



Fábio Rodrigues da Silva

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores

**Estudo de Sistemas *Pump as Turbine*
para Recuperação de Energia Utilizando
Máquinas de Indução**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: João Murta Pina, Professor Doutor,
Universidade Nova de Lisboa
Coorientador: Vítor Manuel de Carvalho Fernão Pires,
Professor Doutor, Instituto Politécnico de Setúbal



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

Estudo de Sistemas *Pump as Turbine* para Recuperação de Energia Utilizando Máquinas de Indução

Copyright © Fábio Rodrigues da Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Professor João Murta Pina por toda a sua ajuda para a realização deste projeto. Ao meu coorientador o professor Victor Pires do Instituto Politécnico de Setúbal por ter sido sempre uma pessoa prestável tirando as dúvidas que me apareceram ao longo do desenvolvimento do controlador de potência e agradeço também ao professor Pablo Durán Barroso da Universidade de Extremadura por toda a sua ajuda no desenvolvimento do sistema hidráulico de modo a que o sistema ficasse o mais completo possível.

Agradeço aos meus amigos da Faculdade, principalmente ao Duarte e António pois foi com eles que ultrapassei as mais difíceis barreiras desta etapa.

Quero agradecer aos meus amigos do FdS, pois foi com eles que passei muito tempo quando tinha possibilidade de ir a casa, estando sempre disponíveis para me ajudar.

Agradeço aos meus avós, irmã e tio por nunca duvidarem das minhas capacidades e me darem sempre força para continuar.

Agradeço à minha namorada, pois foi sempre ela que esteve nos maus momentos que ocorreram ao longo deste percurso e que me deu sempre força para conseguir atingir os meus objetivos.

Acima de tudo quero dedicar esta dissertação aos meus pais pois sem eles não conseguiria chegar a este patamar tão desejado pois foram eles que trabalharam para me proporcionar chegar a um patamar superior.

Ao longo dos últimos anos, a preocupação com o aquecimento global tem aumentado em todo o mundo, surgindo então restrições a vários níveis, incluindo na produção de energia. Devido ao esgotamento dos recursos naturais e dos problemas ambientais é necessário recorrer às energias renováveis de modo a que o impacto no ambiente seja o menor possível. Uma das técnicas mais utilizadas para a produção de energia renovável é a geração hidroelétrica. Uma vez que a implementação de geração hidroelétrica em grande escala nem sempre é tecnologicamente, economicamente, politicamente ou ambientalmente viável, o interesse da geração de energia através de tecnologias de menor escala tem aumentado. Uma das tecnologias que tem sido implementada em vários estudos é a micro-hídrica, sendo ela caso de estudo nesta dissertação.

Nesta dissertação irá ser ensaiado um circuito hidráulico de pequena escala em que as válvulas reguladoras de pressão irão ser substituídas por bombas a operar como turbina, ou PaT (de *Pump as Turbine*). Esta ideia surge com o propósito de gerar energia através do movimento da bomba, energia essa que seria perdida sob forma de calor pelas válvulas.

Para tal, esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um conversor eletrónico de potência de forma a controlar a velocidade da máquina elétrica que se encontra acoplada à PaT. São simuladas várias velocidades de rotação da máquina de modo a poder maximizar o rendimento do sistema implementado. Para simular um caso real, ensaiou-se um circuito hidráulico de pequena escala que se encontra instalado nas instalações do Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa num programa de simulação de sistemas de distribuição de água. Através desse software foi possível extrair as potências mecânicas geradas, sendo posteriormente simuladas com o conversor eletrónico de potência podendo assim concluir que para a maximização da eficiência do sistema terá de ser necessário a implementação de um variador de frequência.

Palavras-Chave: Bomba operando como turbina, conversor eletrónico de potência, controlo V/f, eficiência energética.

ABSTRACT

Over the past years, concerns about global warming have increased. This problem led to restrictions in different fields such as energy production. The use of renewable energies is mandatory due to the depletion of natural resources and related environmental problems. One of the most popular techniques used to produce these energies is the hydroelectric generation.

Since the implementation of hydroelectric generation at big scale is not always a workable solution due to different issues at the technological, economic, political or environmental level, the interest in energy generation based on small-scale technologies has been increasing. Lately, micro hydroic is one of these technologies which is being used in different studies. In this thesis, it will be also investigated.

Throughout this dissertation, a small-scale hydroelectric circuit will be tested. In this case, the pressure-regulating valves will be replaced by pumps which will be working as turbines – PaT (from Pump as Turbine). The main purpose of this idea is the use of the movement of the pump to generate energy which, otherwise, would be lost through the valves as heat.

This project presents the development of a power converter which controls the electric machine speed that is connected to the PaT. Different machine rotation speeds are simulated to maximize the yield of the implemented system. In order to simulate a real case, a hydraulic circuit was tested at the Electrotechnical Engineering Department at Faculdade de Ciências e Tecnologias from Universidade Nova de Lisboa in a software that is based in the simulation of water distribution systems. This software allowed the extraction of the generated mechanical power, which was lately simulated with the power converter. Therefore, one can conclude that the implementation of a frequency inverter is needed to maximise the efficiency of the system.

Keywords: Pump as Turbine, power converter, V/f control, energetic efficiency.

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract	ix
Índice.....	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Acrónimos	xvii
Simbologia	xvii
1. Introdução	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos da Dissertação	1
1.3. Organização da Dissertação	2
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1. Sistema de Bombagem como Turbina.....	3
2.1.1. Classificação de Bombas.....	3
2.1.2. Vantagens/Desvantagens das <i>Pump As Turbine</i>	7
2.2. Redução de Caudal.....	8
2.3. Gerador de Indução	10
2.3.1. Vantagens da Utilização do Motor de Indução	11
2.4. Conversor eletrónico de potência para a Interligação à Rede Elétrica	12
2.5. Modulação PWM	12
2.6. Sincronismo – PLL (Phase Locked Loop)	14
2.7. Conclusão.....	16
3. Controlo da Máquina de Indução	17
3.1. Controlo do Retificador de Tensão	17
3.2. Controlo do Inversor	22
3.3. Controlo V/f	25
3.3.1. Fundamento Teórico	25
3.3.2. Implementação do Controlo V/f em Anel Fechado.....	26
4. Circuito Hidráulico.....	33

4.1.	Modelo Hidráulico	33
4.2.	Constituintes da Rede em Simulação	33
4.3.	Extração das Curvas Características	38
4.4.	Simulação com o EPANET	41
5.	Análise de Resultados	47
5.1.	Simulação dos Valores Extraídos do <i>Simulink</i> com Conversor	47
5.2.	Simulações com Valores Obtidos no EPANET com Conversor.....	49
5.3.	Comportamento do Conversor face à Variação da Potência Mecânica.....	52
6.	Conclusões e Trabalho Futuro.....	55
	Referências bibliográficas	57
I.	Valores Obtidos para Cálculo do Rendimento da Máquina de Indução com os Valores de Referência	59
II.	Valores Obtidos para Cálculo do Rendimento da Máquina de Indução com Valores Provenientes do EPANET	61
III.	Cálculo do Rendimento do Sistema com os Valores de Referência	65
IV.	Cálculo do Rendimento do Sistema com Valores Provenientes do EPANET	67
V.	Cálculo das Perdas Associadas ao Uso do Conversor eletrónico de potência com Valores de Referência.....	69
VI.	Cálculo das Perdas Associadas ao Uso do Conversor eletrónico de potência com Valores Provenientes do EPANET	71
VII.	DataSheet da PAT	73
VIII.	DataSheet da Bomba Utilizada	77
IX.	DataSheet da Máquina de Indução Utilizada	79
X.	Código MATLAB para Extração da Potência Mecânica do EPANET	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Bomba operando como bomba [7]	4
Figura 2.2 Bomba operando como turbina [7]	4
Figura 2.3 Rotor radial [6]	5
Figura 2.4 Rotor axial [6]	5
Figura 2.5 Rotor misto [6]	5
Figura 2.6 Bomba múltiplo estágio [6]	6
Figura 2.7 Bomba dupla sucção [6]	6
Figura 2.8 Escolha das bombas para sistemas PAT. Adaptado de: [6]	6
Figura 2.9 Topologia de uma válvula Monovar [16]	8
Figura 2.10 Esquema do conversor	12
Figura 2.11 Geração de um sinal SPWM	13
Figura 2.12 Diagrama de blocos de um circuito de sincronismo (PLL - Phase Locked Loop)	15
Figura 3.1 Conversor back-to-back	17
Figura 3.2 Retificador de tensão monofásico	18
Figura 3.3. Controlador de tensão	18
Figura 3.4 Retificador de tensão	19
Figura 3.5 Retificador monofásico	21
Figura 3.6 Tensão à saída do retificador	21
Figura 3.7 Tensão e corrente à entrada do retificador	22
Figura 3.8 Inversor de tensão trifásico	22
Figura 3.9 Modulação SPWM	23
Figura 3.10 Velocidade obtida com V/f em anel aberto	24
Figura 3.11 Circuito de teste do inversor de tensão trifásico	25
Figura 3.12 Esquema equivalente da máquina de indução	25
Figura 3.13 Esquema base do controlo V/f	27
Figura 3.14 Tensão no condensador em modo gerador	27
Figura 3.15 Corrente no inversor em modo gerador	28
Figura 3.16 Tensão no condensador em modo motor	28
Figura 3.17 Corrente no inversor em modo motor	29
Figura 3.18 Controlador para determinação da nova frequência	29
Figura 3.19 Exemplo da resposta da máquina para uma velocidade = 1265 RPM	30
Figura 3.20 Conversor eletrónico de potência com as suas unidades de controlo	31
Figura 4.1 Representação do circuito hidráulico instalado	Erro! Marcador não definido.
Figura 4.2 Reservatório implementado na rede [32]	34
Figura 4.3 Esquema de um reservatório hidropneumático [33]	34
Figura 4.4 Bomba de circulação instalada [32]	35
Figura 4.5 PAT instalada na rede [32]	35
Figura 4.6 Manómetro instalado [32]	37
Figura 4.7 Caudalímetro instalado [32]	37
Figura 4.8 Circuito para extração das curvas de rendimento	39

Figura 4.9	Curvas características da máquina de indução	40
Figura 4.10	Gráfico da potência elétrica gerada pela máquina de indução	41
Figura 4.11	Curvas da bomba e PAT instaladas	42
Figura 4.12	Rede implementada no EPANET	43
Figura 4.13	Exemplo de simulação no software EPANET	43
Figura 4.14	Potência elétrica gerada pela máquina de indução	45
Figura 4.15	Curvas de rendimento da máquina de indução	45
Figura 5.1	Potência elétrica entregue à rede	48
Figura 5.2	Curvas de rendimento do sistema com conversor eletrônico de potência	49
Figura 5.3	Gráfico da potência elétrica entregue à rede com conversor eletrônico de potência	50
Figura 5.4	Curvas de rendimento do sistema com conversor eletrônico de potência	51
Figura 5.5	Resposta da máquina elétrica a uma variação da velocidade	52
Figura 5.6	Resposta da máquina de indução a duas alterações de velocidade	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Tipos de funcionamento de uma máquina de indução	11
Tabela 3.1 Tabela de estados do inversor.....	23
Tabela 4.1 Características da bomba de circulação	35
Tabela 4.2 Características hidráulicas da PAT	36
Tabela 4.3 Características do motor instalado	36
Tabela 4.4 Características da máquina de indução acoplada à PAT para efeitos de simulação ...	36
Tabela 4.5 Parâmetros da máquina de indução	38
Tabela 4.6 Valores obtidos para $P_{mec}=200W$	40
Tabela 4.7 Valores obtidos no EPANET	44
Tabela 4.8 Valores obtidos para $P_{mec}=215,20W$	44
Tabela 4.9 Frequência ótima para cada nível de potência.....	46
Tabela 5.1 Rendimento dos valores simulados com o conversor ligado à rede	47
Tabela 5.2 Comparação dos valores obtidos com e sem conversor	48
Tabela 5.3 Rendimento do sistema com o conversor ligado à rede	49
Tabela 5.4 Cálculo das perdas associadas ao uso do conversor	50
Tabela 5.5 Frequência ótima de funcionamento do sistema com conversor	51
Tabela I.1 Valores obtidos para $P_{mec}=180W$	59
Tabela I.2 Valores obtidos para $P_{mec}=160W$	59
Tabela I.3 Valores obtidos para $P_{mec}=140W$	59
Tabela I.4 Valores obtidos para $P_{mec}=120W$	60
Tabela I.5 Valores obtidos para $P_{mec}=100W$	60
Tabela I.6 Valores obtidos para $P_{mec}=80W$	60
Tabela I.7 Valores obtidos para $P_{mec}=60W$	60
Tabela II.1 Valores obtidos para $P_{mec}=192,80W$	61
Tabela II.2 Valores obtidos para $P_{mec}=171,71W$	61
Tabela II.3 Valores obtidos para $P_{mec}=133,42W$	62
Tabela II.4 Valores obtidos para $P_{mec}=120,76W$	62
Tabela II.5 Valores obtidos para $P_{mec}=108,73W$	62
Tabela II.6 Valores obtidos para $P_{mec}=97,34W$	63
Tabela II.7 Valores obtidos para $P_{mec}=76,44W$	63
Tabela II.8 Valores obtidos para $P_{mec}=61,45W$	63
Tabela III.1 Rendimento do sistema com conversor eletrónico de potência.....	65
Tabela IV.1 Rendimento do sistema com conversor eletrónico de potência com valores provenientes do EPANET	67
Tabela V.1 Perdas associadas ao uso do conversor.....	69
Tabela VI.1 Perdas associadas ao conversor com valores provenientes do EPANET.....	71

ACRÓNIMOS

PAT – *Pump As Turbine*
DEE – Departamento de Engenharia Eletrotécnica
PWM – *Pulse Width Modulation*
SPWM – *Sinusoidal Pulse Width Modulation*
PLL – *Phase Locked Loop*

SIMBOLOGIA

Q_{bep} – Caudal no ponto de melhor eficiência da bomba;
 H_{bep} – Altura manométrica atingida no ponto de melhor eficiência;
 η_{max} – Eficiência máxima da bomba;
 Q_t – Caudal em modo turbina;
 H_t – Altura manométrica atingida em modo turbina;
 ρ – Densidade do fluido;
 g – Aceleração gravitacional;
 Q – Caudal;
 H – Queda útil;
 T – Binário produzido (Nm);
 Ω – Velocidade angular (rad/s);
 N – Velocidade de rotação(rpm);
 f_c – Frequência da onda portadora;
 f_m – Frequência do sinal de referência.
 A_m – Amplitude do sinal de referência;
 A_c – Amplitude da onda portadora;
 R_s – Resistência do estator;
 L_{ls} – Dispersão do estator;
 R_r – Resistência do rotor;
 L_{lr} – Dispersão do rotor;
 L_m – Indutância mútua;
 J – Coeficiente de inércia;
 F – Atrito viscoso;
 L_s – Coeficiente de autoindução total do estator;
 L_r – Coeficiente de autoindução total do rotor.

1.1. Motivação

Com a crescente procura de energia elétrica, cada vez mais é necessário encontrar alternativas económicas e sustentadas para a sua produção. A exploração das energias renováveis cada vez tem sido maior, tentando assegurar o futuro das próximas gerações. De modo a promover o desenvolvimento sustentável é necessário implementar métodos em que a produção de energia elétrica seja eficiente e o mais ecológico possível.

A micro hídrica é uma das maiores e mais antigas fontes de energia renovável, convertendo energia do movimento da água em energia elétrica [1]. Um dos problemas associados a esta tecnologia é a baixa produção de energia em relação ao custo elevado na aquisição e da manutenção de uma turbina. A solução encontrada para diminuir os custos associados à turbina é a seleção de uma bomba a operar como turbina (PAT, *Pump as Turbine*) que é consideravelmente mais barata tanto na aquisição como na sua manutenção.

Esta dissertação surge então da necessidade de aproveitar energia em sistemas de distribuição de água que normalmente é desperdiçada sob forma de calor. Para que tal aconteça as válvulas reguladoras de pressão devem substituídas por PATs.

O problema que se pretende resolver nesta dissertação, além da garantia da qualidade de entrega da água aos consumidores com os níveis de pressão adequados para cada situação é a interligação da PAT com a rede elétrica para que possa haver a transferência de energia. Para que tal aconteça é necessário a implementação de um conversor eletrónico de potência com capacidade de transferência bidirecional. Para que se consiga minimizar as perdas associadas ao uso do conversor e do gerador terá de ser necessário controlar a velocidade da máquina elétrica para que ela possa trabalhar sempre no seu ponto máximo de rendimento.

1.2. Objetivos da Dissertação

No sentido de aproveitar energia produzida pelo movimento do rotor da bomba, esta dissertação envolve o estudo e controlo de um acionamento elétrico, de forma a aproveitar a energia proveniente da redução da pressão em redes municipais de distribuição de água equipadas com dispositivos de bombagem com motores de indução. Para tal são utilizadas bombas operando como turbinas com o objetivo de produzir energia através da colocação da máquina elétrica como gerador. Para tal, é então necessário utilizar um acionamento com capacidade de transferência de energia bidirecional. Associado a este acionamento também deverá ser implementado um sistema de controlo de modo a colocar a máquina no modo de gerador, com a finalidade de aproveitar a energia criada pelo movimento da água. Foi utilizado um caso de estudo relativo a uma instalação

existente no Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE). Para a sua implementação serão abordados os seguintes pontos:

- Dimensionamento dos conversores eletrónicos de potência;
- Desenvolvimento do sistema de controlo;
- Simulação da rede instalada;
- Simulação do sistema.

1.3. Organização da Dissertação

Esta dissertação tem como objetivo o cálculo da potência a ser entregue à rede elétrica tal como a maximização da eficiência do circuito hidráulico que se encontra instalado no DEE. Tendo em vista a eficiência do sistema foi aplicado um conversor eletrónico de potência com a função de variar a velocidade da máquina de indução. Para que a simulação fosse o mais completa possível foi simulado o circuito hidráulico, através do software EPANET. No final da dissertação aliou-se a simulação do conversor eletrónico de potência com a do circuito hidráulico, de modo a concluir sobre a viabilidade da junção destes dois sistemas.

Os capítulos desta dissertação estão definidos da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução ao que irá ser desenvolvido tal como os seus objetivos.
- Capítulo 2 – Revisão da literatura apresentando vários sistemas de bombagem, geradores, introdução ao conversor utilizado tal como a sua modulação.
- Capítulo 3 – Apresentação do conversor eletrónico tal como as suas unidades de controlo.
- Capítulo 4 – Descrição do circuito hidráulico implementado e a abordagem utilizada para obter o maior rendimento possível no sistema.
- Capítulo 5 – Apresentação dos valores de potência obtidos e conclusão sobre a viabilidade do sistema.
- Capítulo 6 – Conclusões acerca do trabalho desenvolvido e apresentação do trabalho futuro.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistema de Bombagem como Turbina

Os sistemas de bombagem equipados com bombas a operar como turbinas têm-se tornado bastante estudados e implementados, principalmente em regiões onde a aquisição de bombas é mais facilitada [2]. As turbinas e as bombas são máquinas hidráulicas que ou recebem ou fornecem energia de um fluido. Para perceber o conceito de uma PAT é necessário a descrição do funcionamento de ambos os equipamentos.

As bombas transformam a energia mecânica, proveniente dos motores, em energia hidráulica, permitindo assim o transporte ou elevação de fluidos a diferentes distâncias e alturas.

As turbinas recebem energia hidráulica proveniente do movimento de um fluido transformando-a em energia mecânica, sendo posteriormente transformada em energia elétrica através de um gerador.

Nos sistemas de distribuição de água podem ser utilizados dois tipos de máquinas: turbinas e PATs. Usando turbinas, estas são muito mais eficientes, já as bombas a operar como turbinas são muito mais vantajosas economicamente [3].

As bombas operando como turbinas podem tanto ser usadas para produção de energia renovável tanto como em processos industriais, podendo ser economicamente rentáveis em várias situações [4], [5], [6], [7], [8]:

- Reservatórios de água;
- Descarga de águas residuais;
- Redução de pressão em sistemas de distribuição;
- Áreas remotas;
- Sistemas de irrigação;
- Utilização da energia produzida em excesso nas quedas de água;
- Pequenas indústrias;
- Processos agrícolas;
- Sistemas de osmose inversa.

2.1.1. Classificação de Bombas

A classificação das bombas hidráulicas depende da sua aplicação e da forma como é impulsionado o fluido. A classificação mais usual é a seguinte:

- Bombas Volumétricas ou de Deslocamento Positivo;
- Bombas Centrífugas.

A designação de bomba volumétrica deve-se ao fluido ocupar e desocupar de forma sucessiva espaços no interior da bomba com volumes que são conhecidos. A designação de deslocamento positivo deve-se ao facto de o movimento do fluido seguir a direção que lhe é transmitida [3]. Nas bombas de deslocamento positivo o movimento do fluido é causado diretamente pela ação do mecanismo de impulsão da bomba que obriga o fluido a executar o mesmo movimento, podendo ter um movimento alternativo (bombas de pistão, de diafragma e de membrana) ou rotativo (bombas de engrenagens, de lóbulos, de palhetas e de parafuso).

- Bombas alternativas – o instrumento que produz o movimento do fluido é um pistão que em momentos alternativos aspira e expulsa o fluido.
- Bombas rotativas – são comandadas por um movimento de rotação.

As bombas de deslocamento positivo apresentam algumas vantagens tais como: elevada eficiência, medida de volume precisas, produção de pressões muito elevadas e capacidade de aspiração para bombear água a partir de um nível inferior [9].

Segundo a GRUNDFOS [9], as bombas centrífugas representam 80% das bombas existentes no mundo. O seu nome advém do comportamento do fluido que é conduzido para o núcleo do impulsor e distribuído através da força centrífuga, para a periferia deste. A sua construção é robusta, simples e pouco dispendiosa. A bomba consegue garantir um caudal equilibrado e pode ser facilmente acelerada sem provocar danos no equipamento. As bombas centrífugas podem ser categorizadas em diferentes grupos: radiais, mistas e axiais, existindo também bombas múltiplo estágio e de dupla sucção [6].

• Bomba Centrífuga

Neste caso de estudo, a bomba que se encontra instalada é uma bomba centrífuga, sendo ela neste capítulo analisada com maior detalhe do que as bombas de deslocamento positivo. Para tal será analisado seu comportamento, tal como a geometria do rotor que pode ser encontrada neste tipo de bombas.

O comportamento do fluido numa bomba centrífuga tal como explicado anteriormente é absorvido pelo núcleo do impulsor sendo ele distribuído para a sua periferia acabando por sair pelo bocal de descarga (Figura 2.1). Ao operando como turbina, o fluido acaba por entrar pelo bocal de descarga da bomba saindo ele pelo núcleo do impulsor (Figura 2.2).

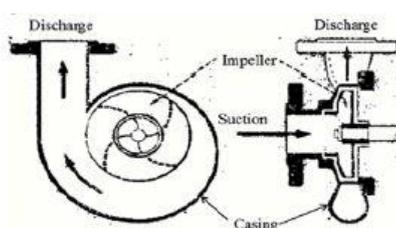


Figura 2.1 Bomba operando como bomba [7]

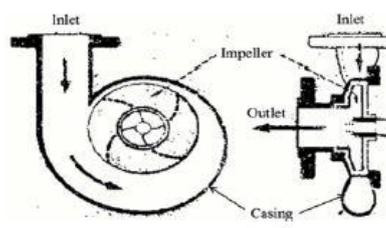


Figura 2.2 Bomba operando como turbina [7]

Se o movimento do fluido for suficiente para superar o binário do rotor e do veio então esse binário pode ser utilizado pelo gerador. De referir que na implementação das bombas como turbinas em sistemas de distribuição de água deve ser tido em conta a variação diária e sazonal da quantidade de água, uma vez que estas condições irão determinar o ponto de funcionamento da máquina [3].

Existindo vários tipos de rotor, a classificação das bombas centrífugas pode ser efetuada da seguinte forma:

- **Bombas radiais** (Figura 2.3) – Denominação devido à trajetória do fluxo dentro do rotor que se faz segundo um plano radial (perpendicular ao eixo), do centro para a periferia do rotor. Rotor projetado para altas pressões e baixos caudais.

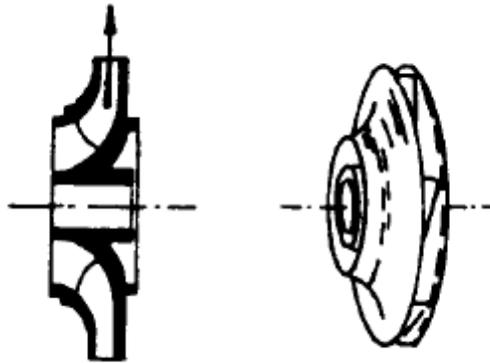


Figura 2.3 Rotor radial [6]

- **Bombas axiais** (Figura 2.4) - Denominação devido ao fluxo ser paralelo ao eixo de rotação da bomba, sendo utilizadas para grandes caudais e baixas alturas manométricas. As bombas axiais não utilizam a força centrífuga, mas sim a força de sustentação (inércia). Para aumentar esta força o rotor possui um perfil aerodinâmico com aspecto de hélice [3] .

