ocorre de forma distribuída ao longo da profundidade desta.

4.3. Comparações entre os dois sistemas

De modo a comparar os dois sistemas foi escolhido o mais eficiente entre estes e entre cada escala de turbina e foi elaborado um gráfico, presente na Figura 4.30. É de notar que a curva do sistema *Propeller* é uma aproximação pelas razões apresentadas anteriormente.

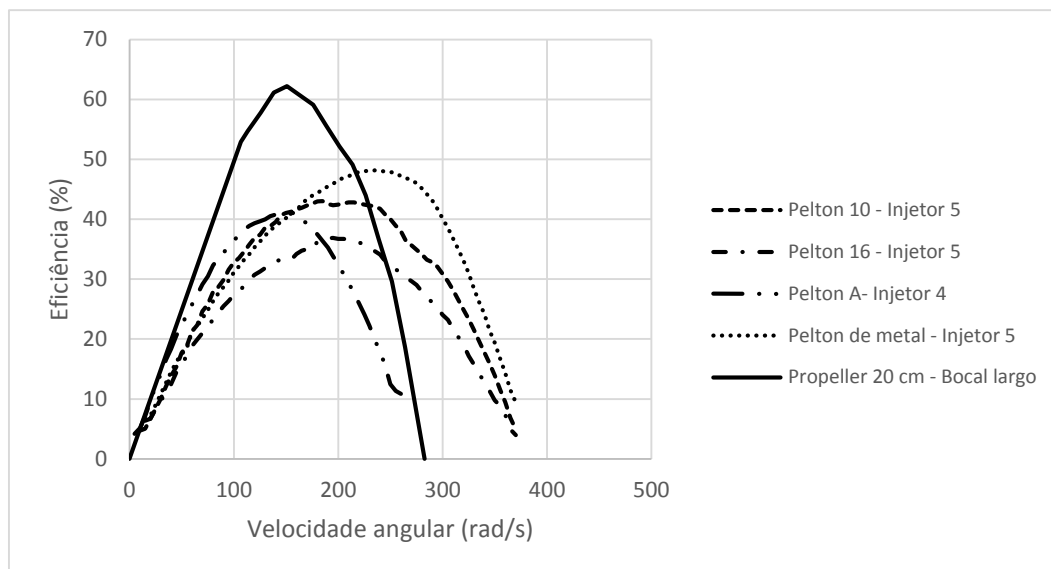


Figura 4.30 – Comparação entre as turbinas *Pelton* e a turbina *Propeller*.

O sistema *Pelton* tende a ter uma curva de eficiência mais larga e mais estável. O sistema *Propeller* embora tenha uma eficiência superior perde muito em termos de gama útil de potência.

4.4. Gerador elétrico e retificador

As formas de onda das fases do gerador são apresentadas na Figura 4.31.

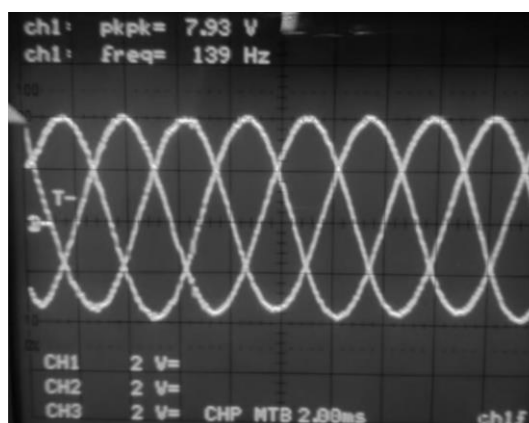


Figura 4.31 – Forma de onda da saída trifásica do gerador.

A tensão em aberto à saída do retificador foi medida para várias velocidades de rotação e os resultados são apresentados na Figura 4.32. É de notar a dependência linear da tensão relativamente à velocidade angular.

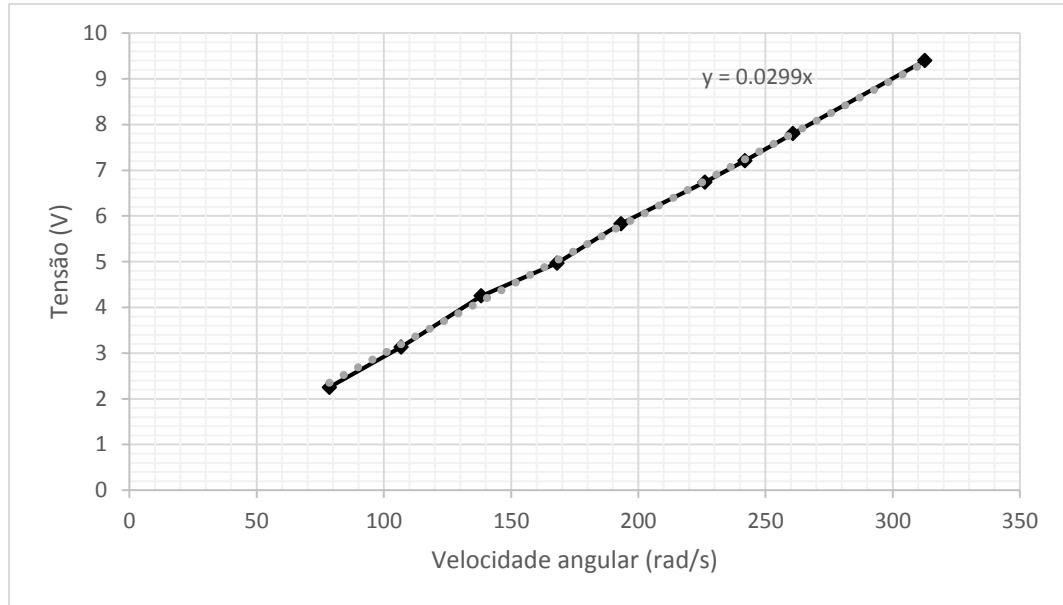


Figura 4.32 – Linearidade da tensão em relação à velocidade angular do gerador.

Aplicando vários valores de carga resistiva e de velocidade de rotação mediu-se a corrente e a tensão de saída. Através desses valores foi obtida a curva para a resistência interna equivalente do sistema gerador e retificador. Foi observado que esta variava de forma inversamente proporcional à corrente. Esta dependência pode ser observada na Figura 4.36, em conjunto com uma curva que a segue aproximadamente.

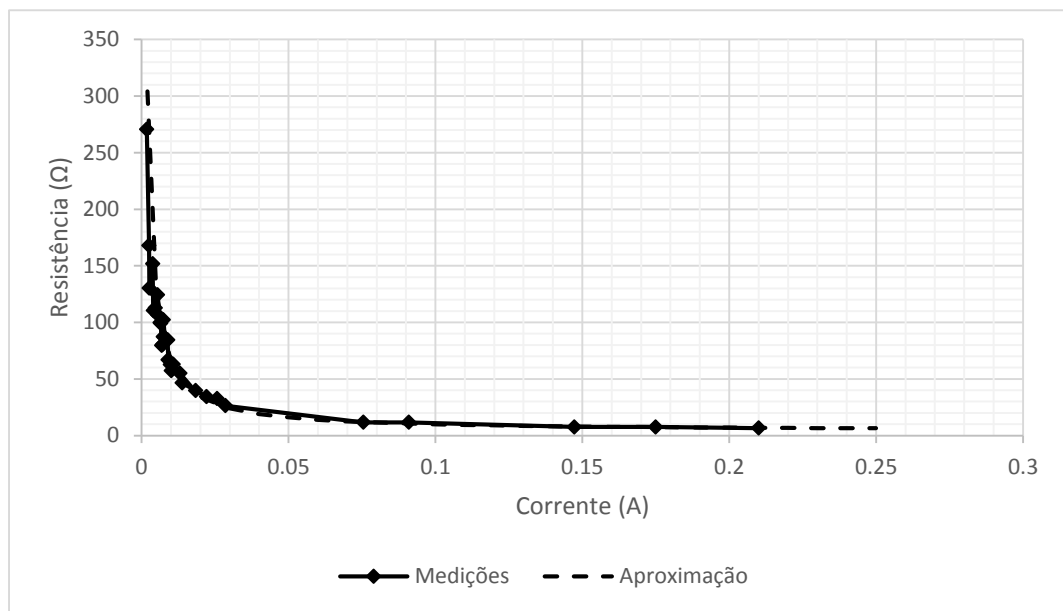


Figura 4.33 – Resistência interna equivalente do conjunto gerador e retificador em relação à corrente.

A curva de aproximação foi criada através de

$$R_{Equivalente} = \frac{2 \times V_{diodo}}{I} + R_{gerador} \quad (4.2)$$

com V_{diodo} a tensão de queda em cada diodo do retificador, assumida como sendo 0,3 V, I a corrente instantânea que passa pelo diodo e $R_{gerador}$ a resistência interna do gerador por fase cujo valor medido foi de 2,1 Ω.

4.5. Potência elétrica com a turbina *Pelton*

Tendo os dados relativos à potência mecânica das turbinas, foi feita uma seleção de seis turbinas, com o melhor desempenho geral, duas de cada dimensão. Estas foram as turbinas 8, 10, 15, 16, A e a turbina *Pelton* de metal usada em [16]. Os injetores usados foram o 4, 5 e 7. A este sistema foi acoplado o gerador dimensionado na secção 3.8.

4.5.1. Sistema com a turbina, gerador e retificador

Com o gerador ligado ao sistema hídrico e usando a carga variável e a interface desenvolvida foi possível obter gráficos semelhantes ao da Figura 4.34. Todos os gráficos relativos a esta experiência encontram-se no Anexo S.

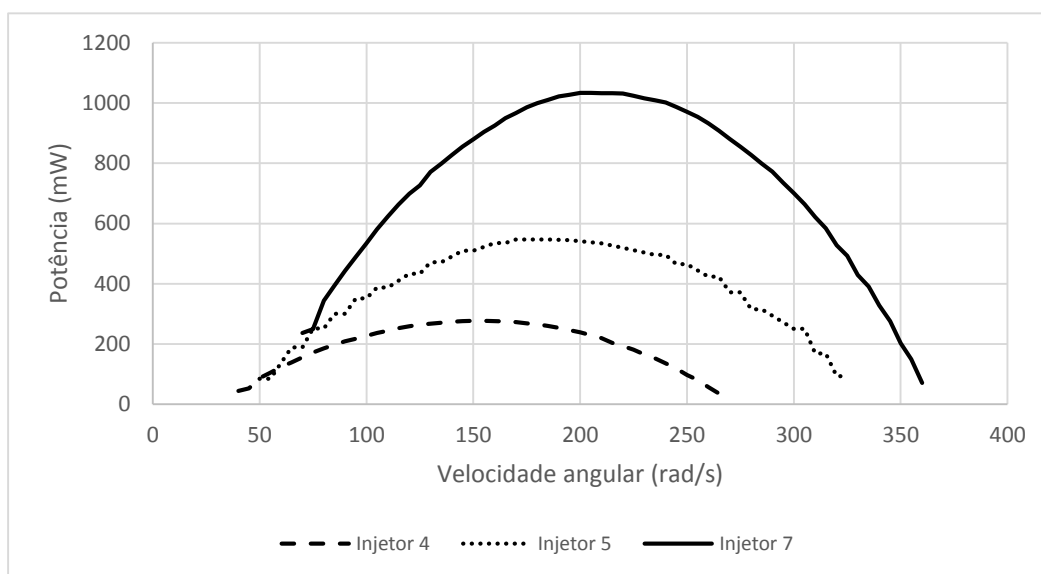


Figura 4.34 – Potência elétrica da turbina 8 para vários injetores.

Verificou-se que existia uma relação aproximadamente linear entre a tensão e a velocidade angular, como se pode observar na Figura 4.35.

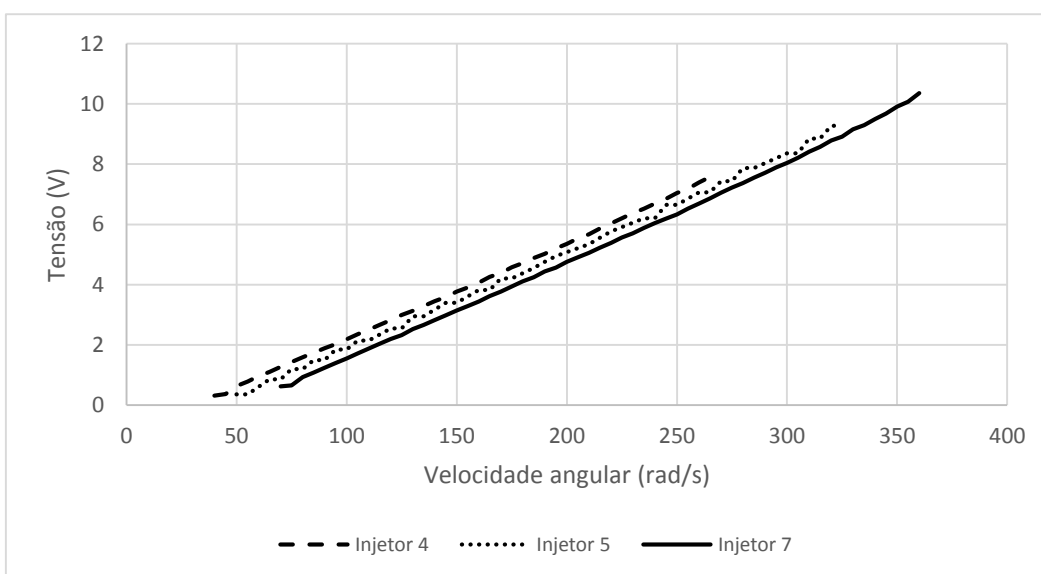


Figura 4.35 – Relação entre a tensão e velocidade angular.

Usando (4.1) para obter a resistência parasita em cada ponto de funcionamento foi observada uma dependência entre a corrente gerada e o binário gerado estimado.

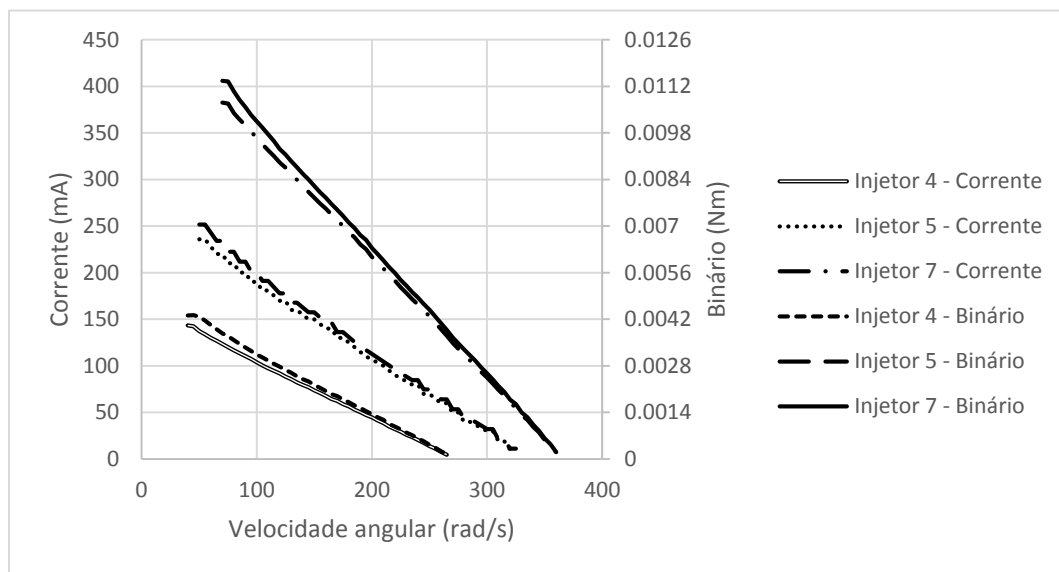


Figura 4.36 – Relação entre a corrente e o binário relativamente à velocidade angular.

A eficiência máxima dos conjuntos testados encontra-se na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 – Eficiência máxima dos sistemas.

INJETOR	TURBINA 8	TURBINA 10	TURBINA 15	TURBINA 16	TURBINA A	TURBINA DE METAL
4	22,3%	20,5%	19,5%	19,5%	28,2%	24,9%
5	25,0%	22,3%	25,0%	24,2%	29,9%	32,7%
7	27,9%	24,9%	23,2%	23,6%	30,3%	35,9%

A Figura 4.37 apresenta as eficiências das turbinas testadas em função da potência disponível no injetor, a qual depende da queda e do caudal.

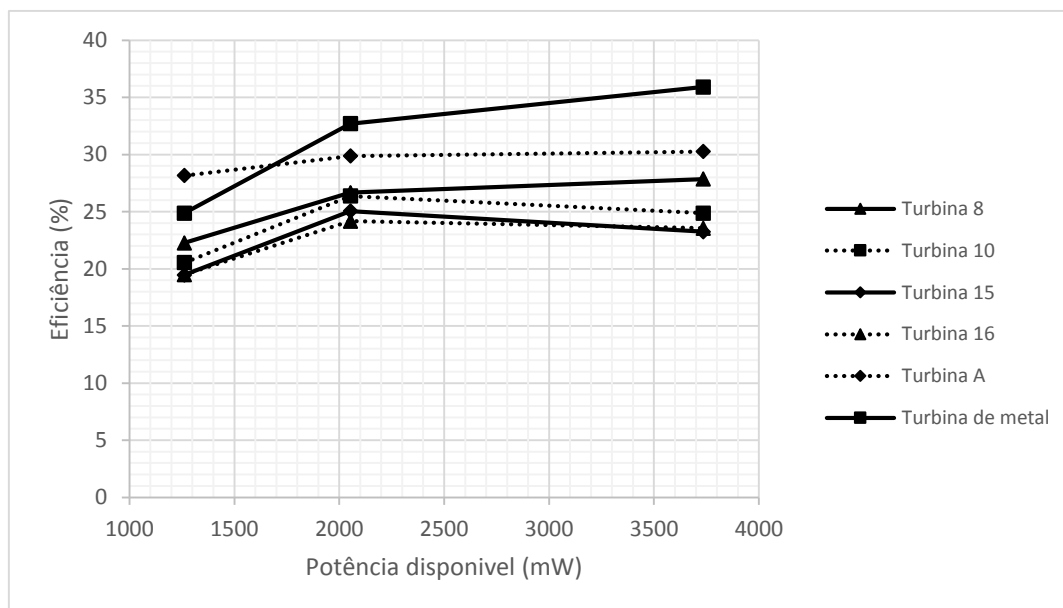


Figura 4.37 – Eficiência dos sistemas relativamente à potência.

É de notar que as turbinas 15 e 16, de pequena dimensão, e a 10, de média dimensão, tinham o seu pico com o injetor 5, enquanto as restantes não tinham um máximo definido neste conjunto de dados. Era necessário um injetor maior ou uma queda maior para se chegar ao ponto de ser observado um máximo.

4.5.2. Comportamento do gerador e retificador

Comparando a potência mecânica com a potência elétrica é obtida a eficiência do gerador e retificador ao longo da gama de velocidade angular. Um exemplo é apresentado na Figura 4.38. Os restantes gráficos podem ser consultados no Anexo T.

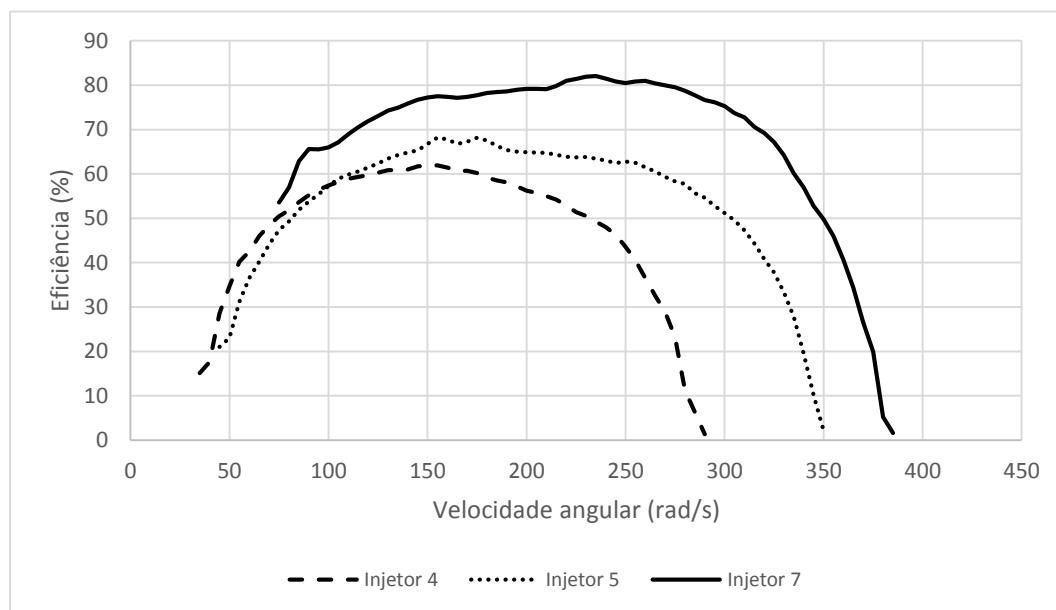


Figura 4.38 – Eficiência do gerador e retificador em relação à velocidade angular.

São de notar os topos parcialmente achatados. Nas altas rotações ocorria uma perda de eficiência, devido aos efeitos do atrito nos rolamentos, indução magnética na superfície dos condutores e um aumento da resistência parasita dos díodos do retificador quando a corrente era baixa. Nas baixas rotações, onde o valor da corrente era elevado, as perdas ocorriam por efeito de joule na resistência interna do gerador e nos díodos do retificador.

Os valores da eficiência de pico do gerador em conjunto com o retificador são agregados na Tabela 4-5.

Tabela 4-5 – Eficiência de pico do gerador para cada turbina.

INJETOR	TURBINA 8	TURBINA 10	TURBINA 15	TURBINA 16	TURBINA A	TURBINA DE METAL
4	63,0%	56,1%	60,2%	60,5%	67,9%	54,8%
5	63,6%	60,9%	65,6%	65,1%	75,4%	67,2%
6	76,3%	72,9%	77,6%	79,9%	80,4%	82,7%

Estes dados são representados graficamente na Figura 4.39 em função da potência disponível.

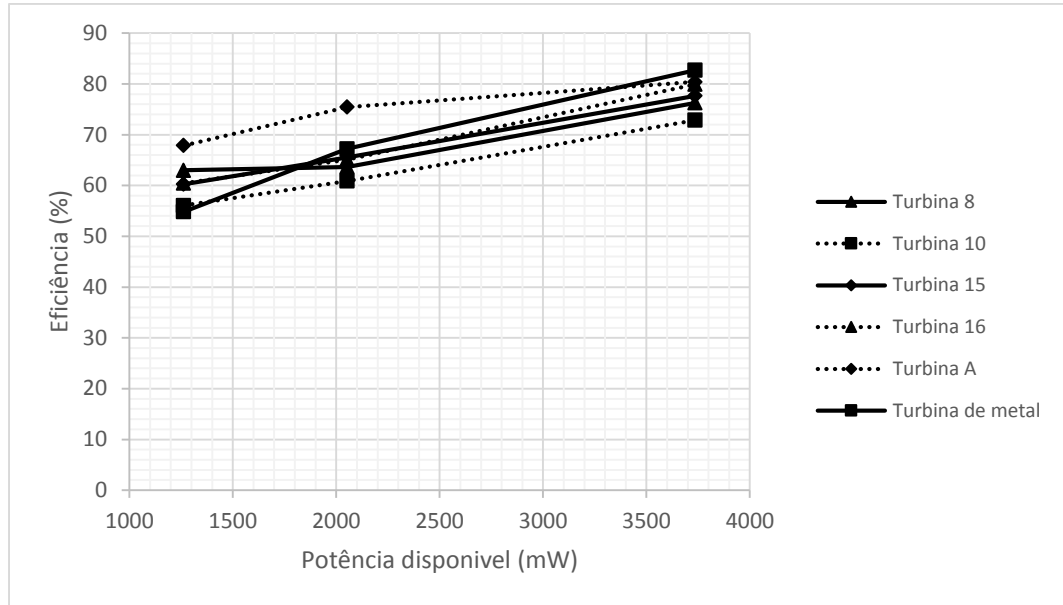


Figura 4.39 – Dependência entre a eficiência e a potência disponível.

Foi feito um segundo gráfico, apresentado na Figura 4.40, com a dependência da eficiência com a velocidade angular.

Destes dois últimos gráficos chega-se à conclusão que quanto maior for a potência disponível e maior a velocidade angular melhor será a eficiência do gerador e retificador. Uma maior potência implica que a potência perdida no retificador, que só depende da corrente que por lá passa, represente uma fatia mais pequena da potência total. Uma maior velocidade angular provoca uma tensão maior aos terminais, que faz com que a tensão de condução dos díodos represente uma percentagem menor da tensão de saída, e uma corrente de saída menor, que provoca menos perdas nas resistências parasitas presentes no gerador e retificador.

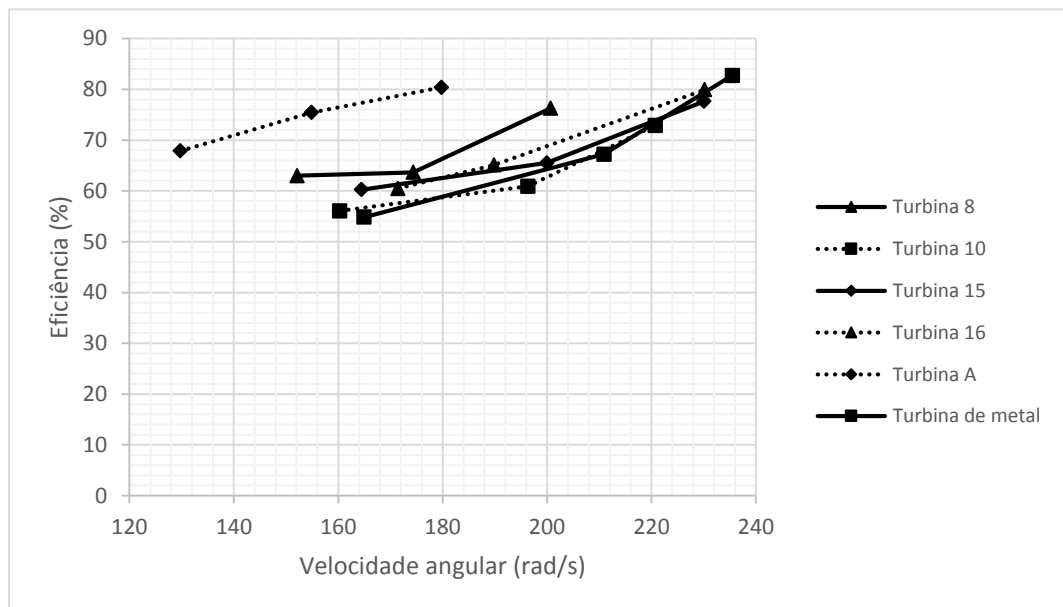


Figura 4.40 – Eficiência do conjunto gerador e retificador em relação à velocidade angular.

4.6. Potência elétrica com a turbina *Propeller*

Foi observado o comportamento do gerador quando acoplado à turbina *Propeller*. Foi escolhida a montagem com o tubo de sucção divergente e os testes foram realizados para 10, 20 e 30 cm de queda. Na Figura 4.41 são representados os dados de potência elétrica em relação à velocidade angular.

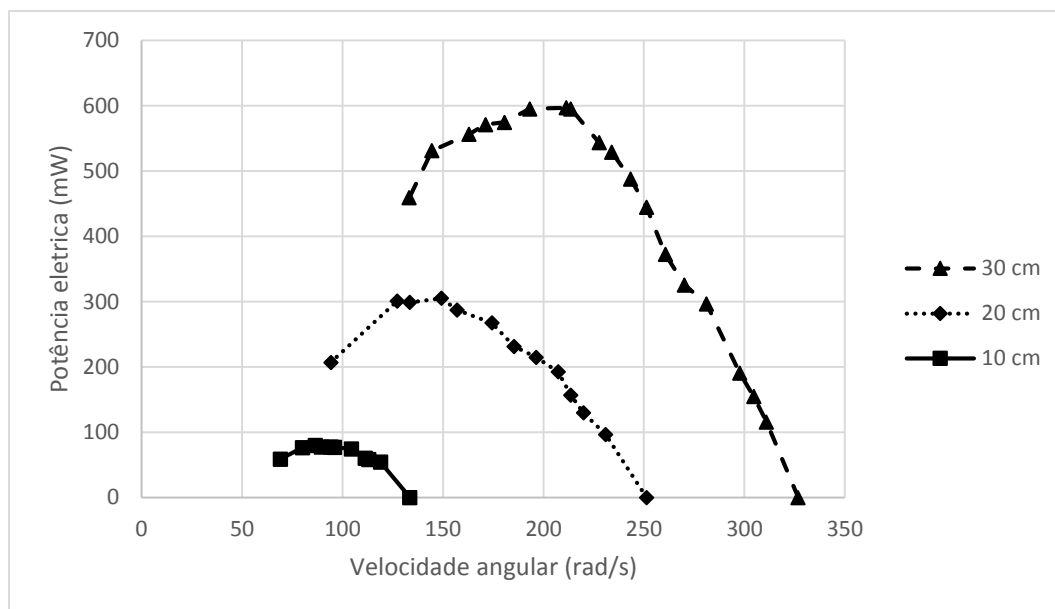


Figura 4.41 – Potência elétrica para a turbina *Propeller*.

A potência elétrica máxima obtida para uma queda de 30 cm era próxima da potência elétrica requerida.

A eficiência do sistema *Propeller* com o gerador e retificador, quando estava a funcionar no ponto de máxima transferência de potência, era de 27% para uma queda de 10 cm, 38%, para uma queda de 20 cm, e 41% para uma queda de 30 cm. Isto é esperado, visto que com um aumento da queda ocorre um aumento da potência mecânica e da velocidade angular. Consequentemente, as perdas de potência e da queda de tensão aos terminais do retificador representam uma percentagem menor da potência produzida e da tensão aos terminais do gerador.

4.7. Conversor DC-DC comutado

De forma a aferir a eficiência do conversor DC-DC dimensionado, foram realizados testes com três cargas diferentes, para três níveis de tensão e com uma variação de 5% do fator de ciclo entre cada medição, começando nos 20% e acabando nos 80%. Os resultados são representados graficamente na Figura 4.42. Nesta figura é observado que quanto maior for a carga imposta no regulador mais estreita é a banda útil de conversão. É também verificado que a eficiência em torno da zona onde a tensão de saída e de entrada são iguais varia entre os 80% e os 90%, dependendo da carga aplicada. Para situações em que a corrente é baixa começa a ser notório o efeito da resistência equivalente de perdas no diodo. O rácio de conversão, neste circuito de conversão, é dado pela equação (2.6), ou seja, é a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada num conversor ideal.

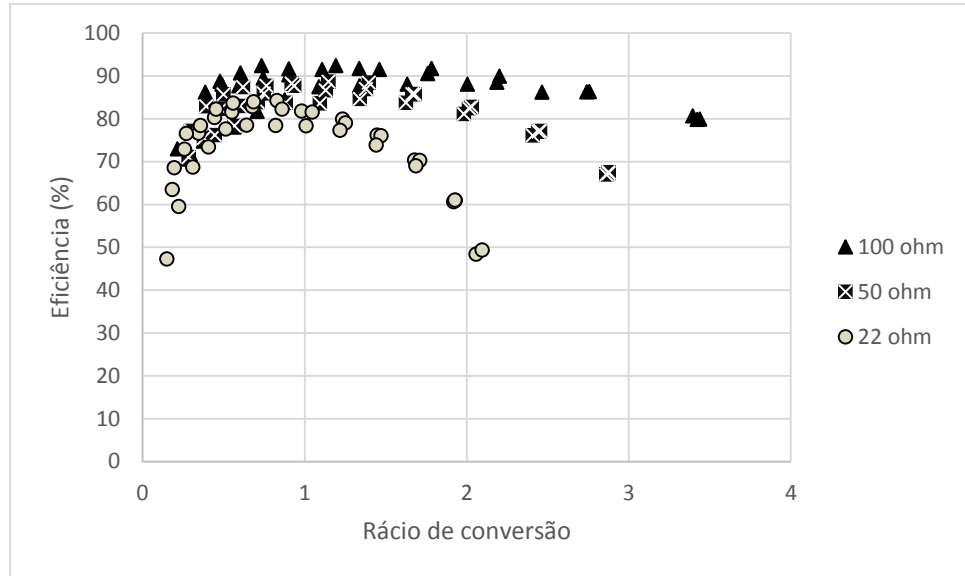


Figura 4.42 – Eficiência do conversor DC- DC.

Usando uma câmara termográfica foi observado que o díodo era o elemento que causava grande parte das perdas no circuito de regulação.

4.8. Nó sensor

Com o nó sensor, apresentado em 3.10, montado e ligado ao sistema hídrico *Pelton* foram obtidas algumas curvas de funcionamento.

4.8.1. Testes de variação de carga

A Figura 4.43 apresenta o nó sensor montado no apoio do injetor do sistema *Pelton*. A queda foi mantida em relação aos testes anteriores.



Figura 4.43 – Nó sensor.

Para os testes foram utilizadas a turbina 8, a turbina 15, a turbina A e a turbina de metal. Estas são testadas com o injetor 5 e o injetor 7, uma vez que estes apresentavam as melhores eficiências e forneciam a potência requerida.

Foram obtidos vários gráficos relativos ao funcionamento destes sistemas. Estes podem ser consultados no Anexo V.

A Figura 4.44 apresenta as curvas relativas à potência que era injetada na bateria, representada pela potência de entrada, e a potência que era extraída da bateria, representada pela potência de saída, em relação à velocidade angular. É de notar que a bateria carregava somente quando a curva da potência de entrada era superior à curva da potência de saída.

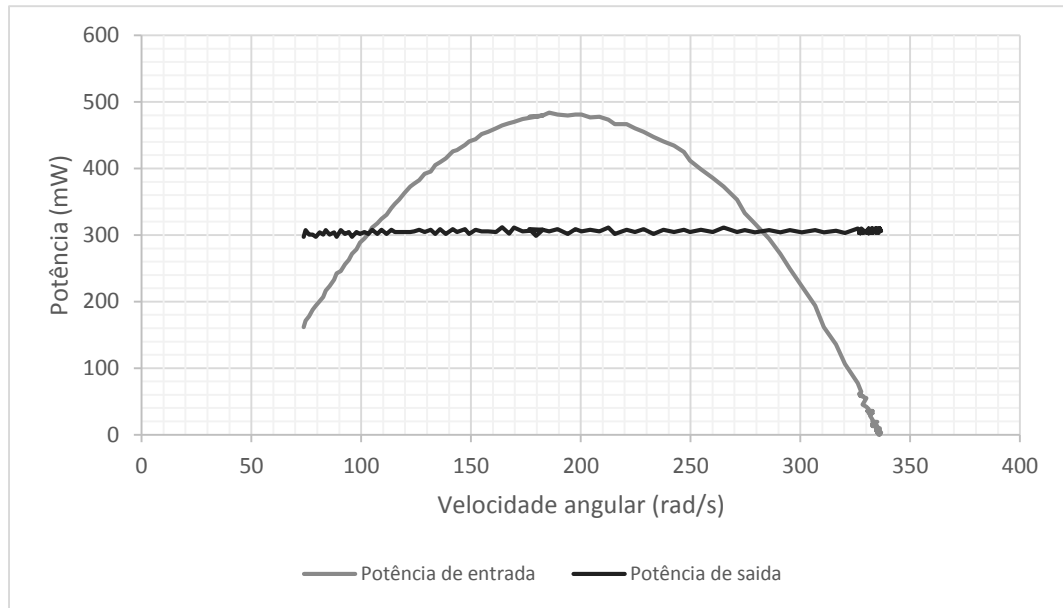


Figura 4.44 – Relação entre a potência de entrada, potência de saída e a velocidade angular.

Na Figura 4.45 e na Figura 4.46 é observado o ponto a partir do qual o regulador começava a impor carga no gerador. Este ponto variava de turbina para turbina e de injetor para injetor. Quanto maior for a potência disponível mais larga era a curva de potência. Quanto mais lenta fosse a turbina, como no caso da turbina A, cujo ponto de máxima potência ocorria a uma velocidade angular inferior às restantes turbinas, maior era o fator de ciclo necessário.

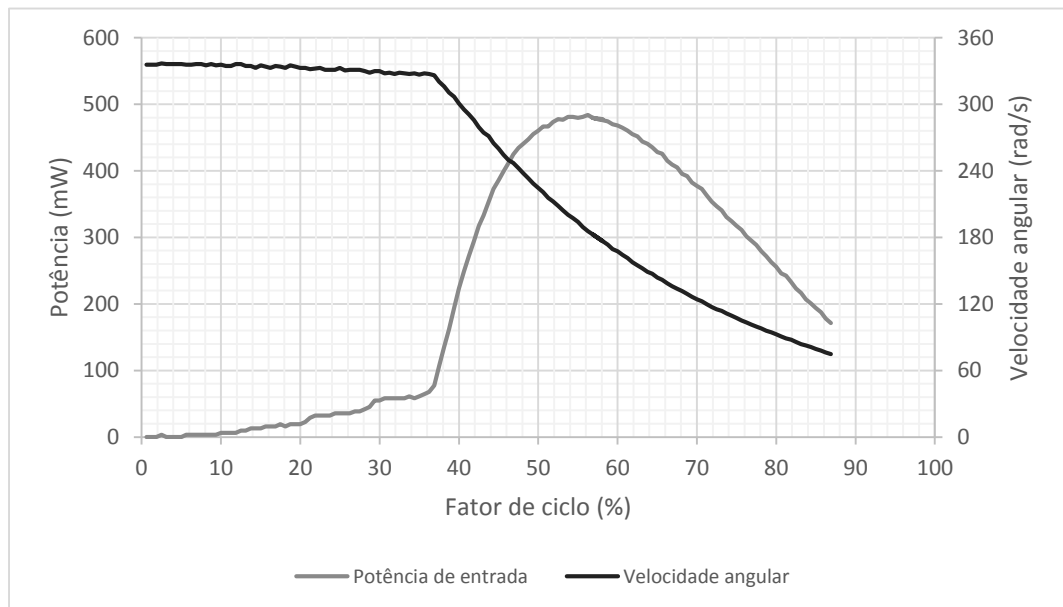


Figura 4.45 – Relação entre a velocidade angular, potência de entrada e fator de ciclo para a turbina 8 e injetor 5.

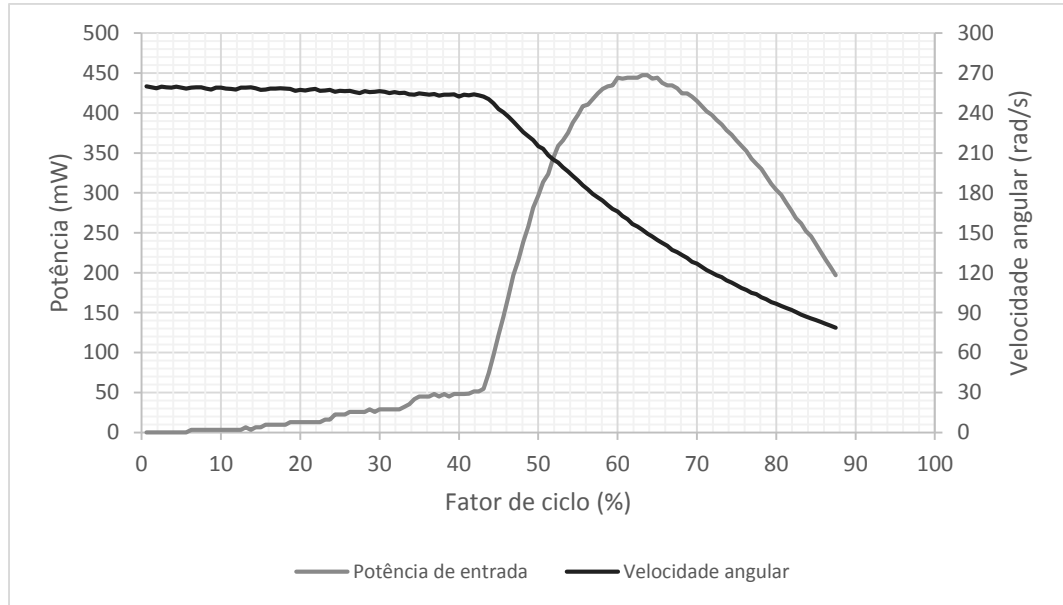


Figura 4.46 – Relação entre a velocidade angular, potência de entrada e fator de ciclo para a turbina A e injetor 5.

Como mostra a Figura 4.47, existe uma relação direta entre a potência de entrada e a corrente de entrada, o que permite simplificar o algoritmo de controlo de carga e MPPT.

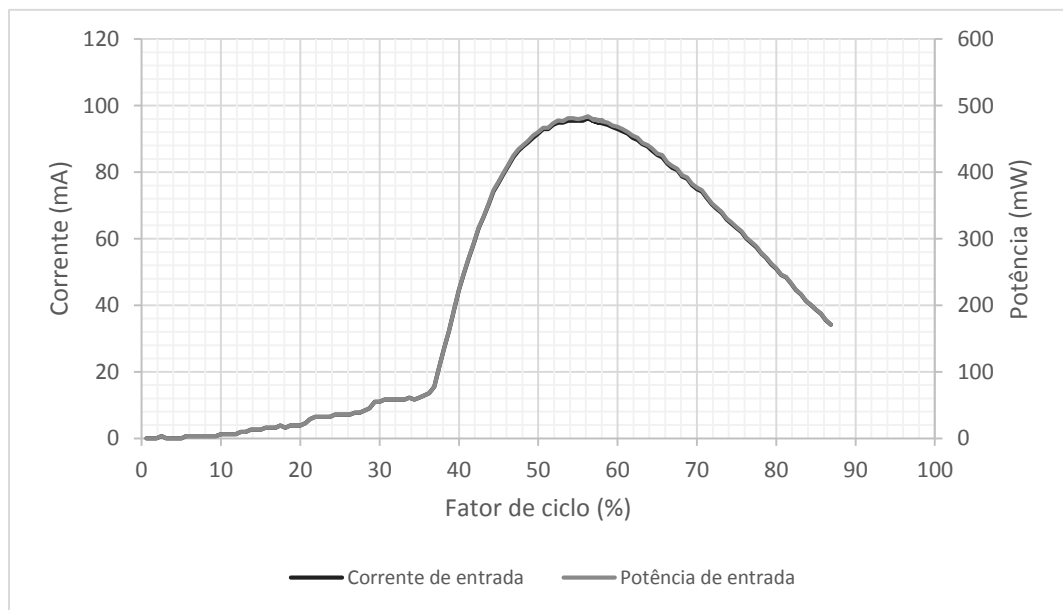


Figura 4.47 – Comparação entre a potência de entrada e a corrente de entrada.

Na Figura 4.48 é observado o algoritmo de procura do máximo ponto de transferência a funcionar. É verificado que o algoritmo varia o fator de ciclo continuamente à procura do melhor ponto de extração de potência e que este estabiliza na potência de pico encontrada no teste de varrimento.

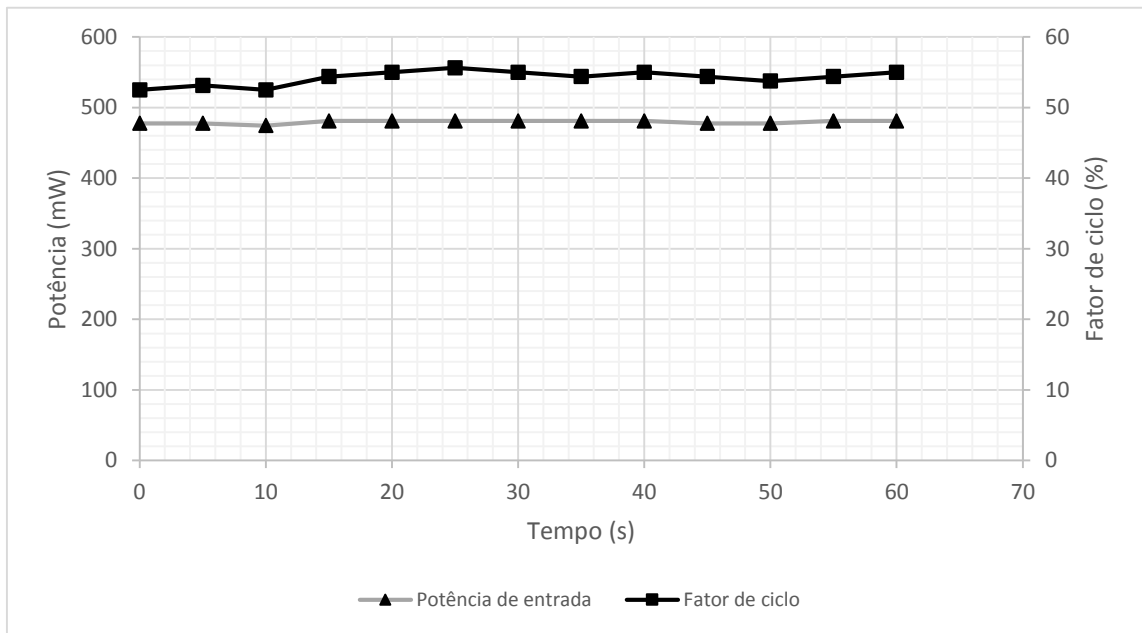


Figura 4.48 – Efeito na potência de entrada em relação ao fator de ciclo.

Deixando o algoritmo correr durante cerca de 20 segundos, de forma a estabilizar num ponto, foi obtido o erro, ou seja, a diferença entre a potência máxima localizada pelo algoritmo e a potência máxima localizada pelo teste de varrimento. Este encontrava-se entre os 0,24% e 3,4%.

A eficiência do sistema completo, desde a captura até à bateria, está representada na Tabela 4-6, organizada por injetor e por diâmetro de turbina.

Tabela 4-6 – Eficiência do sistema em relação à turbina e injetor.

	Turbina 15	Turbina 8	Turbina de metal	Turbina A
Injetor 5	18,4%	23,6%	27,6%	21,8%
Injetor 7	18,1%	21,3%	29,2%	22,1%

Desta é observado que quanto maior for o diâmetro da turbina melhor eficiência geral tinha o sistema.

4.9. Densidade de potência

O volume ocupado pela turbina e injetor do sistema *Pelton*, sem a tubagem, é de 135 cm³. O sistema *Propeller* ocupa cerca de 181,5 cm³. Isto implica que, para os sistemas com maior eficiência, a densidade de potência para o sistema *Pelton* é de 3,79 mW/cm³ e para o sistema *Propeller* é de 3,3 mW/cm³.

Os sistemas eólicos apresentados na bibliografia, que ocupam um volume semelhante apresentam densidades na ordem dos 0,2 a 5 mW/cm³. Um módulo solar retangular típico de 1 W e com um volume de 20 cm³ tem uma densidade de potência na ordem dos 50 mW/cm³.

Quando comparados com sistemas puramente mecânicos, como as turbinas eólicas, os sistemas hídricos apresentam uma densidade de potência semelhante. Quando comparados com

o sistema de captura de energia mais comum, os sistemas solares fotovoltaicos, é observada uma densidade menor, ou seja, os sistemas hídricos desenvolvidos têm uma densidade de potência uma ordem de grandeza inferior aos sistemas de captura solar.

Ao contrário das fontes eólicas e das fontes solares a densidade de potência para sistemas hídricos não tende a variar de forma drástica desde que haja uma fonte adequada de água. A potência captável para sistemas eólicos varia com a velocidade do vento, uma variável caótica e imprevisível. Para sistemas solares a potência captada durante a noite é nula e durante o dia esta varia de forma gradual, desde que não haja eclosão por nuvens, cuja posição e padrões de deslocamento são caóticos mas previsíveis.

4.10. Conclusões

No sistema *Propeller* a turbina tende a ter a mesma eficiência independentemente da tubagem de captação de água. A eficiência desta depende acima de tudo da queda disponível e da carga imposta no seu eixo. O sistema na sua totalidade ganha eficiência quando é usado um tubo de sucção divergente, visto este reduzir as perdas de queda relativas à saída de água e aumentar o diferencial de vácuo na turbina.

O sistema *Pelton* tem uma eficiência mais baixa. Isto deve-se em parte à influência da viscosidade da água a esta escala, à rugosidade relativa e à influência da perda nos rolamentos.

Embora mais eficiente do que o sistema *Pelton*, o sistema *Propeller* perde um pouco na largura de potência usável. Sem o recurso a sistemas de adaptação de carga torna-se muito difícil ligar o sistema diretamente a uma carga de forma eficiente. O ambiente perfeito para este sistema são condutas de rega e percursos de água corrente com pouca queda e muito caudal, como levadas ou ribeiras.

O sistema *Propeller* pode ser melhorado, reduzindo a quantidade de curvas no canal, e estreitando a zona onde a turbina fica localizada em relação à restante conduta, para permitir uma velocidade de rotação mais elevada. É também possível usar algum mecanismo de criação de vorticidade mais perto da hélice, de forma a reduzir os efeitos de perda de sustentação.

Foi obtida uma série de boas práticas para o dimensionamento das turbinas para sistemas de muito pequena escala, nomeadamente no que toca ao número de colheres, diâmetro, geometria da colher e ângulo da colher relativamente ao raio.

O sistema do gerador e retificador quando acoplado ao sistema *Pelton* tem uma potência de saída que segue de forma muito próxima a forma da curva da potência mecânica.

O algoritmo de pesquisa do ponto de máxima transferência de potência consegue compensar variações na potência disponível.

A turbina de metal tem uma série de características que a ajudaram a obter uma eficiência superior. Esta tem um número de pás igual a 12, pelos gráficos foi observado que usa o choque de entrada para ganhar eficiência nas altas rotações e não tem o ângulo entre as colheres e o raio.

Os sistemas hídricos dimensionados e testados neste trabalho apresentam densidades de energia equiparáveis aos sistemas de captura eólicos, mas inferiores aos sistemas de captura de energia solar em termos de densidade de potência.

5. Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais e possíveis trabalhos futuros.

5.1. Conclusão

O objetivo principal do presente trabalho foi o de desenvolver um sistema de captação de energia hídrica adequado para fins de alimentação de nós sensores. Para isso foram criados dois sistemas, um para baixa queda e grande caudal, sistema *Propeller*, e outro para grande queda e baixo caudal, sistema *Pelton*.

Para o sistema *Propeller* foi usada uma solução comercial para a turbina e rolamento impermeável. O restante material foi baseado em tubos de PVC padrão e peças criadas numa máquina de impressão 3D.

Tendo em conta o objetivo principal, todo o sistema *Pelton* foi desenhado de raiz e fabricado na máquina de impressão 3D.

Ambos os sistemas foram testados com uma máquina de medição de potência mecânica desenvolvida para ser usada neste trabalho, que permitia testar o sistema *Propeller* de forma manual e o sistema *Pelton* de forma semiautomática.

Posteriormente ambos os sistemas foram acoplados a um gerador e a um retificador e o seu desempenho foi testado usando uma carga dinâmica controlada remotamente.

Por fim foi acoplado um sistema sensor sem fios ao sistema *Pelton* com o gerador e retificador a funcionarem como carga. Isto foi feito de forma a verificar a viabilidade do sistema hídrico desenvolvido para fins de alimentação de um nó sensor.

Para aferição da eficiência mecânica dos sistemas foram testadas 9 combinações para o sistema *Propeller* e 84 combinações para o sistema *Pelton*.

A eficiência máxima da turbina *Propeller* foi de 62%, enquanto para a turbina *Pelton* foram encontradas combinações cuja eficiência máxima, para as turbinas impressas, foi de 37% para as turbinas pequenas, 42% para as turbinas médias e 41% para a turbina impressa grande. A turbina de metal, apresentada em [16], obteve uma eficiência de 48% nos testes efetuados.

As eficiências obtidas são inferiores às dos sistemas de grande dimensão, como acontece noutros sistemas de pequena escala, nomeadamente nas turbinas eólicas. As turbinas *Pelton* apresentaram eficiências mais baixas do que a turbina *Propeller*. As razões possíveis para isso passam pela influência da viscosidade a esta escala, a rugosidade relativa elevada devido às turbinas serem impressas numa máquina de impressão 3D de baixa qualidade e a influência dos atritos nos rolamentos usados.

Do estudo efetuado foi possível observar uma série de características importantes a ter em conta quando é dimensionado um sistema hídrico de pequena escala.

Para sistemas *Propeller* é fundamental garantir o caudal necessário, pois qualquer bolha de ar que entre no sistema reduz substancialmente a capacidade de captação de energia. O tubo de sucção também é muito importante, visto reduzir as perdas na tubagem. Foi observado que é uma boa prática garantir que a saída de água se encontre submersa. Uma descarga fora da água faz perder parte da energia potencial de vácuo criada por uma tubagem cheia de água a jusante da turbina. Quanto mais curta for a tubagem maior será a potência captada devido à menor perda de queda nas paredes desta.

Para sistemas *Pelton* chegou-se à conclusão que muitas das diretrizes de dimensionamento para turbinas de grande escala não funcionam para sistemas com a escala usada neste trabalho. Para sistemas *Pelton* de muito pequena escala devem ser usadas turbinas com divisória central, envernizadas, bem centradas relativamente ao eixo e ao jato, sem um ângulo entre a colher e o raio da turbina, com um total de 12 pás e um jato ligeiramente maior que o dimensionado pelas equações para grande escala. Esta configuração confere uma curva de potência larga e suave. Por outro lado um mecanismo mais fácil para aumentar a eficiência é simplesmente aumentar o diâmetro da turbina.

Refira-se que todos os sistemas criados conseguiram atingir ou exceder a potência e a velocidade angular requerida para o gerador projetado.

Os testes iniciais foram efetuados usando um método completamente manual, um processo moroso e incapaz de observar mudanças bruscas. A passagem para um método semiautomático aumentou substancialmente a capacidade de captura e análise dos sistemas criados.

O acoplamento do gerador aos sistemas hídricos permitiu obter a eficiência global do sistema antes do regulador. Nos sistemas *Pelton* a eficiência máxima variou entre 25%, para uma turbina de menor escala, e 36%, para a turbina de maior diâmetro. Por sua vez, foi observado que a eficiência de pico do conjunto do gerador e retificador variou entre os 56% e os 83%, nos testes efetuados, dependendo da carga aplicada e da potência disponível. A eficiência deste conjunto tendeu a subir com potências disponíveis mais elevadas e para velocidades de rotação mais elevadas visto a perda de potência e de tensão nos díodos representar uma percentagem inferior da potência e da tensão total.

O sistema de captura completamente automático usado na obtenção dos dados de potência elétrica melhorou imenso a qualidade dos dados e velocidade a que estes eram obtidos.

O conversor DC-DC comutado conseguiu ter uma eficiência na ordem dos 80% a 90%, dependendo da carga. Quando o rácio da tensão da saída em relação à tensão de entrada era diferente da unidade a eficiência tendia a baixar.

O nó sensor foi testado com múltiplas turbinas e vários injetores. Em todos os casos, a potência elétrica fornecida à bateria excedia a potência que lhe era extraída, possibilitando o carregamento desta. A eficiência geral do sistema como o nó sensor variou entre os 18,1% para a turbina 15 e os 29,2% para a turbina de metal.

Alterando um pouco o algoritmo foi possível manter o nó sensor a funcionar sem recurso à bateria, bastando para isso o uso de um condensador de grande capacidade e de uma carga de arranque inicial.

As vantagens dos sistemas hídricos estudados são a densidade de potência apreciável e a estabilidade da fonte de energia, ou seja, desde que exista caudal o sistema pode funcionar 24 horas por dia de forma previsível. Pelo contrário, os sistemas eólicos estão dependentes do vento que tem uma natureza caótica e os sistemas solares só funcionam durante o dia e têm um nível de potência capturável que varia ao longo deste.

A principal desvantagem deste sistema relativamente a sistemas solares e eólicos é a cobertura, ou seja, estes sistemas requerem um fluxo de água adequado para as suas necessidades, enquanto os sistemas eólicos e solares podem ser montados numa maior variedade de localizações.

5.2. Trabalhos futuros

Ao longo deste trabalho foram sendo observados alguns detalhes que podem ser melhorados ou expandidos em trabalhos futuros.

Começando pelo sistema *Propeller* a grande melhoria que o sistema poderá sofrer é a supressão das curvas na tubagem e a implementação de uma caixa de vulto ou diretrizes finas perto da turbina. Outra melhoria passará por usar uma tubagem de captura com um diâmetro superior ao da turbina. Isto permitirá aumentar a velocidade da água a passar na turbina e reduzirá as perdas por atrito na tubagem.

Quanto à turbina *Pelton* é proposta a mudança dos rolamentos para unidades melhor dimensionadas para a carga em questão, ou seja, utilizando rolamentos mais pequenos e um eixo mais estreito. Um outro ponto de melhoria será o uso de injetores de metal, criados num torno de precisão, sendo estes muito mais duráveis além de não sofrerem da influência da qualidade da superfície interior.

Referências

- [1] W. Dargie e C. Poellabauer, *Fundamentals of wireless sensor networks Theory and practice*, WILEY, 2010.
- [2] S.-H. Yang, *Wireless Sensor Networks, Principles, Design and Applications*, Springer, 2014.
- [3] S. Khan, A. K. Pathan e N. A. Alrajeh, *Wireless sensor networks Current Status and Future Trends*, CRC Press, 2013.
- [4] J. Yick, B. Mukherjee e D. Ghosal, “Wireless sensor network survey,” *Computer Networks*, vol. 52, pp. 2292-2330, 2008.
- [5] A. Dewan, S. U. Ay, M. N. Karim e H. Beyenal, “Alternative power sources for remote sensors: A review,” *Journal of Power Sources*, vol. 245, pp. 129-143, 2014.
- [6] Z. Kausar, A. W. Reza, M. U. Saleh e H. Ramiah, “Energizing wireless sensor networks by energy harvesting systems: Scopes, challenges and approaches,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 973-989, 2014.
- [7] B. C. Norman, “Power Options for Wireless Sensor Networks,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 22, pp. 14-17, 2007.
- [8] D. Linden e T. B. Reddy, *Linden's handbook of batteries*, McGraw-Hill, 2010.
- [9] T. Mahlia, T. Saktisahdan, A. Jannifar, M. Hasan e H. Matseelar, “A review of available methods and development on energy storage; technology update,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, p. 532–545, 2014.
- [10] H. Kim, S. Priya e D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies*, Springer, 2009.
- [11] R. Moghe, Y. Yang, F. Lambert e D. Divan, “A scoping study of electric and magnetic field energy harvesting for wireless sensor networks in power system applications,” *Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 3550-3557, 2009.
- [12] A. Goetzberger e V. Hoffmann, *Photovoltaic Solar Energy Generation*, Springer, 2005.
- [13] S. Krauter, *Solar Electric Power Generation Photovoltaic Energy Systems*, Springer, 2006.
- [14] L. E. Chaar, L. lamont e N. E. Zein, “Review of photovoltaic technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 2165-2175, 2011.
- [15] R. Morais, S. G. Matos, M. A. Fernandes, A. L. Valente, S. F. Soares, P. Ferreira e M. Reis, “Sun, wind and water flow as energy supply for small stationary data acquisition platforms,” *computers and electronics in agriculture*, vol. 64, pp. 120-132, 2008.
- [16] J. Azevedo e F. Santos, “Energy harvesting from wind and water for autonomous wireless sensor nodes,” *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 6, pp. 413-420, 2012.

