

Dimensionamento e otimização de circuitos de água industriais através de modelos de simulação OpenModelica

Diogo Emanuel Rocha Costa

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Professor Armando Oliveira

Orientadora na empresa: Doutora Muriel Iten



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2018

Aos meus pais, irmão e namorada.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo o dimensionamento e otimização de circuitos de água industriais através de modelos de simulação. O trabalho insere-se no projeto Europeu WaterWatt que visa a melhoria de eficiência energética de circuitos de água industriais, nomeadamente circuitos de tratamento, aquecimento, arrefecimento e transporte. Neste sentido, numa primeira fase foram desenvolvidos oito modelos numéricos com recurso ao *software* OpenModelica correspondentes aos casos de estudo reais do projeto WaterWatt. Posteriormente, os mesmos modelos foram calibrados com dados reais recolhidos em campo destes casos de estudo. Com os modelos devidamente calibrados foi possível analisar os circuitos de água industriais em geral, fazendo um levantamento das principais ineficiências e formas de as minimizar. Posteriormente, foi analisado o potencial de melhoria de eficiência energética de cada circuito e foram propostas medidas com a finalidade de aproveitar esse mesmo potencial. Essas medidas contemplam análise energética bem como económica de forma a identificar medidas com viabilidade económica e energética.

Globalmente os objetivos foram cumpridos, tendo-se confirmado o potencial de melhoria de eficiência existente nestes circuitos, havendo casos em que foi possível uma redução de 25 a 30% no consumo energético anual.

O *software* OpenModelica apresentou-se como uma ferramenta que permite, com facilidade, avaliar a viabilidade das medidas propostas e que pode vir a constituir-se como um elemento diferenciador no projeto de instalações mais eficientes.

Design and optimization of industrial water circuits through OpenModelica simulation models

Abstract

The present work aims to design and optimise industrial water circuits (IWC) with respect to water and energy consumption. The work is inserted into the European WaterWatt European project. It aims to improve the energy efficiency of industrial water namely in the treatment, heating, cooling and transportation circuits.

First, eight numerical models were developed based on real case studies of the WaterWatt project. These models have been designed using the OpenModelica software, an open source software that allows the modelling of physical systems. Subsequently, the models were calibrated with the real data that has collected in these case studies industries. With the calibrated models, the performance of the IWC was analysed and the main inefficiencies and ways of improving them were identified.

Secondly, the potential of improving the energy efficiency of each circuit was analysed and several measures were proposed. These measures were analysed in energy and economic perspective.

Overall, the objectives were fulfilled, confirming that there is great potential for the improvement of energy efficiency in IWC. In some of the IWC, the annual energy consumption could be reduced by 25 to 30%.

The OpenModelica software allows to evaluate the feasibility of the energy efficiency measures in an easy way, therefore a tool with much potential for the design of more efficient industrial water installations.

Agradecimentos

Em primeiro lugar queria agradecer ao Instituto de Soldadura e Qualidade pela oportunidade e confiança dada para desenvolver a minha tese de mestrado num instituto reconhecido internacionalmente e, por assim ter contactado com o mundo empresarial que tanto queria experienciar.

Um especial agradecimento à minha orientadora, Doutora Muriel Iten, pela disponibilidade demonstrada perante os entraves que foram surgindo e pelos desafios lançados ao longo deste período que tanto contribuíram para a minha evolução como futuro engenheiro.

Ao Professor Armando Oliveira pela ajuda e orientação prestadas na realização desta dissertação.

Quero também agradecer à minha família e a todos os meus amigos pela constante entajuda e amizade que tornaram todo este processo mais fácil de concretizar.

Por último, queria agradecer à Mafalda Moreira por toda a disponibilidade demonstrada em ajudar, por todas as conversas e por todo o carinho, que tornaram a conclusão desta etapa mais gratificante.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Consumos de energia e água na indústria	2
1.3	Projeto WaterWatt	5
1.4	Objetivos da tese	6
1.5	Estrutura da dissertação	6
2	Circuitos de água industriais típicos	7
2.1	Circuito aberto de arrefecimento a água	7
2.2	Circuito fechado de arrefecimento a água	7
2.3	Circuito de tratamento de gases	8
2.4	Circuito de transporte de matéria prima	8
2.5	Circuito de tratamento de água	9
3	Estado da arte	10
3.1	Motores elétricos	10
3.1.1	Otimização dos motores	11
3.1.2	Utilização de motores mais eficientes	12
3.1.3	Utilização de variadores eletrónicos de velocidade	14
3.2	Sistemas de bombagem	16
3.2.1	Sistemas de bombagem com VEV	19
4	OpenModelica	21
5	Casos de estudo	25
5.1	Caso de estudo 1 - Circuito aberto de arrefecimento de um processo de laminagem	25
5.2	Caso de estudo 2 - Circuito fechado de arrefecimento de um alto forno	28
5.3	Caso de estudo 3 - Circuito aberto de arrefecimento para produção de aço estrutural (vergalhões) e bobines de fio	29
5.4	Caso de estudo 4 - Circuito fechado de arrefecimento de um alto forno	31
5.5	Caso de estudo 5 - Circuito aberto de arrefecimento de uma farmacêutica	32
5.6	Caso de estudo 6 - Circuito de transporte de matéria prima	33
5.7	Caso de estudo 7 - Circuito de tratamento de água	35
5.8	Caso de estudo 8 - Circuito aberto de arrefecimento de condensadores barométricos	37
6	Discussão	40
7	Conclusões e perspetiva de trabalho futuro	42
	Referências	43
	ANEXO A: Resultados das simulações	45
A-1	Caso de estudo 1 - Resultados	45
A-2	Caso de estudo 2 - Resultados	45
A-3	Caso de estudo 3 - Resultados	47
A-4	Caso de estudo 4 - Resultados	48
A-5	Caso de estudo 5 - Resultados	49
A-8	Caso de estudo 8 - Resultados	50

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Consumo de energia final nos países da União Europeia (adaptado de [4]).	1
Figura 1.2 - Consumo total de energia primária em Portugal (em Mtep) (adaptado de [8]).	2
Figura 1.3 - Extração de água por setor na União Europeia.	3
Figura 2.1 - Esquema de um circuito de arrefecimento a água aberto.	7
Figura 2.2 - Esquema de um circuito de arrefecimento a água fechado.	8
Figura 2.3 - Esquema de um circuito de tratamento de gases.	8
Figura 2.4 - Esquema de um circuito de transporte de matéria prima.	9
Figura 2.5 - Esquema de um circuito de tratamento de água.	9
Figura 3.1 - Consumo de energia dos motores elétricos na Indústria (adaptado de [17]).	10
Figura 3.2 - Balanço energético simples a motor eléctrico [16].	11
Figura 3.3 - Classes de eficiência IE para motor de 4 pólos, 50 Hz. [21]	13
Figura 3.4 – Esquema típico de um VEV [26].	15
Figura 3.5 - Sistema de bombagem convencional em que a entrada representa a potência elétrica fornecida e a saída representa a potência mecânica disponibilizada pelo sistema de bombagem convencional (adaptado de [28]).	18
Figura 3.6 - Sistema de bombagem de alta eficiência em que a entrada representa a potência elétrica fornecida e a saída representa a potência mecânica disponibilizada pelo sistema de bombagem otimizado (adaptado de [28]).	19
Figura 3.7 - Potência relativa de entrada: controlo por estrangulamento (standard) vs. controlo por VEV [29].	19
Figura 3.8 – a) Controlo on/off ; b) Controlo por VEV (adaptado de [23]).	20
Figura 4.1 - Aspeto geral do <i>software</i> OpenModelica.	22
Figura 5.1 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento aberto de um processo de laminagem [31].	26
Figura 5.2 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento fechado de um alto forno [31].	28
Figura 5.3 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento aberto para produção de vergalhões e bobines de fio [31].	30
Figura 5.4 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento fechado de um alto forno [31].	31
Figura 5.5 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento aberto de uma farmacêutica [31].	32
Figura 5.6 - Esquema OpenModelica do circuito de transporte de matéria prima [31].	34
Figura 5.7 - Esquema OpenModelica do circuito de tratamento de água [31].	36
Figura 5.8 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento de condensadores barométricos [31].	38

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Circuitos industriais de água típicos por setor de atividade	3
Tabela 3.1 - Classificação dos motores trifásicos segundo a norma IEC/EN 60034-30-1 [21]	12
Tabela 3.2 - Potencial de poupança energética anual através da substituição de motores de 4 pólos de classe de eficiência IE1 para IE4	13
Tabela 4.1 – Componentes e equipamento OpenModelica	22
Tabela 5.1 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética	27
Tabela 5.2 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética	29
Tabela 5.3 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética	30
Tabela 5.4 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética	31
Tabela 5.5 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética	33
Tabela 5.6 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética	34
Tabela 5.7 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética	36
Tabela 5.8 - Nº de horas de trabalhos dos grupos de bombagem 1 e 2	38
Tabela 5.9 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética	39
Tabela A.1 – Resultados da implementação das medidas de eficiência propostas para o caso de estudo 1 obtidos nas simulações em OpenModelica	45
Tabela A.2 – Comparação entre as características nominais dos grupos de bombagem e as obtidas na simulação.....	46
Tabela A.3 - Comparação entre as características nominais da tubagem e as obtidas na simulação	46
Tabela A.4 - Comparação entre as características nominais do permutador e as obtidas na simulação	46
Tabela A.5 - Comparação entre as características nominais das torres de arrefecimento e as obtidas na simulação.....	46
Tabela A.6 – Comparação entre as temperaturas de entrada e saída do forno nominais e as obtidas depois da introdução das medidas de melhoria de eficiência	47
Tabela A.7 - Comparação entre as características nominais do grupo de bombagem e as obtidas na simulação.....	47
Tabela A.8 - Comparação entre as características nominais da tubagem e as obtidas na simulação	47
Tabela A.9 - Comparação entre as características nominais do processo e as obtidas na simulação	47
Tabela A.10 – Comparação entre a altura manométrica nominal disponibilizada pelo grupo de bombagem e a obtida na simulação depois da introdução da medida de melhoria de eficiência	48
Tabela A.11 - Comparação entre as características nominais da bomba e as obtidas na simulação	48

Tabela A.12 - Comparação entre as características nominais da tubagem e as obtidas na simulação	48
Tabela A.13 - Comparação entre as características nominais do permutador e as obtidas na simulação	48
Tabela A.14 - Comparação entre as características nominais da fonte de caudal e as obtidas na simulação	49
Tabela A.15 - Comparação entre as temperaturas de entrada e saída do forno nominais e as obtidas depois da introdução das medidas de melhoria de eficiência	49
Tabela A.16 - Comparação entre as características nominais do grupo de bombagem e as obtidas na simulação	49
Tabela A.17 - Comparação entre as características nominais da tubagem e as obtidas na simulação	49
Tabela A.18 - Comparação entre as características nominais do tratamento químico e as obtidas na simulação	50
Tabela A.19 - Comparação entre as características nominais das torres de arrefecimento e as obtidas na simulação	50
Tabela A.20 - Comparação entre as temperaturas de entrada e saída da produção nominais e as obtidas depois da introdução das medidas de melhoria de eficiência	50
Tabela A.21 - Comparação entre as temperaturas nominais dos condensadores barométricos e as obtidas depois da introdução das medidas de melhoria de eficiência	51

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A União Europeia tem vindo a adotar políticas energéticas que têm como principais objetivos a segurança no fornecimento de recursos energéticos e o seu aprovisionamento de acordo com as necessidades, a competitividade no setor dos fornecedores energéticos e o consumo sustentável de energia, através da redução da dependência dos combustíveis fósseis e emissões de GEE e outros poluentes [1].

Para tal definiu um conjunto de objetivos a serem atingidos em 2020, entre os quais:

- 20% de redução da emissão de gases com efeito de estufa;
- 20% de quota de energias renováveis;
- 20% de aumento em eficiência energética.

As medidas implementadas têm-se refletido em melhorias significativas e segundo dados da Agência Europeia do Ambiente as emissões de gases com efeito de estufa, em 2015, diminuíram 23,6% face a 1990 enquanto que a quota de energias renováveis, também em 2015, estava nos 16,7% enquanto percentagem do consumo de energia final [2],[3].

Conforme se constata na figura 1.1, os maiores consumidores em termos de energia final na União Europeia são os transportes, a indústria e os edifícios pelo que as diretivas se focam, principalmente, nestes setores. No caso particular da indústria percebe-se que representa cerca de ¼ da energia final consumida na União pelo que existe uma necessidade óbvia quer em termos energéticos, quer em termos ambientais de aumentar a eficiência dos seus processos.

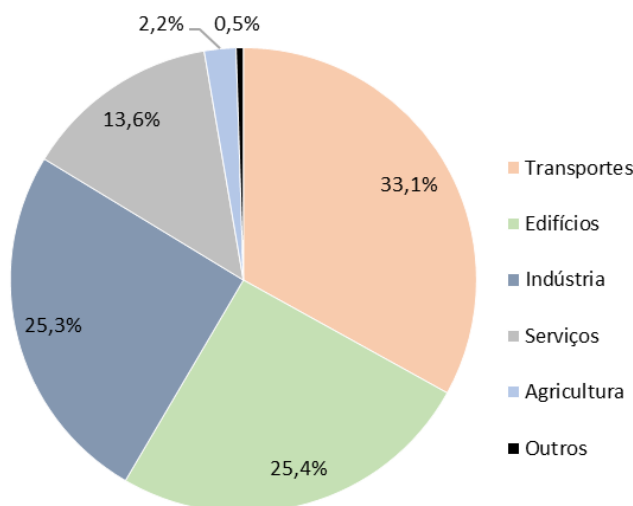


Figura 1.1 - Consumo de energia final nos países da União Europeia (adaptado de [4]).

Tendo em conta este cenário e o facto de atravessarmos um período marcado pelas intensas alterações climáticas, crise económica, escassez de recursos energéticos e dependência das importações de energia, a nível europeu (53,6 % segundo dados do Eurostat), a União Europeia lançou a diretiva 2012/27/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de outubro de 2012 com vista a mitigar estes problemas. É nesta perspetiva que a eficiência energética assume um papel preponderante já que permite o aumento da segurança do aprovisionamento energético da União, reduzindo o consumo de energia primária que, por conseguinte, diminui as importações de energia. São também alcançados efeitos colaterais como a diminuição das emissões de gases com efeito de estufa que aliado ao primeiro permite a diminuição dos custos e o combate às alterações climáticas. Para tal, estabeleceu como meta a redução em 368 Mtep (20%) no consumo de energia primária da União até 2020, face às projeções esse ano, promovendo assim a competitividade da indústria [5].

Recentemente, as prioridades energéticas foram revistas e foram estabelecidas novas metas para 2030, baseadas no Pacote Clima e Energia onde a nova meta de eficiência energética foi estabelecida em pelo menos 27%, a ser revista em 2020 [6].

No que diz respeito a Portugal, o compromisso foi definido em 22,5 Mtep o que equivale a um ganho de 25%, superior ao objetivo comum de 20% no consumo de energia primária (CEP) face às projeções para 2020. A evolução do CEP, figura 1.2, sem usos não energéticos mostra que, em 2015, Portugal se encontra 22% abaixo do valor de referência previsto e abaixo da meta [7].

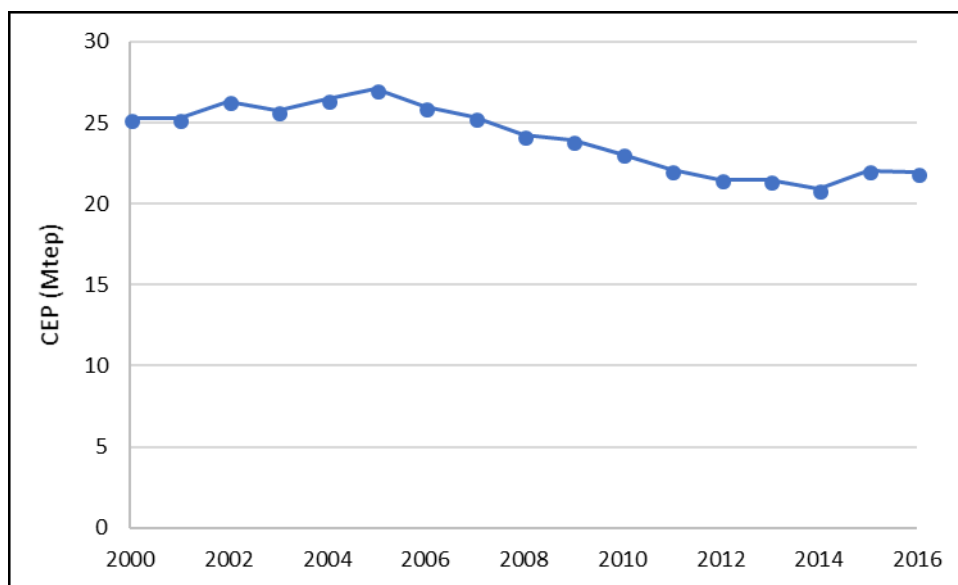


Figura 1.2 - Consumo total de energia primária em Portugal (em Mtep) (adaptado de [8]).

1.2 Consumos de energia e água na indústria

Como visto na secção anterior, a eficiência energética é um dos principais objetivos da União Europeia e um dos grandes consumidores de energia são os circuitos de água industriais (IWC). Estes são parte integrante das instalações da maior parte das empresas industriais e, em particular, o sistema de bombagem pode representar entre 25-50% da energia usada em algumas destas indústrias. Por isto mesmo, é notória a necessidade da elevada eficiência destes equipamentos [9].

Na União Europeia extraem-se cerca de 247 mil milhões de m³/ano de água sendo que 15% desse montante é usado pela indústria, sendo os restantes 85% utilizados para produção de

energia (44%), principalmente em circuitos de arrefecimento, na agricultura (24%) e para abastecimento público (17%), tal como se pode ver na figura 1.3 [10].

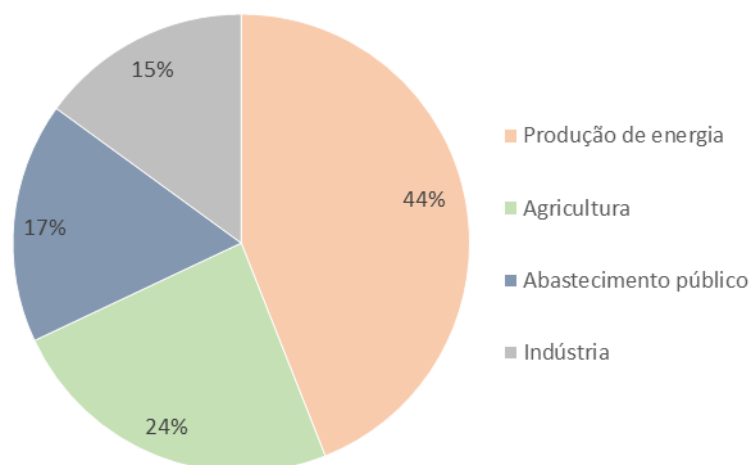


Figura 1.3 - Extração de água por setor na União Europeia.

A indústria utiliza água em diversos processos como refrigeração, aquecimento, tratamentos, transporte e limpeza sendo, por diversas vezes, parte constituinte do produto final [10].

Estima-se que na Europa a indústria consuma cerca de 37.000 milhões de m³/ano de água potável recirculando-a até dez vezes (perfazendo um total de 370.000 milhões de m³/ano) com um consumo energético específico >0.2 kWh/m³. O potencial de poupança de 10% identificado nos projetos europeus SELSA e RELOTEMP, significaria uma redução de 7400 GWh/ano no consumo energético [11].

Os circuitos apresentados na tabela 1.1 são circuitos típicos de água industriais, que vão ser apresentados mais em pormenor no capítulo 2. Serão também estudados por forma a perceber o seu consumo de energia e analisar de que forma se pode otimizar, sempre tendo em vista a eficiência energética. Quanto ao consumo de energia é necessário avaliar todos os parâmetros que têm influência: o caudal, o comprimento e o diâmetro da tubagem, as quedas de pressão existentes no circuito, eficiência dos diversos equipamentos tais como permutadores, torres de arrefecimento e os seus ventiladores, bombas e motores elétricos.