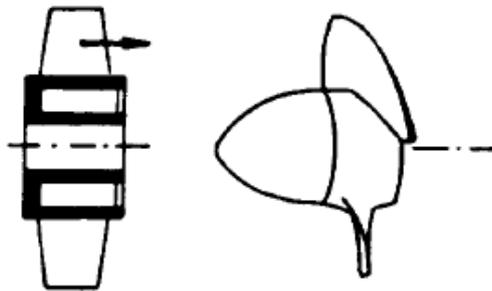


Figura 2.4 Rotor axial [6]

- **Bombas mistas** (Figura 2.5) - Denominação devido ao fluxo ser diagonal ao eixo de rotação da bomba. São bombas intermédias em relação às axiais e radiais, ou seja, utilizadas para caudais médios e alturas manométricas médias.

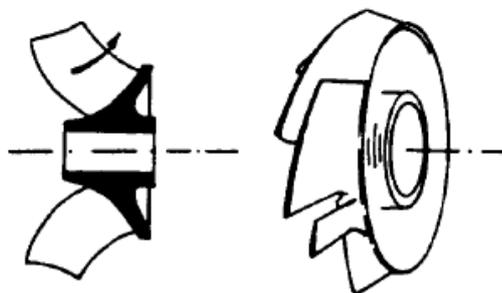


Figura 2.5 Rotor misto [6]

Caso sejam necessárias alturas manométricas ou caudais mais elevados podem ser utilizadas as bombas que são descritas abaixo.

- **Bombas de múltiplo estágio** (Figura 2.6) – Denominação devido à distribuição em série dos rotores sendo adequadas para grandes alturas manométricas, sendo o seu efeito semelhante ao de bombas em série.

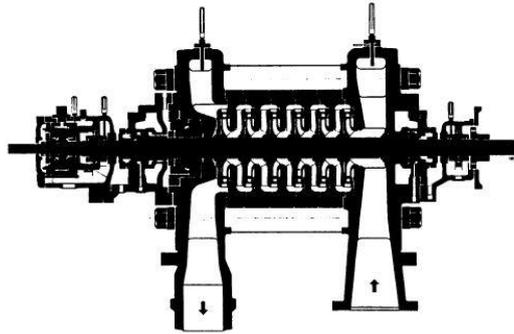


Figura 2.6 Bomba múltiplo estágio [6]

- **Bombas de dupla sucção** (Figura 2.7) – Denominação devido à distribuição paralela dos rotores. Bombas mais indicadas para caudais elevados, sendo sujeitas a esforços hídricos mais elevados.

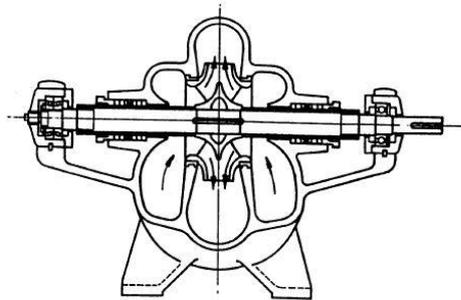


Figura 2.7 Bomba dupla sucção [6]

Chapallaz et al. [6] fornece um guia que permite a escolha da bomba para operar como turbina, sendo o gráfico apresentado na Figura 2.8.

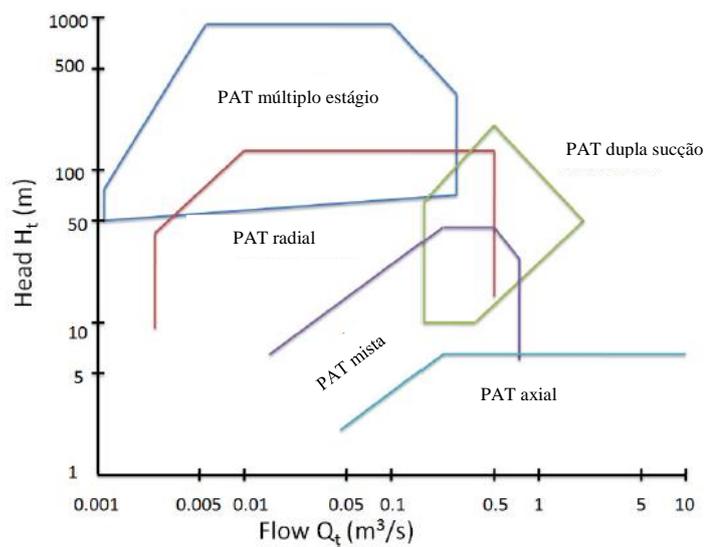


Figura 2.8 Escolha das bombas para sistemas PAT. Adaptado de: [6]

2.1.2. Vantagens/Desvantagens das *Pump As Turbine*

Visto que a utilização de turbinas para sistemas de baixa potência acaba por ser um investimento bastante dispendioso, podem-se utilizar bombas que ao trabalhar no sentido inverso funcionam como turbinas. Serão explícitas algumas vantagens que advêm da utilização das bombas em vez das turbinas tal como algumas desvantagens.

São apresentadas de seguida algumas vantagens sobre as turbinas hidroelétricas para este tipo de sistemas [6], [10], [5],[11] :

- Economicamente mais viável;
- Fácil instalação;
- Manutenção das bombas relativamente mais simples;
- Maior longevidade;
- Equipamento simples e robusto.

Além de as bombas terem imensas vantagens em relação às turbinas, existem também algumas desvantagens, desvantagens essas que são enumeradas de seguida [12], [10], [5], [6], [3]:

- Baixa eficiência;
- Escolha limitada de geradores compatíveis com a PAT;
- Não há controlo hidráulico, sendo necessário válvulas de controlo na canalização para iniciar ou parar o funcionamento da bomba;
- Se for utilizada para adaptação às variações de caudal devido à sazonalidade as perdas hidráulicas irão aumentar exponencialmente;
- Não é possível controlar a quantidade de água que entra no rotor;
- Não são fornecidas as curvas características do funcionamento como turbina.

Segundo Agarwal [4], o rendimento de uma bomba a funcionar como turbina não tem o mesmo ponto de melhor eficiência. Este acontecimento deve-se essencialmente às perdas de energia devido ao atrito causado pelo embate entre a água e o rotor, que não foi projetado para funcionar como turbina.

Uma das grandes desvantagens dos sistemas PAT durante a aquisição de uma bomba, é o facto das suas curvas características em modo de funcionamento como turbina não serem fornecidas, pelo que, a escolha da bomba torna-se bastante difícil para cada aplicação. Para tal, alguns investigadores conceberam alguns métodos para prever as suas características funcionando como turbina.

Através do método de Sharma [13], é possível calcular o caudal e a altura em modo turbina através do melhor ponto de eficiência da bomba e do seu rendimento máximo através das equações (2.1) e (2.2).

$$Q_t = \frac{Q_{bep}}{(\eta_{max})^{0,8}} \quad (2.1)$$

$$H_t = \frac{H_{bep}}{(\eta_{max})^{1,2}} \quad (2.2)$$

Em que,

- Q_{bep} e H_{bep} – Caudal e altura manométrica atingidos no ponto de melhor eficiência da bomba;
- η_{max} – Eficiência máxima da bomba;

- Q_t e H_t – Caudal e altura manométrica atingidos em modo turbina à mesma velocidade.

Outro dos métodos propostos, é o desenvolvido por Stepanoff [14] que com base em considerações teóricas calculou as características da bomba funcionando como turbina utilizando as equações (2.3) e (2.4).

$$H_t = \frac{H_{bep}}{\eta_{max}} \quad (2.3)$$

$$Q_t = \frac{Q_{bep}}{\sqrt{\eta_{max}}} \quad (2.4)$$

2.2.Redução de Caudal

Existem desafios associados aos sistemas de distribuição de água, tal como a sua reabilitação e a sua manutenção ao longo dos anos. Tendo em conta essa preocupação, é importante que o fornecimento de água entregue nas residências seja a mais económica possível, mantendo os padrões de qualidade do serviço. De modo a proteger as canalizações é bastante comum o uso de válvulas reguladoras de pressão a fim de evitar ruturas na rede devido ao excesso de pressão nas tubagens [15].

Um dos tipos de válvulas existentes nas nossas redes de distribuição são as válvulas de regulação Monovar que são constituídas por duas placas circulares perfuradas e de um corpo anular montado entre os flanges da tubagem. Na Figura 2.9 está representada a topologia da válvula, em que a placa (2) é fixa e a placa (3) é móvel. Quando os orifícios de ambas as placas se encontram alinhados, a válvula encontra-se aberta. Deslocando a placa móvel um diâmetro de orifício é possível fechar a válvula. Para condições específicas de caudal os orifícios na placa fixa são parcialmente bloqueados pelos da placa móvel.

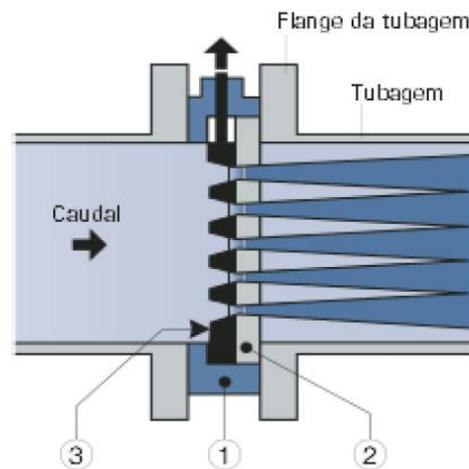


Figura 1
 1 = Corpo anular
 2 = A jusante, placa fixa
 3 = A montante, placa móvel

Figura 2.9 Topologia de uma válvula Monovar [16]

Segundo Monteiro [16], este tipo de válvula apresenta várias vantagens uma vez que a dissipação de energia é controlada através de jatos múltiplos que distribuem o caudal conseguindo assim reduzir os efeitos de perturbação.

Embora o uso das válvulas reguladoras de pressão sejam uma solução segura e bastante fiável [17], na redução de pressão e proteção das redes de distribuição, existe dissipação de energia associada ao seu uso. De modo a conseguir aproveitar essa energia podem ser utilizadas turbinas com a mesma finalidade, tendo a possibilidade de conseguir gerar energia através da sua rotação de modo a que o sistema de distribuição de água se torne mais eficiente.

Para que seja economicamente viável, não são utilizadas turbinas para a geração de energia elétrica, mas sim bombas operando no seu modo inverso, uma vez que, embora o seu rendimento seja inferior, o custo de turbinas hidroelétricas é muito mais elevado que o das bombas.

Segundo Pannatier et al. [18], ao controlar a velocidade da PAT são obtidas algumas vantagens tanto no modo de funcionamento como bomba, como no de turbina, ou seja:

- Possibilita o controlo da potência ativa no modo de bomba;
- Aumento da eficiência do sistema;
- Melhora a estabilidade da rede através da injeção de potência ativa na rede elétrica.

Considerando a PAT aplicada ao sistema, é possível calcular a potência mecânica entregue ao gerador. Segundo Ismail et al. [19], é possível calcular a potência hidráulica de entrada na PAT de acordo com:

$$P_{hidr} = \rho g Q \Delta H \quad (2.5)$$

onde,

- ρ – Densidade do fluido (kg/m^3);
- g – Aceleração gravitacional (m/s^2);
- Q – Caudal (m^3/h);
- ΔH – Diferença de pressão (m).

Segundo Ismail et al. [19], é possível calcular a potência mecânica gerada pela PAT, através do binário gerado pelo rotor e pela sua velocidade de rotação. Esta potência poderá ser determinada de acordo com as equações (2.6) e (2.7).

$$P_{mec} = T \cdot \Omega \quad (2.6)$$

$$P_{mec} = \frac{2\pi N T}{60} \quad (2.7)$$

Onde,

- T – Binário produzido (Nm);
- Ω – Velocidade angular (rad/s);
- N – Velocidade de rotação (rpm).

Em qualquer conversão de energia existem perdas. Neste caso, a perdas podem ser divididas em duas categorias, perdas mecânicas e perdas hidráulicas, sendo o rendimento mecânico inferior ao hidráulico muito devido a fugas do fluido e a perdas de energia nas chumaceiras [20].

O cálculo do rendimento da bomba a funcionar como turbina é obtido através da relação entre a potência mecânica gerada e a potência hidráulica recebida pela PAT. Este rendimento poderá ser determinado por:

$$\eta_{PAT} = \frac{P_{mec}}{P_{hidr}} \cdot 100 (\%) \quad (2.8)$$

de acordo com as equações (2.5) e (2.7) o rendimento poderá ser determinado por:

$$\eta_{PAT} = \frac{2\pi NT}{60 \rho g Q \Delta H} (\%) \quad (2.9)$$

2.3. Gerador de Indução

Para a produção de energia é necessário acoplar um gerador à bomba para que se consiga transformar a potência mecânica que é entregue ao veio do gerador em energia elétrica. Para tal podem ser utilizados vários tipos de geradores, utilizando-se os geradores de indução e os geradores síncronos [7].

O gerador mais utilizado para a redução de pressão de forma a controlar o fluxo de água nos sistemas de distribuição de água, assim como, o conseqüente aproveitamento da energia associada a este sistema, são os geradores com rotor em gaiola de esquilo. Estes geradores são os mais utilizados muito devido à sua simplicidade e robustez, aliado também ao seu baixo preço [8].

Funcionando como motor o fluxo do estator é superior ao movimento do rotor fazendo com que o fluxo do estator induza correntes no rotor que criam um fluxo com uma polaridade magnética oposta ao estator. Sendo utilizado como gerador, é produzida energia elétrica quando o rotor é mais rápido que a velocidade de sincronismo [7].

A velocidade de sincronismo de uma máquina de indução pode ser obtida através da frequência e do seu número de pólos, tal como descrito pela seguinte equação:

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.10)$$

onde,

- p – Número de pares de pólos;
- f – Frequência da rede (Hz);
- N_s – Velocidade de sincronismo (rpm).

As máquinas de indução a trabalhar como motor giram a uma velocidade ligeiramente inferior à velocidade de sincronismo.

A velocidade do motor é dada pela equação seguinte:

$$N_m = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad (2.11)$$

onde s (escorregamento) representa a diferença relativa entre a velocidade do campo girante e a velocidade do rotor.

O valor do escorregamento poderá ser determinado por:

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (2.12)$$

em que:

- N_s – Velocidade de sincronismo;
- N – Velocidade real do rotor.

Tal como referido, quando o motor de indução é convertido para gerador ele gira a uma velocidade ligeiramente superior à velocidade de sincronismo, ou seja:

$$N_{ger} = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - (-s)) \quad (2.13)$$

Através do escorregamento é possível saber em que modo é que a máquina de indução está a trabalhar.

Podem ser identificados 3 tipos de funcionamento de uma máquina de indução:

Tabela 2.1 Tipos de funcionamento de uma máquina de indução

	Escorregamento	Velocidade	Binário	P.Elet	P.Mec	Func.
1	$s < 0$	$N_s < N$	$T < 0$	$P_{elet} < 0$	$P_{mec} < 0$	Gerador
2	$0 < s < 1$	$0 < N < N_s$	$T > 0$	$P_{elet} > 0$	$P_{mec} > 0$	Motor
3	$1 < s$	$N < 0$	$T > 0$	$P_{elet} > 0$	$P_{mec} < 0$	Freio

A potência elétrica de saída do gerador pode ser calculada aproximadamente por:

$$P_{elect} = \eta_{ger} \cdot P_{out} \quad (2.14)$$

onde,

- η_{ger} – Rendimento do gerador;
- P_{out} – Potência de saída da PAT.

Em que, como anteriormente referido:

$$P_{out} = g \cdot \rho \cdot \eta_{PAT} \cdot \Delta H \cdot Q \quad (2.15)$$

2.3.1. Vantagens da Utilização do Motor de Indução

Através do estudo e da revisão da literatura é possível concluir que a máquina de indução com o rotor em gaiola de esquilo é o mais utilizado para sistemas de baixa potência, muito principalmente pelo seu preço e pela sua simplicidade. Para tal, são enumeradas algumas vantagens e desvantagens da máquina.

Vantagens da máquina de indução utilizado como gerador [21] :

- Custos de investimento;
- Custos de manutenção;
- Viável para pequenas potências;
- Sistema robusto e simples;

A máquina de indução apresenta também algumas desvantagens, não sendo o suficiente para que a escolha recaia para um gerador síncrono visto que as suas desvantagens são reduzidas para este nível de potência [21] :

- Rendimento baixo;

- Não se consegue excitar sozinho tendo de ser ligado a uma fonte de potência bastante superior, conseguindo assim produzir a corrente de magnetização no campo de gerador o que permite gerar e produzir energia.

Por outro lado, poderiam ser utilizados geradores síncronos, mas visto que o seu custo de aquisição é bastante elevado, tal como a sua manutenção, a escolha deste tipo de motores foi refutada [7], [22]. Este tipo de geradores normalmente é utilizado para sistemas de acionamento de grandes potências.

2.4. Conversor eletrónico de potência para a Interligação à Rede Elétrica

O controlo e a conversão da energia elétrica através do uso de sistemas associados a semicondutores de potência são bastante utilizados quer a nível doméstico quer industrial. A eletrónica de potência é uma área que está em expansão que envolve três campos básicos: a potência, a eletrónica e o controlo.

Para a ligação do gerador à rede elétrica, normalmente é utilizado um conversor *back-to-back*, que neste caso, é formado por um retificador monofásico e um inversor trifásico. Para controlo deste conversor são normalmente utilizadas técnicas de modulação PWM (*Pulse Width Modulation*), sendo esta modulação bastante utilizada em aplicações industriais, associados ao controlo da tensão e da frequência dos motores de corrente alternada [23].

Na Figura 2.10 encontra-se um esquema do funcionamento do conversor. O primeiro conversor irá converter uma tensão alternada sinusoidal para contínua. Depois deste processo é utilizado um inversor de modo a converter novamente para uma tensão alternada com o objetivo de fornecer e/ou receber energia do gerador elétrico.

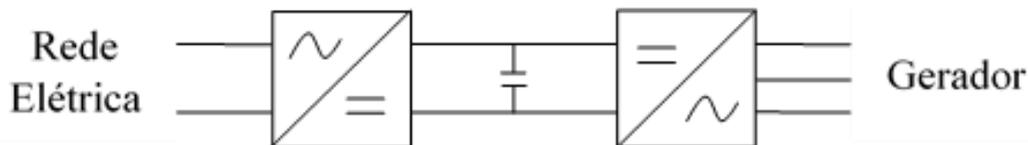


Figura 2.10 Esquema do conversor

2.5. Modulação PWM

Existem vários tipos de controlo que poderão ser utilizados para comandar os conversores eletrónicos de potência. Um dos mais utilizados é através da modulação PWM.

Este tipo de modulação controla a largura dos impulsos do sinal, permitindo deste modo controlar a comutação dos semicondutores dos conversores de potência. Devido ao desenvolvimento dos dispositivos semicondutores de potência utilizados em aplicações de alta frequência, os inversores PWM ganharam crescente interesse em pesquisas na área da engenharia. Esta técnica de modulação possibilita a eliminação de maneira seletiva das harmónicas de pequena ordem na saída do conversor [23].

Esta modulação é bastante utilizada devido a vários fatores, que são mencionados abaixo [24]:

- Com este método, as harmónicas de baixa frequência podem ser eliminadas ou minimizadas;
- As harmónicas de ordem superior conseguem ser filtradas com maior facilidade;

- Adequado para cargas sensíveis a harmónicas.

De referir que quanto maior a frequência de comutação maior serão as perdas de comutação dos semicondutores. Para a escolha da frequência de comutação da modulação PWM, é preciso existir um ajuste entre perdas na máquina de indução e das perdas no inversor [25]:

- Quando a frequência é baixa, as perdas no motor são maiores devido à onda de corrente ser menos sinusoidal;
- Quando a frequência aumenta, as perdas no motor são mais reduzidas, enquanto que as perdas no inversor aumentam devido ao aumento do número de comutações dos transístores.

• Técnica de Modulação SPWM

No caso específico dos inversores em que se pretende gerar uma tensão de saída o mais próximo possível de uma sinusoidal, uma das técnicas de modulação mais utilizadas é a técnica de modulação *Sine Pulse Width Modulation* (SPWM). A técnica de modulação sinusoidal compara um sinal sinusoidal de referência com um sinal triangular (onda portadora). A frequência do sinal sinusoidal de referência (f_m) é igual à frequência fundamental da tensão de saída do inversor. Já a frequência da forma de onda triangular (f_c) determina a frequência de comutação dos semicondutores tendo ela uma frequência e uma amplitude fixa ao longo do tempo [23]. A Figura 2.11 apresenta o princípio da geração dos comandos por via da técnica de modulação SPWM.

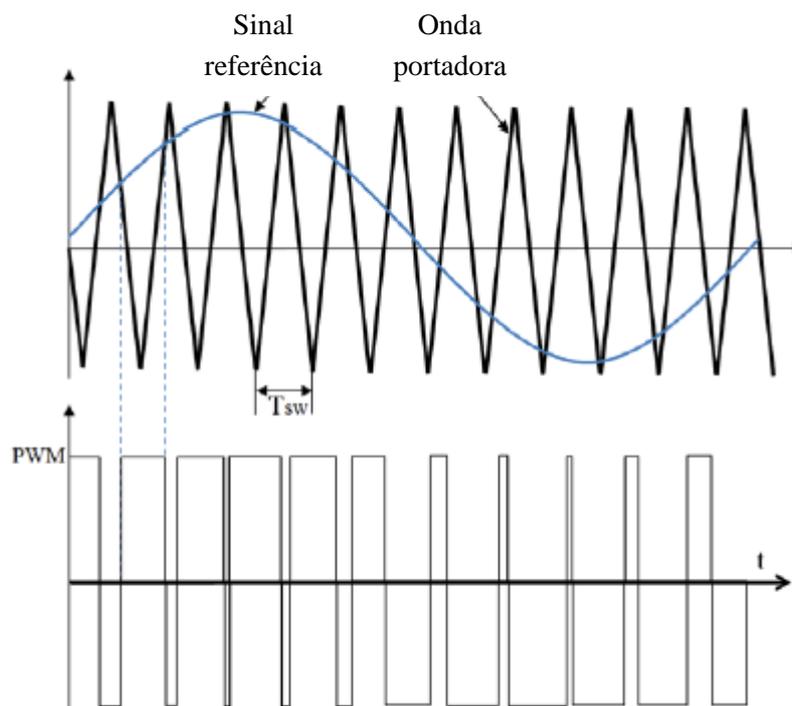


Figura 2.11 Geração de um sinal SPWM

Se o valor do sinal de referência no instante t for maior ou igual que o valor da onda portadora o resultado é um valor fixo e positivo para o impulso. Caso contrário o impulso toma valor nulo.

A relação entre estas duas frequências define a frequência de modulação [23]:

$$m_f = \frac{f_c}{f_m} \quad (2.16)$$

sendo,

- f_c – Frequência da onda portadora;
- f_m – Frequência do sinal de referência.

Através da comparação entre o sinal de referência e a onda portadora obtém-se um sinal com frequência fixa e largura de impulso variável que depende da razão entre a amplitude do sinal de referência e a amplitude da onda triangular.

A escolha da amplitude da onda portadora afeta diretamente o índice de modulação (m_a) que é calculado através da relação entre a amplitude do sinal de referência e da amplitude portadora, ou seja:

$$m_a = \frac{A_m}{A_c} \quad (2.17)$$

sendo,

- A_m – Amplitude do sinal de referência;
- A_c – Amplitude da onda portadora.

O valor do índice de modulação de amplitude é sempre maior que 0. O sinal diz-se linearmente modulado se o índice estiver compreendido entre o valor 0 e 1. Para valores maiores que 1 diz-se que o sinal está sobre modulado.

Esta técnica de modulação tem bastante interesse, sendo apontadas de seguida algumas vantagens encontradas na literatura [26]:

- Alta eficiência;
- Fácil implementação e controlo;
- Compatível com os microprocessadores atuais;
- Capacidade de trabalhar a alta potência.

No entanto, também existem algumas desvantagens, nomeadamente [26]:

- Atenuação da componente fundamental da onda;
- Gera harmónicas de alta frequência;
- Se a frequência de comutação dos interruptores for demasiado elevada, os semicondutores deteriorarão com mais facilidade.

2.6.Sincronismo – PLL (Phase Locked Loop)

No caso dos conversores ligados à rede elétrica, é normalmente necessário que estes estejam sincronizados com a rede. Existem diversos métodos de sincronização que são responsáveis por fornecer o sinal de fase de referência sincronizado com a tensão da rede elétrica. Para uma correta sincronização, existem vários aspetos importantes, nomeadamente [27], [21]:

- Capacidade de rejeitar a distorção harmónica de forma a que a fundamental seja imune ao ruído;
- Adaptabilidade à frequência em redes de distribuição fracas onde a frequência pode desviar-se dos seus valores nominais, conseguindo então responder a estas alterações sem perder o sincronismo;
- Adaptável a variações de fase, conseguindo responder às variações súbitas de fase;

- Robustez face a desequilíbrios na rede principalmente devido a cargas não lineares;
- Elevado desempenho dinâmico, devido ao interesse de uma rápida sincronização.
- Simplicidade de implementação;
- Precisão.