- [17] E. Hau, *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Springer, 2013.
- [18] G. W. Taylor, J. R. Burns, S. M. Kammann, W. B. Powers e T. R. Welsh, “The Energy Harvesting Eel: A Small Subsurface Ocean/River Power Generator,” *IEEE journal of oceanic engineering*, vol. 26, pp. 539-547, 2001.
- [19] D. Hoffmann, A. Willmann, R. Göpfert, P. Becker, B. Folkmer e Y. Manoli, “Energy Harvesting from Fluid Flow in Water Pipelines for Smart Metering Applications,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 476, p. 012104, 2013.
- [20] G. Chryssis, *High-frequency switching power supplies*, New York: McGraw Hill, 1989.
- [21] A. Ioinovici, *Power Electronics and Energy Conversion Systems*, Wiley, 2013.
- [22] M. K. Kazimierczuk, *Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters*, Dayton, Ohio, USA: Wiley, 2008.
- [23] C. K. Tse, *Complex behavior of switching power converters*, Washington, D.C.: CRC Press, 2003.
- [24] N. Kularatna, *Power electronics design handbook*, Boston: Newnes, 1998.
- [25] S. Ang e A. Oliva, *Power-switching converters*, Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.
- [26] S. Cûk, “Integrated magnetics versus conventional power filtering,” em *IEEE 1987 The Ninth International Telecommunications Energy Conference*, Stockholm, Sweden, 1987.
- [27] S. Cûk, “A New Zero-Ripple Switching DC-to-DC Converter and Integrated Magnetics,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 19, pp. 57-75, 1983.
- [28] F. M. White, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, 2011.
- [29] C. Kothandaraman e R. Rudramoorthy, *Fluid Mechanics and Machinery*, New Age International, 2007.
- [30] A. C. Quintela, *Hidráulica*, Fundação Calouste Gulbenkian, 2005.
- [31] S. L. Dixon e C. A. Hall, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, Elsevier, 2010.
- [32] C. C. Warnick, H. A. Mayo, J. L. Carson e L. H. Sheldon, *Hydropower engineering*, Prentice-Hal, 1984.
- [33] V. Arasu, *Turbo Machines*, Vikas Publishing House, 2001.
- [34] Z. Husain, M. Z. Abdullah e Z. Alimuddin, *Basic Fluid Mechanics and Hydraulic Machines*, BS Publications, 2008.
- [35] J. E. Logan e R. Roy, *Handbook of Turbomachinery*, Marcel Dekker, 2003.

- [36] G. F. Round, Incompressible Flow Turbomachines, Gulf Professional Publishing, 2004.
- [37] R. S. R. Gorla e A. A. Khan, Turbomachinery Design and Theory, Marcel Dekker, 2003.
- [38] S. A. Korpela, Principles of Turbomachinery, WILEY, 2011.
- [39] A. Harvey, A. Brown, P. Hettiarachi e A. Inversin, Micro-hydro design manual, Intermediate Technology Publications, 1993.
- [40] CRANE, Flow of fluids through valves, fittings, and pipe, London: CRANE, 1986.
- [41] Arduino, “Arduino Fio,” Arduino, [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardFio>. [Acedido em 10 Novembro 2015].
- [42] Texas Instruments, “LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers,” Dezembro 2014. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>. [Acedido em 5 Julho 2015].
- [43] maxim integrated, “MAX 9928/MAX9929 Micropower, Uni-/Bidirectional, Current-Sense Amplifiers,” Maxim integrated, Setembro 2014. [Online]. Available: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX9928-MAX9929.pdf>. [Acedido em 13 10 2015].
- [44] Texas Instruments, “DRV5013 Digital-Latch Hall Effect Sensor,” Texas Instruments, Setembro 2014. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5013.pdf>. [Acedido em 13 10 2015].
- [45] Digi International, “XBEE / XBEE-PRO ZB (S2) MODULES,” Digi International, [Online]. Available: <http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3430>. [Acedido em 10 Novembro 2015].
- [46] Fairchild semiconductor, “FDC645N - N-Channel PowerTrench MOSFET,” Fairchild semiconductor, Abril 2001. [Online]. Available: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FD/FDC645N.pdf>. [Acedido em 13 10 2015].
- [47] A. G. Ambekar, Mechanism and machine theory, New Delhi: Prentice-Hall of India, 2007.
- [48] J. S. Brar e R. K. Bansal, A textbook theory of machines, Bangalore,: Laxmi Publications, 2006.
- [49] J. A. Stegmann, “Design and Analysis Aspects of Radial Flux Aircored cored Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications,” Department of Electrical and Electronic Engineering University of Stellenbosch, 2010.

- [50] Graupner, “Graupner - Marine propeller,” [Online]. Available: <http://shop.graupner.de/webuERP/AI?ARTN=2308.40L>. [Acedido em 5 Novembro 2015].
- [51] P. Pejović, *Three-phase diode rectifiers with low harmonics*, New York: Springer, 2007.
- [52] DEXTER, “DEXTER magnetic technologies,” [Online]. Available: <http://www.dextermag.com/resource-center/magnetic-field-calculators/field-calculations-for-rectangle>. [Acedido em 15 Junho 2015].
- [53] S. Sohrab, *New aspects of fluid mechanics and aerodynamics*, WSEAS Press., 2008.
- [54] Interior Dept., Bureau of Reclamation, *Water Measurement Manual*, Interior Dept., Bureau of Reclamation, 2001.
- [55] L. Kranz, C. Gretener, J. Perrenoud, R. Schmitt, F. Pianezzi, F. La Mattina, P. Blösch, E. Cheah, A. Chirilă, C. M. Fella, H. Hagendorfer, T. Jäger, S. Nishiwaki, A. R. Uhl, S. Buecheler e A. N. Tiwari, “Doping of polycrystalline CdTe for high-efficiency solar cells on flexible metal foil,” *Nature Communications*, vol. 4, p. 2306, 2013.
- [56] W. G. Hurley e W. H. Wolfle, *Transformers and inductors for power electronics*, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2013.
- [57] N. H. Karam, R. R. King, M. Haddad, J. H. Ermer, H. Yoon, H. L. Cotal, R. Sudharsanan, J. W. Eldredge, K. Edmondson, D. E. Joslin, D. D. Krut, M. Takahashi, W. Nishikawa, M. Gillanders, J. Granata, P. Hebert, B. Cavicchi e D. Lillington, “Recent developments in high-efficiency Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs/Ge dual- and triple-junction solar cells: steps to next-generation PV cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 66, pp. 453-466, 2001.
- [58] Y. K. Tan e S. K. Panda, “Self-Autonomous Wireless Sensor Nodes With Wind Energy Harvesting for Remote Sensing of Wind-Driven Wildfire Spread,” *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 60, pp. 1367-1377, 2011.
- [59] E. Sardini e M. Serpelloni, “Self-Powered Wireless Sensor for Air Temperature and Velocity Measurements With Energy Harvesting Capability,” *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 60, pp. 1838-1844, 2011.

Anexo A. Tecnologias de produção de células fotovoltaicas

As tecnologias mais comuns para produção solar são as células de silício cristalino, a tecnologia de filme fino e a tecnologia de semicondutores compostos.

As células de silício cristalino pertencem à primeira geração de células fotovoltaicas. Estas têm sido desenvolvidas e melhoradas ao longo dos anos. Dois exemplos de células de silício cristalino são as células monocristalinas e as células policristalinas. A tecnologia monocristalina é a mais comum por ser relativamente eficiente e rentável, sendo que a tecnologia policristalina troca alguma desta eficiência por um custo menor [14].

Uma tentativa de melhorar a tecnologia de silício cristalino vem da tecnologia de filme fino. Esta promete reduzir o custo do material, mantendo a longevidade e a qualidade e reduzindo os efeitos nefastos para a natureza. A diferença principal desta tecnologia relativamente à anterior prende-se com o facto que o material é depositado em camadas muito finas, na ordem de alguns micrómetros, num substrato de vidro ou aço inox. Devido ao processo rápido de deposição há uma redução do custo de manufaturação e do material. Como a quantidade de material fotovoltaico é mais fina do que numa célula cristalina, reduzindo a zona de interação dos fotões, a eficiência tende a ser menor. A grande vantagem desta tecnologia reside na versatilidade dos materiais depositáveis, permitindo um aumento de eficiência e da resistência a variações de temperatura, e no substrato que pode ser flexível e robusto. Há quatro tipos desta tecnologia, nomeadamente as células de silício amorfo, silício policristalino fino depositado num substrato de baixo custo, células de heterojunção de telureto de cádmio/sulfeto de cádmio e às células de heterojunção de cobre-índio-selénio/sulfeto de cádmio. As células de silício absorvem mais do espectro visível e têm uma eficiência inferior às células de silício cristalino, mas uma vez que as camadas depositadas são muito finas, é possível depositar variações do material que conseguem capturar outras gamas espectrais. Estas células são conhecidas como células de silício amorfo de múltipla junção.

Uma outra forma de melhorar a eficiência é depositando uma camada de silício amorfo sobre silício policristalino. Isto permite capturar uma largura espectral maior, visto que cada material responde melhor a zonas espectrais que não são capturadas pelo outro [14].

As células de telureto de cádmio têm propriedades que fazem com que este seja o material ideal para capturar o máximo de radiação solar. No entanto, a disponibilidade limitada de telúrio e a toxicidade do cádmio não permitem uma redução de custos adequada e fazem com que esta tecnologia possa ser um perigo para a saúde e para a natureza. Uma variante com propriedades muito boas em termos elétricos e de absorção ótica são as células de heterojunção de cobre-índio-selénio. Estas tendem a ter a melhor eficiência entre as várias tecnologias de filme fino e permitem uma multitudine de tecnologias de deposição. É possível melhorar ainda mais a eficiência, até 20%, adicionando gálio. As principais limitações desta tecnologia prendem-se à limitação do fornecimento mundial de índio e a sua degradação fácil em ambientes húmidos e quentes. Na Figura A.1 é apresentado um exemplo de uma célula de telureto de cádmio [14].

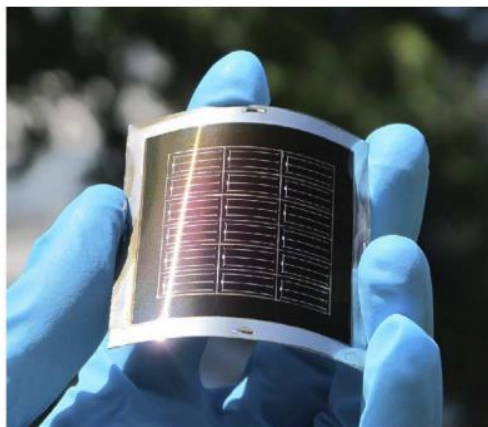


Figura A.1 – Célula solar flexível [55].

Até 2011 a tecnologia solar com melhor eficiência era a junção em camadas de várias placas com diferentes estruturas cristalinas em que cada uma tem gamas de absorção espectral diferentes. Isto permite ganhos de eficiência na ordem dos 39% em células de arsenieto de gálio/fosfato de gálio-índio. Na Figura A.2 é mostrado um exemplo das várias camadas de uma destas células e a sua gama espectral [14].

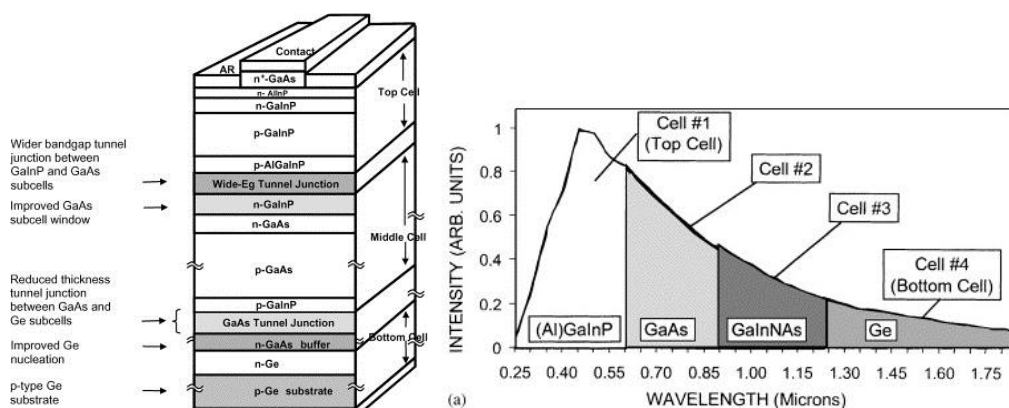


Figura A.2 – Célula solar de múltipla junção e gama espectral [15].

Esta família de células é usada nos painéis solares de satélites, de modo a reduzir a dimensão e o peso do material a ser levado para o espaço e a maximizar a captura de energia com uma área limitada. A grande desvantagem desta tecnologia reside no seu custo elevado [14].

Anexo B. Formas de onda dos reguladores de tensão comutados

Neste anexo estão agregados os gráficos dos reguladores *buck*, *boost*, *buck-boost* e *Cûk*.

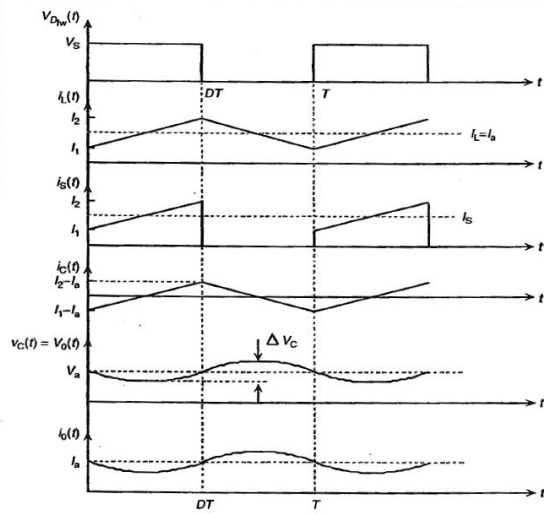


Figura B.1 – Ondas caraterísticas da topologia *buck* [26].

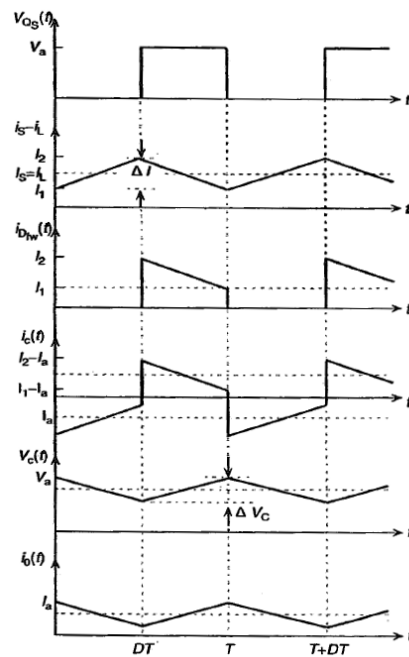


Figura B.2 – Ondas caraterísticas da topologia *boost* [26].

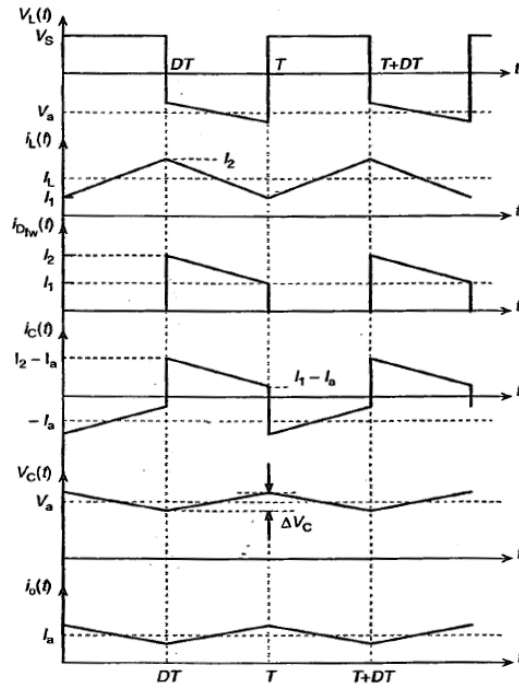


Figura B.3 – Ondas caraterísticas da topologia *Buck-Boost* [26].

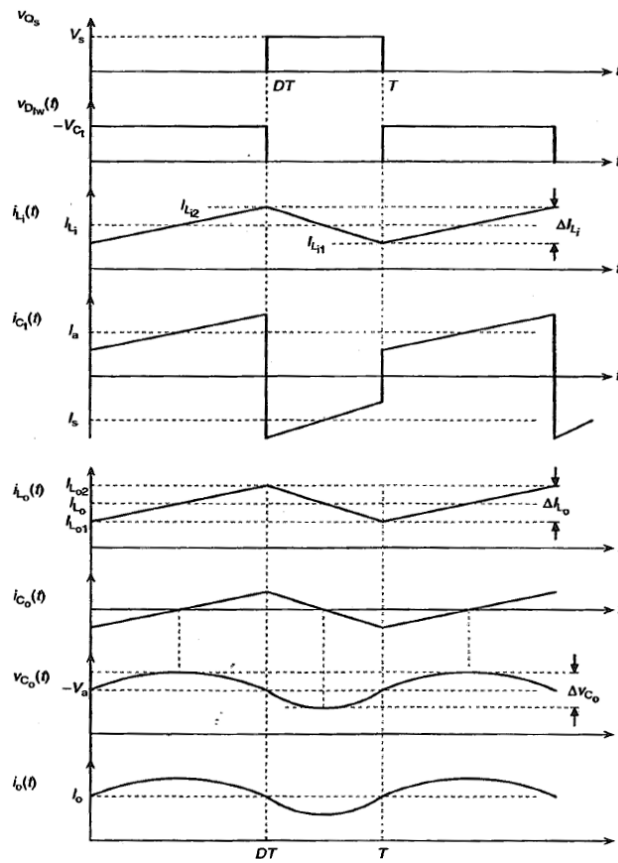


Figura B.4- Formas de onda caraterísticas do regulador Cûk [26].

Anexo C. Fluxograma do conta rotações simples com ecrã

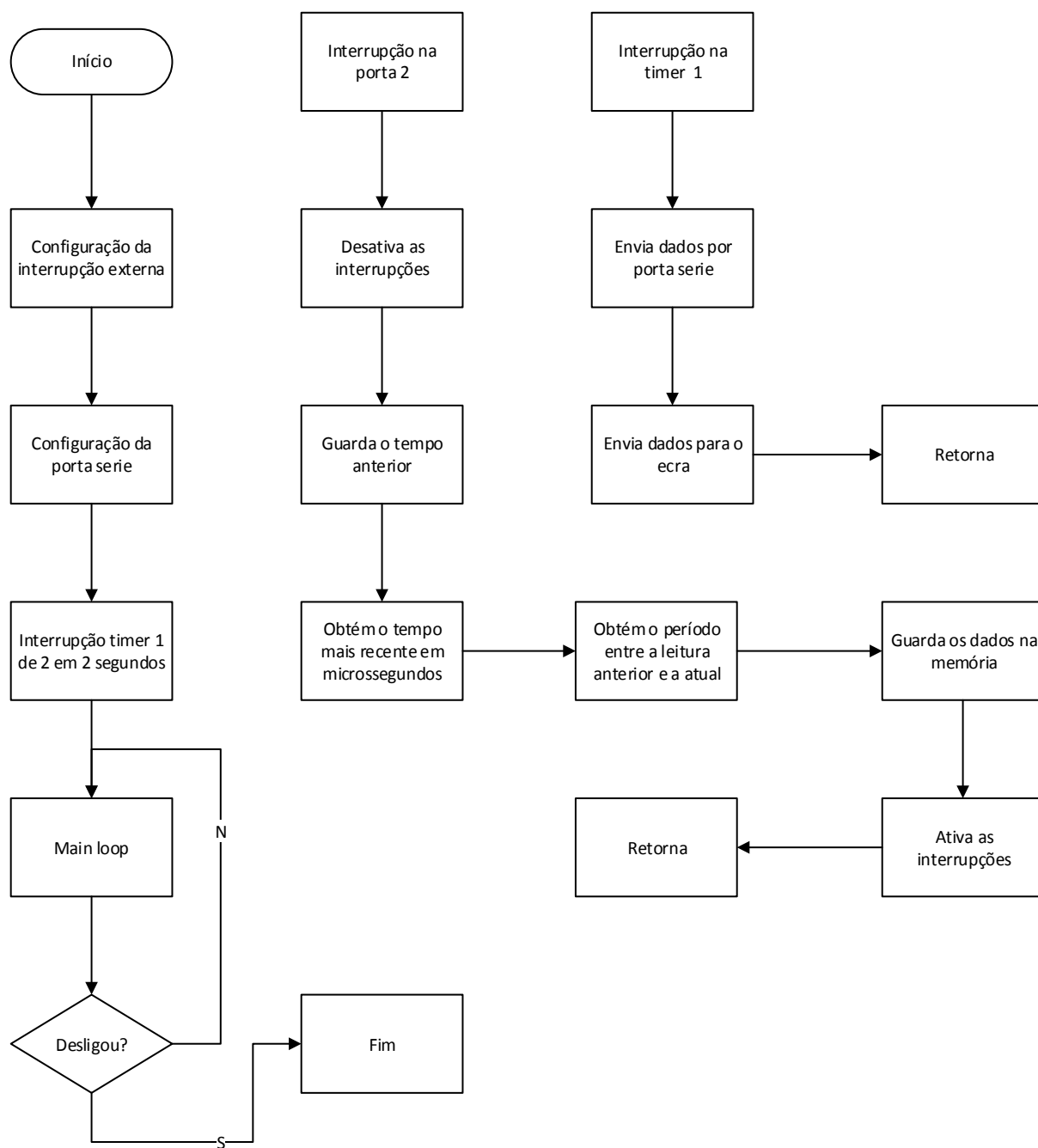


Figura C.1 – Fluxograma do código do conta rotações simples com ecrã.

Anexo D. Código Arduíno do conta rotações simples com ecrã

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include "TimerOne.h"

LiquidCrystal lcd(12, 11, 7, 6, 5, 4);
unsigned long time=0;
unsigned long timeold=0;
unsigned long periodo=0;
float rps=0;
int rotacoes = 0;
//int rodou=0;
int contarodou=0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13, OUTPUT);
  lcd.begin(16, 2);
  attachInterrupt(0, rodou, FALLING);
  Timer1.initialize(200000);
  Timer1.attachInterrupt(Envia);
}

void loop() {

}

void rodou() {
  noInterrupts();
  //contarodou=0;
  timeold=time;
  time=micros();
  periodo=time-timeold;
  rps=1000000.00/periodo;
  digitalWrite(13, !digitalRead(13));
  Serial.println(rps);
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print((rps));

  interrupts();
}

void Envia() {
  noInterrupts();
  Serial.print("RPS ");

  Serial.println(rps);
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print((rps));

  interrupts();
}
```

Anexo E. Fluxograma da interface de medição de potência mecânica

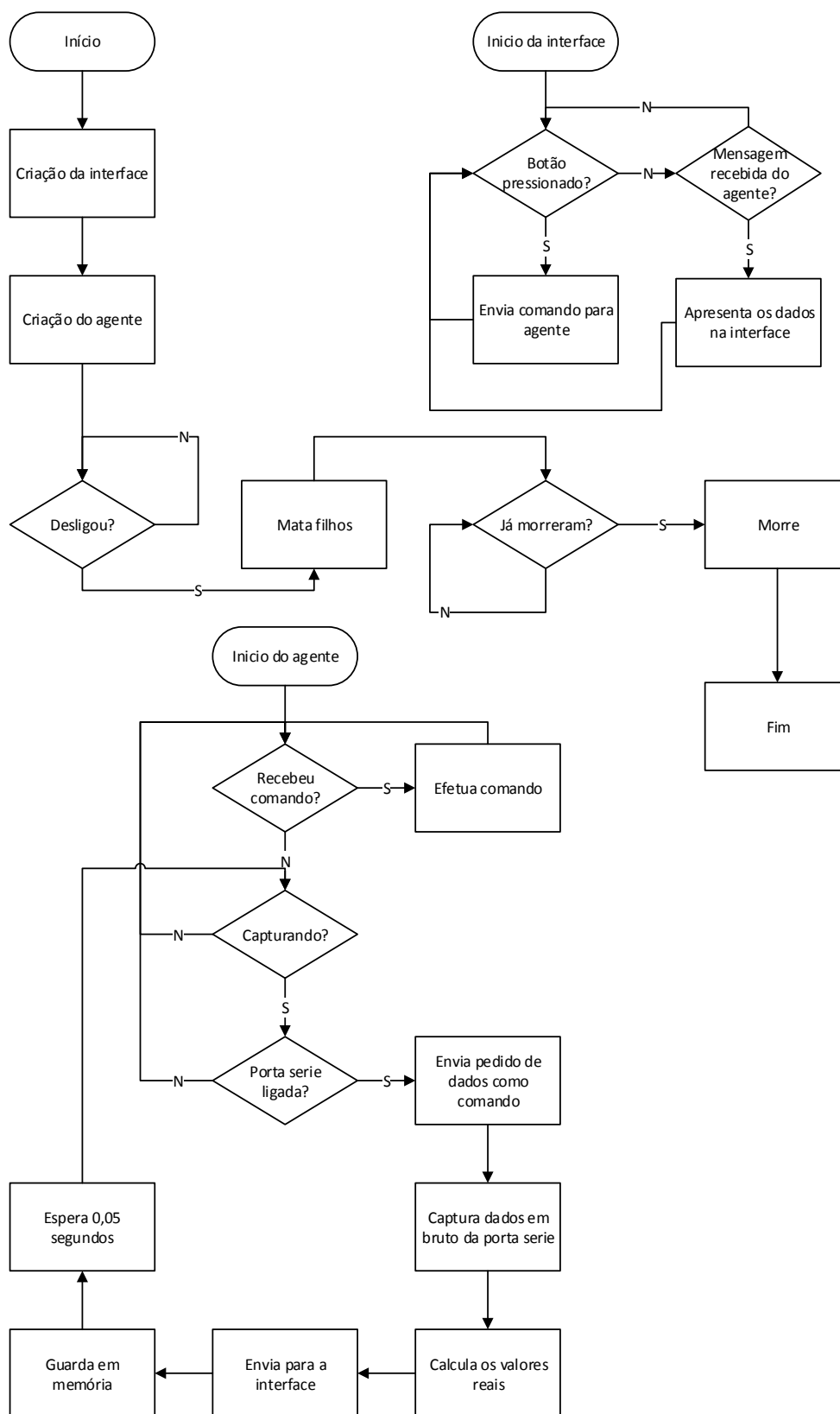


Figura E.1 – Fluxograma da interface do medidor de potência mecânica.

Anexo F. Código python da interface de medição de potência mecânica

```
import serial
import xlswriter
import time
import wx
from wx.lib.pubsub import pub
import wx.lib.plot as plot
import numpy as np
from scipy.signal import butter, lfilter, freqz
from operator import itemgetter
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_wxagg import FigureCanvasWxAgg as FigureCanvas
from matplotlib.backends.backend_wxagg import NavigationToolbar2WxAgg as
NavigationToolbar
import random

from threading import Thread

isalive=True
isstreaming=False

RPMconnected=False
DYNAconnected=False

diametro=0.01

ganho1=0.00459770114943
ganho2=0.0048309178744

offset1=139
offset2=105

medidasrps=[ ]
medidasforca1=[ ]
medidasforca2=[ ]

medidascompostas=[ ]

class plots(wx.Frame):
    def __init__(self, parent):
        wx.Frame.__init__(self, None, title='graficos', size=(800,600))
        self.parent = parent
    # background = wx.StaticBitmap(self, -1, (wx.Image('coordenador.png',
wx.BITMAP_TYPE_ANY).ConvertToBitmap()), (0, 0))
        painel = wx.Panel(self)
        self.figure=plt.figure()
        self.canvas = FigureCanvas(self,-1, self.figure)
        self.toolbar = NavigationToolbar(self.canvas)
        self.toolbar.Hide()
        self.Bind(wx.EVT_CLOSE, self.OnCloseWindow)
        self.SetSize((1200,600))
        self.canvas.SetSize((1200,600))
        self.Show()
```

```

def plot(self,data,data2,axis,onde):

    ax = self.figure.add_subplot(onde)
    ax.hold(False)
    ax.plot(axis, data , axis, data2 )
    plt.grid(True)
    self.canvas.draw()

def OnCloseWindow(self,event):
    self.Show(False)

class directoria:
    def __init__(self):
        self.dir='tese'

    def setaddress(self,address):
        self.dir=address
        print address

    def getaddress(self):
        return self.dir

direc=directoria()

#34,2419
class WorkerThread(Thread):

    #####
    def __init__(self):
        Thread.__init__(self)

        pub.subscribe(self.threadlistener, "Listenthread")
        self.start()

    def butter_lowpass_filter(self, data, order, fs ,cutoff):
#         order = 3
#         fs = 20 # sample rate, Hz
#         cutoff = 2 # desired cutoff frequency of the filter, Hz
        nyq = 0.5 * fs
        normal_cutoff = cutoff / nyq
        b, a = butter(order, normal_cutoff, btype='Low', analog=False)
        y = lfilter(b, a, data)
        return y

    #####
    def run(self):
        global ganho1
        global ganho2
        global offset1
        global offset2

```

```

while isalive:
    if RPMconnected:
        self.serrps.write("F")
        RPS=self.serrps.readline()
        mensagemrps=RPS.split(' ')
        try:
            if 'Medidas' in mensagemrps[0]:
                periodo=long(mensagemrps[1])
                forca1int=int(mensagemrps[2])
                forca2int=int(mensagemrps[3])
                if periodo==0:
                    rotacoesporsegundo=0.00;
                else:
                    rotacoesporsegundo=round(1000000.00/periodo,4)

                forca1=round((forca1int-offset1)*ganho1,4)

                forca2=round((forca2int-offset2)*ganho2,4)

                if forca1<0:
                    forca1=0
                if forca2<0:
                    forca2=0

                diferencial=forca1-forca2

potencia=round((2*3.1415*rotacoesporsegundo*(diferencial*(diâmetro/2))),4)

pub.sendMessage("Listenqui",comandogui="ValRPM",mensagemgui=str(rotacoesporsegundo
))

pub.sendMessage("Listenqui",comandogui="ValDyna",mensagemgui=str(forca1)+
"+str(forca2)+" "+str(diferencial))

pub.sendMessage("Listenqui",comandogui="ValPOT",mensagemgui=str(potencia))

        else:

pub.sendMessage("Listenqui",comandogui="Mensagem",mensagemgui="dado velho")
        #print "dado velho"
    except:
        pass

while isstreaming and RPMconnected:
    f = open(direc.dir+'.txt', 'w')

    f.seek(f.tell())
    f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
    f.write('\n')
    medidasrps=[ ]
    medidasforca1=[ ]
    medidasforca2=[ ]
    medidascompostas=[ ]

```

```

while isstreaming and RPMconnected:
    time.sleep(0.05)
    try:
        self.serrps.write("E")
        RPS=self.serrps.readline()
        mensagemrps=RPS.split(' ')
        if 'Medidas' in mensagemrps[0]:
            periodo=long(mensagemrps[1])
            forca1int=int(mensagemrps[2])
            forca2int=int(mensagemrps[3])
            if periodo==0:
                rotacoesporsegundo=0.00;
            else:
                rotacoesporsegundo=round(1000000.00/periodo,4)

            forca1=round((forca1int-offset1)*ganho1,4)

            forca2=round((forca2int-offset2)*ganho2,4)

            if forca1<0:
                forca1=0
            if forca2<0:
                forca2=0

            diferencial=forca1-forca2
            if diferencial<0:
                diferencial=0

potencia=round((2*3.1415*rotacoesporsegundo*(diferencial*(diâmetro/2))),4)

        f.seek(f.tell())
        f.write(str(rotacoesporsegundo))
        f.write(' ')
        f.write(str(forca1))
        f.write(' ')
        f.write(str(forca2))
        f.write('\n')

        medidasrps.append(rotacoesporsegundo)
        medidasforca1.append(forca1)
        medidasforca2.append(forca2)

    pub.sendMessage("Listenqui", comandogui="ValRPM", mensagemgui=str(rotacoesporsegundo)
    ))

    pub.sendMessage("Listenqui", comandogui="ValDyna", mensagemgui=str(forca1)+
    "+str(forca2)+" "+str(diferencial))

    pub.sendMessage("Listenqui", comandogui="ValPOT", mensagemgui=str(potencia))

    pub.sendMessage("Listenqui", comandogui="Mensagem", mensagemgui="capturando")

    else:

```

```

pub.sendMessage("Listenqui", comandogui="Mensagem", mensagemgui="dado velho")
    print "dado velho"

    except:
        print "falhou"
    f.seek(f.tell())
    f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
    f.close()

#####
workbook = xlswriter.Workbook('dados.xlsx')
worksheet = workbook.add_worksheet()
worksheet.write(3, 0, "medidas cruas")
for i in range(0, len(medidasforca1)):###direitoexcel

worksheet.write_row(i+5,0,[medidasrps[i],medidasforca1[i],medidasforca2[i]])

#####ordenado#####

for i in range(0, len(medidasforca1)):

medidascompostas.append([medidasrps[i],medidasforca1[i],medidasforca2[i]])

    medidascompostasorganizadas=sorted(medidascompostas,
key=itemgetter(0))
    f = open(direc.dir+"-ordenado.txt", 'w')
    f.seek(f.tell())
    f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))

for i in range(0, len(medidasforca1)):
    f.seek(f.tell())
    f.write(str(round(medidascompostasorganizadas[i][0],4)))
    f.write(' ')
    f.write(str(round(medidascompostasorganizadas[i][1],4)))
    f.write(' ')
    f.write(str(round(medidascompostasorganizadas[i][2],4)))
    f.write('\n')

f.seek(f.tell())
f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
f.close()

worksheet.write(3, 10, "medidas organizadas")

for i in range(0, len(medidasforca1)):###organizadoexcel
    worksheet.write_row(i+5,10,medidascompostasorganizadas[i])

#####ordenado
filtrado#####
medidasrpsordenado=[ ]
medidasforca1odenado=[ ]
medidasforca2odenado=[ ]

for i in range(0, len(medidasforca1)):

```

```

        medidasrpsordenado.append(medidascompostasorganizadas[i][0])
        medidasforca1ordenado.append(medidascompostasorganizadas[i][1])
        medidasforca2ordenado.append(medidascompostasorganizadas[i][2])

frame.graficos.plot(np.subtract(medidasforca1ordenado,medidasforca2ordenado),
np.multiply(np.subtract(medidasforca1ordenado,medidasforca2ordenado),medidasrps)
,medidasrps,223)

        dadosfiltrados1 = self.butter_lowpass_filter(medidasforca1ordenado,
6, 20, 1)
        dadosfiltrados2 = self.butter_lowpass_filter(medidasforca2ordenado,
6, 20, 1)

        frame.graficos.plot(np.subtract(dadosfiltrados1,dadosfiltrados2),
np.multiply(np.subtract(dadosfiltrados1,dadosfiltrados2),medidasrps)
,medidasrps,224)

        f = open(direc.dir+"-ordenado- filtrado.txt", 'w')
        f.seek(f.tell())
        f.write(time.strftime( "%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
        f.write('\n')

        for i in range(0, len(dadosfiltrados1)):
            f.seek(f.tell())
            f.write(str(round(medidasrpsordenado[i],4)))
            f.write(' ')
            f.write(str(round(dadosfiltrados1[i],4)))
            f.write(' ')
            f.write(str(round(dadosfiltrados2[i],4)))
            f.write('\n')

        f.seek(f.tell())
        f.write(time.strftime( "%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
        f.close()

        worksheet.write(3, 15, "medidas organizadas filtradas")

        for i in range(0, len(medidasforca1)):###ordenado filtrado

worksheet.write_row(i+5,15,[medidasrpsordenado[i],dadosfiltrados1[i],dadosfiltrado
s2[i]])

#####filtrado#####

        dadosfiltrados1 = self.butter_lowpass_filter(medidasforca1, 6, 20,
1)
        dadosfiltrados2 = self.butter_lowpass_filter(medidasforca2, 6, 20,
1)

        frame.graficos.plot(np.subtract(dadosfiltrados1,dadosfiltrados2),
np.multiply(np.subtract(dadosfiltrados1,dadosfiltrados2),medidasrps)
,medidasrps,222)

        f = open(direc.dir+"-filtrado.txt", 'w')
        f.seek(f.tell())

```

```

f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
f.write('\n')

for i in range(0, len(dadosfiltrados1)):
    f.seek(f.tell())
    f.write(str(round(medidasrps[i],4)))
    f.write(' ')
    f.write(str(round(dadosfiltrados1[i],4)))
    f.write(' ')
    f.write(str(round(dadosfiltrados2[i],4)))
    f.write('\n')

f.seek(f.tell())
f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
f.close()
worksheet.write(3, 5, "medidas filtradas")
for i in range(0, len(medidasforca1)):### filtrado

worksheet.write_row(i+5,5,[medidasrps[i],dadosfiltrados1[i],dadosfiltrados2[i]])

#####
workbook.close()

frame.graficos.plot(np.subtract(medidasforca1,medidasforca2),
np.multiply(np.subtract(medidasforca1,medidasforca2),medidasrps) ,medidasrps,221)

pub.sendMessage("Listenqui",comandogui="Mensagem",mensagemgui="idle")

time.sleep(0.1)
#print "stayin alive"

#print "mataram-me"

def threadlistener(self,comandothread="0",mensagemthread="0"):
    global connected
    global dir
    global diametro
    global isstreaming
    global RPMconnected
    global DYNAconnected
    global ganho1
    global ganho2
    global offset1
    global offset2

    if comandothread == "connectRPM":

        try:
            self.serrps = serial.Serial(port='COM47',baudrate=9600, timeout=2)
            RPMconnected=True

pub.sendMessage("Listenqui",comandogui="EstadoRPM",mensagemgui="Ligado")

except:
    print "falhou"

```

```

if comandothread == "UPDATEDIAM":
    diametro=float(mensagemthread)
    print "actualizado"

if comandothread == "Zero":
    try:
        if RPMconnected:
            self.serrps.write("F")
            RPS=self.serrps.readline()
            mensagemrps=RPS.split(' ')
            if 'Medidas' in mensagemrps[0]:
                offset1=int(mensagemrps[2])
                offset2=int(mensagemrps[3])

                print offset1
                print offset2

            print "Zerado"
    except:
        pass

if comandothread == "Afina1":
    if RPMconnected:
        self.serrps.write("F")
        RPS=self.serrps.readline()
        mensagemrps=RPS.split(' ')
        if 'Medidas' in mensagemrps[0]:
            ganho1=2.0/(int(mensagemrps[2])-offset1)
            print ganho1

        print "afinado"

if comandothread == "Afina2":

    if RPMconnected:
        self.serrps.write("F")
        RPS=self.serrps.readline()
        mensagemrps=RPS.split(' ')
        if 'Medidas' in mensagemrps[0]:
            ganho2=2.0/(int(mensagemrps[3])-offset2)
            print ganho2

        print "afinado"

if comandothread == "Stop":
    isstreaming=False

if comandothread == "Start":
    if RPMconnected:
        isstreaming = True

if comandothread == "dir":
    19+1

```

```

class interface(wx.Frame):
    global dir
    def __init__(self,parent,id):
        wx.Frame.__init__(self,parent,id,'Micro Pico-Hydro Parser',
size=(800,600))
        self.painel=wx.Panel(self)
        self.Bind(wx.EVT_CLOSE, self.OnCloseWindow)

        pub.subscribe(self.GuiListener, "Listenqui")

        #####

        #####barra de estados

        status=self.CreateStatusBar(3)
        self.SetStatusWidths([-1,-4,-1])
        self.SetStatusText('Texto',1)

        #####

#
        #####caixas#####

        CaixabarraCabecalho=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Status')), wx.HORIZONTAL)
        InteriorCaixabarraCabecalho = wx.BoxSizer(wx.HORIZONTAL)
        CaixabarraCabecalho.Add(InteriorCaixabarraCabecalho, 0,
wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)

        CaixabarraTopo=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'valores')), wx.HORIZONTAL)
        InteriorCaixabarraTopo = wx.BoxSizer(wx.HORIZONTAL)
        CaixabarraTopo.Add(InteriorCaixabarraTopo, 0, wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)

        CaixabarraMeio=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'comandos')), wx.HORIZONTAL)
        InteriorCaixabarraMeio = wx.BoxSizer(wx.HORIZONTAL)
        CaixabarraMeio.Add(InteriorCaixabarraMeio, 0, wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)

        CaixabarraFundo=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'captura')), wx.HORIZONTAL)
        InteriorCaixabarraFundo = wx.BoxSizer(wx.HORIZONTAL)
        CaixabarraFundo.Add(InteriorCaixabarraFundo, 0, wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)

```

```

CaixaPrincipal=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'DYNA')),
wx.VERTICAL)

##### barra cabecalho#####

CaixaconectRPM=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'RPM-
DYNA')), wx.VERTICAL)
CaixaDiamrotor=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'diametrorotor')), wx.VERTICAL)
CaixaMensagens=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Mensagens')), wx.VERTICAL)

BotaoLigaRPM=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Connect')
BotaoLigaRPM.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onConnectRPM)

self.RPMstatus=wx.StaticText(self.painel, -1, "Desligado:", pos=(10,10),
size=(100, -1), style=wx.ALIGN_CENTER)

self.DiametroRotor=wx.TextCtrl(self.painel, size=(100, -
1), value=str(diametro))

BotaoUpdateDiam=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Update')
BotaoUpdateDiam.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onUpdateDiam)

self.mensagens=wx.StaticText(self.painel, -1, "Mensagem:", pos=(10,10),
size=(100, -1), style=wx.ALIGN_LEFT)

CaixaconectRPM.Add(BotaoLigaRPM, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
CaixaconectRPM.Add(self.RPMstatus, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

CaixaDiamrotor.Add(self.DiametroRotor, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
CaixaDiamrotor.Add(BotaoUpdateDiam, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

CaixaMensagens.Add(self.mensagens, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_LEFT, 5)

CaixabarraCabecalho.Add(CaixaconectRPM, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
CaixabarraCabecalho.Add(CaixaDiamrotor, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
CaixabarraCabecalho.Add(CaixaMensagens, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

#####barra topo#####

Caixadyna1=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'dyna1 (N)'),
wx.VERTICAL)
Caixadyna2=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'dyna2 (N)'),
wx.VERTICAL)
Caixadynadif=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'dynadif
(N)'), wx.VERTICAL)
CaixaRPS=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'RPS (Hz)'),
wx.VERTICAL)
CaixaRPM=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'RPM (rpm)'),
wx.VERTICAL)

```

```

        CaixaRad=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'w (rad/s)')),
wx.VERTICAL)
        Caixadpotencia=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'potencia
(W)')), wx.VERTICAL)
        Caixapotenciamw=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'potencia
(mW)')), wx.VERTICAL)

        self.dyna1=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        Caixadyna1.Add(self.dyna1, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.dyna2=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        Caixadyna2.Add(self.dyna2, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.dynadif=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        Caixadynadif.Add(self.dynadif, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.RPS=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        CaixaRPS.Add(self.RPS, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.RPM=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        CaixaRPM.Add(self.RPM, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.RADS=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        CaixaRad.Add(self.RADS, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.potencia=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        Caixadpotencia.Add(self.potencia, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.potenciamw=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        Caixapotenciamw.Add(self.potenciamw, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        CaixaBarraTopo.Add(Caixadyna1, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(Caixadyna2, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(Caixadynadif, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(CaixaRPS, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(CaixaRPM, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(CaixaRad, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(Caixadpotencia, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(Caixapotenciamw, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

```

```
#####barra meio#####
```

```

        CaixaZera=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'Zerar')),
wx.VERTICAL)
        CaixaAfina1=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'Afina 1 para
2N')), wx.VERTICAL)
        CaixaAfina2=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'Afina 2 para
2N')), wx.VERTICAL)
        CaixaGraficos=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Grafico')), wx.VERTICAL)

        BotaoZera=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Zera')
        BotaoAfina1=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Afina1')
        BotaoAfina2=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Afina2')
        BotaoGraficos=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Graficos')

        BotaoZera.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onZero)
        BotaoAfina1.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onAfina1)
        BotaoAfina2.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onAfina2)
        BotaoGraficos.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onGraficos)

        CaixaZera.Add(BotaoZera, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaAfina1.Add(BotaoAfina1, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaAfina2.Add(BotaoAfina2, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaGraficos.Add(BotaoGraficos, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        CaixabarraMeio.Add(CaixaZera, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixabarraMeio.Add(CaixaAfina1, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixabarraMeio.Add(CaixaAfina2, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixabarraMeio.Add(CaixaGraficos, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        #####barra fim#####

        CaixaDirectoria=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'Dir')),
wx.VERTICAL)
        CaixaCaptura=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'Captura')),
wx.HORIZONTAL)

        self.Directoria=wx.TextCtrl(self.painel,value=direc.getaddress(),
size=(300,-1),style=wx.TE_PROCESS_ENTER)
        CaixaDirectoria.Add(self.Directoria, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.Directoria.Bind(wx.EVT_TEXT_ENTER, self.onDir)

        BotaoStop=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Para')
        BotaoStart=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Inicia')

        BotaoStop.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onSTOP)
        BotaoStart.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onStart)

        CaixaCaptura.Add(BotaoStop, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

```

```

CaixaCaptura.Add(BotaoStart, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

CaixabarraFundo.Add(CaixaDirectoria, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
CaixabarraFundo.Add(CaixaCaptura, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

#####

#####

#####caixa principal#####

CaixaPrincipal.Add(CaixabarraCabecalho, 0, wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)
CaixaPrincipal.Add(CaixabarraTopo, 0, wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)
CaixaPrincipal.Add(CaixabarraMeio, 0, wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)
CaixaPrincipal.Add(CaixabarraFundo, 0, wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)

self.painel.SetSizer(CaixaPrincipal)
CaixaPrincipal.Fit(self)

#####

self.SetSizeHints(400,400,1800,1800)
self.trabalhador=WorkerThread()
self.graficos = plots(self)

#####

def GuiListener(self,comandogui="-1",mensagemgui="-1"):

    if comandogui=="EstadoRPM":
        self.RPMstatus.SetLabel(mensagemgui)

    if comandogui=="EstadoDYNA":
        self.DYNAstatus.SetLabel(mensagemgui)

    if comandogui=="ValDYna":
        Mensagem=mensagemgui.split(' ')
        self.dyna1.SetLabel(Mensagem[0])
        self.dyna2.SetLabel(Mensagem[1])
        self.dynadif.SetLabel(Mensagem[2])

    if comandogui=="ValRPM":
        try:
            #Mensagem=mensagemgui.split(' ')
            self.RPS.SetLabel(mensagemgui)
            self.RPM.SetLabel(str(60*float(mensagemgui)))
            self.RADS.SetLabel(str(2*3.1415*float(mensagemgui)))
        except:
            print "erro2"

```

```

    if comandogui=="ValPOT":
        self.potencia.SetLabel(mensagemgui)
        self.potenciamw.SetLabel(str(float(mensagemgui)*1000))

    if comandogui=="Mensagem":
        self.mensagens.SetLabel(mensagemgui)

#####

def onConnectRPM(self,event):
    pub.sendMessage("Listenthread",comandothread="connectRPM")

def onUpdateDiam(self,event):
    pub.sendMessage("Listenthread",comandothread="UPDATEDIAM",mensagemthread=self.DiametroRotor.GetLineText(1))

def onZero(self,event):
    pub.sendMessage("Listenthread",comandothread="Zero")

def onAfina1(self,event):
    pub.sendMessage("Listenthread",comandothread="Afina1")

def onAfina2(self,event):
    pub.sendMessage("Listenthread",comandothread="Afina2")

def onGraficos(self,event):
    self.graficos.Show()

def onSTOP(self,event):
    pub.sendMessage("Listenthread",comandothread="Stop")

def onSTART(self,event):
    pub.sendMessage("Listenthread",comandothread="Start")

def onDir(self,event):
    direc.setadress(self.Directoria.GetLineText(1))
    pub.sendMessage("Listenthread",comandothread="dir")
    self.mensagens.SetLabel("ficheiro mudado")

def OnCloseWindow(self,event):
    global isalive
    isalive=False
    while self.trabalhador.is_alive():
        print "ainda nao morreu"
        pass
    try:
        self.graficos.Destroy()
        self.listaTramas.Destroy()
        self.Destroy()
    except:
        self.Destroy()

```

```
if __name__ == '__main__':  
    app=wx.App()  
    frame=interface(parent=None,id=-1)  
    frame.Show()  
    app.MainLoop()
```

Anexo G. Fluxograma do medidor de potência mecânica

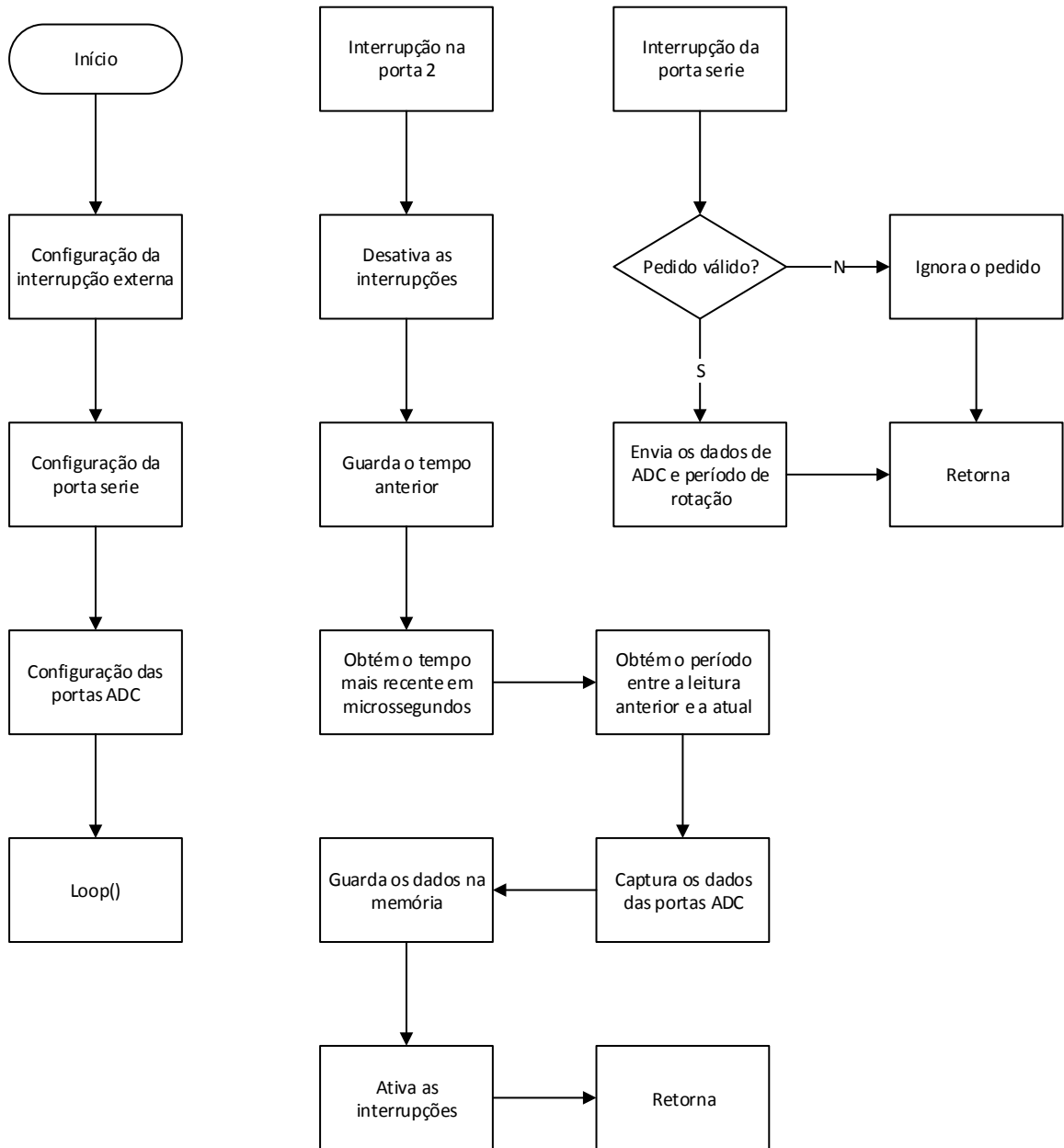


Figura G.1 – Fluxograma do medidor de potência mecânica.

Anexo H. Código Arduíno do medidor de potência mecânica

```
#include <LiquidCrystal.h>
//#include "TimerOne.h"
//LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

const int analogInPin = A0;
const int analogInPin2 = A1;

int sensorValue = 0;
int sensorValue2 = 0;

String comando = "";

String Envia = "E";
String Enviaforcado = "F";

int passou=0;
int capturado=0;
int fezoverflow=0;

////

unsigned long time=0;
unsigned long timeold=0;
unsigned long periodo=0;;

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(0, rodou, FALLING);

}

void loop() {

}

void rodou() {
  noInterrupts();

  timeold=time;
  time=micros();
  periodo=time-timeold;
  digitalWrite(13, !digitalRead(13));

  sensorValue=analogRead(analogInPin);
  sensorValue2=analogRead(analogInPin2);

  //capturado=1;

  //Timer1.restart();
  interrupts();
}
```

```

void enviadados () {

    Serial.print("Medidas ");
    Serial.print(periodo);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(sensorValue);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(sensorValue2);

}

void enviadadosforcado () {

    sensorValue=analogRead(analogInPin);
    sensorValue2=analogRead(analogInPin2);
    capturado=0;
    Serial.print("Medidas ");
    Serial.print(periodo);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(sensorValue);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(sensorValue2);

}

void serialEvent () {
    while (Serial.available ()) {
        comando += (char)Serial.read();

    }

    if (comando == Envia) {
        enviadados ();
    }

    if (comando == Enviaforcado) {
        enviadadosforcado ();
    }

    comando = "";
}

```

Anexo I. Fluxograma da interface da carga variável

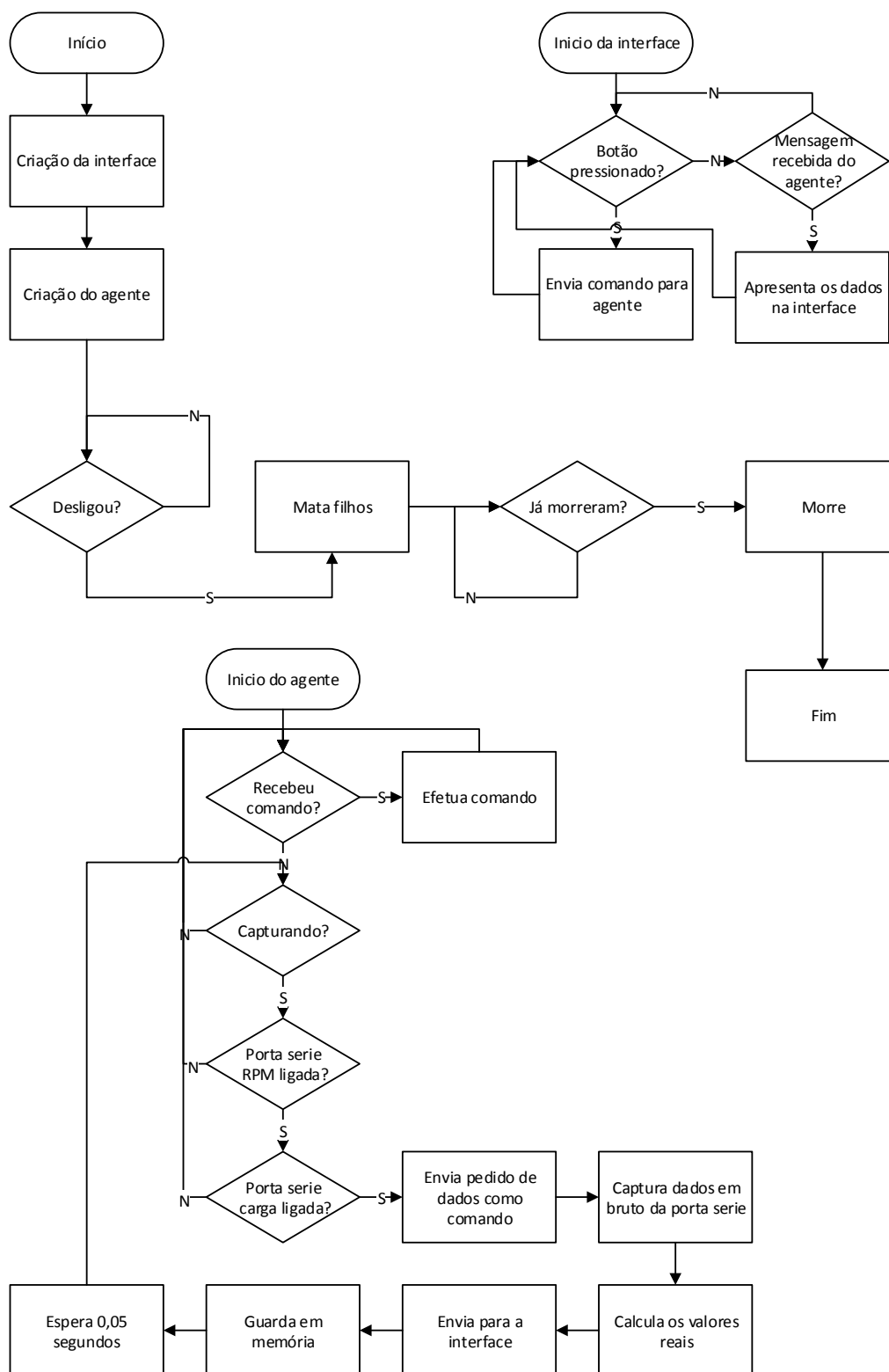


Figura I.1 – Interface do medidor de potência elétrica.

Anexo J. Código python da interface da carga variável

```
import serial
import xlswriter
import time
import wx
from wx.lib.pubsub import pub
import wx.lib.plot as plot
import numpy as np
from scipy.signal import butter, lfilter, freqz
from operator import itemgetter
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_wxagg import FigureCanvasWxAgg as
FigureCanvas
from matplotlib.backends.backend_wxagg import NavigationToolbar2WxAgg as
NavigationToolbar
import random
from pygame import mixer

from threading import Thread

isalive=True
isstreaming=False

RPMconnected=False
LOADconnected=False

numeroDecapturas=1
Incremento=1

medidasrps=[ ]
medidascorrente=[ ]
medidastensao=[ ]

medidascompostas=[ ]

currentGain=1
voltageGain=0.01756058158

capturas=1
medidas=20

updown=0

class link:
    def __init__(self):
        self.port=-1
        self.adress=[]
        self.serialconnection=0

    def createconnection(self):
        self.port=self.findcoordinatorPort(self.avalaiblePorts())

        if self.port!=-1:
            self.serialconnection=serial.Serial(self.port,baudrate=19200,
timeout=6)
```