Tabela 1.1 - Circuitos industriais de água típicos por setor de atividade

Indústria	Circuito típico
Química, Alimentar, Metalomecânica	Circuito aberto de arrefecimento a água
Metalomecânica	Circuito fechado de arrefecimento a água
Metalomecânica	Circuito de tratamento de ar
Metalomecânica	Circuito aberto de arrefecimento/têmpera a água
Papel	Circuito de transporte de matéria prima
Alimentar	Circuito de tratamento de água

Os circuitos apresentados anteriormente apresentam componentes e equipamentos cujas ineficiências estão diretamente relacionadas com o aumento do consumo energético bem como com o aumento do desperdício de água e, portanto, com a diminuição da eficiência do

sistema em si. Assim sendo, de seguida faz-se uma pequena análise a estes equipamentos de forma a mitigar alguns dos seus problemas.

i) Grupos de bombagem de água

No que diz respeito às bombas, parte da energia consumida é devida às ineficiências mecânicas bem como ao seu modo de operação inadequado e afastado do ponto de funcionamento ótimo. Por outro lado, também ao longo do serviço a performance da bomba vai diminuindo devido à erosão, corrosão, desgaste e cavitação. Muito deste desgaste ocorre nos primeiros anos de operação e tende a agravar-se se a bomba/grupo de bombagem trabalhar fora do ponto de operação. No caso de uma manutenção deficiente perdem-se cerca de 5% de eficiência nos primeiros 5 anos e até 15% nos primeiros 10 anos [12].

No entanto, uma manutenção periódica é capaz de repor os níveis de eficiência para os encontrados numa bomba nova e conduzir o equipamento ao longo da curva da banheira em direção à maturidade o que indica o sucesso da manutenção [13].

A maior ou menor eficiência destes equipamentos tem influência direta no consumo de energia do circuito e, como tal, influência nos custos de operação da instalação [12].

ii) Torres de arrefecimento - ventiladores

Outro dos maiores consumidores são os ventiladores das torres de arrefecimento. Neste caso, também a eficiência e a operação longe do ponto de funcionamento, dado que normalmente têm um caudal fixo e as condições de funcionamento vão variando, fazem aumentar de forma considerável o consumo de energia, além de que este desvio tem repercussões nas condições de saída esperadas da torre de arrefecimento [14]. A utilização de variadores de frequência em vez de um motor de duas velocidades nos ventiladores das torres de arrefecimento permitiu, no estudo de E. Al-Bassam e R. Alasseri [15], a redução em 13% do consumo de água e de 9% na potência requerida por tonelada de refrigeração, o que evidencia a eficácia da utilização desta solução.

iii) Tubagens

Tendo como função a ligação entre todos os componentes do circuito, a tubagem adquire extrema importância no que diz respeito ao consumo energético. Uma vez que se trata de circuitos de água industriais e, portanto, as tubagens podem percorrer enormes distâncias e com elevados caudais, a manutenção das mesmas bem como as suas dimensões são preponderantes. Como tal, é necessário fazer limpeza periodicamente para remover os depósitos e incrustações, diminuindo, assim, as perdas de cargas em linha e consequentemente o esforço de bombagem que conduziria a um aumento do consumo energético. Por outro lado, o correto dimensionamento e planeamento da rede é essencial de forma a minimizar as perdas de carga. Por exemplo, aumentando os diâmetros até ao ponto em que seja economicamente rentável, e minimizando o número de joelhos e bifurcações de forma a ter o menor número de perdas de carga localizadas possível, possibilita uma diminuição do esforço de bombagem que, por sua vez, conduz a uma diminuição do consumo energético.

Pelo exposto anteriormente, muitas medidas de melhoramento da eficiência destes sistemas podem ser propostas, tendo em conta o potencial de poupança existente na indústria e em particular nos circuitos de água industriais. Algumas dessas medidas passam por [11]:

- Operar os circuitos de água com auxílio a sensores de temperatura e outros sensores de modo a corresponder à carga imposta no sistema;
- Utilizar bombas e torres de arrefecimento energeticamente eficientes;

- Ajustar as bombas e os ventiladores das torres de arrefecimento à carga imposta de modo a trabalharem sempre próximos do ponto de funcionamento através de variadores de frequência e de sistemas automáticos;
- Usar mais sistemas de pressão estática como tanques/reservatórios em vez de recorrer a processos contínuos de bombagem;
- Minimizar as perdas de carga ao longo circuito de água, isto é, otimizar o circuito em si e a sua operação;
- Efetuar a manutenção periódica da tubagem e controlar as condições da água de modo a evitar um acréscimo de perdas de pressão e deposição de calcário e outros resíduos;
- Diminuir as exigências de refrigeração promovendo a recuperação e reutilização de calor.

1.3 Projeto WaterWatt

Face ao exposto acima, nomeadamente consumos significativos de energia e água em circuitos de água industriais (IWC), surge o projeto WaterWatt que visa melhorar a eficiência energética de IWC. Trata-se de um projeto Europeu com financiamento do programa Horizonte 2020 e que inclui um consórcio europeu nomeadamente: ISQ (Portugal), Cardiff University (Reino Unido), ISMB (Itália), DECHEMA (Alemanha), BFI (Alemanha), SINTEF (Noruega).

O Instituto de Soldadura e Qualidade, ISQ, é uma empresa que conta com 50 anos de atividade, com seis delegações em Portugal (Oeiras; Vila Nova de Gaia; Castelo Branco; Sines; Loulé e Vila Nova de Cerveira) além de escritórios, delegações e empresas associadas em mais de 15 países como EUA, China, Brasil entre outros. É uma entidade privada e independente, que presta serviços de inspeção, ensaio, formação e consultoria técnica.

A sua função consiste em, por um lado melhorar o desempenho dos seus clientes e por outro reduzir o risco associado às suas atividades. Nesse sentido, oferecem serviços e soluções inovadoras que contribuem para que as suas infraestruturas, equipamentos, processos e produtos cumpram as normas e regulamentos em termos de qualidade, segurança, ambiente e responsabilidade social.

O projeto WaterWatt está a cargo do I&D do ISQ, nomeadamente do Sustainable Innovation Centre que visa dar apoio à área operacional da energia.

Uma das lacunas encontradas na eficiência energética na indústria prende-se com o facto das medidas propostas se focarem sobretudo, nos processos primários de produção além de haver pouco conhecimento acerca do consumo dos circuitos auxiliares. É, neste seguimento que surge o projeto WaterWatt que visa a melhoria e otimização dos circuitos de água industriais, sistemas auxiliares aos processos de produção e que têm sido negligenciados dado o seu carácter secundário, tendo, por essa razão grande potencial de melhoramento no que diz respeito à eficiência energética [11].

O projeto *WaterWatt* aparece, então, como uma ferramenta valiosa dada a falta de referência para o consumo de energia dos circuitos de água industriais bem como a falta de ferramentas ou de conhecimento das poupanças potenciais proporcionando todas estas valências no que concerne a estes circuitos através do desenvolvimento da plataforma E³ (*Energy Efficiency Evaluation Platform*). Esta plataforma, servirá de apoio tanto às pequenas e médias empresas bem como às grandes indústrias que pretendam melhorar a eficiência energética dos seus circuitos de água adaptando, de forma interativa, os seus casos aos casos de estudo modelados neste projeto e que servem de referência aos demais.

1.4 Objetivos da tese

Este projeto tem como objetivos principais:

- Dimensionar e otimizar 8 circuitos de água industriais (casos de estudo) através de modelos de simulação no *software* OpenModelica;
- Validação dos modelos numéricos com recurso a dados reais de água e energia dos circuitos casos de estudo;
- Analisar o potencial de melhoria de eficiência energética existente nos casos de estudo selecionados;
- Propor medidas de melhoria de eficiência energética e avaliar a sua viabilidade económica.

1.5 Estrutura da dissertação

No primeiro capítulo é feito um pequeno enquadramento, em termos europeus, dos consumos energéticos por setor bem como das metas existentes para eficiência energética na União Europeia. De seguida faz-se uma primeira abordagem aos circuitos de água industriais, enumerando-se alguns dos seus principais causadores de ineficiências e o potencial existente na melhoria de eficiência energética. Precisamente nesse seguimento, aborda-se o projeto WaterWatt como uma ferramenta na avaliação e aproveitamento deste potencial.

No segundo capítulo faz-se a apresentação dos principais circuitos de água industriais, de forma a dar a conhecer a sua função e equipamentos constituintes, agrupando-os em cinco tipos principais de forma a ser mais fácil a sua identificação aquando da leitura do capítulo 4.

No capítulo seguinte é apresentado o estado da arte, isto é, é feita uma análise aos motores elétricos e sistemas de bombagem, evidenciando-se os principais problemas encontrados e de que forma se podem combater, propondo medidas de melhoria de eficiência energética, apontando as suas vantagens e indicando como se pode averiguar a sua viabilidade económica.

No capítulo 4, far-se-á a apresentação, de um modo geral, do funcionamento do programa bem como dos principais componentes utilizados na construção dos circuitos que vão ser analisados no capítulo 5. Neste último, serão apresentados os casos de estudo, bem como os resultados obtidos nas simulações em OpenModelica, quer do circuito existente, quer com as medidas de melhoria de eficiência propostas e feita uma discussão acerca das medidas aplicadas.

Por último, no capítulo seguinte, são retiradas as respetivas conclusões e apresentadas as perspetivas de trabalhos futuros.

2 Circuitos de água industriais típicos

No âmbito do projeto WaterWatt foram analisados diversos circuitos, tendo-se definido em proposta 11 casos de estudo (dos quais 8 foram analisados no âmbito desta tese) de diversos países europeus e que fossem representativos dos circuitos encontrados na indústria. Estes casos foram agrupados em cinco grupos principais, tendo em conta a semelhança existente entre os mesmos. Neste capítulo são descritos estes cinco tipos de circuitos hidráulicos, de forma genérica, de forma a explicar o melhor possível o tipo de circuitos analisados posteriormente no capítulo 4. Deste modo, os circuitos a seguir apresentados são meramente exemplificativos do tipo de circuitos encontrados na indústria.

2.1 Circuito aberto de arrefecimento a água

Neste tipo de circuitos usualmente tem-se um processo industrial que envolve transferência de calor, por exemplo, a fusão de material metálico num forno ou uma têmpera, que apresenta necessidades de arrefecimento. Define-se como circuito aberto um circuito em que a água contacta diretamente com o ar.

Os equipamentos principais deste tipo de sistema são a fonte de calor que pode assumir a forma de um forno por exemplo, o grupo de bombagem e uma ou mais torres de arrefecimento para arrefecimento da água utilizada para arrefecer/absorver a energia libertada pela fonte de calor, como se pode observar esquematicamente na figura 2.1.

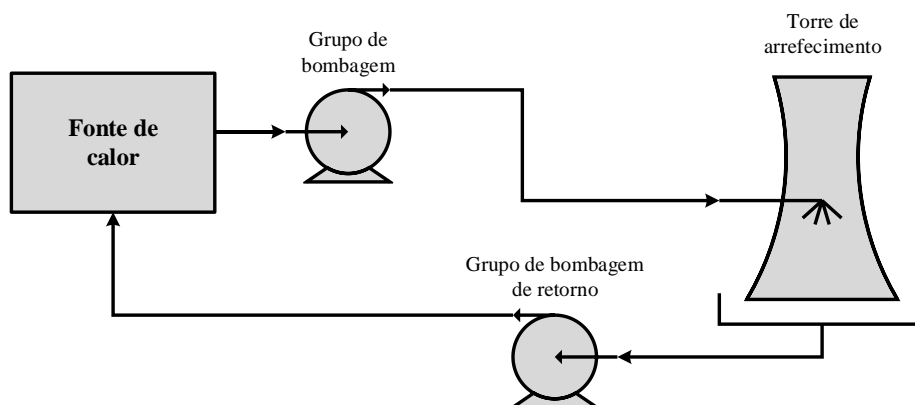


Figura 2.1 - Esquema de um circuito de arrefecimento a água aberto.

2.2 Circuito fechado de arrefecimento a água

Neste tipo de circuitos, à semelhança do circuito anterior, normalmente existe um processo industrial que requer arrefecimento.

No entanto, apresentam algumas diferenças. Neste caso, trata-se de um circuito fechado visto que existem dois circuitos que não entram em contacto direto e que trocam calor entre si

através de um permutador. Assim, os equipamentos principais deste tipo de sistema são a fonte de calor, os grupos de bombagem, o permutador que permite a troca de calor entre os fluidos e uma ou mais torres de arrefecimento, como se pode observar esquematicamente na figura 2.2.

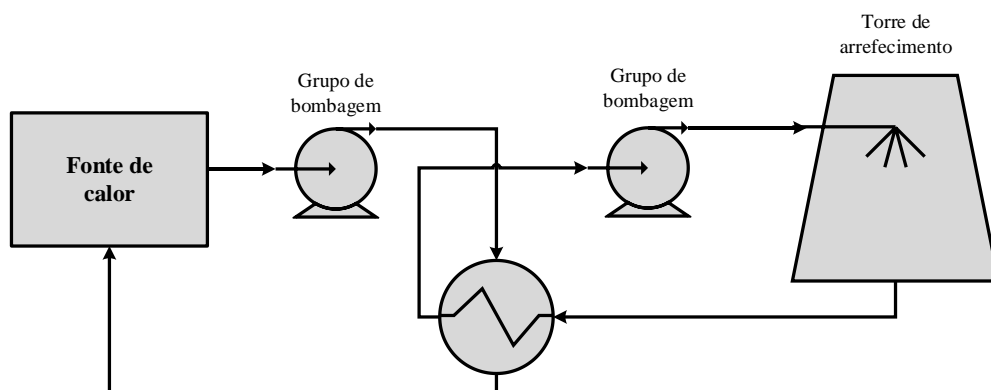


Figura 2.2 - Esquema de um circuito de arrefecimento a água fechado.

2.3 Circuito de tratamento de gases

Estes circuitos são responsáveis pelo tratamento de gases provenientes de processos industriais, tratamento este que pode assumir diversas formas entre elas a remoção de partículas de efluentes gasosos. Normalmente os equipamentos principais são o grupo de bombagem, filtros, lavador de gases, responsável pelo tratamento e torre de arrefecimento quando estes gases são quentes tal como representado esquematicamente na figura 2.3. Pode ainda apresentar tanques de sedimentação entre as torres de arrefecimento e o lavador de gases caso existam partículas sólidas em suspensão.

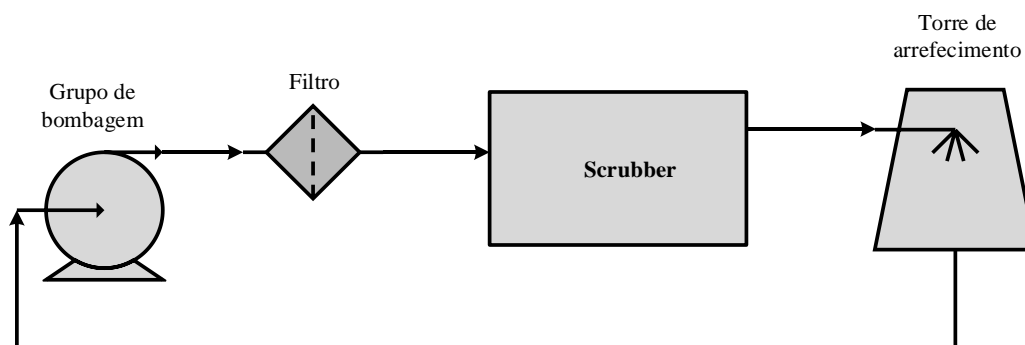


Figura 2.3 - Esquema de um circuito de tratamento de gases.

2.4 Circuito de transporte de matéria prima

Como o próprio nome indica, nestes circuitos é feito o transporte de matéria prima. Um caso típico é, por exemplo, o transporte de pasta de papel.

Os equipamentos essenciais a este tipo de circuitos são os grupos de bombagem e, normalmente tanques de armazenamento que funcionam como pontos intermédios aos processos que se seguem, como se pode observar na figura 2.4.

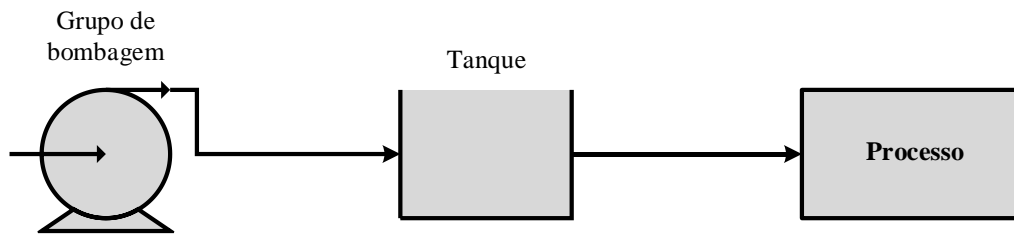


Figura 2.4 - Esquema de um circuito de transporte de matéria prima.

2.5 Circuito de tratamento de água

Este tipo de circuitos têm por objetivo tratar água e capacitá-la das características necessárias ao processo a que se destina, como por exemplo tratar água subterrânea para a produção de uma bebida ou outro produto alimentar.

Assim, necessita de componentes indispensáveis como grupo de bombagem e filtros. Eventualmente pode apresentar tanques de armazenamento, como esquematizado na figura 2.5.

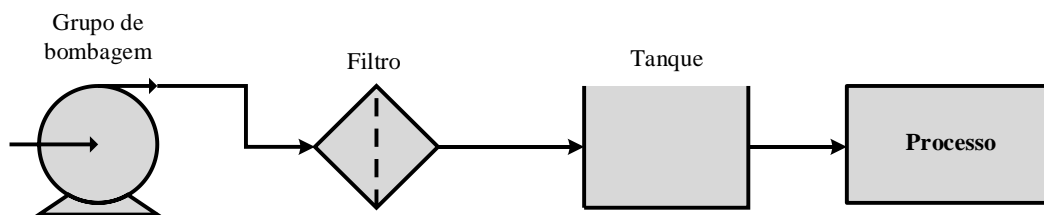


Figura 2.5 - Esquema de um circuito de tratamento de água.

3 Estado da arte

Neste capítulo faz-se uma análise dos componentes principais dos IWC nomeadamente dos motores elétricos, bem como aos sistemas de bombagem em si, tentando encontrar as principais ineficiências. Paralelamente são evidenciadas algumas medidas de melhoria da eficiência passíveis de implementação, assim como a sua aplicabilidade, vantagens e de que forma se pode averiguar a sua viabilidade económica.

3.1 Motores elétricos

Os motores elétricos estão largamente difundidos na indústria dada a sua simples construção e adaptabilidade à variação das cargas impostas, além de usufruírem da vantagem de funcionar a energia elétrica [16].

Na indústria da União Europeia, os motores elétricos são responsáveis por cerca de 70 % do consumo total de eletricidade [17]. Em Portugal, por exemplo, estes representam cerca de 77% do consumo de eletricidade da indústria [18].

Na figura 3.1 são apresentados os consumos de eletricidade dos motores no que diz respeito às suas principais aplicações, onde se pode perceber que a bombagem representa cerca de 20% desse consumo [17].

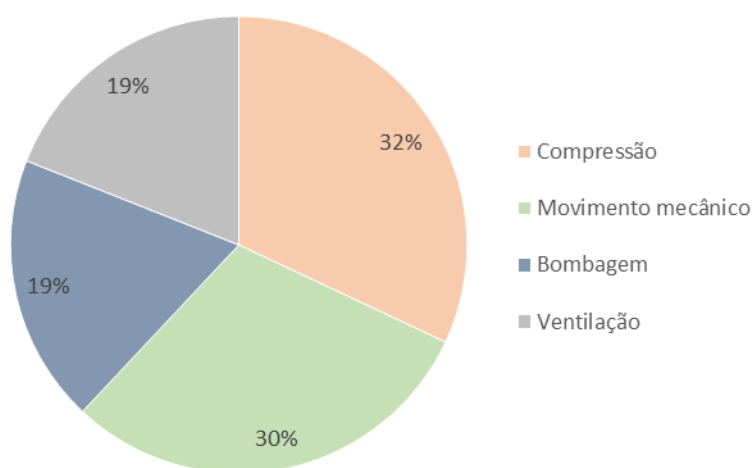


Figura 3.1 - Consumo de energia dos motores elétricos na Indústria (adaptado de [17]).