Para a sincronização à rede elétrica é utilizado normalmente um circuito PLL (Phase Locked Loop). Este tipo de circuitos é muito utilizado em áreas como a das telecomunicações e nos conversores eletrônicos de potência interligados à rede elétrica.

Na Figura 2.12 apresenta-se um diagrama de blocos de um circuito de sincronismo (PLL).

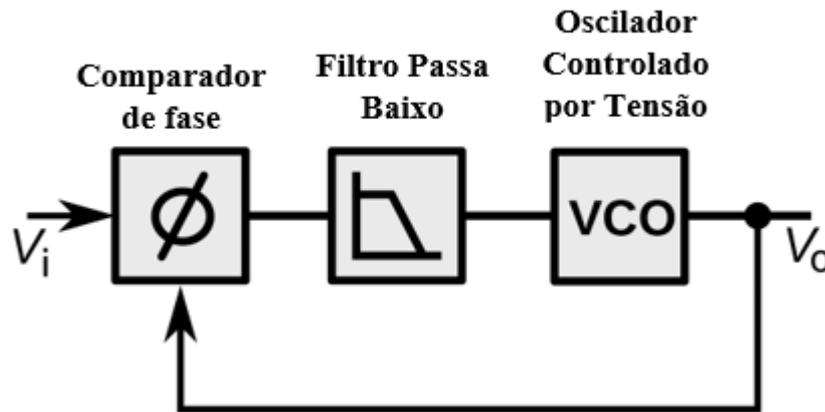


Figura 2.12 Diagrama de blocos de um circuito de sincronismo (PLL - Phase Locked Loop)

De acordo com o diagrama de blocos do circuito PLL apresentado na Figura 2.12, cada um dos blocos tem a seguinte função:

- **Comparador de fase**

A saída do comparador de fase, é proporcional à diferença de fase entre o sinal de entrada e o sinal realimentado.

- **Filtro Passa Baixo**

Para assegurar a estabilidade da malha, é implementado um filtro passa baixo. O filtro controla a oscilação do VCO mantendo as fases das duas entradas do comparador de fase com um erro mínimo. A tensão de saída do filtro u_F , está relacionada com o valor médio da sua tensão de entrada u_i :

$$u_F = k_F \frac{1}{T} \int_0^T u_i(t) dt = k_F \{u_i\}_{med} \quad (2.18)$$

- **Oscilador Controlado Por Tensão**

O oscilador produz um sinal periódico cuja frequência depende da tensão à sua entrada, sendo o responsável por gerar a saída da PLL. O oscilador regula a frequência de realimentação até esta ser idêntica à frequência de entrada, obtendo então um erro de fase constante, sendo também constante no sinal aplicado ao VCO, o que mantém o sincronismo das frequências.

Pode-se demonstrar que caso haja sincronismo então:

$$f_{VCO} = f_{REF} \quad (2.19)$$

$$\varphi_{VCO} = \varphi_{REF} + k_{VCO}(F_{VCO}^0 - f_{REF}) \quad (2.20)$$

sendo,

- f_{VCO} – Frequência do VCO;
- f_{REF} – Frequência do sinal à entrada da PLL;
- φ_{VCO} – Fase do VCO na origem do tempo;
- φ_{REF} – Fase do sinal à entrada da PLL na origem do tempo;
- F_{VCO}^0 – Frequência gerada pelo VCO com entrada nula;
- k_{VCO} – Constante característica do detetor.

2.7. Conclusão

Através desta revisão bibliográfica pretende-se contextualizar o assunto que irá ser abordado nesta dissertação. A revisão permite clarificar o conceito dos sistemas de bombagem como turbinas. Também foi apresentado um estudo sobre o seu funcionamento, aplicações, bombas mais utilizadas e a viabilidade das máquinas. Foi abordada a válvula reguladora de pressão do tipo Monovar, de modo a permitir uma melhor compreensão deste tipo de válvulas. Foram apresentadas as razões para a utilização dos motores de indução em gaiola de esquilo neste tipo de sistema. É também referido a necessidade da utilização de conversores eletrónicos de potência para o controlo e interligação da bomba à rede elétrica, tal como a sua sincronização à rede.

CONTROLO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Tendo em vista o controlo da máquina de indução é necessário a implementação de um conversor eletrónico de potência. Ao ligar a máquina assíncrona à rede elétrica ela gira a uma velocidade constante. Para que seja possível alterar a velocidade da máquina é necessário a implementação de um circuito eletrónico capaz de variar a sua frequência. Este controlo advém da necessidade da alteração da velocidade da máquina de indução e consequentemente da PAT. Ao variar a velocidade para uma determinada potência gerada pela PAT é possível maximizar o rendimento do sistema.

O conversor utilizado para o controlo da máquina de indução é um conversor *back-to-back* (CA-CA) com características de transferência bidirecional (Figura 3.1). Neste capítulo serão detalhados o controlo do retificador de tensão, do inversor trifásico tal como o do conversor. Serão posteriormente analisados os controladores que controlam a velocidade de rotação da máquina de indução. Para efetuar as simulações necessárias foi utilizada a ferramenta *Simulink* do *Matlab*.

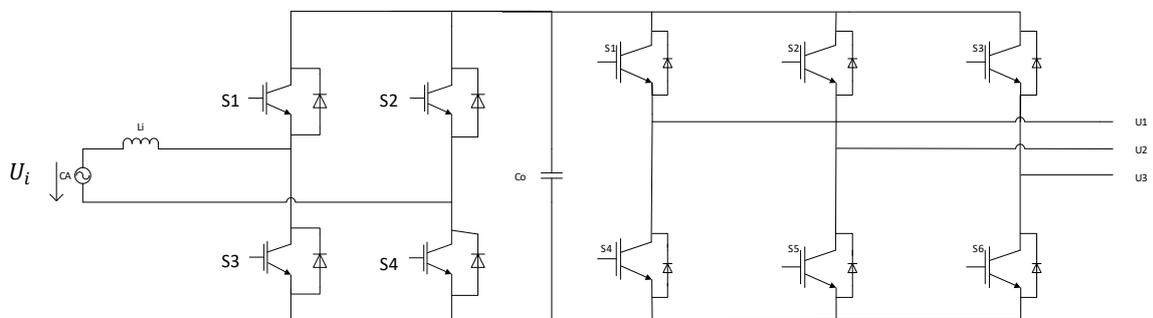


Figura 3.1 Conversor back-to-back

3.1. Controlo do Retificador de Tensão

Um retificador de tensão monofásico Figura 3.2 é um conversor do tipo CA-CC. Relativamente a este tipo de conversores existem várias topologias. Quanto à topologia proposta, esta apresenta características de transferência de energia bidirecional.

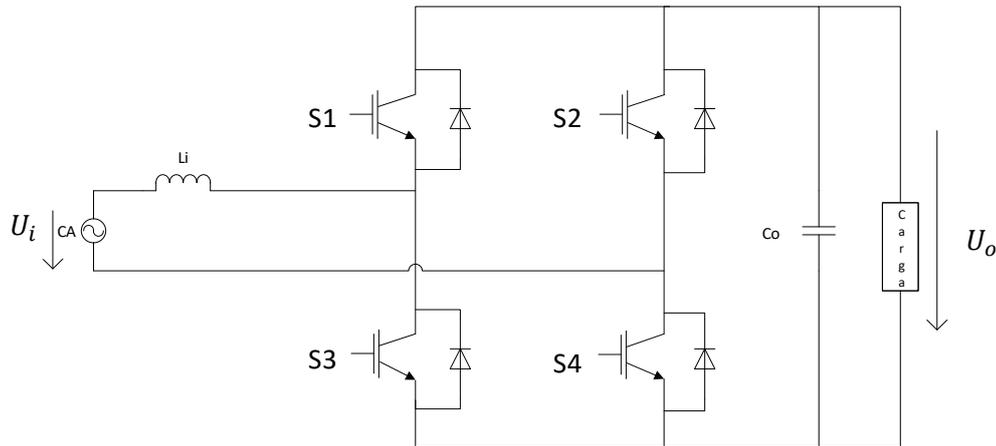


Figura 3.2 Retificador de tensão monofásico

Dado que o motor irá ser controlado por uma frequência e amplitude de tensão variável, optou-se por utilizar pelo conjunto retificador inversor. O retificador irá controlar a tensão contínua (CC) que irá alimentar o inversor. Para manter esta tensão num valor desejado, será utilizado um controlador de tensão associado ao retificador. Contudo, este controlador de tensão não irá controlar diretamente os semicondutores de potência totalmente controlados do inversor, mas sim, gerar um valor de referência para um controlador de corrente. O esquema geral dos controladores utilizados é apresentando na Figura 3.3.

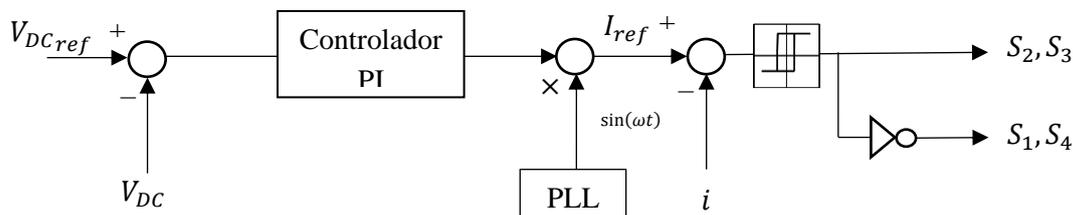


Figura 3.3. Controlador de tensão

Tal como referido, o sistema de controlo acima implementado tem como principal função manter a tensão no barramento CC constante. Este sistema necessita de efetuar a aquisição da tensão de saída e a corrente de entrada. O valor da tensão no barramento DC é subtraído ao valor de referência, através da diferença é obtido o seu erro que será eliminado através de um controlador PI. O sinal à saída deste controlador irá corresponder ao valor da corrente de referência do controlador de corrente. Visto que o sinal da corrente de referência deve ser alternada sinusoidal e estar em fase com a tensão (de modo a garantir que o fator de potência seja praticamente unitário), é necessário multiplicar o sinal à saída do controlador PI por um sinal proporcional à tensão da rede. Este sinal será gerado a partir de um circuito PLL. É obtida então uma corrente de referência sinusoidal em fase com a tensão da rede. O controlo histerético gera sinais para comutação dos semicondutores com o propósito de controlar a corrente de entrada do retificador. Este método é bastante utilizado devido à sua fácil implementação e permite um rápido controlo da corrente. O controlo histerético faz com que a corrente atual siga a corrente de referência na banda de histerese.

O controlador PI possui dois tipos de controlo: o controlo proporcional e o controlo integral. A ação proporcional produz um sinal de saída que é proporcional à amplitude do erro. A ação integral produz um sinal de saída que é proporcional à magnitude e à duração do erro. Isso permite acelerar a resposta do sistema permitindo chegar ao valor de referência o mais rápido possível.

A equação que descreve o controlador PI, é a seguinte:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.1)$$

em que o ganho proporcional é representado por k_p e o ganho integral por k_i . Na implementação deste controlador, os parâmetros foram obtidos por tentativa e erro.

De modo a controlar o retificador é também necessário modelizar o sistema. Os passos iniciais para a modelização do sistema passam por identificar quais as variáveis que são necessárias controlar. Para este circuito, como referido anteriormente é necessário controlar a corrente de entrada e a tensão de saída i_s, V_o .

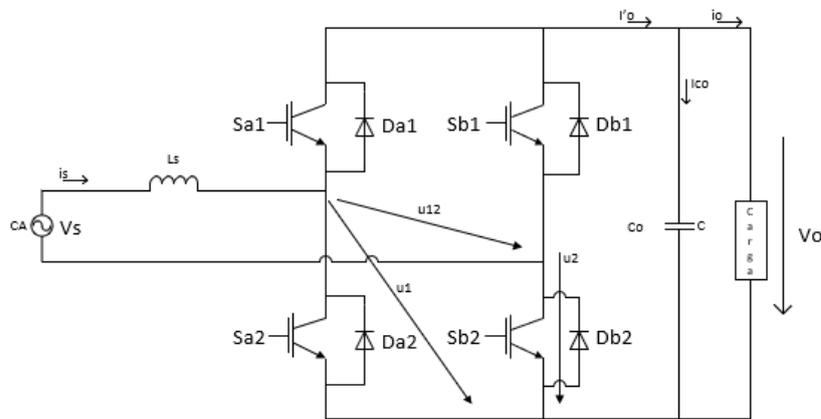


Figura 3.4 Retificador de tensão

De modo a não curto-circuitar o condensador de saída, os interruptores na mesma posição em braços diferentes têm de estar em estados complementares. Os semicondutores estão agrupados em dois conjuntos de interruptores cujos estados podem ser representados através da variável Γ_k , com $k \in \{1,2\}$ definido por [28]:

$$\Gamma_k = \begin{cases} 1, & \text{se } S_{a_k} \text{ ou } D_{a_k} \text{ ON e } S_{b_k} \text{ e } D_{b_k} \text{ OFF} \\ 0, & \text{se } S_{a_k} \text{ e } D_{a_k} \text{ OFF e } S_{b_k} \text{ ou } D_{b_k} \text{ ON} \end{cases} \quad (3.2)$$

aplicando as leis de Kirchhoff, pode-se descrever:

$$u_k = \Gamma_k V_o \quad (3.3)$$

$$u_{12} = u_1 - u_2 = (\Gamma_1 - \Gamma_2) V_o = \gamma V_o \quad (3.4)$$

$$i'_o = \Gamma_1 i_1 + \Gamma_2 i_2 = (\Gamma_1 - \Gamma_2) i_s = \gamma i_s \quad (3.5)$$

onde γ representa a função de comutação que é dada pelas seguintes condições:

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{se } \Gamma_1 = 1 \text{ e } \Gamma_2 = 0 \\ -1, & \text{se } \Gamma_1 = 0 \text{ e } \Gamma_2 = 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

em que a tensão de saída pode ser dada por:

$$\begin{aligned} i'_o &= i_o + i_{co} = i'_o = i_o + \frac{cdV_o(t)}{dt} = \\ \frac{dV_o(t)}{dt} &= \frac{\gamma i_s}{C_o} - \frac{i_o}{C_o} \\ V_o &= \frac{1}{C_o} \int_0^t \left(-\frac{V_o}{R_o} + \gamma i_s \right) dt + V_o(0) \end{aligned} \quad (3.7)$$

e a corrente de entrada pode ser descrita por:

$$\begin{aligned} -V_s + \frac{L_s di(t)}{dt} + \gamma V_o &= 0 \\ \frac{di_s(t)}{dt} &= \frac{1}{L_s} (V_s - \gamma V_o) \\ i_s &= \frac{1}{L_s} \int_0^t (V_s - \gamma V_o) dt + i_s(0) \end{aligned} \quad (3.8)$$

como se pode ver na equação (3.8) a corrente i_s está em função de γ . De modo a que $i_{sref} - i_s = 0$, é aplicado um controlo histerético que permite garantir um *ripple* constante para a corrente. Os semicondutores são então comutados de acordo com as seguintes regras:

$$\begin{cases} i_{sref} - i_s < -\Delta i \rightarrow \gamma = 1 \rightarrow S_1, S_4 \text{ ON e } S_2, S_3 \text{ OFF} \\ i_{sref} - i_s > \Delta i \rightarrow \gamma = -1 \rightarrow S_1, S_4 \text{ OFF e } S_2, S_3 \text{ ON} \end{cases} \quad (3.9)$$

Para testar o controlador de tensão, foi implementado um retificador monofásico na plataforma *Simulink*, em que o objetivo do controlador era estabilizar a tensão de saída a 400 V. Para este teste foi utilizado o circuito que se apresenta na Figura 3.5.

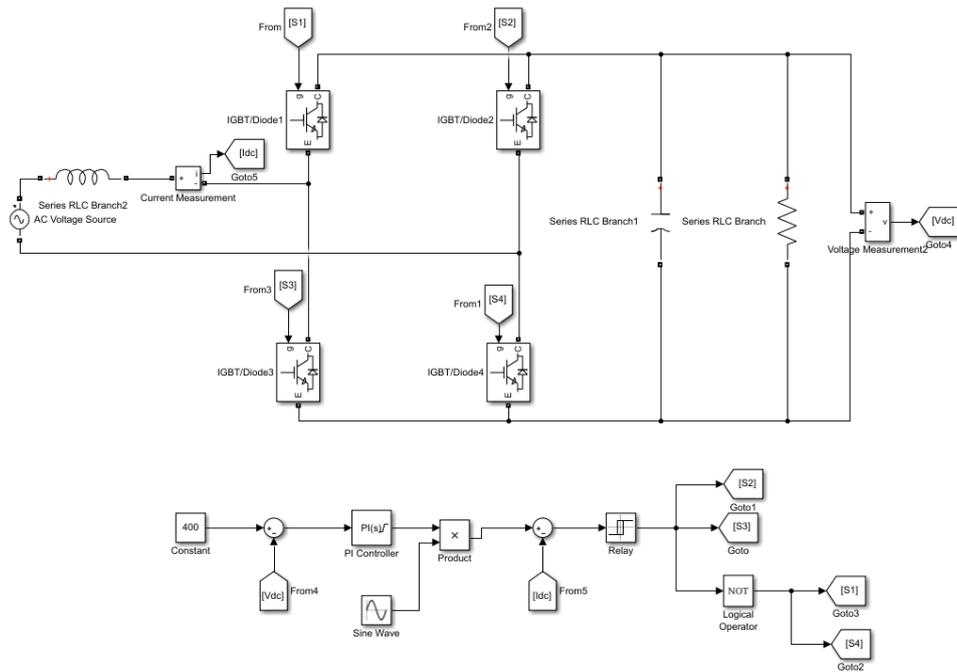


Figura 3.5 Retificador monofásico

Como é possível observar na Figura 3.6, o gráfico apresentado demonstra que o sinal à saída do circuito manteve-se a 400 V, tendo um *ripple* de ordem baixa o que é completamente aceitável para este nível de tensão.

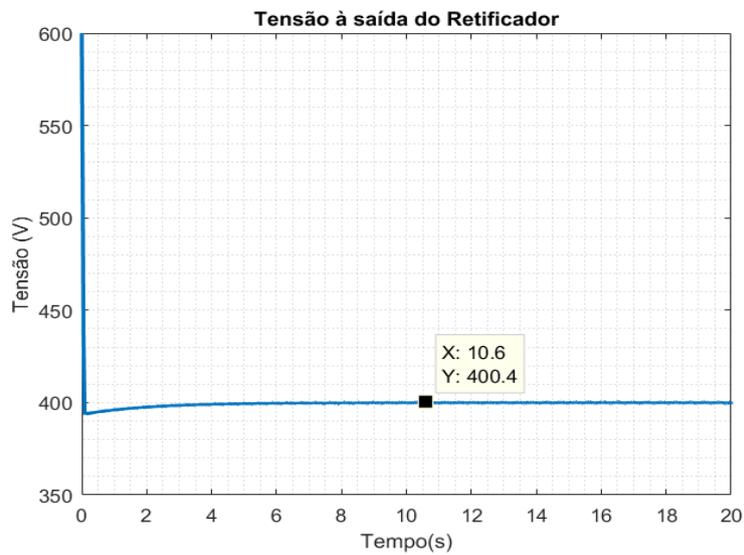


Figura 3.6 Tensão à saída do retificador

De modo a verificar que o fator de potência é praticamente unitário, é possível verificar na Figura 3.7 que a corrente e a tensão de entrada se encontram em fase.

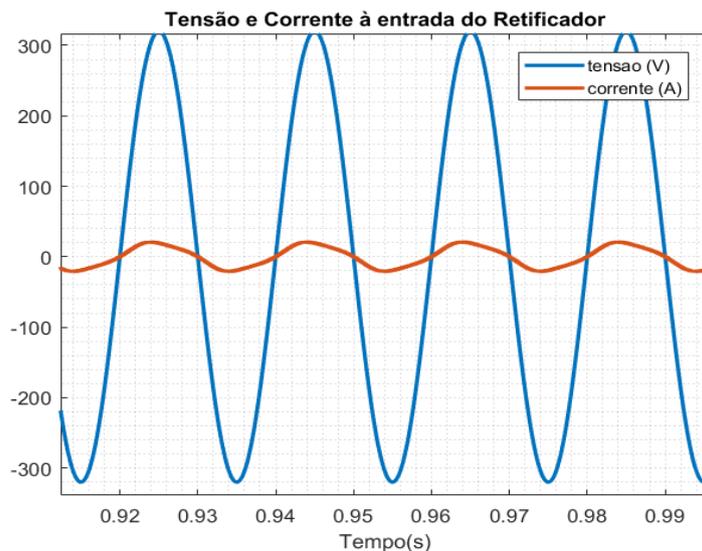


Figura 3.7 Tensão e corrente à entrada do retificador

3.2. Controlo do Inversor

O inversor de tensão trifásico Figura 3.8 permite converter uma tensão contínua numa tensão alternada. Para tal são utilizados dispositivos semicondutores de potência totalmente comandados (IGBTs - *Insulated Gate Bipolar Transistor*) com díodos de roda-livre.

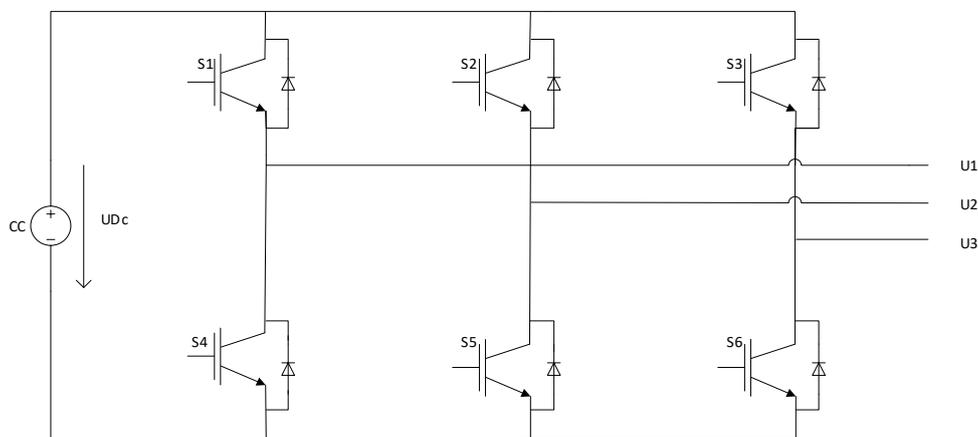


Figura 3.8 Inversor de tensão trifásico

O inversor de tensão trifásico é constituído por seis semicondutores distribuídos por três braços. Na Tabela 3.1 é possível verificar os estados possíveis do inversor trifásico, sendo possível observar qual o valor da tensão à saída.

Tabela 3.1 Tabela de estados do inversor

Estado	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	U_{12}	U_{23}	U_{31}
1	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	0	0	0
2	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	0	0	0
3	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	U_{DC}	0	$-U_{DC}$
4	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	0	U_{DC}	$-U_{DC}$
5	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	$-U_{DC}$	U_{DC}	0
6	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	$-U_{DC}$	0	U_{DC}
7	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	0	$-U_{DC}$	U_{DC}
8	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	U_{DC}	$-U_{DC}$	0

Com o objetivo de verificar se o controlo do inversor era bem executado foi implementado um controlador V/f em malha aberta. Ao implementar um controlo V/f em malha aberta é necessário estipular uma velocidade para que a máquina assíncrona assim o atinja. Para tal é utilizada a técnica de modulação SPWM (Figura 3.9) que consiste em comparar as ondas de tensão trifásicas sinusoidais desfasadas 120° de referência com uma onda triangular, sendo depois utilizados comparadores de modo a que os impulsos dos semicondutores do inversor sejam gerados.

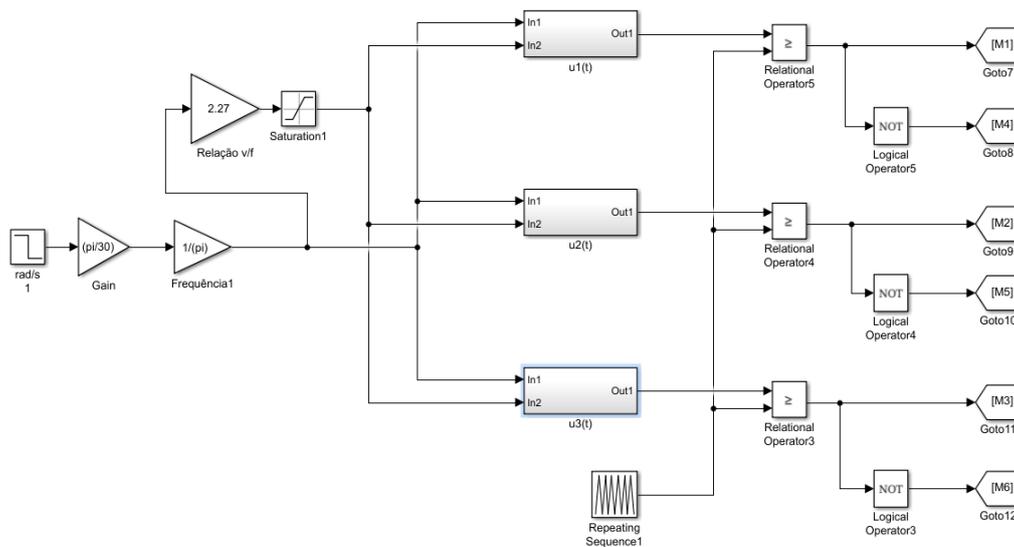


Figura 3.9 Modulação SPWM

Através da Figura 3.9 é possível observar que à entrada da modulação é aplicada uma velocidade que nos blocos de ganho é convertida na frequência e amplitude das ondas sinusoidais de referência. Para a identificação da frequência a ser entregue à máquina elétrica, é multiplicada à velocidade de referência o número de pares de pólos, dividindo no final por 2π . Na Figura 3.10 é possível observar a resposta do sistema à aplicação de duas velocidades de referência (1400 e 900 RPM).