```

self.adress=self.findrouter(self.serialconnection)

if self.adress!=-1:
    return True
else:
    print "nao encontrou router"
    return False
else:
    print "nao encontrou porta"
    return False

def decodeCommandResponse(self,trama):
    receivedData = trama[7:len(trama)-1]
##aproveita o payload
    return receivedData;
##retorna o payload

#####

def getAmpVolt(self,ser):
    data = self.recebeDados(ser)
    if data == -1:
        return -1
    else:
        comprimento=len(data)
        if comprimento % 8 !=0:
            return -1
        else:
            corrente=[]
            tensao=[]
            for x in range (0,(comprimento/8)-1):
                dado=""
                dado+=data[x*8]
                dado+=data[x*8+1]
                dado+=data[x*8+2]
                dado+=data[x*8+3]
                corrente.append(int(dado))

                dado=""
                dado+=data[x*8+4]
                dado+=data[x*8+5]
                dado+=data[x*8+6]
                dado+=data[x*8+7]
                tensao.append(int(dado))

            corrente2=[x*currentGain for x in corrente]
            tensao2=[x*voltageGain for x in tensao]

            mediacorrente = np.percentile(corrente2,50)
            mediatensao = np.percentile(tensao2,50)

            return (mediacorrente,mediatensao)

#batata

```

```

#####receptor de dados da trama#####
def recebeDados(self,ser):
    try:
##tenta receber dados
        out=ser.readline(1)
##verifica se tem o iniciador certo

        if out=='\x7E':

            Lenght=int((bin(ord(ser.read()))),2)
##obtem o comprimento
            Lenght=Lenght<<8|int((bin(ord(ser.read()))),2)
##obtem o comprimento parte 2
            dadoscrus=list(ser.readline(Lenght+1))
##captura o payload

            return dadoscrus[12:-1];
##junta os pedacos do pacote e retorna
        except:
            return -1;
            #####

#####receptor de tramas gerais#####
def recebeTrama(self,ser):
    try:
##tenta receber dados
        out=ser.readline(1)
##verifica se tem o iniciador certo
        if out=='\x7E':

            Lenght=int((bin(ord(ser.read()))),2)
##obtem o comprimento
            Lenght=Lenght<<8|int((bin(ord(ser.read()))),2)
##obtem o comprimento parte 2
            dadoscrus=list(ser.readline(Lenght+1))
##captura o payload

            return [out]+ [Lenght&0xFF00]+ [Lenght&0xFF]+ dadoscrus;
##junta os pedacos do pacote e retorna
        except:
            return -1;
            #####

#####enviador de pacotes de comandos AT
locais#####
def enviaComandoAT(self,comando,ser):
    #esqueleto do pacote##
    inicio=[0x7E]
    comprimento=[0x00,0x00]
    tipo=[0x08]

```

```

    FrameID=[0x01]
    ATCommand=map(ord,comando)
    checksum=[0x00]
    #####
    trama=tipo+FrameID+ATCommand
os pedacos do pacote

    checksum[0]=0xFF-((sum(trama))&0xFF)
##calcula o checksum

    comprimento[0]=len(trama)&0xFF00
##adiciona o comprimento
    comprimento[1]=len(trama)&0xFF
##adiciona o comprimento

    trama=inicio+comprimento+trama+checksum
##finaliza a trama
    try:
        ser.write(trama)
##enviar trama por porta serie
    except:
        pass

    return;

#####

#####enviador de pacotes de comandos AT
remoto#####
    def enviaComandoATremoto(self,comando,
ser,destino=[0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00]):
    ##esqueleto do pacote##
    inicio=[0x7E]
    comprimento=[0x00,0x00]
    tipo=[0x17]
    FrameID=[0x01]
    A64BitAddress=destino
    A16BitAddress=[0xFF,0xFE]
    RemoteCMDOptions=[0x02]
    ATCommand=map(ord,comando)
    checksum=[0x00]
    #####

trama=tipo+FrameID+A64BitAddress+A16BitAddress+RemoteCMDOptions+ATCommand
##junta os pedacos do pacote

    checksum[0]=0xFF-((sum(trama))&0xFF)
##calcula o checksum

    comprimento[0]=len(trama)&0xFF00
##adiciona o comprimento
    comprimento[1]=len(trama)&0xFF
##adiciona o comprimento

    trama=inicio+comprimento+trama+checksum
##finaliza a trama
    try:
        ser.write(trama)
##enviar trama por porta serie
    except:

```

```

        pass

    return;

#####

##### enviador de tramas gerais#####

def enviaTrama(self,dados,endereco,ser):
    ##esqueleto do pacote##
    inicio=[0x7E]
    comprimento=[0x00,0x00]
    tipo=[0x10]
    FrameID=[0x00]
    A64BitAddress=[0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00]
    A16BitAddress=[0xFF,0xFE]
    broadcastradius=[0x00]
    options=[0x00]
    data=[]
    checksum=[0x00]
    #####

    for x in range(0,len(dados)):
        data.append(ord(dados[x]))

    for x in range(0,8):
        A64BitAddress[x]=ord(endereco[x])

trama=tipo+FrameID+A64BitAddress+A16BitAddress+broadcastradius+options+data
##composicao da trama

        checksum[0]=0xFF-((sum(trama))&0xFF)
##calcular checksum

        comprimento[0]=len(trama)&0xFF00
##adicionar o comprimento
        comprimento[1]=len(trama)&0xFF

        trama=inicio+comprimento+trama+checksum
##finalizar a trama

        ser.write(trama)                                     ##envia
a trama pela porta serie
    return;

#####

def availablePorts(self):
    ports = ['COM' + str(i + 1) for i in range(256)]
##cria a lista de portas
    result = []
    for port in ports:
##verifica quais estao disponiveis
        try:
            ser = serial.Serial(port)
            ser.close()

```

```

        result.append(port)
    except (OSError, serial.SerialException):
        pass
    return result;

    def findcoordinatorPort(self,result):
        portacoordenador=-1
        for testlink in result:
            ser = serial.Serial(testlink,baudrate=19200, timeout=0.1)    ##
            cria uma ligacao com timeout curto
            self.enviaComandoAT('VR',ser);
            ## envio do comando AT para enviar o nome do componente
            out=ser.readline(80)    ##
            le o conteudo da porta serie
            if out[8]=='!':    ##
            se for do tipo coordenador
                portacoordenador=testlink    ##
            guarda a porta do coordenador
                ser.close()    ##
            fecha a porta com
                break    ##
            quebra o for
                ser.close()    ##
            fecha a porta com
                return portacoordenador;

    def findrouter(self,ser):
        Router64BitAddress=-1
        self.enviaComandoAT('NT',ser);
        ## envia o comando AT Node Discovery Timeout para avisar todos os nos
        ## da rede relativamente ao timeout do Network Discovery
        dadosRouter=self.recebeTrama(ser);
        ## recupera a trama
        self.enviaComandoATremoto('DNH20PowerRouter',ser);
        ## envia o mando AT Node Discover
        dadosRouter=self.recebeTrama(ser);
        ## recebe e guarda a resposta
        if dadosRouter!=-1:
            payload = self.decodeCommandResponse(dadosRouter);    ##
            manda obter os dados de interesse
            #if ((''.join(payload)).find("H20PowerRouter"))!=-1:
            ## verifica se o no e o router
            if payload[0]=='\x00':    ## verifica se o no e o
            router
                Router64BitAddress = payload[3:11]
            return Router64BitAddress

class plots(wx.Frame):
    def __init__(self, parent):
        wx.Frame.__init__(self, None, title='graficos', size=(800,600))

```

```

        self.parent = parent
#        background = wx.StaticBitmap(self, -1,
(wx.Image('coordenador.png', wx.BITMAP_TYPE_ANY).ConvertToBitmap()), (0,
0))
        painel = wx.Panel(self)
        self.figure=plt.figure()
        self.canvas = FigureCanvas(self,-1, self.figure)
        self.toolbar = NavigationToolbar(self.canvas)
        self.toolbar.Hide()
        self.Bind(wx.EVT_CLOSE, self.OnCloseWindow)
        self.SetSize((1200,600))
        self.canvas.SetSize((1200,600))
        self.Show()

    def plot(self,data,axis,onde):

        ax = self.figure.add_subplot(onde)
        ax.hold(False)
        ax.plot(axis, data )
        plt.grid(True)
        self.canvas.draw()

    def OnCloseWindow(self,event):
        self.Show(False)

class directoria:
    def __init__(self):
        self.dir='tese'

    def setadress(self,adress):
        self.dir=adress
        print adress

    def getadress(self):
        return self.dir

direc=directoria()

#34,2419
class WorkerThread(Thread):

    #####
    def __init__(self):
        Thread.__init__(self)

        pub.subscribe(self.threadlistener, "listenthread")
        self.ligacao=link()
        self.start()

    def butter_lowpass_filter(self, data, order, fs ,cutoff):
#        order = 3
#        fs = 20          # sample rate, Hz
#        cutoff = 2      # desired cutoff frequency of the filter, Hz

```

```

nyq = 0.5 * fs
normal_cutoff = cutoff / nyq
b, a = butter(order, normal_cutoff, btype='low', analog=False)
y = lfilter(b, a, data)
return y

#####
def run(self):
    global isstreaming
    mixer.init()
    mixer.music.load('D:/microwave-oven-bell-1.wav')

    while isalive:

        if RPMconnected:
            try:
                dadosRPS=[]
                for x in range(0, 4):
                    self.serrps.write("e")
                    RPS=self.serrps.readline()
                    mensagemrps=RPS.split(' ')
                    if 'Periodo' in mensagemrps[0]:
                        periodo=long(mensagemrps[1])

                        if periodo==0:
                            rotacoesporsegundo=0.00;
                        else:

rotacoesporsegundo=round(250000.00/periodo,4)
                            dadosRPS.append(rotacoesporsegundo)

                            rotacoesporsegundo = np.percentile(dadosRPS,50)

pub.sendMessage("listengui",comandogui="ValRPM",mensagemgui=str(rotacoespor
segundo))

            except:
                pass
        if LOADconnected:
            try:
                self.ligacao.enviaTrama("e", self.ligacao.adress,
self.ligacao.serialconnection)

                data =
self.ligacao.getAmpVolt(self.ligacao.serialconnection)

                if data !=-1:
                    corrente=data[0]
                    tensao=data[1]

pub.sendMessage("listengui",comandogui="ValPOT",mensagemgui=str((corrente*t
ensao)/1000))

pub.sendMessage("listengui",comandogui="ValLOAD",mensagemgui=str(corrente)+
" "+str(tensao))

```

```

        except:
            pass

    if LOADconnected and RPMconnected:
        try:

pub.sendMessage("listengui",comandogui="ValTorque",mensagemgui=str(((corrente*tensao)/1000)/(rotacoesporsegundo/6.2831853)))
        except:
            pass

    while isstreaming and RPMconnected and LOADconnected:
        f = open(direc.dir+'.txt', 'w')

        f.seek(f.tell())
        f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
        f.write('\n')

        medidasrps=[ ]
        medidascorrente=[ ]
        medidas tensao=[ ]

        medidascompostas=[ ]

        targetcurrent=0

        capturasfeitas=0
        medidasfeitas=0
        direccao=Incremento

    while isstreaming and RPMconnected and LOADconnected:
        try:

pub.sendMessage("listengui",comandogui="Mensagem",mensagemgui="capturando:
Corrente alvo = " + str(targetcurrent)+ " mA" )

                self.ligacao.enviaTrama("s"+str(targetcurrent),
self.ligacao.adress, self.ligacao.serialconnection)
                #self.serLOAD.write("s"+str(targetcurrent))
                time.sleep(0.2)
#####
##

                mediarp=[ ]

                self.ligacao.enviaTrama("e", self.ligacao.adress,
self.ligacao.serialconnection)
                for x in range(0, 4):
                    self.serrps.write("e")
                    RPS=self.serrps.readline()

                    mensagemrps=RPS.split(' ')
                    if 'Periodo' in mensagemrps[0]:
                        periodo=long(mensagemrps[1])

```

```

        if periodo==0:
            rotacoesporsegundo=0.00;
        else:

rotacoesporsegundo=round(250000.00/periodo,4)

        mediarps.append(rotacoesporsegundo)

        rotacoesporsegundo= np.percentile(mediarps,50)

#####

        corrente=0
        tensao=0

        #self.ligacao.enviaTrama("e", self.ligacao.adress,
self.ligacao.serialconnection)
        #self.serLOAD.write("e")
        data =
self.ligacao.getAmpVolt(self.ligacao.serialconnection)
        ##batata

        if data !=-1:
            corrente=data[0]
            tensao=data[1]

#####

pub.sendMessage("listengui",comandogui="ValRPM",mensagemgui=str(rotacoespors
segundo))

pub.sendMessage("listengui",comandogui="ValLOAD",mensagemgui=str(corrente)+
" "+str(tensao))

pub.sendMessage("listengui",comandogui="ValPOT",mensagemgui=str((corrente*t
ensao)/1000))

pub.sendMessage("listengui",comandogui="ValTorque",mensagemgui=str(((corren
te*tensao)/1000)/(rotacoesporsegundo/6.2831853)))

        f.seek(f.tell())
        f.write(str(rotacoesporsegundo))
        f.write(' ')
        f.write(str(corrente))
        f.write(' ')
        f.write(str(tensao))
        f.write('\n')

        medidasrps.append(rotacoesporsegundo)
        medidascorrente.append(corrente)

```

```

medidastensao.append(tensao)

targetcurrent+=direccao
if (targetcurrent>corrente+(abs(direccao)*10) and
direccao>0 or targetcurrent>900 and direccao>0 or targetcurrent<=0 and
direccao<0) and updown==0:
    #if (targetcurrent>180 and direccao>0 or
targetcurrent>900 and direccao>0 or targetcurrent<=0 and direccao<0) and
updown==0:

        direccao=-direccao
        capturasfeitas+=0.5

if (targetcurrent>corrente+(abs(direccao)*10) and
direccao>0 or targetcurrent>900 and direccao>0 or targetcurrent<=0 and
direccao<0) and updown==1:
    #if (targetcurrent>180 and direccao>0 or
targetcurrent>900 and direccao>0 or targetcurrent<=0 and direccao<0) and
updown==1:

        targetcurrent=0
        self.ligacao.enviaTrama("s"+str(targetcurrent),
self.ligacao.adress, self.ligacao.serialconnection)
        #self.serLOAD.write("s"+str(targetcurrent))
        capturasfeitas+=1
        time.sleep(3)

if capturasfeitas>=capturas:
    isstreaming=False
    mixer.music.play()

except:
    #print "falhou"
    pass
f.seek(f.tell())
f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
f.close()

#####
workbook = xlsxwriter.Workbook(direc.dir+'dados.xlsx')
worksheet = workbook.add_worksheet()
worksheet.write(3, 0,"medidas cruas")
for i in range(0, len(medidasrps)):###direitoexcel

worksheet.write_row(i+5,0,[medidasrps[i],medidascorrente[i],medidastensao[i]
11)

#####

frame.graficos.plot(np.multiply(medidascorrente,medidastensao)
,medidasrps,111)

```

```

#####

#####ordenado#####

    for i in range(0, len(medidascorrente)):

medidascompostas.append([medidasrps[i],medidascorrente[i],medidastensao[i]]
)

        medidascompostasorganizadas=sorted(medidascompostas,
key=itemgetter(0))
        f = open(direc.dir+"-ordenado.txt", 'w')
        f.seek(f.tell())
        f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))

        for i in range(0, len(medidascorrente)):
            f.seek(f.tell())

f.write(str(round(medidascompostasorganizadas[i][0],4)))
        f.write(' ')

f.write(str(round(medidascompostasorganizadas[i][1],4)))
        f.write(' ')

f.write(str(round(medidascompostasorganizadas[i][2],4)))
        f.write('\n')

        f.seek(f.tell())
        f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
        f.close()

        worksheet.write(3, 10,"medidas organizadas")

        for i in range(0, len(medidascorrente)):###organizadoexcel

worksheet.write_row(i+5,10,medidascompostasorganizadas[i])

        #####ordenado
filtrado#####
        medidasrpsordenado=[ ]
        medidascorrenteordenado=[ ]
        medidastensaoordenado=[ ]

        for i in range(0, len(medidascorrente)):

medidasrpsordenado.append(medidascompostasorganizadas[i][0])

medidascorrenteordenado.append(medidascompostasorganizadas[i][1])

medidastensaoordenado.append(medidascompostasorganizadas[i][2])

```

```

        dadosfiltrados1 =
self.butter_lowpass_filter(medidascorrenteordenado, 6, 20, 1)
        dadosfiltrados2 =
self.butter_lowpass_filter(medidastensaoordenado, 6, 20, 1)

f = open(direc.dir+"-ordenado- filtrado.txt", 'w')
f.seek(f.tell())
f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
f.write('\n')

for i in range(0, len(dadosfiltrados1)):
    f.seek(f.tell())
    f.write(str(round(medidasrpsordenado[i],4)))
    f.write(' ')
    f.write(str(round(dadosfiltrados1[i],4)))
    f.write(' ')
    f.write(str(round(dadosfiltrados2[i],4)))
    f.write('\n')

f.seek(f.tell())
f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
f.close()

worksheet.write(3, 15,"medidas organizadas filtradas")

for i in range(0, len(medidascorrente)):###ordenado
filtrado

worksheet.write_row(i+5,15,[medidasrpsordenado[i],dadosfiltrados1[i],dadosf
iltrados2[i]])

#####filtrado#####

        dadosfiltrados1 =
self.butter_lowpass_filter(medidascorrente, 6, 20, 1)
        dadosfiltrados2 = self.butter_lowpass_filter(medidastensao,
6, 20, 1)

f = open(direc.dir+"-filtrado.txt", 'w')
f.seek(f.tell())
f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
f.write('\n')

for i in range(0, len(dadosfiltrados1)):
    f.seek(f.tell())
    f.write(str(round(medidasrps[i],4)))
    f.write(' ')
    f.write(str(round(dadosfiltrados1[i],4)))
    f.write(' ')
    f.write(str(round(dadosfiltrados2[i],4)))
    f.write('\n')

f.seek(f.tell())
f.write(time.strftime("%H:%M:%S-%d/%m/%Y"))
f.close()
worksheet.write(3, 5,"medidas filtradas")

```

```

        for i in range(0, len(medidascorrente)):### filtrado
worksheet.write_row(i+5,5,[medidasrps[i],dadosfiltrados1[i],dadosfiltrados2
[i]])

#####
workbook.close()

#####

        self.ligacao.enviaTrama("s0", self.ligacao.adress,
self.ligacao.serialconnection)
        #self.serLOAD.write("s"+str(0))

pub.sendMessage("listengui",comandogui="Mensagem",mensagemgui="idle")

        time.sleep(0.2)
        #print "stayin alive"

        #print "mataram-me"

def threadlistener(self,comandothread="0",mensagemthread="0"):
    global connected
    global dir
    global isstreaming
    global RPMconnected
    global LOADconnected
    global capturas
    global Incremento
    global updown

    global isalive

    if comandothread == "connectRPM":

        try:
            self.serrps = serial.Serial(port='COM50',baudrate=9600,
timeout=2)
            RPMconnected=True

pub.sendMessage("listengui",comandogui="EstadoRPM",mensagemgui="Ligado")

        except:
            print "falhou a conecter rpm"

    if comandothread == "connectLOAD":

        try:
            if self.ligacao.createconnection():

pub.sendMessage("listengui",comandogui="EstadoLOAD",mensagemgui="Ligado")
            LOADconnected=True

```

```

#                 self.serLOAD = serial.Serial(port='COM6',baudrate=9600,
timeout=2)
#                 LOADconnected=True
#
pub.sendMessage("listengui",comandogui="EstadoLOAD",mensagemgui="Ligado")

        except:
            print "falhou a conectar carga"

        if comandothread == "UpdateCurrent":
            corrente=int(mensagemthread)
            if LOADconnected:
                self.ligacao.enviaTrama("s"+str(corrente),
self.ligacao.adress, self.ligacao.serialconnection)
                #self.serLOAD.write("s"+str(corrente))

        if comandothread == "UpdateCapturas":
            capturas=int(mensagemthread)

pub.sendMessage("listengui",comandogui="Mensagem",mensagemgui="Numero de
capturas: " + str(capturas) )

        if comandothread == "UpdateSequencia":
            updown=int(mensagemthread)

        if comandothread == "UpdateIncremento":
            Incremento=int(mensagemthread)

pub.sendMessage("listengui",comandogui="Mensagem",mensagemgui="Incremento
de: " + str(Incremento) )

        if comandothread == "morre":
            isalive=False

        if comandothread == "Stop":
            isstreaming=False

        if comandothread == "Start":
            if RPMconnected and LOADconnected:
                isstreaming = True

#                 if comandothread == "dir":
#                     pass

class interface(wx.Frame):
    global dir
    def __init__(self,parent,id):
        wx.Frame.__init__(self,parent,id,'LoadMaster-V1', size=(800,600))

```

```

self.painel=wx.Panel(self)
self.Bind(wx.EVT_CLOSE, self.OnCloseWindow)

pub.subscribe(self.GuiListener, "listengui")

#####

#####barra de estados

status=self.CreateStatusBar(3)
self.SetStatusWidths([-1,-4,-1])
self.SetStatusText('Texto',1)

#####
#
#####caixas#####

    CaixabarraCabecalho=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -
1, 'Status')), wx.HORIZONTAL)
    InteriorCaixabarraCabecalho = wx.BoxSizer(wx.HORIZONTAL)
    CaixabarraCabecalho.Add(InteriorCaixabarraCabecalho, 0,
wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)

    CaixabarraTopo=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'valores')), wx.HORIZONTAL)
    InteriorCaixabarraTopo = wx.BoxSizer(wx.HORIZONTAL)
    CaixabarraTopo.Add(InteriorCaixabarraTopo, 0,
wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)

    CaixabarraMeio=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'comandos')), wx.HORIZONTAL)
    InteriorCaixabarraMeio = wx.BoxSizer(wx.HORIZONTAL)
    CaixabarraMeio.Add(InteriorCaixabarraMeio, 0,
wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)

    CaixabarraFundo=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'captura')), wx.HORIZONTAL)
    InteriorCaixabarraFundo = wx.BoxSizer(wx.HORIZONTAL)
    CaixabarraFundo.Add(InteriorCaixabarraFundo, 0,
wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)

    CaixaPrincipal=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'LOADMASTER')), wx.VERTICAL)

##### barra cabecalho#####

    CaixaconectRPM=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'RPM')), wx.VERTICAL)

```

```

        CaixaconectLOAD=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'LOAD')), wx.VERTICAL)
        CaixaMensagens=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Mensagens')), wx.VERTICAL)

        BotaoLigaRPM=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Connect')
        BotaoLigaRPM.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onConnectRPM)

        BotaoLigaLOAD=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Connect')
        BotaoLigaLOAD.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onConnectLOAD)

        self.RPMstatus=wx.StaticText(self.painel,-
1,"Desligado:",pos=(10,10), size=(100,-1),style=wx.ALIGN_CENTER)

        self.LOADstatus=wx.StaticText(self.painel,-
1,"Desligado:",pos=(10,10), size=(100,-1),style=wx.ALIGN_CENTER)

        self.mensagens=wx.StaticText(self.painel,-
1,"Mensagem:",pos=(10,10), size=(100,-1),style=wx.ALIGN_LEFT)

        CaixaconectRPM.Add(BotaoLigaRPM, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaconectRPM.Add(self.RPMstatus, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        CaixaconectLOAD.Add(BotaoLigaLOAD, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaconectLOAD.Add(self.LOADstatus, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        CaixaMensagens.Add(self.mensagens, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_LEFT, 5)

        CaixabarraCabecalho.Add(CaixaconectRPM, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER,
5)
        CaixabarraCabecalho.Add(CaixaconectLOAD, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER,
5)
        CaixabarraCabecalho.Add(CaixaMensagens, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER,
5)

        #####barra topo#####

        CaixaAmp=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'Amps
(mA)'), wx.VERTICAL)
        CaixaVolt=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'Volts
(V)'), wx.VERTICAL)
        Caixatorque=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Torque (Nm)'), wx.VERTICAL)
        CaixaRPS=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'RPS
(Hz)'), wx.VERTICAL)
        CaixaRPM=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'RPM
(rpm)'), wx.VERTICAL)
        CaixaRad=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1, 'w
(rad/s)'), wx.VERTICAL)
        Caixadpotencia=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'potencia (W)'), wx.VERTICAL)
        Caixapotenciamw=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'potencia (mW)'), wx.VERTICAL)

```

```

        self.Amp=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        CaixaAmp.Add(self.Amp, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.Volt=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        CaixaVolt.Add(self.Volt, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.torque=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10),
size=(100,-1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        Caixatorque.Add(self.torque, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.RPS=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        CaixaRPS.Add(self.RPS, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.RPM=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        CaixaRPM.Add(self.RPM, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.RADS=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10), size=(100,-
1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        CaixaRad.Add(self.RADS, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.potencia=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10),
size=(100,-1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        Caixadpotencia.Add(self.potencia, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        self.potenciamw=wx.StaticText(self.painel,-1,"0",pos=(10,10),
size=(100,-1),style=wx.ALIGN_CENTER)
        Caixapotenciamw.Add(self.potenciamw, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        CaixaBarraTopo.Add(CaixaAmp, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(CaixaVolt, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(CaixaRPS, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(CaixaRPM, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(CaixaRad, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(Caixadpotencia, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(Caixapotenciamw, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaBarraTopo.Add(Caixatorque, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        #####barra meio#####

        CaixaSetCorrente=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Corrente')), wx.VERTICAL)
        CaixaSetCapturas=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Capturas')), wx.VERTICAL)
        CaixaSetIncremento=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Incremento')), wx.VERTICAL)
        CaixaGraficos=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Grafico')), wx.VERTICAL)

```

```

        self.SetCorrente=wx.SpinCtrl(self.painel, wx.ID_ANY,
value="",style=wx.SP_ARROW_KEYS, min=0, max=900, initial=0)
        self.SetCorrente.Bind(wx.EVT_SPINCTRL, self.onUpdatecurrent)

        self.SetCapturas=wx.SpinCtrl(self.painel, wx.ID_ANY,
value="",style=wx.SP_ARROW_KEYS, min=1, max=10, initial=1)
        self.SetCapturas.Bind(wx.EVT_SPINCTRL, self.onUpdatecapturas)

        self.SetIncremento=wx.SpinCtrl(self.painel, wx.ID_ANY,
value="",style=wx.SP_ARROW_KEYS, min=1, max=10, initial=1)
        self.SetIncremento.Bind(wx.EVT_SPINCTRL, self.onUpdatemedidas)

        BotaoGraficos=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Graficos')
        BotaoGraficos.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onGraficos)

        CaixaSetCorrente.Add(self.SetCorrente, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER,
5)
        CaixaSetCapturas.Add(self.SetCapturas, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER,
5)
        CaixaSetIncremento.Add(self.SetIncremento, 1,
wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixaGraficos.Add(BotaoGraficos, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        CaixabarraMeio.Add(CaixaSetCorrente, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixabarraMeio.Add(CaixaSetCapturas, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        CaixabarraMeio.Add(CaixaSetIncremento, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER,
5)
        CaixabarraMeio.Add(CaixaGraficos, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

        #####barra fim#####

        CaixaDirectoria=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Dir')), wx.VERTICAL)
        CaixaCaptura=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Captura')), wx.HORIZONTAL)
        CaixaSequencia=wx.StaticBoxSizer((wx.StaticBox(self.painel, -1,
'Sequencia')), wx.HORIZONTAL)

        self.Directoria=wx.TextCtrl(self.painel,value=direc.getadress(),
size=(300,-1),style=wx.TE_PROCESS_ENTER)
        CaixaDirectoria.Add(self.Directoria, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
        self.Directoria.Bind(wx.EVT_TEXT_ENTER, self.onDir)

        self.sequencia=wx.RadioButton(self.painel, -1,
style=wx.RA_SPECIFY_ROWS,choices=["UP-DOWN","UP-UP"],name="dasdas")

        self.sequencia.Bind(wx.EVT_RADIOBOX, self.onupdateSequencia)

        BotaoStop=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Para')
        BotaoStart=wx.Button(self.painel, wx.ID_ANY, 'Inicia')

        BotaoStop.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onSTOP)
        BotaoStart.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.onStart)

```

```

CaixaCaptura.Add(BotaoStop, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
CaixaCaptura.Add(BotaoStart, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

CaixaSequencia.Add(self.sequencia, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 2)

CaixabarraFundo.Add(CaixaSequencia, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 3)
CaixabarraFundo.Add(CaixaDirectoria, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)
CaixabarraFundo.Add(CaixaCaptura, 1, wx.ALL|wx.ALIGN_CENTER, 5)

#####

#####

#####caixa principal#####

CaixaPrincipal.Add(CaixabarraCabecalho, 0,
wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)
CaixaPrincipal.Add(CaixabarraTopo, 0, wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)
CaixaPrincipal.Add(CaixabarraMeio, 0, wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)
CaixaPrincipal.Add(CaixabarraFundo, 0, wx.EXPAND|wx.ALIGN_CENTER)

self.painel.SetSizer(CaixaPrincipal)
CaixaPrincipal.Fit(self)

#####

self.SetSizeHints(400,400,1800,1800)
self.trabalhador=WorkerThread()
self.graficos = plots(self)

#####

def GuiListener(self,comandogui="-1",mensagemgui="-1"):

    if comandogui=="EstadoRPM":
        self.RPMstatus.SetLabel(mensagemgui)

    if comandogui=="EstadoLOAD":
        self.LOADstatus.SetLabel(mensagemgui)

    if comandogui=="EstadoDYNA":
        self.DYNAstatus.SetLabel(mensagemgui)

    if comandogui=="ValLOAD":
        Mensagem=mensagemgui.split(' ')
        self.Amp.SetLabel(Mensagem[0])
        self.Volt.SetLabel(Mensagem[1])

    if comandogui=="ValRPM":
        try:

```

```

        #Mensagem=mensagemgui.split(' ')
        self.RPS.SetLabel(mensagemgui)
        self.RPM.SetLabel(str(60*float(mensagemgui)))
        self.RADS.SetLabel(str(2*3.1415*float(mensagemgui)))
    except:
        print "erro2"

    if comandogui=="ValTorque":
        self.torque.SetLabel(mensagemgui)

    if comandogui=="ValPOT":
        self.potencia.SetLabel(mensagemgui)
        self.potenciamw.SetLabel(str(float(mensagemgui)*1000))

    if comandogui=="Mensagem":
        self.mensagens.SetLabel(mensagemgui)

#####

def onConnectRPM(self,event):
    pub.sendMessage("listenthread",comandothread="connectRPM")

def onConnectLOAD(self,event):
    pub.sendMessage("listenthread",comandothread="connectLOAD")

def onUpdateDiam(self,event):
    pub.sendMessage("listenthread",comandothread="UPDATEDIAM",mensagemthread=self.DiametroRotor.GetLineText(1))

def onZero(self,event):
    pub.sendMessage("listenthread",comandothread="Zero")

def onAfina1(self,event):
    pub.sendMessage("listenthread",comandothread="Afina1")

def onAfina2(self,event):
    pub.sendMessage("listenthread",comandothread="Afina2")

def onGraficos(self,event):
    self.graficos.Show()

def onSTOP(self,event):
    pub.sendMessage("listenthread",comandothread="Stop")

def onStart(self,event):
    pub.sendMessage("listenthread",comandothread="Start")

def onDir(self,event):
    direc.setaddress(self.Directoria.GetLineText(1))
    pub.sendMessage("listenthread",comandothread="dir")
    self.mensagens.SetLabel("ficheiro mudado")

def onUpdatecurrent(self,event):
    pub.sendMessage("listenthread",comandothread="UpdateCurrent",mensagemthread=
    self.SetCorrente.GetValue())

```

```

    def onUpdatecapturas (self, event) :

pub.sendMessage ("listenthread",comandothread="UpdateCapturas",mensagemthrea
d= self.SetCapturas.GetValue ())

    def onupdateSequencia (self, event) :

pub.sendMessage ("listenthread",comandothread="UpdateSequencia",mensagemthre
ad= self.sequencia.GetSelection ())

    def onUpdatemedidas (self, event) :

pub.sendMessage ("listenthread",comandothread="UpdateIncremento",mensagemthr
ead= self.SetIncremento.GetValue ())

def OnCloseWindow (self, event) :

    global isalive
pub.sendMessage ("listenthread",comandothread="morre")
    while self.trabalhador.is_alive() :
        #print "ainda nao morreu"
        pass
    try:
        self.graficos.Destroy()
        self.listaTramas.Destroy()
        self.Destroy()
    except:
        self.Destroy()

if __name__ == '__main__':
    app=wx.App()
    frame=interface (parent=None, id=-1)
    frame.Show()
    app.MainLoop()

```

Anexo K. Fluxograma do medidor de potência elétrica

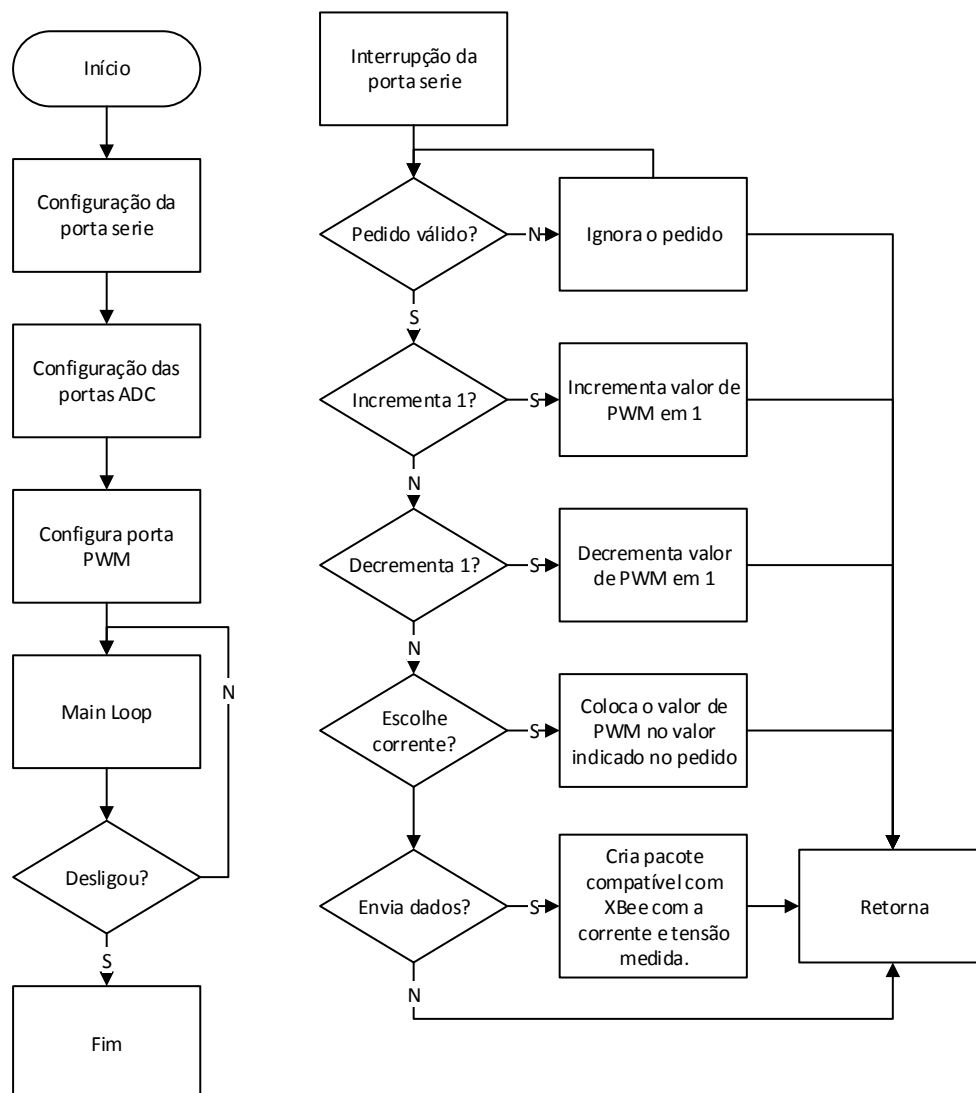


Figura K.1 – Fluxograma do medidor de potência elétrica.

Anexo L. Código Arduino do medidor de potência elétrica

```
#include "TimerOne.h"
int duty = 0;
String comando = "";

const int analogInPin = A0;
const int analogInPin2 = A1;

int sensorCorrente = 0;
int sensorTensao = 0;

String enviaforcado = "f";
String envia = "e";
String incrementa = "i";
String decrementa = "d";
String set = "s";

byte inicio[3];
byte resto[30];
int tamanhoRecepcao = 0;

boolean output = HIGH;

int recepint = 0;

int dadosAmp[10];
int dadosVolt[10];

byte head[] = {0x7E, 0x00, 0x5E, 0x10, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0xFF, 0xFE, 0x00, 0x00 };

byte payload[] = {0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00};

byte checksum = 0x79;

int valorSensor = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(19200);

  Serial.setTimeout(200);

  pinMode(10, OUTPUT);
  Timer1.initialize(1000); // initialize timer1, and set a 1/2
second period
  Timer1.pwm(9, duty); // setup pwm on pin 9, 50% duty cycle
```

```

}

void loop()
{

}

void enviadados() {

    checksum = 0x0D;
    char tempdata[5];
    char tempdataalong[11];

    int indice = 0;
    while (indice < sizeof(payload)) {

        valorSensor = analogRead(analogInPin);
        sprintf( tempdata, "%4d", valorSensor );
        payload[indice] = tempdata[0];
        checksum += payload[indice];
        indice++;
        payload[indice] = tempdata[1];
        checksum += payload[indice];
        indice++;
        payload[indice] = tempdata[2];
        checksum += payload[indice];
        indice++;
        payload[indice] = tempdata[3];
        checksum += payload[indice];
        indice++;

        valorSensor = analogRead(analogInPin2);
        sprintf( tempdata, "%4d", valorSensor );
        payload[indice] = tempdata[0];
        checksum += payload[indice];
        indice++;
        payload[indice] = tempdata[1];
        checksum += payload[indice];
        indice++;
        payload[indice] = tempdata[2];
        checksum += payload[indice];
        indice++;
        payload[indice] = tempdata[3];
        checksum += payload[indice];
        indice++;

    }

    checksum = 0xFF - checksum;

    Serial.write(head, sizeof(head));
    Serial.write(payload, sizeof(payload));
    Serial.write(checksum);
}

void serialEvent() {
    byte checksum = 0;
    while (Serial.available()) {

```

```

Serial.readBytes(inicio, 3); //captura os primeiros 4 bytes para
encontrar
if (inicio[0] == 0x7E) { // o comprimento da trama
    digitalWrite(13, output);
    output = !output;
    tamanhoRecepcao = (inicio[1] << 8) + inicio[2]; //calcula o
comprimento da trama
    Serial.readBytes(resto, tamanhoRecepcao + 1); //vai buscar o
resto da trama

    for (int i = 0; i < tamanhoRecepcao + 1; i++) { //soma os pacotes
para verificar checksum
        checksum += resto[i];
    }
//

    if (checksum == 0xFF) { // o valor do checksum é o
correcto?

        if (resto[0] == 0x90 && resto[12] == 0x65) {
            enviadados();
            digitalWrite(13, output);
            output = !output;
        }

        else if (resto[0] == 0x90 && resto[12] == 0x73) {
            char valor[] = {'0', '0', '0', '0'};
            int j = 4 - (tamanhoRecepcao - 13);

            for (int i = 13; i < tamanhoRecepcao; i++) {
                valor[j] = resto[i];
                j++;
            }

            duty = atoi(valor);
            if (duty > 1023) {
                duty = 1023;
            }
            else if (duty < 0) {
                duty = 0;
            }
            Timer1.setPwmDuty(9, duty);

        }

    }

}

}

}
}

```

Anexo M. Fluxograma do medidor de rotações

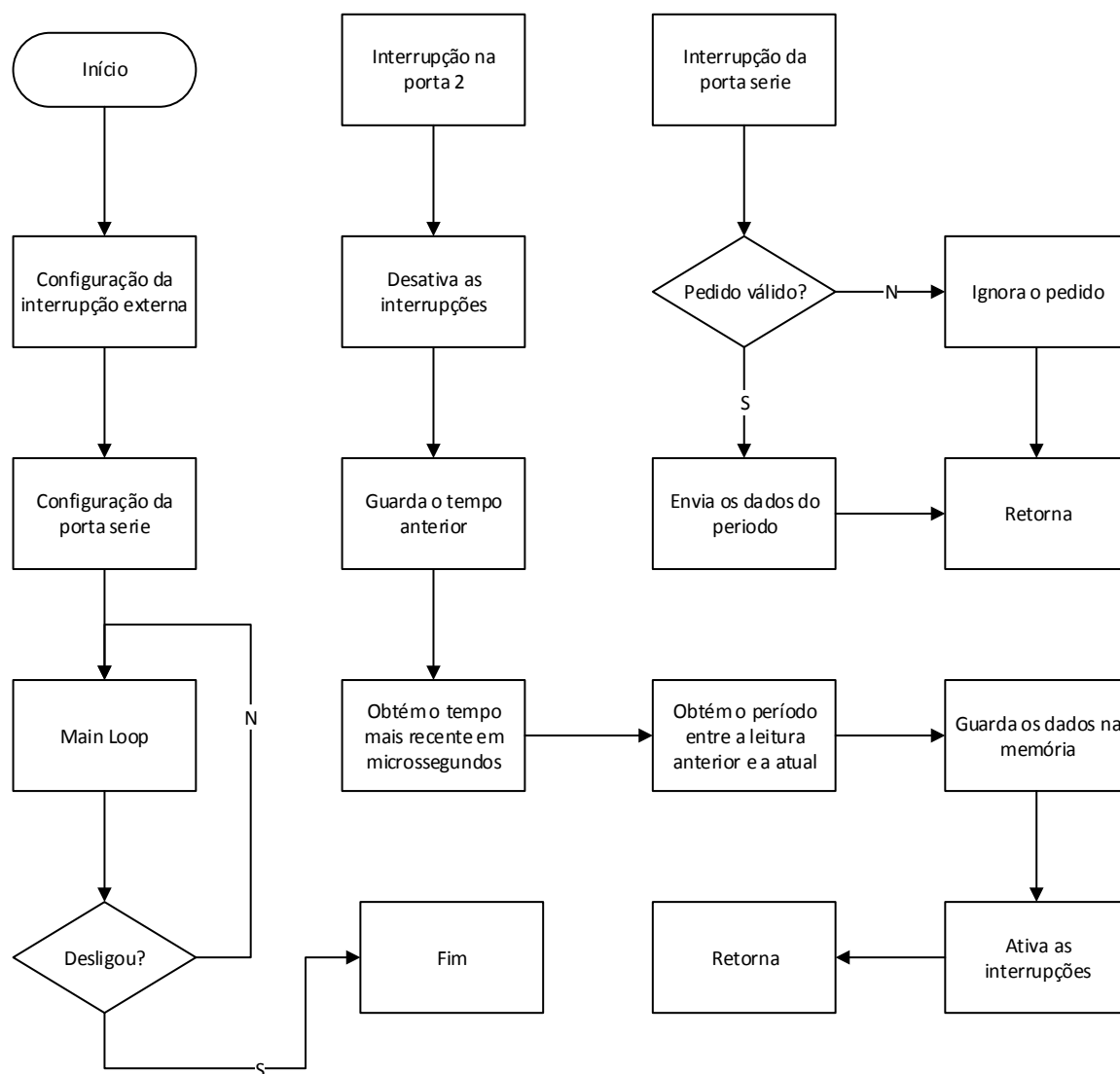


Figura M.1 – Fluxograma do código do medidor de rotações.

Anexo N. Código Arduíno do medidor de rotações

```
unsigned long time=0;
unsigned long timeold=0;
unsigned long periodo=0;

String comando = "";
String Envia = "e";

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13, OUTPUT);

  attachInterrupt(0, rodou, FALLING);
}

void loop() {

  if(time+1500000<micros()){
    periodo=0;
  }

}

void rodou() {
  noInterrupts();
  timeold=time;
  time=micros();
  periodo=time-timeold;
  //Serial.println(periodo);
  digitalWrite(13, !digitalRead(13));
  interrupts();
}

void serialEvent() {
  while (Serial.available()) {
    comando += (char)Serial.read();
    // add it to the inputString:
  }