Existem basicamente dois problemas inerentes aos motores elétricos. Por um lado, alguns motores não estão corretamente dimensionados para o sistema de potência no qual estão inseridos, dado que são sobredimensionados na fase de projeto, trabalhando, portanto, longe do ponto ótimo, em regime de carga parcial ou variável ao longo do tempo [16].

Por outro lado, mesmo que o motor esteja bem dimensionado para o sistema de potência, este tem perdas térmicas que provocam um aumento da temperatura no mesmo [16].

De forma a mitigar alguns destes problemas, várias soluções têm vindo a ser desenvolvidas, entre as quais estão a utilização de motores elétricos de alto rendimento, variadores eletrónicos de velocidade (VEV), e a otimização dos sistemas de transmissão mecânica entre o motor e o equipamento final.

Tendo em conta o elevado custo da eletricidade e atendendo a que os motores elétricos representam uma fatia bastante significativa do consumo de eletricidade industrial, é imperativo garantir que estes trabalhem em condições ideais, garantindo a maior eficiência energética possível e usando as soluções disponíveis já referidas anteriormente.

3.1.1 Otimização dos motores

Um motor elétrico é responsável por converter energia elétrica em energia mecânica. No entanto, esta conversão é acompanhada de perdas por arrastamento do fluido envolvente no qual as partes móveis se encontram mergulhadas, e de perdas sob a forma de calor, como se representa na figura 3.2.

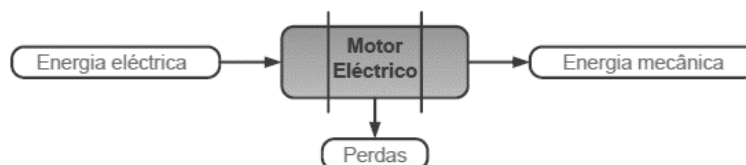


Figura 3.2 - Balanço energético simples a motor elétrico [16].

Uma forma de quantificar estas perdas passa pelo rendimento do motor elétrico, η , que é o quociente entre a potência mecânica, P_{mec} , e a potência elétrica, P_{el} , dado pela equação seguinte:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} = \frac{P_{el} - \text{perdas}}{P_{el}} \quad (3.1)$$

Como resultado destas perdas temos dois efeitos: a redução do rendimento do motor e a redução do seu tempo de vida útil provocada pelo aumento de temperatura.

A perda total sob a forma de calor obtém-se pela acumulação das seguintes perdas individuais:

- Perdas independentes da intensidade de corrente [19]:
 - perdas magnéticas no ferro que englobam as perdas por histerese e por correntes de Foucault, sendo proporcionais ao quadrado do fluxo magnético;
 - perdas mecânicas resultantes do atrito nos rolamentos e da ventilação do motor.

Estas são praticamente constantes e aparecem tanto no funcionamento em carga como em vazio.

- Perdas dependentes da intensidade de corrente [19]:
 - Perdas por efeito de Joule no estator devido à passagem de corrente nos seus enrolamentos;
 - Perdas por efeito de Joule no rotor devido à passagem de corrente na gaiola.

O valor destas varia em função da carga, ou seja, em função da corrente absorvida, sendo proporcionais ao quadrado da corrente a ao valor da resistência [19].

Tendo por objetivo o aumento da eficiência dos motores elétricos, minimizando as suas perdas, algumas medidas podem ser implementadas:

- Substituir os motores convencionais, em caso de avaria ou fim de vida, por motores mais eficientes;
- Utilizar VEVs de forma a regular continuamente a velocidade de rotação do motor à carga imposta;
- Utilizar *soft-starters* para controlar/limitar a tensão e corrente aplicada ao motor e assim evitar picos de corrente no arranque;
- Garantir a manutenção adequada dos motores;
- Evitar o sobredimensionamento dos motores e desligá-los sempre que não estão a ser utilizados.

3.1.2 Utilização de motores mais eficientes

Segundo a Siemens [20] a alteração de motores convencionais, classe de eficiência IE1, para motores IE4 de alta eficiência pode conduzir a melhorias de eficiência até 14%, o que significa uma elevada diminuição do consumo energético. Acresce a este facto que mais de 95% dos custos relativos à vida útil de um motor são devidos ao seu consumo energético, sendo que o investimento inicial e manutenção representam menos de 5% dos custos totais [18].

Por outro lado, esta redução de perdas leva a que os motores trabalhem, necessariamente, a temperaturas mais baixas, o que conduz a um prolongamento da sua vida útil. No entanto, apresentam também alguns aspetos menos positivos, principalmente a menor resistência dos motores de alta eficiência.

Em 2014 foi lançada a norma IEC/EN 60034-30-1 [21] pelo IEC (International Electrotechnical Commission) que define a classificação, por classes de rendimentos, como se pode observar na tabela 3.1, dos motores com as seguintes especificações:

- Motores elétricos mono/trifásicos de uma velocidade, 50 e 60 Hz;
- 2, 4, 6 ou 8 pólos;
- Potência útil: de 0.12 kW a 1000 kW;
- Tensão nominal: de 50 V a 1 kV;
- Funcionamento contínuo (S1);
- Temperatura ambiente: de -20 °C a +60 °C;
- Altitude: até 4000 m acima do nível do mar.

Tabela 3.1 - Classificação dos motores trifásicos segundo a norma IEC/EN 60034-30-1 [21]

IE4	Rendimento Super Premium
IE3	Rendimento Premium
IE2	Alto Rendimento
IE1	Rendimento Standard

A figura 3.3 mostra a eficiência dos motores das classes IE1, IE2, IE3 e IE4 para a gama de potências úteis já referida anteriormente.

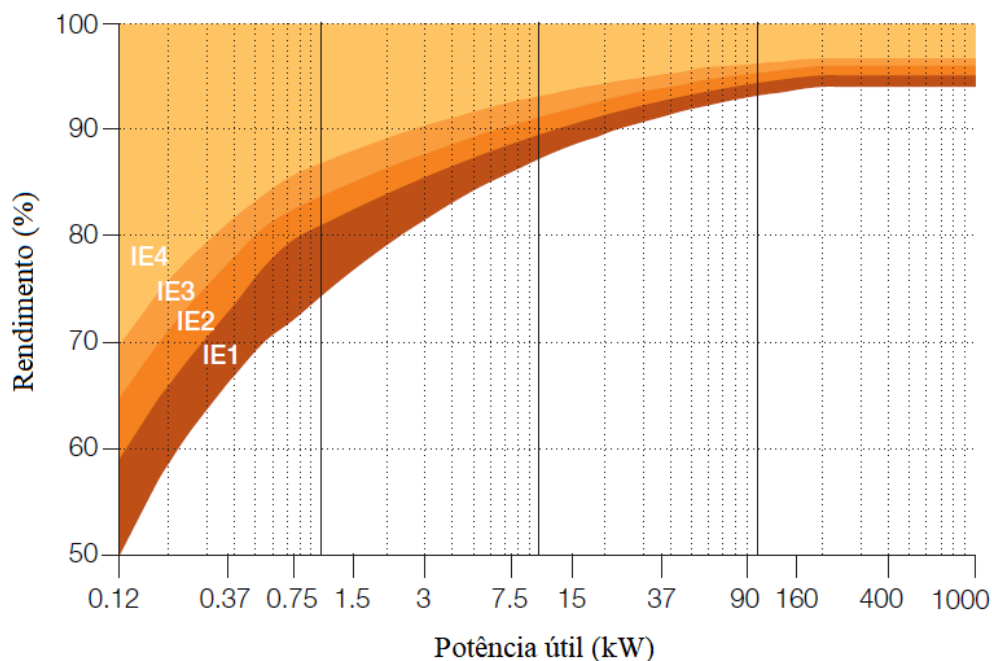


Figura 3.3 - Classes de eficiência IE para motor de 4 pólos, 50 Hz. [21]

Fazendo um pequeno exercício baseado na figura 3.3 e tomando por premissa a operação dos motores 24 horas por dia, 365 dias por ano, ou seja, 8760 h/ano, a tabela 3.2 apresenta o potencial de poupança de energia anual para motores de 4 pólos de várias potências, através da alteração de motores da classe IE1 para a classe IE4.

Tabela 3.2 - Potencial de poupança energética anual através da substituição de motores de 4 pólos de classe de eficiência IE1 para IE4

Classe de eficiência do motor	Potência útil (kW)			
	7,5	45	110	450
Eficiência máxima de motor IE1 (%)	88,7	93,1	94,5	95,1
Consumo energético (MWh/ano)	74,1	423,4	1019,7	4145,1
Eficiência mínima de motor IE4 (%)	92,6	95,4	96,3	96,7
Consumo energético (MWh/ano)	71,0	413,2	1000,6	4076,5
Redução energética mínima (%)	4,2	2,4	1,9	1,7
Redução energética mínima (MWh/ano)	3,1	10,2	19,1	68,6

É possível verificar na tabela 3.2 que os motores da classe IE4 são energeticamente mais eficientes, o que os torna operacionalmente mais económicos. No entanto, também requerem um investimento inicial mais alto: cerca de 20 a 30% face aos motores convencionais [22]. Assim, é necessário averiguar se este custo-benefício é economicamente viável. Uma das formas passa pelo cálculo do tempo de amortização simples, explicitado pela equação 3.2., que não contabiliza a taxa de inflação e a taxa de juro.

$$\text{tempo de amortização (anos)} = \frac{\text{Investimento adicional (€)}}{\text{Poupanças anuais (€/ano)}} \quad (3.2)$$

Em que as poupanças anuais são calculadas a partir da equação 3.3:

$$\text{Poupanças anuais (€/ano)} = t * C_{el} * \left(\frac{P_c}{\eta_c} - \frac{P_{ae}}{\eta_{ae}} \right) \quad (3.3)$$

em que:

t: número de horas de operação do motor num ano;

C_{el} : preço da eletricidade (€/kWh);

P_c : Potência útil do motor convencional (kW);

P_{ae} : Potência útil do motor de alto rendimento (kW);

η_c : Rendimento do motor convencional;

η_{ae} : Rendimento do motor de alto rendimento.

3.1.3 Utilização de variadores eletrónicos de velocidade

Segundo A. T. de Almeida et al. [23] a utilização de variadores eletrónicos de velocidade (VEV) apresenta-se como uma medida com grande potencial de poupança, uma vez que permitem ajustar a velocidade no motor à carga imposta e, com isso, reduzir os consumos de energia.

Recorrentemente, ocorrem casos de sobredimensionamento excessivo de motores devido a, por exemplo, se desconhecer com rigor a carga a que vai estar sujeito. Isto tem consequências negativas como [24]:

- Investimento inicial mais elevado na compra do motor bem como da aparelhagem associada;
- Rendimento do motor mais reduzido o que conduz a um funcionamento da instalação mais oneroso;
- Fator de potência mais baixo, o que resulta em consumos energéticos maiores e, portanto, custos maiores, ou na fatura elétrica, ou em equipamentos para compensar este abaixamento do fator de potência.

É nesta perspetiva que surge a utilidade dos VEV, já que permitem o ajustamento da velocidade do motor às condições existentes em cada momento. A velocidade dos motores de indução, que são os mais utilizados na indústria – (cerca de 90%), é determinada pela frequência da tensão de alimentação, pelo seu número de pólos e pelo seu fator de carga (a velocidade decresce ligeiramente à medida que a carga aumenta). Assim, para impor uma determinada velocidade aos motores, sem recurso a dispositivos mecânicos externos, é necessário ajustar a frequência da tensão de alimentação [25].

Este tipo de dispositivos apresentam, tipicamente, uma gama de potências de 0,55 kW a 55 kW [26], e convertem a tensão da rede de 50 Hz numa tensão contínua; posteriormente, produzem uma frequência variável determinada pelo operador, que pode variar entre os 0 e os 400 Hz. Os variadores eletrónicos de velocidade com inversor por fonte de tensão e modulação por largura de impulso são os mais comumente utilizados para o controlo da velocidade dos motores de indução trifásicos [23]. Um esquema típico é apresentado na figura 3.4. Basicamente é constituído por um retificador, que pode ser controlado ou não, que converte tensão alternada em contínua, e por um inversor que converte a tensão contínua em alternada.

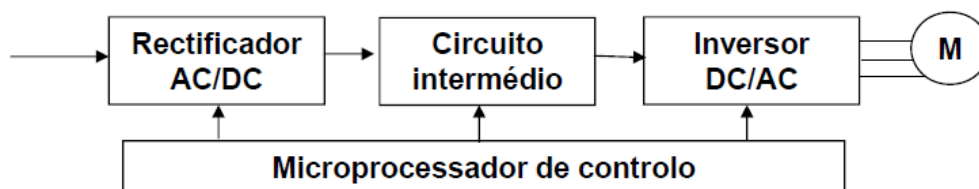


Figura 3.4 – Esquema típico de um VEV [26].

a) Análise técnica - Aplicações dos VEV

Os VEV são normalmente implementados no acionamento de bombas, ventiladores e compressores já que são os equipamentos com maior potencial de poupança energética, uma vez que normalmente os motores elétricos acoplados a estes equipamentos têm velocidades fixas correspondentes ao caudal nominal pretendido [16].

Na indústria, os caudais de fluido necessitam muitas vezes de ser regulados ao longo dos processos e os VEV constituem-se como a técnica mais apropriada desde que, no sistema, exista uma elevada gama de velocidades a ser controlada de forma precisa, já que permitem a equalização da velocidade do motor aos requisitos da carga.

No entanto, é usual na indústria encontrarem-se sistemas em que os caudais são regulados através de dispositivos de estrangulamento como válvulas reguladoras de pressão (*throttles*) e amortecedores de pulsações/vibrações (*dampers*), que, apesar de atingirem o fim pretendido, introduzem elevadas perdas de carga que, por sua vez, levam a grandes desperdícios energéticos.

Assim, o controlo por VEV de bombas e ventiladores permite a resposta a mudanças de condições de uma forma mais rápida e fiável que aqueles controlados por válvulas e *dampers*, algo que se acentua mais nos extremos da gama de fluxo onde as válvulas se tornam altamente não lineares, permitindo, precisamente nestes casos, reduções significativas nos consumos quando comparados com o controlo por estrangulamento de fluxo.

Por outro lado, os VEV permitem também a operação dos motores de indução a velocidades mais elevadas que a velocidade nominal, desde que os rotores suportem esse aumento de velocidade.

Percebe-se então que a utilização dos VEV permite a extensão da gama de operação dos motores, possibilitando, dentro de certos limites, mitigar certas aplicações que eram limitadas pela capacidade dos ventiladores e bombas [25].

Algumas das vantagens da utilização dos VEV em motores elétricos na indústria são [24]:

- Economias de energia entre os 20-25%, podendo atingir os 50%;
- Arranque e paragem do motor controlados já que os picos de corrente são limitados;
- Aumento da vida útil do motor;
- Correção do fator de potência;
- Aumento da produtividade;
- Capacidade de *bypass* em caso de falha;
- Melhoramento no controlo do processo e na qualidade do produto;
- Redução da quantidade de partes mecânicas já que os VEV além de compactos já incorporam dispositivos de proteção para o motor (térmicos, magnéticos, falta de fase).

Apesar destas vantagens é necessário ter em conta que os VEV são aconselhados quando os motores aos quais são acoplados funcionam numa carga variável a menos de 50% da capacidade, durante pelo menos 20% do tempo de operação a que estão sujeitos, e no mínimo durante 2000 horas por ano.

b) Análise económica dos VEV

Uma vez que os variadores eletrónicos de velocidade se têm tornado cada vez mais atrativos quer em termos económicos quer a nível de desempenho e fiabilidade, permitindo maiores reduções nos consumos energéticos e menores tempos de amortização, é necessário perceber o custo/benefício da sua instalação e operação, e averiguar até que ponto é atrativo ou não o investimento.

Assim, para averiguar a viabilidade económica da implementação de um VEV, tendo em vista a redução dos gastos energéticos associados, é crucial ter em consideração o rendimento global para os diversos regimes. O controlo da velocidade pode permitir poupanças energéticas bastante significativas em determinados tipos de carga. No entanto, essa redução é feita através de um dispositivo que introduz perdas adicionais que, em alguns regimes de carga, pode até conduzir a poupanças negativas. De notar também que o próprio rendimento do VEV tende a decrescer à medida que o seu fator de carga decresce [23]:

Deste modo, a poupança anual, para i regimes de carga, relativamente a uma situação inicial, em que não há controlo de velocidade, pode ser dada pela equação 3.4 [24]:

$$\text{Poupanças anuais (€/ano)} = \sum_i \left[t_i C_{el,i} * \left(\frac{P_{m,i}}{\eta_{m,i}} - \frac{P_{VEV-m,i}}{\eta_{VEV-m,i}} \right) \right] \quad (3.4)$$

em que:

i : regime de carga;

t_i : são os períodos de funcionamento do motor no regime de carga i (h/ano);

$C_{el,i}$: custo médio da eletricidade durante o período (€/kWh);

$P_{m,i}$: potência útil do motor no regime de carga i (kW);

$P_{VEV-m,i}$: potência útil do motor com VEV no regime de carga i (kW);

$\eta_{m,i}$: Rendimento do motor no regime de carga i ;

$\eta_{VEV-m,i}$: Rendimento do motor com VEV no regime de carga i .

3.2 Sistemas de bombagem

Como se referiu em 3.1, na União Europeia os motores elétricos representam cerca de 70% do consumo de energia elétrica na indústria, sendo que cerca de 19% desse total se deve a sistemas de bombagem (figura 3.1). É precisamente esta disseminação que os torna tão atrativos no que toca a medidas de eficiência energética [17].

Assim, é necessário, em primeiro lugar, identificar os sistemas que têm maiores perdas e conceber um plano de otimização, que normalmente passa por [27]:

- Analisar os sistemas de bombagem e identificar os que têm maior potencial de melhoramento, isto é, os maiores, com maiores tempos de operação, ou os que tenham maiores problemas de manutenção e operação;
- Fazer uma análise detalhada dos sistemas identificados;
- Desligar bombas desnecessárias; usar interruptores de pressão de modo a controlar o número de bombas em funcionamento quando o caudal varia;
- Repor as folgas internas das bombas;
- Trocar ou modificar as bombas sobredimensionadas;

- Instalar bombas corretamente dimensionadas;
- Instalar uma bomba mais pequena responsável pelos caudais mais baixos;
- Alterar o rotor das bombas de modo a que os requisitos do sistema condigam com as condições à saída das bombas sempre que a altura manométrica das mesmas for superior ao requerido.
- Instalar VEV ou montar bombas em paralelo por exemplo de modo a variar o caudal de acordo com o desejado sem recorrer a válvulas reguladores de caudal ou fazendo *bypass* ao excesso de caudal;
- Substituir os motores elétricos convencionais por motores de alto rendimento;
- Extinguir fugas e reparar válvulas danificadas ou até mesmo trocar estas válvulas por válvulas mais eficientes energeticamente;
- Criar um programa de manutenção periódico.

No que diz respeito aos principais problemas operacionais das bombas, estes resumem-se a [24]:

- Necessidade excessiva de manutenção de bombas que pode indicar uma de três coisas:
 - Bomba em cavitação;
 - Bomba bastante desgastada;
 - Inadequabilidade para a operação a que a bomba está sujeita.
- Excesso de estrangulamento na descarga. Uma bomba estrangulada na sucção, com carga e caudal constantes, indica um excesso de capacidade;
- Bomba ruidosa é, muitas vezes, um indicador da existência de cavitação, enquanto que a existência de uma queda de pressão exagerada é, normalmente, detetada pelo ruído proveniente das válvulas de controlo ou *bypass*.
- Alterações nas condições de projeto já que estas mudanças podem conduzir a perda de eficiência por parte das bombas;
- Sobredimensionamento excessivo das bombas que conduz a um desperdício energético assinalável já que a pressão imposta ao escoamento é muito superior à imposta pelo circuito.