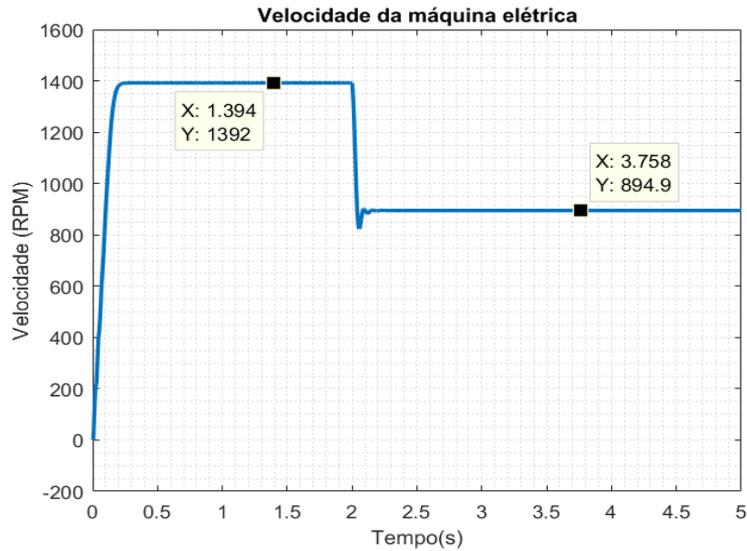


Figura 3.10 Velocidade obtida com V/f em anel aberto

Conforme é possível verificar, as velocidades obtidas estão muito próximas dos valores de referência.

Visto que não é monitorizada a velocidade do rotor da máquina assíncrona, muito dificilmente se conseguirá obter na plenitude a velocidade requerida. Para que tal aconteça é necessário implementar um controlador V/f em malha fechada que será explicado de seguida.

A tensão de saída do inversor (fase-neutro) controlado pela modulação SPWM pode ser obtida através de:

$$V_{an} = m_a \frac{V_{Dc}}{2} \text{sen}(2\pi ft) \quad (3.10)$$

enquanto que a tensão (fase-fase) é obtida através da seguinte equação:

$$V_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_{Dc} \quad (3.11)$$

em que,

- m_a – Índice de modulação;
- V_{Dc} – Tensão no barramento DC.

O circuito utilizado para a simulação do inversor foi o que se encontra na Figura 3.11.

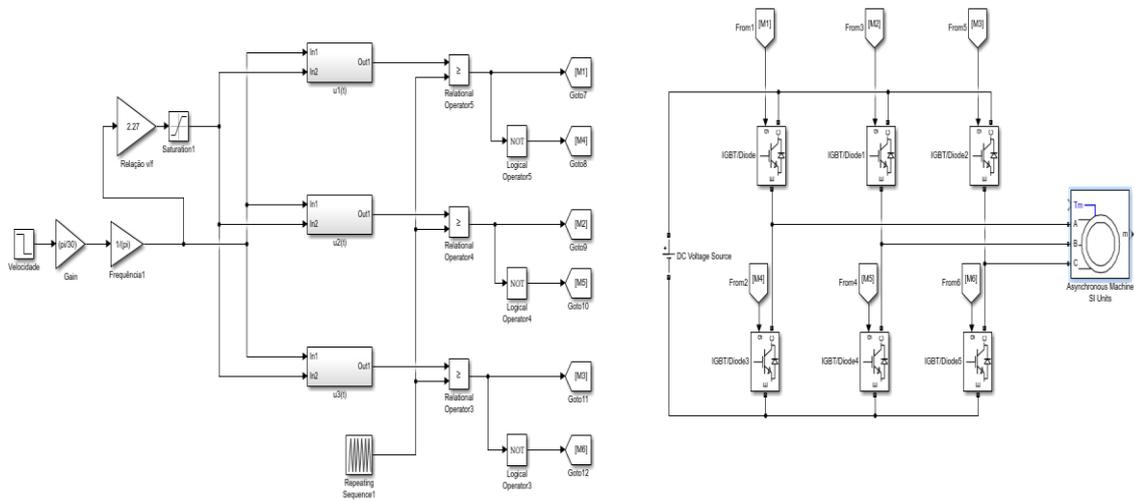


Figura 3.11 Circuito de teste do inversor de tensão trifásico

3.3. Controlo V/f

Com o objetivo de controlar a velocidade da máquina assíncrona optou-se por um método de controlo escalar, ou seja, a técnica de controlo V/f. O controlo V/f é um método que permite variar a frequência e a amplitude da tensão que é fornecida à máquina assíncrona, mantendo assim o fluxo da máquina constante. Este método tem sido um dos mais populares e utilizado em aplicações domésticas e industriais devido à sua fácil implementação. Contudo o seu desempenho dinâmico é inferior a outras técnicas de controlo, como por exemplo, o controlo vetorial [29].

3.3.1. Fundamento Teórico

No controlo V/f, a velocidade da máquina de indução é controlada através da alteração do valor da tensão e frequência entregues ao estator mantendo o fluxo sempre constante. É possível explicar a técnica examinando o esquema equivalente da máquina de indução (Figura 3.12).

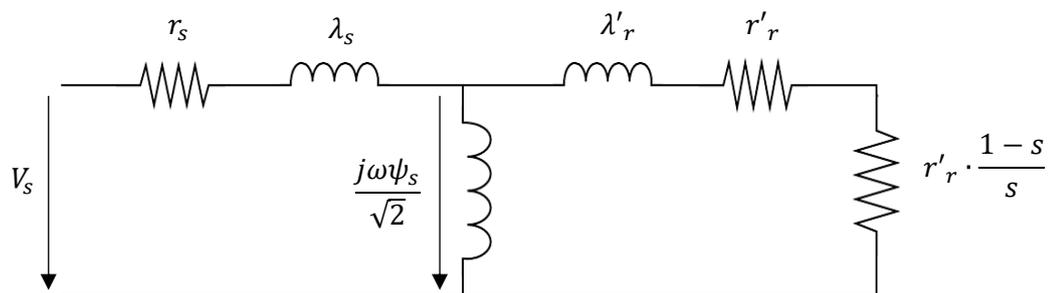


Figura 3.12 Esquema equivalente da máquina de indução

Partindo do esquema equivalente apresentado na Figura 3.12 e desprezando-se a resistência e o coeficiente de dispersão do estator obtém-se:

$$V_s = \frac{\omega\psi_s}{\sqrt{2}} \quad (3.12)$$

em que,

- V_s é o valor eficaz da tensão aplicada;
- ψ_s é o valor de pico do fluxo do estator.

O fluxo criado pode então ser calculado da seguinte forma:

$$\psi_s = \frac{V_s}{\sqrt{2}\pi f} \quad (3.13)$$

de referir que o fator $\sqrt{2}$ resulta de ter sido utilizado o valor máximo como amplitude do vetor do fluxo e o valor eficaz para a amplitude do vetor da tensão.

Caso a relação não se mantenha constante o motor ficará sobre-excitado ou sub-excitado. A sobre-excitação ocorre quando se mantém a tensão de alimentação e se diminui a frequência, ou quando a tensão aumenta e a frequência se mantém constante. A sub-excitação acontece quando a frequência aumenta e a tensão se mantém constante, ou quando a tensão de alimentação diminui e a frequência se mantém constante.

3.3.2. Implementação do Controlo V/f em Anel Fechado

O controlo V/f em malha fechada é uma melhoria do controlo em anel aberto visto que possibilita o controlo do escorregamento. É um controlo em que é possível monitorizar a velocidade a que a máquina está a girar, tentando então minimizar esse erro o mais rapidamente possível. Em malha fechada, é relacionada a velocidade atual do rotor e a velocidade de referência.

A Figura 3.13 apresenta o esquema base do controlo V/f. A máquina elétrica é alimentada pelo conversor CA-CA, no qual o inversor de tensão recebe os sinais de comando oriundos da modulação SPWM de modo a fornecer a frequência e a tensão respetivas à máquina. O escorregamento, que é obtido através do erro da velocidade, é adicionado ao sinal da velocidade de rotação do motor, de modo a obter-se a velocidade de rotação desejada e, conseqüentemente, a frequência e amplitude de tensão a aplicar ao estator. De referir que a amplitude e tensão serão determinadas a partir da frequência, de modo a que a sua relação seja sempre constante.

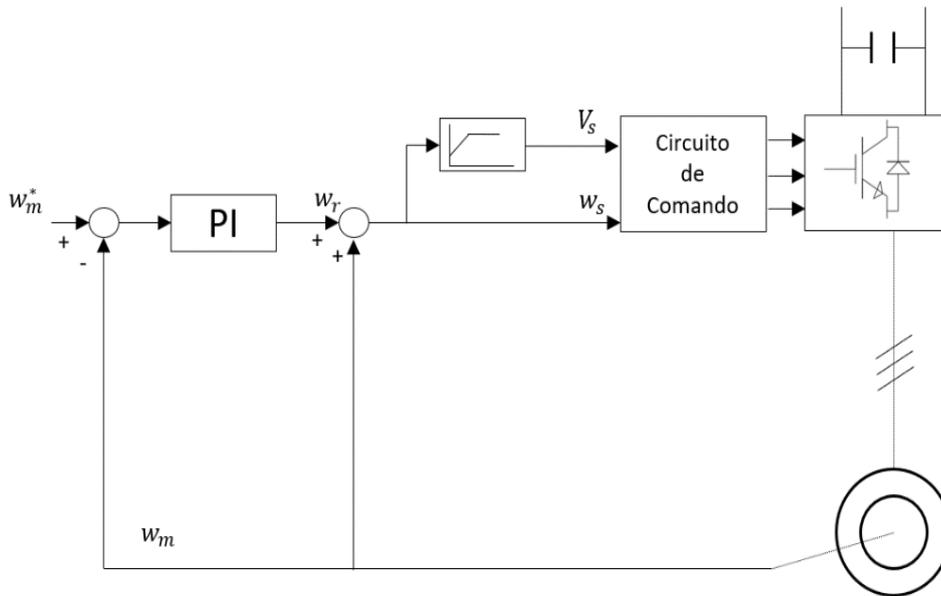


Figura 3.13 Esquema base do controlo V/f

De modo a verificar o comportamento do motor com a aplicação desta técnica de controlo, este sistema foi implementado no *Simulink*. Para testar o inversor de tensão simulou-se o circuito desde o condensador até à máquina assíncrona de modo a que se pudesse verificar se existia transferência de energia em ambos os sentidos. Deste modo, colocou-se um binário negativo, de modo a que a máquina funcionasse como gerador, verificando então que a tensão no condensador aumentava (Figura 3.14), sendo também possível observar através do valor médio da corrente, uma vez que, o seu valor médio é negativo (Figura 3.15). Ao impor um binário positivo, verifica-se que a tensão no condensador diminui (Figura 3.16), ou seja, está a fornecer energia ao motor e o valor médio da corrente é positivo (Figura 3.17).

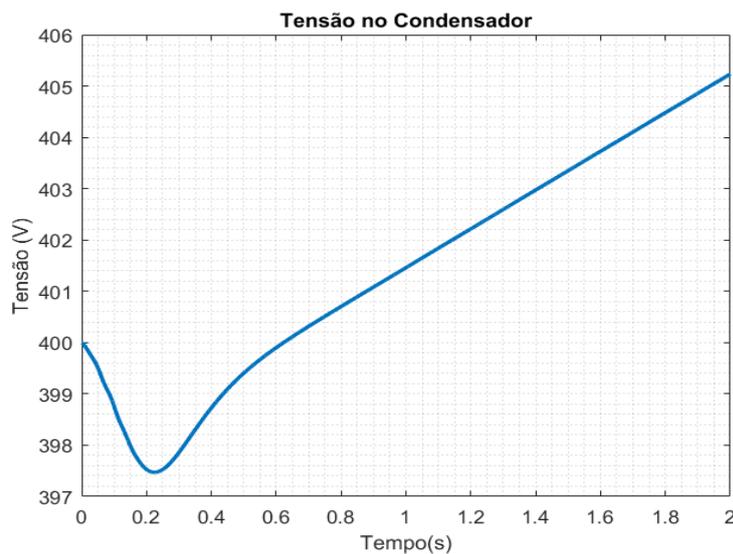


Figura 3.14 Tensão no condensador em modo gerador

Como é possível observar na figura abaixo (Figura 3.15) o valor médio da corrente à entrada do inversor é negativo, demonstrando então que a máquina de indução está a trabalhar como gerador.

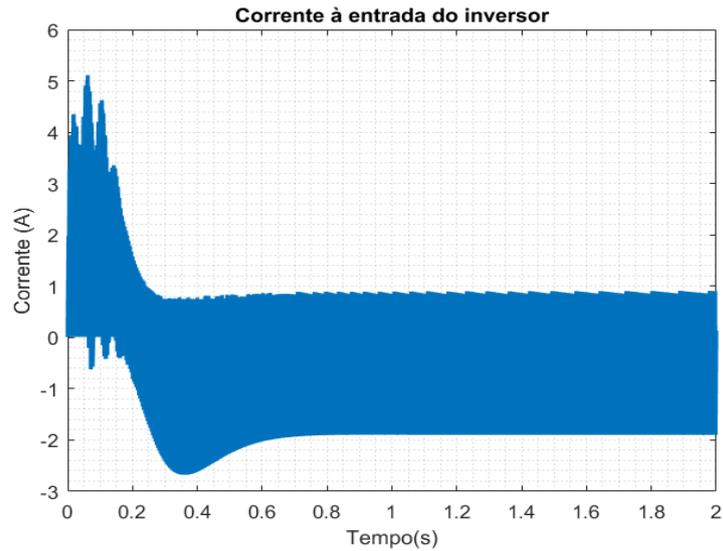


Figura 3.15 Corrente no inversor em modo gerador

Como é possível observar na figura abaixo (Figura 3.16) a tensão no condensador vai decrescendo, o que leva a concluir que o circuito eletrônico é que está a fornecer energia à máquina de indução, trabalhando ela então como motor neste momento.

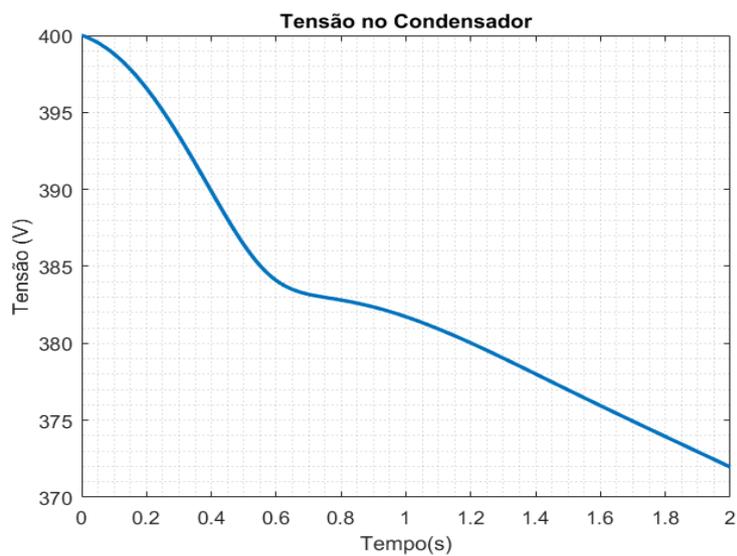


Figura 3.16 Tensão no condensador em modo motor

Na figura abaixo (Figura 3.17) é possível observar que o valor médio da corrente à entrada do inversor é positivo, conseguindo então demonstrar mais uma vez que o inversor está a fornecer energia à máquina de indução.

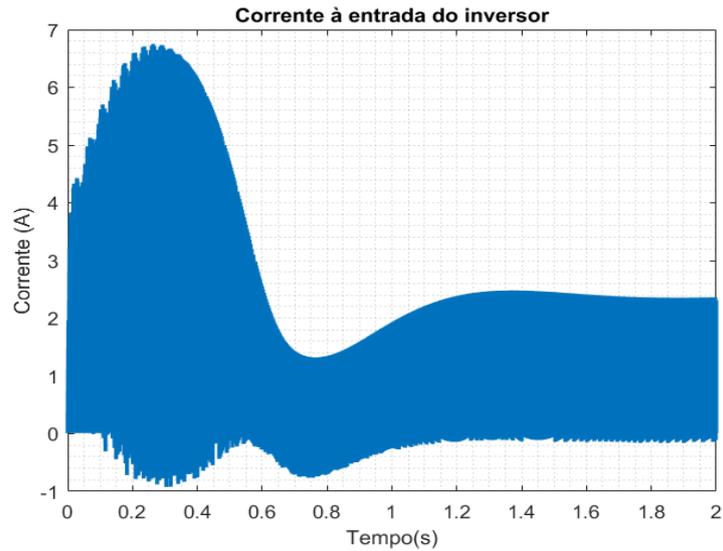


Figura 3.17 Corrente no inversor em modo motor

Para o controle da velocidade foi utilizado o controlador que está apresentado na Figura 3.18.

Para que seja determinada a nova frequência é necessário introduzir a velocidade de referência em rpm. Para efeitos de comparação é transformada para rad/s sendo posteriormente subtraída a velocidade real da máquina elétrica, obtendo então o seu erro, erro esse que irá ser minimizado pelo controlador PI. O erro entre a velocidade de referência e a velocidade atual do rotor, origina o sinal relativo à velocidade do campo girante em relação à velocidade do rotor. A saída do controlador do PI é somada à velocidade atual do rotor, obtendo então a sua nova velocidade.

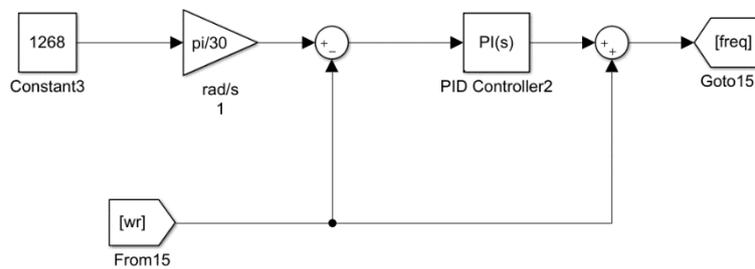


Figura 3.18 Controlador para determinação da nova frequência

Através do controlador implementado é possível controlar o escorregamento de modo a que a velocidade de referência seja atingida. O objetivo do controlador é conseguir obter a velocidade de referência, podendo ser explicado com a seguinte equação:

$$N_s = N_r + sN_s \tag{3.14}$$

em que,

- N_s – Velocidade de rotação de referência;
- N_r – Velocidade atual do rotor;
- s – Escorregamento.

Determinada a nova frequência, ela irá ser utilizada na modulação SPWM que já foi explicada anteriormente.

Na Figura 3.19 é possível ver um exemplo do controlo da velocidade da máquina de indução através do método V/f em anel fechado em que a velocidade requerida foi de 1265 RPM.

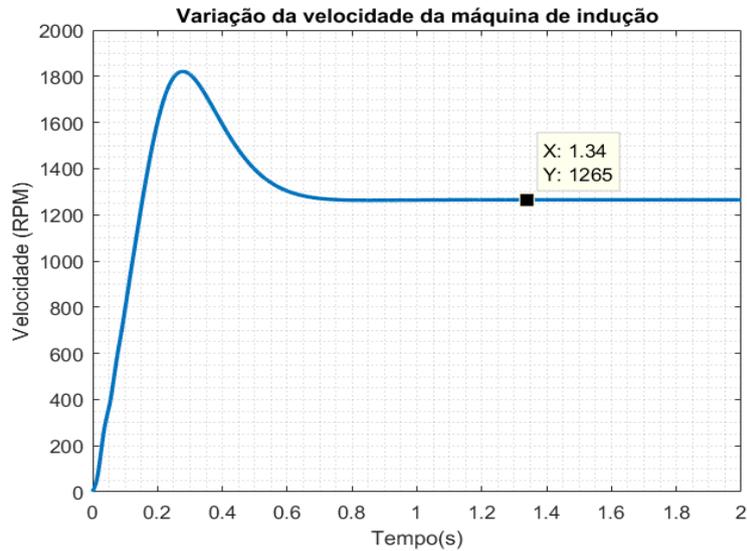


Figura 3.19 Exemplo da resposta da máquina para uma velocidade = 1265 RPM

É possível verificar na Figura 3.19, que o erro estático é eliminado. Poder-se-ia ter uma sobrelevação menor, mas o tempo de resposta da máquina seria maior, o que levava a que demorasse muito mais tempo a conseguir atingir a velocidade desejada.

É possível observar o conversor implementado bem como todas as suas unidades de controlo na Figura 3.20 (página seguinte).

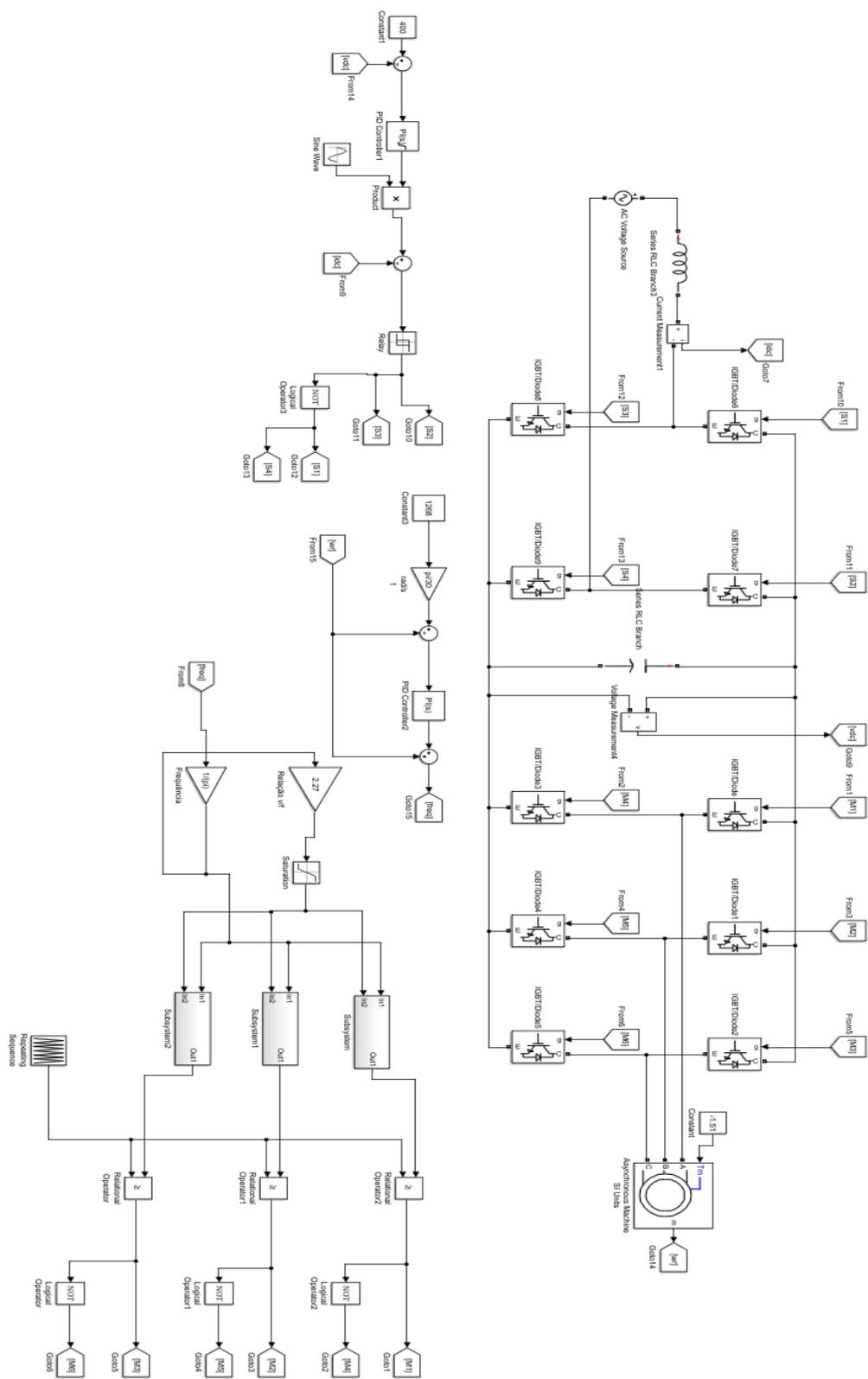


Figura 3.20 Conversor eletrônico de potência com as suas unidades de controlo

4.1. Modelo Hidráulico

Neste capítulo foi abordada a simulação do circuito hidráulico que se encontra instalado no DEE.