  if (comando == Envia) {
    Enviadados();
  }

  comando = "";
}

void Enviadados() {

  Serial.print("Periodo ");
  Serial.println(periodo);
}
```

Anexo O. Gráficos de potência mecânica do sistema *Propeller*

Neste anexo são apresentados os dados obtidos com o sistema *Propeller* de forma gráfica.

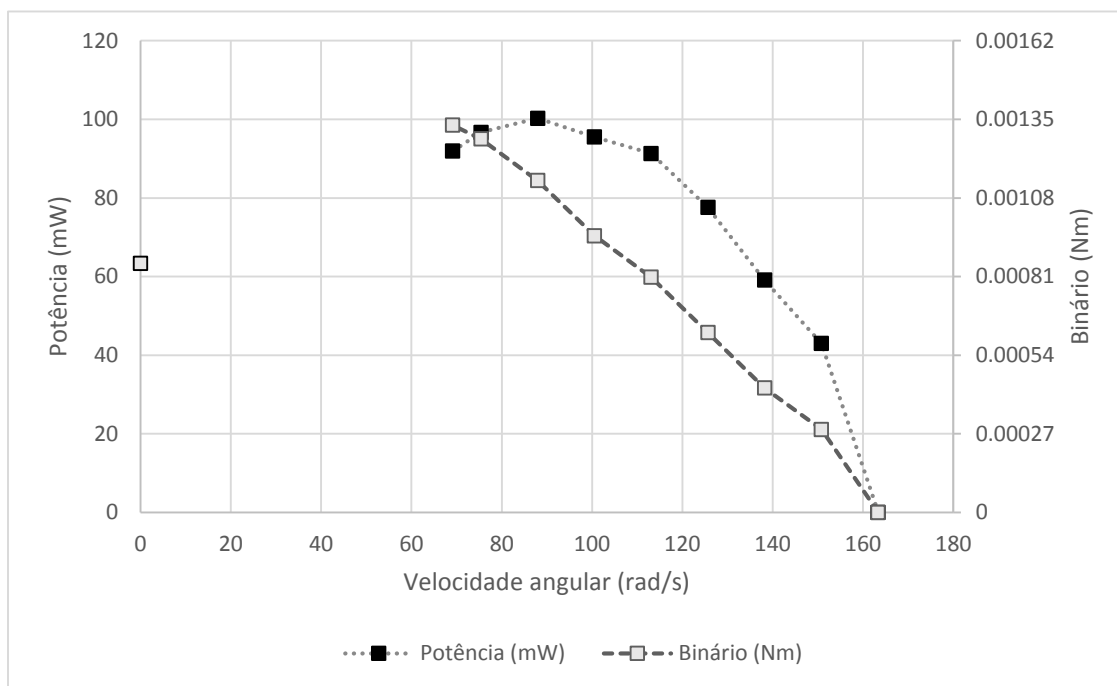


Figura O.1 – Gráfico de potência e binário para o sistema sem bocal e com uma queda de 10cm.

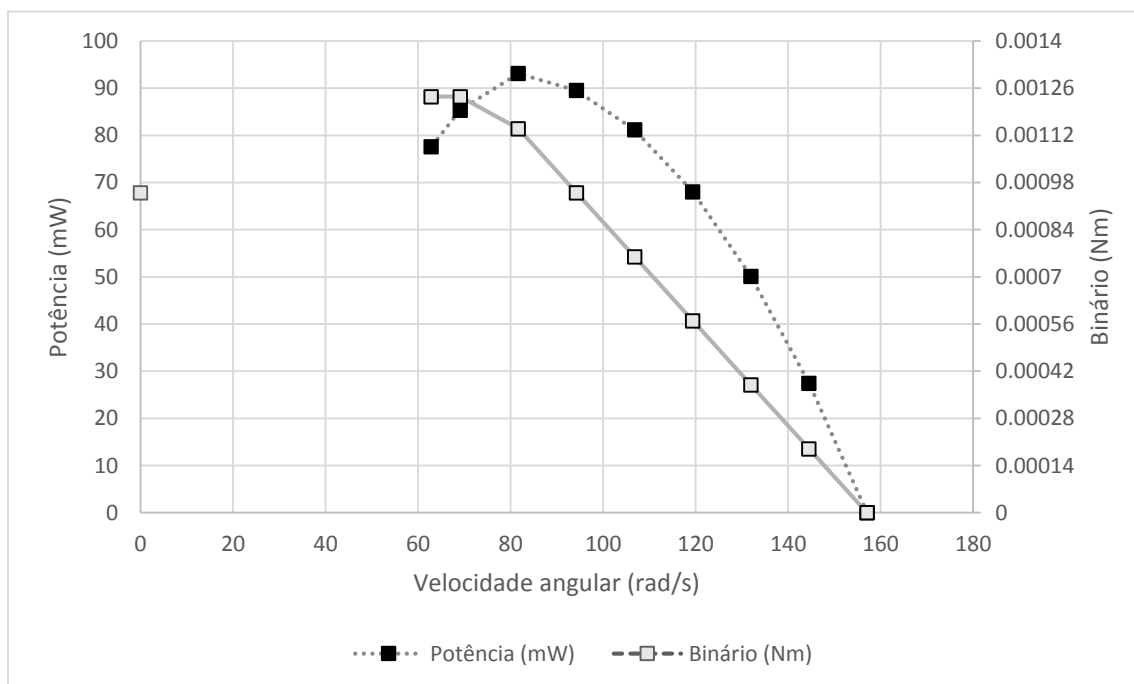


Figura O.2 – Gráfico de potência e binário para o sistema com bocal reto e com uma queda de 10cm.

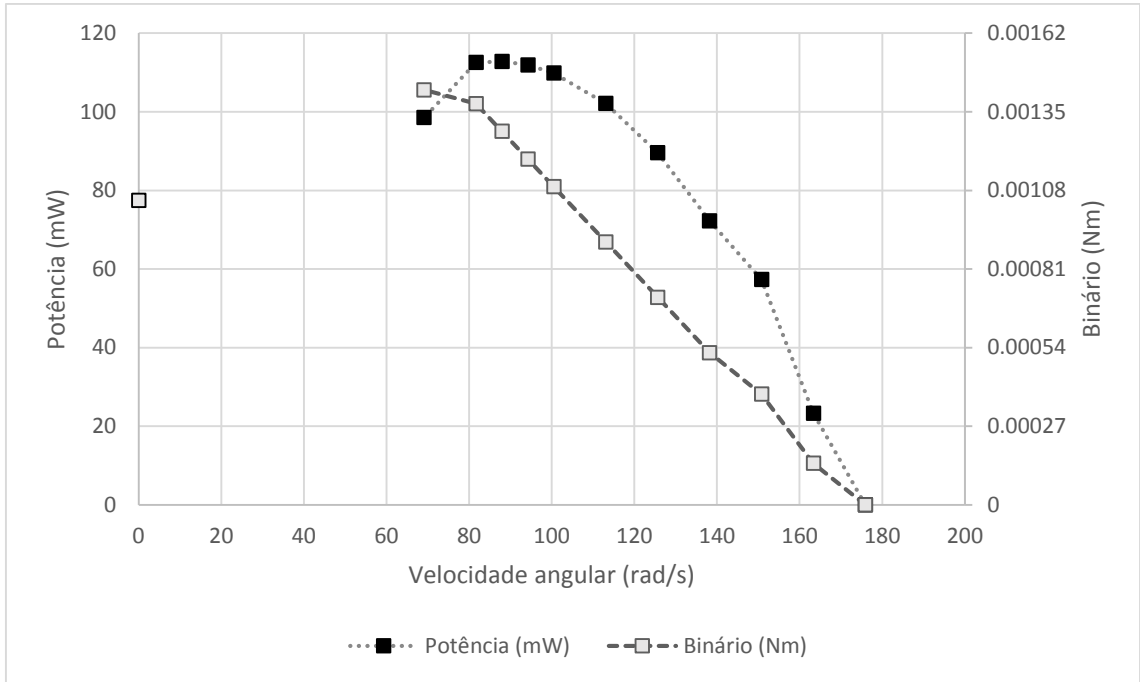


Figura O.3 – Gráfico de potência e binário para o sistema com bocal divergente e com uma queda de 10cm.

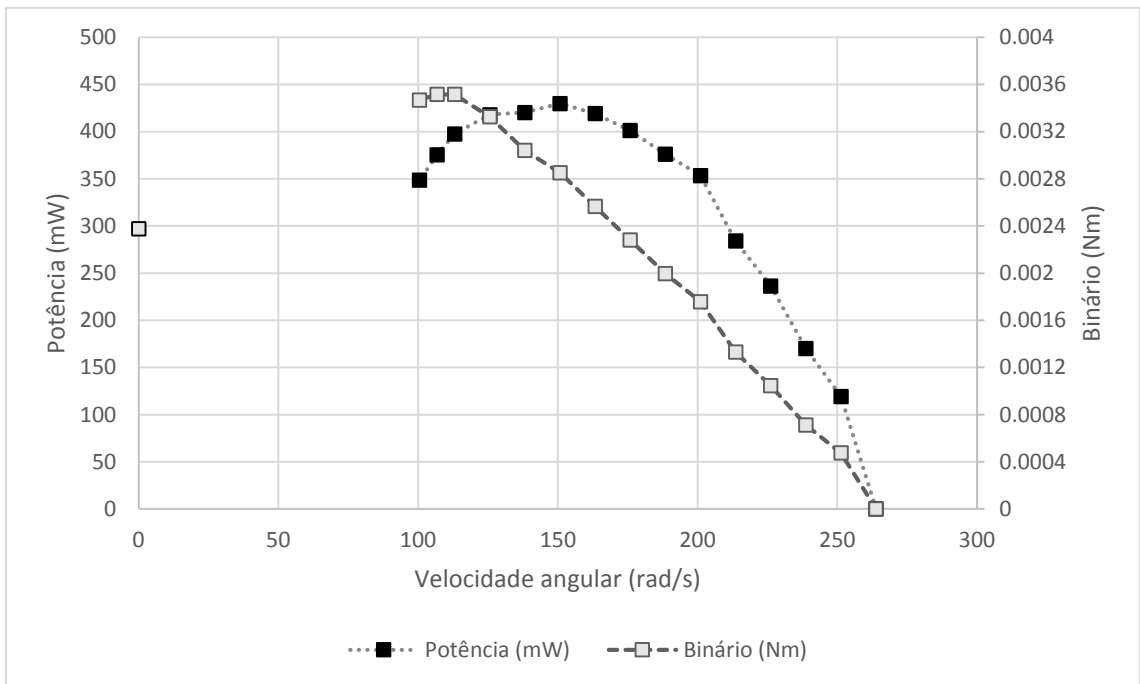


Figura O.4 – Gráfico de potência e binário para o sistema sem bocal e com uma queda de 20cm.

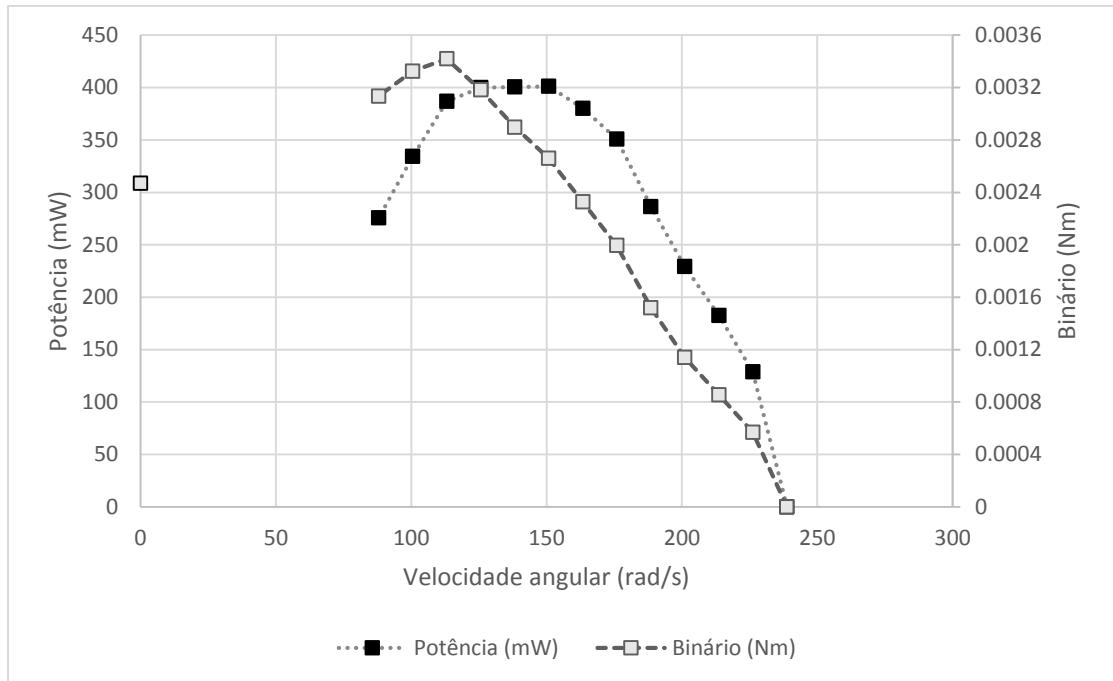


Figura O.5 – Gráfico de potência e binário para o sistema com bocal reto e com uma queda de 20cm.

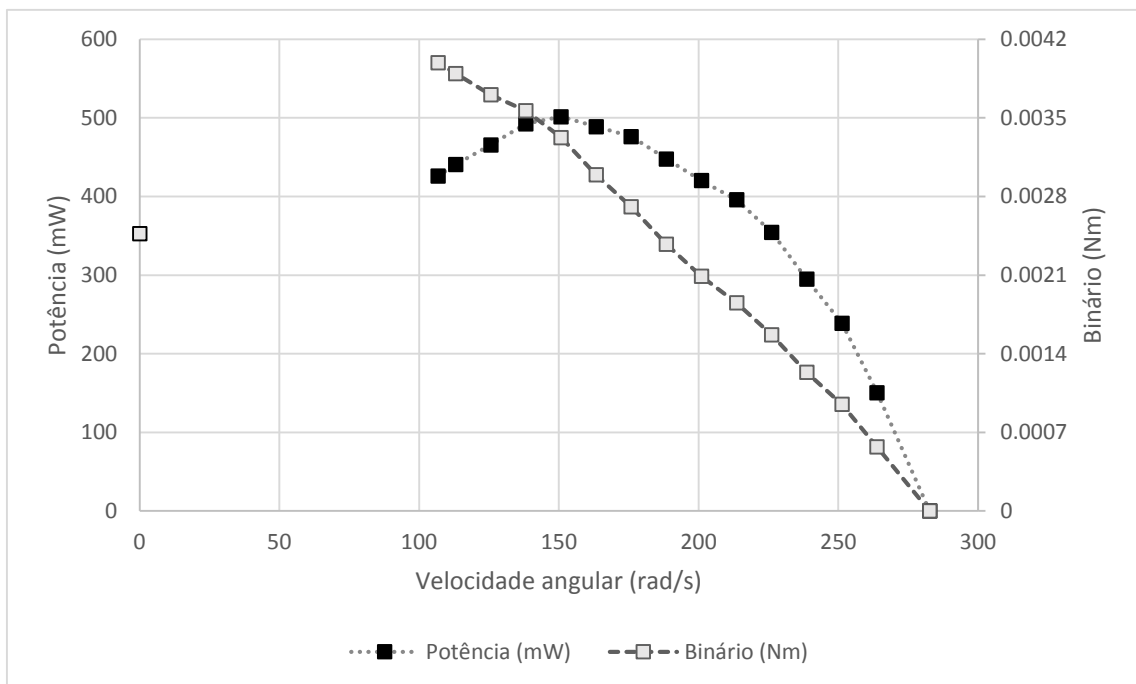


Figura O.6 – Gráfico de potência e binário para o sistema com bocal divergente e com uma queda de 20cm.

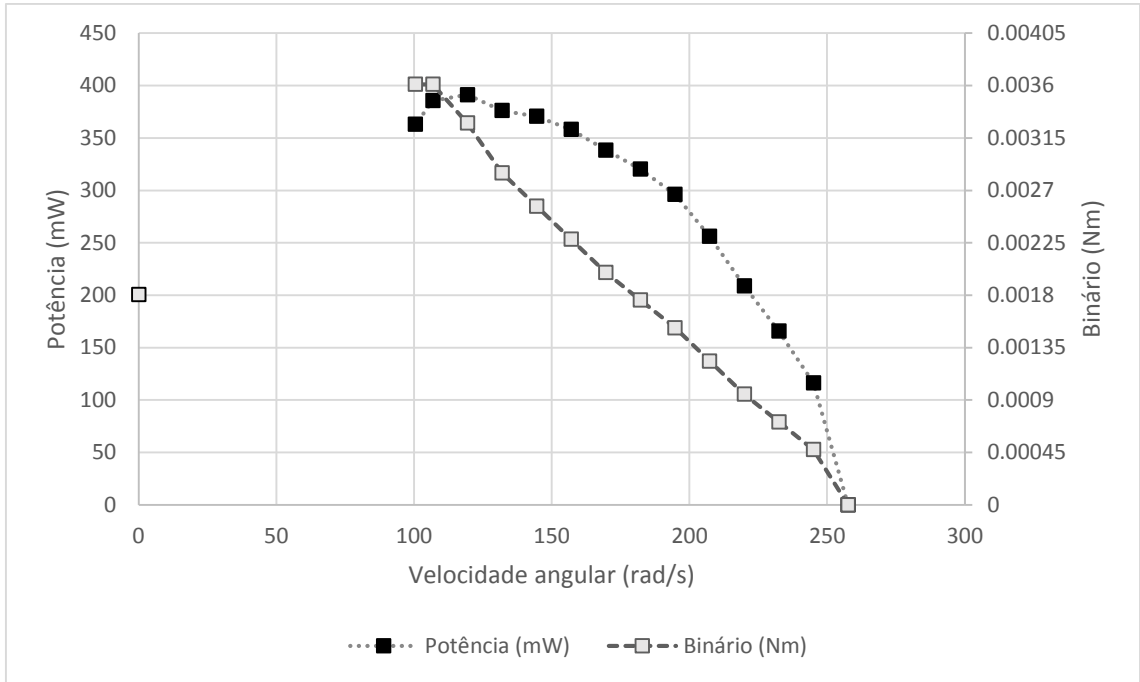


Figura O.7 – Gráfico de potência e binário para o sistema sem bocal e com uma queda de 30cm.

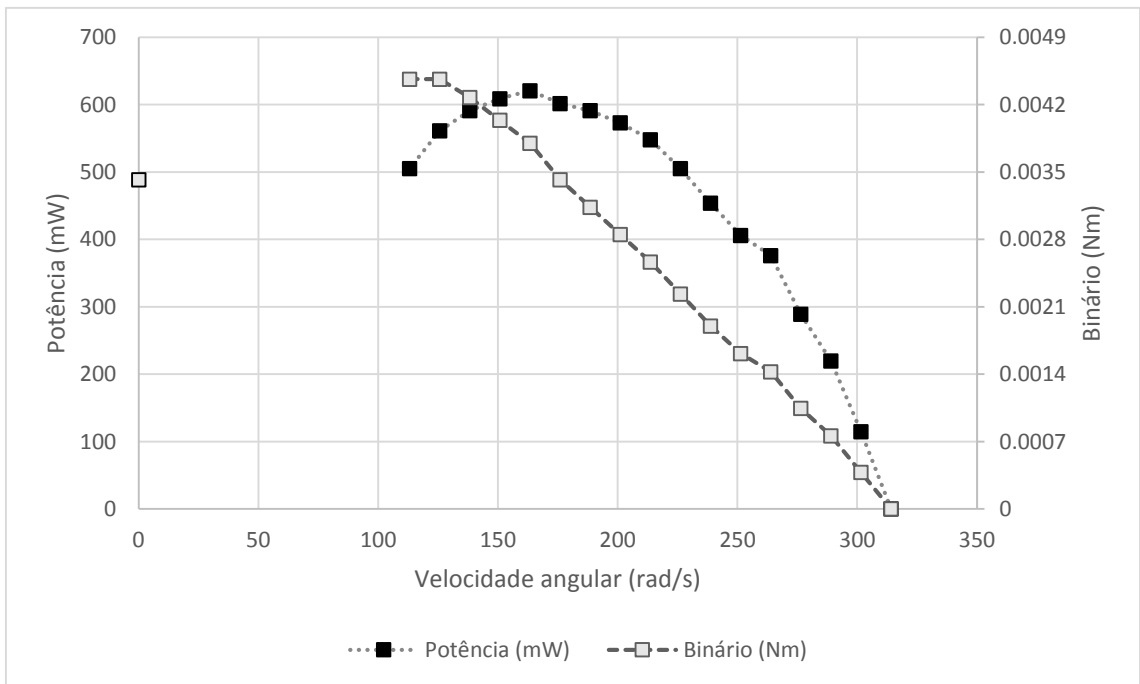


Figura O.8 – Gráfico de potência e binário para o sistema com bocal reto e com uma queda de 30cm.

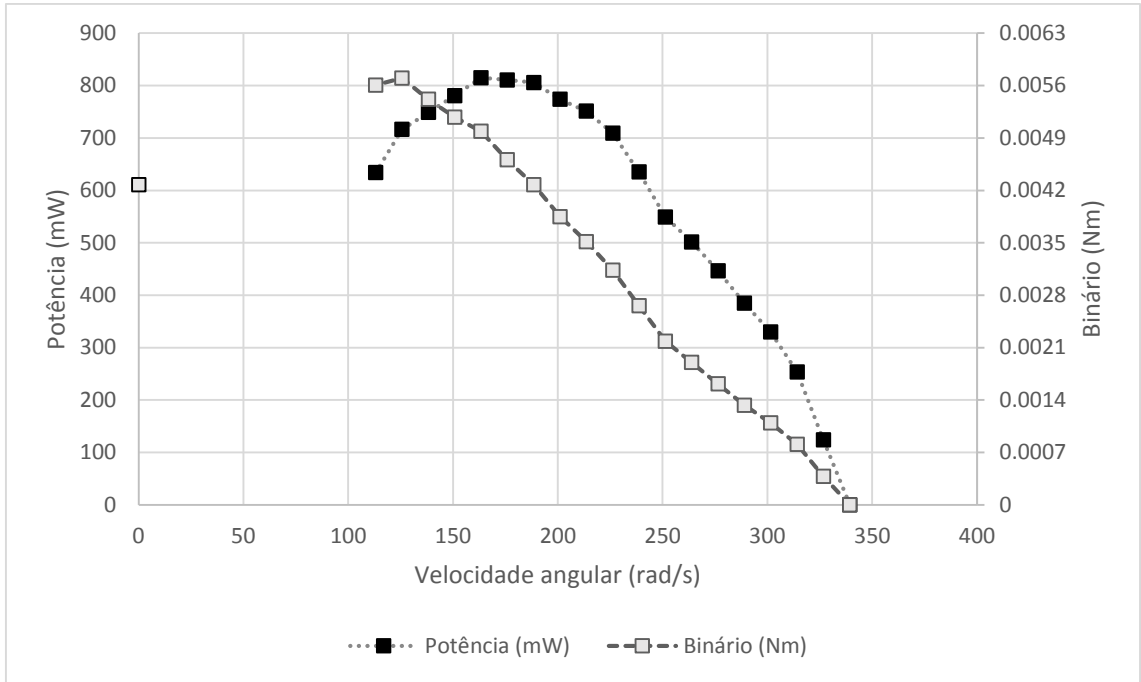


Figura O.9 – Gráfico de potência e binário para o sistema com bocal divergente e com uma queda de 30cm.

Anexo P. Fotografias do sistema *Propeller*

Neste anexo são representadas algumas imagens referentes ao sistema *Propeller*



Figura P.1 – Bomba de reciclagem de água, tanque de estabilização e tanque de captura.



Figura P.2 – Sistema de medição de binário e potência, turbina, sistema de captação e sistema de reciclagem de água.



Figura P.3 – Alinhamento correto do fio.



Figura P.4 – Testes preliminares com o eixo em cobre.



Figura P.5 – Método de medição de caudal.



Figura P.6 – No topo o conjunto de eixo impermeável, prendedor de eixo e apoio do gerador. Na parte inferior o cone, a turbina e uma moeda para escala.

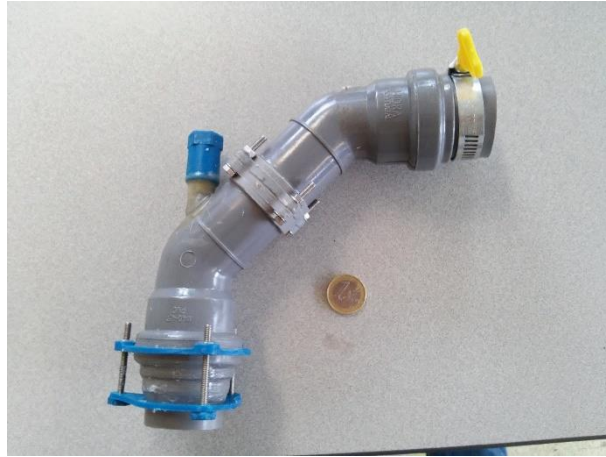


Figura P.7 – Conduto de captura e a encapsulamento da turbina. Moeda para escala.



Figura P.8 – Buraco para o eixo impermeável e rosca do apertador de eixo.



Figura P.9 – Saída de água e parafusos de troca fácil de turbina.

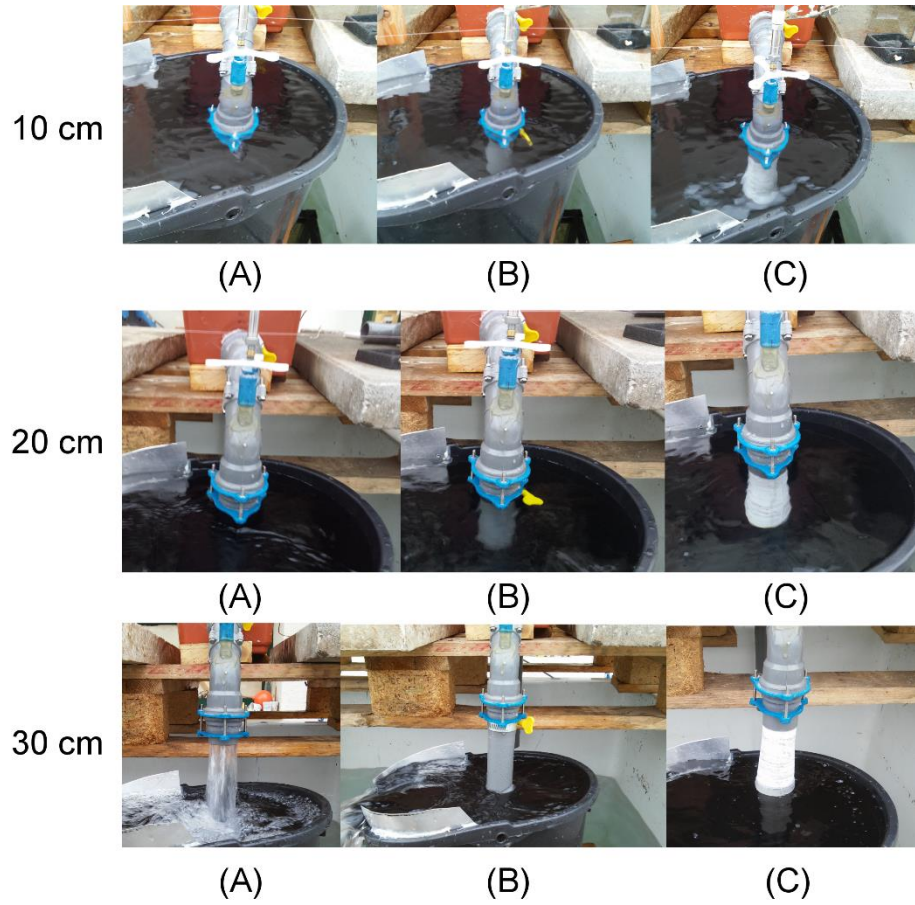


Figura P.10 – Matriz de testes efetuados.

Anexo Q. Fotografias do sistema *Pelton*

Neste anexo são representadas algumas fotos relativas ao sistema *Pelton*.

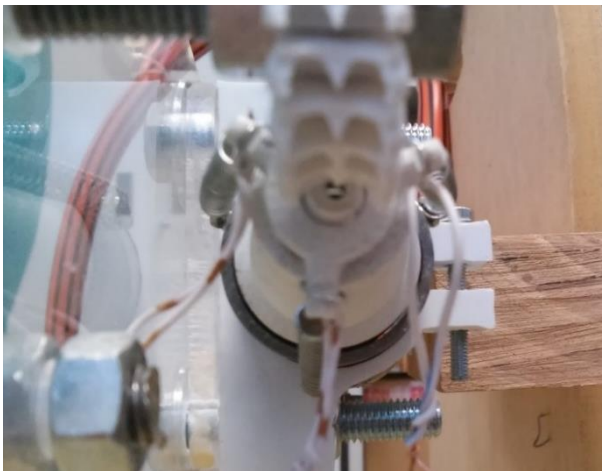


Figura Q.1 – Detalhe do alinhamento do injetor e da turbina.



Figura Q.2 – Cobertura transparente e tubo transparente de realociação de válvula de purga de ar.



Figura Q.3 – Detalhe da estrutura basculante e deslizante. Facilita muito a troca do injetor e turbina.



Figura Q.4 – Detalhe do sistema de troca rápida de injetor e mecanismo de purga de ar.



Figura Q.5 – Mecanismo de aplicação uniforme de verniz.



Figura Q.6 – Turbina 2 uniformemente envernizada.

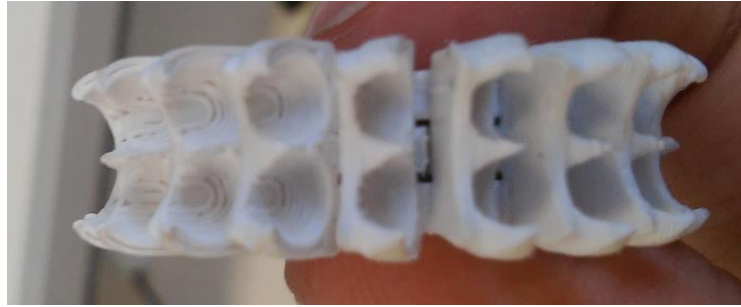


Figura Q.7 – Detalhe da turbina 1.



Figura Q.8 – Detalhe da turbina 2.

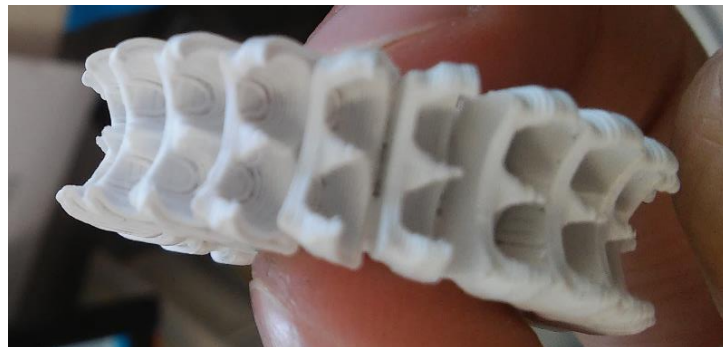


Figura Q.9 – Detalhe da turbina 3.

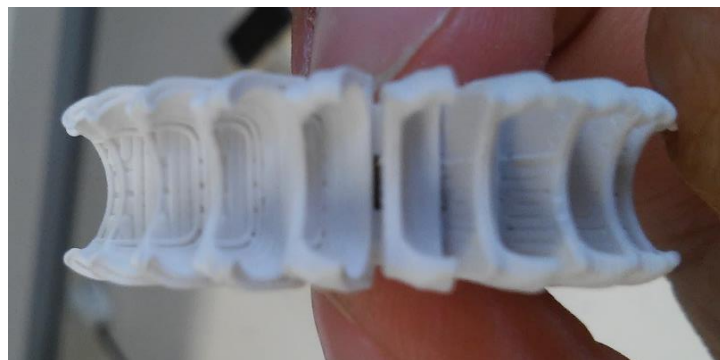


Figura Q.10 – Detalhe da turbina 4.

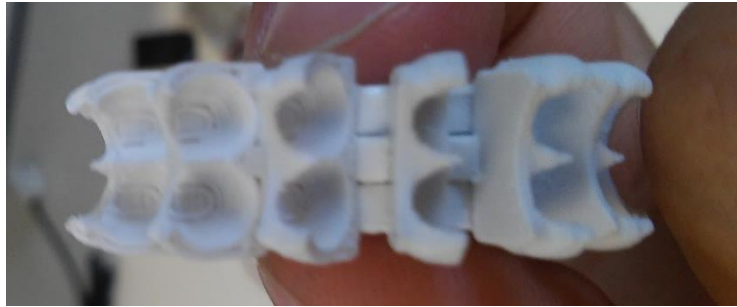


Figura Q.11 – Detalhe da turbina 5.



Figura Q.12 – Detalhe da turbina 6.



Figura Q.13 – Detalhe da turbina 7.

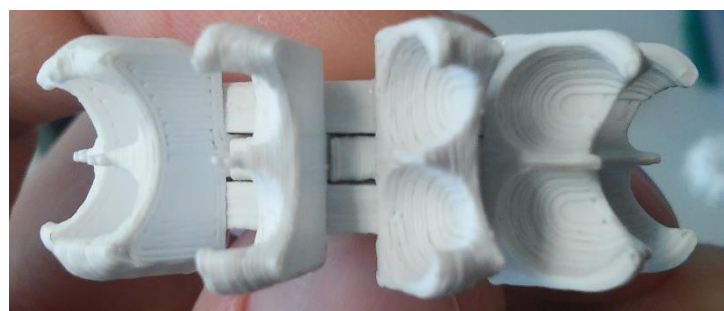


Figura Q.14 – Detalhe da turbina 8.

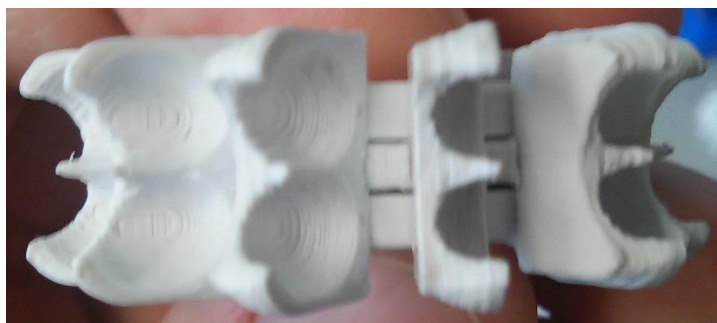


Figura Q.15 – Detalhe da turbina 9.

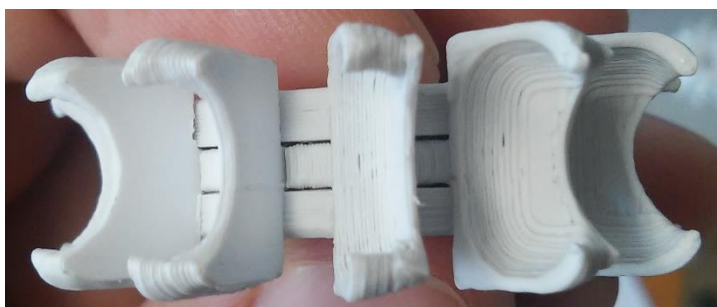


Figura Q.16 – Detalhe da turbina 10.



Figura Q.17 – Detalhe da turbina 11.

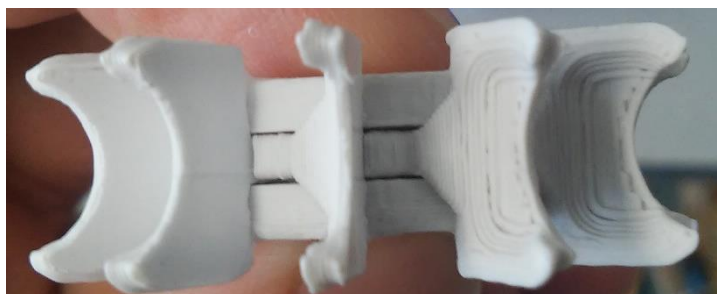


Figura Q.18 – Detalhe da turbina 12.

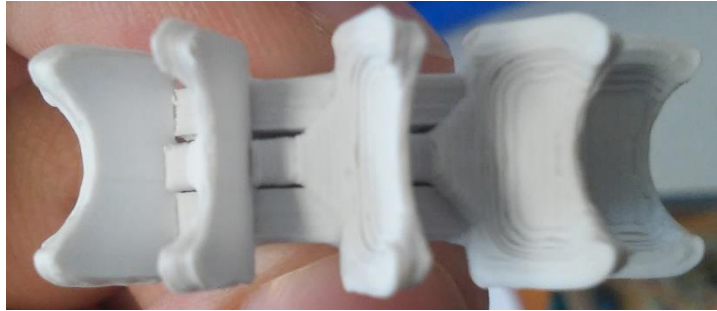


Figura Q.19 – Detalhe da turbina 13.

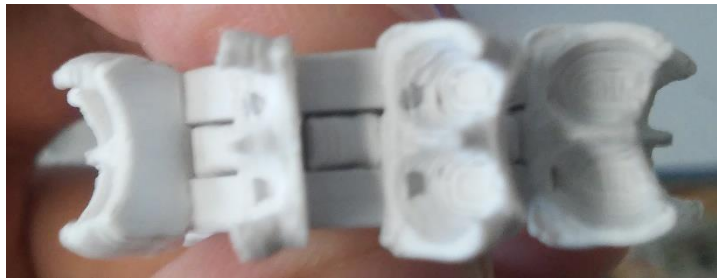


Figura Q.20 – Detalhe da turbina 14.

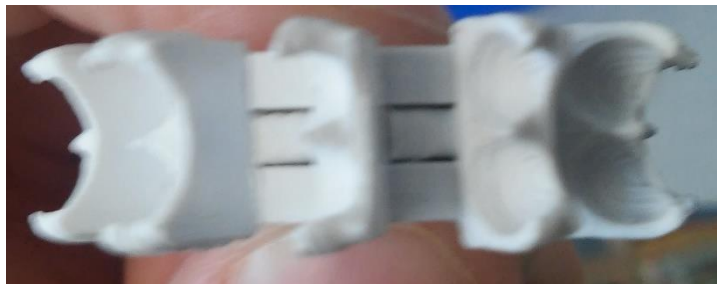


Figura Q.21 – Detalhe da turbina 15.



Figura Q.22 – Detalhe da turbina 16.

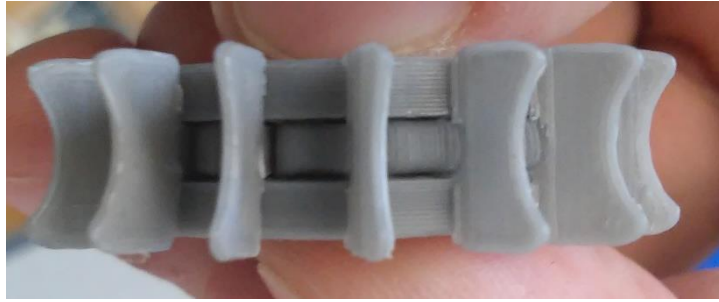


Figura Q.23 – Detalhe da turbina 17.

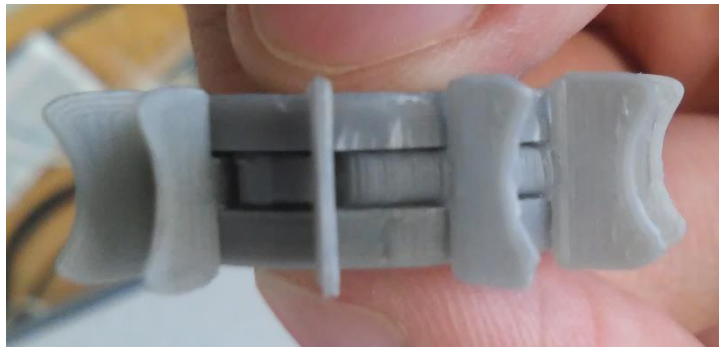


Figura Q.24 – Detalhe da turbina 18.



Figura Q.25 – Detalhe da turbina A.



Figura Q.26 – Detalhe da turbina de metal.



Figura Q.27 – Condições de teste.



Figura Q.28 – Tanque de compensação, tanque de captura e válvula de boia.



Figura Q.29 – Sistema de medição de rotações por minuto.

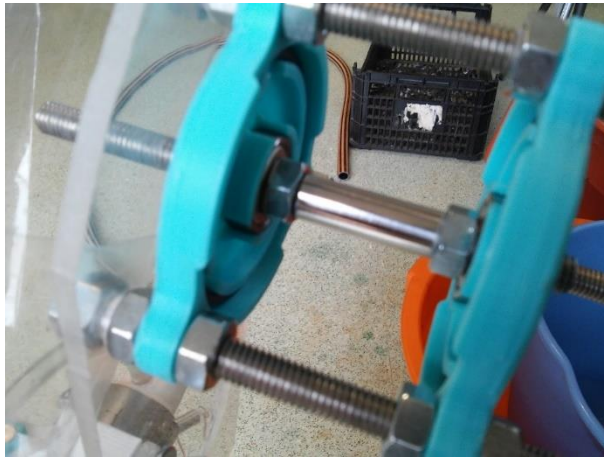


Figura Q.30 – Eixo de inox montado no chassis do gerador no lugar do rotor.



Figura Q.31 – Nível do jato de água.



Figura Q.32 – Medição da velocidade da água para fins de cálculo de queda efetiva.

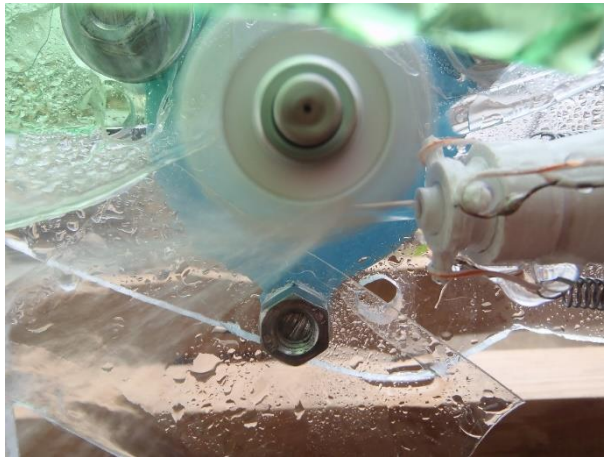


Figura Q.33 – O correto alinhamento do jato e da turbina.



Figura Q.34 – Detalhe da escapatória da água.

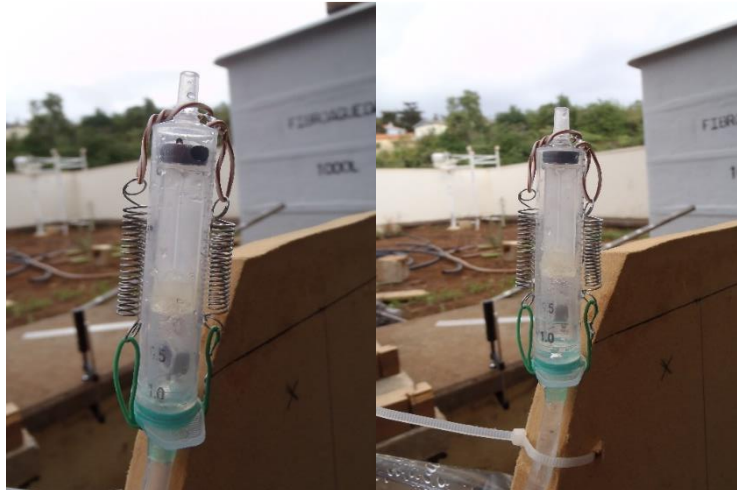


Figura Q.35 – Válvula de purga de ar em funcionamento.



Figura Q.36 – Detalhe da junta de borracha

A Figura Q.37, Figura Q.38, Figura Q.39, Figura Q.40, Figura Q.41, Figura Q.42, Figura Q.43, Figura Q.44 e a Figura Q.45 mostram a qualidade do jato. Para permitir a focagem da câmara e se ter uma referência de escala e opacidade do jato foi colocada uma caneta por trás deste.



Figura Q.37 – Jato do injetor 1



Figura Q.38 – Jato do injetor 2