Para este conjunto de problemas, acima referidos, apresentam-se as seguintes soluções:

- Substituição das bombas sobredimensionadas que se constitui como a maior fonte de ineficiência energética em sistemas de bombagem. Obviamente tem de haver uma avaliação das soluções existentes antes de avançar para esta troca já que o mesmo efeito se pode conseguir com a mudança de impulsores ou o uso de VEV, por exemplo, tudo depende do que for mais rentável;
- Utilização de uma bomba auxiliar de aumento de pressão, mais pequena, para os casos em que há um utilizador de alta pressão. Desta forma garante-se a rentabilização do sistema já que assim este pode trabalhar a uma pressão mais baixa e conseqüentemente a uma potência mais baixa;
- Limpeza ou alteração do diâmetro dos impulsores de forma a corrigir o sobredimensionamento das bombas. No entanto, esta medida tem de ser avaliada caso a caso já que pode conduzir a um abaixamento drástico do rendimento hidráulico da bomba;
- Reposição das folgas internas permitindo a restauração da capacidade e do rendimento das bombas que vão diminuindo fruto do desgaste, causador de mais fugas internas e maiores folgas entre componentes;
- Aplicação de revestimentos na bomba, sobretudo na voluta, de forma a reduzir as perdas por atrito.

Focando-nos agora nos sistemas de bombagem, os principais problemas são os seguintes:

- Bombas com grandes variações de caudal ou pressão. É desperdiçada energia sempre que os escoamentos ou pressões normais são menores que 75% dos seus valores

máximos. Normalmente este desperdício resulta de três razões principais: a) estrangulamento excessivo, b) grandes caudais de *bypass* ou c) funcionamento de bombas desnecessárias;

- Desvio de caudal por *bypass* por sistemas de controlo ou por orifícios de proteção de perdas de pressão, como visto anteriormente, constitui uma fonte de desperdício energético;
- Em sistemas com múltiplas bombas a ineficiência energética deve-se, usualmente, às seguintes razões: *bypass* do excesso de caudal, operação de bombas desnecessárias, excesso de pressão, ou por existir um grande aumento de caudal entre bombas;

Enquanto que as soluções mais comuns passam por:

- Desligar as bombas desnecessárias sempre que as necessidades da instalação assim o permitirem;
- Utilizar VEV nos motores elétricos das eletrobombas ou, em alternativa, utilizar várias bombas em paralelo que permitam um funcionamento de acordo com as necessidades. É uma medida que, se o sistema funcionar a baixo caudal, aumenta a eficiência energética já que as bombas desnecessárias são desligadas e as outras trabalham ao caudal nominal, isto é, com rendimentos elevados;
- Instalar contadores volumétricos e elétricos para monitorizar o desempenho do sistema de modo a controlar o seu funcionamento e até mesmo formar uma base de dados que sirva de base para um eventual plano de melhoria no controlo.

Um sistema de bombagem é composto por vários componentes, e como tal a sua eficiência global é afetada pelas eficiências individuais de cada um desses componentes. Nas figuras 3.5 e 3.6 evidencia-se a importância da escolha de componentes o mais eficientes possível, e mostra-se a preponderância deste facto onde um sistema convencional consome mais do dobro da potência absorvida por um sistema otimizado [28].

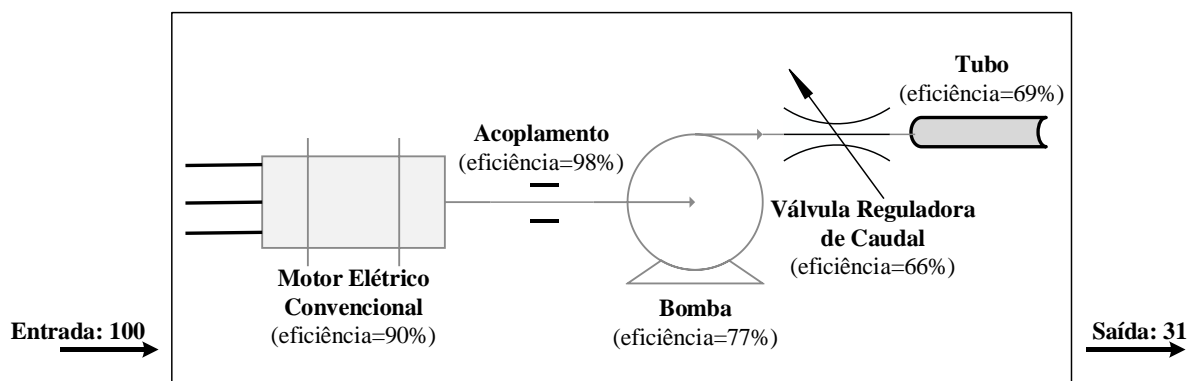


Figura 3.5 - Sistema de bombagem convencional em que a entrada representa a potência elétrica fornecida e a saída representa a potência mecânica disponibilizada pelo sistema de bombagem convencional (adaptado de [28]).

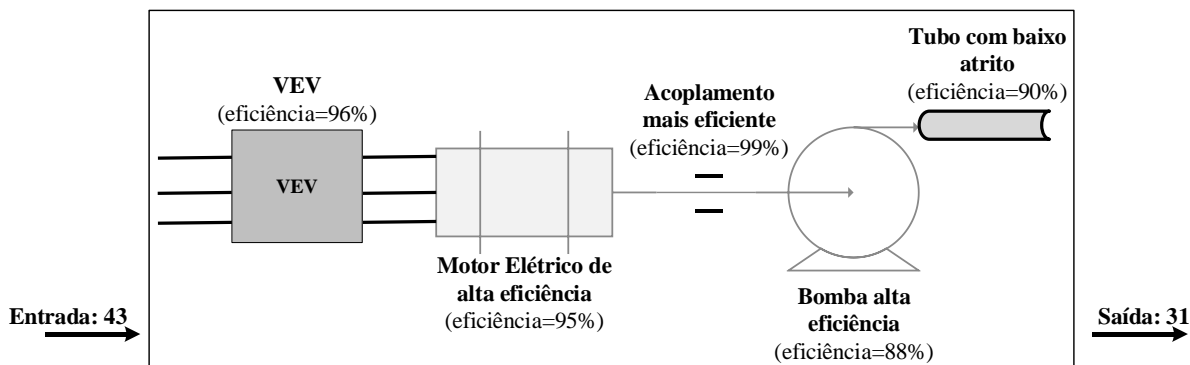


Figura 3.6 - Sistema de bombeamento de alta eficiência em que a entrada representa a potência elétrica fornecida e a saída representa a potência mecânica disponibilizada pelo sistema de bombeamento otimizado (adaptado de [28]).

Pela análise das figuras 3.5 e 3.6 constata-se, relativamente à eficiência global, um incremento de 41%: no caso do sistema convencional tem-se uma eficiência global de 31% enquanto que no sistema otimizado esta é de 72%. Isto deve-se à aplicação de VEV, sendo possível ajustar a velocidade de rotação dos motores elétricos aos requisitos, e à substituição das bombas convencionais por bombas mais eficientes, conseguindo-se obter um sistema de bombeamento de alta eficiência.

No entanto, a maior economia energética é obtida pela aplicação de VEV [16], o que é mais aprofundado na secção seguinte.

3.2.1 Sistemas de bombeamento com VEV

Como se pode observar pela figura 3.7, a aplicação de VEV permite uma clara redução do consumo energético comparativamente com o convencional controlo por estrangulamento. Vemos que se reduzirmos o caudal através do controlo standard o consumo desce menos acentuadamente do que no caso em que essa redução de caudal é feita por redução da velocidade da bomba [29].

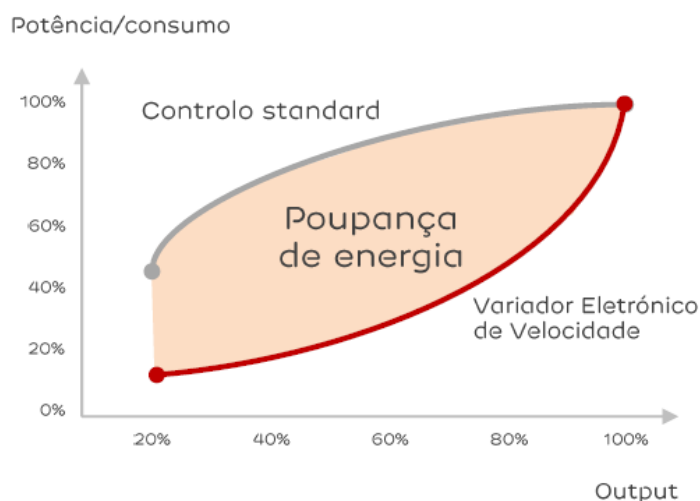


Figura 3.7 - Potência relativa de entrada: controlo por estrangulamento (standard) vs. controlo por VEV [29].

Para além desta evidente poupança energética a aplicação de VEV a sistemas de bombeamento acarreta outras vantagens como [26]:

- Arranque e paragem suaves do motor já que permite a definição de rampas de velocidade;
- Diminuição dos choques mecânicos através da definição de rampas de aceleração e desaceleração.

De um modo geral, a potência mecânica resulta do produto do binário pela velocidade angular. Em bombas centrífugas e ventiladores (carga binária quadrática) a potência requisitada varia aproximadamente com o cubo da velocidade de rotação do motor [25]. Assim sendo, pode-se perceber que num sistema de bombagem apenas 51% da potência total é necessária para obter 80% do caudal nominal [30].

Segundo a ABB, a utilização de variadores eletrônicos de frequência normalmente permite poupanças energéticas entre 30 a 50%, podendo em alguns casos chegar aos 80%. Afirma também que alterações bastante pequenas como a redução em 10% da velocidade (5Hz) significam 27% de poupança energética [30].

Em sistemas em que existem várias bombas em paralelo e em que a altura manométrica a vencer não é um fator importante a substituição do controlo on/off pelo controlo por VEV de forma a obter o caudal pretendido pode constituir-se como uma solução bastante rentável, como se pode observar pela figura 3.8, em que se consegue, para o mesmo caudal, uma redução de 75% na potência requerida pelo sistema de bombagem [23].

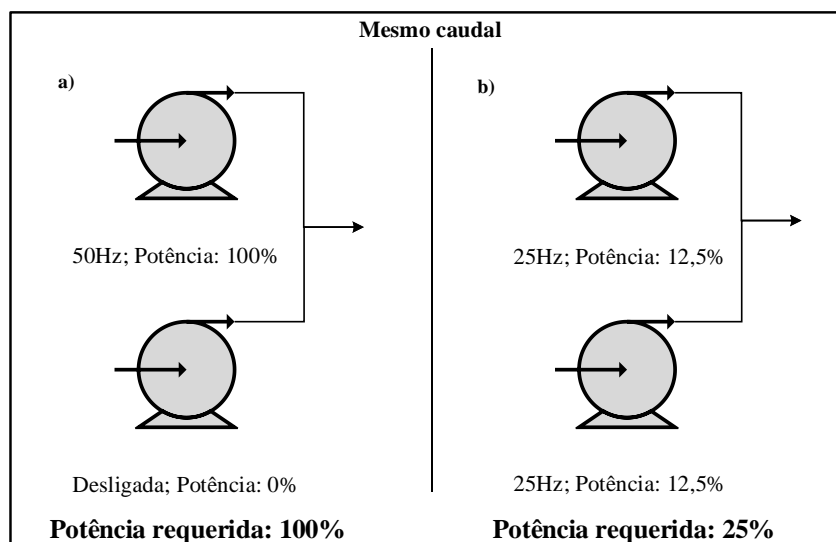


Figura 3.8 – a) Controlo on/off ; b) Controlo por VEV (adaptado de [23]).

4 OpenModelica

Neste capítulo far-se-á a apresentação, de um modo geral, do procedimento para a “construção” de um circuito de água na ferramenta OpenModelica Connection Editor (OMEdit) [31], bem como dos principais componentes utilizados na construção dos circuitos que vão ser analisados no capítulo seguinte.

O OpenModelica é um *software* gratuito que permite a modelação de sistemas físicos como sistemas mecânicos, elétricos e magnéticos. Os componentes/equipamentos existentes estão sob a forma de ícones que podem ser arrastados para a janela principal e formar o circuito pretendido. Estes ícones estão distribuídos por várias bibliotecas:

- a biblioteca *Modelica* desenvolvida pela Modelica Association que é a biblioteca principal do *software* e que serve de base às restantes bibliotecas;
- a biblioteca *ThermoPower* desenvolvida pelo Politécnico de Milão que faz uma compilação dos componentes/equipamentos existentes na biblioteca *Modelica*, relacionados com a energia térmica;
- a biblioteca *WaterWatt* que foi desenvolvida a propósito do projeto e que deriva da biblioteca *ThermoPower*. Esta está estruturada em três famílias:
 - *Cold Water* utilizada para modelar circuitos industriais em que os fenómenos presentes sejam essencialmente hidráulicos, onde a água se encontra no estado líquido e à temperatura ambiente;
 - *Water Steam* utilizada para modelar circuitos industriais em que os fenómenos presentes sejam hidráulicos e térmicos, onde a água pode assumir os vários estados, isto é, líquido, vapor ou vapor húmido;
 - *Slurry* que, à semelhança da *Cold Water*, é utilizada para modelar circuitos industriais em que os fenómenos presentes sejam essencialmente hidráulicos, onde os fluidos se encontrem no estado líquido. No entanto, os fluidos podem ser água, polpa ou pasta de papel.

Cada componente tem as equações governativas do seu funcionamento associadas e existe a possibilidade de alterar essas equações, bem como acrescentar variáveis. A título de exemplo, o código das bombas existente na biblioteca *Modelica* não incluía o rendimento do motor elétrico que foi adicionado na biblioteca *WaterWatt* de forma a determinar o consumo energético efetivo associado a cada bomba. Por outro lado, é também possível criar equipamento não existente nas bibliotecas disponíveis, como é o caso do forno, laminagem, prensa, permutador de calor ou condensador barométrico que tiveram de ser criados de forma a ser possível modelar os casos de estudo e que fazem parte da biblioteca *WaterWatt*.

Na figura 4.1 mostra-se o aspeto geral da interface onde se podem ver as bibliotecas anteriormente descritas.

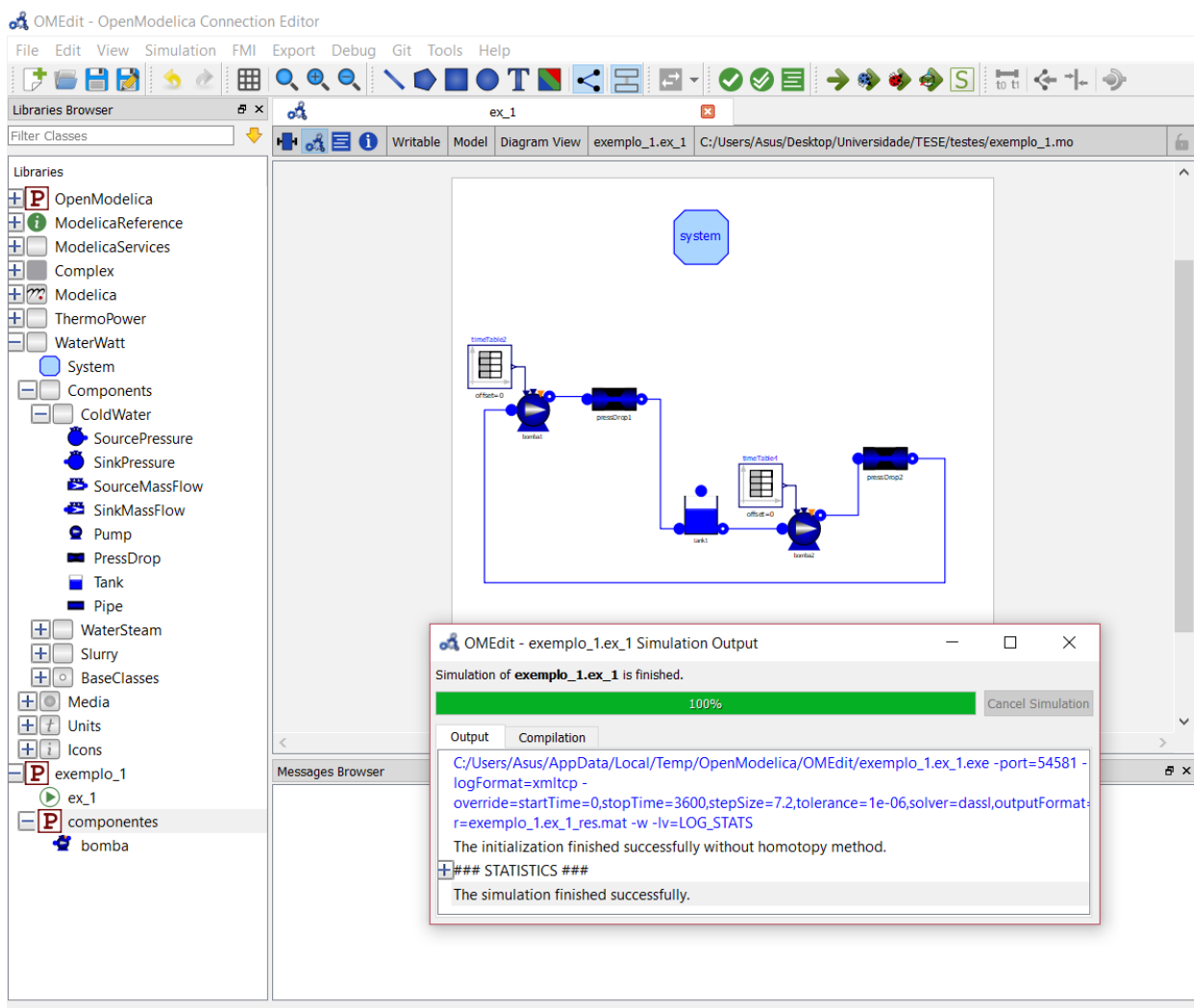



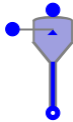


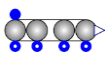








Figura 4.1 - Aspeto geral do *software* OpenModelica.

De forma a tornar mais claro o processo de construção de um circuito faz-se, de seguida, uma listagem dos componentes e equipamentos existentes assim como dos que foram criados. Para cada um deles indicar-se-ão os parâmetros obrigatórios a introduzir para que a simulação seja possível.

Tabela 4.1 – Componentes e equipamento OpenModelica

Componente	Ícone	Parâmetros a introduzir
Fonte de caudal		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Caudal mássico ✓ Pressão ✓ Temperatura
“Reservatório” de caudal		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacitância hidráulica
Tubagem		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Área da secção transversal, perímetro, comprimento e elevação ✓ Caudal mássico ✓ Perda de carga

Componente	Ícone	Parâmetros a introduzir
Perda de carga		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Caudal mássico ✓ Perda de carga
Tanque		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Área transversal ✓ Volume ✓ Nível da água inicial
Bomba		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Curva da eficiência (3 pontos) ✓ Curva da altura manométrica (3 pontos) ✓ Ponto de funcionamento (caudal, altura manométrica e velocidade angular) ✓ Rendimento do motor de acionamento
Condensador barométrico		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Caudal mássico de água
Torre de arrefecimento		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Coeficiente de transferência de massa ✓ Coeficiente de transferência de calor ✓ Caudal mássico de água ✓ Caudal volúmico de ar ✓ Área de transferência de calor ✓ Potência e velocidade angular do ventilador
Permutador de calor de tubos		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Caudais mássicos dos dois fluxos ✓ Temperaturas de entrada dos fluxos ✓ Perda de carga ✓ Comprimento, área e perda de carga da tubagem
Prensa		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fração do caudal que cai para cada um dos tanques associados
Condições de funcionamento (<i>Time Table</i>)		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pode ser ligado a bombas, fontes de caudal, fornos, entre outros. A título de exemplo no caso das bombas pode-se definir a velocidade de rotação desejada que pode ser diferente da nominal e nos fornos a potência térmica transferida para a água de arrefecimento.
Fonte de calor		<ul style="list-style-type: none"> ✓ A potência é imposta por um <i>Time Table</i>
Meio de transferência de calor		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Condutividade térmica ✓ Capacidade térmica volumétrica ✓ Comprimento e espessura

Componente	Ícone	Parâmetros a introduzir
Forno		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Caudal mássico ✓ Comprimento, área e perda de carga da tubagem ✓ Potência térmica transferida para a água (definida num <i>Time Table</i>)
Laminagem		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Caudal mássico ✓ Comprimento, área e perda de carga da tubagem ✓ Potência térmica transferida para a água (definida num <i>Time Table</i>)
Condições exteriores		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pressão ambiente ✓ Temperatura bolbo seco ✓ Temperatura bolbo húmido

Em termos de simulação esta é feita em regime dinâmico e procura-se atingir o regime estacionário de modo a validar as condições fornecidas pela indústria.