Um dos principais objetivos de um sistema de distribuição de água é o fornecimento com qualidade aos clientes. É então necessário assegurar que a substituição de uma válvula por uma PAT não influencie o comportamento da rede. Para que seja uma rede bem projetada é preciso que se tenha em conta a eficiência energética do circuito, tal como a influência da PAT no sistema e a sua capacidade de adaptar a diferentes condições de trabalho, a fim de evitar problemas de funcionamento [30].

O sistema que está instalado no DEE é composto por um reservatório de descarga, que abastece todo o circuito. É constituído por uma bomba para que a água seja impulsionada, logo de seguida à bomba é encontrado um reservatório hidropneumático que tem como principal função a estabilização da pressão de saída da bomba. Por fim encontra-se a PAT que irá ser testada e que fecha o circuito debitando novamente a água no reservatório.

Para simulação do sistema hidráulico foi utilizado o software EPANET. Este é um programa que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição. Com o EPANET é possível obter o valor de caudal em cada tubagem e a pressão em cada nó tal como outras variáveis inerentes ao comportamento da água. Assim, este software é uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição, conseguindo então um melhor conhecimento de como é realizado o transporte e se a entrega da água cumpre os parâmetros mínimos exigidos ao seu destino.

4.2. Constituintes da Rede em Simulação

A rede implementada encontra-se descrita na referência [31]. Para um maior enquadramento à rede implementada foi feita uma descrição mais resumida dos componentes da rede.

- **Reservatório de Carga/Descarga**

Este tipo de reservatórios não tem nenhuma especificidade em particular, uma vez que apenas permitem acumular toda a água do sistema tal como assegurar o ponto de descarga necessário. O reservatório utilizado tem uma capacidade de 250 litros e foi construído pela empresa Momel S.A.



Figura 4.1 Reservatório implementado na rede [31]

- **Reservatório Hidropneumático**

Os reservatórios hidropneumáticos (Figura 4.2) normalmente são instalados próximos da secção de saída das válvulas que precedem as bombas. Também podem ser aplicados em sistemas de elevação de água em edifícios, mantendo a pressão na rede alimentando-a para pequenos caudais evitando assim frequentes arranques das bombas [32].

Neste tipo de sistemas podem ocorrer falhas a nível da canalização levando a um aumento (sobrepessão) ou a uma diminuição (subpressão) na pressão, resultando na alteração das características do fluxo de água, surgindo então os regimes transitórios.

Os reservatórios hidropneumáticos são importantes na proteção do circuito, protegendo o circuito contra as ondas de choque. Os reservatórios contêm água e ar comprimido, tendo o propósito de alimentar a tubagem. Quando ocorre uma diminuição da pressão o reservatório alimenta a tubagem. Ao aumentar a pressão é o reservatório que é alimentado pela tubagem. Neste circuito é utilizado um reservatório de 100 litros e 10 bar, visto que a pressão máxima do sistema nunca ultrapassa os 10 bar, com um bocal de entrada/saída de 50 mm.

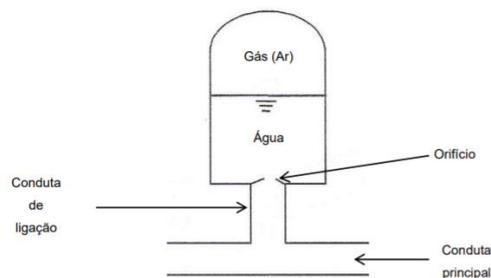


Figura 4.2 Esquema de um reservatório hidropneumático [32]

- **Bomba e PAT**

A bomba é utilizada de maneira a impor a pressão na água de modo a que todo o circuito seja abastecido. Para a impulsão da água é utilizada uma bomba centrífuga horizontal monobloco

Caprari (Figura 4.3), equipada com um motor de indução de 2 pólos, para uma pressão máxima de 10 bar.



Figura 4.3 Bomba de circulação instalada [31]

As características da bomba podem ser observadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Características da bomba de circulação

Modelo	CM32-16C
Caudal (m ³ /h)	4,5-21
Altura Manométrica (m)	24,4 -14,1
Altura Manométrica min (m)	14,1
Altura Manométrica máx (m)	24,7
Potência (kW)	1,5
U Δ (V)	220 - 240
U estrela (V)	380 - 415
Corrente (A)	4
Frequência (Hz)	50
Velocidade de Rotação (RPM)	2900

A PAT instalada na rede é uma bomba centrífuga monobloco (Figura 4.4). A PAT está acoplada a uma máquina de indução em gaiola de esquilo. As características hidráulicas da PAT encontram-se na Tabela 4.2.



Figura 4.4 PAT instalada na rede [31]

Tabela 4.2 Características hidráulicas da PAT

Empresa	KSB
Modelo	Etanorm 50-32-125
Diâmetro do impulsor (mm)	139
Caudal (m³/h)	12,24
Altura Manométrica (m)	3,69
Velocidade de Rotação (RPM)	1020

A máquina de indução que está instalada no sistema é fabricada pela Siemens, estando as suas características descritas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Características do motor instalado

Empresa	Siemens
Modelo	3 MOT1LA7083-6AA10-Z
Potência (kW)	0,55
Tensão (V)	230-400
Corrente (A)	2,8/1,59
Fator de Potência	0,74
Velocidade Nominal (RPM)	910
η (%)	67,5

Devido à falta de informação dos parâmetros internos da máquina instalada, para efeitos de simulação irá ser substituída por uma máquina de indução com o mesmo nível de potência, fabricada pela empresa ABB. As suas características encontram-se na Tabela 4.4. Esta alteração da máquina de indução deveu-se ao facto de não poder ter sido ensaiada a máquina em questão. Resolveu-se então substituir a máquina de modo a que fosse uma simulação genérica, tentando concluir sobre a viabilidade do sistema.

Tabela 4.4 Características da máquina de indução acoplada à PAT para efeitos de simulação

Designação do Motor	M2VA 80A 4
ID do produto	3GVA082001-ASB
Potência (kW)	0,55
Tensão (V)	220-380
Corrente (A)	1,50/2,60
Velocidade nominal (RPM)	1400
Fator de Potência (ϕ)	0,76
η (%)	75,30

- **Manómetro**

O manómetro é um instrumento utilizado para monitorizar a pressão, em que o valor apresentado é a pressão que está no sistema relativa à pressão atmosférica. De realçar que a precisão do manómetro é influenciada pela densidade do fluido. O manómetro aplicado na rede é um manómetro de glicerina (Figura 4.5).



Figura 4.5 Manómetro instalado [31]

- **Caudalímetro**

O caudalímetro é um instrumento que é utilizado para a medição de caudal de um líquido. No caso do circuito implementado, o ponto de funcionamento do sistema é de 3,4 L/s. Na figura abaixo (Figura 4.6) é possível ver o caudalímetro instalado.



Figura 4.6 Caudalímetro instalado [31]

4.3.Extração das Curvas Caraterísticas

Para que o sistema seja o mais eficiente possível e sabendo que se está a utilizar um controlo V/f, foi testado para a máquina elétrica em causa, as suas curvas de rendimento a funcionar como gerador. Para esta simulação foram aplicadas 3 fontes de tensão alternadas sinusoidais desfasadas 120 graus ligadas diretamente à máquina de indução.

Tal como referido anteriormente, devido à falta de informação sobre os parâmetros da máquina de indução utilizada no sistema foi necessário encontrar parâmetros de uma máquina de indução semelhante à implementada. Sendo o motor de 0,55 kW foi encontrado um motor dessa potência da empresa ABB (Anexo IX), em que os parâmetros da máquina foram estimados por Frederik Aarskog [33]. As características da bomba já foram descritas na Tabela 4.4, sendo necessário para a simulação da máquina a introdução das suas caraterísticas internas.

Para a implementação deste motor no *Simulink* foi necessário introduzir as suas caraterísticas, nomeadamente as apresentadas na Tabela 4.5 [33].

Tabela 4.5 Parâmetros da máquina de indução

Parâmetro	Valor
R_s (m Ω)	3808,456
L_s (mH)	236,716
L_{ls} (mH)	12,485
R_r (m Ω)	3947,745
L_r (mH)	236,716
L_{lr} (mH)	12,485
L_m (mH)	224,231
J (kg.m ²)	0,004
F (N.m.s)	0,001

Cujos parâmetros representam:

- R_s - Resistência do estator;
- L_{ls} – Dispersão do estator;
- R_r – Resistência do rotor;
- L_{lr} – Dispersão do rotor;
- L_m – Indutância mútua estator-rotor;
- J – Coeficiente de inércia;
- F – Atrito Viscoso;
- L_s – Coeficiente de autoindução total do estator;
- L_r – Coeficiente de autoindução total do rotor.

Para o cálculo do rendimento da máquina assíncrona foi utilizada uma máquina de indução com o rotor em gaiola de esquilo com as caraterísticas que se encontram na Tabela 4.5, no qual lhe foi imposta um binário mecânico. O objetivo da simulação é conseguir atingir os níveis de potência

fornecidos pelo EPANET. Nesta fase da dissertação foram simulados valores de referência de modo a poder conhecer melhor o comportamento da máquina de indução.

Calculando a potência mecânica é também possível calcular a potência ativa gerada, o que possibilita o cálculo do rendimento da máquina. Na Figura 4.7 é possível observar o circuito utilizado para a extração das curvas de rendimento da máquina de indução.

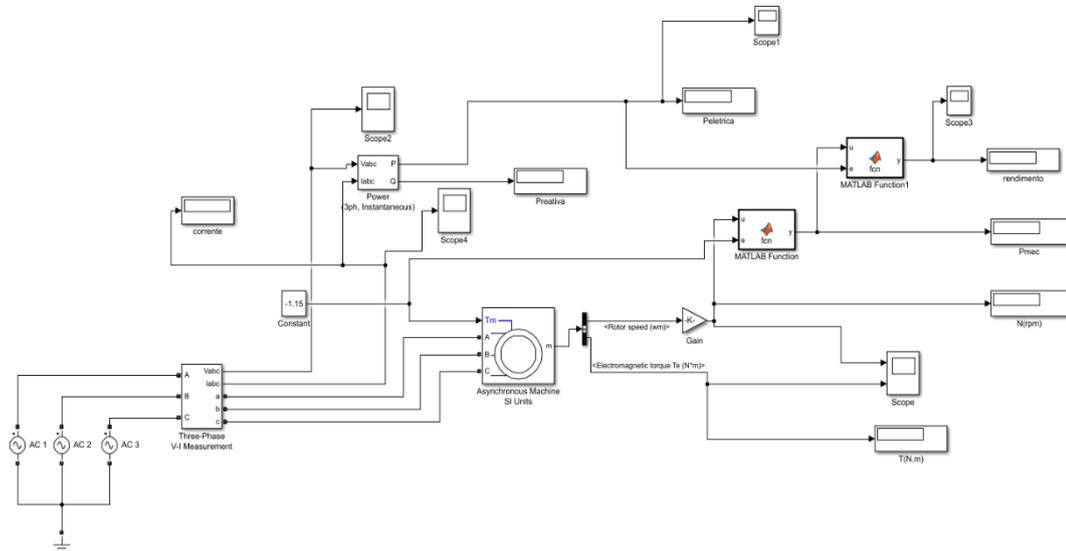


Figura 4.7 Circuito para extração das curvas de rendimento

Para que fosse possível extrair a potência mecânica entregue à máquina de indução utilizou-se a equação (4.1) que está implementada numa função MATLAB.

$$P_{mec} = \frac{2\pi NT}{60} \quad (4.1)$$

Ao simular o circuito concluiu-se que a máquina abaixo dos 15 Hz, não tinha níveis de eficiência aceitáveis, sendo, portanto esse o valor mínimo admissível a ser entregue à máquina. Os outros níveis de frequência simulados foram: 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz e 50 Hz. Sabendo que se está a controlar a máquina através do método V/f, foram testadas várias relações de modo a obter o melhor rendimento. O valor obtido da realização de várias simulações foi de $\frac{80\sqrt{2} V}{50 \text{ Hz}} = 2,27$.

Sabendo que a potência mecânica máxima gerada pela PAT nesta rede é de aproximadamente 200W, testou-se a máquina de indução em intervalos de 20W, até aos 60W, pois abaixo desta potência o rendimento da máquina era muito baixo, não sendo rentabilizável a utilização da PAT para gerar energia. Os valores obtidos para a potência mecânica de 200W podem ser observados na tabela abaixo (Tabela 4.6). Os valores obtidos para os outros níveis de potência encontram-se no Anexo I.

Tabela 4.6 Valores obtidos para $P_{mec} = 200W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-200,20	$80\sqrt{2}$	50	1500	-1,23	-147,10	73,47	1555,00
-200,50	$64\sqrt{2}$	40	1200	-1,51	-148,10	73,84	1268,00
-200,20	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,94	-140,10	69,97	985,60
-199,90	$32\sqrt{2}$	20	600	-2,70	-115,80	57,92	707,20
-199,90	$24\sqrt{2}$	15	450	-3,36	-91,72	45,89	568,00

Tendo extraído os valores de rendimento das tabelas, é possível construir um gráfico em que seja possível observar as curvas de rendimento e assim observar com maior facilidade quais os pontos de melhor eficiência do sistema. As curvas de rendimento encontram-se na figura abaixo (Figura 4.8).

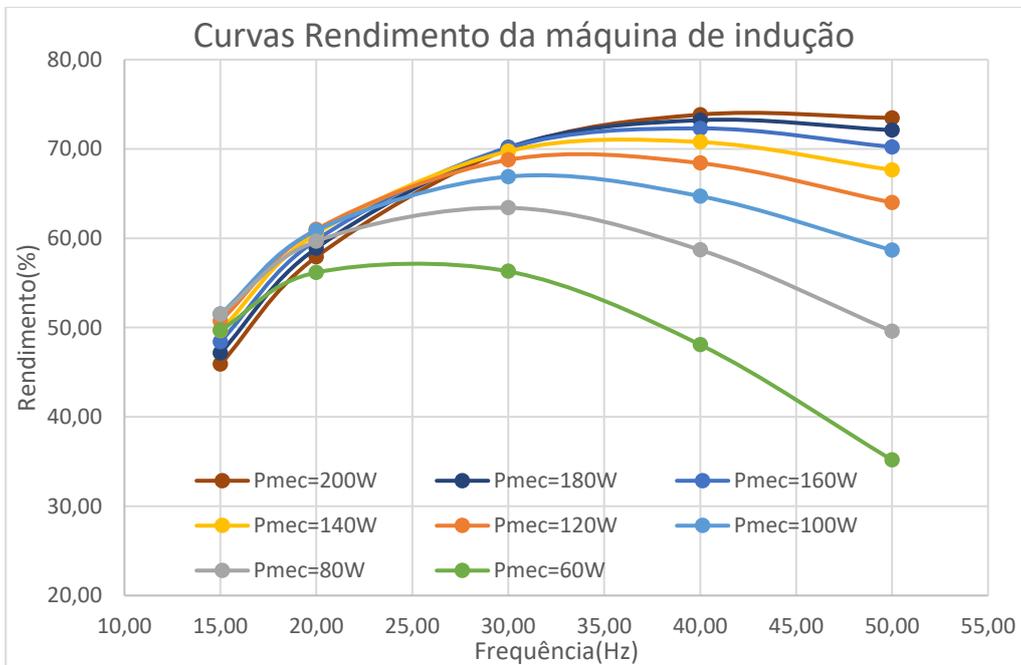


Figura 4.8 Curvas características da máquina de indução

A potência elétrica gerada pela máquina elétrica pode ser observada na Figura 4.9.

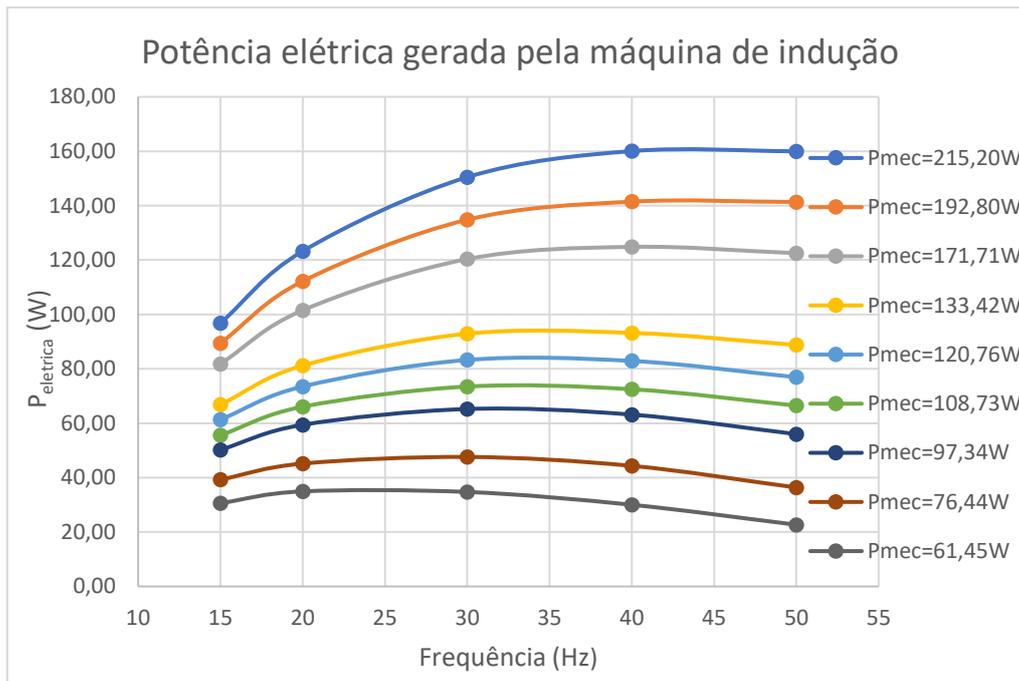


Figura 4.9 Gráfico da potência elétrica gerada pela máquina de indução

É possível observar que, de acordo com a potência mecânica entregue ao gerador, nem sempre a frequência mais alta é o ponto onde se consegue o maior rendimento do sistema, sendo este gráfico crucial para a escolha da velocidade a que a máquina deverá trabalhar.

Através da observação Figura 4.9 é possível concluir que quanto maior a potência mecânica, mais rápido tem de girar a máquina de indução, de modo a obter uma maior eficiência do sistema. Quanto menor a potência entregue à máquina, menor tem de ser a velocidade.

4.4. Simulação com o EPANET

De modo a poder simular o circuito hidráulico instalado no DEE, recorreu-se ao uso do EPANET. Para a caracterização da PAT foi introduzida a curva característica da bomba centrífuga para a velocidade de 1020 rpm (Anexo II) e (Figura 4.10). A curva característica da bomba instalada encontra-se na Figura 4.10 e no Anexo VIII.

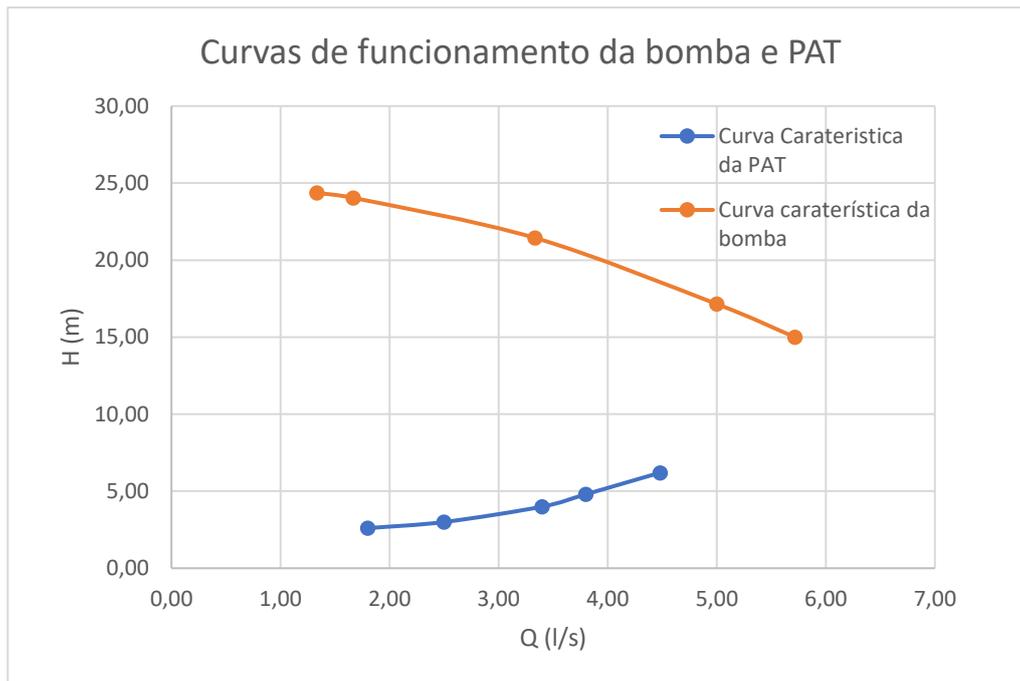


Figura 4.10 Curvas da bomba e PAT instaladas

Visto que as curvas características da PAT não são fornecidas pelo construtor, caso seja necessário a simulação de outras velocidades de rotação, ou não possam ser extraídas experimentalmente é necessário recorrer às leis de afinidade das turbomáquinas (equações (4.2);(4.3);(4.4)) [34]. O índice 1 refere-se aos valores iniciais, tanto de velocidade, caudal e pressão e o índice 2 refere-se aos valores obtidos através das leis da afinidade.

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (4.2)$$

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (4.3)$$

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (4.4)$$

O cálculo do rendimento associado a cada velocidade de rotação é dado pela seguinte regra:

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,1} \quad (4.5)$$

Na Figura 4.11 encontra-se a rede implementada no software EPANET onde se pode observar a PAT entre os nós 9 e 10. Para a caracterização da PAT e da bomba foram inseridas as curvas de funcionamento acima demonstradas.

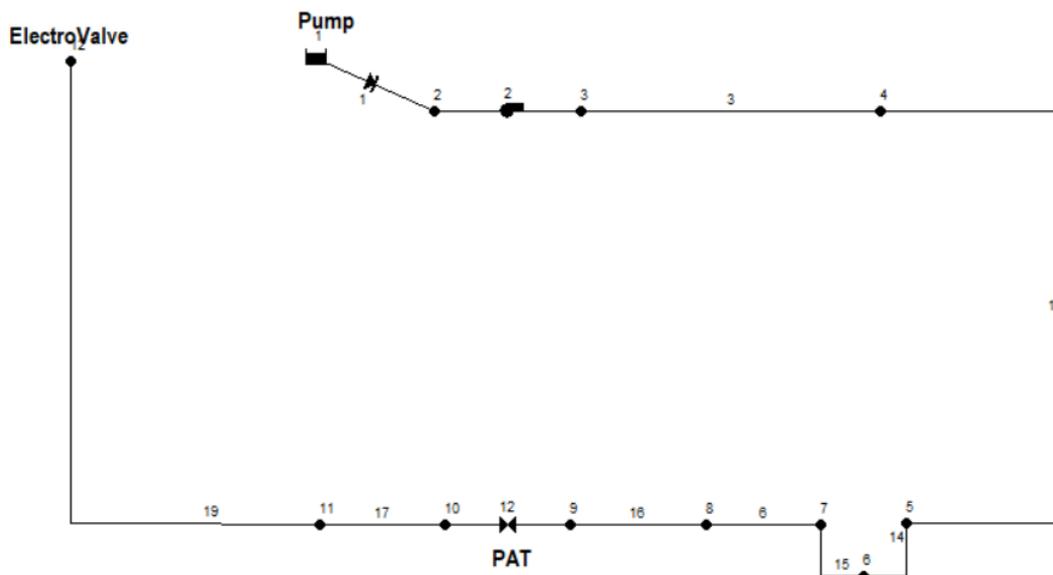


Figura 4.11 Rede implementada no EPANET

Após a simulação da rede através do EPANET foi possível obter diversos valores. Este faz uma simulação de 24h, em que de 10 em 10 min são apresentados valores tais como a pressão e o caudal. Neste caso foram extraídos os valores de diferença de pressão causada pela PAT e o caudal disponível na rede. Na figura que se segue (Figura 4.12) é apresentado um exemplo em que é possível observar o caudal da água que está a circular na rede e o nível de pressão em cada nó da mesma.