Figura Q.39 – Jato do injetor 3



Figura Q.40 – Jato do injetor 3A



Figura Q.41 – Jato do injetor 4



Figura Q.42 – Jato do injetor 5



Figura Q.43 – Jato do injetor 6



Figura Q.44 – Jato do injetor 7



Figura Q.45 – Jato do injetor 8

Anexo R. Gráficos de potência mecânica do sistema *Pelton*

Neste anexo estão agrupados os dados dos injetores, potência disponível e dados de potência e binários obtidos nos testes do sistema *Pelton*.

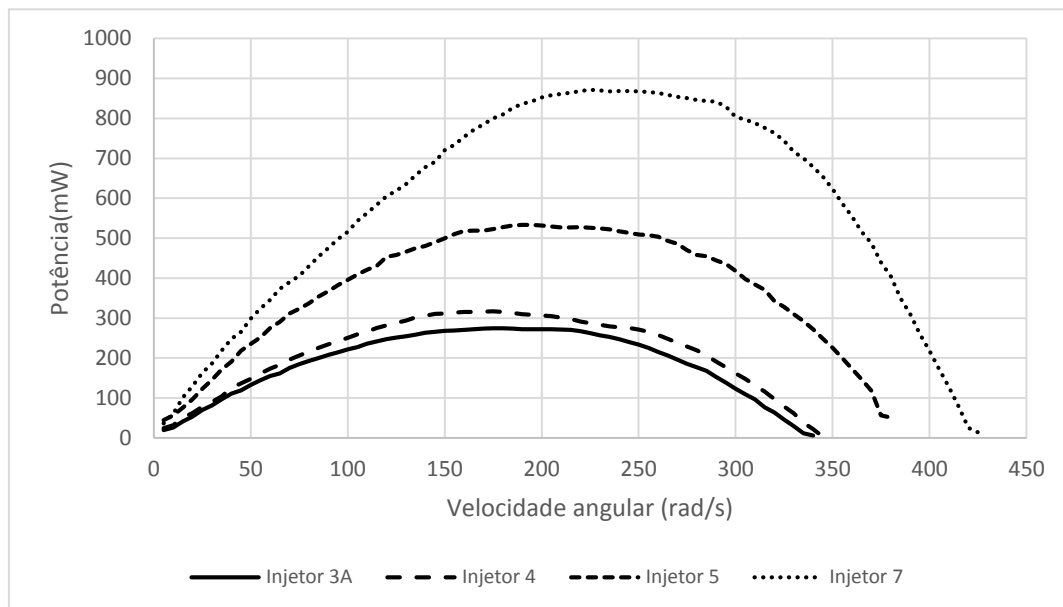


Figura R.1 – Potência com a turbina 1 e múltiplos injetores.

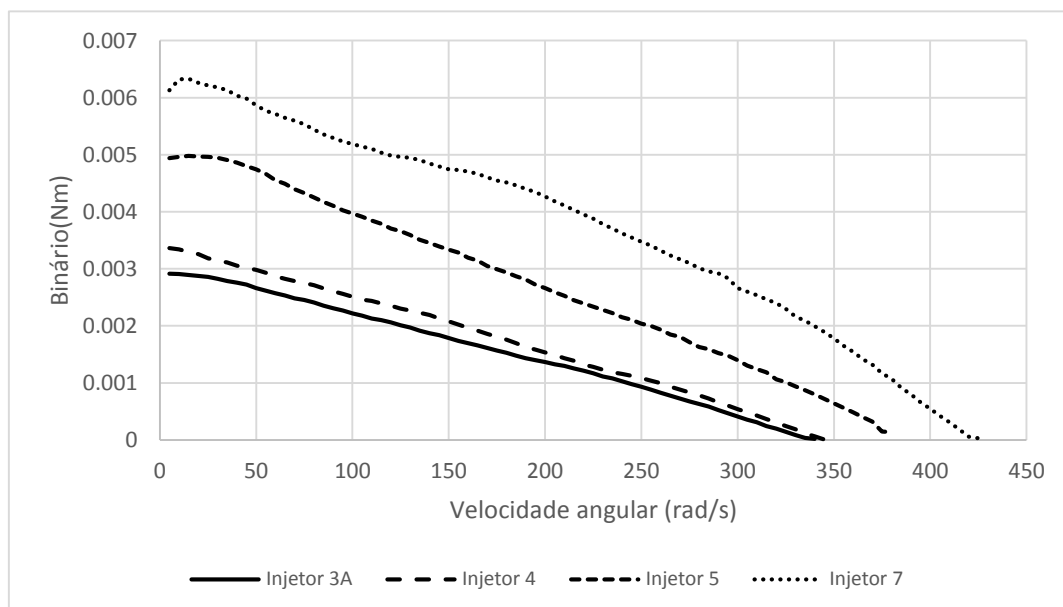


Figura R.2 – Binário com a turbina 1 e múltiplos injetores.

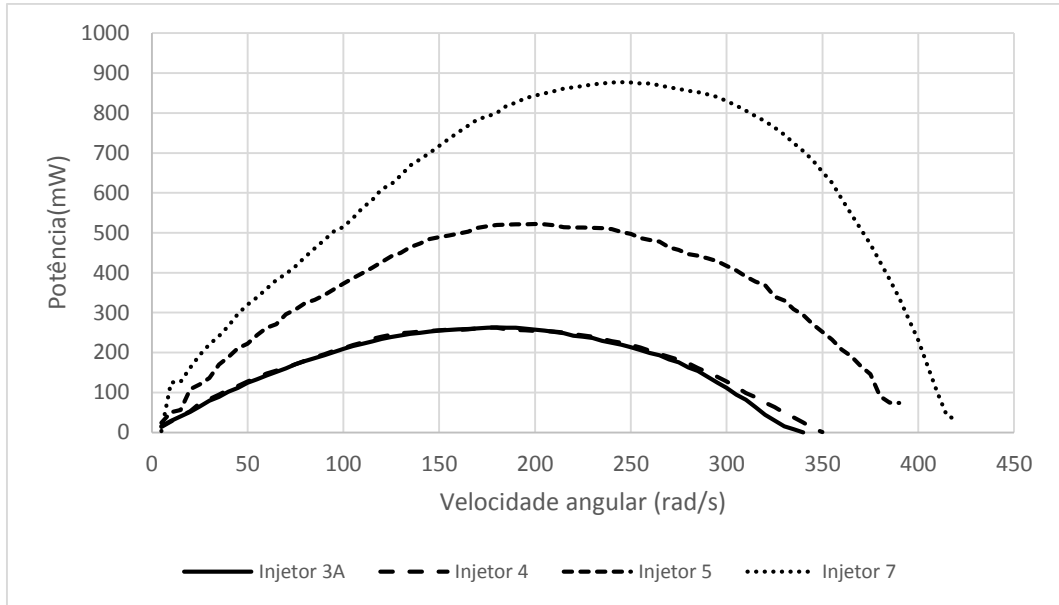


Figura R.3 – Potência com a turbina 2 e múltiplos injetores.

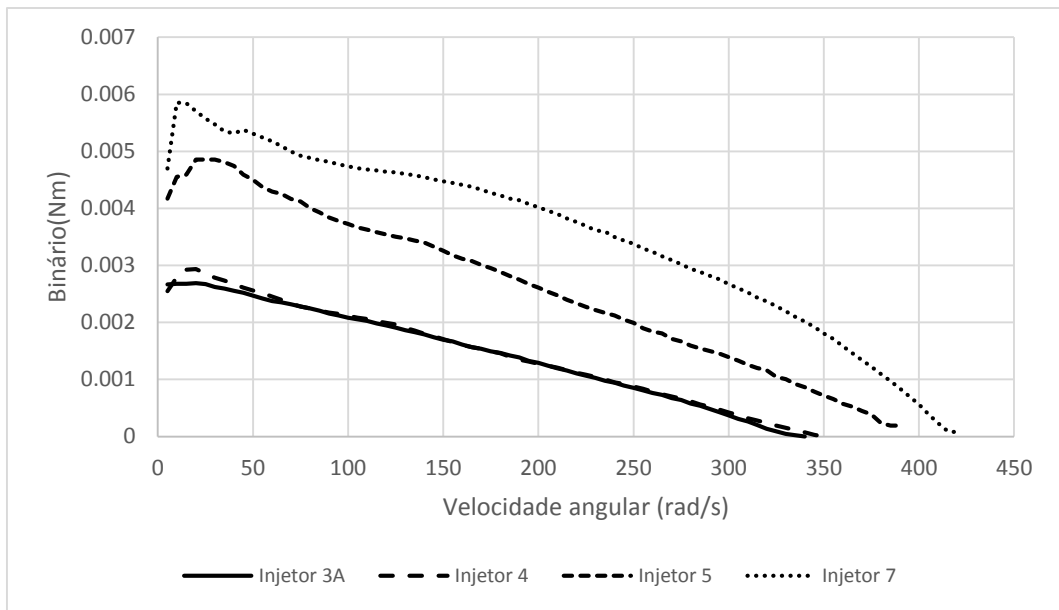


Figura R.4 – Binário com a turbina 2 e múltiplos injetores.

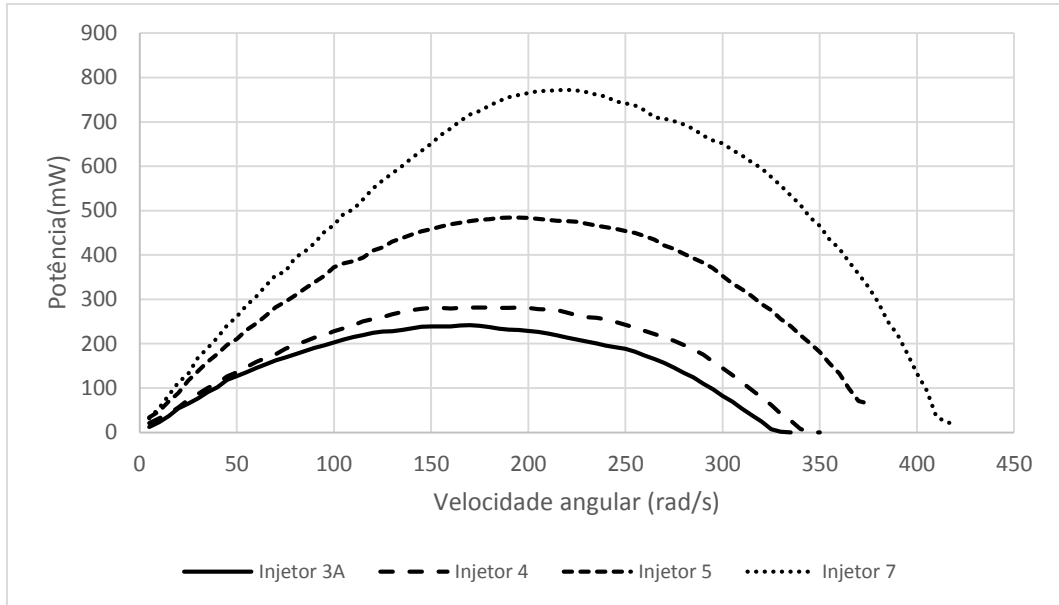


Figura R.5 – Potência com a turbina 3 e múltiplos injetores.

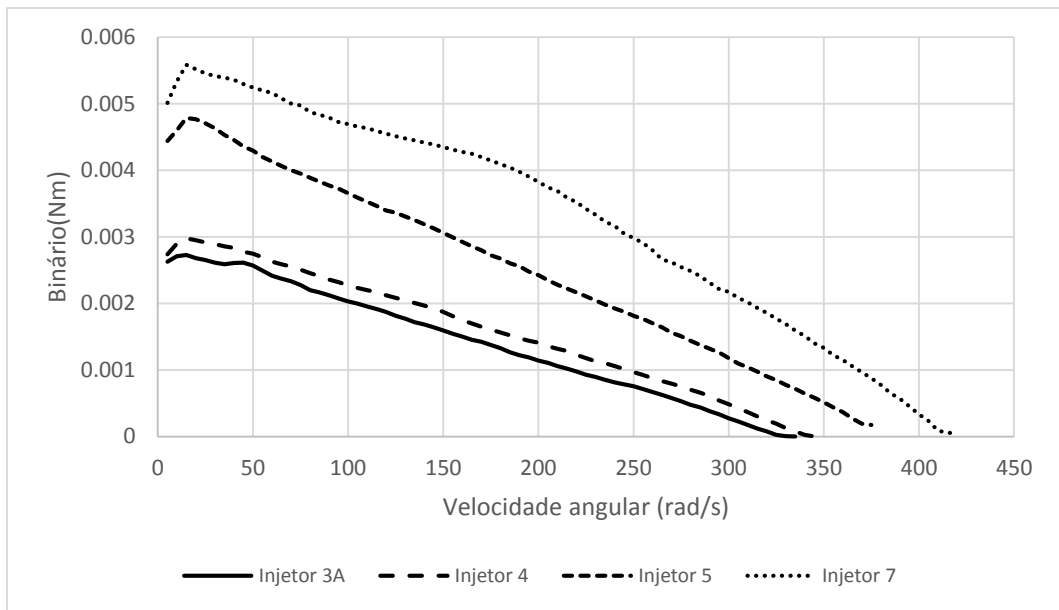


Figura R.6 – Binário com a turbina 3 e múltiplos injetores.

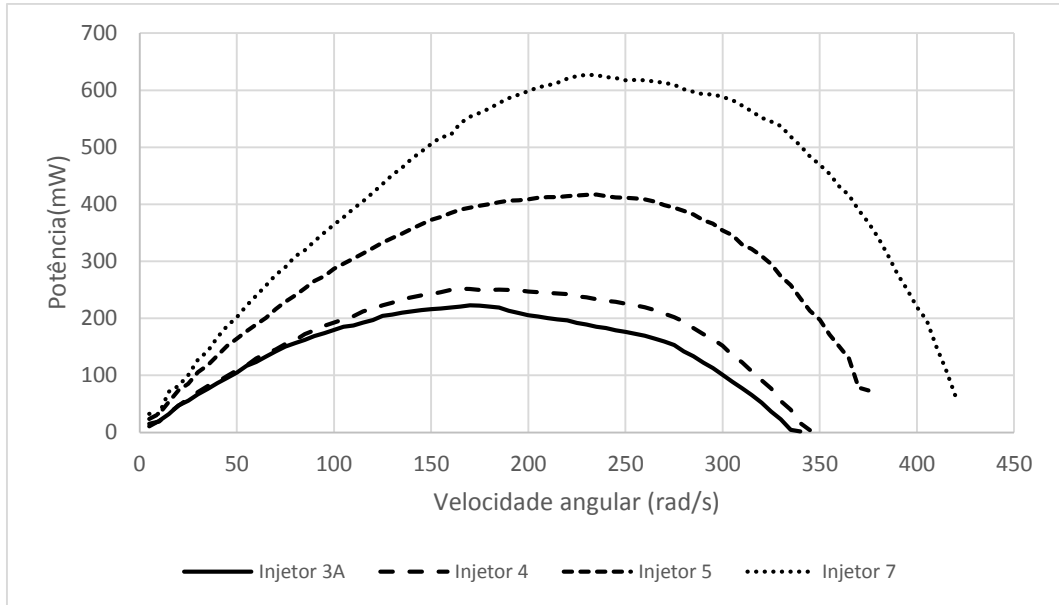


Figura R.7 – Potência com a turbina 4 e múltiplos injetores.

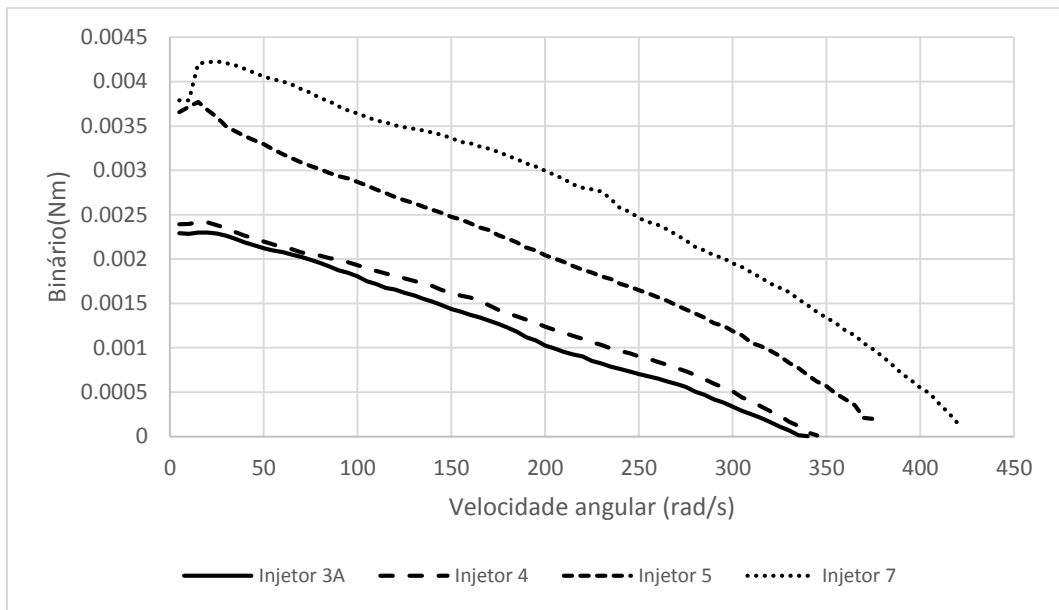


Figura R.8 – Binário com a turbina 4 e múltiplos injetores.

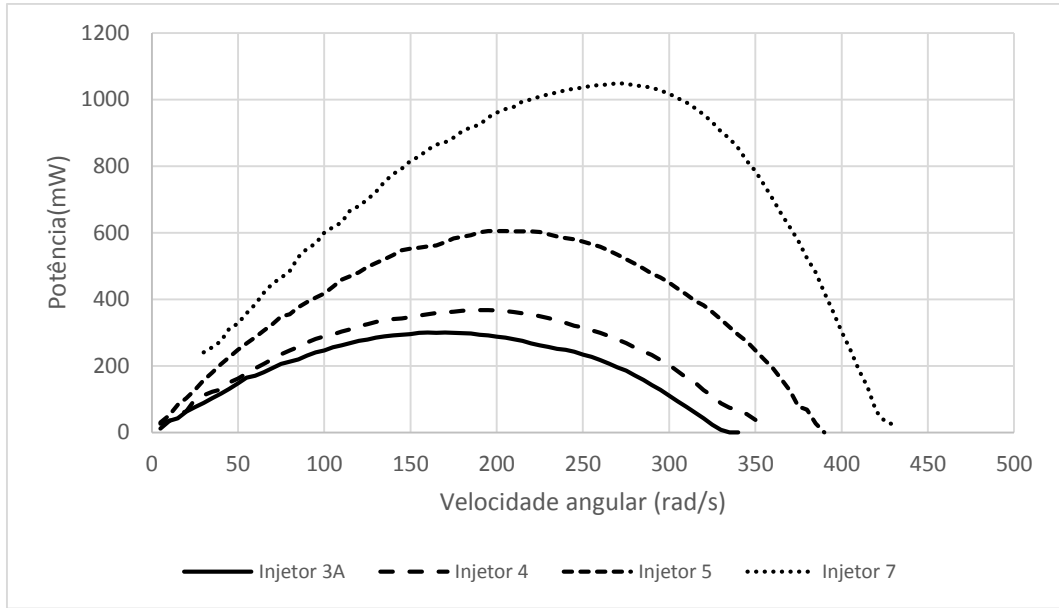


Figura R.9 – Potência com a turbina 5 e múltiplos injetores.

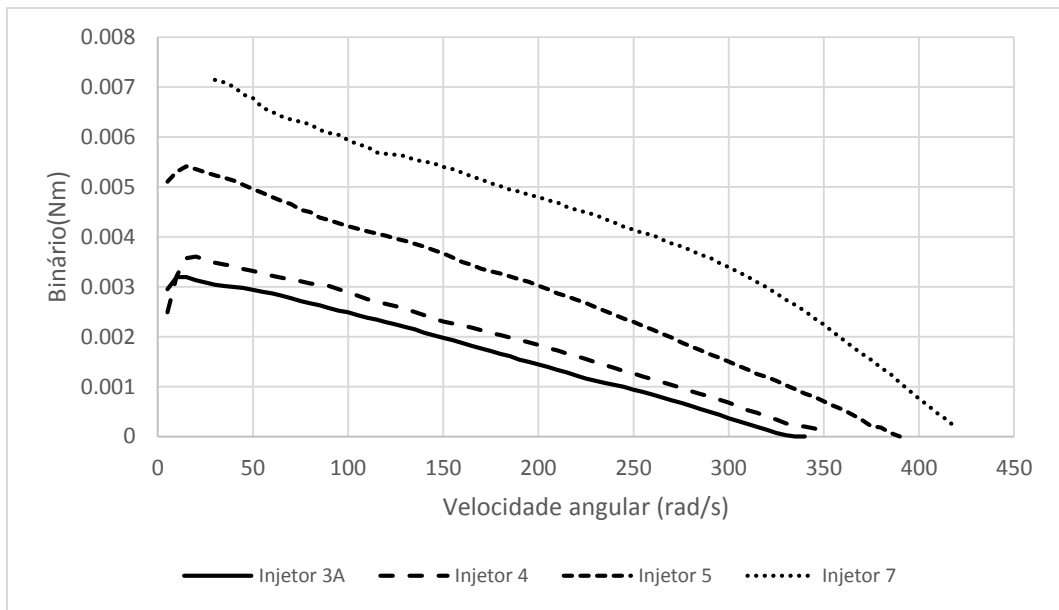


Figura R.10 – Binário com a turbina 5 e múltiplos injetores.

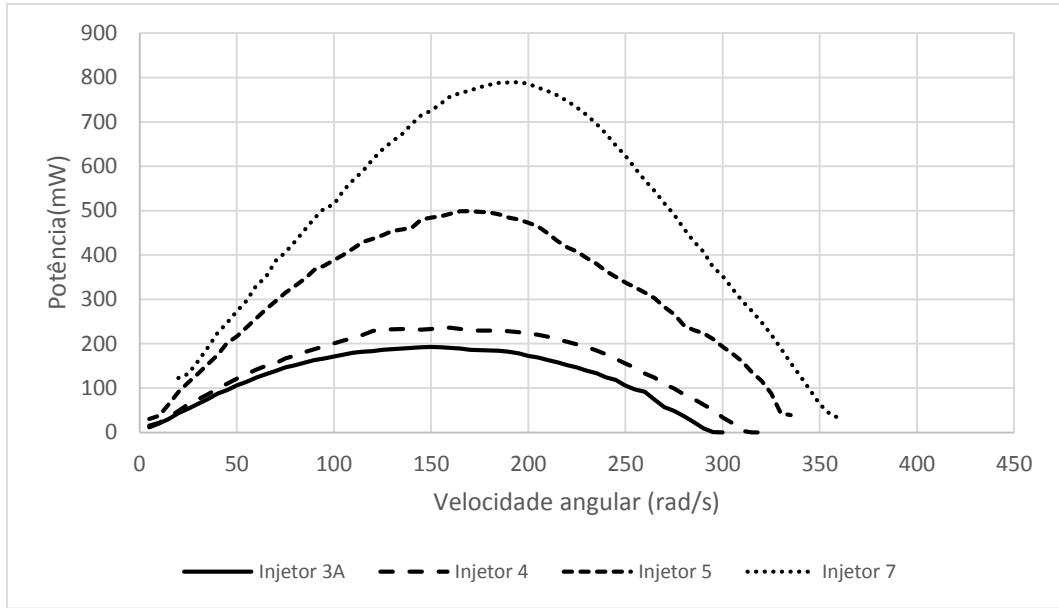


Figura R.11 – Potência com a turbina 6 e múltiplos injetores.

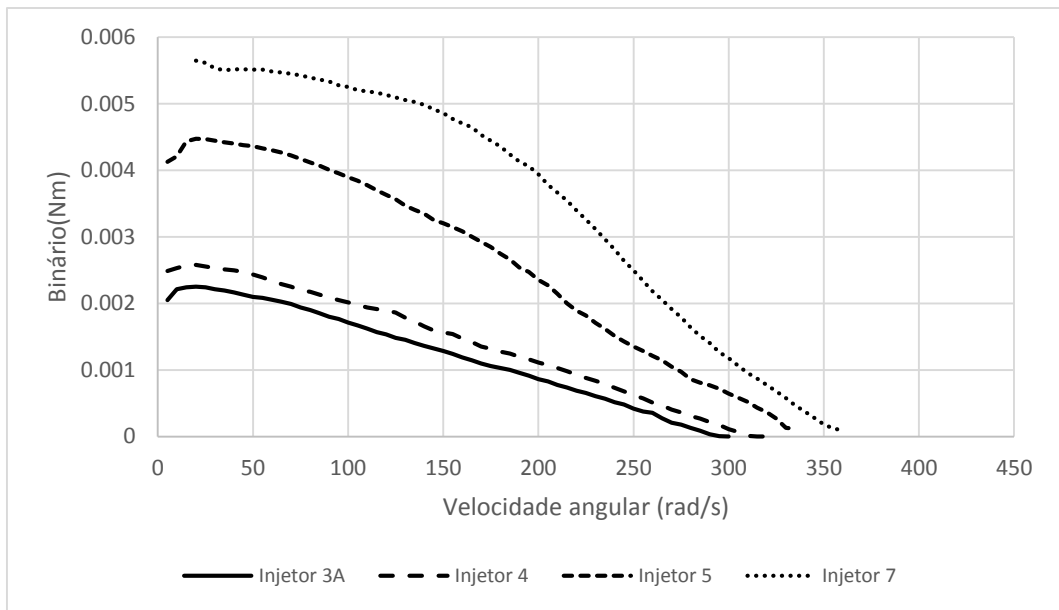


Figura R.12 – Binário com a turbina 6 e múltiplos injetores.

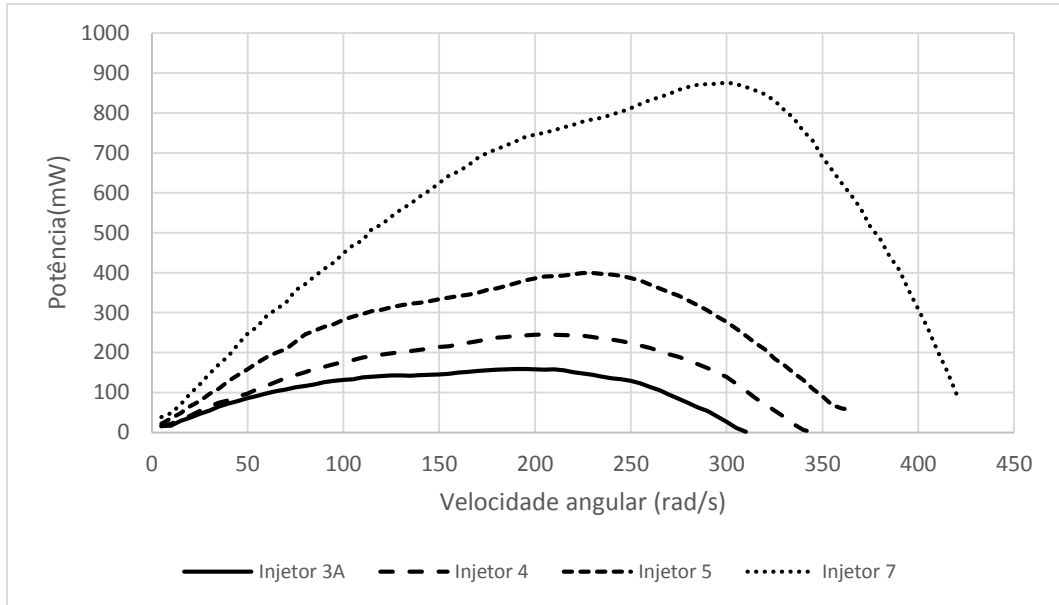


Figura R.13 – Potência com a turbina 7 e múltiplos injetores.

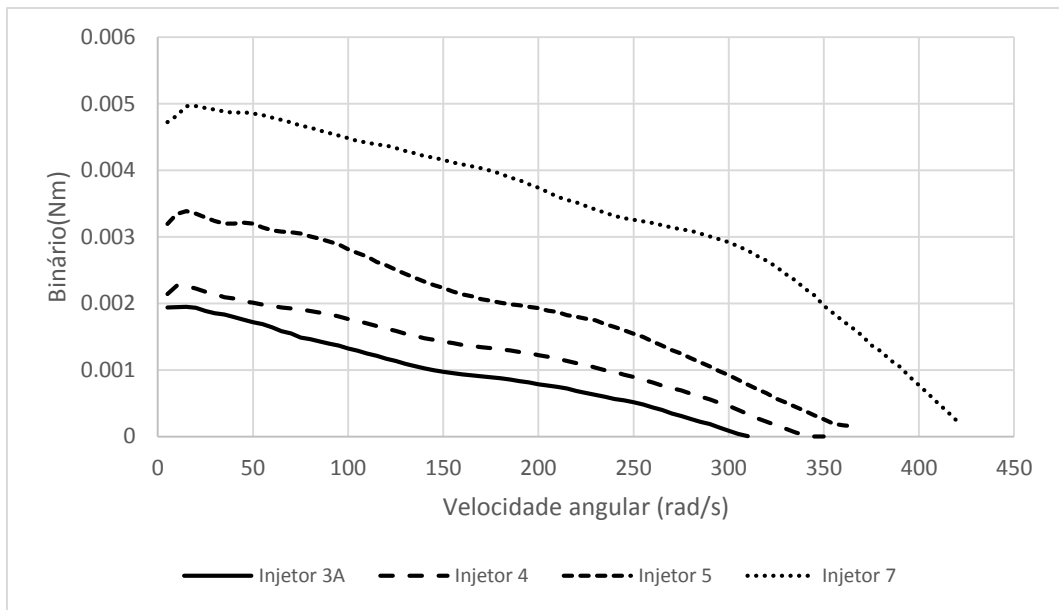


Figura R.14 – Binário com a turbina 7 e múltiplos injetores.

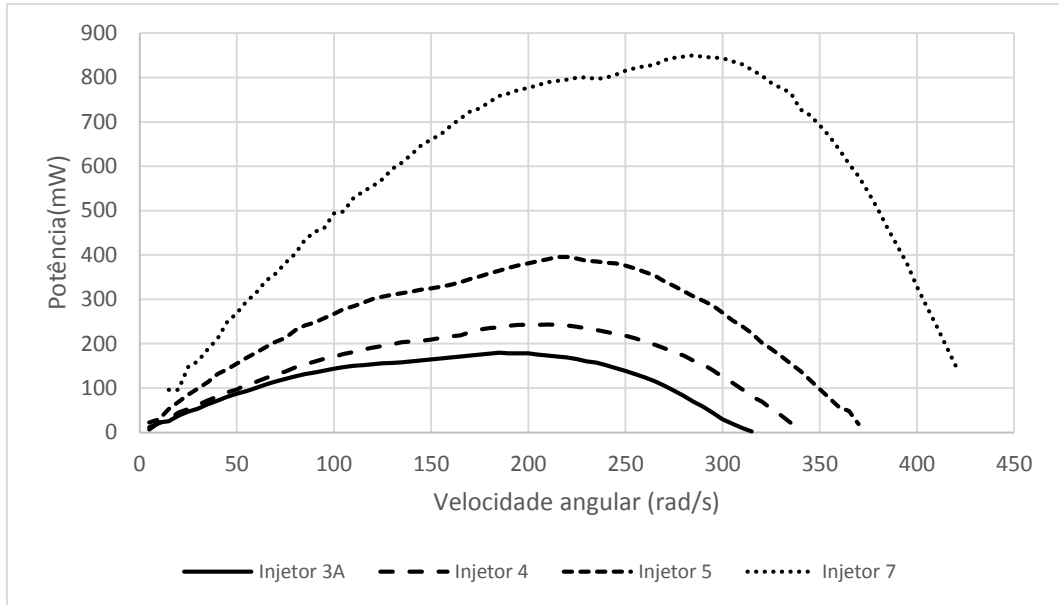


Figura R.15 – Potência com a turbina 7 invertida e múltiplos injetores.

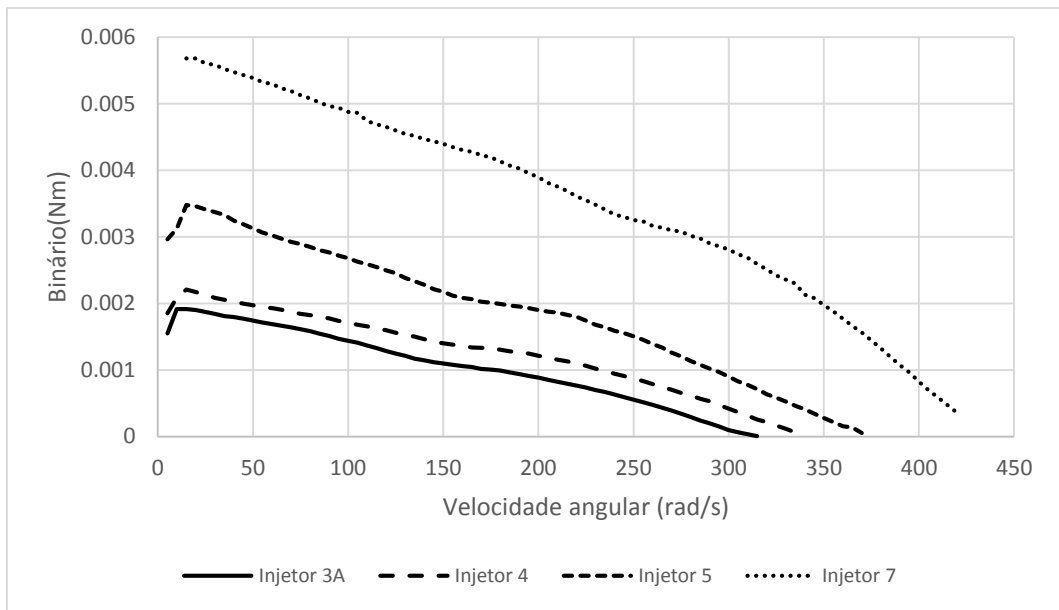


Figura R.16 – Binário com a turbina 7 invertida e múltiplos injetores.

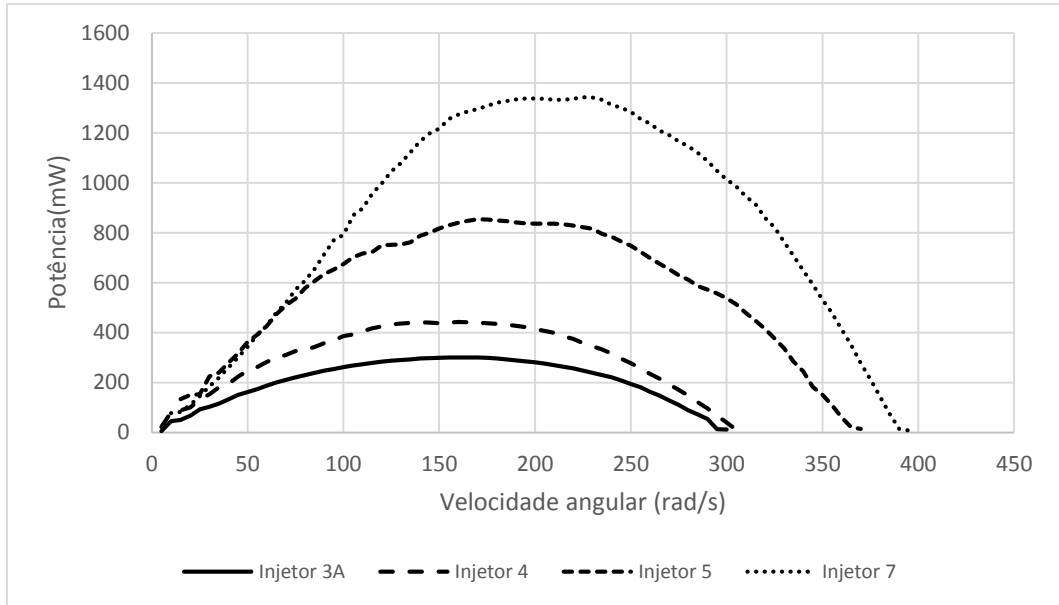


Figura R.17 – Potência com a turbina 8 e múltiplos injetores.

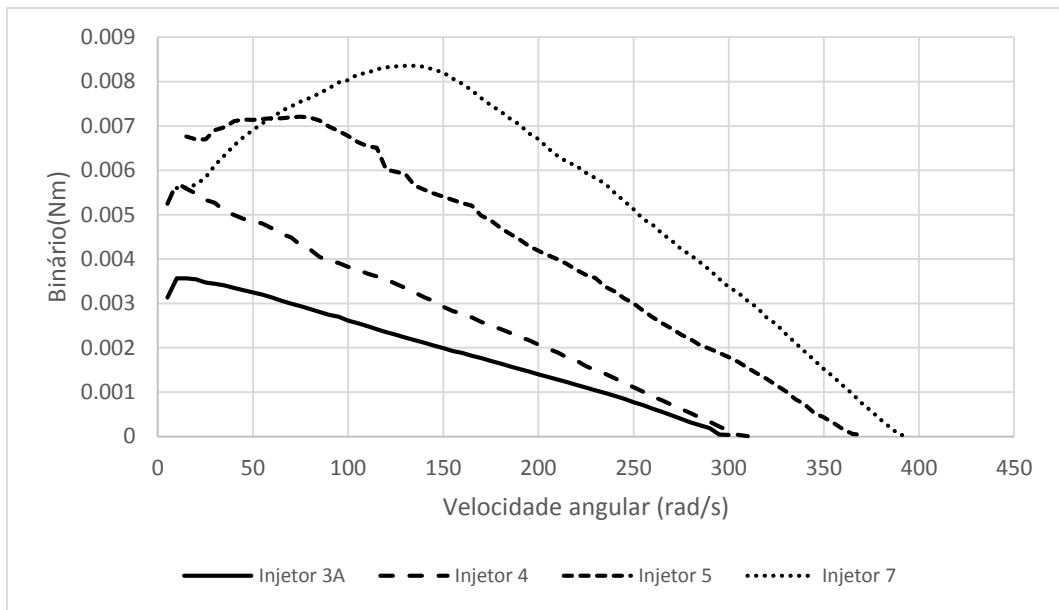


Figura R.18 – Binário com a turbina 8 e múltiplos injetores.

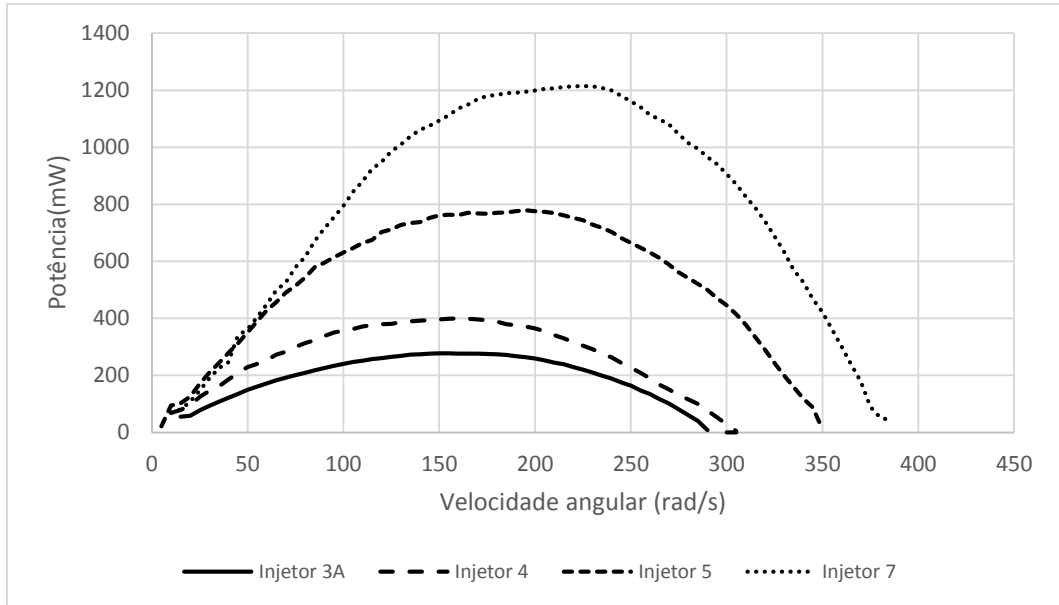


Figura R.19 – Potência com a turbina 9 e múltiplos injetores.

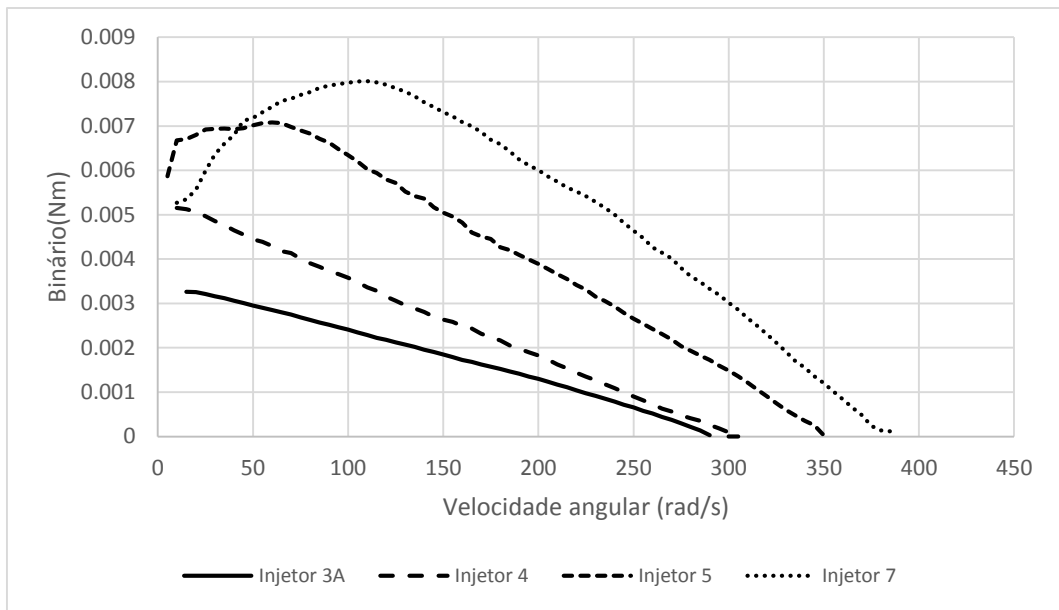


Figura R.20 – Binário com a turbina 9 e múltiplos injetores.

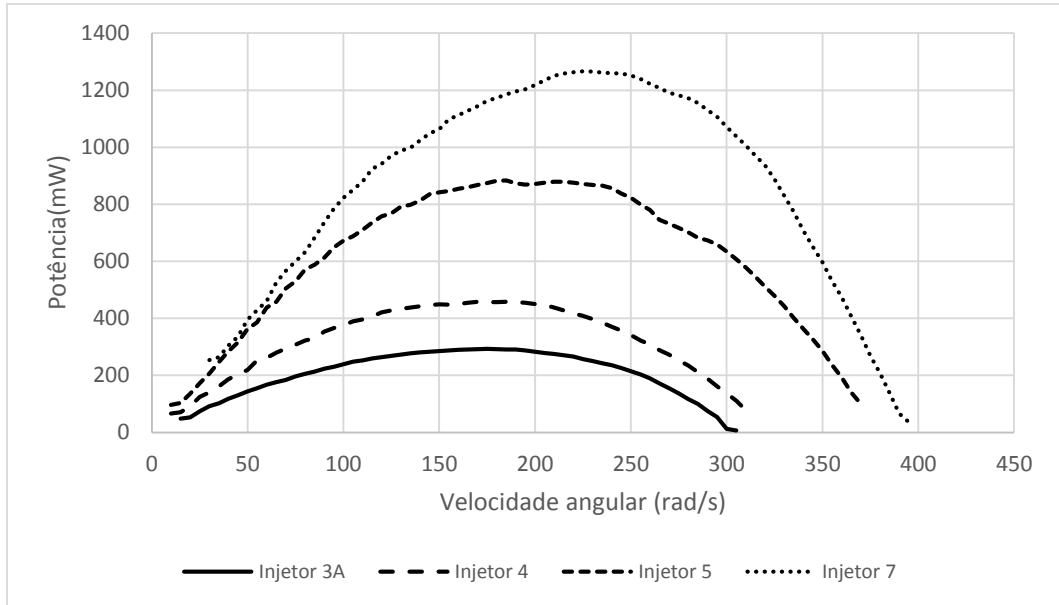


Figura R.21 – Potência com a turbina 10 e múltiplos injetores.

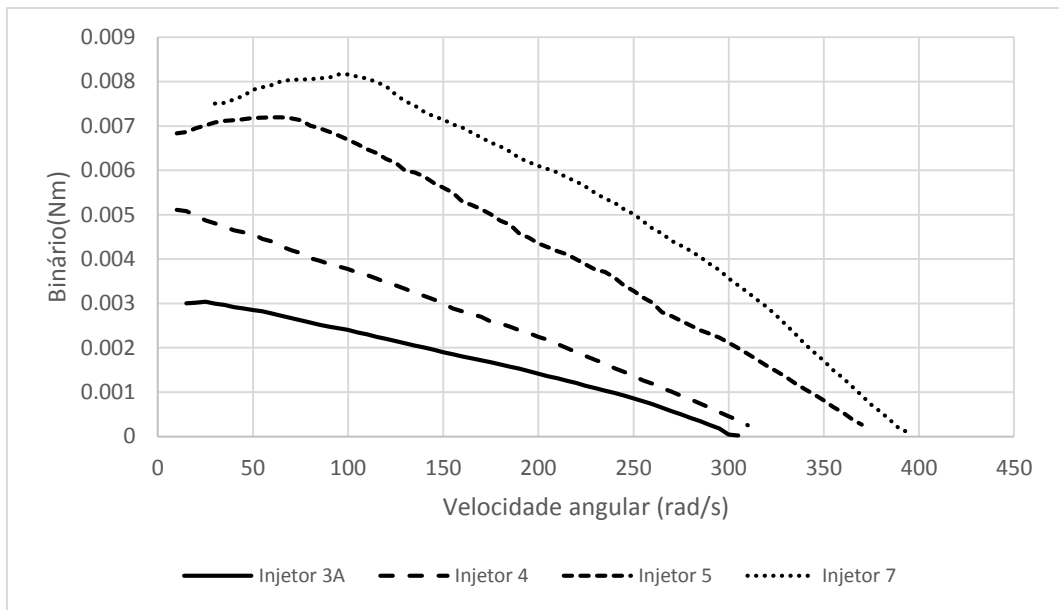


Figura R.22 – Binário com a turbina 10 e múltiplos injetores.

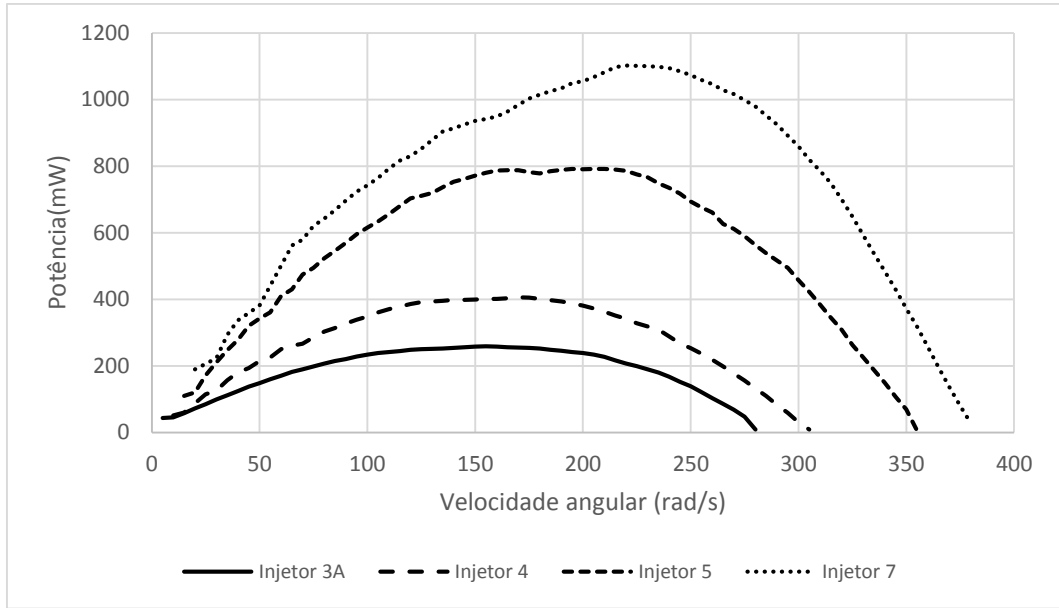


Figura R.23 – Potência com a turbina 11 e múltiplos injetores.

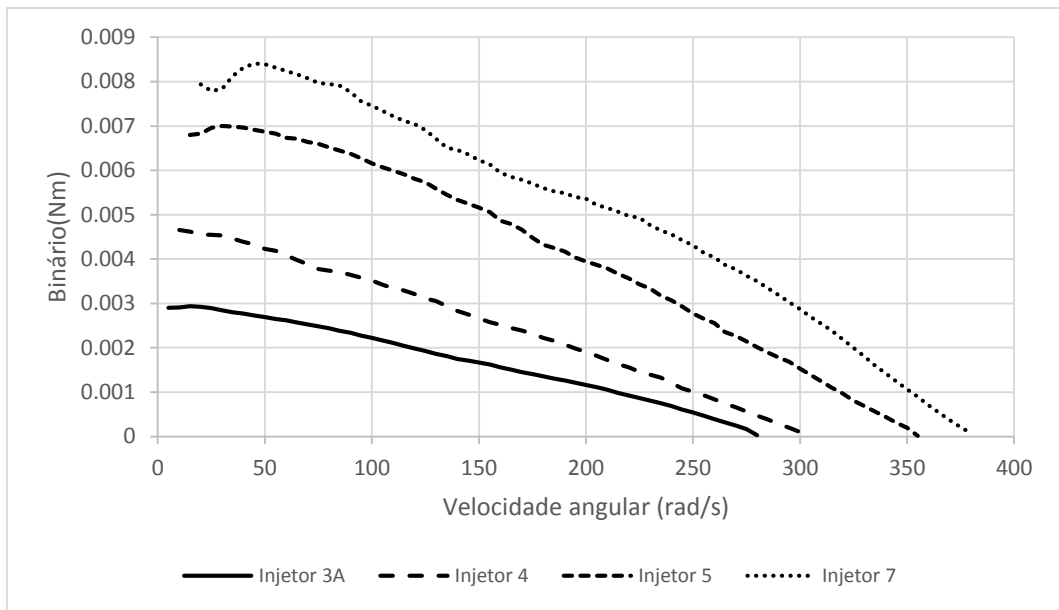


Figura R.24 – Binário com a turbina 11 e múltiplos injetores.

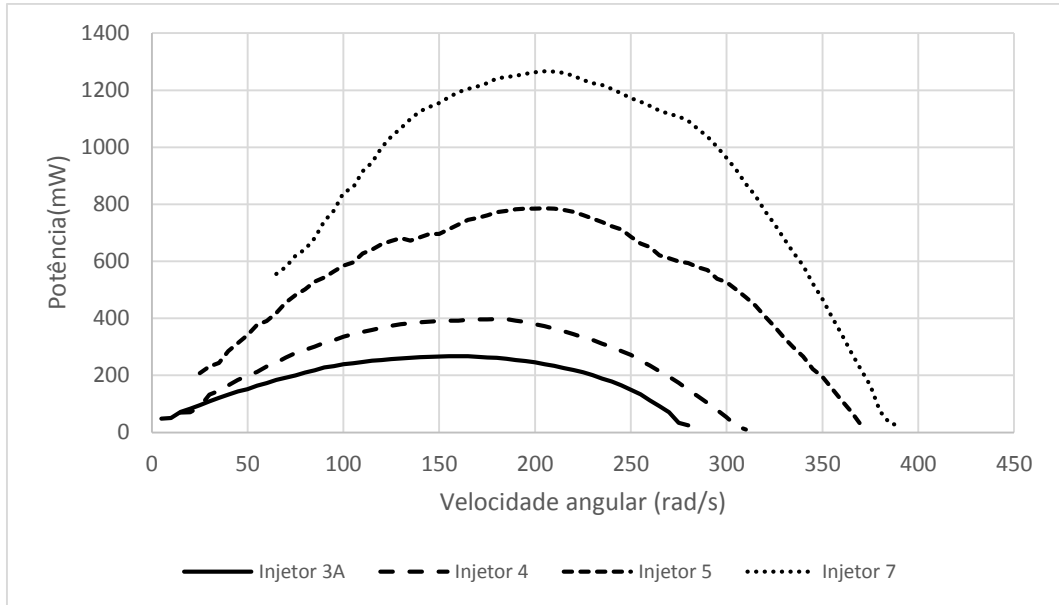


Figura R.25 – Potência com a turbina 12 e múltiplos injetores.

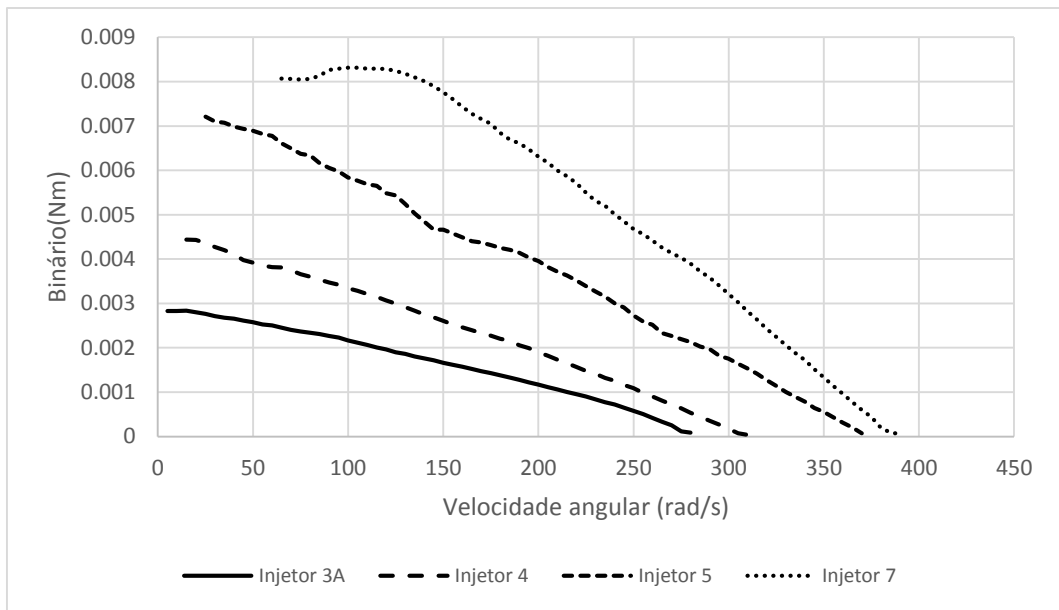


Figura R.26 – Binário com a turbina 12 e múltiplos injetores.

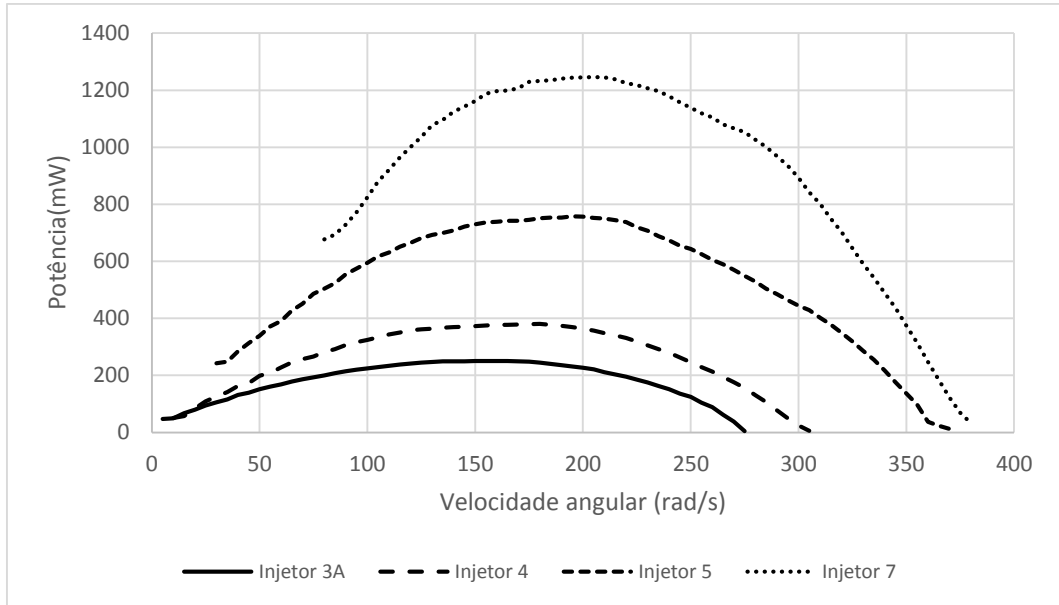


Figura R.27 – Potência com a turbina 13 e múltiplos injetores.

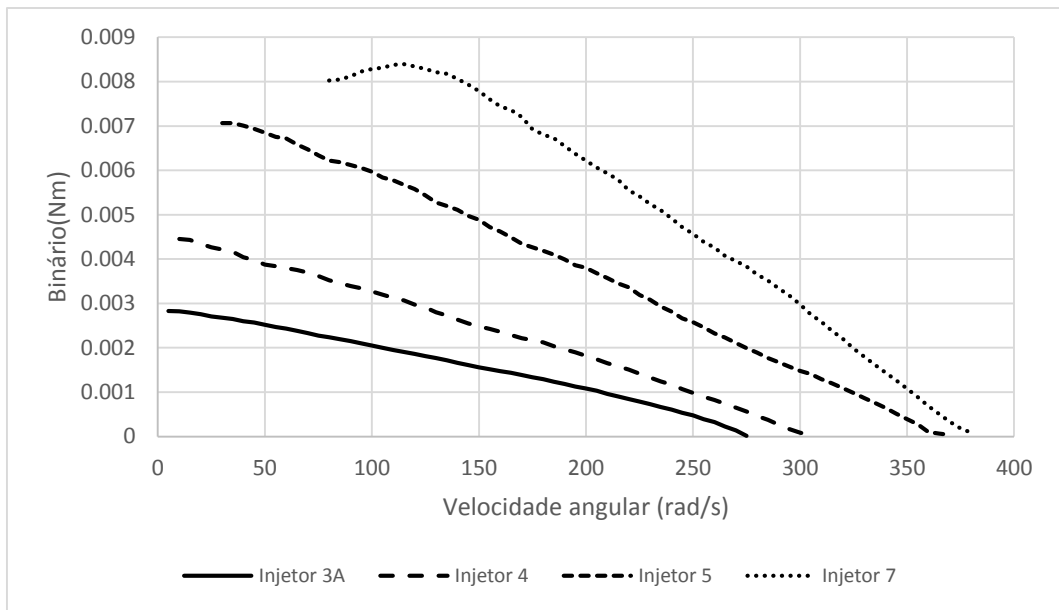


Figura R.28 – Binário com a turbina 13 e múltiplos injetores.

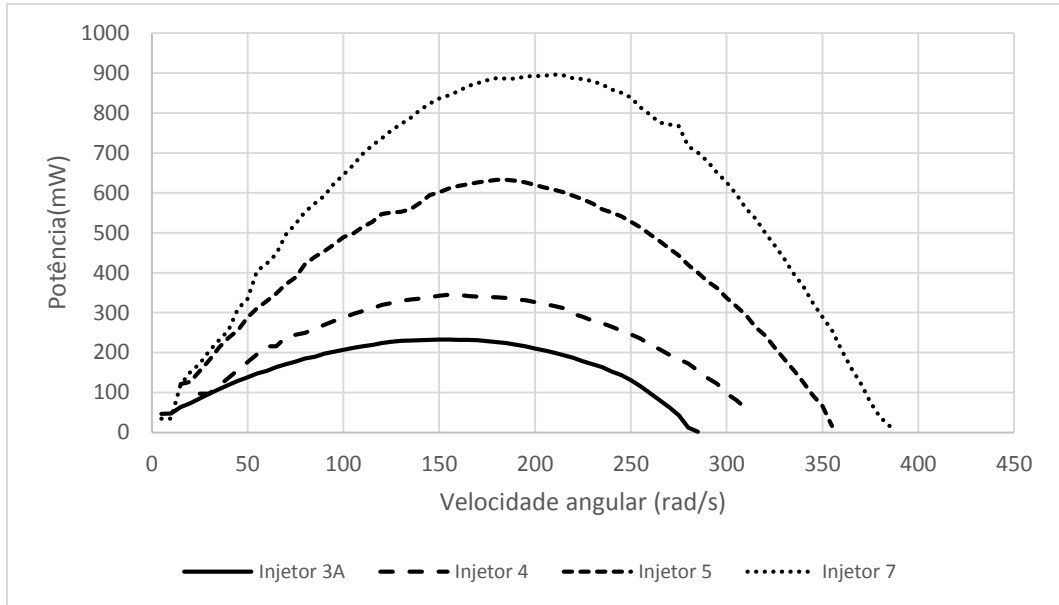


Figura R.29 – Potência com a turbina 14 e múltiplos injetores.

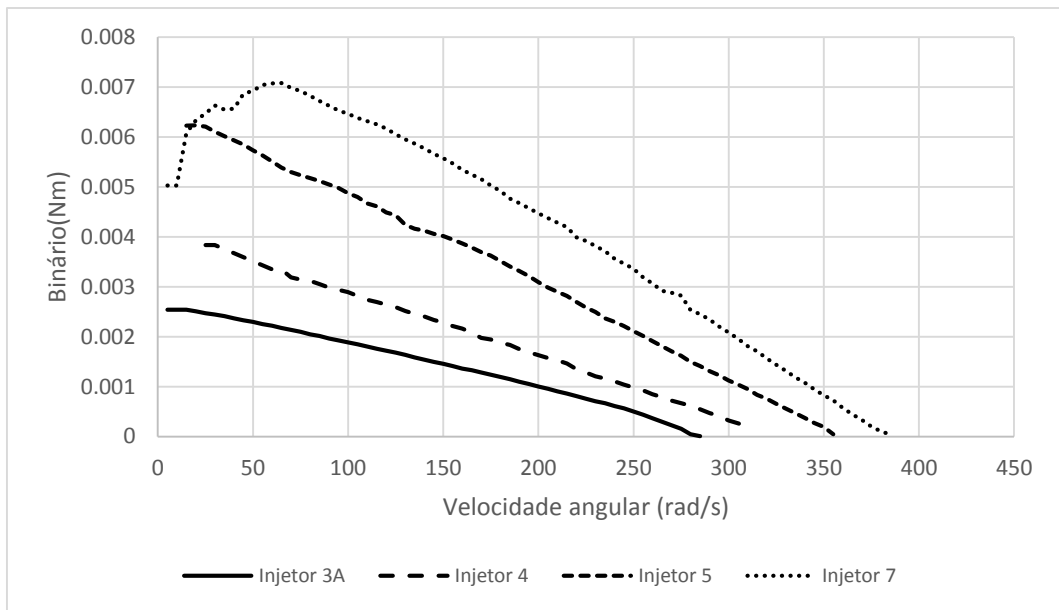


Figura R.30 – Binário com a turbina 14 e múltiplos injetores.

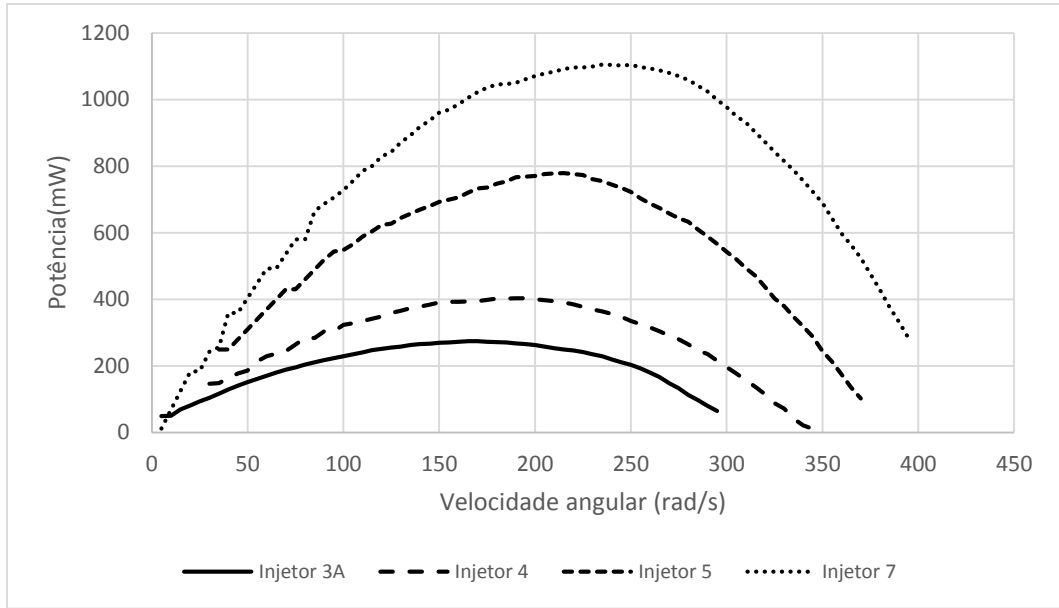


Figura R.31 – Potência com a turbina 15 e múltiplos injetores.

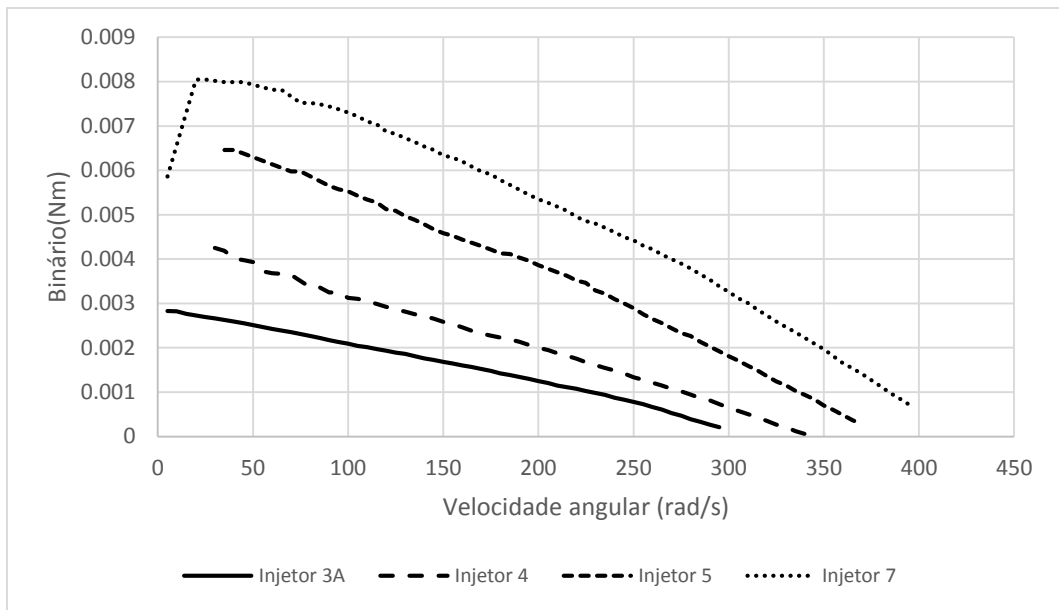


Figura R.32 – Binário com a turbina 15 e múltiplos injetores.

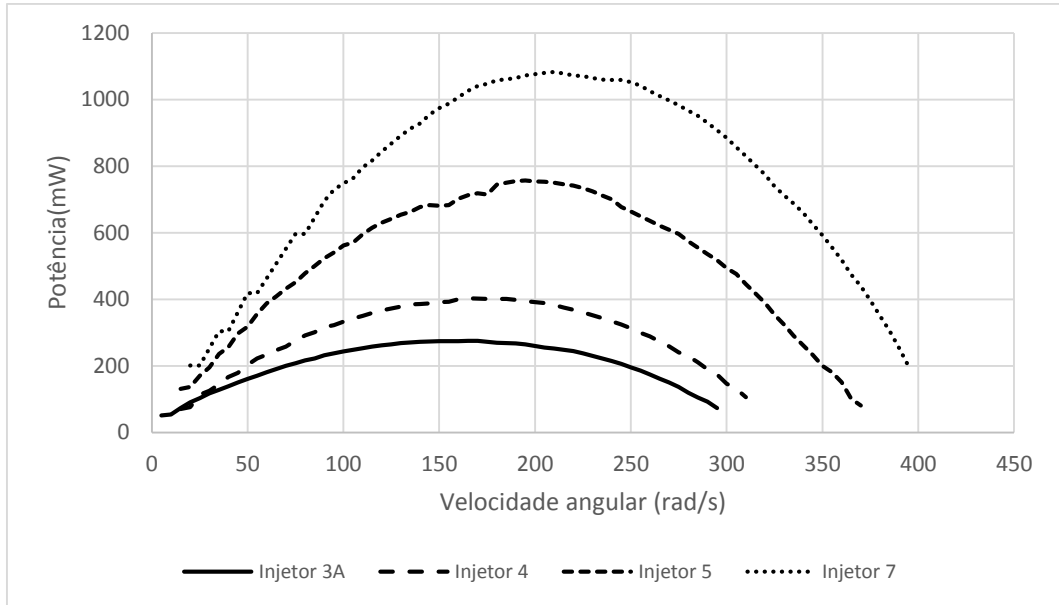


Figura R.33 – Potência com a turbina 16 e múltiplos injetores.

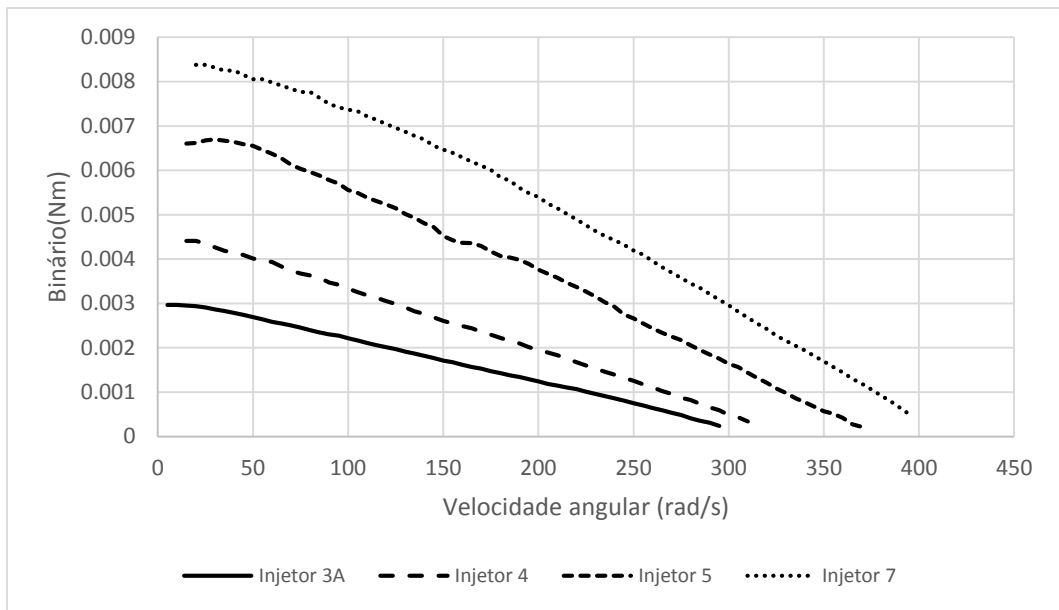


Figura R.34 – Binário com a turbina 16 e múltiplos injetores.

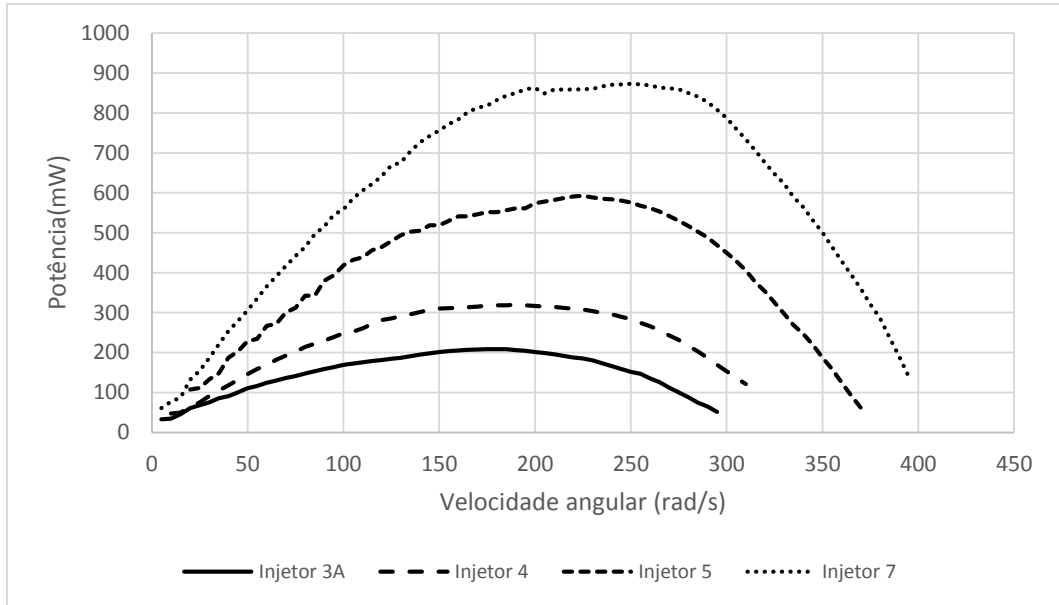


Figura R.35 – Potência com a turbina 17 e múltiplos injetores.

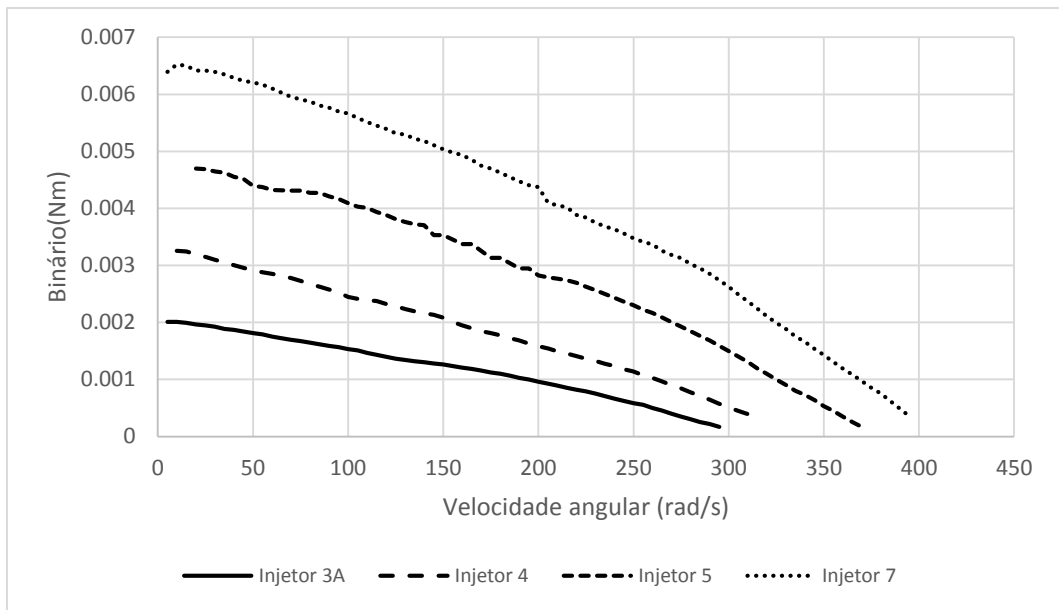


Figura R.36 – Binário com a turbina 17 e múltiplos injetores.

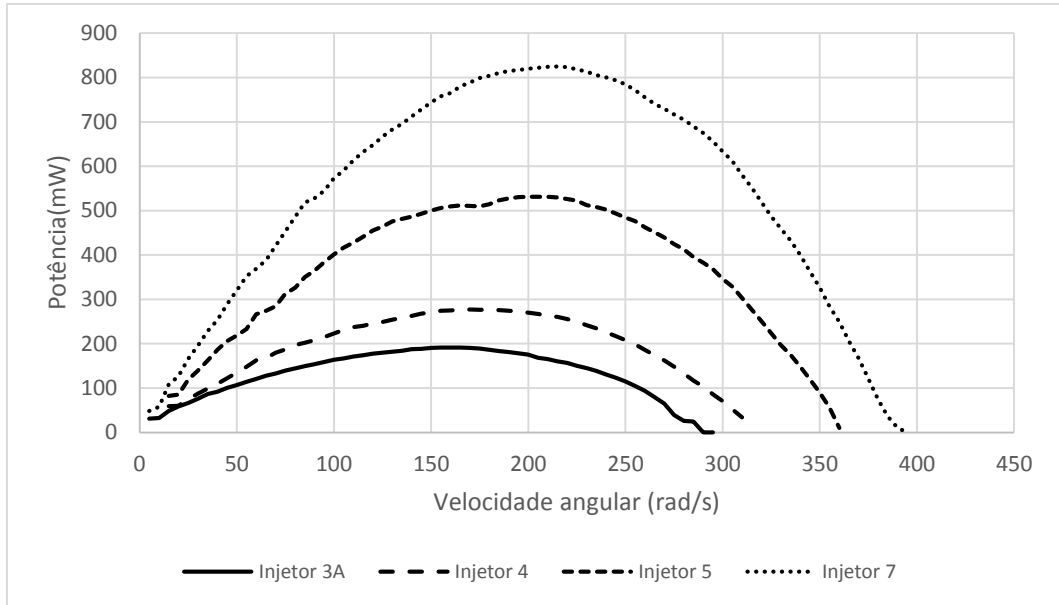


Figura R.37 – Potência com a turbina 18 e múltiplos injetores.

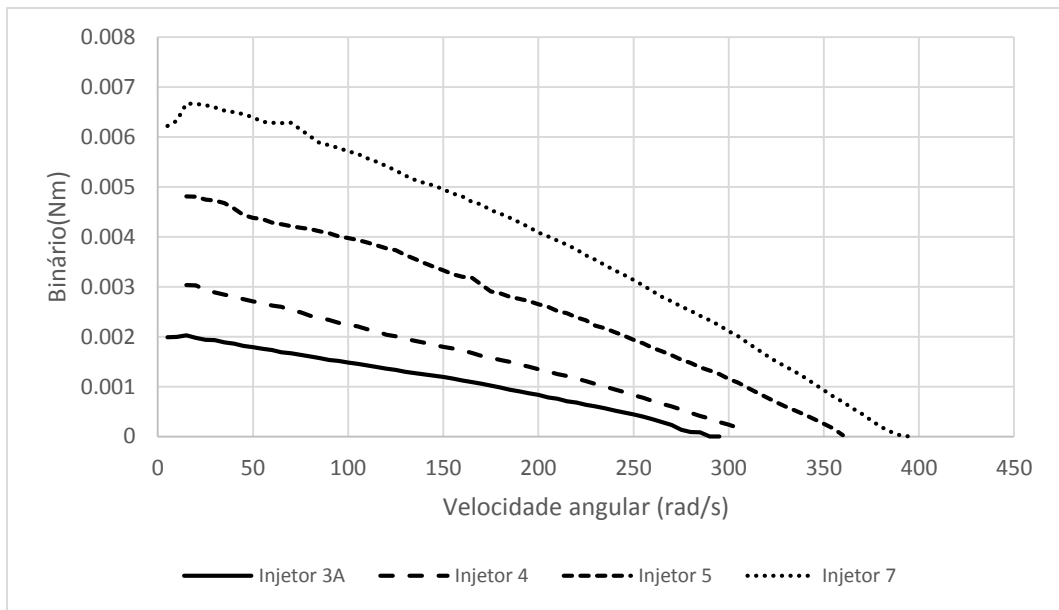


Figura R.38 – Binário com a turbina 18 e múltiplos injetores.

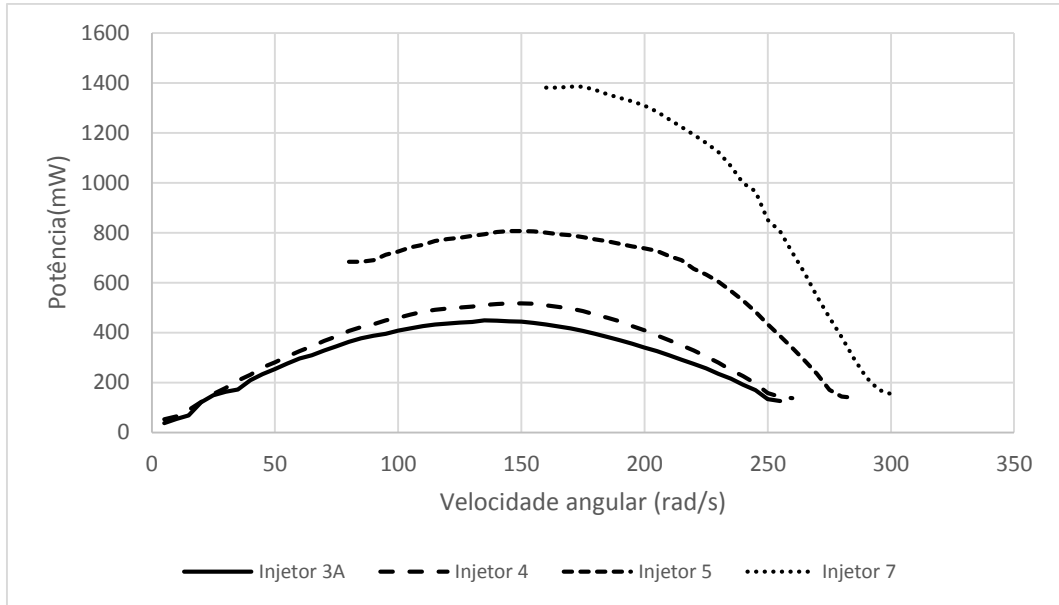


Figura R.39 – Potência com a turbina A e múltiplos injetores.

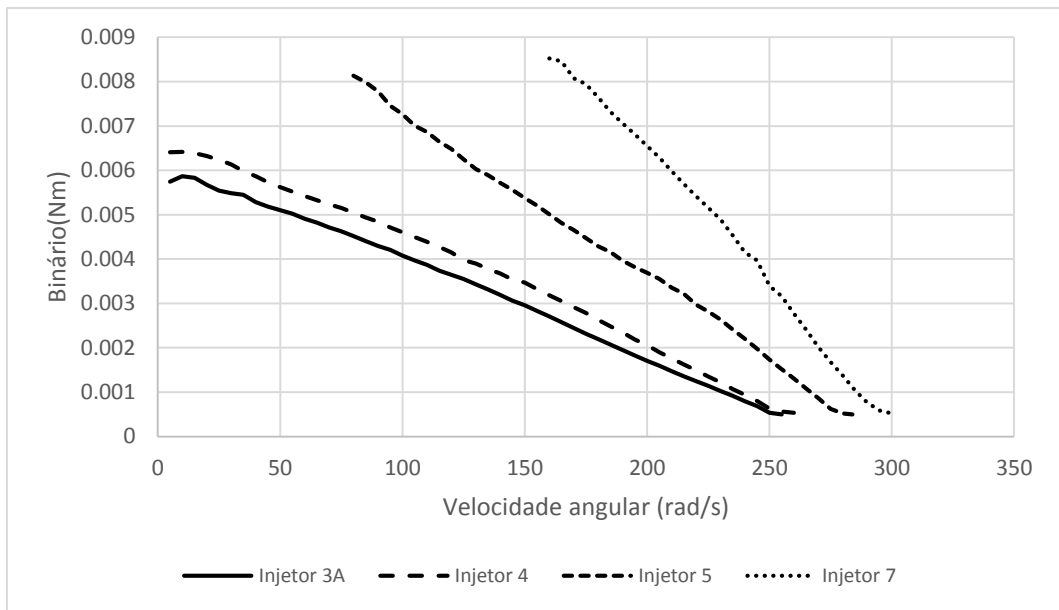


Figura R.40 – Binário com a turbina A e múltiplos injetores.

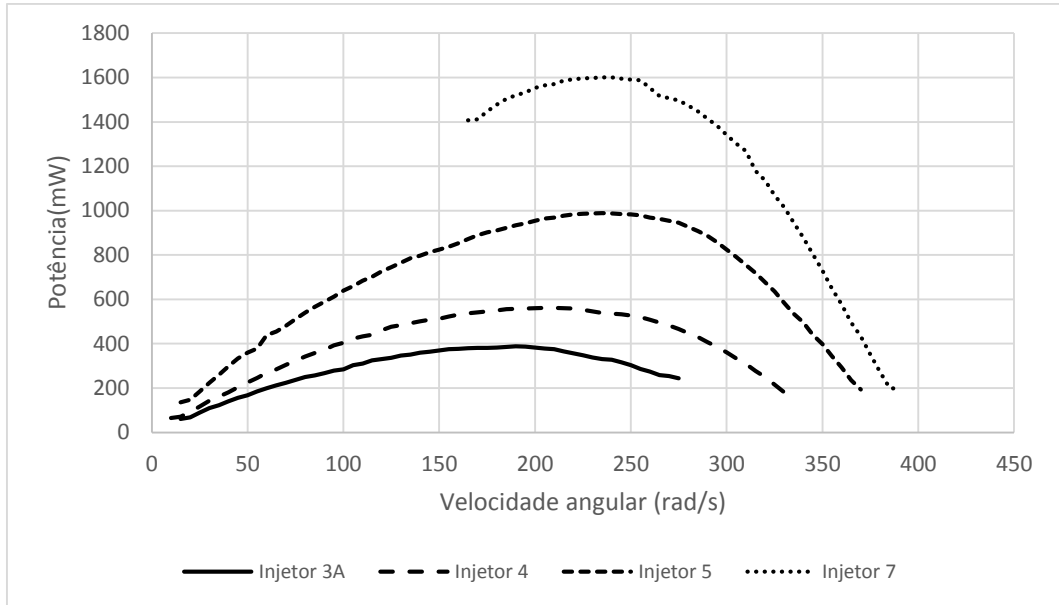


Figura R.41 – Potência com a turbina de metal e múltiplos injetores.

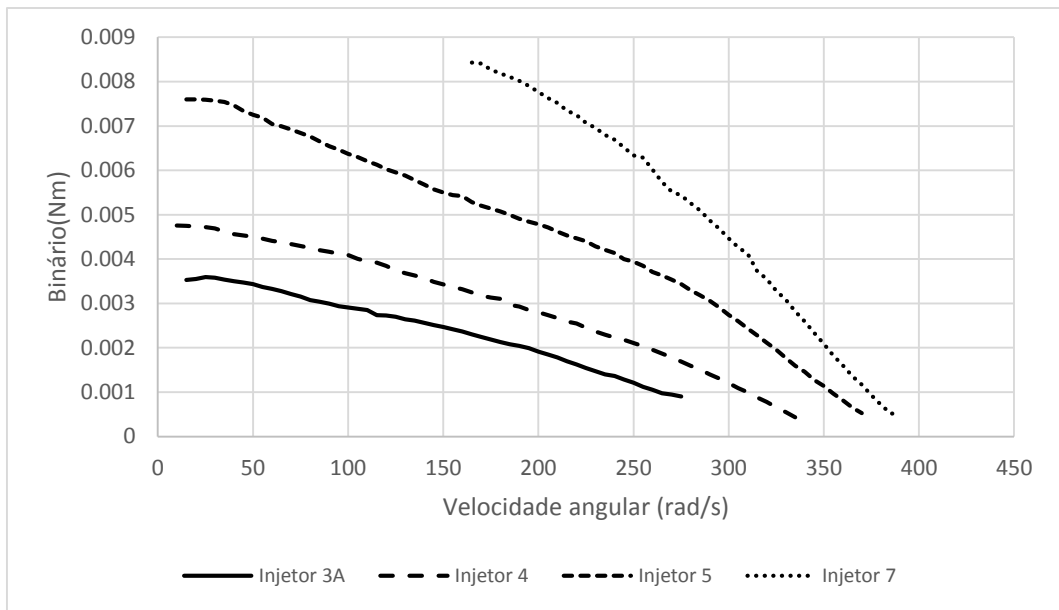


Figura R.42 – Binário com a turbina de metal e múltiplos injetores.

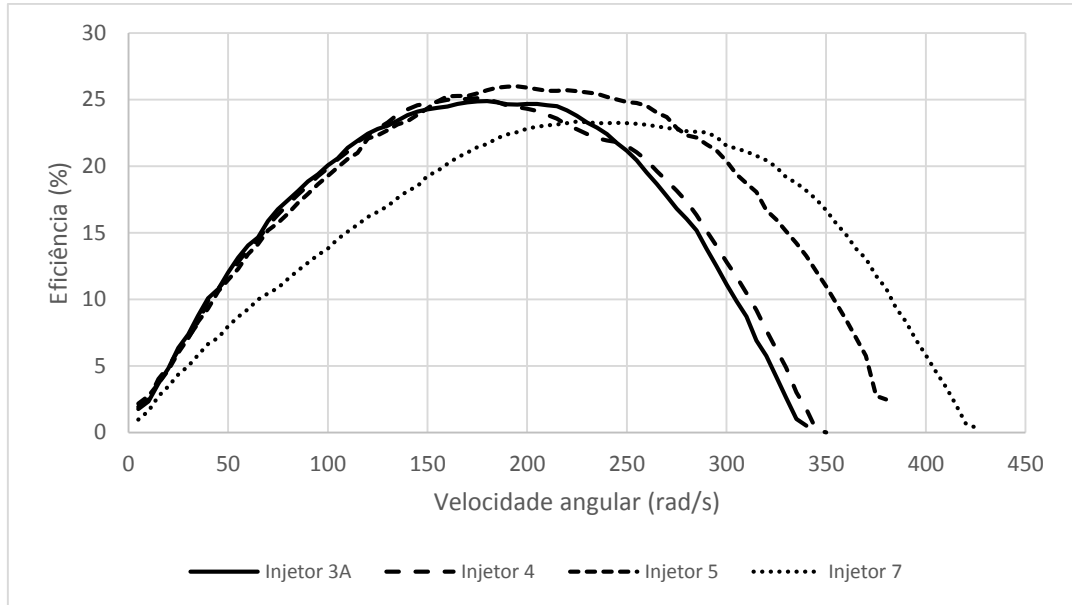


Figura R.43 – Eficiência com a turbina 1 e múltiplos injetores.

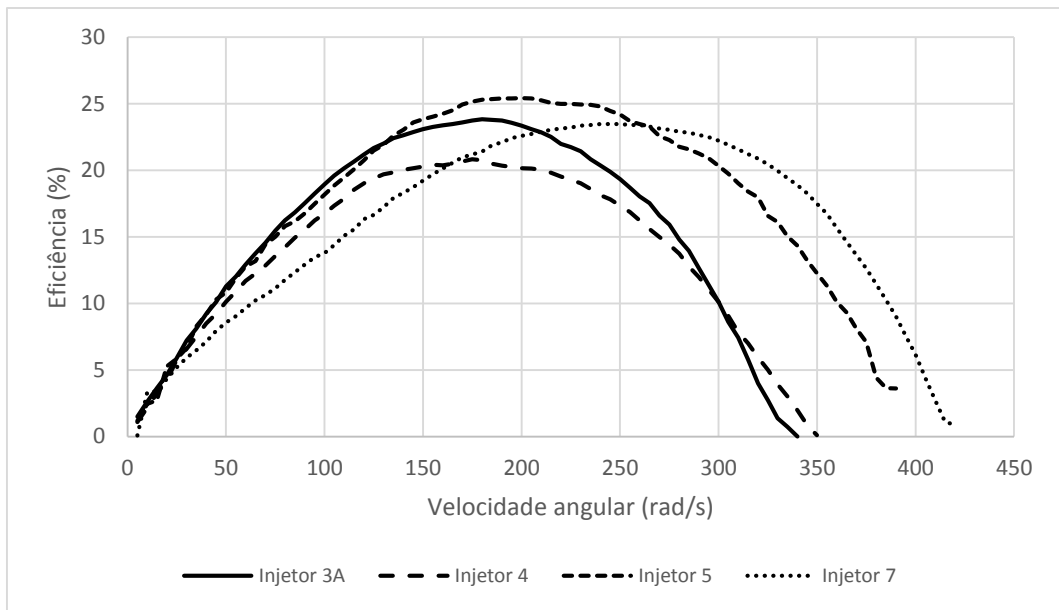


Figura R.44 – Eficiência com a turbina 2 e múltiplos injetores.

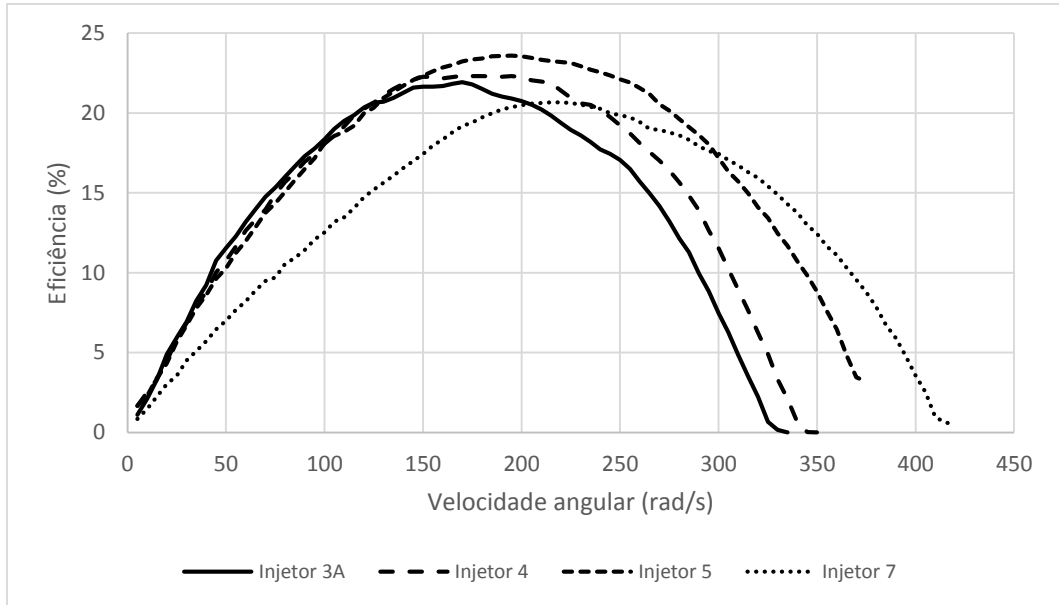


Figura R.45 – Eficiência com a turbina 3 e múltiplos injetores.

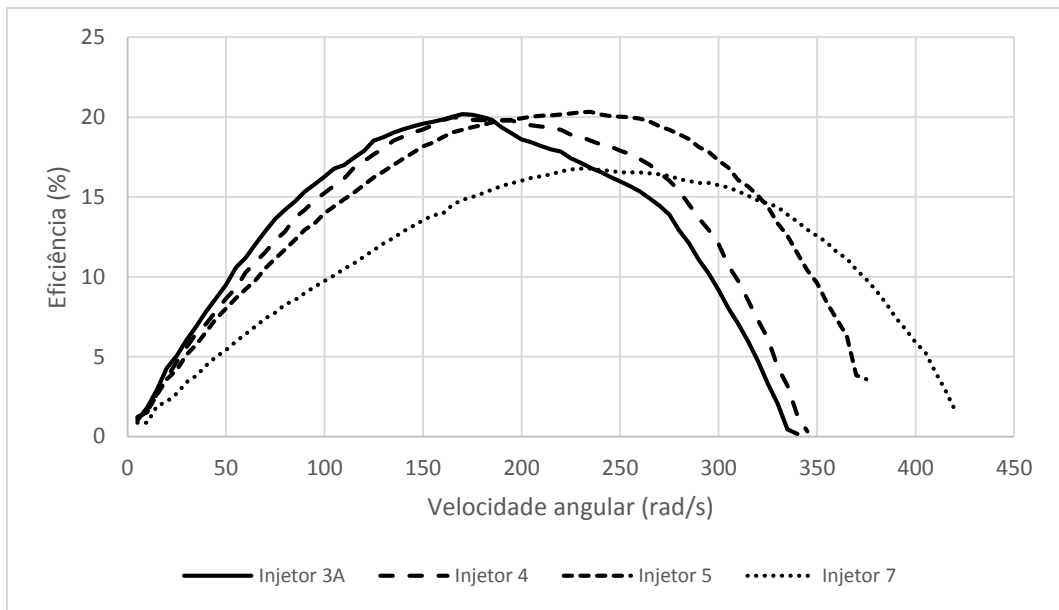


Figura R.46 – Eficiência com a turbina 4 e múltiplos injetores.

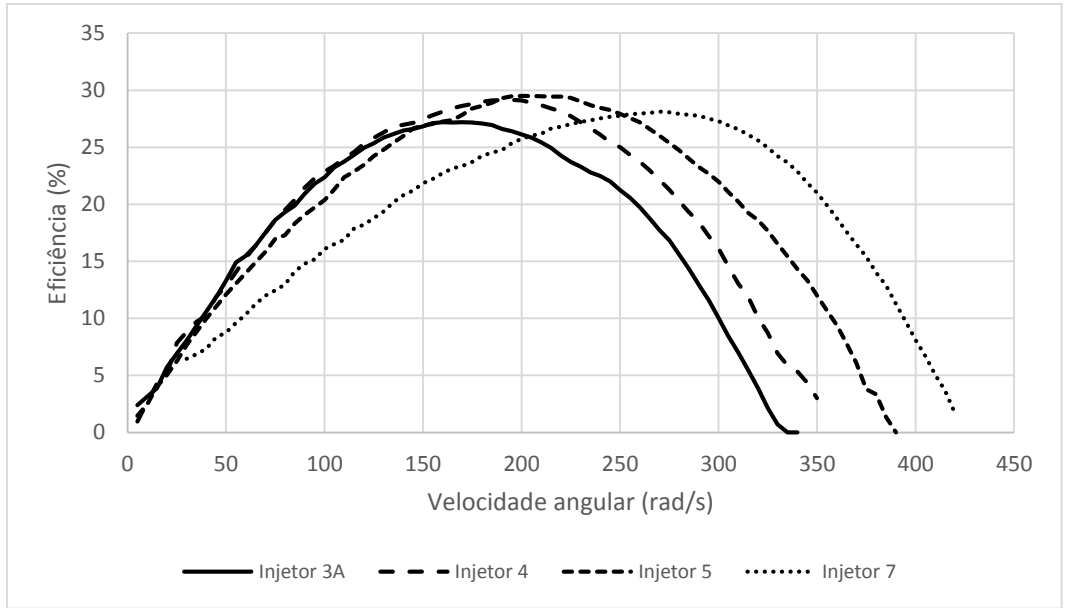


Figura R.47 – Eficiência com a turbina 5 e múltiplos injetores.

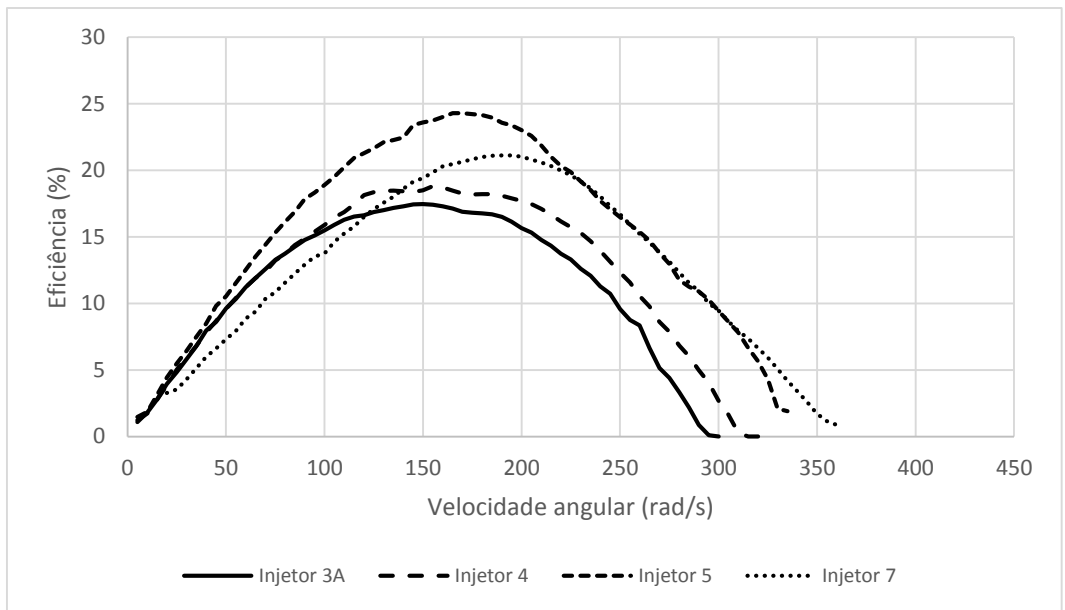


Figura R.48 – Eficiência com a turbina 6 e múltiplos injetores.

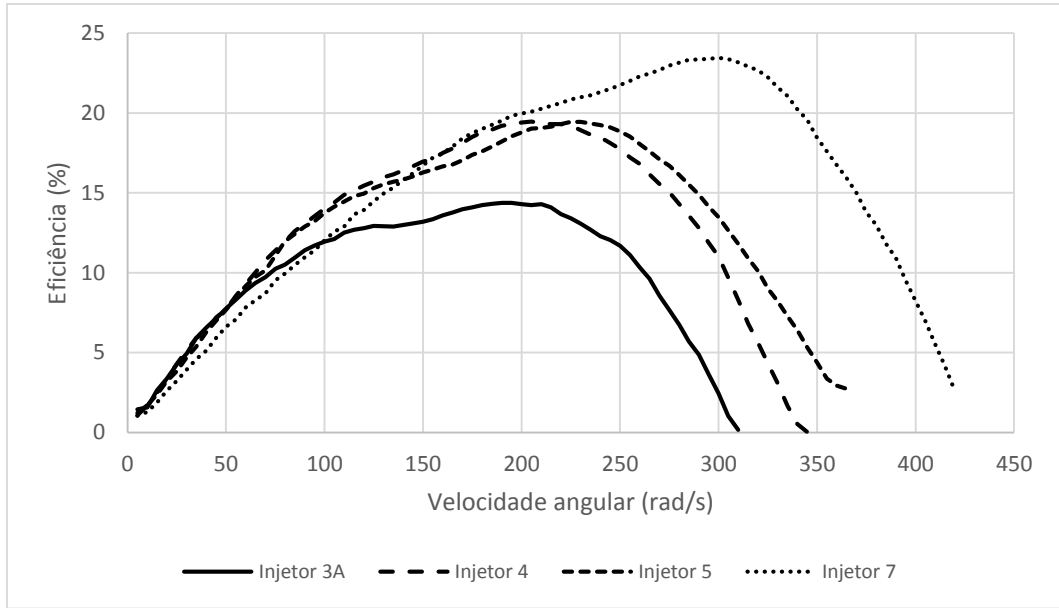