No que diz respeito a outputs, conseguem-se obter todo o tipo de informações para cada equipamento desde de consumo de eletricidade, os caudais envolvidos, as pressões de trabalho, basta para isso na janela de resultados selecionar-se o que é pretendido analisar.

5 Casos de estudo

Neste capítulo serão apresentados os casos de estudo bem como os resultados obtidos nas simulações no OpenModelica. De referir que as condições de funcionamento geral das instalações, bem como as características de cada um dos seus equipamentos constituintes, foram fornecidos pelos responsáveis das empresas, tais como curvas características das bombas, perdas de carga do circuito e comprimentos das tubagens, velocidades das bombas e ventiladores.

O custo da eletricidade usado para o cálculo do *payback* foi de 0,0923 €/kWh baseado nos dados da ERSE [32].

Os preços dos variadores eletrónicos de velocidade foram retirados do catálogo da ABB [33], enquanto que o preço dos motores de indução trifásicos de classe de eficiência IE3 foram retirados do catálogo da Siemens [34].

O custo apresentado para a manutenção de uma bomba é de 73 €, calculado tendo em conta que seriam necessários dois dias de trabalho de um técnico de manutenção com salário médio de 800 € mensais. Apenas foi contabilizada a mão de obra, sem se ter em conta o custo inerente à troca ou reparação de alguns dos componentes das bombas, por dificuldade em estimar o mesmo.

Como sugerido pela referência [12], para implementação da medida da manutenção das bombas foi estimada uma redução de eficiência das mesmas tendo em conta os anos de operação da seguinte forma:

- redução de 5% de eficiência em bombas com mais de 5 anos;
- redução de 10% de eficiência em bombas com mais de 10 anos;
- redução de 15% em bombas com mais de 20 anos.

Por último, quanto aos tempos de operação dos circuitos, estes foram fornecidos pelos respetivos responsáveis das empresas à exceção dos 3 últimos casos de estudo. Esses casos correspondem aos casos de estudo portugueses em que os dados foram recolhidos em campo numa campanha de medições de três dias de forma a compilar os consumos de energia e água dos respetivos processos industriais permitindo, assim, a calibração dos modelos numéricos. Esta campanha foi considerada representativa do funcionamento normal anual das respetivas empresas.

Os resultados da validação dos circuitos, a seguir apresentados, são expostos no anexo A.

5.1 Caso de estudo 1 - Circuito aberto de arrefecimento de um processo de laminagem

Este circuito faz parte de um processo de produção de fio de aço inoxidável a partir de lingotes. Um dos passos deste processo é a laminagem, processo este que precisa de ser continuamente refrigerado para proteção do equipamento e para se atingir a qualidade desejada do material, além de que a água também é usada para quebrar e retirar os óxidos

formados durante o processo. É importante referir também que as necessidades de refrigeração não são constantes ao longo do tempo.

O circuito apresenta quatro torres de arrefecimento equipadas com ventiladores de 22 kW e velocidade nominal de 1500 rpm, três grupos de bombagem, os grupos 1 e 2 equipados com bombas de potência igual a 82 kW, caudal volúmico de 500 m³/h, altura manométrica de 48 m e velocidade nominal de 1450 rpm, e o grupo 3 equipado com bombas de potência 92 kW, caudal volúmico 600 m³/h, altura manométrica 47.5 m e velocidade nominal de 1450 rpm, todos eles acionados por motores de indução trifásicos de rendimento 90%. Possui também 2 filtros de areia, um separador de óleo e um separador de partículas sólidas em suspensão por ciclone, como se pode observar na figura 5.1.

Por último, é importante referir que o circuito opera 6600 horas por ano e que os grupos de bombagem têm mais de 10 anos de operação.

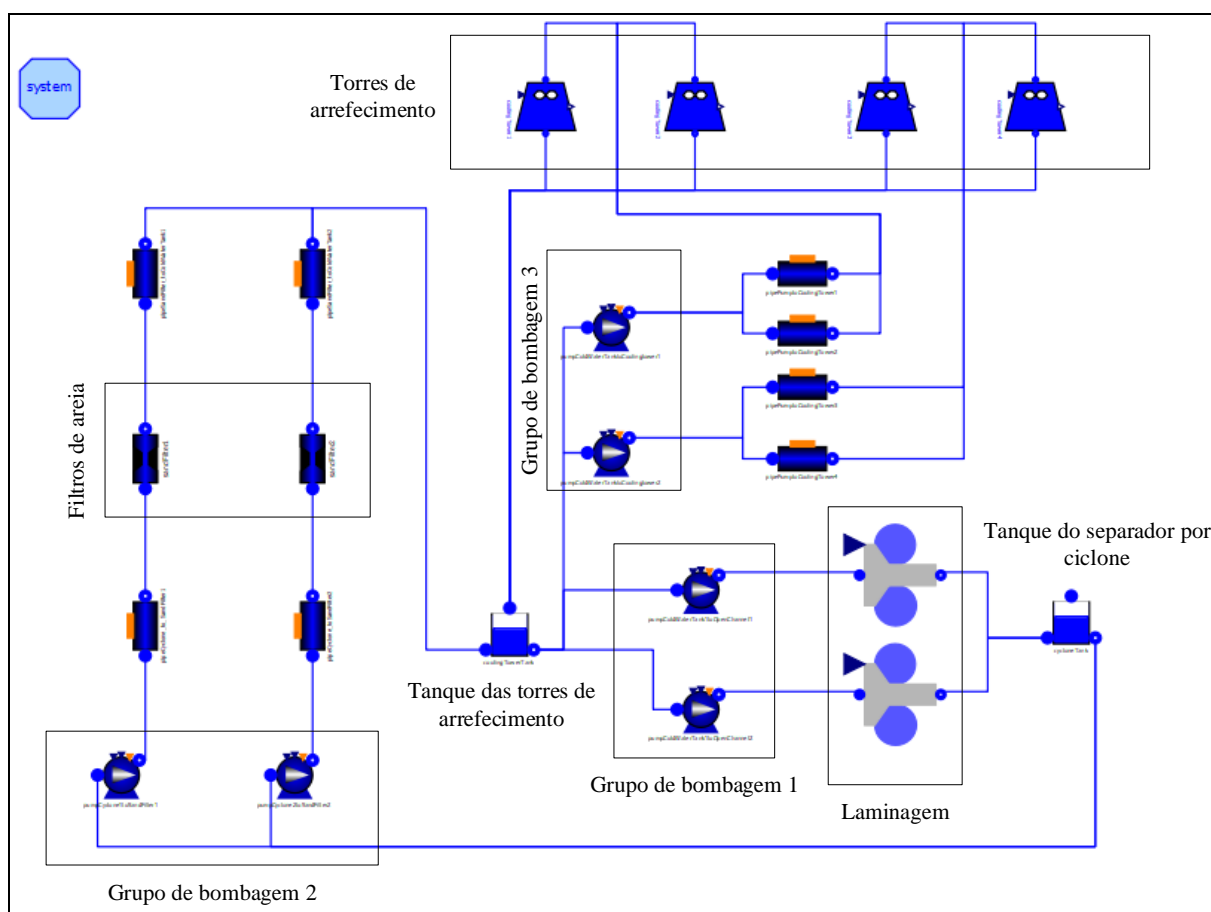


Figura 5.1 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento aberto de um processo de laminagem [31].

Na tabela 5.1 são apresentados os resultados da simulação obtidos com as condições operacionais fornecidas pelos responsáveis da empresa em questão bem como os resultados obtidos depois da introdução das propostas de melhoria energética.

Tabela 5.1 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética

Medidas	Consumo de energia (kWh)		Poupanças anuais (kWh)	Custo da medida (€)	Payback (anos)
	Antes	Depois			
Acoplar VEV ao grupo de bombagem 1	1.199.365	967.630	231.735 (19%)	21.622	1,0
Acoplar VEV ao grupo de bombagem 2	1.198.993	967.941	231.051 (19%)	21.622	1,0
Acoplar VEV ao grupo de bombagem 3	1.354.993	1.088.757	266.236 (20%)	21.622	0,9
Alterar os filtros (1,3 bar para 0,5 bar)	119.167	73.333	146.667 (4%)	42.196	3,1
Utilizar motores de alta eficiência IE3	3.753.351	3.540.893	212.458 (6%)	134.916	6,9
VEV e motor de alta eficiência IE3 no GB1	1.199.365	912.858	286.507 (24%)	66.594	2,5
VEV e motor de alta eficiência IE3 no GB2	1.198.993	913.152	285.841 (24%)	66.594	2,5
VEV e motor de alta eficiência IE3 no GB3	1.354.993	1.027.130	327.863 (24%)	66.594	2,2
Acoplar VEV aos ventiladores	580.800	423.403	157.397 (27%)	14.872	1,0
Manutenção das bombas	4.277.526	3.753.351	524.175 (12%)	436	0,009
VEV e manutenção das bombas do GB1	1.368.233	967.630	400.603 (29%)	21.768	0,6
VEV e manutenção das bombas do GB2	1.367.771	967.941	399.829 (29%)	21.768	0,6
VEV e manutenção das bombas do GB3	1.541.522	1.088.757	452.765 (29%)	21.768	0,5

A aplicação de VEV nas bombas e ventiladores permite economias de energia significativas à volta dos 20% e 27%, respetivamente com um período de amortização baixo de cerca de um ano em ambos os casos, o que se torna bastante apelativo em termos industriais.

Por seu turno, a manutenção das bombas afigura-se como uma das mais apelativas já que possui um período de amortização quase instantâneo e permite economias energéticas da ordem dos 12%, que embora sejam bastante inferiores às anteriores têm bastante relevância dado o baixo investimento necessário.

A utilização de motores de alta eficiência, por sua vez, introduz melhorias energéticas com alguma relevância da ordem dos 6%, no entanto, esta medida pressupõe um período de amortização do investimento de cerca de 7 anos pelo que a sua introdução na indústria se torna pouca apelativa. Apesar desta desvantagem, em caso de fim de vida de um motor ou necessidade de substituição, é uma medida interessante tendo em conta o seu potencial de economia de energia. No entanto, se a esta medida juntarmos a aplicação de um variador eletrónico de velocidade os períodos de amortização baixam drasticamente, tornando-se um investimento bem mais apelativo.

No caso dos filtros de areia, verificou-se que a sua troca por filtros que introduzam uma menor perda de carga é uma medida que deve ser equacionada pois permite reduções de 4%

no consumo energético e com períodos de amortização aceitáveis industrialmente, isto é, aproximadamente 3 anos.

Por último, a medida que mais economias energéticas possibilita é a aplicação de VEV aliada à manutenção das bombas apresentando poupanças de 29 % face aos consumos anteriores além de apresentar um retorno do investimento de 7 meses o que é bastante atrativo.

5.2 Caso de estudo 2 - Circuito fechado de arrefecimento de um alto forno

Este circuito é responsável pela refrigeração de um alto forno de forma a evitar que este se danifique quando as temperaturas passam os 2200 °C.

Assim sendo, é constituído pelo grupo de bombagem 1 (duas bombas com potência de 470 kW, caudal volúmico de 2771,5 m³/h, altura manométrica de 52 m e velocidade nominal de 1490 rpm, acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 94,5%) e dois permutadores de calor. O calor é transferido para o ambiente através de um circuito secundário constituído pelo grupo de bombagem 2 (duas bombas: Sulzer e Margam com potência de 555 e 455 kW, caudal volúmico de 1350 m³/h, altura manométrica de 106 e 97 m e velocidade nominal de 930 e 1057 rpm, respetivamente acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 94,5%) e três torres de arrefecimento equipadas com ventiladores de 67 kW de potência e velocidade nominal de 2900 rpm, como se pode observar na figura 5.2.

O circuito opera 8760 horas por ano e os ventiladores das torres de arrefecimento já têm variadores de velocidade instalados bem como as bombas. Os grupos de bombagem têm mais de 10 anos de serviço.

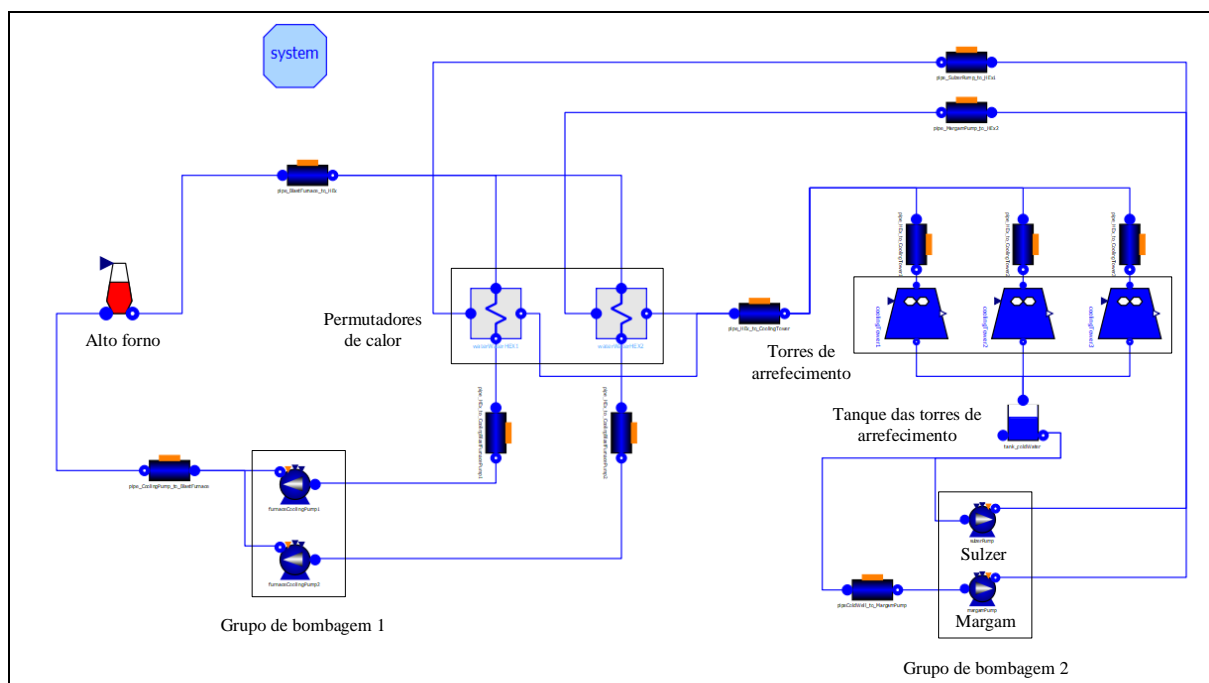


Figura 5.2 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento fechado de um alto forno [31].

Na tabela 5.2 são apresentados os resultados da simulação obtidos com as condições operacionais fornecidas pelos responsáveis da empresa em questão bem como os resultados obtidos depois da introdução das propostas de melhoria energética.

Tabela 5.2 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética

Medidas	Consumo de energia (kWh)		Poupanças anuais (kWh)	Custo da medida (€)	Payback (anos)
	Antes	Depois			
Ajustar VEV do grupo de bombagem 1	8.553.229	5.681.245	2.871.984 (34%)	-	-
Ajustar VEV do grupo de bombagem 2	9.029.466	7.972.940	1.056.526 (12%)	-	-
Manutenção das bombas do GB1	9.691.661	8.553.229	1.138.432 (12%)	146	0,0014
Manutenção das bombas do GB2	10.410.069	9.029.466	1380602 (13%)	146	0,0011
Ajustar VEV dos ventiladores	1.760.760	1.268.896	491.864 (28%)	-	-

Neste caso de estudo, como referido anteriormente, as bombas e os ventiladores apresentam VEV. Assim sendo, foi estudado o seu ajuste para o modo de operação ótimo, tendo-se verificado que existe uma margem considerável principalmente no grupo de bombagem 1 e nos ventiladores com poupanças de 34% e 28%, respetivamente. Visto que esta medida não implica qualquer tipo de custo apresenta-se atrativa a nível industrial com poupanças imediatas tanto a nível de energia como de água.

A manutenção das bombas, mais uma vez apresenta-se como uma medida apelativa implicando um investimento reduzido e um período de amortização quase instantâneo, permitindo economias energéticas da ordem dos 12%.

Neste caso, a utilização de motores de alta eficiência não foi equacionada uma vez que ambos os grupos de bombagem já estavam equipados com motores de classe IE3.

5.3 Caso de estudo 3 - Circuito aberto de arrefecimento para produção de aço estrutural (vergalhões) e bobines de fio

Este circuito é responsável pela refrigeração de vários processos industriais na fábrica, entre eles produção de bobines de fio de aço e vergalhões. Cada processo tem exigências diferentes em termos de caudal de água e pressão necessários, e por isso mesmo a instalação já está equipada com variadores de frequência.

Existe na instalação um grupo de bombagem (duas bombas de potência de 137 kW, caudal volumico de 360 m³/h, altura manométrica de 113 m e velocidade nominal de 2500 rpm, acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 95%) e um conjunto de perdas de carga correspondentes a cada processo de produção, como se pode observar na figura 5.3.

O circuito opera 7785 horas por ano e o grupo de bombagem conta com mais de 5 anos de serviço.

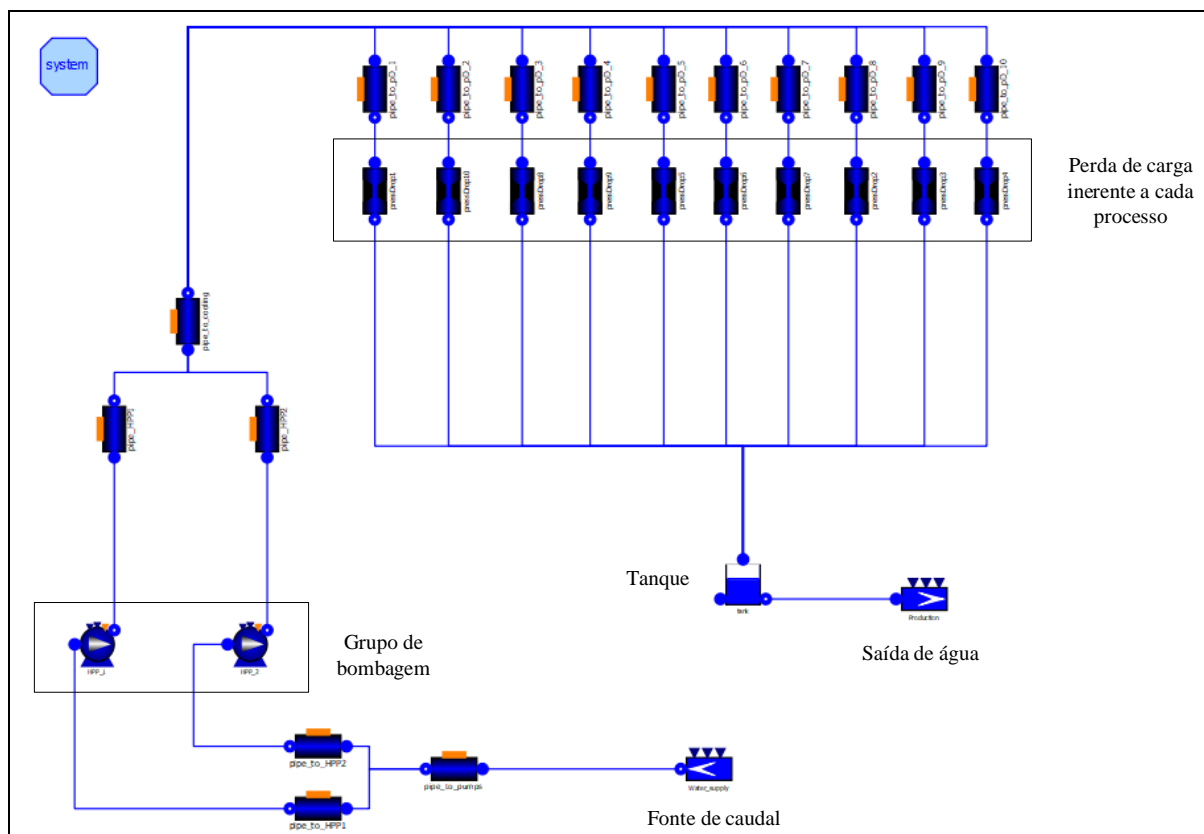


Figura 5.3 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento aberto para produção de vergalhões e bobinas de fio [31].