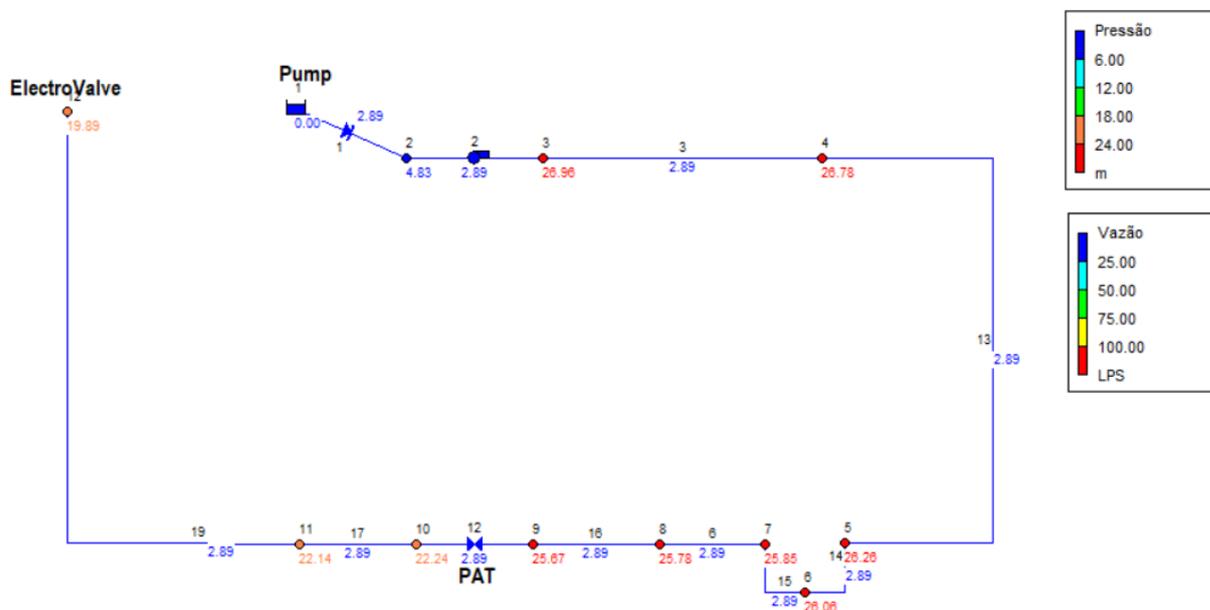


Figura 4.12 Exemplo de simulação no software EPANET

De modo a poder calcular a potência mecânica gerada pela PAT, foi utilizada uma rotina *Matlab* (Anexo X). Através desta rotina foi possível obter os valores de caudal, diferença de pressão e a potência mecânica gerada pela PAT numa tabela. Com o intuito de não repetir valores de potência

mecânica foram retiradas as variações de potência mecânica ao longo das 24h do dia. Na Tabela 4.7 é possível observar os valores de caudal, diferença de pressão causada pela PAT e a potência mecânica gerada pela PAT.

Tabela 4.7 Valores obtidos no EPANET

Hora	ΔH (m)	P_{mec} (W)	Q (l/s)
00:00	3,43	97,34	2,89
01:50	3,00	76,45	2,55
02:50	2,83	61,45	2,21
04:50	3,06	76,44	2,55
05:50	3,43	97,34	2,89
07:50	4,68	171,71	3,74
09:50	5,37	215,19	4,08
11:50	5,03	192,80	3,91
13:50	3,81	120,76	3,23
15:50	4,68	171,71	3,74
17:50	4,00	133,42	3,40
19:50	3,62	108,73	3,06
21:50	3,43	97,34	2,89

Após o cálculo dos valores de potência entregues à máquina elétrica procedeu-se ao cálculo do seu rendimento para estes valores. Como tal, foi necessário voltar a utilizar o circuito representado na Figura 4.7, no qual a máquina elétrica está ligada diretamente a três fontes sinusoidais. Na tabela abaixo (Tabela 4.8) podem ser observados os valores resultantes da simulação para um valor de potência mecânica de 215,20W. Os outros níveis de potência encontram-se no Anexo II.

Tabela 4.8 Valores obtidos para $P_{mec} = 215,20W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-215,48	$80\sqrt{2}$	50	1500	-1,32	-160,00	74,26	1559,00
-215,98	$64\sqrt{2}$	40	1200	-1,62	-160,07	74,11	1273,00
-215,90	$48\sqrt{2}$	30	900	-2,08	-150,49	69,70	991,20
-215,82	$32\sqrt{2}$	20	600	-2,89	-123,27	57,12	713,10
-215,68	$24\sqrt{2}$	15	450	-3,59	-96,82	44,89	573,70

Feitas as simulações para os outros níveis de potência pode-se obter um gráfico que demonstre a potência que a máquina de indução gera (Figura 4.13).

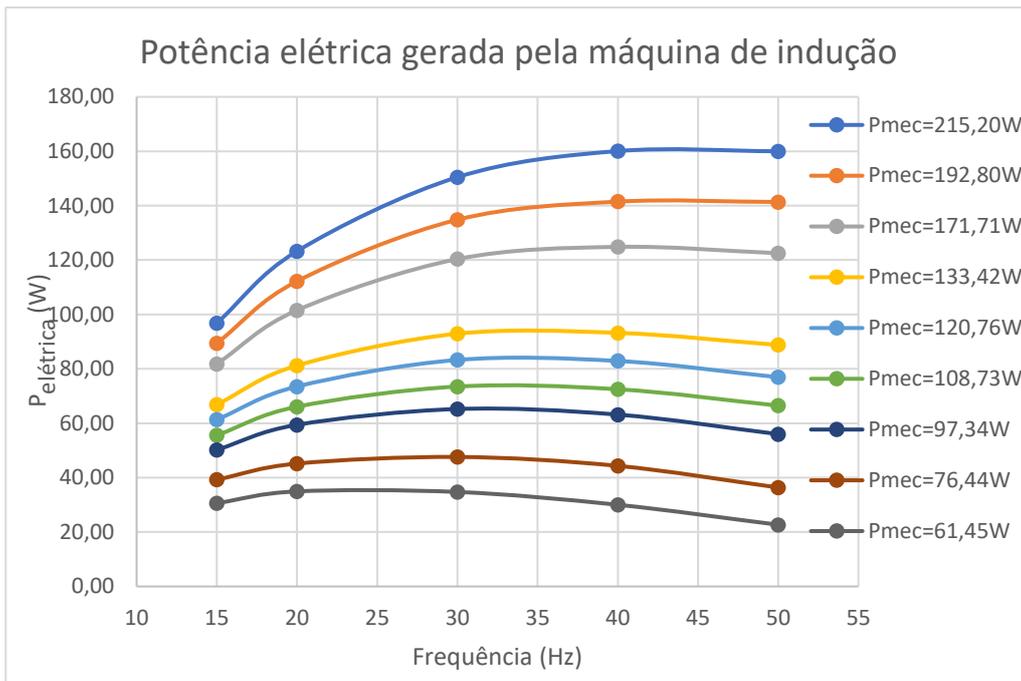


Figura 4.13 Potência elétrica gerada pela máquina de indução

É igualmente possível a obtenção de um gráfico onde se podem observar as curvas de rendimento da máquina elétrica (Figura 4.14).

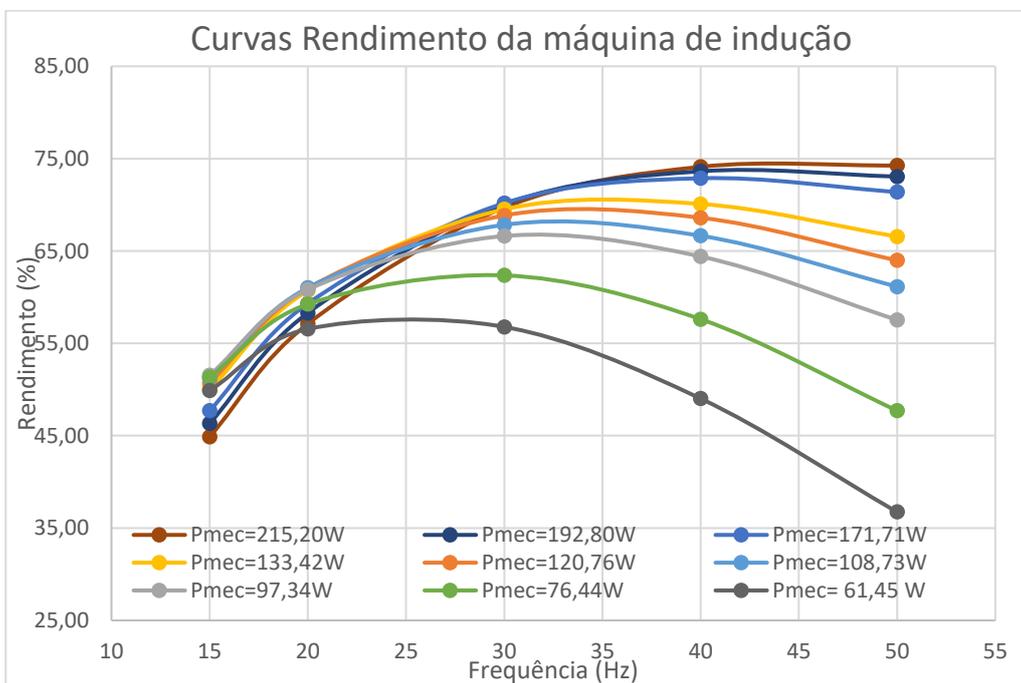


Figura 4.14 Curvas de rendimento da máquina de indução

Após a observação dos gráficos inerentes ao rendimento da máquina elétrica é possível observar que, consoante o nível de potência entregue à máquina elétrica, a velocidade de rotação da máquina deve variar de modo a maximizar a eficiência do sistema.

Com a utilização do variador de frequência é possível alterar a frequência da máquina, conseguindo assim maximizar o rendimento do sistema. Na tabela abaixo (Tabela 4.9) é possível observar para cada nível de potência a frequência mais adequada a ser aplicada ao gerador.

Tabela 4.9 Frequência ótima para cada nível de potência

P_{mec} (W)	f (Hz)	Rendimento (%)
215,20	50	74,26
192,80	40	73,63
171,71	40	72,87
133,42	40	70,09
120,76	30	68,85
108,73	30	67,84
97,34	30	66,62
76,44	30	62,36
61,45	30	56,78

Através destas simulações é possível concluir que para maximizar a eficiência do sistema é necessária a utilização de um variador de frequência de modo a que a PAT trabalhe sempre no seu ponto de maior eficiência. No capítulo seguinte serão simulados os valores de referência e os provenientes do EPANET, em que já existe a interligação da máquina de indução à rede elétrica por via do conversor.

ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo foram analisadas as potências elétricas entregues à rede com a utilização do conversor de modo a poder determinar quais as perdas associadas à utilização deste bem como a sua viabilidade.

5.1. Simulação dos Valores Extraídos do *Simulink* com Conversor

Tendo em conta que para a ligação à rede elétrica é necessário incorporar o conversor eletrónico de potência dimensionado no capítulo 3, é importante simular os valores de potência mecânica que foram utilizados no capítulo anterior. Deste modo, é possível perceber quais as perdas associadas ao uso do inversor, para que possa ser calculado o rendimento total do sistema. Para tal simulou-se o conversor eletrónico de potência para cada potência mecânica de referência (Tabela 5.1, Anexo III)

Tabela 5.1 Rendimento dos valores simulados com o conversor ligado à rede

P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mec} (W)	P_{ele} (W)	P_{rea} (W)	Rendimento (%)
200,00	50	-200,30	-137,40	5,94	68,60
	40	-200,50	-134,90	5,80	67,28
	30	-200,23	-121,70	5,29	60,78
	20	-199,96	-90,22	3,80	45,12
	15	-199,86	-62,49	2,64	31,27

Através da Tabela 5.1 e do Anexo III é possível perceber que para potências mecânicas superiores ou iguais a 180W a frequência que melhor se adequa ao sistema é a de 50Hz. Entre 100W e 180W a frequência que obtém a melhor eficiência é a de 40 Hz. Para potências inferiores a 100W (inclusive) a frequência que obtém um maior rendimento é a de 30Hz. Após uma análise a estes resultados é possível constatar que a utilização de um variador de frequência é necessário, uma vez que através da alteração da velocidade da máquina de indução é possível otimizar a eficiência do sistema.

Comparando o rendimento obtido nas simulações em que só foi calculado o rendimento da máquina elétrica, com os valores obtidos na simulação com o conversor ligado à rede elétrica é possível observar as perdas que estão inerentes ao uso do conversor (Tabela 5.2) e (Anexo V).

Tabela 5.2 Comparação dos valores obtidos com e sem conversor

$P_{mec}(W)$	$f (Hz)$	$P_{elet \text{ sem conversor}} (W)$	$P_{elet \text{ com conversor}} (W)$	Perdas potência(W)
200	50	147,10	137,40	9,70
	40	148,10	134,90	13,20
	30	140,10	121,70	18,40
	20	115,80	90,22	25,58
	15	91,72	62,49	29,23

Através da análise à Tabela 5.2 e às tabelas no Anexo V, é possível perceber que quanto menor a velocidade de rotação da máquina elétrica, maior serão as perdas associadas ao uso do conversor eletrônico de potência. Este facto não impossibilita que as frequências mais baixas não sejam utilizadas, pois para potências mecânicas abaixo dos 100W a frequência que rentabiliza melhor o sistema é de 30 Hz.

É possível observar de uma forma mais visual, os níveis de potência entregues à rede com o conversor eletrônico de potência instalado (Figura 5.3).

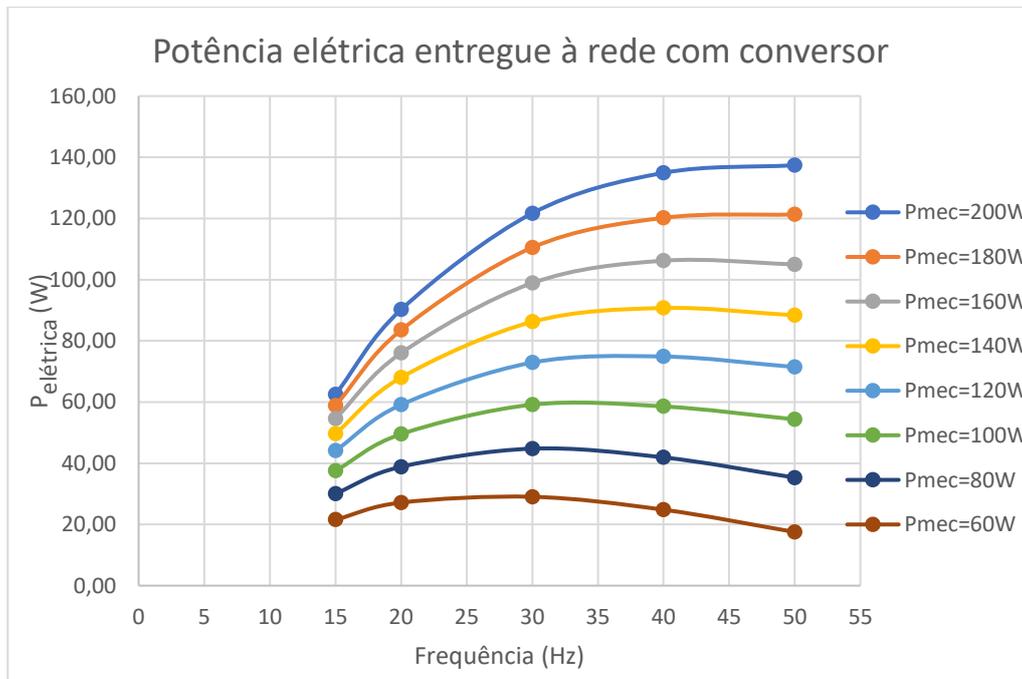


Figura 5.1 Potência elétrica entregue à rede

É possível observar que nem sempre a frequência mais alta, acaba por produzir uma maior potência. Mais uma vez é possível concluir que um variador de frequência é o conversor ideal para aumentar a eficiência do sistema. É também possível concluir esta informação ao observar a figura abaixo (Figura 5.2).

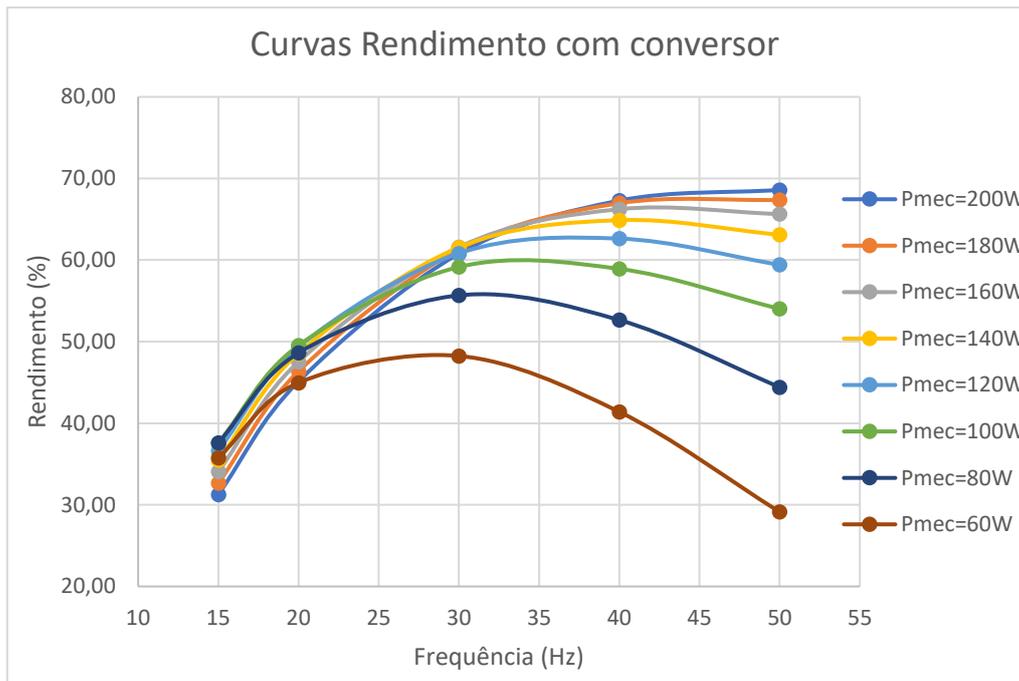


Figura 5.2 Curvas de rendimento do sistema com conversor eletrônico de potência

5.2.Simulações com Valores Obtidos no EPANET com Conversor

Para obter valores mais próximos da realidade aliou-se a simulação do EPANET com o circuito desenvolvido no *Simulink*. Para tal foi simulada a rede que está instalada no DEE (Tabela 4.7). Para que seja feita a comunicação dos programas é utilizado uma rotina *Matlab* que calcula a potência mecânica entregue à máquina elétrica. Obtidos esses valores, introduzem-se no *Simulink*, conseguindo assim calcular a potência entregue à rede. Para tal foram simuladas as potências mecânicas obtidas pelo EPANET, variando então a velocidade da máquina com o objetivo de poder concluir sobre a eficiência da utilização do conversor. Os valores obtidos para a potência de 215,20W encontram-se na tabela abaixo (Tabela 5.3). Os restantes valores de potência encontram-se no Anexo IV.

Tabela 5.3 Rendimento do sistema com o conversor ligado à rede

P_{mec} (W)	f (Hz)	$P_{mecânica}$ (W)	$P_{elétrica}$ (W)	$P_{reativa}$ (W)	Rendimento (%)
215,20	50	-215,50	-149,20	6,47	69,23
	40	-215,96	-145,40	6,34	67,33
	30	-215,90	-130,10	5,60	60,26
	20	-215,81	-95,17	4,08	44,10
	15	-215,68	-65,08	2,74	30,17

Como concluído anteriormente, quanto maior a potência mecânica entregue ao gerador, maior deve ser a frequência entregue ao estator.

As perdas associadas ao uso do conversor eletrônico de potência podem ser observadas na tabela abaixo e no Anexo VI.

Tabela 5.4 Cálculo das perdas associadas ao uso do conversor

$P_{mec}(W)$	$f (Hz)$	Pelet sem conversor (W)	Pelet com conversor (W)	Perdas potência(W)
215,20	50	160,00	149,20	10,80
	40	160,07	145,40	14,67
	30	150,49	130,10	20,39
	20	123,27	95,17	28,10
	15	96,82	65,08	31,74

A potência gerada pela máquina elétrica e a que realmente é entregue à rede elétrica foram novamente comparadas. Foi possível concluir mais uma vez que quanto menor for a velocidade da máquina elétrica maior serão as perdas associadas ao uso do conversor. Mesmo que as perdas para frequências inferiores sejam maiores que nas mais altas, não ocorre o impedimento do uso das frequências mais baixas. Esta ocorrência deve-se ao facto da potência elétrica mesmo assim continuar a ser superior nas frequências mais baixas. Normalmente estes acontecimentos ocorrem em potências abaixo dos 120W. É então possível detalhar a potência que é entregue à rede elétrica (Figura 5.3).

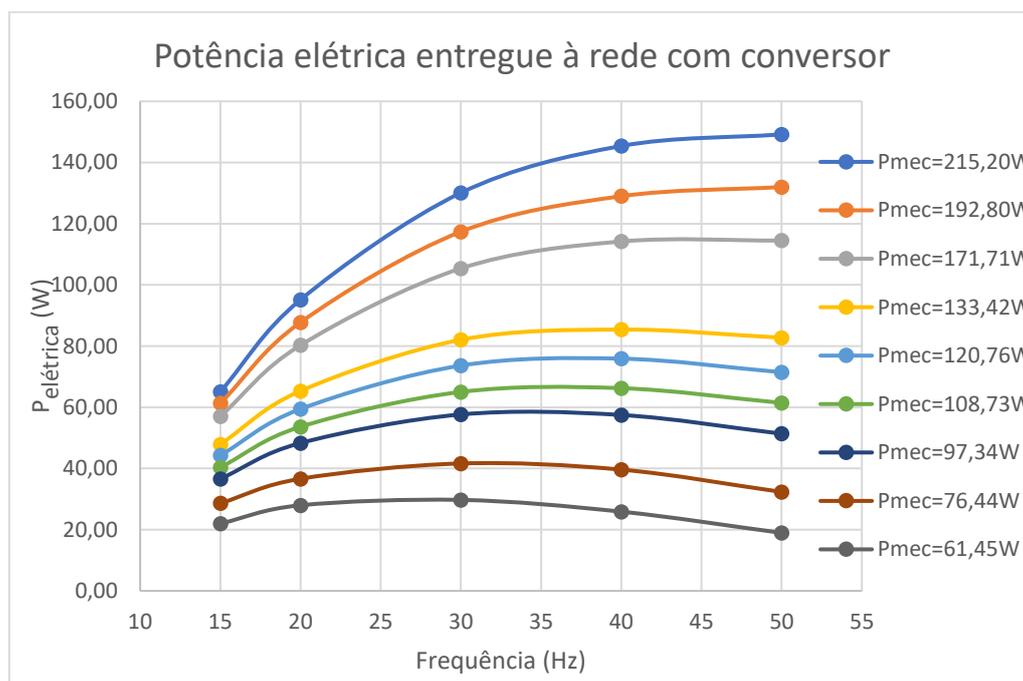


Figura 5.3 Gráfico da potência elétrica entregue à rede com conversor eletrônico de potência

As curvas de rendimento de todo o sistema são apresentadas na Figura 5.4.

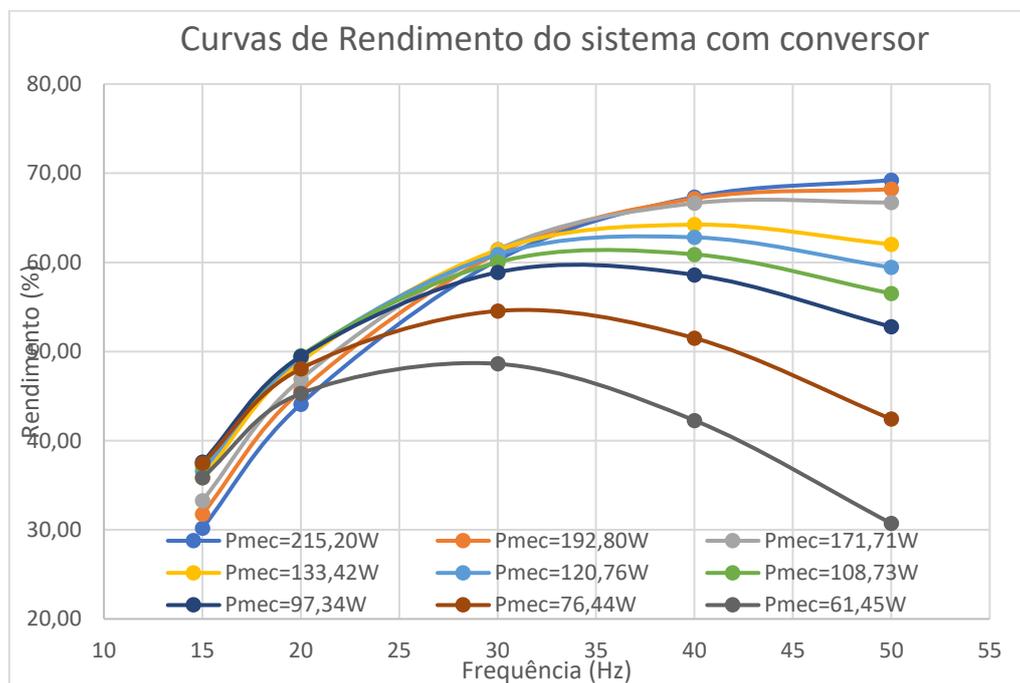


Figura 5.4 Curvas de rendimento do sistema com conversor eletrônico de potência

Após a análise das curvas de rendimento do sistema é possível concluir novamente, que a variação da velocidade de rotação da máquina elétrica e da consequente alteração da velocidade da PAT acaba por ser benéfica. Visto que o ponto fundamental de um sistema de recuperação de energia é a sua eficiência, o circuito eletrônico desenvolvido consegue atingir esse objetivo. Tal é possível observar pois numa gama de aproximadamente 120W, a alteração da frequência entregue ao estator é alterada por três vezes. Com estas alterações consegue-se maximizar a eficiência do sistema. As frequências ótimas a ser entregues ao estator da máquina estão detalhadas na tabela abaixo (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 Frequência ótima de funcionamento do sistema com conversor

P _{mec} (W)	f (Hz)	Rendimento (%)
215,20	50	69,23
192,80	50	68,21
171,71	50	66,72
133,42	40	64,23
120,76	40	62,81
108,73	40	60,89
97,34	30	58,59
76,44	30	54,55
61,45	30	48,62

Ao analisar a Tabela 5.5 é também possível concluir que o sistema consegue, à exceção de potências mecânicas na ordem dos 60 W, rendimentos superiores a 50%. Visto que o rendimento máximo da máquina de indução como motor é na ordem dos 75%, pode-se concluir que rendimentos acima dos 50% são valores bastantes aceitáveis. De realçar que as frequências de 20 Hz e 15 Hz nunca são utilizadas para maximizar o rendimento da máquina.