Figura R.49 – Eficiência com a turbina 7 e múltiplos injetores.

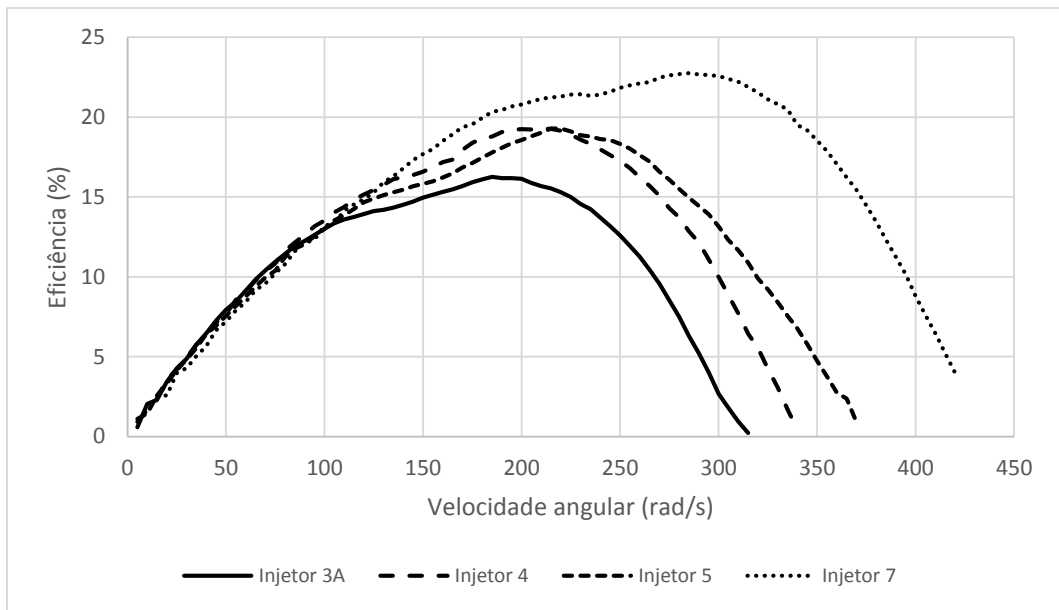


Figura R.50 – Eficiência com a turbina 7 invertida e múltiplos injetores.

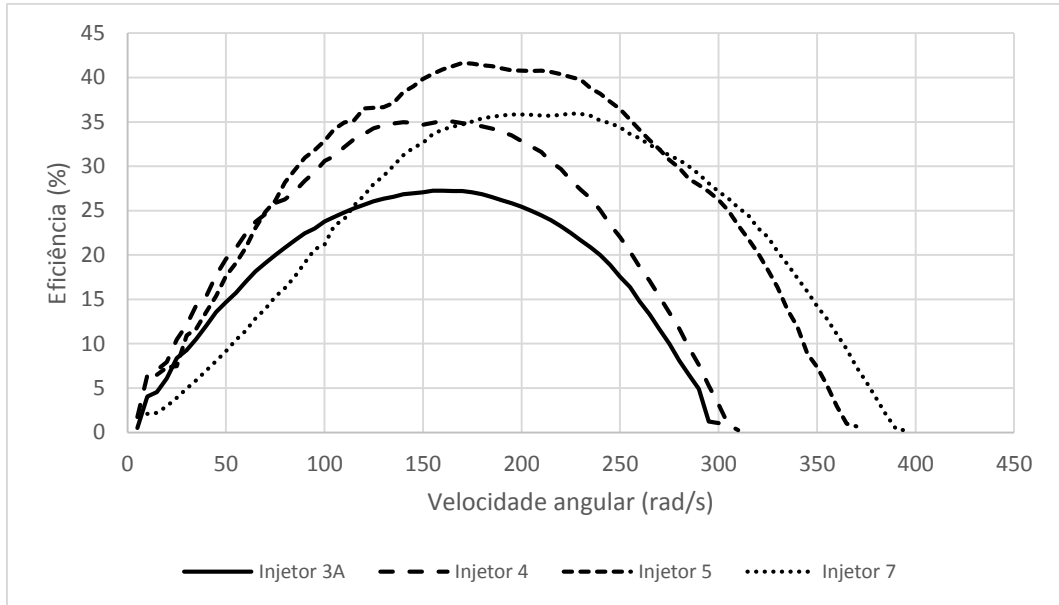


Figura R.51 – Eficiência com a turbina 8 e múltiplos injetores.

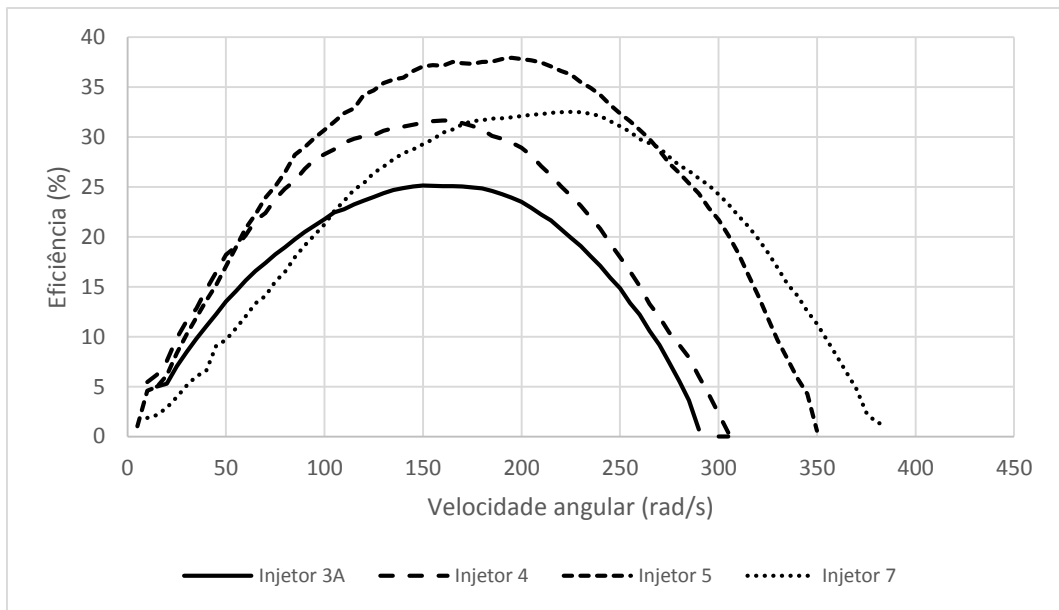


Figura R.52 – Eficiência com a turbina 9 e múltiplos injetores.

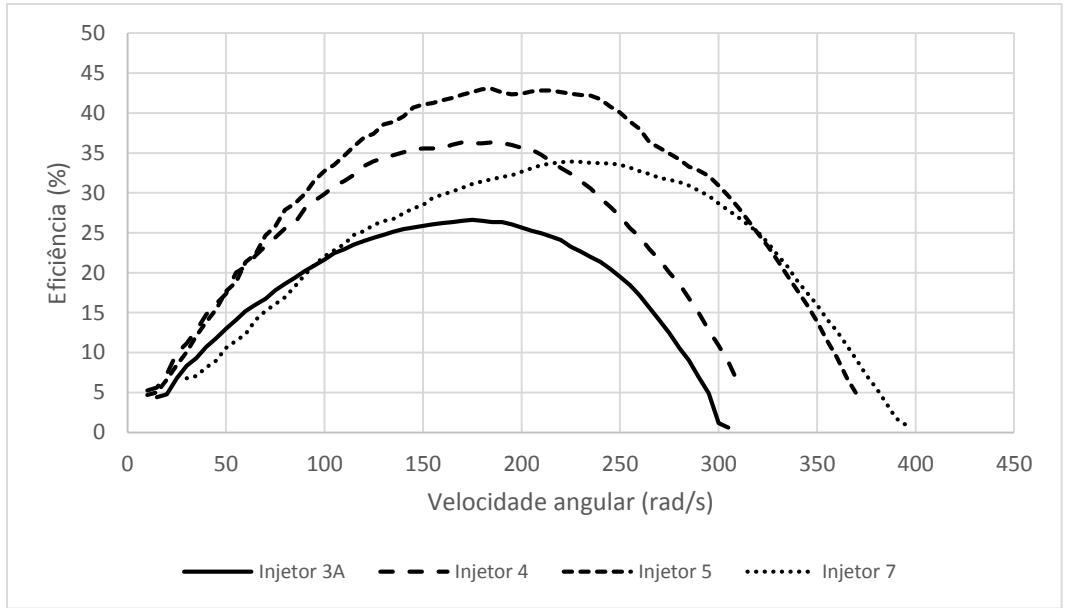


Figura R.53 – Eficiência com a turbina 10 e múltiplos injetores.

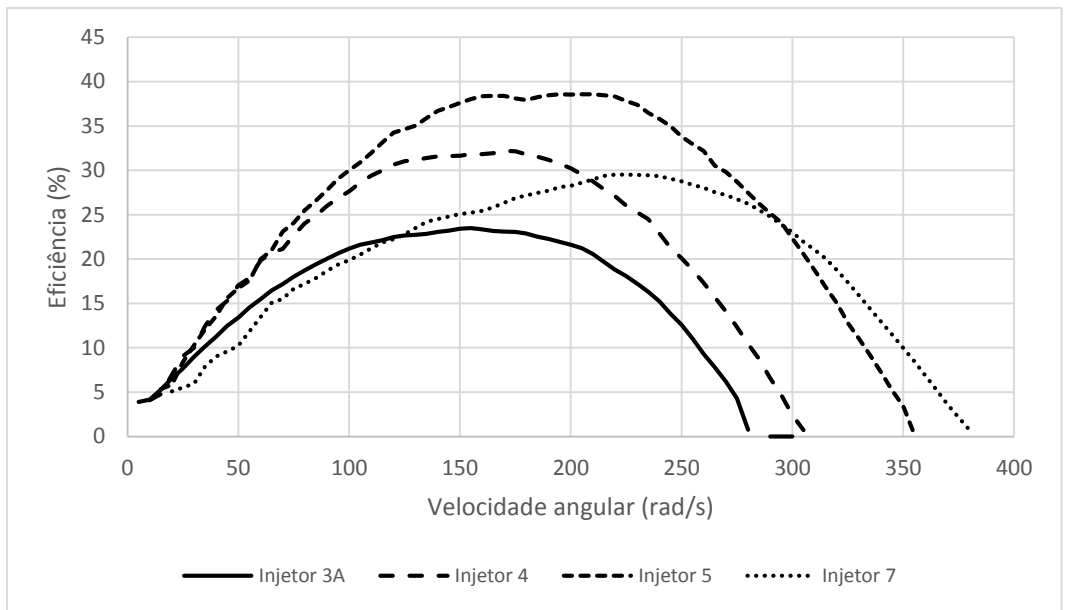


Figura R.54 – Eficiência com a turbina 11 e múltiplos injetores.

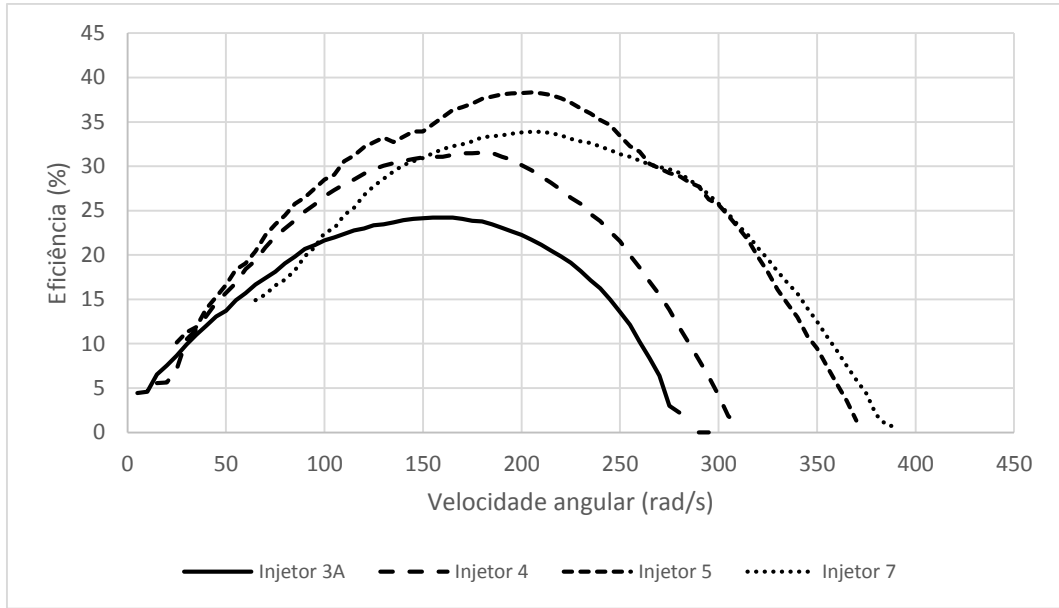


Figura R.55 – Eficiência com a turbina 12 e múltiplos injetores.

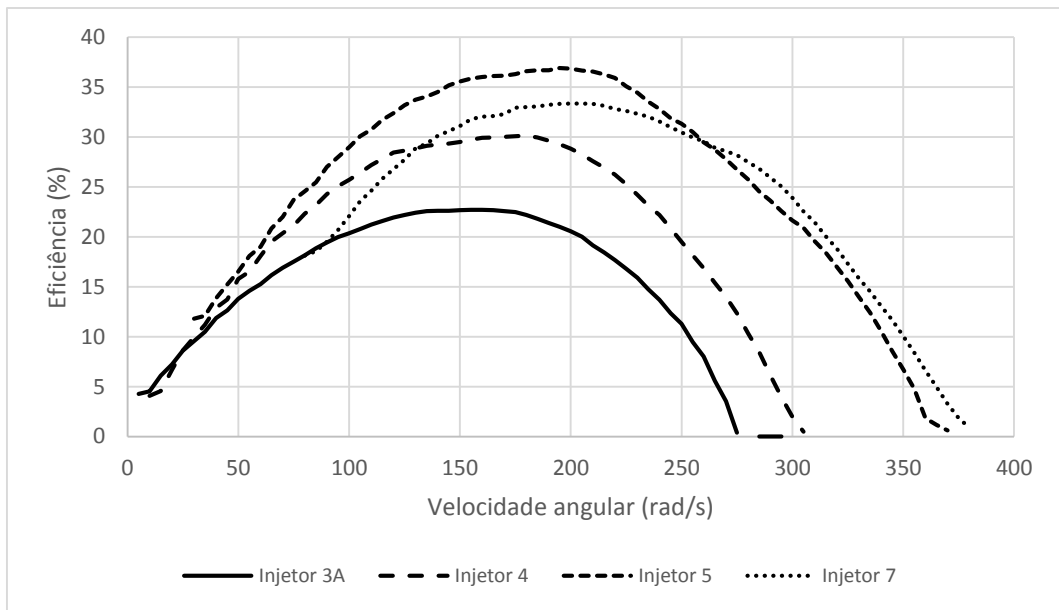


Figura R.56 – Eficiência com a turbina 13 e múltiplos injetores.

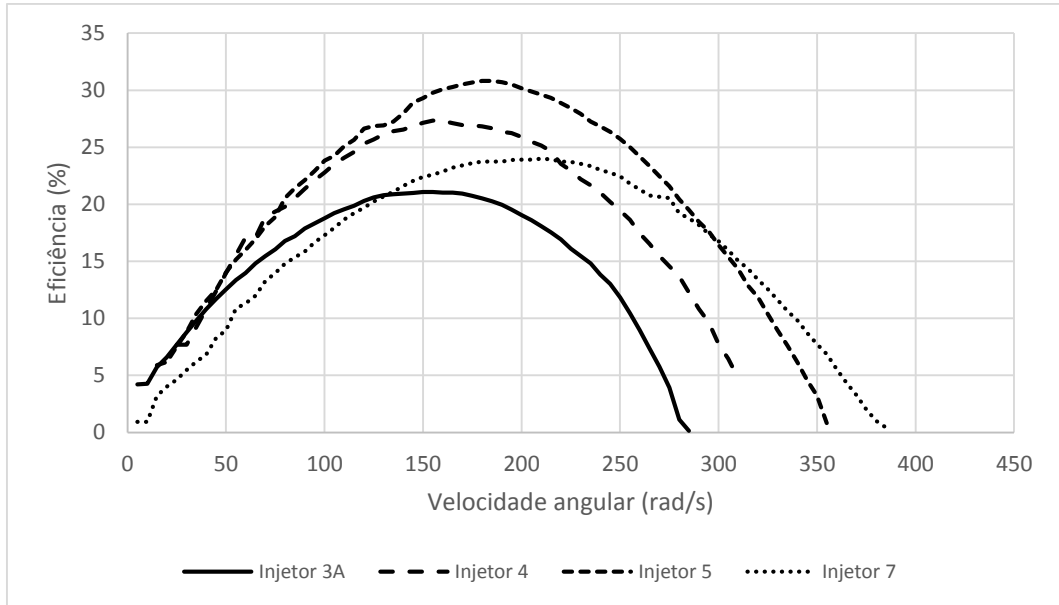


Figura R.57 – Eficiência com a turbina 14 e múltiplos injetores.

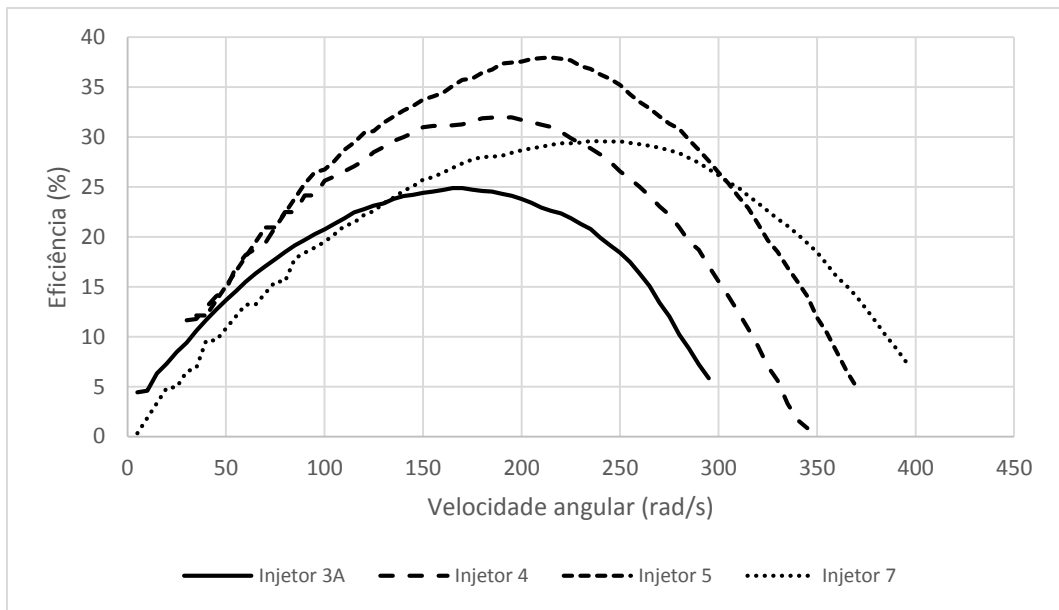


Figura R.58 – Eficiência com a turbina 15 e múltiplos injetores.

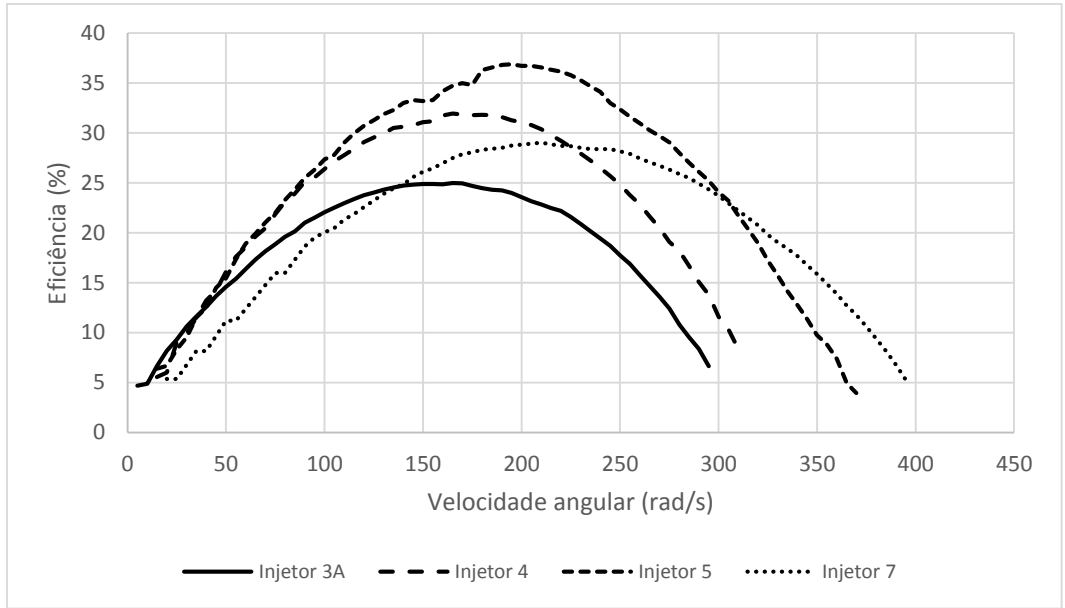


Figura R.59 – Eficiência com a turbina 16 e múltiplos injetores.

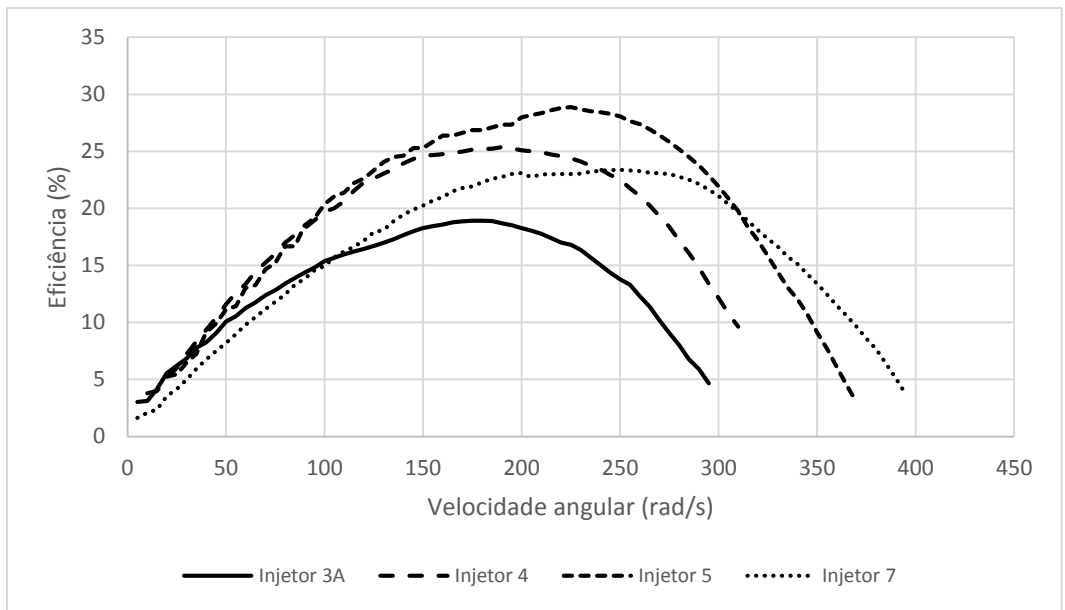


Figura R.60 – Eficiência com a turbina 17 e múltiplos injetores.

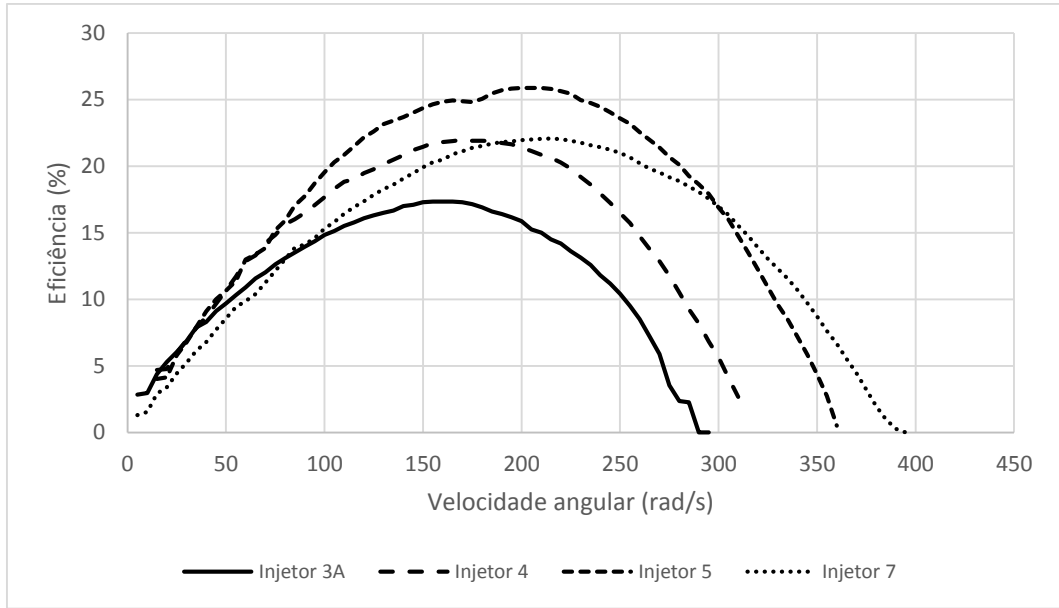


Figura R.61 – Eficiência com a turbina 18 e múltiplos injetores.

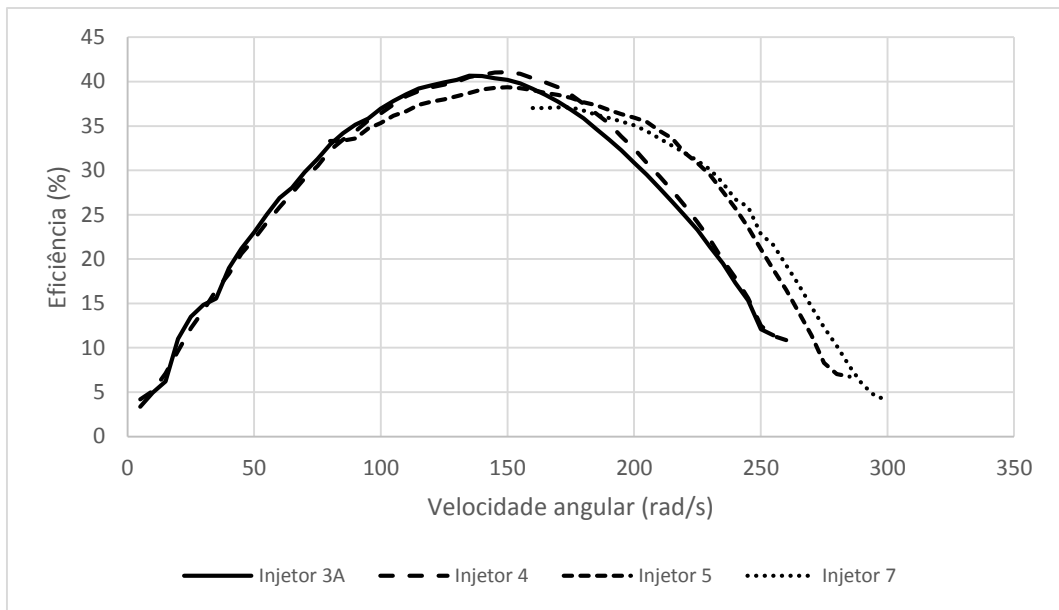


Figura R.62 – Eficiência com a turbina A e múltiplos injetores.

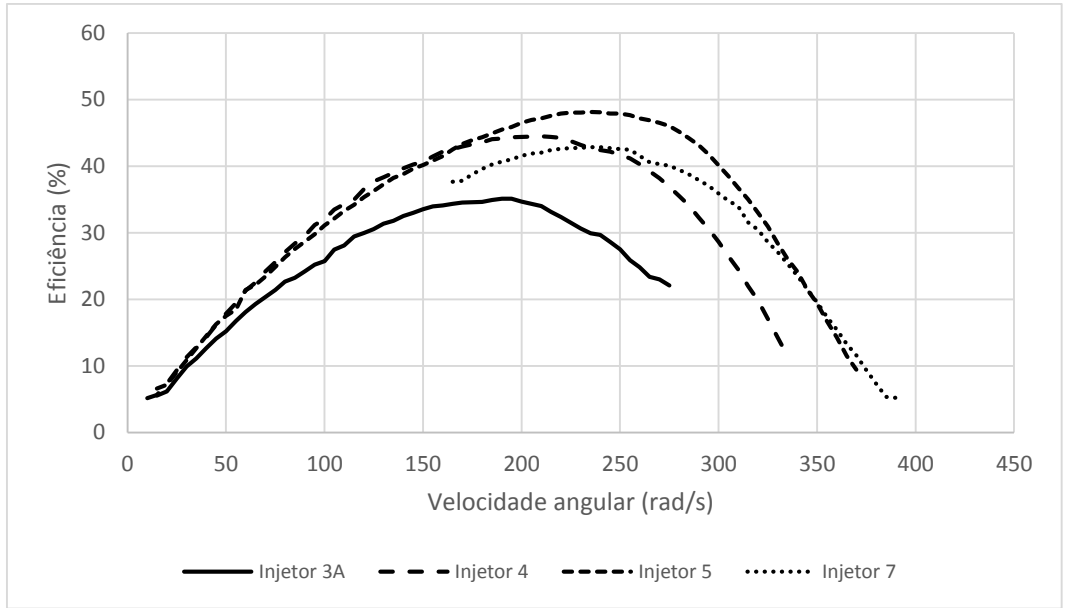


Figura R.63 – Eficiência com a turbina de metal e múltiplos injetores.

Anexo S. Gráficos dos testes de carga elétrica

Neste anexo estão agregados todos os dados relativos à turbina acoplada ao gerador com retificador.

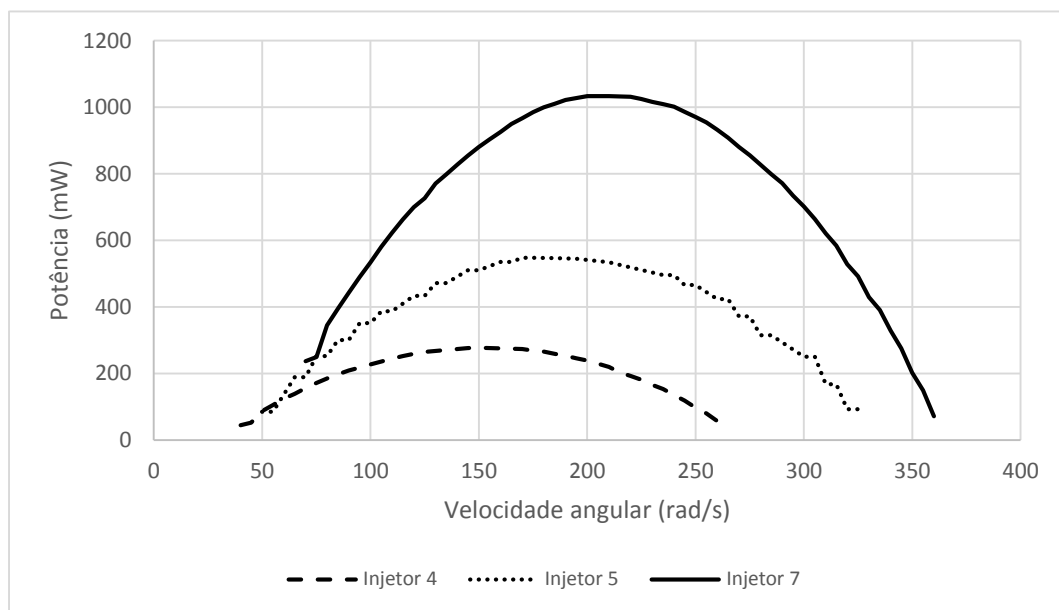


Figura S.1 – Potência elétrica com a turbina 8 e múltiplos injetores.

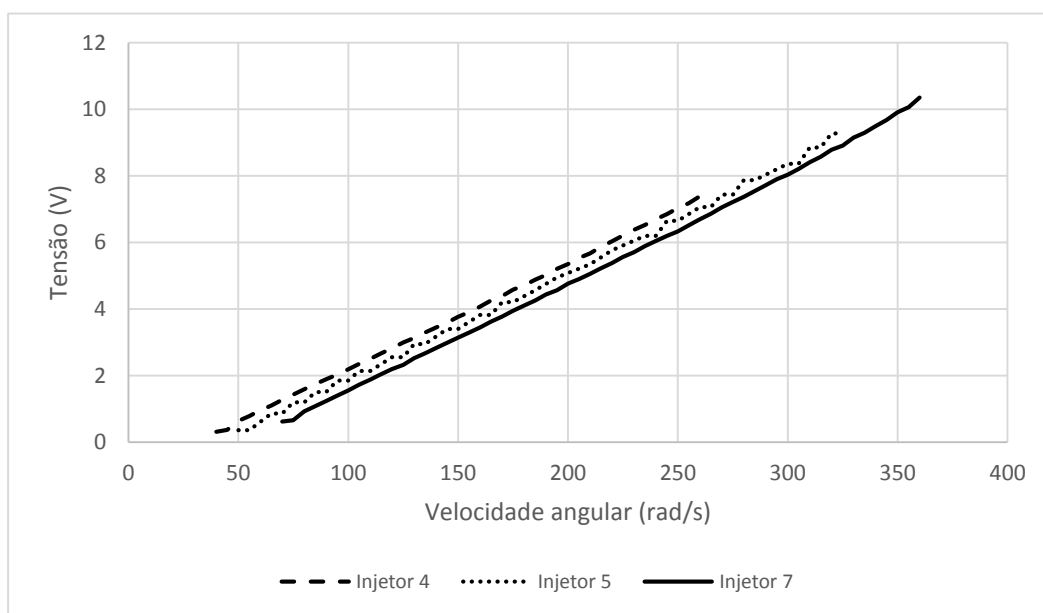


Figura S.2 – Relação entre a tensão e a velocidade angular para a turbina 8.

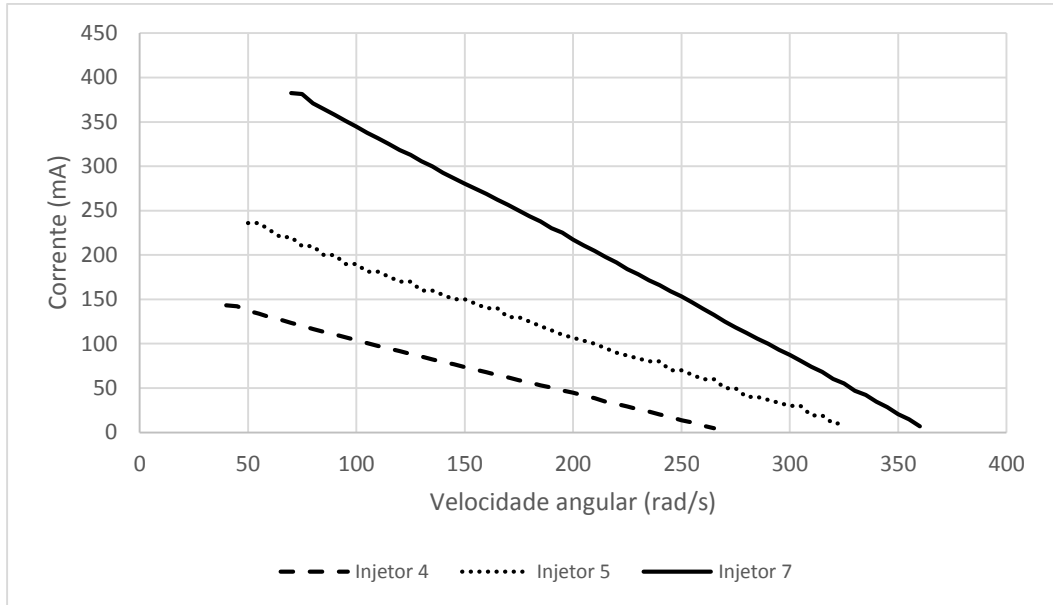


Figura S.3 – Relação entre a corrente e a velocidade angular para a turbina 8.

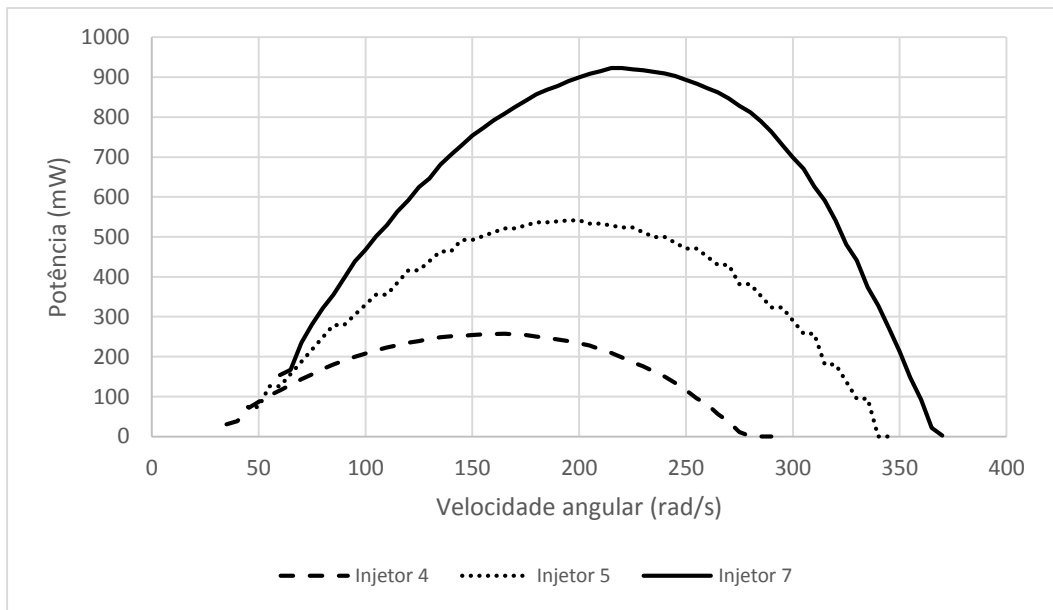


Figura S.4 – Potência elétrica com a turbina 10 e múltiplos injetores.

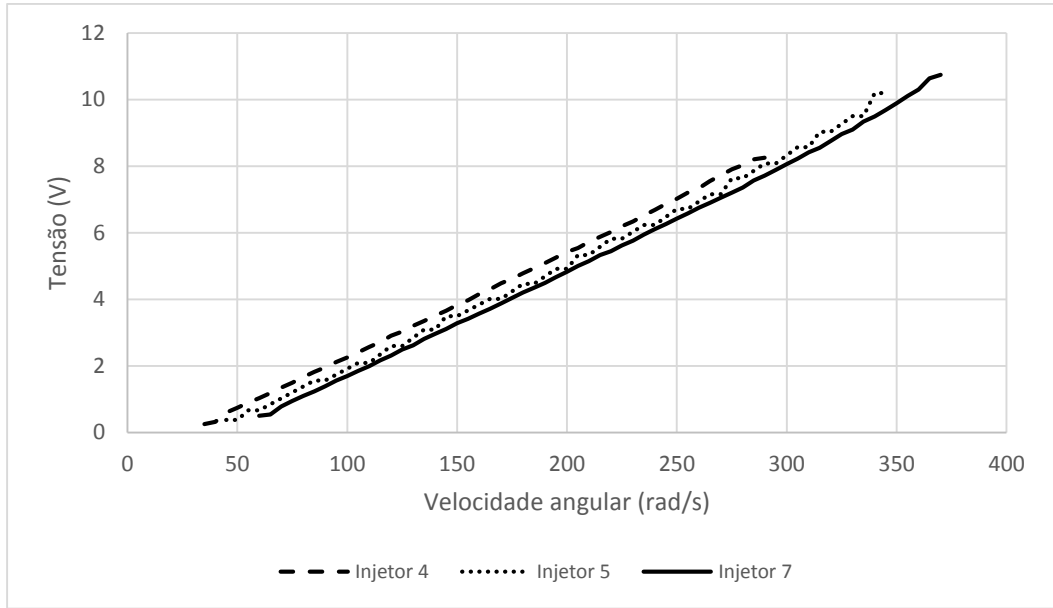


Figura S.5 – Relação entre a tensão e a velocidade angular para a turbina 10.

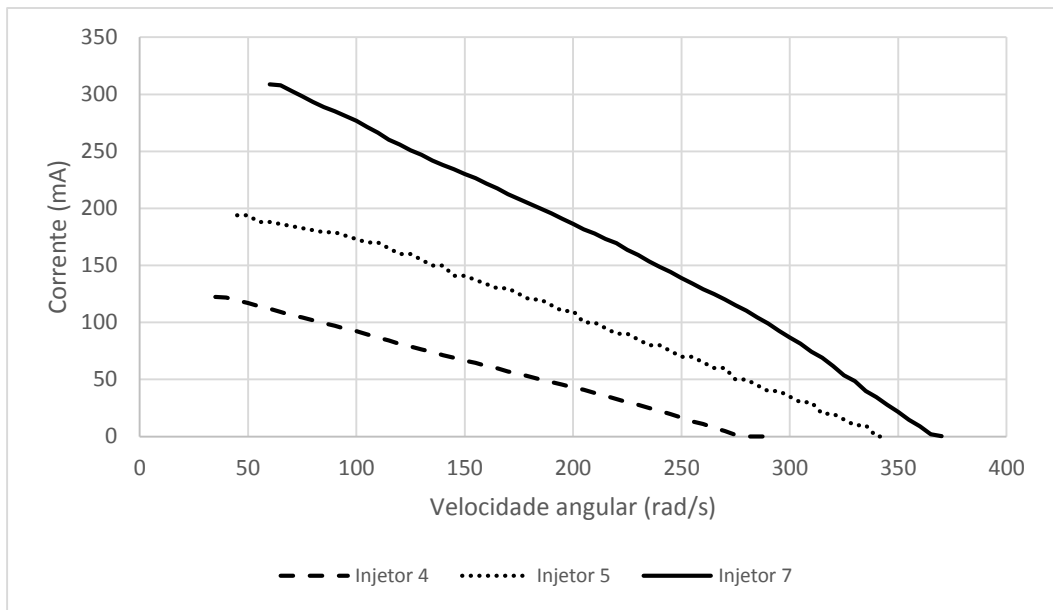


Figura S.6 – Relação entre a corrente e a velocidade angular para a turbina 10.

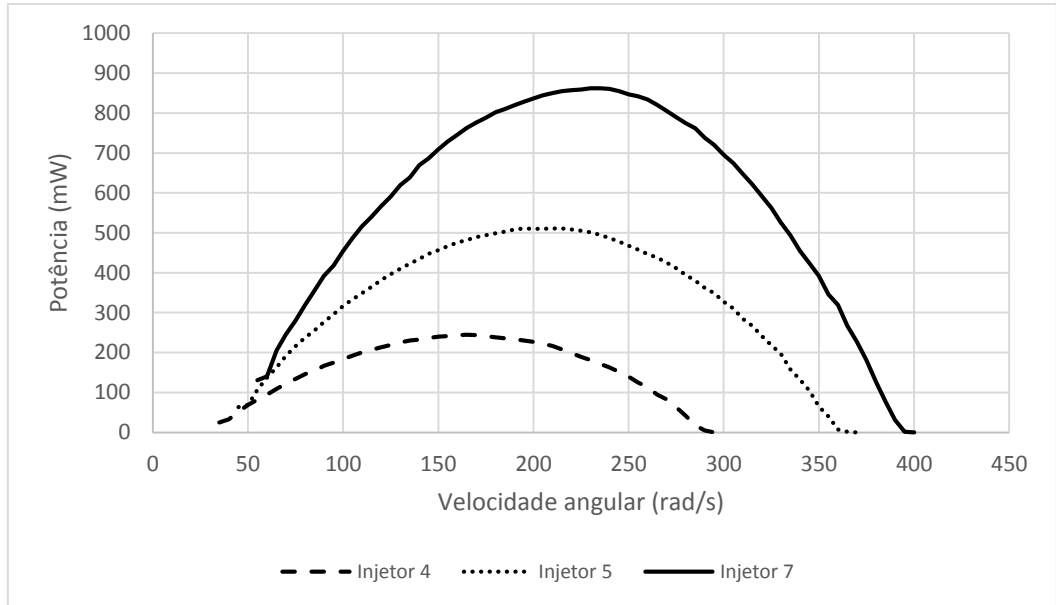


Figura S.7 – Potência elétrica com a turbina 15 e múltiplos injetores.

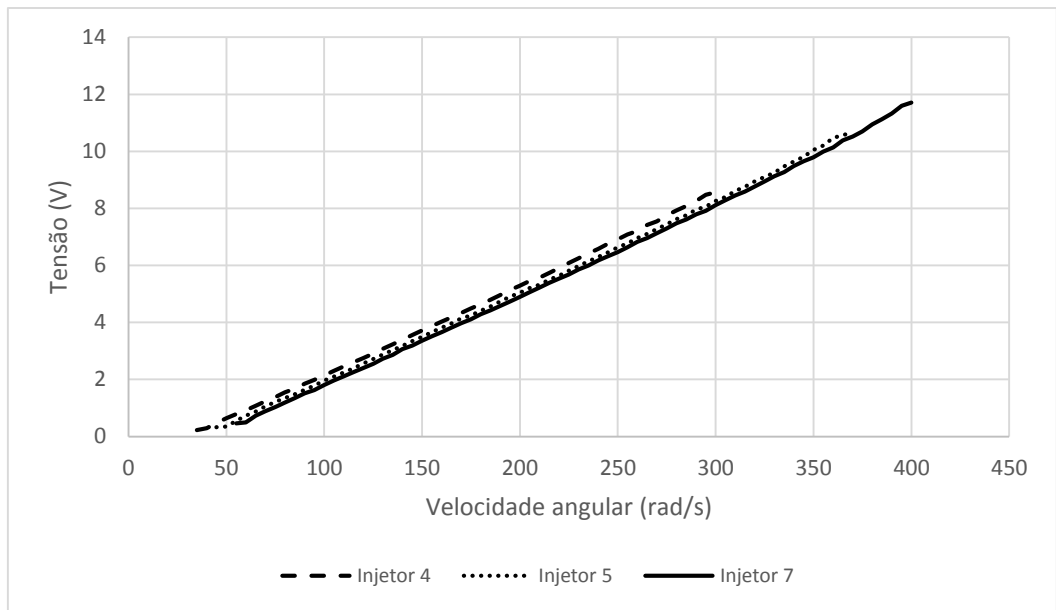


Figura S.8 – Relação entre a tensão e a velocidade angular para a turbina 15.

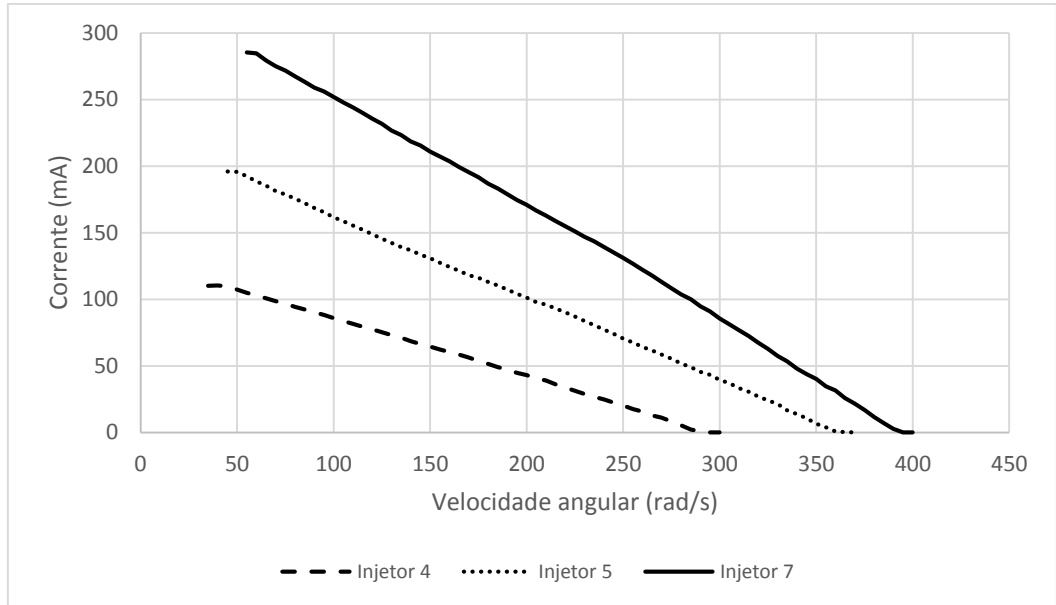


Figura S.9 – Relação entre a corrente e a velocidade angular para a turbina 15.

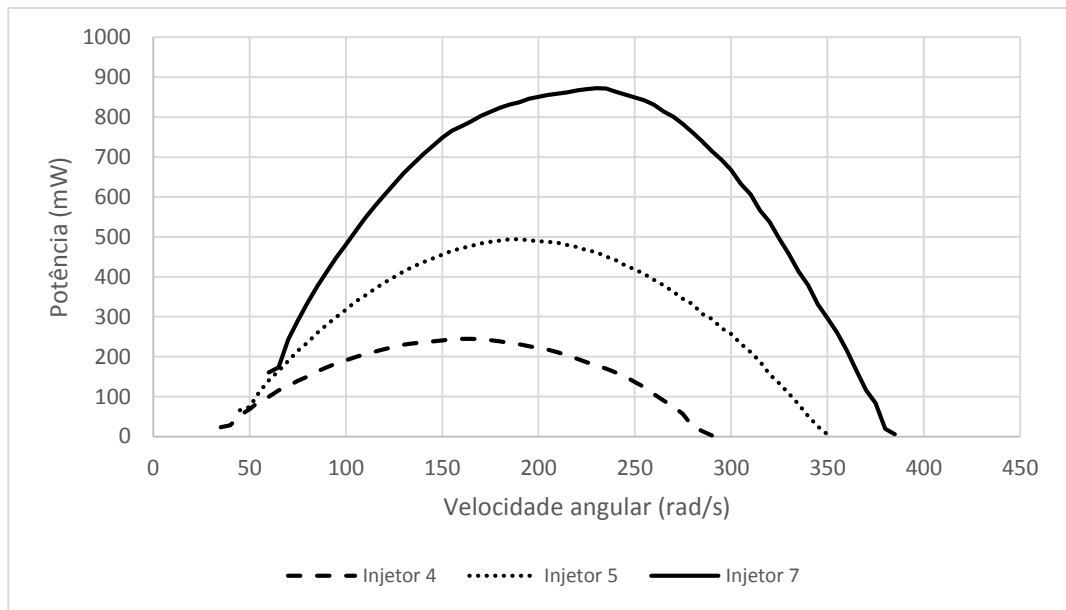


Figura S.10 – Potência elétrica com a turbina 16 e múltiplos injetores.

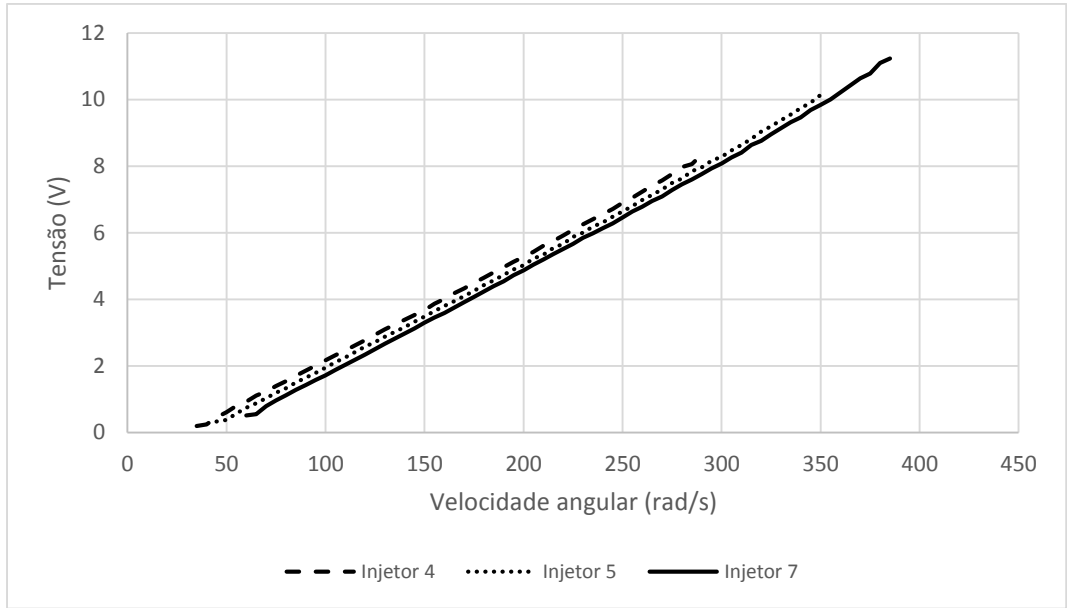


Figura S.11 – Relação entre a tensão e a velocidade angular para a turbina 16.

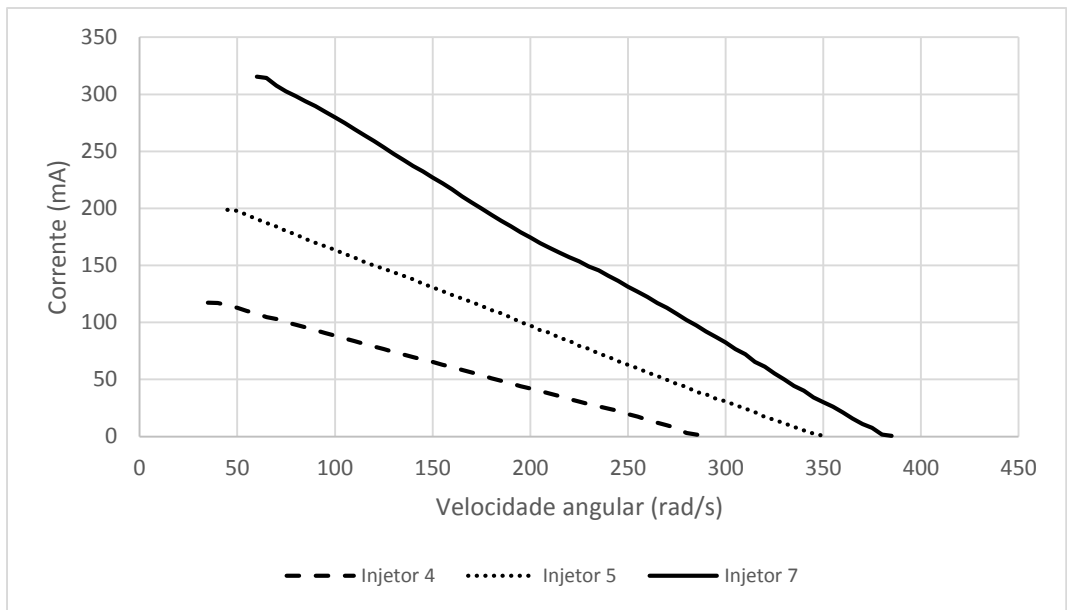


Figura S.12 – Relação entre a corrente e a velocidade angular para a turbina 16.

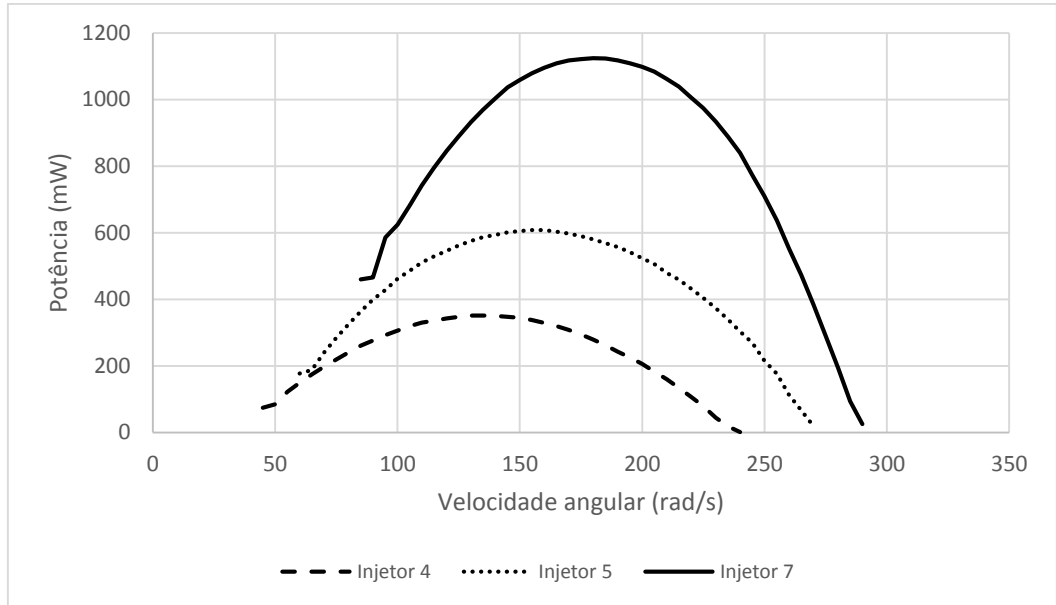


Figura S.13 – Potência elétrica com a turbina A e múltiplos injetores.

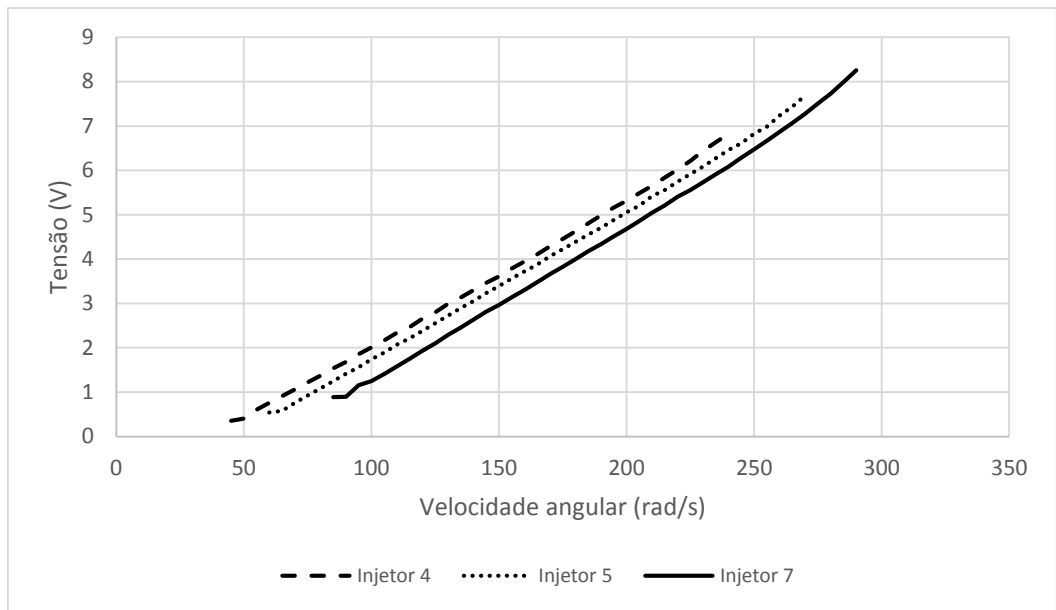


Figura S.14 – Relação entre a tensão e a velocidade angular para a turbina A.

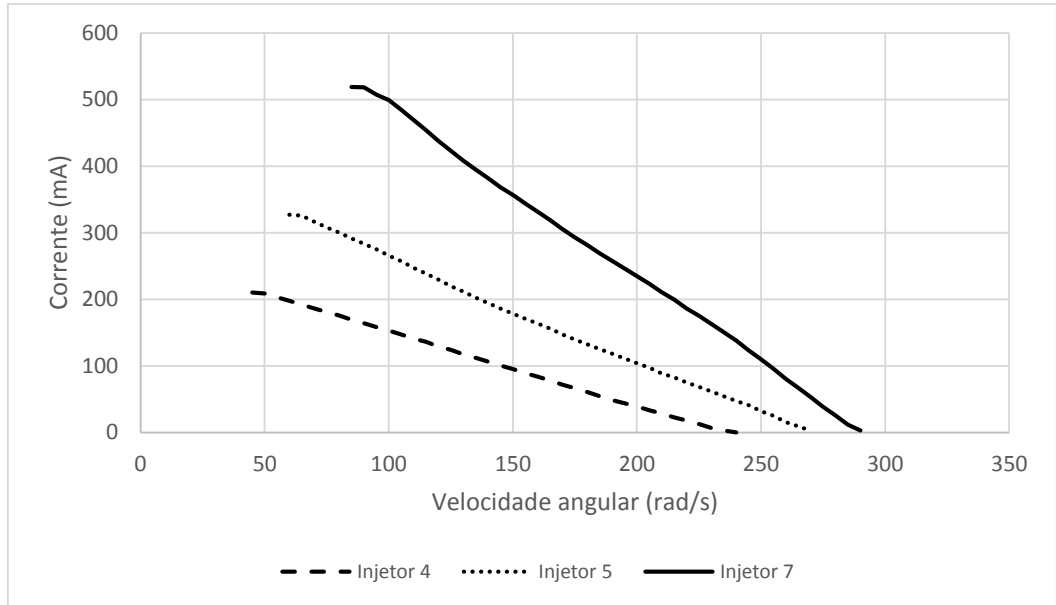


Figura S.15 – Relação entre a corrente e a velocidade angular para a turbina A.

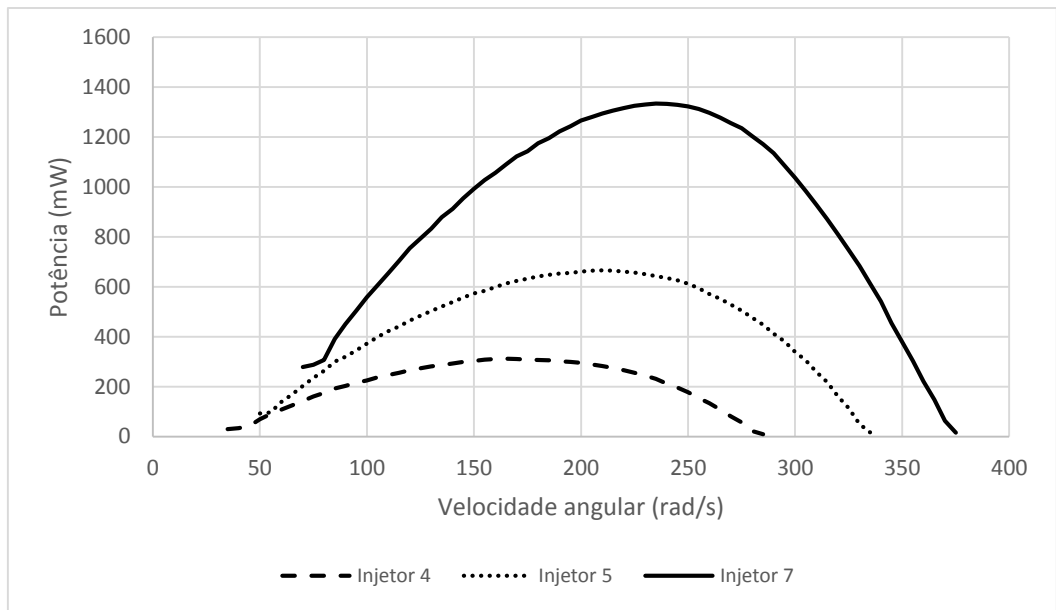


Figura S.16 – Potência elétrica com a turbina de metal e múltiplos injetores.

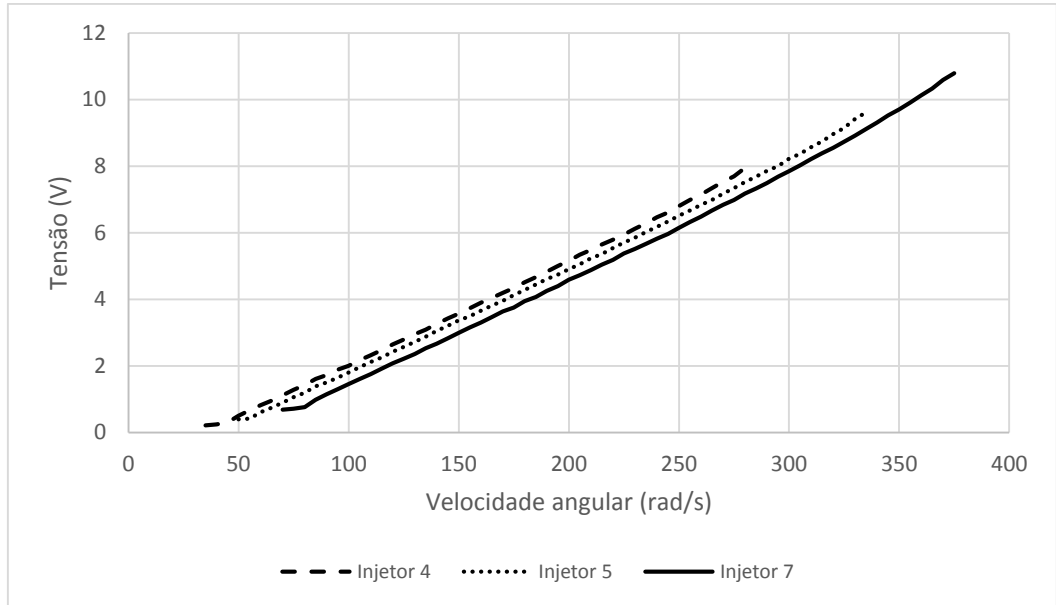


Figura S.17 – Relação entre a tensão e a velocidade angular para a turbina de metal.

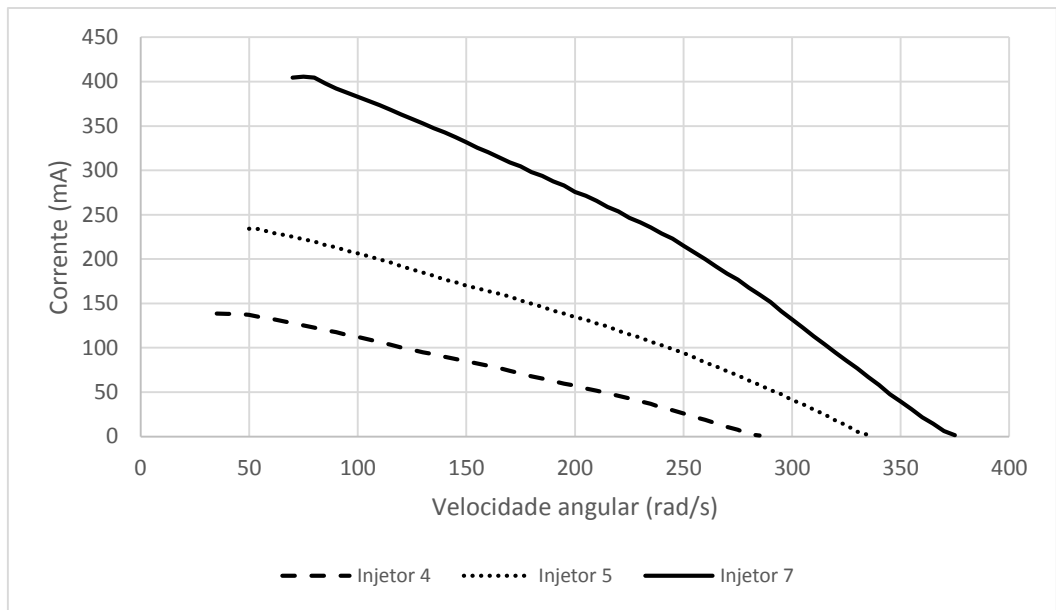


Figura S.18 – Relação entre a corrente e a velocidade angular para a turbina de metal.

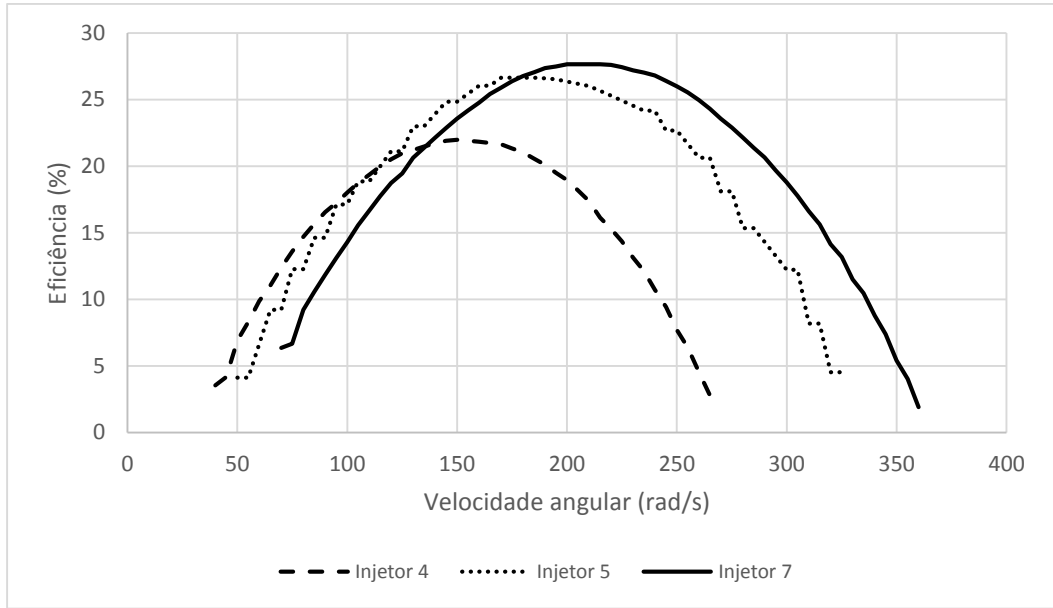


Figura S.19 – Eficiência elétrica com a turbina 8 e múltiplos injetores.

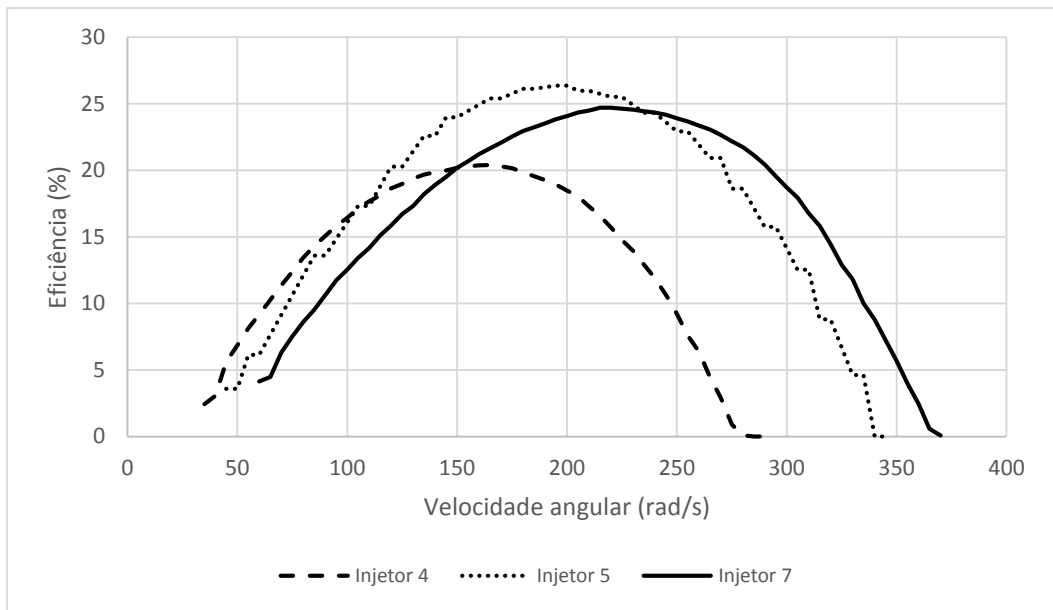


Figura S.20 – Eficiência elétrica com a turbina 10 e múltiplos injetores.

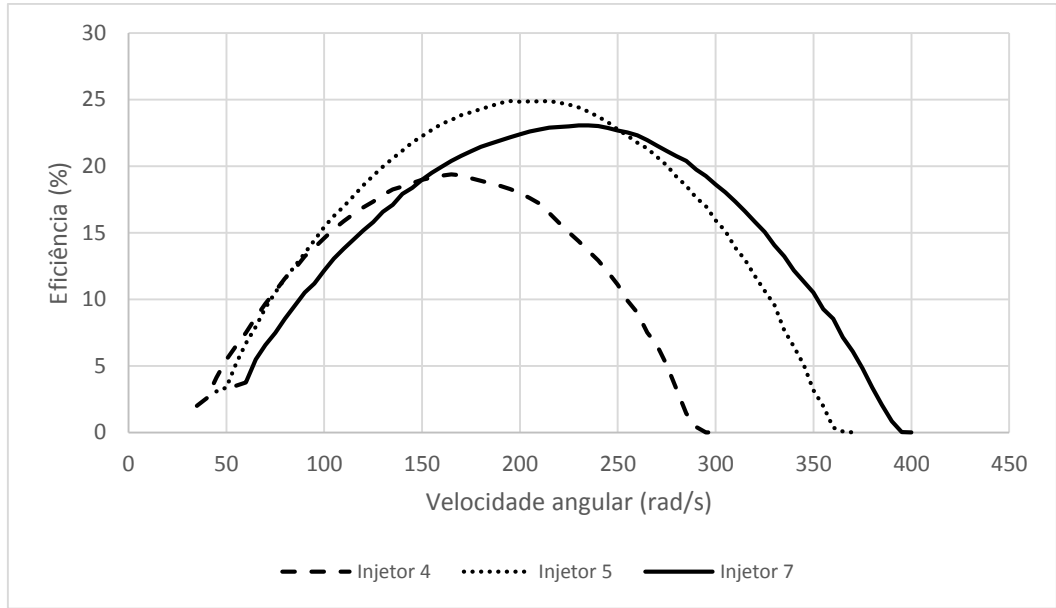


Figura S.21 – Eficiência elétrica com a turbina 15 e múltiplos injetores.

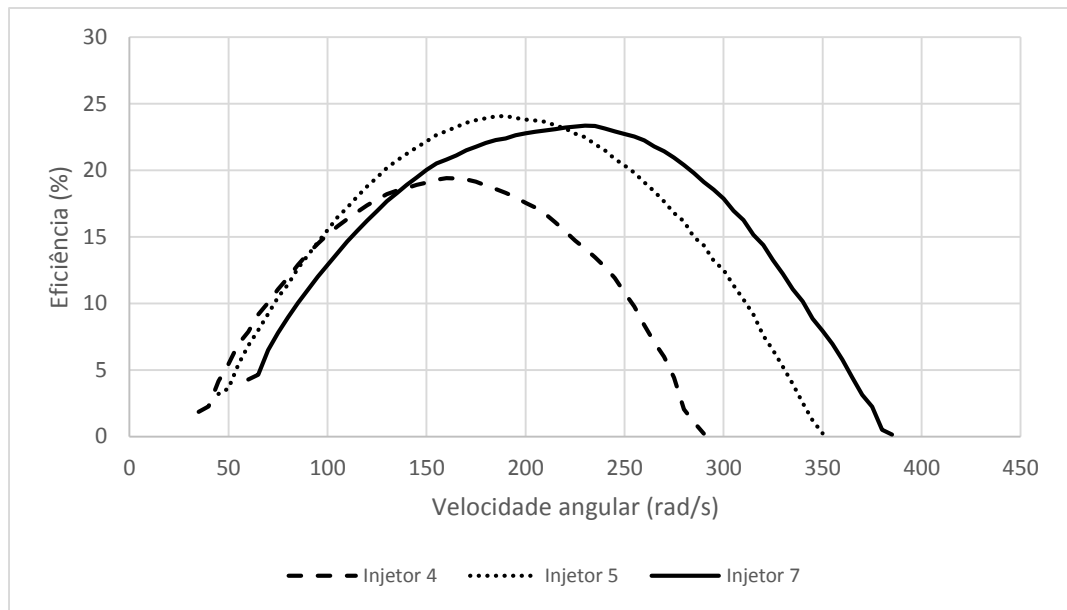


Figura S.22 – Eficiência elétrica com a turbina 16 e múltiplos injetores.

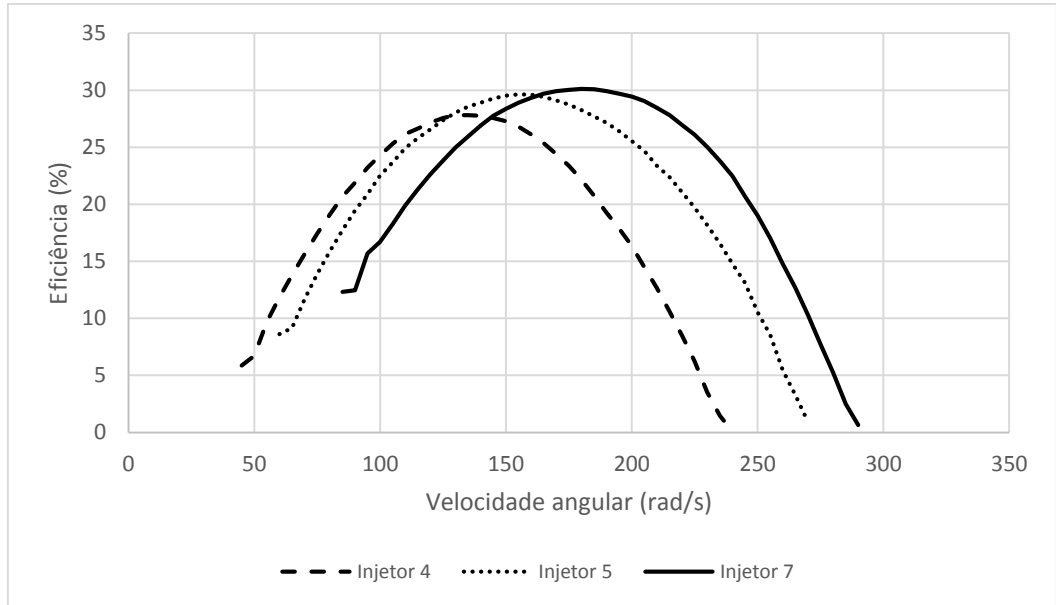


Figura S.23 – Eficiência elétrica com a turbina A e múltiplos injetores.

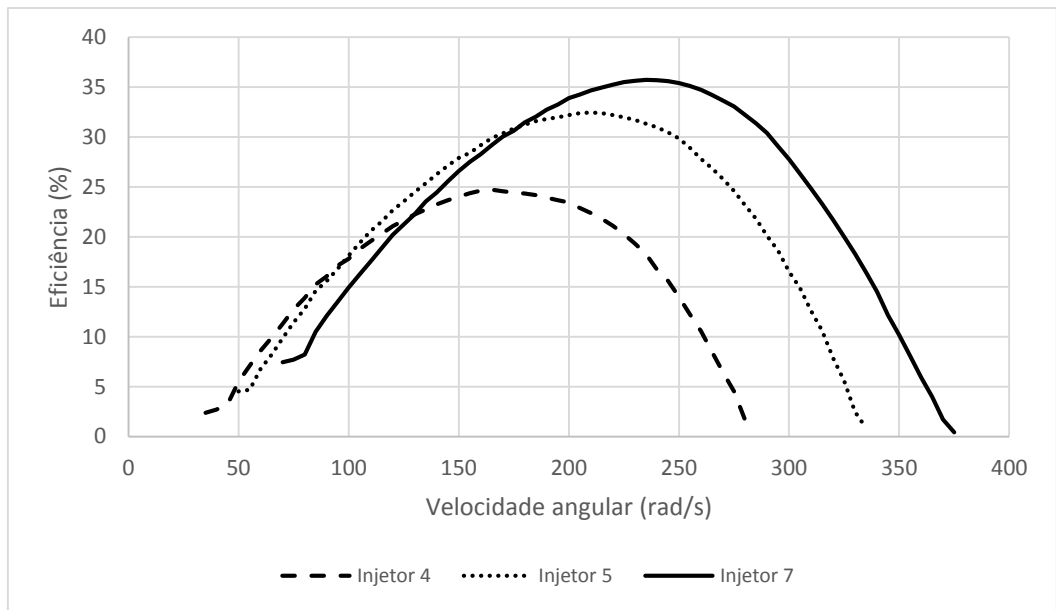


Figura S.24 – Eficiência elétrica com a turbina de metal e múltiplos injetores.

Anexo T. Gráficos da relação entre potência mecânica e potência elétrica

Neste anexo estão agregadas os gráficos relativos à eficiência do gerador e retificador.

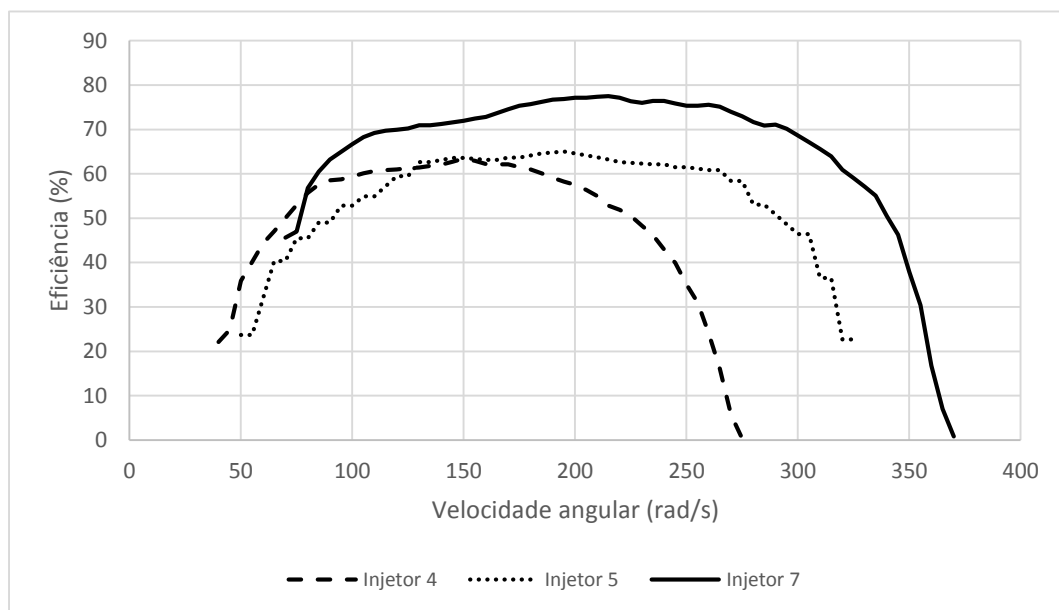


Figura T.1 – Eficiência do gerador e retificador com a turbina 8 e múltiplos injetores.

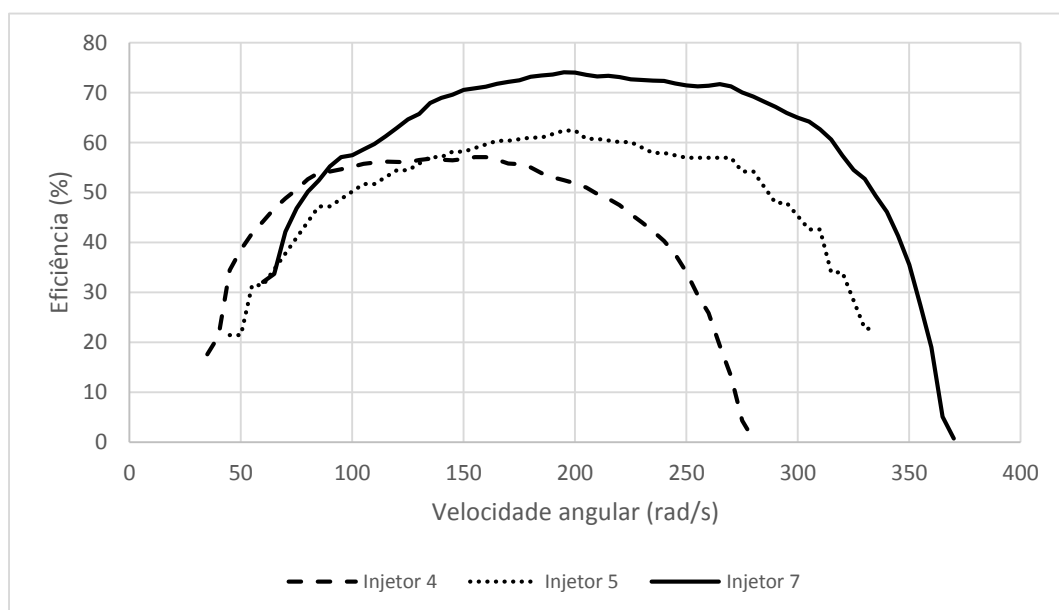


Figura T.2 – Eficiência do gerador e retificador com a turbina 10 e múltiplos injetores.

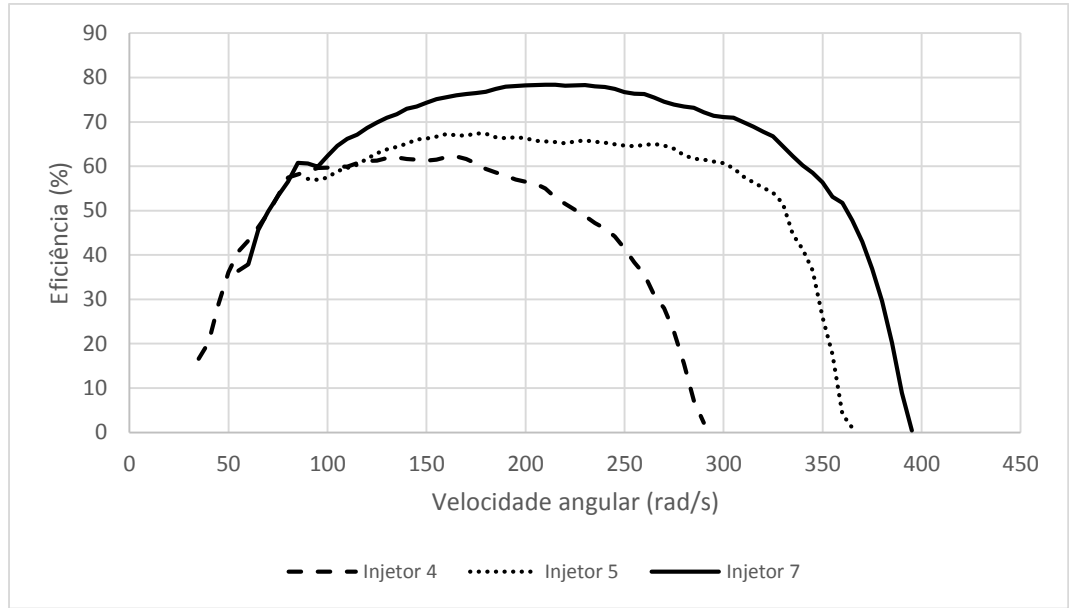


Figura T.3 – Eficiência do gerador e retificador com a turbina 15 e múltiplos injetores.

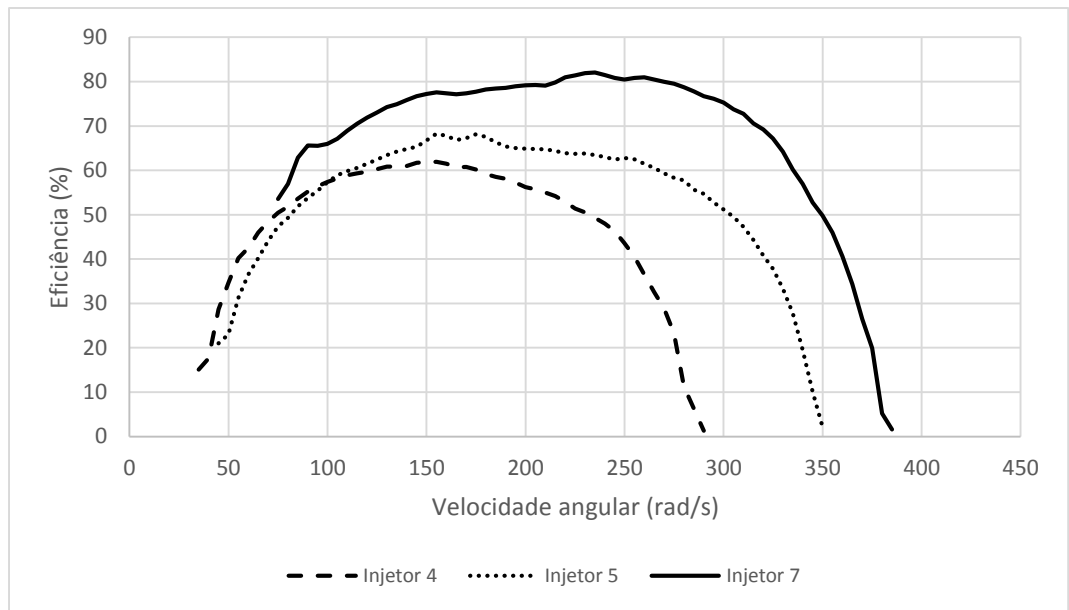


Figura T.4 – Eficiência do gerador e retificador com a turbina 16 e múltiplos injetores.

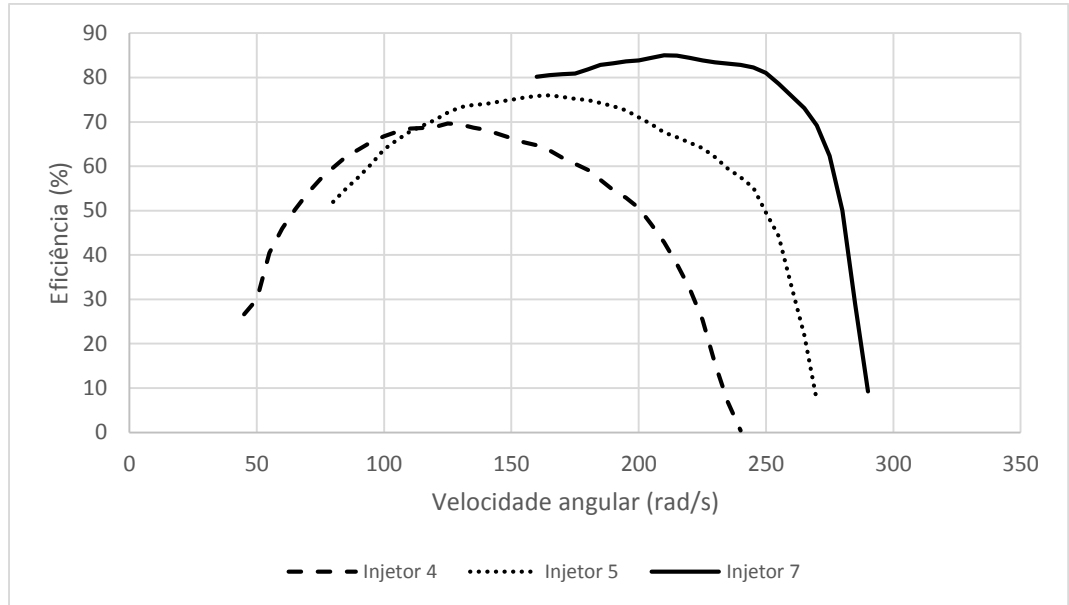


Figura T.5 – Eficiência do gerador e retificador com a turbina A e múltiplos injetores.

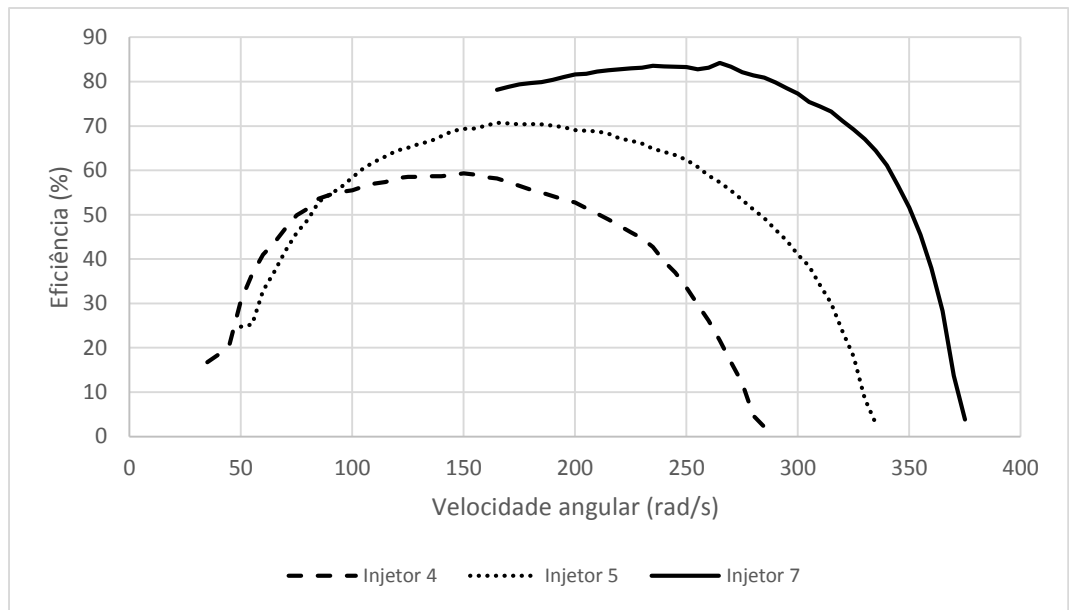


Figura T.6 – Eficiência do gerador e retificador com a turbina de metal e múltiplos injetores.

Anexo U. Código do nó sensor