Na tabela 5.3 são apresentados os resultados da simulação obtidos com as condições operacionais fornecidas pelos responsáveis da empresa em questão bem como os resultados obtidos depois da introdução das propostas de melhoria energética.

Tabela 5.3 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética

Medidas	Consumo de energia (kWh)		Poupanças anuais (kWh)	Custo da medida (€)	Payback (anos)
	Antes	Depois			
Ajustar VEV do grupo de bombagem	2.257.292	2.205.397	51.895 (2,3%)	-	-
Manutenção das bombas	2.404.709	2.257.292	147.417 (6,5%)	146	0,01

O ajuste dos VEV do grupo de bombagem, apesar de não introduzir poupanças energéticas significativas, constitui-se como uma medida a ser aplicada já que tem retorno imediato. Neste caso de estudo, foi notório que o processo estava bem controlado, daí as reduzidas poupanças obtidas através da introdução desta medida.

A manutenção das bombas é uma medida apelativa devido ao reduzido investimento necessário e ao período de amortização quase instantâneo além de permitir economias energéticas da ordem dos 6,5 %.

À semelhança do caso anterior, a utilização de motores de alta eficiência não foi equacionada uma vez que o grupo de bombagem já se encontra equipado com motores de classe IE3.

5.4 Caso de estudo 4 - Circuito fechado de arrefecimento de um alto forno

À semelhança do que acontecia no circuito 5.2, este circuito também tem como objetivo fazer o arrefecimento de um alto forno. Por isso mesmo, dispõe dos mesmos equipamentos, isto é, uma bomba com potência de 140 kW, caudal volúmico de 683,89 m³/h, altura manométrica de 60,89 m e velocidade nominal de 1488 rpm, acionada por um motor de indução trifásico de rendimento 95%) e um permutador de calor, como se pode observar na figura 5.4. O calor é transferido para outro circuito de água da fábrica que não foi objeto de análise neste caso de estudo já que não foram fornecidas informações à cerca do mesmo.

O circuito opera 8760 horas por ano e a bomba já tem variadores de velocidade, embora as necessidades de arrefecimento sejam constantes ao longo do ano, já que a bomba foi escolhida tendo em conta o custo e não o circuito onde ia ser inserida.

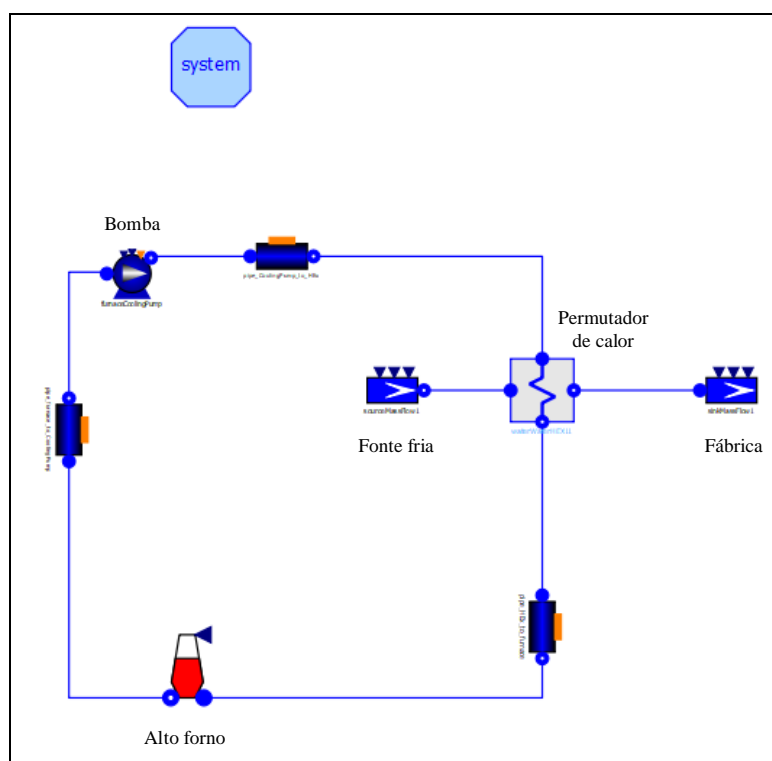


Figura 5.4 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento fechado de um alto forno [31].

Na tabela 5.4 são apresentados os resultados da simulação obtidos com as condições operacionais fornecidas pelos responsáveis da empresa em questão bem como os resultados obtidos depois da introdução das propostas de melhoria energética.

Tabela 5.4 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética

Medidas	Consumo de energia (kWh)		Poupanças anuais (kWh)	Custo da medida (€)	Payback (anos)
	Antes	Depois			
Ajustar VEV da bomba	1.277.112	953.631	323.481 (25%)	-	-

A bomba já tem acoplado um VEV, contudo verificou-se que o processo não estava bem controlado e, portanto, existia um grande potencial de poupança de energia ao ajustar o VEV

às necessidades de arrefecimento do forno. Foi possível uma redução de 25 % nos consumos energéticos o que é bastante significativo além de ter retorno imediato.

De referir ainda que este circuito foi recentemente remodelado o que faz com que as hipóteses da manutenção das bombas bem como a aplicação de motores de alta eficiência tenham sido descartadas.

5.5 Caso de estudo 5 - Circuito aberto de arrefecimento de uma farmacêutica

Este circuito é responsável pela refrigeração de vários processos e, por isso mesmo, as necessidades de arrefecimento não são constantes ao longo do tempo. Deste circuito fazem parte o grupo de bombagem (duas bombas de potência 110 kW, caudal volúmico 660,75 m³/h, altura manométrica 51,5 m e velocidade nominal de 1480 rpm, acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 90%) que leva a água até um tratamento químico a seguidamente até à produção onde há transferência de calor para a água que, posteriormente, é arrefecida numa torre de arrefecimento equipada com um ventilador de 150 kW e velocidade nominal de 1500 rpm, como se pode observar na figura 5.5.

O circuito opera 3000 horas por ano, o grupo de bombagem está equipado com o sistema on/off de modo a corresponder à variação das necessidades de refrigeração e o ventilador já está equipado com um variador de frequência. O grupo de bombagem tem 3 anos de serviço.

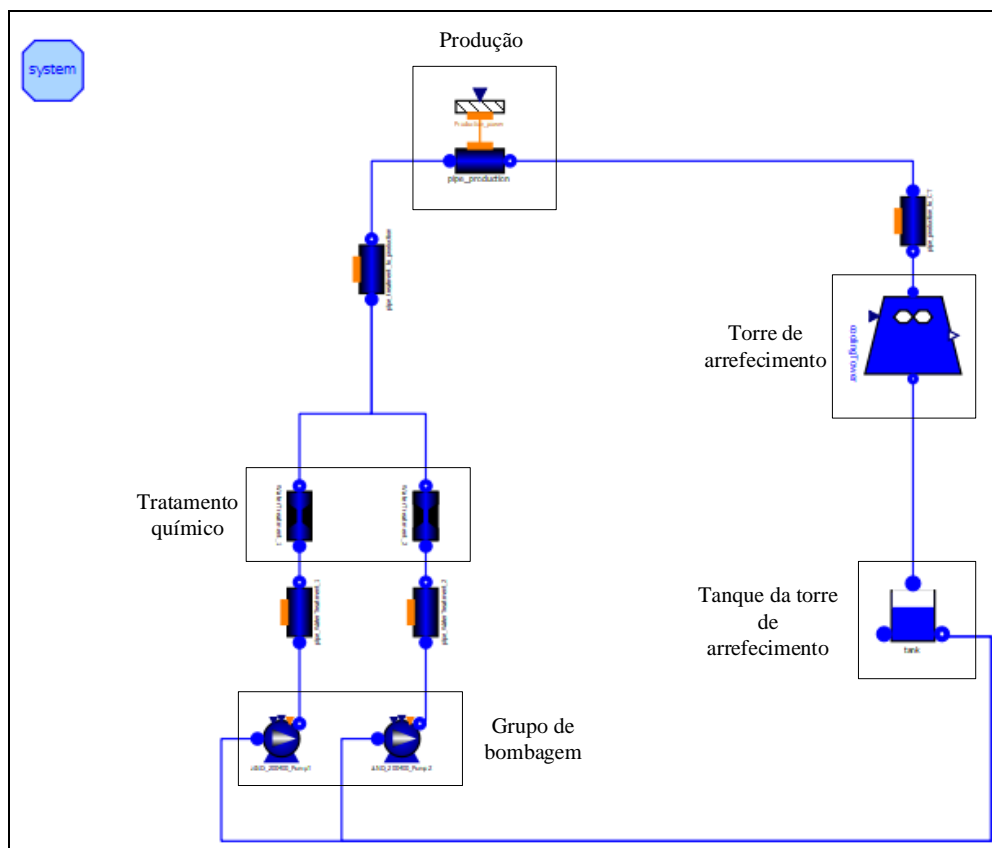


Figura 5.5 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento aberto de uma farmacêutica [31].

Na tabela 5.5 são apresentados os resultados da simulação obtidos com as condições operacionais fornecidas pelos responsáveis da empresa em questão bem como os resultados obtidos depois da introdução das propostas de melhoria energética.

Tabela 5.5 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética

Medidas	Consumo de energia (kWh)		Poupanças anuais (kWh)	Custo da medida (€)	Payback (anos)
	Antes	Depois			
Acoplar VEV ao grupo de bombagem	727.068	552.273	174.795 (24%)	26.326	1,6
Utilizar motores de alta eficiência IE3	727.068	685.914	41.154 (6%)	53.172	14
Acoplar VEV e motor de alta eficiência IE3	727.068	521.012	206.056 (28%)	79.498	4,2
Ajustar VEV do ventilador	450.000	406.482	43.518 (10%)	-	-

Neste caso de estudo, os ventiladores já possuíam VEV. Assim sendo, foi estudado o ajuste da operação dos mesmos tendo-se verificado que existe uma margem interessante de 10 % de redução dos consumos energéticos aliado ao facto do retorno ser imediato o que se torna bastante apelativo.

A aplicação de VEV ao grupo de bombagem, por sua vez, permite uma redução de 24 % face ao anterior consumo com um período de amortização do investimento de 1,6 anos o que se afigura como uma excelente medida a ser implementada. Acresce o facto de os VEV terem outras vantagens já que permitem arranques e paragens suaves ao contrário do controlo on/off anteriormente instalado aumentando assim a vida útil do equipamento [23].

A utilização de motores de alta eficiência, por sua vez, introduz melhorias energéticas com alguma relevância da ordem dos 6%, no entanto, esta medida pressupõe um período de amortização do investimento de 14 anos, período este bastante elevado dadas as poucas horas de operação anuais. Assim sendo, a introdução desta medida na indústria torna-se muito pouca apelativa. Apesar desta desvantagem, em caso de fim de vida de um motor ou necessidade de substituição, é uma medida interessante tendo em conta o seu potencial de economia de energia. No entanto, se a esta medida for adicionada a aplicação de um VEV as poupanças energéticas são as mais significativas (29%) e os períodos de amortização reduzem drasticamente, tornando-se um investimento bem mais apelativo, apesar de corresponder a 4 anos ligeiramente superior ao normalmente admitido como aceitável.

Neste caso, a manutenção das bombas não foi equacionada como hipótese já que o grupo de bombagem foi remodelado recentemente.

5.6 Caso de estudo 6 - Circuito de transporte de matéria prima

O circuito faz parte de uma fábrica de papel e representa os processos de diluição da fibra de papel e água transformando-se em polpa de papel e posteriormente transportada para a prensa onde é comprimida e afixada ao tapete rolante. O circuito é constituído pelo grupo de bombagem 1 (duas bombas de potência 31,5 kW, caudal volúmico 226 m³/h, altura manométrica 28,5 m e velocidade nominal de 1450 rpm, acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 94,6%) que faz o transporte da polpa desde o tanque de diluição até ao tanque de alimentação da prensa. Na passagem pelos rolos perde-se água e alguma pasta desidratada que são coletadas em 4 tanques; a partir dos tanques de água, a água residual é bombeada pelo grupo de bombagem 2 (duas bombas de potência 42 kW, caudal volúmico 200 m³/h, altura manométrica 39,5 m e velocidade nominal de 1450 rpm, acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 90,6%) para o tanque de diluição enquanto que a pasta é bombeada para o tanque de alimentação do processo pelo grupo de bombagem 3 (duas

bombas de potência 6,1 kW, caudal volúmico 57 m³/h, altura manométrica 18,6 m e velocidade nominal de 1450 rpm, acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 90,6%), como se pode observar na figura 5.6.

O circuito em questão opera 7080 horas por ano e todos os grupos de bombagem contam com mais de 20 anos de serviço.

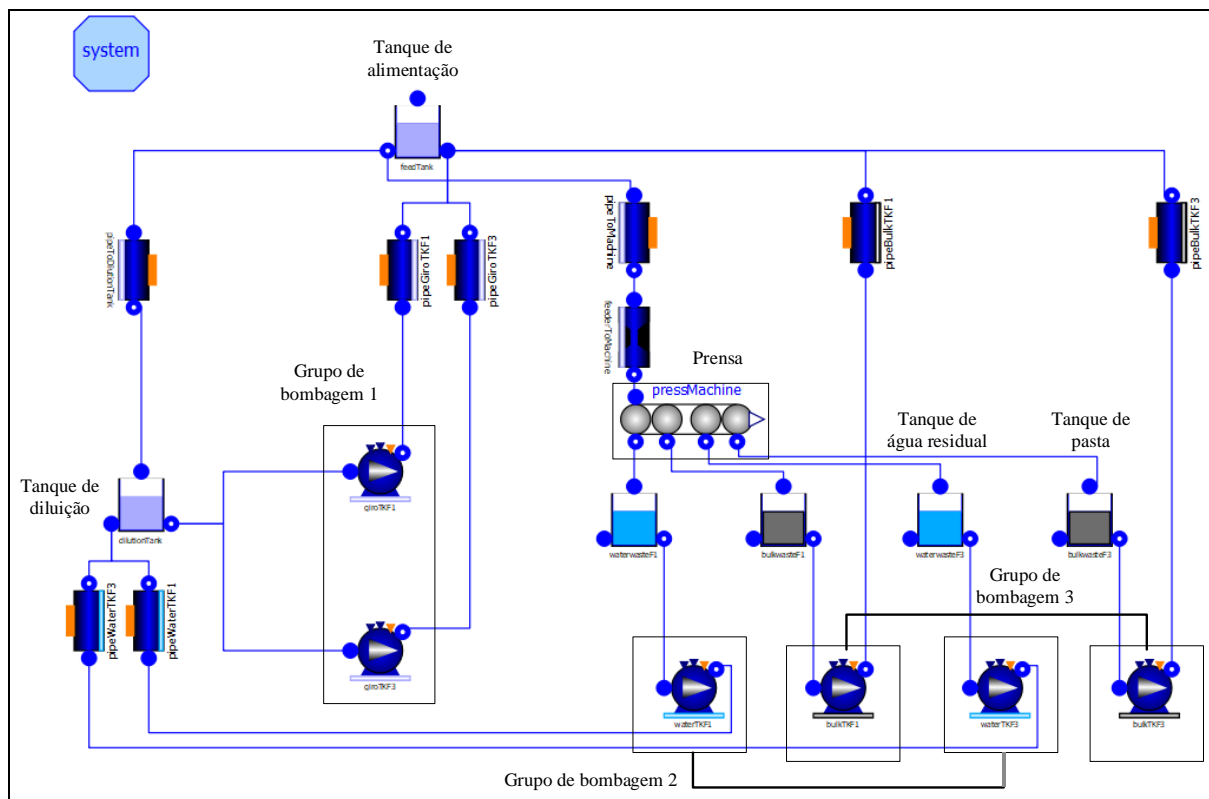


Figura 5.6 - Esquema OpenModelica do circuito de transporte de matéria prima [31].

Na tabela 5.6 são apresentados os resultados da simulação obtidos com as condições operacionais fornecidas pelos responsáveis da empresa em questão bem como os resultados obtidos depois da introdução das propostas de melhoria energética.

Tabela 5.6 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética

Medidas	Consumo de energia (kWh)		Poupanças anuais (kWh)	Custo da medida (€)	Payback (anos)
	Antes	Depois			
Utilizar motores de alta eficiência IE3 no GB2	566.389	537.890	28.498 (5%)	19.900	7,6
Utilizar motores de alta eficiência IE3 no GB3	79.619	75.613	4.006 (5%)	5.132	13,9
Manutenção das bombas	2.788.849	2.105.080	683.769 (25%)	436	0,01

Neste caso de estudo, os regimes de carga das bombas são bastante constantes ao longo do ano, pelo que a hipótese de acoplar VEV aos grupos de bombagem foi descartada, acrescentando o facto de as bombas estarem bem dimensionadas ao contrário do que se verificou no caso de estudo 2 e 4 que também tinham regimes de carga constantes ao longo do ano.

A manutenção das bombas é a medida mais atrativa visto que possui um período de amortização quase instantâneo e permite economias energéticas de 25%, economias bastante significativas tendo em conta o reduzido investimento necessário.

Neste caso em específico seria interessante avaliar a troca das bombas antigas por bombas mais eficientes visto que são bombas que apresentam bastantes anos de operação. No entanto, esta análise é delicada visto que as curvas de funcionamento das bombas atualmente não correspondem ao perfil fornecido pelo que a avaliação económica do potencial existente na troca do equipamento fica comprometida.

A troca dos motores convencionais por motores de alta eficiência foi avaliada apenas nos grupos de bombagem 2 e 3, visto que o grupo de bombagem 1 já possuía este tipo de motores. A sua utilização introduziu melhorias energéticas com alguma relevância da ordem dos 5%, no entanto, esta medida pressupõe um período de amortização do investimento de 7,6 anos para o grupo de bombagem 2 e de 13,9 anos para o grupo de bombagem 3, períodos que não são apelativos a nível industrial, a menos que o equipamento esteja em fim de vida.

5.7 Caso de estudo 7 - Circuito de tratamento de água

Este circuito tem por objetivo o fornecimento de água potável para o processo de produção de açúcar. Nesse sentido a água é bombeada pelo grupo de bombagem 1 (duas bombas, sendo uma de *backup*, de potência 5,76 kW, caudal volúmico 45 m³/h, altura manométrica 31,5 m e velocidade nominal de 2932 rpm, acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 89,2 %) e filtrada através de um filtro de areia. Seguidamente é armazenada num tanque, que recebe também água da rede de forma a não sobrecarregar a extração de água do furo, sendo posteriormente bombeada pelo grupo de bombagem 2 (três bombas: duas bombas com potência de 17,5 kW, caudal volúmico de 50 m³/h, altura manométrica de 63 m e velocidade nominal de 2900 rpm acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 90,9 % e uma bomba, que neste momento não está a ser utilizada, de potência 11,5 kW, caudal volúmico 80 m³/h, altura manométrica 39,5 m e velocidade nominal de 1450 rpm, acionada por um motor de indução trifásico de rendimento 75 %) para o tanque da fábrica ficando disponível para o processo produtivo, como se pode observar na figura 5.7.

O grupo de bombagem 1 opera 1327 horas por ano tendo mais de 5 anos de operação, enquanto que o grupo de bombagem 2 opera 5211 horas por ano, contando com mais de 20 anos de serviço.