5.3. Comportamento do Conversor face à Variação da Potência Mecânica

Com o objetivo de demonstrar que o circuito implementado consegue alterar a velocidade de rotação da máquina de indução num estado dinâmico, foram realizados testes com o intuito de variar a velocidade da máquina segundo certa potência mecânica. Foram realizadas duas simulações, uma em que foi feita uma alteração da potência mecânica entregue ao gerador e outra em que foi alterada duas vezes a potência mecânica entregue ao gerador.

Na Figura 5.5 é apresentada a resposta da máquina de indução à variação da frequência e da tensão entregues ao estator. Os valores de potência mecânica entregues ao gerador foram de 215,20 W e de 192,80W. Com o intuito de recuperar o máximo de energia possível as frequências ideais a ser entregues à máquina são de 50 Hz e 30 Hz respetivamente. As velocidades respetivas a esse nível de potência são exatamente 1559 rpm e 954,60 rpm, velocidades que conseguiram ser obtidas na íntegra pelo conversor.

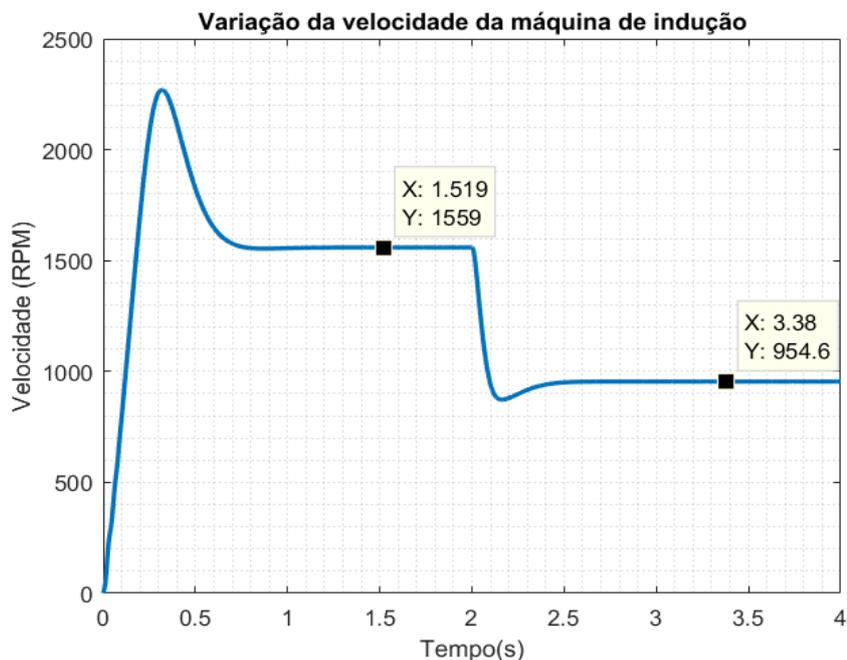


Figura 5.5 Resposta da máquina elétrica a uma variação da velocidade

Na Figura 5.6 é apresentada a resposta da máquina de indução a duas variações da frequência e da tensão entregues ao estator. Os valores de potência mecânica entregues ao gerador foram de 215,20W, de 61,45W e de 133,42W. Com o intuito de recuperar o máximo de energia possível as frequências ideais a ser entregues à máquina são de 50 Hz, 30 Hz e 40 Hz respetivamente. As

velocidades respetivas a esse nível de potência são exatamente 1559 rpm, 927,5 rpm e 1245 rpm, velocidades que conseguiram ser obtidas na íntegra pelo conversor.

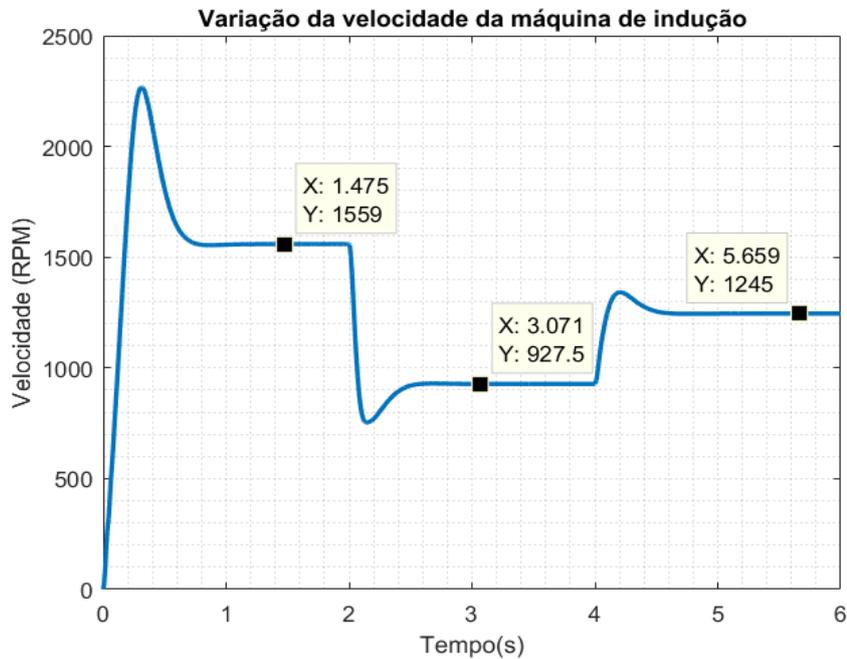


Figura 5.6 Resposta da máquina de indução a duas alterações de velocidade

Através da análise destas duas figuras, é possível demonstrar que é possível implementar um conversor CA-CA para sistemas de distribuição de água. Os resultados apresentados são promissores para uma eventual implementação na vida real. Através das simulações o conversor conseguiu dar uma boa resposta às potências mecânicas que eram entregues à máquina de indução. Para que o sistema funcione de forma autónoma é necessário a utilização deste conversor aliado a um microcontrolador para que não seja necessário a interação humana para a alteração das constantes que são entregues aos controladores.

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Através desta dissertação é possível concluir que a utilização de um conversor a interligar a máquina de indução à rede maximiza a eficiência do sistema. Nesta dissertação começou-se por implementar um conversor eletrónico de potência, tal como a implementação das suas unidades de controlo, de modo a poder controlar a velocidade da máquina de indução. Foi implementada a técnica de controlo de velocidade mais simples da máquina elétrica, o controlo escalar V/f que permite alterar a velocidade da máquina elétrica sem alterar o seu fluxo.

Para concluir sobre a funcionalidade do sistema, foi necessário recorrer a várias simulações de modo a poder observar se os níveis de potência entregues à rede elétrica viabilizavam o sistema. Para tal foi simulado o circuito hidráulico que se encontra no DEE, em que foram extraídas as potências mecânicas geradas pela PAT. Essas potências foram entregues à máquina de indução em que para cada potência foram utilizadas várias frequências, com o objetivo de utilizar a que maximizasse o rendimento do sistema. Os valores obtidos de rendimento para cada frequência ótima foram bastantes promissores, obtendo valores acima dos 50%. O conversor implementado demonstrou que tem capacidade para reagir às variações de potência conseguindo impor a velocidade de rotação que maximiza a eficiência do sistema.

Conclui-se com este projeto que é possível instalar uma PAT num sistema de distribuição de água aliado a um variador de frequência. Além da utilização do variador de frequência aumentar a eficiência do sistema, ainda é possível maximizá-la. Para tal é necessário aliar a regulação elétrica à regulação hidráulica.

- **Trabalho Futuro**

De modo a poder melhorar a eficiência do sistema é possível aliar à regulação elétrica a regulação hidráulica, pois ao utilizar estes dois tipos de regulação pode-se manobrar com mais facilidade os pontos de funcionamento da PAT, conseguindo assim melhores resultados a nível de eficiência. Uma das desvantagens em utilizar somente a regulação elétrica é não conseguir atingir todos os pontos de operação da PAT, ficando eles fora da região de regulação impossibilitando assim a maximização total do sistema.

Para que a eficiência do sistema aumente, podem ser utilizadas duas válvulas, uma válvula em série e uma válvula bypass. A válvula em série é utilizada quando a pressão a dissipar é maior que a diferença de pressão causada pela PAT, enquanto a válvula bypass é aberta quando o caudal

é demasiado elevado levando a que o controlo da pressão seja mais difícil. Portanto uma abordagem futura ao sistema é a junção da regulação elétrica à regulação hidráulica conseguindo assim atingir pontos de funcionamento que a regulação elétrica não atinge.

Tendo já simulado o sistema num ambiente de simulação é necessário testar este circuito para o caso de estudo real. Para que tal aconteça, terá de ser implementado o conversor e para o seu respetivo controlo deve ser utilizado um microcontrolador, de modo a que o conversor eletrónico de potência funcione automaticamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Barde, “Pump as a Turbine in Microhydropower,” vol. 4, no. 1, pp. 27–30, 2016.
- [2] B. H. Teuteberg, “Design of a Pump-As-Turbine Microhydro System for an Abalone Farm,” Stellenbosch University, 2010.
- [3] M. de C. M. Simão, “Hidrodinâmica e desempenho em turbinas de baixa potência : concepção , modelação e ensaios”. Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, 2009.
- [4] T. Agarwal, “Review of pump as turbine (PAT) for micro-hydropower,” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 2, no. 11, pp. 163–169, 2012.
- [5] A. Williams, *Pumps As Turbines A user’s guide*. Intermediate Technology Publications, 1995.
- [6] F. G. Chapallaz JM, Eichenberg P, *Manual on Pumps Used as Turbines*, vol. 11, no. ISBN 3-528-02069-5. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, 1992.
- [7] A. S. Aidhen, “Pump As Turbine With Induction Generators In Pico Hydro For Electrification of High Terrain Areas: A Review,” *Int. J. Curr. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 5, pp. 1543–1548, 2016.
- [8] P. N. Garay, “Using Pumps as Hydroturbines,” 1990, pp. 52–61.
- [9] GRUNDFOS, “Princípios Básicos e Tipos de Bombas.” [Online]. Available: <https://pt.grundfos.com/>.
- [10] R. B. Fernandes, “Viabilidade de conjunto motor de indução e bomba centrífuga operando como turbina e gerador para pequenos aproveitamentos de potencial hídrico”. Pós Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Lavras, 2006.
- [11] M. Venturini, S. Alvisi, S. Simani, and L. Manservigi, “Energy Production by Means of Pumps As Turbines in Water Distribution Networks,” 2017.
- [12] V. A. Patel, S. V Jain, K. H. Motwani, and R. N. Patel, “Numerical optimization of guide vanes and reducer in pump running in turbine mode,” in *Procedia Engineering*, 2013, vol. 51, pp. 797–802.
- [13] A. A. Williams, “Pumps as turbines for low cost micro hydro power,” *Renew. Energy*, vol. 9, no. 1–4, pp. 1227–1234, Sep. 1996.
- [14] A. J. Stepanoff, *Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, Design, and Application*, 2nd ed. 1957.
- [15] S. Parra, S. Krause, F. Krönlein, F. W. Günthert, and T. Klunke, “Intelligent pressure management by pumps as turbines in water distribution systems: results of experimentation,” *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 6, no. 1, p. ws2017154, 2017.
- [16] J. P. E. Monteiro, “Análise da solução mais económica para o abastecimento de água ao reservatório de Alto Carenque”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [17] L. Araujo, H. Ramos, and S. Coelho, “Pressure Control for Leakage Minimisation in

- Water Distribution Systems Management,” *Water Resour. Manag.*, vol. 20, no. 1, pp. 133–149, 2006.
- [18] Y. Pannatier, B. Kawkabani, C. Nicolet, J.-J. Simond, A. Schwery, and P. Allenbach, “Investigation of Control Strategies for Variable-Speed Pump-Turbine Units by Using a Simplified Model of the Converters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 9, pp. 3039–3049, 2010.
- [19] M. A. Ismail, W. K. Muzammil, M. Rahman, M. W. K. Ibrahim, and S. Misran, “Experimental Design and Analysis of Pump as Turbine for Microhydro System,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 217, no. 1.
- [20] A. de C. Quintela, *Hidráulica*, 13^a. Fundação Calouste Gulbekian, 2014.
- [21] A. V. Braga, “Modelagem, ajuste e implementação de um sistema de controle de tensão para o gerador de indução,” Universidade Federal de Itajubá, 2002.
- [22] H. Ramos and A. Borga, “Pumps as turbines: an unconventional solution to energy production,” *Urban Water*, vol. 1, no. 3, pp. 261–263, 1999.
- [23] V. Bacon, L. Campanhol, and S. Silva, “Análise Comparativa das Técnicas SPWM e SVM Aplicadas a um Inversor de Tensão Trifásico,” vol. 10, pp. 5–14, 2011.
- [24] S. Mishra, Anupam and Panda, Sunil and B, “Control of Voltage Source Inverters using PWM/SVPWM for Adjustable Speed Drive Applications,” National Institute of Technology, Rourkela, 2009.
- [25] M. Barnes, *Practical variable speed drives and power electronics*. Perth, Australia, 2003.
- [26] B. Majhi, “Analysis of Single-Phase SPWM Inverter,” National Institute of Technology, Rourkela, 2012.
- [27] A. Lopes, “Controlo Avançado de Conversores para Sistemas FotoVoltaicos”. Tese de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [28] V. F. Pires and J. Silva, “Teaching Nonlinear Modeling, Simulation, and Control of Electronic Power Converters Using MATLAB/SIMULINK,” vol. 45, no. 3, pp. 253–261, 2002.
- [29] M. Tessema, “V/f control design and simulation for five-phase induction motor,” Addis Ababa University, 2015.
- [30] O. Fecarotta, H. M. Ramos, S. Derakhshan, G. Del Giudice, and A. Carravetta, “Fine Tuning a PAT Hydropower Plant in a Water Supply Network to Improve System Effectiveness,” vol. 144, no. 8, pp. 1–12, 2018.
- [31] A. Sebastião, “A platform for assessment of energy recovery technologies by pressure reduction in water distribution networks”. Tese de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. FCT-UNL, 2017.
- [32] D. Lousa, “Estudo do Comportamento Dinâmico de um Reservatório Hidropneumático”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. FCT-UNL, 2011.
- [33] F. G. Aarskog, “Monitoring of load torque variations by using an Electrical Drive with Direct Torque Control,” Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [34] L. Gevorkov and V. Vodovozov, “Study of the Centrifugal Pump Efficiency at Throttling and Speed Control,” pp. 199–202, 2016.

VALORES OBTIDOS PARA CÁLCULO DO RENDIMENTO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO COM OS VALORES DE REFERÊNCIA

Tabela I.1 Valores obtidos para $P_{mec} = 180W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-180,00	$80\sqrt{2}$	50	1500	-1,11	-129,80	72,10	1549,00
-179,60	$64\sqrt{2}$	40	1200	-1,36	-131,50	73,22	1261,00
-180,30	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,76	-126,50	70,16	978,20
-180,20	$32\sqrt{2}$	20	600	-2,46	-106,10	58,89	699,40
-180,20	$24\sqrt{2}$	15	450	-3,07	-84,97	47,15	560,60

Tabela I.2 Valores obtidos para $P_{mec} = 160W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-159,90	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,99	-112,30	70,22	1543,00
-160,30	$64\sqrt{2}$	40	1200	-1,22	-115,90	72,30	1255,00
-160,60	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,58	-112,60	70,13	970,70
-159,90	$32\sqrt{2}$	20	600	-2,21	-95,64	59,80	691,00
-160,30	$24\sqrt{2}$	15	450	-2,77	-77,61	48,42	552,60

Tabela I.3 Valores obtidos para $P_{mec} = 140W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-140,00	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,87	-94,70	67,64	1537,00
-139,80	$64\sqrt{2}$	40	1200	-1,07	-98,94	70,77	1248,00
-140,10	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,39	-97,71	69,74	962,50
-140,10	$32\sqrt{2}$	20	600	-1,96	-84,78	60,53	682,30
-140,10	$24\sqrt{2}$	15	450	-2,46	-69,57	49,66	543,80

Tabela I.4 Valores obtidos para $P_{mec} = 120W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-120,20	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,75	-76,93	63,99	1531,00
-119,50	$64\sqrt{2}$	40	1200	-0,92	-81,76	68,41	1241,00
-119,90	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,20	-82,47	68,78	954,10
-119,80	$32\sqrt{2}$	20	600	-1,70	-73,05	60,98	672,90
-120,40	$24\sqrt{2}$	15	450	-2,15	-61,06	50,73	534,60

Tabela I.5 Valores obtidos para $P_{mec} = 100W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-100,60	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,63	-59,01	58,66	1525,00
-99,44	$64\sqrt{2}$	40	1200	-0,77	-64,35	64,71	1233,00
-100,00	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,01	-66,90	66,90	945,50
-99,98	$32\sqrt{2}$	20	600	-1,44	-60,86	60,88	663,00
-99,90	$24\sqrt{2}$	15	450	-1,82	-51,45	51,50	524,20

Tabela I.6 Valores obtidos para $P_{mec} = 80W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-79,49	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,50	-39,41	49,58	1518,00
-79,58	$64\sqrt{2}$	40	1200	-0,62	-46,71	58,69	1226,00
-80,43	$48\sqrt{2}$	30	900	-0,82	-51,00	63,41	936,70
-79,91	$32\sqrt{2}$	20	600	-1,17	-47,68	59,67	652,20
-80,04	$24\sqrt{2}$	15	450	-1,49	-41,21	51,49	512,90

Tabela I.7 Valores obtidos para $P_{mec} = 60W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-60,16	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,38	-21,16	35,17	1512,00
-59,95	$64\sqrt{2}$	40	1200	-0,47	-28,82	48,08	1218,00
-60,19	$48\sqrt{2}$	30	900	-0,62	-33,88	56,29	927,00
-60,39	$32\sqrt{2}$	20	600	-0,90	-33,92	56,16	640,70
-60,27	$24\sqrt{2}$	15	450	-1,15	-29,95	49,70	500,40



**VALORES OBTIDOS PARA CÁLCULO DO RENDIMENTO DA
MÁQUINA DE INDUÇÃO COM VALORES PROVENIENTES DO
EPANET**

Tabela II.1 Valores obtidos para $P_{mec} = 192,80W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-193,48	$80\sqrt{2}$	50	1500	-1,19	-141,35	73,06	1553,00
-192,14	$64\sqrt{2}$	40	1200	-1,45	-141,48	73,63	1265,00
-192,45	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,87	-134,84	70,06	982,70
-192,50	$32\sqrt{2}$	20	600	-2,61	-112,22	58,30	704,30
-193,05	$24\sqrt{2}$	15	450	-3,26	-89,43	46,33	565,50

Tabela II.2 Valores obtidos para $P_{mec} = 171,71W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-171,64	$80\sqrt{2}$	50	1500	-1,06	-122,53	71,39	1546,00
-171,33	$64\sqrt{2}$	40	1200	-1,30	-124,85	72,87	1259,00
-171,51	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,68	-120,37	70,18	974,90
-171,22	$32\sqrt{2}$	20	600	-2,35	-101,55	59,31	695,80
-171,54	$24\sqrt{2}$	15	450	-2,94	-81,83	47,71	557,20

Tabela II.3 Valores obtidos para $P_{mec} = 133,42W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-133,41	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,83	-88,80	66,56	1535,00
-133,02	$64\sqrt{2}$	40	1200	-1,02	-93,23	70,09	1245,00
-133,69	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,33	-92,93	69,51	959,90
-133,77	$32\sqrt{2}$	20	600	-1,88	-81,22	60,72	679,50
-133,68	$24\sqrt{2}$	15	450	-2,36	-66,88	50,03	540,90

Tabela II.4 Valores obtidos para $P_{mec} = 120,76W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-120,24	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,75	-76,93	63,98	1531,00
-120,86	$64\sqrt{2}$	40	1200	-0,93	-82,91	68,60	1241,00
-120,96	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,21	-83,28	68,85	954,60
-120,56	$32\sqrt{2}$	20	600	-1,71	-73,51	60,98	673,30
-120,99	$24\sqrt{2}$	15	450	-2,16	-61,35	50,70	534,90

Tabela II.5 Valores obtidos para $P_{mec} = 108,73W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-108,76	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,68	-66,50	61,14	1527,00
-108,78	$64\sqrt{2}$	40	1200	-0,84	-72,50	66,65	1237,00
-108,34	$48\sqrt{2}$	30	900	-1,09	-73,50	67,84	949,20
-108,31	$32\sqrt{2}$	20	600	-1,55	-66,08	61,01	667,30
-108,51	$24\sqrt{2}$	15	450	-1,96	-55,60	51,24	528,70

Tabela II.6 Valores obtidos para $P_{mec} = 97,34W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-97,34	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,61	-56,01	57,54	1524,00
-98,10	$64\sqrt{2}$	40	1200	-0,76	-63,18	64,40	1233,00
-97,93	$48\sqrt{2}$	30	900	-0,99	-65,24	66,62	944,60
-97,72	$32\sqrt{2}$	20	600	-1,41	-59,43	60,81	661,80
-97,46	$24\sqrt{2}$	15	450	-1,78	-50,24	51,55	522,80

Tabela II.7 Valores obtidos para $P_{mec} = 76,44W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-76,26	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,48	-36,38	47,71	1517,00
-76,95	$64\sqrt{2}$	40	1200	-0,60	-44,33	57,61	1225,00
-76,35	$48\sqrt{2}$	30	900	-0,78	-47,61	62,36	934,80
-76,25	$32\sqrt{2}$	20	600	-1,12	-45,17	59,24	650,10
-76,49	$24\sqrt{2}$	15	450	-1,43	-39,28	51,35	510,80

Tabela II.8 Valores obtidos para $P_{mec} = 61,45W$

P_{mec} (W)	U_{pico} (V)	f (Hz)	N_s (RPM)	T (N.m)	P_{elet} (W)	Rendimento (%)	Velocidade Rotor (RPM)
-61,75	$80\sqrt{2}$	50	1500	-0,39	-22,69	36,74	1512,00
-61,25	$64\sqrt{2}$	40	1200	-0,48	-30,02	49,02	1219,00
-61,19	$48\sqrt{2}$	30	900	-0,63	-34,75	56,78	927,50
-61,81	$32\sqrt{2}$	20	600	-0,92	-34,96	56,55	641,60
-61,41	$24\sqrt{2}$	15	450	-1,17	-30,64	49,89	501,20

CÁLCULO DO RENDIMENTO DO SISTEMA COM OS VALORES DE REFERÊNCIA

Tabela III.1 Rendimento do sistema com conversor eletrônico de potência

P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
180,00	50	-180,05	-121,30	5,20	67,37
	40	-179,50	-120,20	5,20	66,96
	30	-180,29	-110,50	4,65	61,29
	20	-180,17	-83,52	3,50	46,36
	15	-180,23	-58,85	2,44	32,65
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
160,00	50	-159,97	-105,00	4,40	65,64
	40	-160,34	-106,20	4,52	66,23
	30	-160,61	-98,90	4,25	61,58
	20	-159,92	-76,02	3,18	47,54
	15	-160,30	-54,60	2,29	34,06
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
140,00	50	-140,03	-88,36	3,74	63,10
	40	-139,84	-90,74	3,84	64,89
	30	-140,10	-86,23	3,72	61,55
	20	-140,04	-68,02	2,87	48,57
	15	-140,09	-49,69	2,05	35,47
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
120,00	50	-120,24	-71,45	3,05	59,42
	40	-119,56	-74,88	3,18	62,63
	30	-119,90	-72,92	3,10	60,82
	20	-119,80	-59,12	2,45	49,35
	15	-120,36	-44,10	1,75	36,64
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
100,00	50	-100,61	-54,35	2,32	54,02
	40	-99,42	-58,58	2,51	58,92
	30	-100,00	-59,15	2,48	59,15
	20	-99,98	-49,52	-2,10	49,53
	15	-99,91	-37,54	1,55	37,57
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)