```
#include "TimerOne.h"
#include <MsTimer2.h>
//
const int samplertime = 1000;

int requestcharge = 0;

byte inicio[3];
byte resto[30];
int tamanhoRecepcao = 0;

int times = 5; // a quantidade de vezes que mede antes de mandar
int timesdone = 0;

unsigned long timeold = 0;
unsigned long time = 0;
unsigned long periodo = 0;
unsigned long periodotemp = 0;

const int ISensein = A1;
const int ISenseout = A2;
const int VSense = A0;

int valCorrenteout = 0;
int valCorrentein = 0;
int valTensao = 0;

int valCorrenteinold = 0;

const int alive_pin = 8;
const int chargepin = 12;
const int sendpin = 7;

int duty = 0;

int direccao = 1;

unsigned int state = 0; //0 = standby 1 = charging, 2= manual, 9 = panic

const unsigned int MaxVolt = 469;
const unsigned int MinVolt = 369;

const unsigned int MaxAmp = 500; //em niveis
const unsigned int MinAmp = 10;

int correntepico = 0;

int dutypicoUpper = 0;
int dutypico = 0;
int dutypicoLower = 0;

int indeciso = 0;

byte head[] = {0x7E, 0x00, 0x42, 0x10, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0xFF, 0xFE, 0x00, 0x00 }; //14 len
```

```

byte payload[] = {'?', 'S', 'T', '=', 0x00, 0x00, '&', 'D', 'T', '=', 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, '&', 'B', 'V', '=', 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, '&', 'I',
'I', '=', 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, '&', 'I', 'O', '=', 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, '&', 'R', 'P', '=', 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00}; // len52
////////// status Duty cycle
Batery voltage Current in Duty cycle Current
out Rotation period
byte checksum = 0x79;

```

```
void setup()
```

```

{
  Serial.begin(9600);

  pinMode(alive_pin, OUTPUT);
  pinMode(chargepin, OUTPUT);
  pinMode(sendpin, OUTPUT);

  Timer1.initialize(40);
  Timer1.pwm(9, 0);
  attachInterrupt(1, rodou, FALLING);

  MsTimer2::set(sampletime, Faz);
  MsTimer2::start();
}

```

```
void loop()
```

```

{
}

```

```
void Faz()
```

```

{
  timesdone++;
  digitalWrite(alive_pin, !digitalRead(alive_pin));
  switch (state) {
    case 0://idle
      digitalWrite(chargepin, LOW);
      valCorrentein = analogRead(ISensein);
      valCorrenteout = analogRead(ISenseout);
      valTensao = analogRead(VSense);

      if (valTensao < MinVolt || requestcharge == 1) {
        requestcharge = 0;
        //Serial.println("inicia");
        startcharging();
      }

      break;
    case 1://charging
      digitalWrite(chargepin, !digitalRead(alive_pin));
      valCorrenteinold = valCorrentein;
      valCorrentein = analogRead(ISensein);
      valCorrenteout = analogRead(ISenseout);
      valTensao = analogRead(VSense);

      if (valTensao > MaxVolt || state == 0) {

```

```

    //Serial.println("para");

    stopcharging();
}
else if (valCorrentein <= valCorrenteinold) {
    digitalWrite(chargepin, !digitalRead(chargepin));
    //Serial.println("muda");
    direccao = -direccao;
    duty = duty + direccao;
    indeciso++;

    if (duty > 140) {
        duty = 140;
    }

    if (duty < 0) {
        duty = 0;
    }

    Timer1.setPwmDutyByte(9, duty);
}

else if (valCorrentein > valCorrenteinold) {
    indeciso = 0;
    duty = duty + direccao;
    if (duty > 140) {
        duty = 140;
    }

    if (duty < 0) {
        duty = 0;
    }
    Timer1.setPwmDutyByte(9, duty);

    //Serial.println("continua");
}

if (indeciso > 20) {
    findpeak();
}

break;

case 2://manual
    digitalWrite(chargepin, HIGH);
    valCorrenteinold = valCorrentein;
    valCorrentein = analogRead(ISensein);
    valCorrenteout = analogRead(ISenseout);
    valTensao = analogRead(VSense);
    Timer1.setPwmDutyByte(9, duty);

    break;

case 3://sweep
    digitalWrite(chargepin, !digitalRead(alive_pin));
    valCorrentein = analogRead(ISensein);
    valCorrenteout = analogRead(ISenseout);
    valTensao = analogRead(VSense);
    duty = duty + 1;

```

```

    if (duty > 140) {
        duty = 0;
    }

    if (duty < 0) {
        duty = 0;
    }
    Timer1.setPwmDutyByte(9, duty);

    timesdone = times;

    break;

case 9: // panic
    Timer1.setPwmDutyByte(9, 0);
    digitalWrite(alive_pin, HIGH);
    digitalWrite(chargepin, !digitalRead(chargepin));
    digitalWrite(sendpin, !digitalRead(chargepin));

    break;

default:
    Timer1.setPwmDutyByte(9, 0);
    digitalWrite(alive_pin, HIGH);
    digitalWrite(chargepin, !digitalRead(chargepin));
    digitalWrite(sendpin, !digitalRead(chargepin));
    break;

}

if (timesdone >= times) {
    Manda();
    timesdone = 0;
}
}

void findpeak()
{
    indeciso = 0;
    Timer1.setPwmDutyByte(9, 0);
    correntepico = 0;
    dutypico = 0;
    for (int i = 1; i < 140; i++) {
        digitalWrite(chargepin, !digitalRead(chargepin));
        Timer1.setPwmDutyByte(9, i);
        delay(3000);
        valCorrentein = analogRead(ISensein);
        if (valCorrentein > correntepico) {
            correntepico = valCorrentein;
            dutypico = i;
        }
    }
}

void startcharging()
{
    digitalWrite(alive_pin, LOW);
    state = 1;
}

```

```

    duty = 0;
    findpeak();
    duty = dutypico;
    Timer1.setPwmDutyByte(9, duty);
}

void stopcharging()
{
    digitalWrite(chargepin, LOW);
    state = 0;
    duty = 0;
    direccao = 1;
    Timer1.setPwmDutyByte(9, duty);
}

void Manda()
{
    digitalWrite(sendpin, !digitalRead(sendpin));
    checksum = 0x0D;
    char tempstatus[3];
    char tempdata[5];
    char tempdatalong[11];
    //byte payload[] = {'?', 'S', 'T', '=', 0x00, 0x00, '&', 'D', 'T', '=',
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, '&', 'B', 'V', '=', 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, '&',
'I', 'I', '=', 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, '&', 'I', 'O', '=', 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, '&', 'R', 'P', '=', 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00};
    ////////////////////////////////////////////////// status      4-5          Duty cycle
10-13          Batery voltage      18-21
Current in      26-29          Current out      34 -37
Rotation period 42-51

    for (int i = 0; i < 2; i++) {
        sprintf( tempstatus, "%2d", state );
        payload[i + 4] = tempstatus[i];
    }

    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        sprintf( tempdata, "%4d", duty );
        payload[i + 10] = tempdata[i];
    }

    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        sprintf( tempdata, "%4d", valTensao );
        payload[i + 18] = tempdata[i];
    }

    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        sprintf( tempdata, "%4d", valCorrentein );
        payload[i + 26] = tempdata[i];
    }

    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        sprintf( tempdata, "%4d", valCorrenteout );
        payload[i + 34] = tempdata[i];
    }
}

```

```

for (int i = 0; i < 10; i++) {
    sprintf( tempdatalong, "%10lu", periodo );
    payload[i + 42] = tempdatalong[i];
}
for (int i = 0; i < sizeof(payload); i++) {
    checksum += payload[i];
}

checksum = 0xFF - checksum;

Serial.write(head, sizeof(head));
Serial.write(payload, sizeof(payload));
Serial.write(checksum);
}

void rodou() {
    noInterrupts();
    timeold = time;
    time = micros();
    if (time > timeold) {
        periodo = time - timeold;
    }
    interrupts();
}

void serialEvent() {
    byte checksum = 0;
    while (Serial.available()) {
        Serial.readBytes(inicio, 3); //captura os primeiros 4 bytes para
encontrar
        if (inicio[0] == 0x7E) { // o comprimento da trama
            tamanhoRecepcao = (inicio[1] << 8) + inicio[2]; //calcula o
comprimento da trama
            Serial.readBytes(resto, tamanhoRecepcao + 1); //vai buscar o
resto da trama

            for (int i = 0; i < tamanhoRecepcao + 1; i++) { //soma os pacotes
para verificar checksum
                checksum += resto[i];
            }
            //

            if (checksum == 0xFF) { // o valor do checksum é o
correcto?

                if (resto[0] == 0x90 && resto[12] == 0x69 && state == 0) { //
iniciar carregamento
                    requestcharge = 1;

                }

                if (resto[0] == 0x90 && resto[12] == 0x70) { //parar carregamento
                    stopcharging();

                }

                if (resto[0] == 0x90 && resto[12] == 0x6D && state == 0) { //manual
                    state = 2;

```