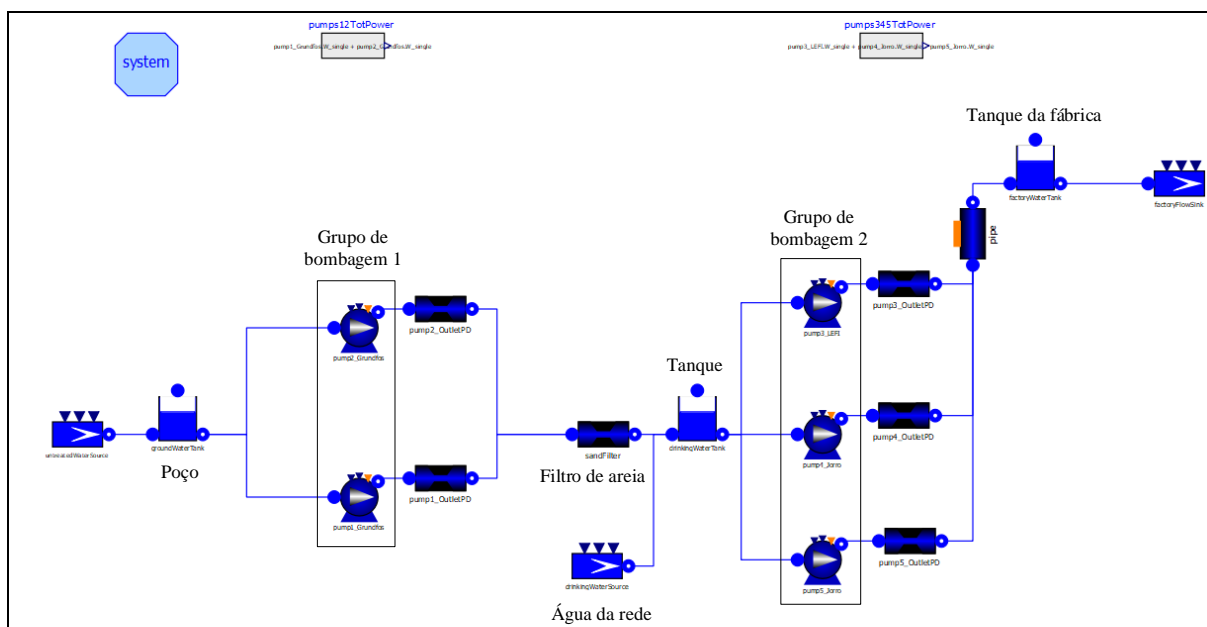


Figura 5.7 - Esquema OpenModelica do circuito de tratamento de água [31].

Na tabela 5.7 são apresentados os resultados da simulação obtidos com as condições operacionais fornecidas pelos responsáveis da empresa em questão bem como os resultados obtidos depois da introdução das propostas de melhoria energética.

Tabela 5.7 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética

Medidas	Consumo de energia (kWh)		Poupanças anuais (kWh)	Custo da medida (€)	Payback (anos)
	Antes	Depois			
Utilizar motores de alta eficiência IE3 no GB1	8.723	8.156	567 (7%)	2.406	46,0
Utilizar motores de alta eficiência IE3 no GB2	156.994	149.589	7.405 (5%)	10.734	15,7
Manutenção do grupo de bombagem 1	9.440	8.723	717 (8%)	73	1,1
Manutenção do grupo de bombagem 2	242.426	156.994	85.432 (35%)	146	0,02
Motores IE3 e manutenção do GB1	9.440	8.156	1.284 (14%)	2.479	20,9
Motores IE3 e manutenção do GB2	242.426	149.589	92.837 (38%)	10.880	1,3

À semelhança do caso de estudo anterior, os regimes de carga das bombas são bastante constantes ao longo do ano, pelo que a hipótese de acoplar VEV aos grupos de bombagem foi descartada, acrescentando o facto de as bombas estarem bem dimensionadas ao contrário do que se verificou no caso de estudo 2 e 4 que também tinham regimes de carga contantes ao longo do ano.

A manutenção das bombas é uma medida bastante atrativa, principalmente para o grupo de bombagem 2 que é bastante antigo e onde as poupanças energéticas atingidas foram de 35%. Por outro lado, no grupo de bombagem 1 as poupanças foram de 8% devido ao facto de ser

relativamente recente. Em ambos casos é uma medida a ter em conta dado que o retorno do investimento é praticamente instantâneo.

Tal como no caso anterior, seria interessante avaliar a troca das bombas do grupo de bombagem 2 por bombas mais eficientes visto que são bombas bastante antigas. No entanto, não é possível fazer uma análise correta a esta medida já que as curvas de funcionamento das bombas atualmente não correspondem ao perfil fornecido pelo que a avaliação económica do potencial existente na troca do equipamento fica comprometida.

A utilização de motores de alta eficiência, neste caso em específico, é uma medida nada atrativa em termos industriais devido aos elevados períodos de amortização do investimento de 46 e 15,7 anos para os grupos de bombagem 1 e 2, respetivamente. Mesmo quando esta medida foi avaliada em conjunto com a manutenção das bombas apenas para o grupo de bombagem 2 se mostrou atrativa com poupanças de energia de 38%, o que é bastante significativo, e um período de retorno financeiro de 1,3 anos.

No grupo de bombagem 2, existe uma bomba acionada por um motor de indução trifásico com rendimento de 75%. Neste caso em específico, seria relevante estudar o custo-benefício da substituição deste motor por um de alta eficiência, no entanto como esta bomba não estava em funcionamento aquando da campanha de medições, visto que vai alternando o funcionamento com as outras bombas do grupo de bombagem, não foi possível avaliar o impacto desta medida.

5.8 Caso de estudo 8 - Circuito aberto de arrefecimento de condensadores barométricos

Este circuito faz parte de uns dos processos da produção de açúcar. O açúcar tem de ser cozinhado a uma temperatura baixa (70 °C), no entanto, para ferver água a esta temperatura é necessário produzir vácuo conseguido através de um condensador barométrico fazendo passar água fria a 30 °C no condensador de forma a condensar o vapor em água quente a 40 °C.

Seguidamente esta água quente é armazenada num tanque e depois bombeada pelo grupo de bombagem 2 (três bombas de potência 22 kW, caudal volúmico 200 m³/h, altura manométrica 22,9 m e velocidade nominal de 1450 rpm, acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 93,9% e uma bomba de potência 40 kW, caudal volúmico 250 m³/h, altura manométrica 31,6 m e velocidade nominal de 1450 rpm, acionada por motor de indução trifásico de rendimento 94,6%) até às duas torres de arrefecimento, equipadas com ventiladores de 20,4 e 19,7 kW respetivamente com velocidades nominais de 201,8 rpm e 219,3 rpm. Nas torres volta a arrefecer até aos 30 °C e, depois de coletada no tanque das torres de arrefecimento, é bombeada novamente, pelo grupo de bombagem 1 (cinco bombas de potência 22 kW, caudal volúmico 200 m³/h, altura manométrica 22,9 m e velocidade nominal de 1450 rpm, acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 93,9%; duas bombas de potência 40 kW, caudal volúmico 250 m³/h, altura manométrica 31,6 m e velocidade nominal de 1450 rpm, acionadas por motores de indução trifásicos de rendimento 94,6% e uma bomba de potência 31,5 kW, caudal volúmico 76 m³/h, altura manométrica 32,5 m e velocidade nominal de 1450 rpm, acionada por motor de indução trifásico de rendimento 92,1%), através dos condensadores barométricos, como se pode observar na figura 5.8.

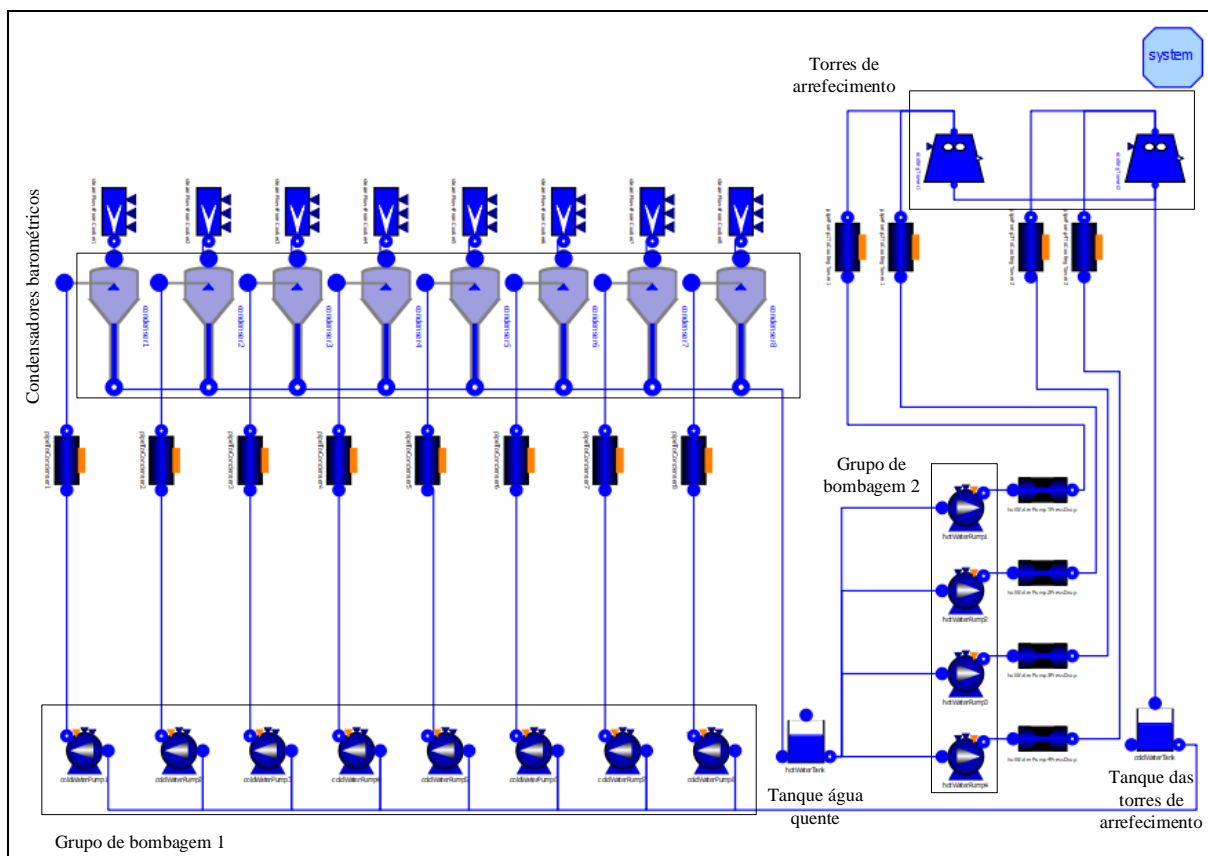


Figura 5.8 - Esquema OpenModelica do circuito de arrefecimento de condensadores barométricos [31].

Neste circuito quer os bombas quer os ventiladores já possuem VEV instalados. De referir também que ambos os grupos de bombagem têm mais de 20 anos de serviço e cada bomba opera um número de horas diferente por ano como se pode observar na tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Nº de horas de trabalhos dos grupos de bombagem 1 e 2

	Identificação	Nº de horas de operação
Grupo de bombagem 1	<i>coldWaterPump 1</i>	2537
	<i>coldWaterPump 2</i>	5753
	<i>coldWaterPump 3</i>	5222
	<i>coldWaterPump 4</i>	6195
	<i>coldWaterPump 5</i>	6136
	<i>coldWaterPump 6</i>	2744
	<i>coldWaterPump 7</i>	6077
	<i>coldWaterPump 8</i>	6815
Grupo de bombagem 2	<i>hotWaterPump 1</i>	7080
	<i>hotWaterPump 2</i>	7080
	<i>hotWaterPump 3</i>	6726
	<i>hotWaterPump 4</i>	7080

Na tabela 5.9 são apresentados os resultados da simulação obtidos com as condições operacionais fornecidas pelos responsáveis da empresa em questão bem como os resultados obtidos depois da introdução das propostas de melhoria energética.

Tabela 5.9 - Avaliação energética e económica das medidas de eficiência energética

Medidas	Consumo de energia (kWh)		Poupanças anuais (kWh)	Custo da medida (€)	Payback (anos)
	Antes	Depois			
Manutenção das bombas	2.776.298	2.070.864	705.434 (25%)	873	0,01
Ajustar VEV dos ventiladores	283.908	245.260	38.648 (14%)	-	-
Ajustar VEV do grupo de bombagem 1	1.096.325	1.050.748	45.577 (4%)	-	-
Ajustar VEV do grupo de bombagem 2	974.539	935.346	39.193 (4%)	-	-

Neste caso de estudo, como referido anteriormente, as bombas e os ventiladores apresentam VEV. Assim sendo, foi estudado o seu ajuste tendo-se verificado que ao nível dos grupos de bombagem as poupanças possíveis são de 4% enquanto que nos ventiladores são de 14%. Uma vez que se trata de um ajuste e, portanto, o retorno é imediato é uma medida que deve ser implementada com grande interesse do ponto de vista industrial.

A manutenção das bombas é a medida estudada mais atrativa já que apesar de exigir um investimento, ao contrário da medida anterior, este é reduzido e o retorno é quase imediato possibilitando poupanças energéticas de 25% face aos consumos anteriores dos dois grupos de bombagem.

Neste caso em particular, seria interessante avaliar a troca das bombas dos dois grupos de bombagem por bombas mais eficientes visto que são bombas bastante antigas. No entanto, não é possível fazer uma análise correta já que as curvas de funcionamento das bombas atualmente não correspondem ao perfil fornecido pelo que a avaliação económica do potencial existente na troca do equipamento fica comprometida.

As torres de arrefecimento, equipamento em madeira e com mais de 40 anos de operação, necessitam de substituição. Apesar da empresa estar ciente do problema e até já ter planeada a substituição do equipamento por um mais eficiente, esta substituição não pode ser avaliada uma vez que não foram efetuadas medições dos consumos dos ventiladores e nos foram fornecidas as características nominais e não as de operação atuais.

A utilização de motores de alta eficiência não foi equacionada uma vez que ambos os grupos de bombagem já estavam equipados com motores de classe IE3.

6 Discussão

Como visto no capítulo anterior, muitas medidas de melhoria de eficiência energética podem ser implementadas nos circuitos de água industriais. Algumas delas, por limitação do programa ou mesmo por falta de informação não foram sugeridas anteriormente e, por isso mesmo, também serão discutidas neste capítulo.

Assim, a aplicação de VEV conduziu a economias de energia significativas entre os 19 e os 27% tendo, em todos os casos estudados, períodos de amortização relativamente pequenos (inferiores a 2 anos), o que se torna bastante apelativo em termos industriais. Por outro lado, também o ajuste dos VEV, quer em bombas quer em ventiladores, conduz a reduções consideráveis no consumo energético de até 34%. Estes resultados estão dentro do esperado em termos de economias de energia apontadas entre 20-25% com um máximo de 50% [24].

Tendo em conta o que já foi referido no capítulo 1, acerca da perda de eficiência das bombas até 15% nos primeiros 10 anos por manutenção deficiente, a medida proposta da manutenção das bombas afigura-se como uma das mais eficazes e de menor período de amortização ainda mais quando se trata de bombas com muitos anos de operação e pouca manutenção. As poupanças energéticas alcançadas variaram entre os 12 e os 35%, algo que se encontra dentro das expectativas que apontam para um potencial de até 70 a 80% em termos de economias energéticas [35], [36].

A utilização de motores de alta eficiência, por sua vez, introduz melhorias energéticas com alguma relevância da ordem dos 5 a 7%, no entanto, esta medida implica sempre períodos de amortização do investimento bem superiores a 3 anos pelo que a introdução da mesma na indústria se torna pouca apelativa. Apesar desta desvantagem, em caso de fim de vida de um motor ou necessidade de substituição, é uma medida interessante tendo em conta o seu potencial de economia de energia. Por outro lado, se a esta medida juntarmos a aplicação de um variador eletrónico de velocidade os períodos de amortização baixam drasticamente e torna-se um investimento bem mais apelativo.

No caso de existirem filtros de areia, a sua troca por filtros que introduzam uma menor perda de carga é uma medida que deve sempre ser equacionada pois permite reduções interessantes no consumo energético e com períodos de amortização aceitáveis a nível industrial, isto é, à volta dos 3 anos.

Algumas medidas podem ser bastante interessantes de implementar como a troca de bombas antigas por bombas mais eficientes ou a instalação de torres de arrefecimento mais eficientes. No entanto, esta análise é delicada visto que as curvas de funcionamento das bombas atualmente não correspondem ao perfil fornecido. O mesmo se passa com as torres de arrefecimento. Em alguns casos constatou-se a existência de torres de arrefecimento em madeira e bombas com mais de 40 anos. Contudo, a avaliação económica do potencial existente na troca do equipamento não pode ser efetuada já que o que foi fornecido foram as condições nominais e não as atuais.

A troca de tubagem por uma com diâmetro maior e rugosidade menor, a sua limpeza bem como a sua disposição são medidas que permitiriam minimizar as perdas de carga, e, com

isto, minimizar o consumo energético. No entanto, não nos foi dada a planta das fábricas nem informação acerca da tubagem bem como do seu estado atual o que impossibilitou a análise económica desta medida.

Numa perspetiva ambiental, é de referir também que a aplicação de variadores eletrónicos de velocidade em bombas permite reduzir os consumos de água e, uma vez que se trata de caudais industriais, tem um impacto muito significativo na quantidade de água potável utilizada pela indústria. Por exemplo, no caso 4.2 o caudal nominal de água responsável pelo arrefecimento do forno é de 5543 m³/h. Na simulação foi possível perceber que se obtinha o arrefecimento pretendido se baixássemos o caudal para 4908 m³/h o que significa uma redução de 635 m³/h no consumo de água. Para se ter uma ideia, o consumo médio de água diário por habitante em Portugal é de 187 litros [37] o que significa que este caudal de água poupado seria suficiente para abastecer 81.498 pessoas por ano em Portugal. Embora se trate de um circuito fechado e, portanto, esta água não esteja constantemente a ser extraída fica-se como uma perspetiva do potencial de economia de água com todos os impactos inerentes num período de marcadas alterações climáticas e escassez de água.

7 Conclusões e perspectiva de trabalho futuro

Da análise destes oito casos de estudo concluiu-se que, efetivamente, existe um potencial grande de economia de energia e melhoria de eficiência nos circuitos de água industriais, tal como inicialmente previsto pelo projeto WaterWatt tendo-se verificado que se conseguem poupanças energéticas globais que podem atingir os 20 a 30%. Assim sendo, existe um grande potencial neste projeto, pelo que a plataforma E³ se afigura como uma ferramenta interessante no que toca à análise prévia de medidas de eficiência a implementar na indústria. Mesmo tratando-se de circuitos auxiliares com importância menor na fatura energética de uma empresa relativamente aos processos principais de produção, esta análise pode fazer a diferença, principalmente em pequenas e médias empresas em que as margens de lucro são mais pequenas.

De entre as medidas propostas para a melhoria de eficiência energética verificou-se que, quando aplicável, a introdução de variadores eletrónicos de velocidade é a medida que permite maiores poupanças energéticas além de permitir poupanças de água substanciais.

Medidas transversais podem e devem ser aplicadas, que embora não se reflitam diretamente na redução dos custos, podem desempenhar um papel importante no diagnóstico e prevenção de determinados acidentes ou avarias como é o caso de um sistema de monitorização dos consumos energéticos por equipamento. Isto é, instalar contadores volumétricos e elétricos para monitorizar o desempenho do sistema de modo a controlar o seu funcionamento e até mesmo formar uma base de dados que sirva de ponto de partida para um eventual plano de melhoria no controlo, além de permitir ajustes e reparações mais rápidas e eficientes [27].

É importante referir que estes resultados são obtidos por simulação numérica e que, por isso mesmo, podem não refletir com exatidão o resultado na realidade já que as condições não são bem constantes. Por outro lado, também os tempos de operação dos circuitos podem não corresponder exatamente à realidade além de que foi assumido um rendimento de 100% para os VEV, que embora não seja muito diferente do encontrado no mercado (>95% para regimes de carga superiores a 50%) não deixa de ser uma aproximação [38]. Por isso mesmo, um coeficiente de segurança de 10% deve ser aplicado às poupanças referidas no capítulo anterior de forma a contabilizar estas incertezas.