80,00	50	-79,48	-35,31	1,40	44,43
	40	-79,60	-41,91	1,82	52,65
	30	-80,43	-44,78	1,80	55,68
	20	-79,91	-38,85	1,59	48,62
	15	-80,03	-30,09	1,16	37,60
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
60,00	50	-60,17	-17,53	0,65	29,13
	40	-59,95	-24,82	0,99	41,40
	30	-60,19	-29,04	0,99	48,25
	20	-60,39	-27,15	1,08	44,96
	15	-60,26	-21,55	0,89	35,76

ANEXO
IV

CÁLCULO DO RENDIMENTO DO SISTEMA COM VALORES PROVENIENTES DO EPANET

Tabela IV.1 Rendimento do sistema com conversor eletrônico de potência com valores provenientes do EPANET

P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
192,80	50	-193,53	-132,00	5,69	68,21
	40	-192,08	-129,00	5,59	67,16
	30	-192,44	-117,40	5,03	61,01
	20	-192,50	-87,77	3,82	45,59
	15	-193,05	-61,30	2,58	31,75
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
171,71	50	-171,61	-114,50	4,86	66,72
	40	-171,40	-114,20	4,85	66,63
	30	-171,51	-105,40	4,56	61,45
	20	-171,23	-80,30	3,42	46,90
	15	-171,55	-57,07	2,38	33,27
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
133,42	50	-133,42	-82,75	3,54	62,02
	40	-132,98	-85,41	3,59	64,23
	30	-133,69	-82,08	3,54	61,40
	20	-133,78	-65,35	2,79	48,85
	15	-133,68	-47,91	1,94	35,84
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
120,76	50	-120,25	-71,46	3,04	59,43
	40	-120,86	-75,91	3,25	62,81
	30	-120,95	-73,65	3,12	60,89
	20	-120,57	-59,45	2,50	49,31
	15	-120,99	-44,28	1,76	36,60
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
108,73	50	-108,74	-61,45	2,61	56,51
	40	-108,81	-66,26	2,83	60,89
	30	-108,35	-65,03	2,75	60,02
	20	-108,31	-53,64	2,29	49,52
	15	-108,52	-40,38	1,76	37,21

P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
97,34	50	-97,35	-51,38	2,23	52,78
	40	-98,13	-57,50	2,40	58,60
	30	-97,93	-57,67	2,38	58,89
	20	-97,72	-48,33	2,02	49,46
	15	-97,45	-36,63	1,47	37,59
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
76,44	50	-76,25	-32,35	1,26	42,42
	40	-76,97	-39,64	1,58	51,50
	30	-76,36	-41,65	1,77	54,55
	20	-76,25	-36,65	1,40	48,07
	15	-76,49	-28,65	1,06	37,45
P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{mecânica} (W)	P_{elétrica} (W)	P_{reativa} (W)	Rendimento (%)
61,45	50	-61,75	-18,97	0,65	30,72
	40	-61,27	-25,90	1,09	42,27
	30	-61,19	-29,75	1,20	48,62
	20	-61,81	-27,99	1,10	45,28
	15	-61,41	-22,02	0,80	35,86



CÁLCULO DAS PERDAS ASSOCIADAS AO USO DO CONVERSOR ELETRÔNICO DE POTÊNCIA COM VALORES DE REFERÊNCIA

Tabela V.1 Perdas associadas ao uso do conversor

P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{elet sem conversor} (W)	P_{elet com conversor} (W)	Perdas potência(W)
180	50	129,80	121,30	8,50
	40	131,50	120,20	11,30
	30	126,50	110,50	16,00
	20	106,10	83,52	22,58
	15	84,97	58,85	26,12
160	50	112,30	105,00	7,30
	40	115,90	106,20	9,70
	30	112,60	98,90	13,70
	20	95,64	76,02	19,62
	15	77,61	54,60	23,01
140	50	94,70	88,36	6,34
	40	98,94	90,74	8,20
	30	97,71	86,23	11,48
	20	84,78	68,02	16,76
	15	69,57	49,69	19,88
120	50	76,93	71,45	5,48
	40	81,76	74,88	6,88
	30	82,47	72,92	9,55
	20	73,05	59,12	13,93
	15	61,06	44,10	16,96
100	50	59,01	54,35	4,66
	40	64,35	58,58	5,77
	30	66,90	59,15	7,75
	20	60,86	49,52	11,34
	15	51,45	37,54	13,91
80	50	39,41	35,31	4,10
	40	46,71	41,91	4,80

	30	51,00	44,78	6,22
	20	47,68	38,85	8,83
	15	41,21	30,09	11,12
60	50	21,16	17,53	3,63
	40	28,82	24,82	4,00
	30	33,88	29,04	4,84
	20	33,92	27,15	6,77
	15	29,95	21,55	8,40

CÁLCULO DAS PERDAS ASSOCIADAS AO USO DO CONVERSOR ELETRÓNICO DE POTÊNCIA COM VALORES PROVENIENTES DO EPANET

Tabela VI.1 Perdas associadas ao conversor com valores provenientes do EPANET

P_{mec} (W)	f (Hz)	P_{elet sem conversor} (W)	P_{elet com conversor} (W)	Perdas potência(W)
192,80	50	141,35	132,00	9,35
	40	141,48	129,00	12,48
	30	134,84	117,40	17,44
	20	112,22	87,77	24,45
	15	89,43	61,30	28,13
171,71	50	122,53	114,50	8,03
	40	124,85	114,20	10,65
	30	120,37	105,40	14,97
	20	101,55	80,30	21,25
	15	81,83	57,07	24,76
133,42	50	88,80	82,75	6,05
	40	93,23	85,41	7,82
	30	92,93	82,08	10,85
	20	81,22	65,35	15,87
	15	66,88	47,91	18,97
120,76	50	76,93	71,46	5,47
	40	82,91	75,91	7,00
	30	83,28	73,65	9,63
	20	73,51	59,45	14,06
	15	61,35	44,28	17,07
108,73	50	66,50	61,45	5,05
	40	72,50	66,26	6,24
	30	73,50	65,03	8,47
	20	66,08	53,64	12,44
	15	55,60	40,38	15,22
97,34	50	56,01	51,38	4,63
	40	63,18	57,50	5,68
	30	65,24	57,67	7,57
	20	59,43	48,33	11,10
	15	50,24	36,63	13,61

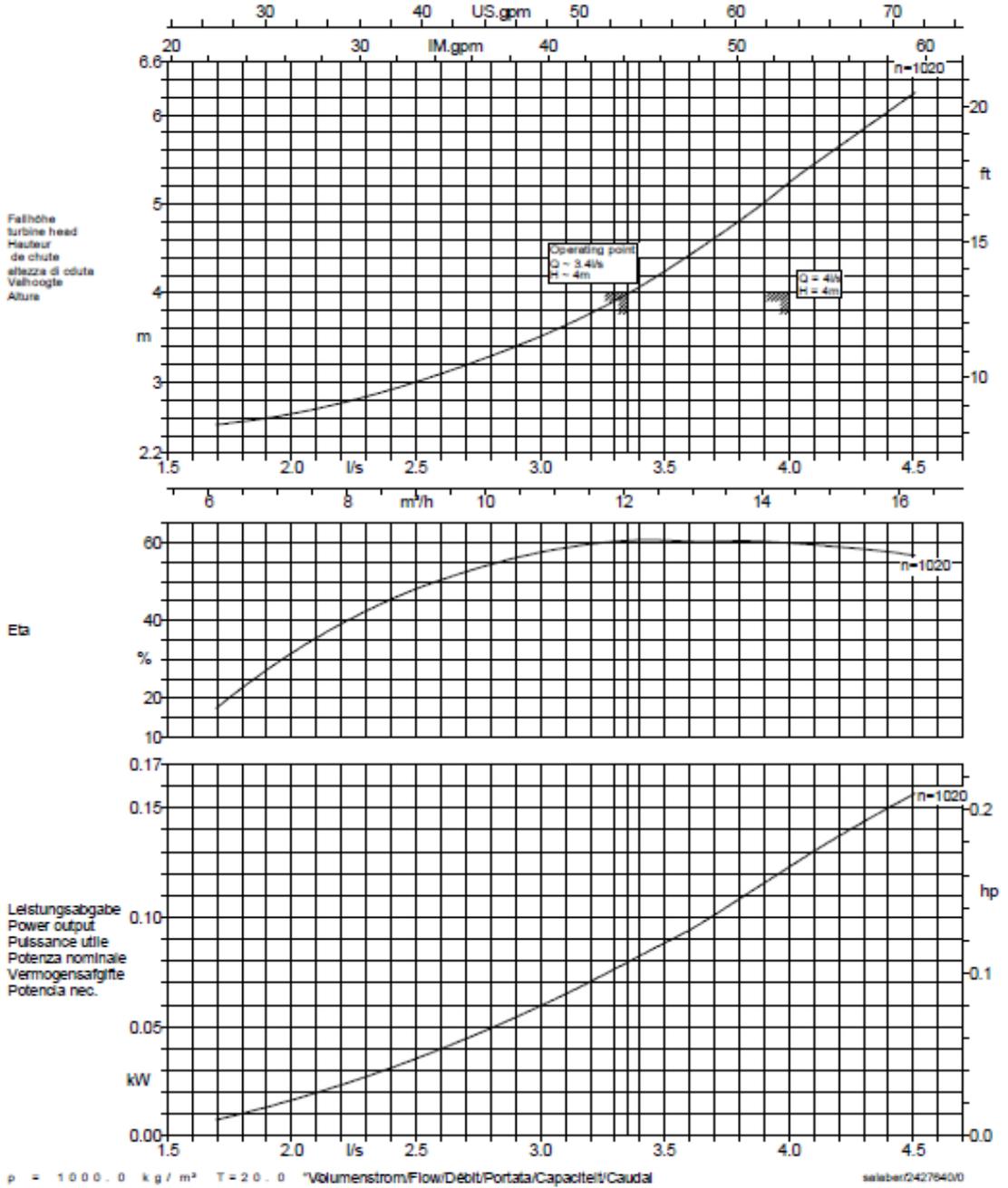
76,44	50	36,38	32,35	4,03
	40	44,33	39,64	4,69
	30	47,61	41,65	5,96
	20	45,17	36,65	8,52
	15	39,28	28,65	10,63
61,45	50	22,69	18,97	3,72
	40	30,02	25,90	4,12
	30	34,75	29,75	5,00
	20	34,96	27,99	6,97
	15	30,64	22,02	8,62

ANEXO



DATASHEET DA PAT

Baureihe-Größe Type-Size Modèle	Tipo Serie Tipo	Nennrehzahl Nom. speed Vitesse nom.	Velocità di rotazione nom. Nominal foerental Revoluciones nom.	Laufrad-Ø Impeller diameter Diamètre de roue	Ø Glinerte Ø Waaler Ø Rodete	
Etanorm 32-125 Turbine		1020 1/min		139 mm		
Projekt Project Projet	Progetto Projekt Proyecto	Angebots-Nr. Project No. No. de l'offre	Offerta-No. Offertenr. Offerta-No.	Pos.-Nr. Item No. No. de pos.	Pos.Nr. Positlenr. Pos.-Nr.	KSB Aktiengesellschaft 67225 Frankenthal Johann-Klein-Strasse 9 67227 Frankenthal
10-01-2432 - Inquiry for IST		2010-01-019				



Tolerance:
 Q = +5-9%
 H = +1-7%
 ETA = -7%

Salomon, Bernhard
 T1481
 2010-01-29

Installation plan

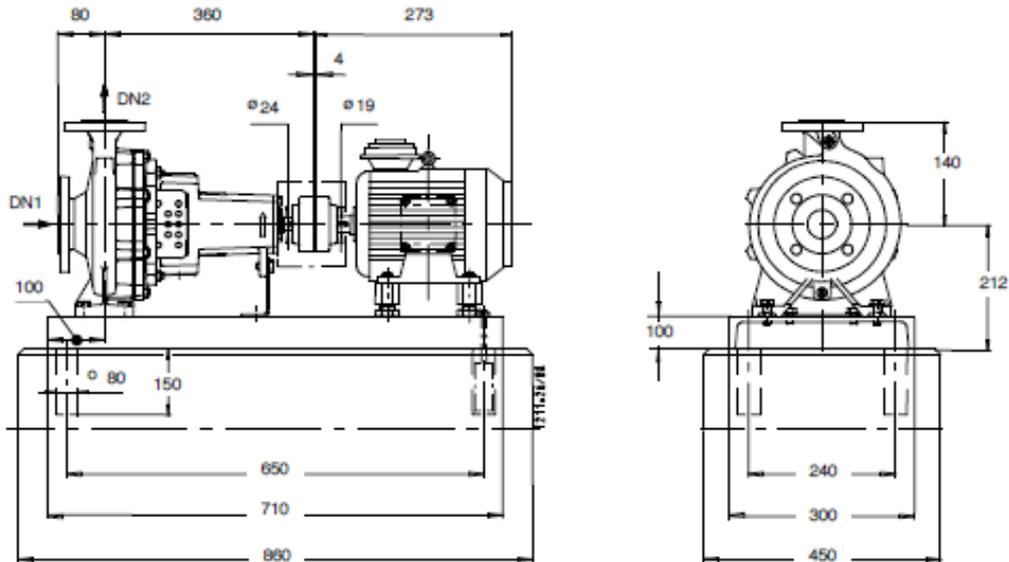


Customer item no.: Lab
 Order dated: 12/01/2010
 Order no.: 2432 - PaT
 Quantity: 1

Number:
 Item no.: 400
 : 12/01/2010
 Page: 1 / 2

Etanorm M 032-125 SP
 Standardpump acc. EN 733

Version no.: 1



Drawing is not to scale

Dimensions in mm

Motor

Motor manufacturer KSB
 Motor size 80
 Motor power 0.55 kW

Position of terminal box 0°/360° (top)

Baseplate

Design U-beam / folded plate
 Size 13A
 Material Steel ST
 Leakage drain, baseplate Without
 Rp1
 Foundation bolts M16x250 (Not in scope of supply)

Connections

Suction nominal size DN1 DN 50 / EN 1092-2
 Discharge nominal size DN2 DN 32 / EN 1092-2
 Nominal pressure suct. PN 16
 Rated pressure disch. PN 16

Coupling

Coupling manufacturer Flender
 Coupling type Eupex N
 Coupling size 68
 Spacer 0.0 mm

Weight net

Pump 34 kg
 Baseplate 33 kg
 Coupling 1 kg
 Coupling guard 2 kg
 Motor 9 kg
 Total 79 kg

Connect pipes without stress or strain!

Dimensional tolerances for shaft axis height:
 Dimensions without tolerances, middle tolerances to:
 Connection dimensions for pumps:
 Dimensions without tolerances - welded parts:
 Dimensions without tolerances - gray cast iron parts:

DIN 747
 ISO 2768-m
 EN735
 ISO 13920-B
 ISO 8062-CT9

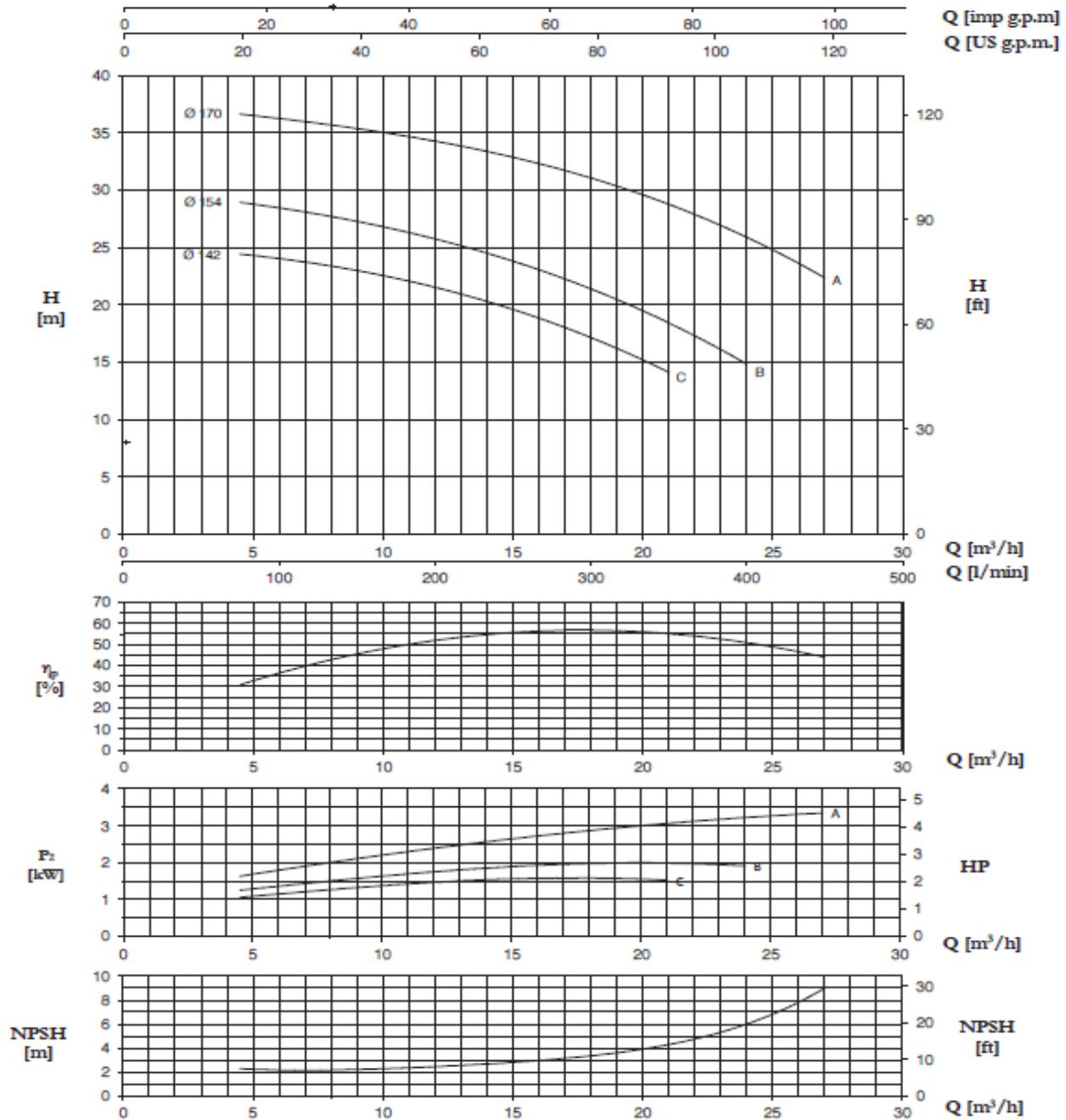
**For auxiliary connections
 see separate drawing.**



DATASHEET DA BOMBA UTILIZADA

CM EN 733 ~ 2900 r.p.m.

32-160



TYPE	P ₂		P ₁ (kW)	A	Q (m³/h - l/min)											
					3~	0	4.5	6	7.5	9	12	15	18	21	24	27
						0	75	100	125	150	200	250	300	350	400	450
3~			3~	H (m)												
32-160 C (*)	2	1.5	2.3	4	24,7	24,4	24,1	23,6	23,0	21,5	19,6	17,2	14,1	-	-	
32-160 B (*)	3	2,2	2,9	5,2	29,0	-	28,5	28,0	27,3	25,7	23,8	21,4	18,5	14,8	-	
32-160 A	4	3	4,1	7,1	36,8	-	36,4	36,0	35,4	34,2	32,8	31,1	28,8	26,0	22,3	

(*) Disponibile nella versione monofase / Single phase available / Bajo pedido tambien es monofase / Disponible en monofase

ANEXO



DATASHEET DA MÁQUINA DE INDUÇÃO UTILIZADA

3GVA082001-ASB



"No longer for sale" replaced by 3GAA082001-BSE

"No longer for sale" replaced by 3GAA082001-CSE

"No longer for sale" replaced by 3GAA082001-ADE

"No longer for sale" replaced by 3GAA082001-ASE

"No longer for sale" replaced by 3GAA082001-ASET1

Products → Motors and Generators → IEC Low Voltage AC Motors → Legacy IEC Low Voltage Motors
→ Aluminum Motors

Products → Motors and Generators → IEC Low Voltage AC Motors → Legacy IEC Low Voltage Motors
→ Marine General Purpose Motors

General Information

Product ID: 3GVA082001-ASB
 ABB Type Designation: M2VA 80A 4
 Catalog Description: No Description Available

Additional Information

ABB Type Designation:	M2VA 80A 4
Altitude:	1000 m
Ambient Temperature:	40 °C
Bearing:	6204-2ZC3
Bearing NDE:	6203-2ZC3
Core Credit:	0.00
Country of Origin:	Italy (IT)
Customs Tariff Number:	85015100
Direction of Rotation:	Both sides

Electrical Data:

Conn	Temp Class	Freq	Voltage	Power	Speed	Current	Power Factor	Efficiency	Torque	IS/IN
Y	--	50 Hz	380-420 V	0.55 kW	1400 r/min	1.50 A	0.760	75.30 %	3.75 N-m	4.60
D	--	50 Hz	220-240 V	0.55 kW	1400 r/min	2.60 A	0.760	75.30 %	3.75 N-m	4.60
Y	--	60 Hz	440-480 V	0.65 kW	1680 r/min	1.40 A	0.810	75.30 %	3.75 N-m	4.60
D	--	60 Hz	250-280 V	0.65 kW	1680 r/min	2.40 A	0.810	75.30 %	3.75 N-m	4.60

Gross Weight:	9.4 kg
IC Class:	IC411
IM Class:	IMB3 IM1001
IP Class:	IP55
Insulation Class:	ICLF
Lubrication:	For life
Made To Order:	No
Minimum Order Quantity:	1 piece
Moment of Inertia:	0.00126 kg/m ³
Output Power:	0.55 kW
Package Level 1 Units:	1 carton
Poles (High):	4
Product Name:	3-Phase squirrel cage motor
Product Net Weight:	9 kg
Quote Only:	No
Replaced Product ID (OLD):	3GVA082001-ASAS 3GVA082001-ASA 3GAA082001-ASV
Replacement Product ID (NEW):	3GAA082001-BSE 3GAA082001-CSE 3GBA082101-ASB 3GVA082001-ASE 3GAA082001-ADE 3GAA082001-ASE 3GAA082001-ASET1 3GVA082001-ASC 3GBA082102-ASB
Selling Unit of Measure:	piece
Sound dB (A):	50 dB(A)
Standards:	IEC 60034-1
Starting of Motor:	Direct Online
Temperature Class Default:	--
Terminator Box Location:	D-End top
Two Speed Motor:	No
Type of Duty:	S1
Voltage Code:	S



CÓDIGO MATLAB PARA EXTRAÇÃO DA POTÊNCIA MECÂNICA DO EPANET

```
%% CALL TO EPANET
% Model derotinaion
clc;
clear;
% close all;
tic
% % Create EPANET object using the INP file
inpname='ModeloLabFCT_PAT_NoBypass.inp';

%%tic;d=epanet(inpname);toc
tic;d=epanet(inpname, 'Bin');toc

% % Number of nodes and links
numnodes = d.BinNodeCount ;
numlinks = d.BinLinkCount ;
fprintf('%s%d\n', 'Number of nodes: ', numnodes);
fprintf('%s%d\n', 'Number of links: ', numlinks);

% % Depth and Flow in each Pipeline
FlowPipe = d.getBinComputedLinkFlow;
HeadPipe = d.getBinComputedNodePressure;

% % Get information from each pipeline

Matrix = d.getBinLinksInfo;

% % Count length of elements - pipeline

len = length(Matrix.BinLinkFromNode) ;

% % Loop for each pipeline and the nodes after and before in
each case to
```

```

% % estimate the Mechanical Power and the Head Pressure
Difference

for j=1:len
node_in = str2num(cell2mat(Matrix.BinLinkFromNode(j))) ;
node_out = str2num(cell2mat(Matrix.BinLinkToNode(j))) ;

for i=1:24*6
% % Mechanical Power
Pot(i,j)=9.81*abs(FlowPipe(i,j))*abs(HeadPipe(i,node_in) -
HeadPipe(i,node_out) )/1000;
% % Head Pressure Difference
Head(i,j) = abs(HeadPipe(i,node_in) - HeadPipe(i,node_out)
) ;
end

end

% % Figure 1 - Pressure Difference in each pipe
% % (Time step: 10 minutes, Total time: 1 day)
figure(1); hold on; imagesc([1 len],[1 24*6],Head); hold
off;

% % Figure 2 - Flow in each pipe for each time period
% % (Time step: 10 minutes, Total time: 1 day)
figure(2); hold on; imagesc([1 len],[1 24*6],FlowPipe); hold
off;

% % Figure 3 - Mechanical power for each time period
% % (Time step: 10 minutes, Total time: 1 day)
figure(3); hold on; imagesc([1 len],[1 24*6],Pot); hold off;

% % Saving the changes as a new .INP file
d.saveBinInpFile('ModeloLabFCT_PAT_NoBypass.inp');

% CLOSING THE EPANET FILE

% % Closing the .INP file
d.BinClose
toc

```