```

}

if (resto[0] == 0x90 && resto[12] == 0x76 && state == 0) { //sweep
    state = 3;
}

else if (resto[0] == 0x90 && resto[12] == 0x73 && state == 2) {
    char valor[] = {'0', '0', '0', '0'};
    int j = 4 - (tamanhoRecepcao - 13);

    for (int i = 13; i < tamanhoRecepcao; i++) {
        valor[j] = resto[i];
        j++;
    }
    noInterrupts();
    duty = atoi(valor);
    if (duty > 140) {
        duty = 140;
    }
    else if (duty < 0) {
        duty = 0;
    }
    interrupts();
    Timer1.setPwmDutyByte(9, duty);
}
}
}
digitalWrite(sendpin, !digitalRead(sendpin));
}

```

Anexo V. Gráficos dos testes com nó sensor

Neste anexo são apresentadas todos os gráficos relativos aos testes com o nó sensor.

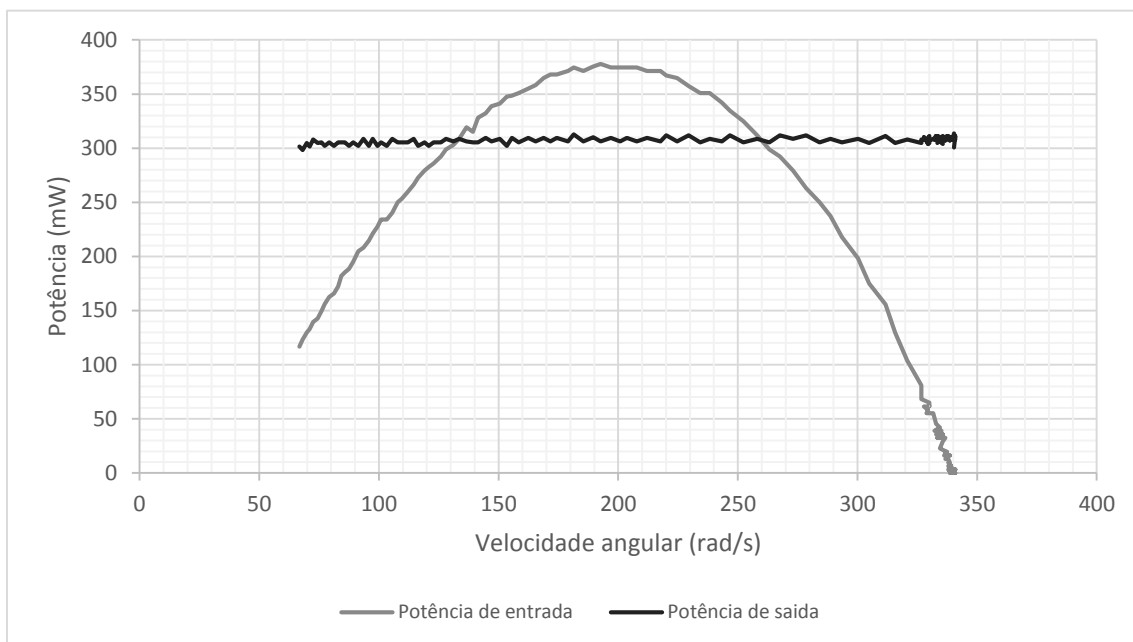


Figura V.1 – Potência de entrada e saída da bateria para a turbina 15 e injetor 5.

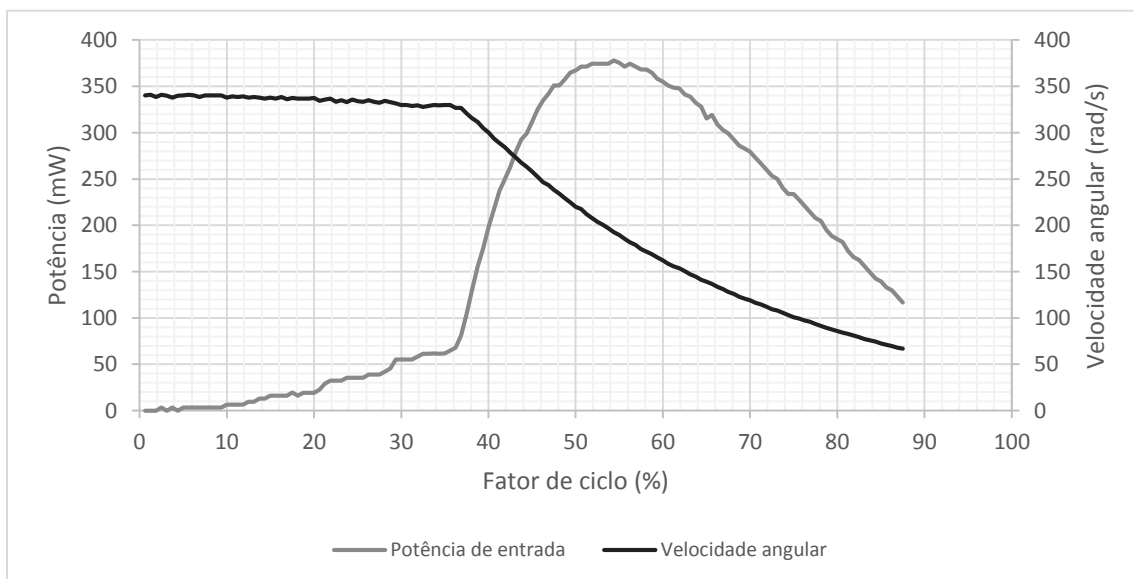


Figura V.2 – Potência de entrada e velocidade angular para a turbina 15 e injetor 5.

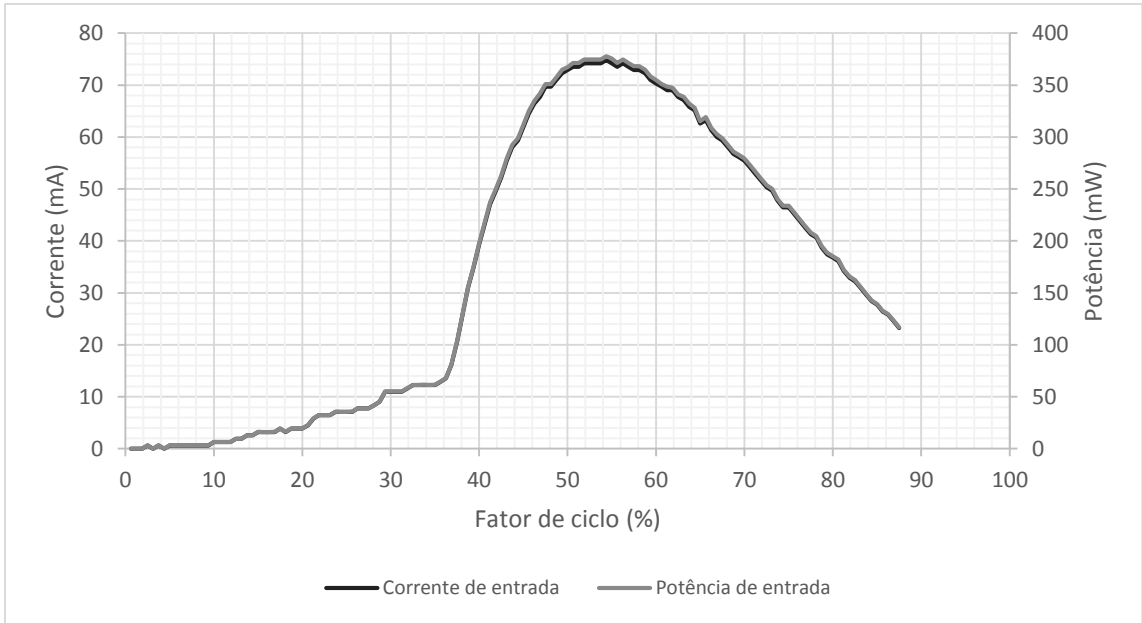


Figura V.3 – Relação entre a potência e a corrente de entrada na bateria para a turbina 15 e injetor 5.

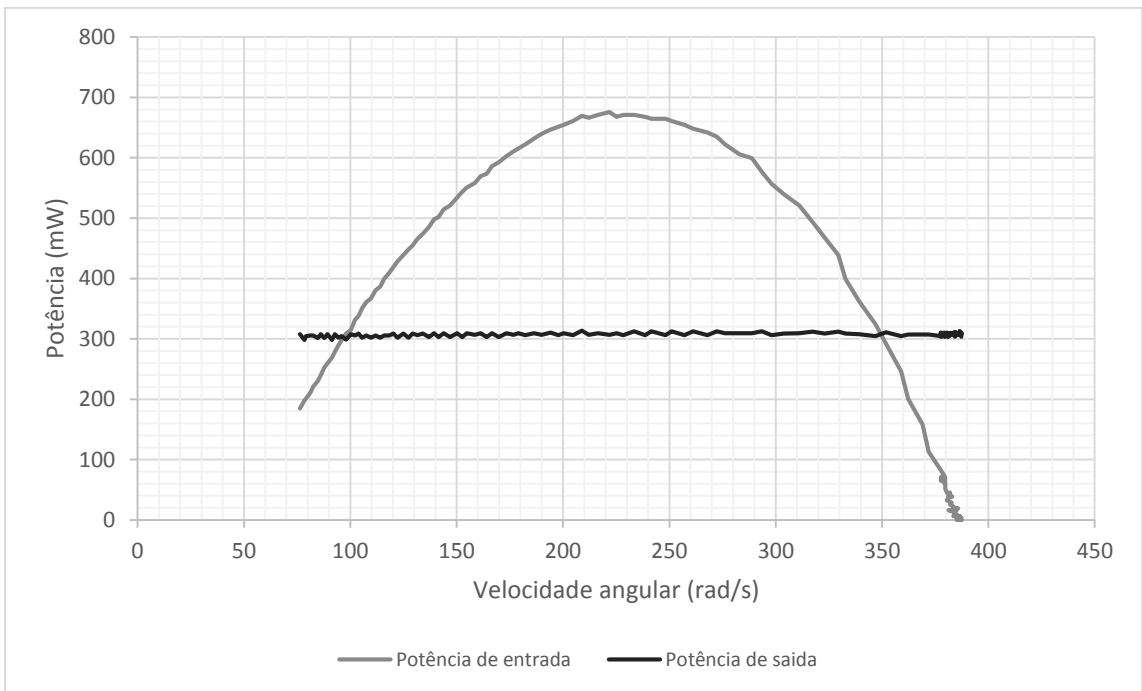


Figura V.4 – Potência de entrada e saída da bateria para a turbina 15 e injetor 7.

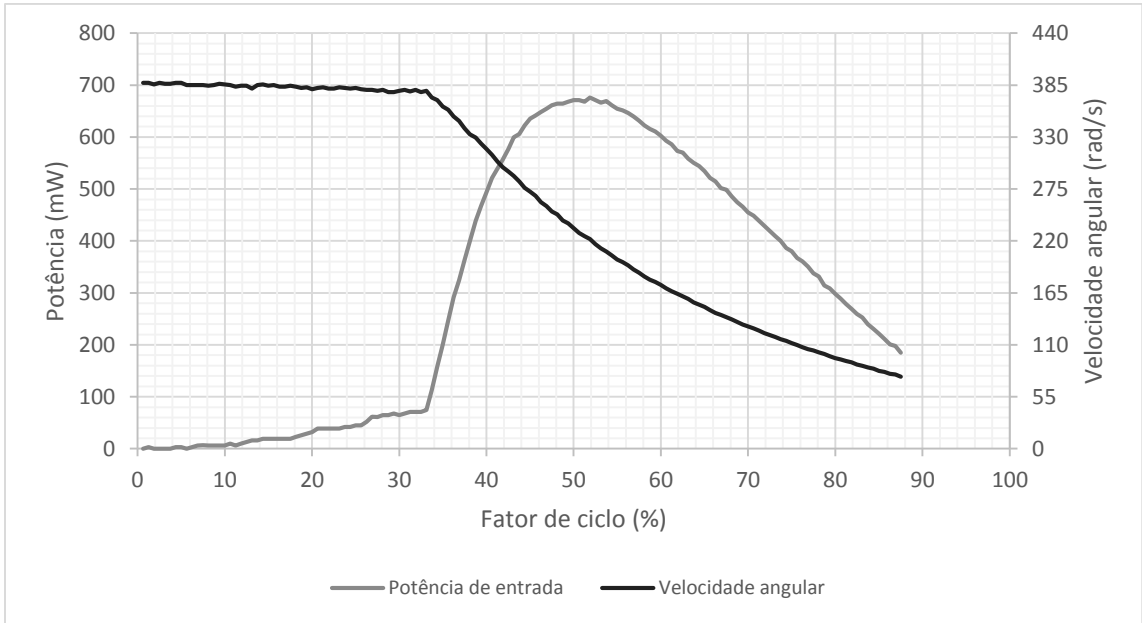


Figura V.5 – Potência de entrada e velocidade angular para a turbina 15 e injetor 7.

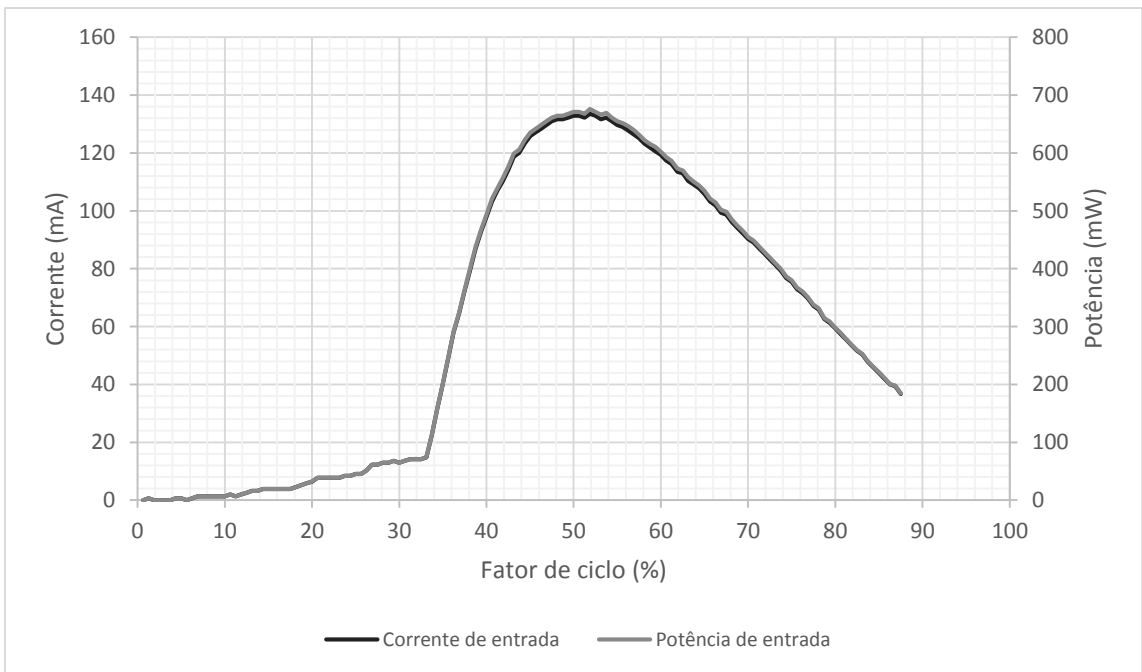


Figura V.6 – Relação entre a potência e a corrente de entrada na bateria para a turbina 15 e injetor 7.

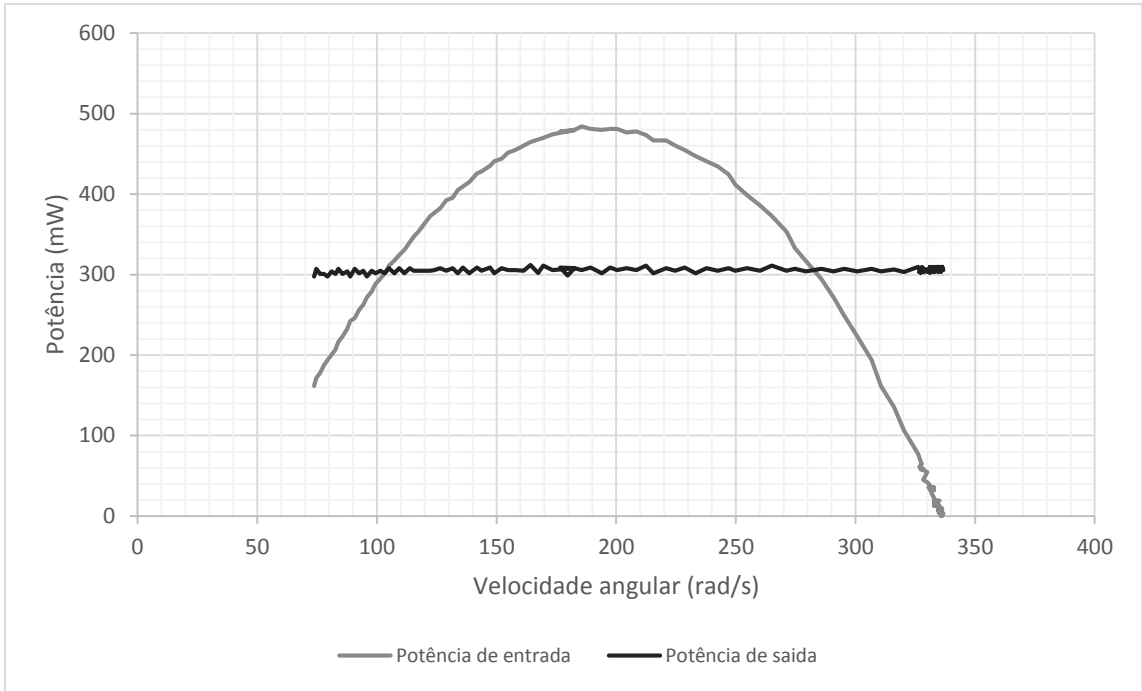


Figura V.7 – Potência de entrada e saída da bateria para a turbina 8 e injetor 5.

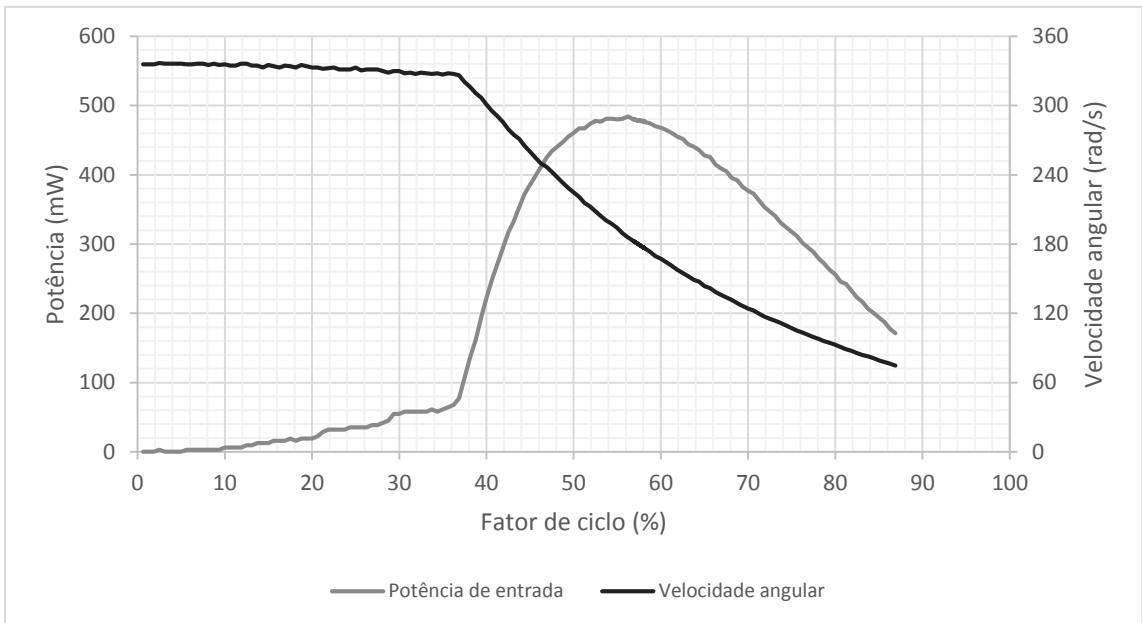


Figura V.8 – Potência de entrada e velocidade angular para a turbina 8 e injetor 5.

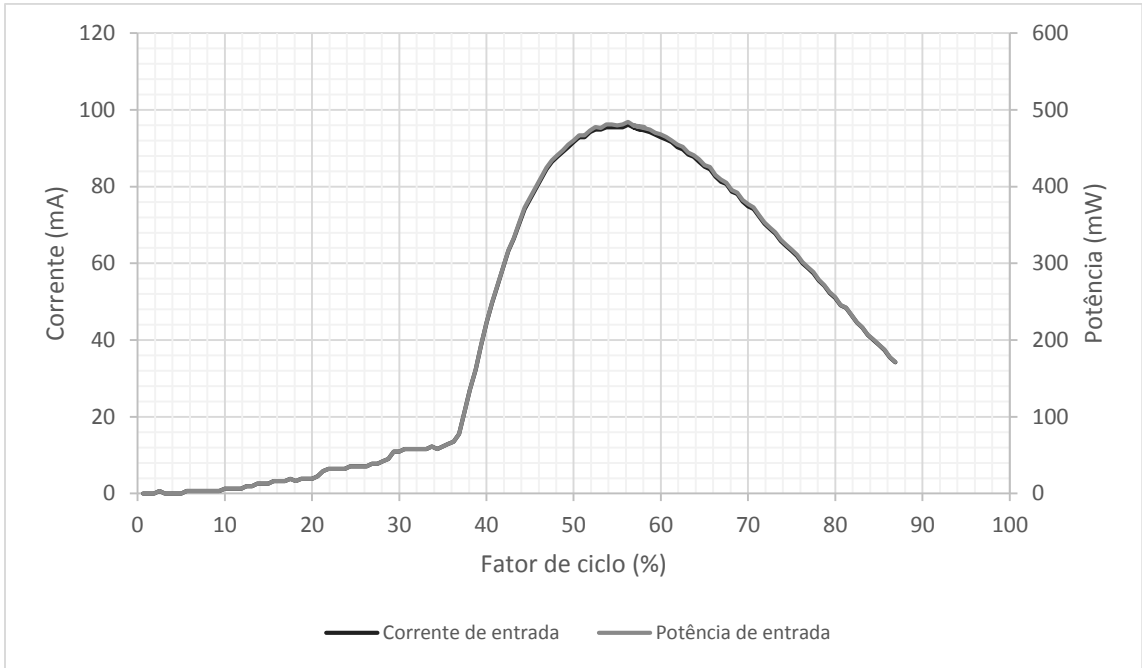


Figura V.9 – Relação entre a potência e a corrente de entrada na bateria para a turbina 8 e injetor 5.

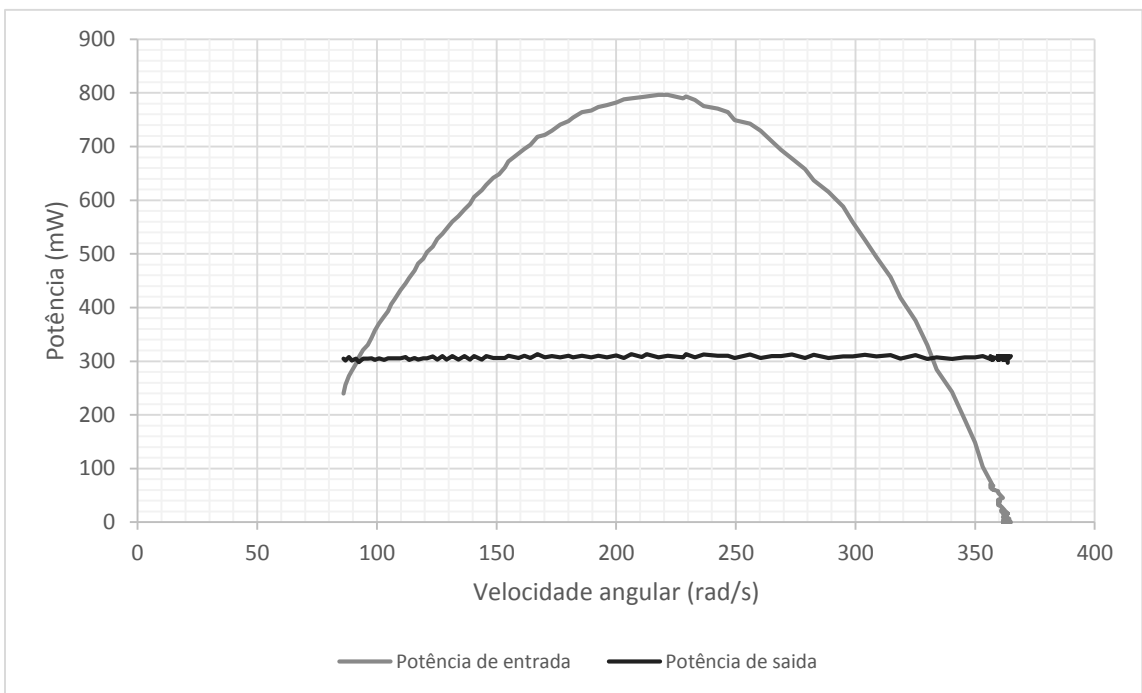


Figura V.10 – Potência de entrada e saída da bateria para a turbina 8 e injetor 7.

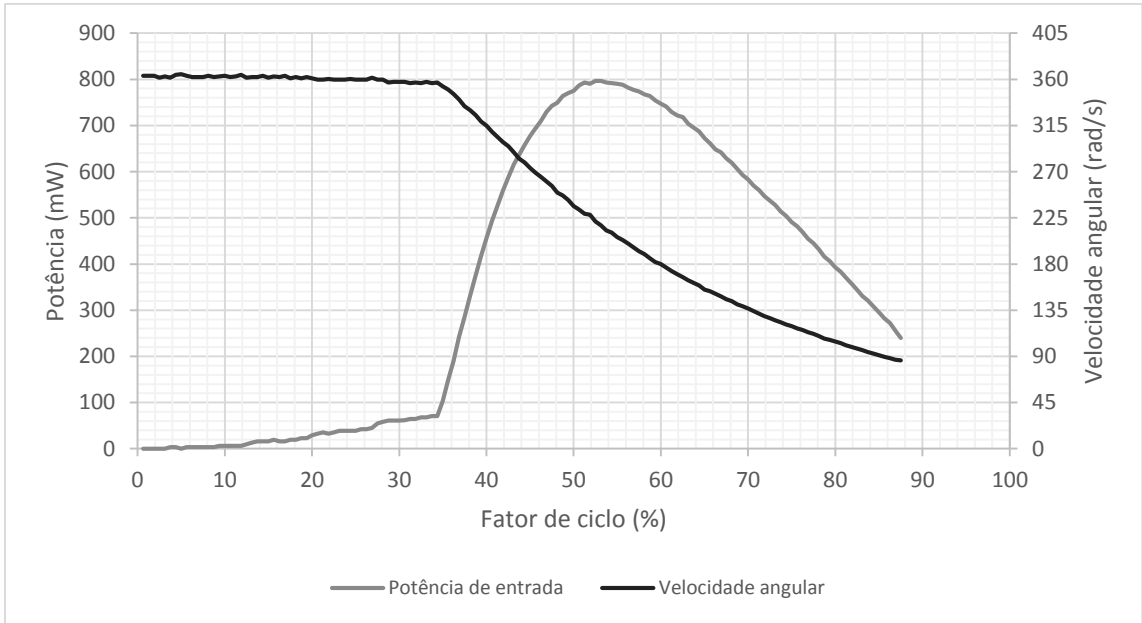


Figura V.11 – Potência de entrada e velocidade angular para a turbina 8 e injetor 7.

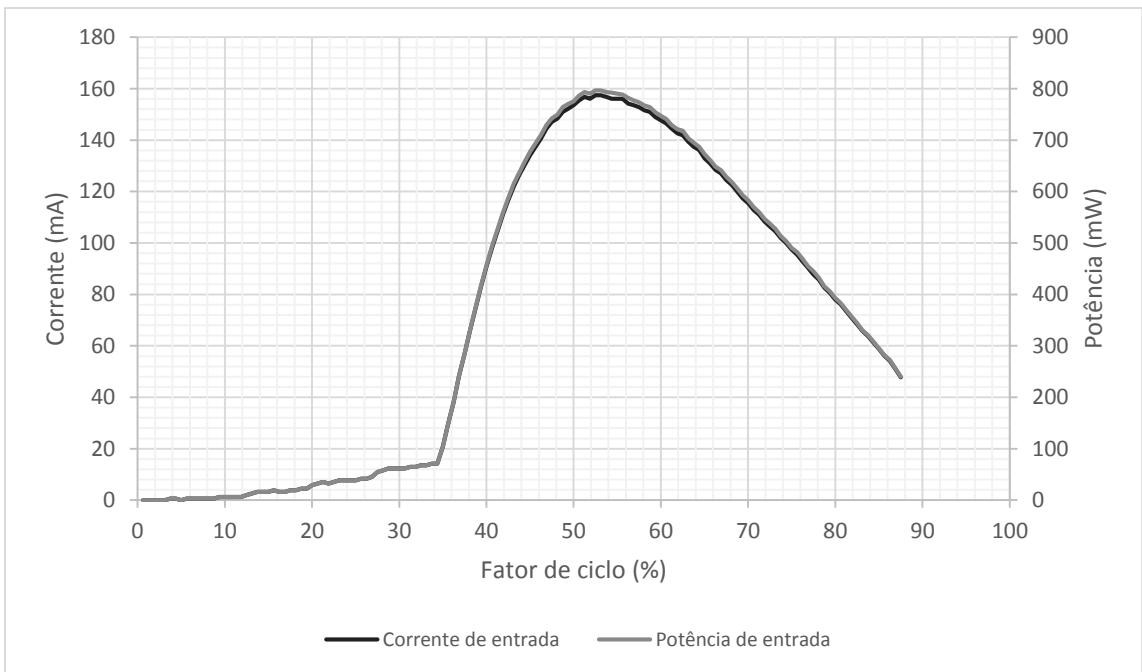


Figura V.12 – Relação entre a potência e a corrente de entrada na bateria para a turbina 8 e injetor 7.

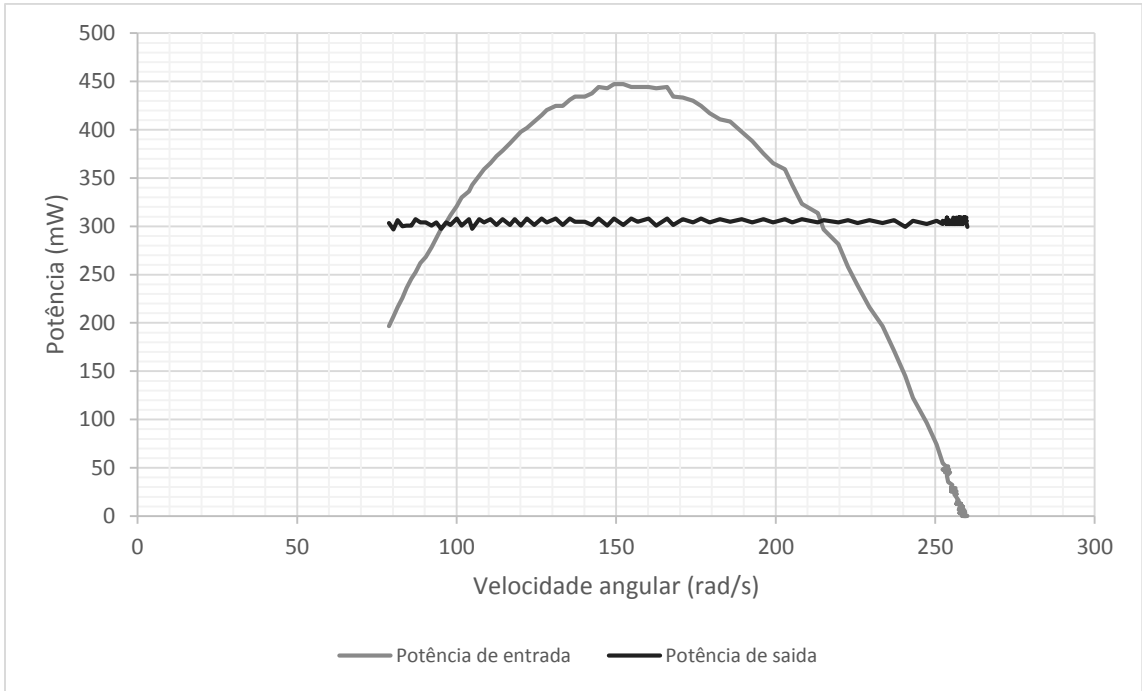


Figura V.13 – Potência de entrada e saída da bateria para a turbina A e injetor 5.

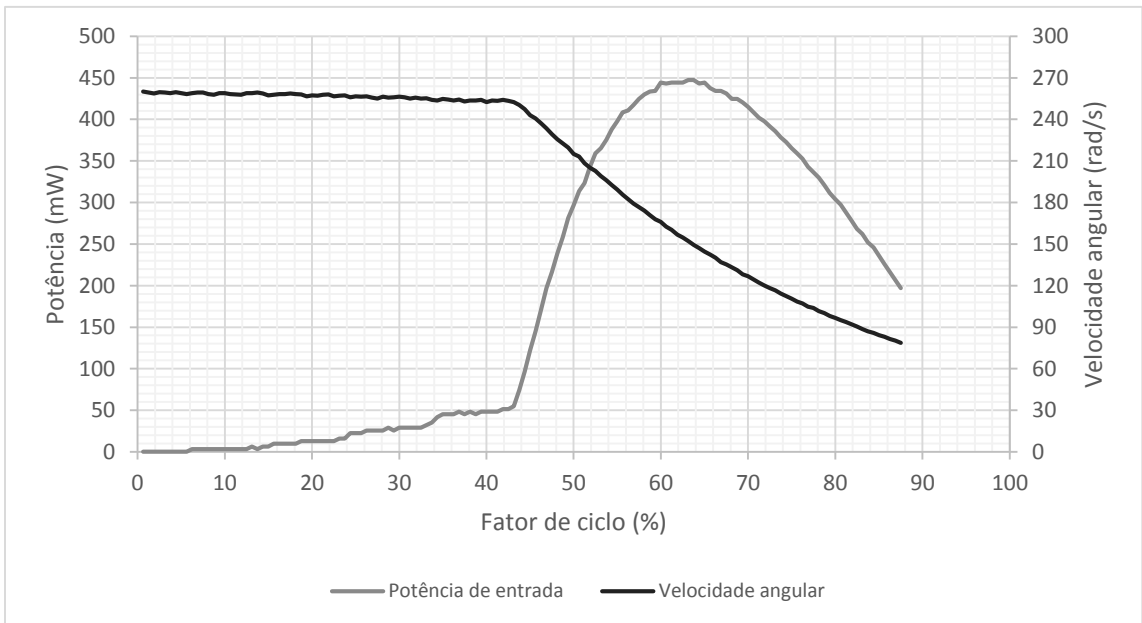


Figura V.14 – Potência de entrada e velocidade angular para a turbina A e injetor 5.



Figura V.15 – Relação entre a potência e a corrente de entrada na bateria para a turbina A e injetor 5.

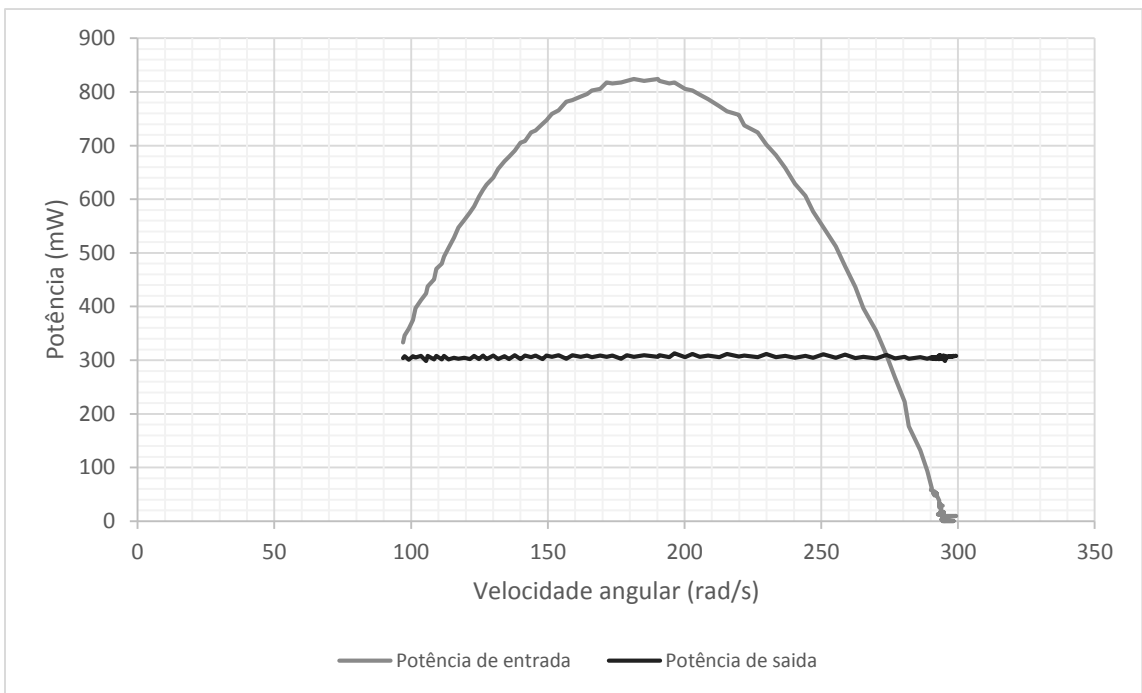


Figura V.16 – Potência de entrada e saída da bateria para a turbina A e injetor 7.

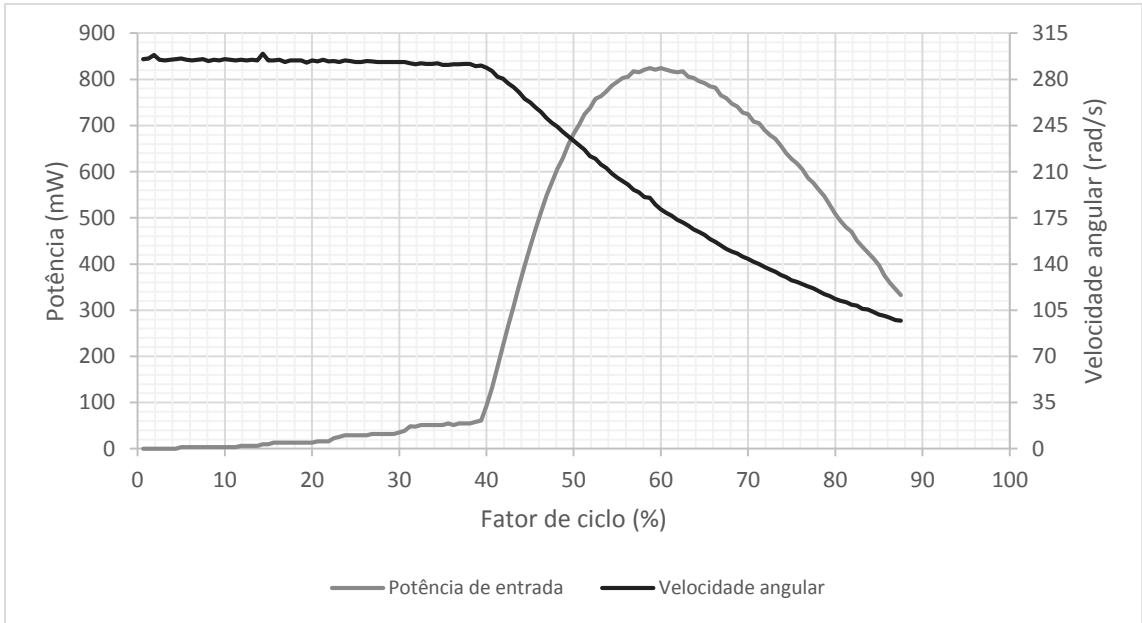


Figura V.17 – Potência de entrada e velocidade angular para a turbina A e injetor 7.

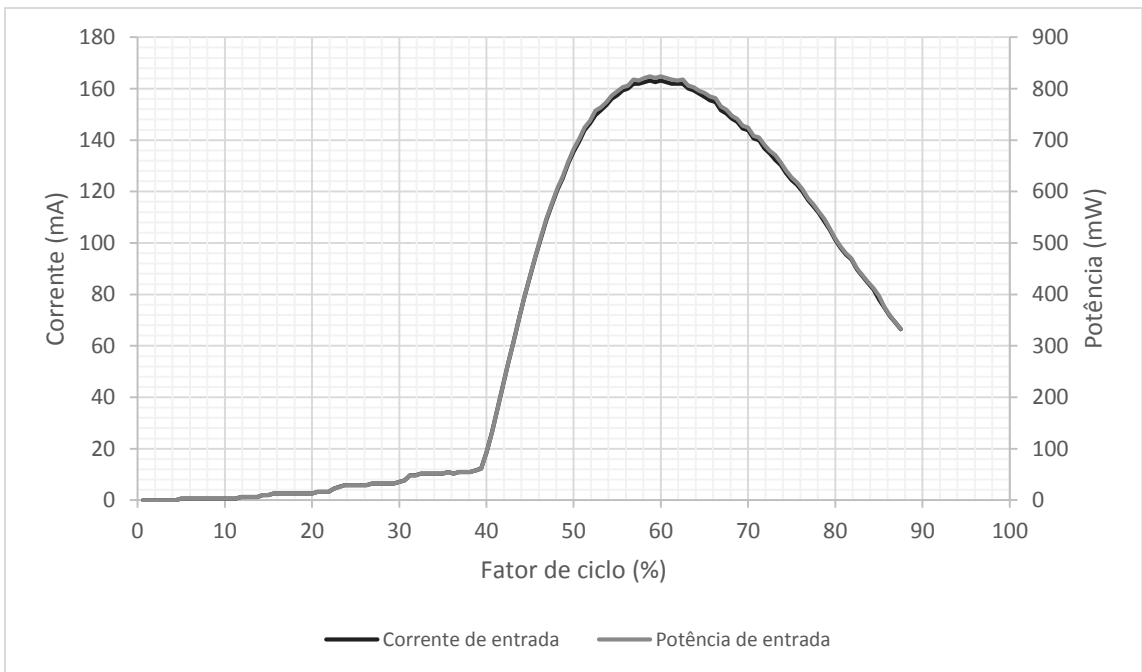


Figura V.18 – Relação entre a potência e a corrente de entrada na bateria para a turbina A e injetor 7.

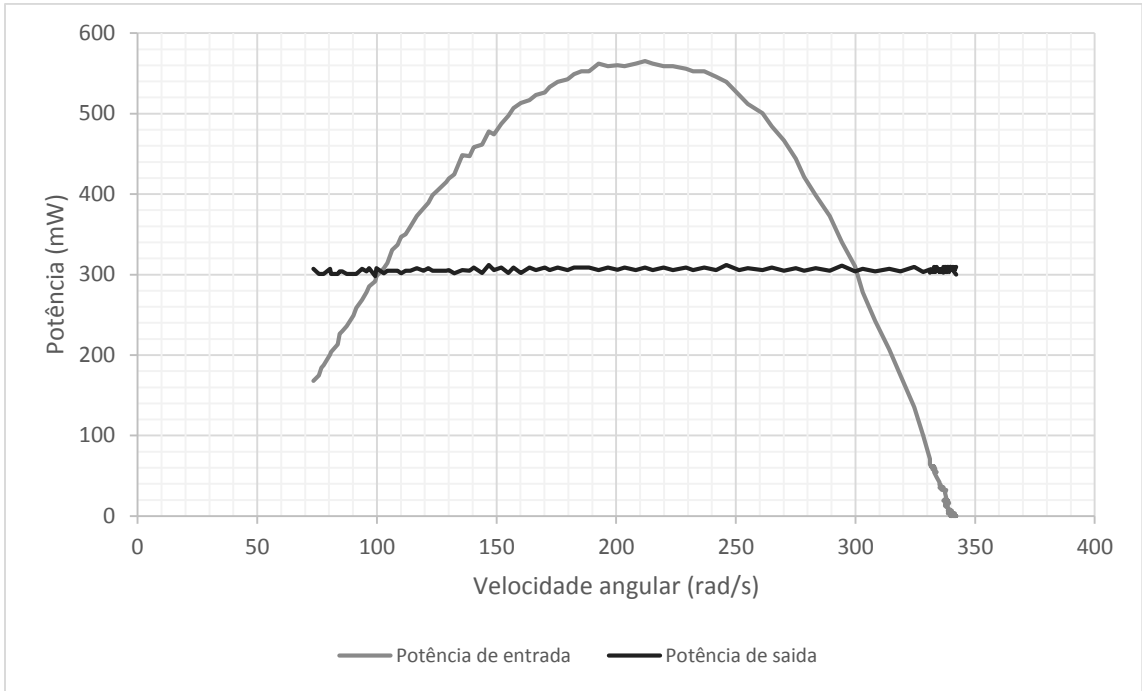


Figura V.19 – Potência de entrada e saída da bateria para a turbina de metal e injetor 5.

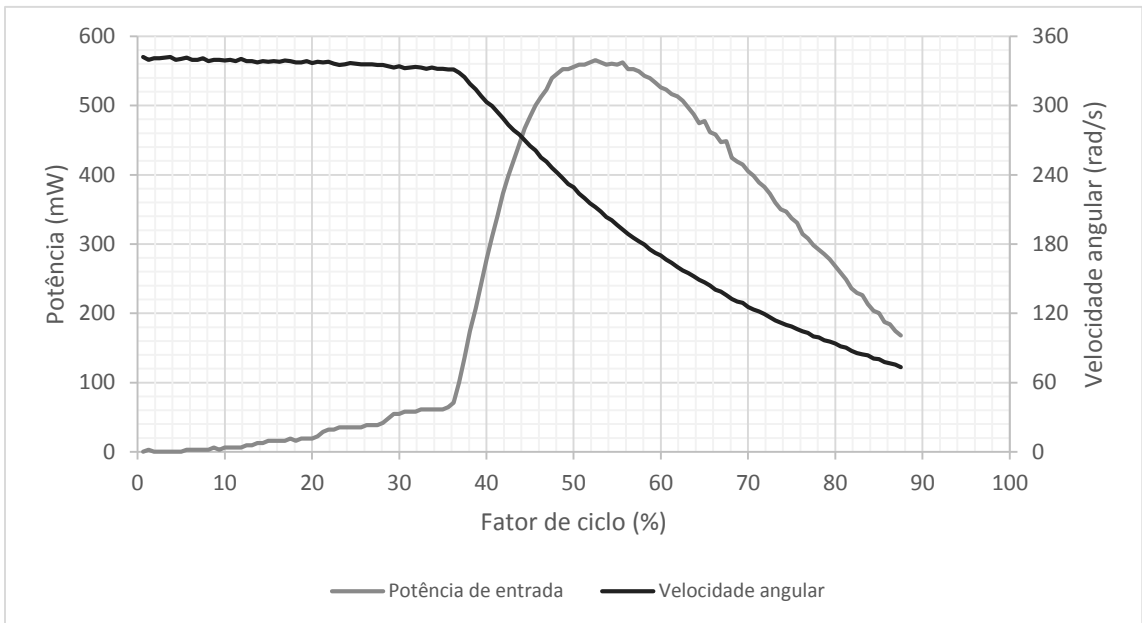


Figura V.20 – Potência de entrada e velocidade angular para a turbina de metal e injetor 5.



Figura V.21 – Relação entre a potência e a corrente de entrada na bateria para a turbina de metal e injetor 5.

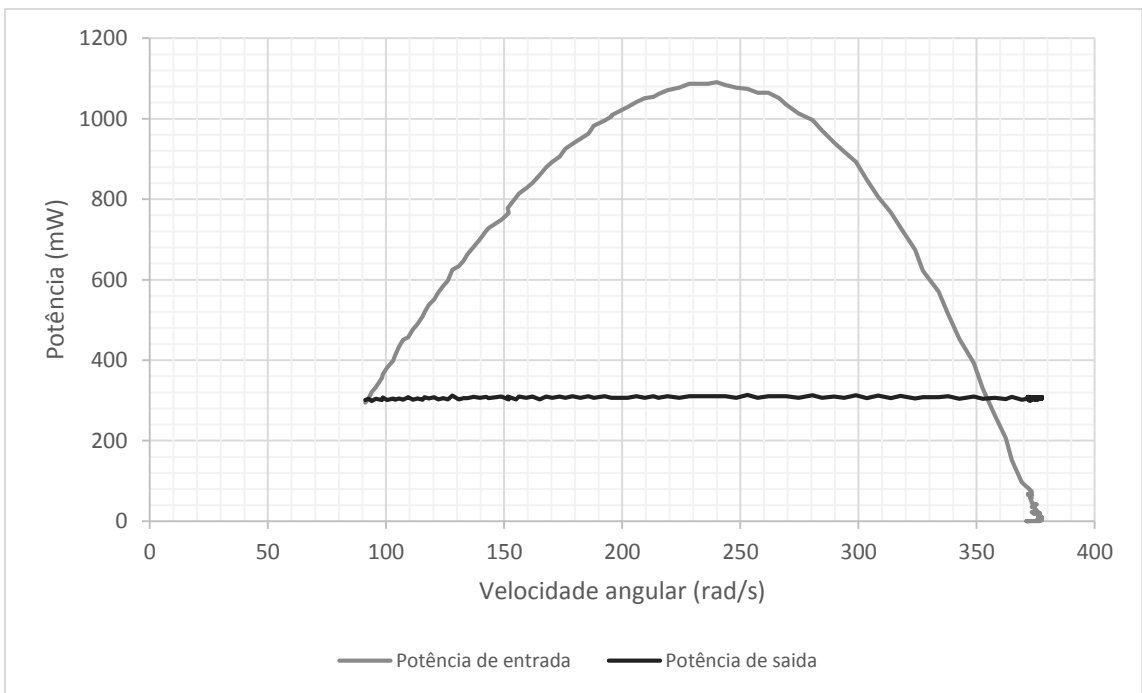


Figura V.22 – Potência de entrada e saída da bateria para a turbina de metal e injetor 7.

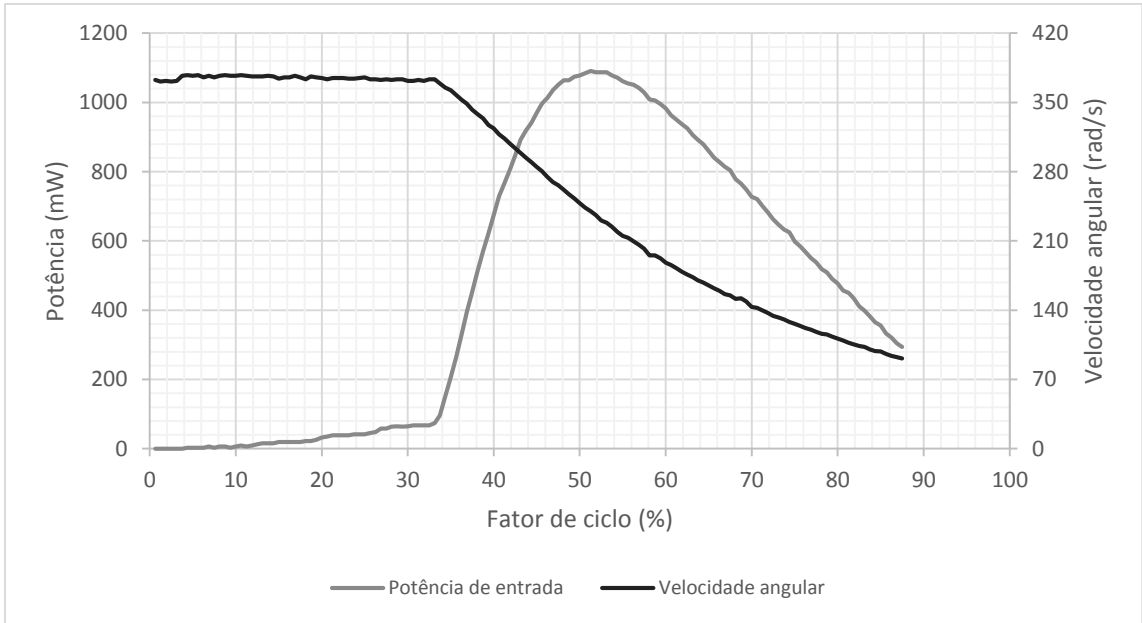


Figura V.23 – Potência de entrada e velocidade angular para a turbina de metal e injetor 7.

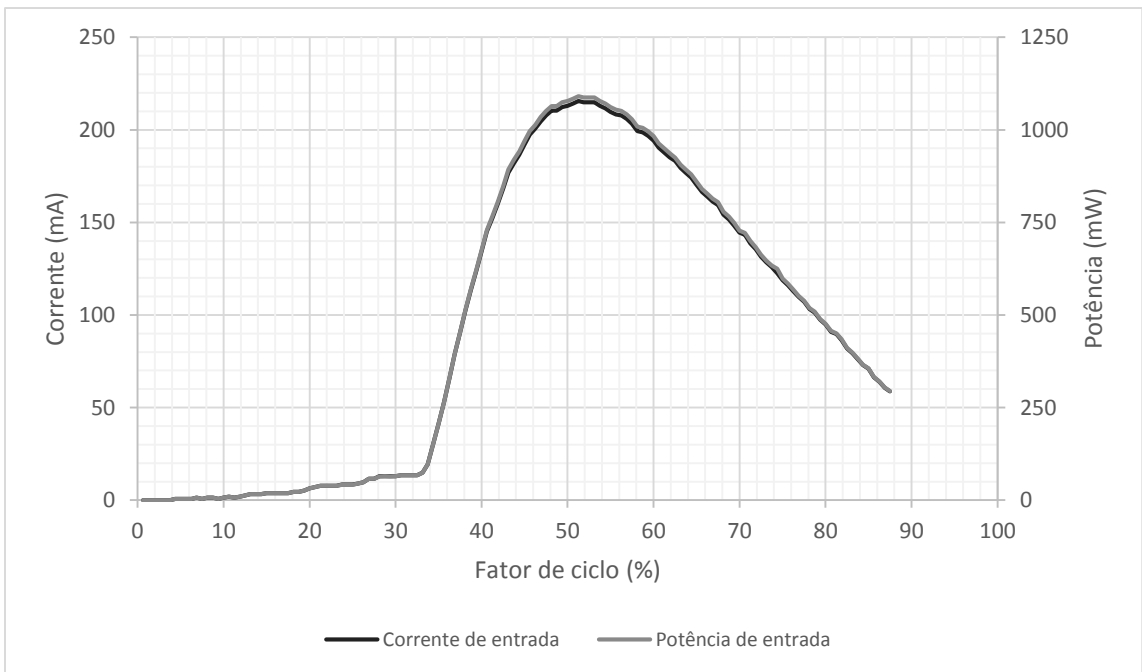


Figura V.24 – Relação entre a potência e a corrente de entrada na bateria para a turbina de metal e injetor 7.

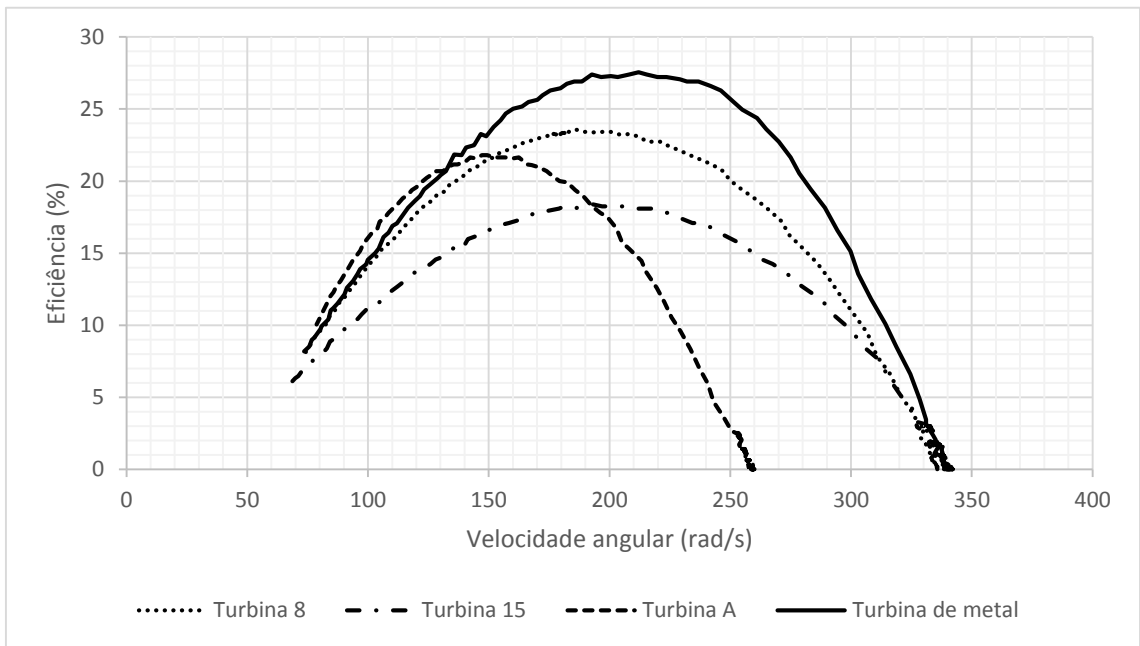


Figura V.25 – Eficiência do sistema completo para o injetor 5.

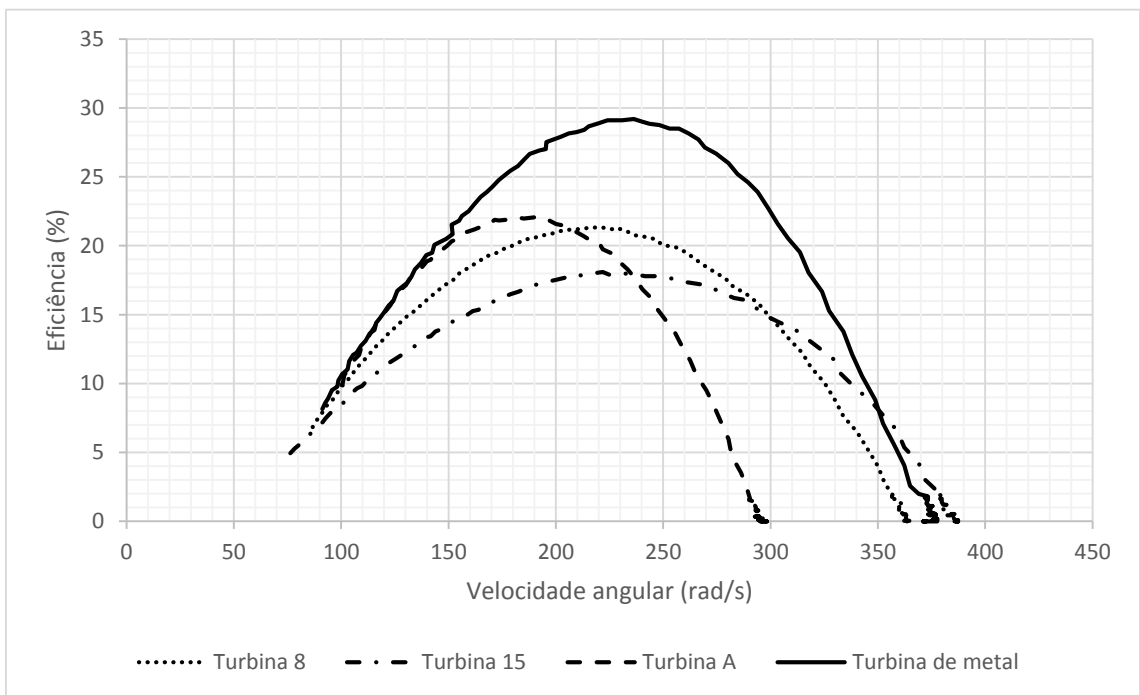


Figura V.26 – Eficiência do sistema completo para o injetor 7.