Numa perspectiva de trabalho futuro seria interessante trabalhar sobre um projeto de raiz em que esta análise fosse efetuada de forma prévia à implementação industrial. Deste modo, seria possível desde o início implementar medidas de eficiência energética, desde o esquema da tubagem e o seu diâmetro até à escolha de equipamentos com menor perda de carga e maior eficiência. Dispondo deste *software*, é algo que se torna acessível e que permite futuramente reduzir custos adicionais, algo que pode ser uma mais valia competitiva em termos industriais.

Referências

- [1] E. Commission, «EUROPE 2020», 2010.
- [2] European Environment Agency, «Annual European Union greenhouse gas inventory 1990 – 2015 and inventory report 2017», 2017.
- [3] European Environment Agency, «Renewable energy in Europe – 2017 Update», 2017.
- [4] Eurostat, «Consumption of energy», 2017. [Em linha]. Disponível em: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy. [Acedido: 20-Mar-18].
- [5] Parlamento Europeu e Conselho, «DIRETIVAS», 2012.
- [6] E. Commission, «Energy Strategy and Energy Union». [Em linha]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union>. [Acedido: 03-Mar-2018].
- [7] I. P. Agência para o Desenvolvimento e Coesão, «RELATÓRIO INTERCALAR DO ACORDO DE PARCERIA», 2017.
- [8] PORDATA, «Consumo de energia primária: total e por tipo de fonte de energia», 2016. [Em linha]. Disponível em: <https://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+primária+total+e+por+tipo+de+fonte+de+energia-1130>. [Acedido: 22-Fev-18].
- [9] Hydraulic Institute, «PUMP LIFE CYCLE COSTS», 2001.
- [10] E. N. V. D. Etu *et al.*, «Final report: EU Water saving potential», 2007.
- [11] EUROPEAN COMMISSION, «GRANT AGREEMENT», 2016.
- [12] B. P. Cardoso, A. Santos, R. Rato, e M. Estrela, «Assessment of Pump’s Performance in Water Supply Systems – Data Collected from Multiple Case Studies», pp. 217–226, 2017.
- [13] M. A. Sellitto, «Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos», 2005.
- [14] S. T. Dehaghani e H. Ahmadikia, «Retrofit of a wet cooling tower in order to reduce water and fan power consumption using a wet / dry approach», vol. 125, pp. 1002–1014, 2017.
- [15] E. Al-Bassam e R. Alasseri, «Measurable energy savings of installing variable frequency drives for cooling towers’ fans , compared to dual speed motors», vol. 67, pp. 261–266, 2013.
- [16] V. Magueijo *et al.*, «Medidas de eficiência energética aplicáveis à indústria portuguesa: um enquadramento tecnológico sucinto», 2010.
- [17] International Energy Agency, «Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric

- Motor-Driven Systems», 2011.
- [18] EDP, «Motores de Alto Rendimento», 2017.
- [19] M. R. Quintas, «Motores Assíncronos», 2016.
- [20] Siemens, «Low voltage motors with Super Premium Efficiency IE4». [Em linha]. Disponível em: <https://w3.siemens.com/drives/global/en/motor/low-voltage-motor/efficiency-standards/ie4-super-premium-efficiency/pages/ie4-super-premium-efficiency.aspx>. [Acedido: 13-Abr-2018].
- [21] ABB, «Technical note: IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors», 2014.
- [22] S. Lu, «A review of high-efficiency motors : Specification, policy, and technology», vol. 59, pp. 1–12, 2016.
- [23] A. T. de Almeida, F. J. T. E. Ferreira, e D. Both, «Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives With Electric Motor Systems», 2005.
- [24] M. C. Fernandes *et al.*, *Medidas transversais de eficiência energética para a indústria*, 1ª Edição. Lisboa, 2016.
- [25] N. A. Barata, «FERRAMENTAS DE ESTIMATIVA DE POUPANÇA ENERGÉTICA EM MOTORES INDUSTRIAIS COM VARIADORES DE VELOCIDADE», FEUP, 2012.
- [26] P. A. F. de Abreu, «Arranque de motores elétricos», 2017.
- [27] International Energy Agency, «Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions», 2007.
- [28] P. Fonseca, S. B. Nielsen, e D. Both, «VSDs for Electric Motor Systems», 2011.
- [29] EDP, «Variadores Eletrónicos de Velocidade», 2017.
- [30] ABB, «The ABB energy efficiency & productivity improvement plan: Efficient control of motor-driven applications», 2015.
- [31] Modelica Association, «OpenModelica». 2018.
- [32] ERSE, «Tarifas transitórias», 2018.
- [33] ABB, «Conversores de frequência de baixa tensão», 2014.
- [34] Siemens, «Low-Voltage Motors», 2015.
- [35] GRUNDFOS, «A pump refurbishment offers significant energy saving opportunities». [Em linha]. Disponível em: <https://ie.grundfos.com/about-us/news-and-press/news/a-pump-refurbishment-offers-significant-energy-saving-opportunities.html>. [Acedido: 08-Jun-2018].
- [36] WGM Engineering ltd, «PUMP REFURBISHMENT». [Em linha]. Disponível em: http://www.wgmengineering.co.uk/pump_refurbishment.htm. [Acedido: 08-Jun-2018].
- [37] ERSAR, «Consumo médio diário de água por habitante». [Em linha]. Disponível em: <http://www.ersar.pt/pt/site-setor/site-factos-e-numeros/Paginas/Facto-2.aspx>. [Acedido: 01-Jun-2018].
- [38] U.S. Department of Energy, «Adjustable Speed Drive Part-Load Efficiency», 2012.

ANEXO A: Resultados das simulações

No presente anexo serão apresentados os resultados das simulações dos quatro casos de estudo realizados integralmente no âmbito desta tese, nomeadamente os casos de estudo 2, 3, 4 e 5. Paralelamente, serão também apresentados os resultados da implementação das medidas de melhoria de eficiência energética propostas no capítulo 4 para todos os casos de estudo à exceção dos casos de estudo 6 e 7 em que as medidas de otimização propostas não têm influência no desempenho do sistema.

A-1 Caso de estudo 1 - Resultados

Na tabela A.1 pode-se fazer a comparação entre as temperaturas antes e depois da introdução das medidas de otimização. As temperaturas controladas foram as da água à entrada e à saída dos tubos de arrefecimento do processo laminagem, que, em termos do processo, é o mais importante de forma a garantir a qualidade do mesmo.

As medidas que influenciam estas temperaturas são a introdução de VEV. Nas simulações, foi possível baixar a velocidade de rotação das bombas e ventiladores até 1350 rpm sem que as temperaturas fossem significativamente afetadas.

Tabela A.1 – Resultados da implementação das medidas de eficiência propostas para o caso de estudo 1 obtidos nas simulações em OpenModelica

Medidas	Temperatura à entrada do tubo (°C)		Erro (%)	Temperatura à saída do tubo (°C)		Erro (%)
	Nominal	Depois		Nominal	Depois	
VEV no grupo de bombagem 1		19,55	2,25		24,71	0,86
VEV no grupo de bombagem 2	20,00	19,31	3,45	24,50	24,37	0,53
VEV no grupo de bombagem 3		19,29	3,55		24,54	0,16
VEV nos ventiladores		19,58	2,10		24,59	0,37

A-2 Caso de estudo 2 - Resultados

Nas tabelas A.2 a A.5 apresentam-se os resultados obtidos na simulação em comparação com os dados nominais fornecidos pela empresa com o respetivo erro associado, que permitiram a validação do caso de estudo 2.

Tabela A.2 – Comparação entre as características nominais dos grupos de bombagem e as obtidas na simulação

Grupo de bombagem	Caudal volúmico (m ³ /h)			Altura manométrica (m)			Potência (kW)		
	Nom.	Sim.	Erro (%)	Nom.	Sim.	Erro (%)	Nom.	Sim.	Erro (%)
1	2771,5	2813,10	1,50	52	52,44	0,84	470	465,74	0,91
2	Sulzer	1363,04	0,97	106	104,00	1,89	555	534,80	3,64
	Margam	1350,0	0,80	97	97,02	0,02	455	448,55	1,42

Tabela A.3 - Comparação entre as características nominais da tubagem e as obtidas na simulação

Tubagem	Caudal mássico (kg/s)		Erro (%)	Perda de carga (bar)		Erro (%)
	Nom.	Sim.		Nom.	Sim.	
Permutadores até GB 1	769,09	771,09	0,26	0,10	0,102	1,78
GB 1 até alto forno	1538,18	1542,18	0,26	1,50	1,53	1,77
Forno	1538,18	1542,18	0,26	1,38	1,41	1,91
Forno até permutadores	1538,18	1542,18	0,26	1,00	1,02	2,04
Tanque até GB 2 (Margam)	374,63	376,93	0,61	0,50	0,51	1,44
Margam até permutador	374,63	376,93	0,61	4,75	4,82	1,42
Sulzer até permutador	374,63	377,55	0,78	5,90	6,00	1,76
Permutador até torre de arrefecimento	749,25	754,48	0,70	3,00	3,06	1,93
Até cada uma das torres de arrefecimento	249,75	251,49	0,70	0,01	0,01	1,93

Tabela A.4 - Comparação entre as características nominais do permutador e as obtidas na simulação

Permutador	Temperatura de entrada (°C)		Erro (%)	Temperatura de saída (°C)		Erro (%)	Perda de carga (bar)		Erro (%)
	Nom.	Sim		Nom.	Sim.		Nom.	Sim.	
Lado quente	55,00	54,21	1,45	60,00	59,29	1,19	1,00	1,02	2,04
Lado frio	25,00	24,71	1,17	35,00	35,21	0,59	1,00	1,02	2,04

Tabela A.5 - Comparação entre as características nominais das torres de arrefecimento e as obtidas na simulação

Torres de arrefecimento	Temperatura de entrada (°C)		Erro (%)	Temperatura de saída (°C)		Erro (%)
	Nom.	Sim		Nom.	Sim.	
	25,00	25,14	0,57	35,00	35,21	0,59

Na tabela A.6 pode-se fazer a comparação entre as temperaturas antes e depois da introdução das medidas de otimização. As temperaturas controladas foram as da água à entrada e à saída do forno de forma a garantir o correto arrefecimento do mesmo

As medidas que influenciam estas temperaturas são a introdução de VEV. Nas simulações, foi possível baixar a velocidade de rotação do grupo de bombagem 1 até 1350 rpm, do grupo de bombagem 2 até 890 e 1017 rpm, respetivamente e dos ventiladores até 2600 rpm sem que as temperaturas fossem significativamente afetadas.

Tabela A.6 – Comparação entre as temperaturas de entrada e saída do forno nominais e as obtidas depois da introdução das medidas de melhoria de eficiência

Medidas	Temperatura à entrada do forno (°C)		Erro (%)	Temperatura à saída do forno (°C)		Erro (%)
	Nominal	Depois		Nominal	Depois	
Ajustar VEV do grupo de bombagem 1		53,56	2,62		59,28	1,20
Ajustar VEV do grupo de bombagem 2	55,00	55,23	0,42	60,00	60,25	0,42
Ajustar VEV dos ventiladores		55,28	0,51		60,30	0,50

A-3 Caso de estudo 3 - Resultados

Nas tabelas A.7 a A.9 apresentam-se os resultados obtidos na simulação em comparação com os dados nominais fornecidos pela empresa com o respetivo erro associado, que permitiram a validação do caso de estudo 3.

Tabela A.7 - Comparação entre as características nominais do grupo de bombagem e as obtidas na simulação

Grupo de bombagem	Caudal volúmico (m ³ /h)			Erro (%)	Altura manométrica (m)			Erro (%)	Potência (kW)			Erro (%)
	Nom.	Sim.			Nom.	Sim.			Nom.	Sim.		
1	360	361,48	0,41	113	112,95	0,05	137	136,28	0,53			

Tabela A.8 - Comparação entre as características nominais da tubagem e as obtidas na simulação

Tubagem	Caudal mássico (kg/s)		Erro (%)	Perda de carga (bar)		Erro (%)
	Nom.	Sim.		Nom.	Sim.	
Fonte	199,8	200,408	0,30	0,02	0,0201	0,50
Fonte até grupo de bombagem	99,9	100,204	0,30	0,01	0,0101	1,00
Saída do grupo de bombagem	99,9	100,204	0,30	0,1	0,1007	0,70
Ligação da saída do grupo de bombagem até processo	199,8	200,408	0,30	0,2	0,2014	0,70
Processo	19,98	20,041	0,31	0,1	0,1001	0,10

Tabela A.9 - Comparação entre as características nominais do processo e as obtidas na simulação

Processo (perdas de carga)	Caudal mássico (kg/s)		Erro (%)	Perda de carga (bar)		Erro (%)
	Nom.	Sim.		Nom.	Sim.	
	19,98	20,041	0,31	15,5	15,60	0,65

Na tabela A.10 pode-se fazer a comparação entre a altura manométrica nominal disponibilizada pelo grupo de bombagem e a obtida depois da introdução das medidas de otimização. Neste circuito, o requisito principal era vencer a perda de carga imposta pelo processo produtivo em causa.

As medidas que influenciam esta capacidade de vencer a perda de carga são a introdução de VEV. Nas simulações, foi possível baixar a velocidade de rotação do grupo de bombagem 1 até 2490 rpm sem comprometer a capacidade das bombas em transferir para o fluido a altura manométrica necessária para vencer a perda de carga.

Tabela A.10 – Comparação entre a altura manométrica nominal disponibilizada pelo grupo de bombagem e a obtida na simulação depois da introdução da medida de melhoria de eficiência

Medidas	Altura manométrica disponibilizada pelo grupo de bombagem (bar)		Erro (%)
	Nominal	Depois	
Ajustar VEV do grupo de bombagem 1	15,50	15,52	0,13

A-4 Caso de estudo 4 - Resultados

Nas tabelas A.11 a A.14 apresentam-se os resultados obtidos na simulação em comparação com os dados nominais fornecidos pela empresa com o respetivo erro associado, que permitiram a validação do caso de estudo 4.

Tabela A.11 - Comparação entre as características nominais da bomba e as obtidas na simulação

Bomba	Caudal volúmico (m ³ /h)		Erro (%)	Altura manométrica (m)		Erro (%)	Potência (kW)		Erro (%)
	Nom.	Sim.		Nom.	Sim.		Nom.	Sim.	
	683,89	693,24	1,37	60,89	60,81	0,13	140,08	138,49	1,14

Tabela A.12 - Comparação entre as características nominais da tubagem e as obtidas na simulação

Tubagem	Caudal mássico (kg/s)		Erro (%)	Perda de carga (bar)		Erro (%)
	Nom.	Sim.		Nom.	Sim.	
Bomba até permutador	189,78	191,23	0,76	1,30	1,33	2,14
Permutador até ao forno	189,78	191,23	0,76	0,50	0,51	1,96
Forno	189,78	191,23	0,76	1,00	1,02	2,06
Forno até à bomba	189,78	191,23	0,76	2,00	2,04	2,16

Tabela A.13 - Comparação entre as características nominais do permutador e as obtidas na simulação

Permutador	Temperatura de entrada (°C)		Erro (%)	Temperatura de saída (°C)		Erro (%)	Perda de carga (bar)		Erro (%)
	Nom.	Sim.		Nom.	Sim.		Nom.	Sim.	
Lado quente	35,00	34,98	0,06	40,00	40,13	0,33	1,00	1,02	2,06
Lado frio	7,00	7,12	1,77	21,00	21,20	0,97	4,80	4,92	2,42

Tabela A.14 - Comparação entre as características nominais da fonte de caudal e as obtidas na simulação

Fonte de caudal	Caudal mássico (kg/s)			Pressão (bar)		
	Nom.	Sim.	Erro (%)	Nom.	Sim.	Erro (%)
Fonte fria	69,38	70,21	1,20	6,00	5,93	1,17

Na tabela A.15 pode-se fazer a comparação entre as temperaturas antes e depois da introdução das medidas de otimização. À semelhança do caso de estudo 2, as temperaturas controladas foram as da água à entrada e à saída do forno de forma a garantir o correto arrefecimento do mesmo

As medidas que influenciam estas temperaturas são a introdução de VEV. Nas simulações, foi possível baixar a velocidade de rotação da bomba até 1350 rpm sem que as temperaturas fossem significativamente afetadas.

Tabela A.15 - Comparação entre as temperaturas de entrada e saída do forno nominais e as obtidas depois da introdução das medidas de melhoria de eficiência

Medidas	Temperatura à entrada do forno (°C)		Erro (%)	Temperatura à saída do forno (°C)		Erro (%)
	Nominal	Depois		Nominal	Depois	
Ajustar VEV do grupo de bombagem 1	35,00	34,45	1,57	40,00	40,03	0,08

A-5 Caso de estudo 5 - Resultados

Nas tabelas A.16 a A.19 apresentam-se os resultados obtidos na simulação em comparação com os dados nominais fornecidos pela empresa com o respetivo erro associado, que permitiram a validação do caso de estudo 5.

Tabela A.16 - Comparação entre as características nominais do grupo de bombagem e as obtidas na simulação

Grupo de bombagem	Caudal volúmico (m ³ /h)			Altura manométrica (m)			Potência (kW)		
	Nom.	Sim.	Erro (%)	Nom.	Sim.	Erro (%)	Nom.	Sim.	Erro (%)
1	660,75	680,02	2,92	51,5	51,52	0,04	110	109,06	0,86

Tabela A.17 - Comparação entre as características nominais da tubagem e as obtidas na simulação

Tubagem	Caudal mássico (kg/s)			Perda de carga (bar)		
	Nom.	Sim.	Erro (%)	Nom.	Sim.	Erro (%)
Grupo de bombagem até ao tratamento químico	183,36	187,77	2,41	2,00	2,11	5,41
Tratamento químico até à produção	366,72	375,55	2,41	1,10	1,16	5,41
Produção	366,72	375,55	2,41	1,20	1,27	5,62
Produção até torre de arrefecimento	366,72	375,55	2,41	0,50	0,53	5,82

Tabela A.18 - Comparação entre as características nominais do tratamento químico e as obtidas na simulação

Tratamento químico	Caudal mássico (kg/s)		Erro (%)	Perda de carga (bar)		Erro (%)
	Nom.	Sim.		Nom.	Sim.	
	183,4	187,77	2,41	0,01	0,011	5,39

Tabela A.19 - Comparação entre as características nominais das torres de arrefecimento e as obtidas na simulação

Torres de arrefecimento	Temperatura de entrada (°C)		Erro (%)	Temperatura de saída (°C)		Erro (%)
	Nom.	Sim.		Nom.	Sim.	
	45,00	44,84	0,36	35,00	36,03	2,93

Na tabela A-20 pode-se fazer a comparação entre as temperaturas antes e depois da introdução das medidas de otimização. As temperaturas controladas foram as da água à entrada e à saída da produção de forma a garantir o correto arrefecimento do processo.

As medidas que influenciam estas temperaturas são a introdução de VEV. Nas simulações, foi possível baixar a velocidade de rotação do grupo de bombagem até 1350 rpm e dos ventiladores até 1450 rpm sem que as temperaturas fossem significativamente afetadas.

Tabela A.20 - Comparação entre as temperaturas de entrada e saída da produção nominais e as obtidas depois da introdução das medidas de melhoria de eficiência

Medidas	Temperatura de entrada na produção (°C)		Erro (%)	Temperatura de saída da produção (°C)		Erro (%)
	Nominal	Depois		Nominal	Depois	
Ajustar VEV do grupo de bombagem	35,00	34,43	1,63	45,00	45,19	0,42
Ajustar VEV dos ventiladores		35,53	1,51		45,36	0,80

A-8 Caso de estudo 8 - Resultados

Na tabela A.21 pode-se fazer a comparação entre as temperaturas nominais dos condensadores barométricos e as obtidas depois da introdução das medidas de otimização.

As medidas que influenciam estas temperaturas são a introdução de VEV. Nas simulações, foi possível baixar a velocidade de rotação dos grupos de bombagem 1 e 2 até 1430 rpm e dos ventiladores até 191,8 rpm e 209,3 rpm, respetivamente sem que as temperaturas fossem significativamente afetadas.

Tabela A.21 - Comparação entre as temperaturas nominais dos condensadores barométricos e as obtidas depois da introdução das medidas de melhoria de eficiência

Medidas	Temperatura condensador 1, 2, 3, 4 e 6 (°C)			Temperatura condensador 5 e 7 (°C)			Temperatura condensador 8 (°C)		
	Nominal	Depois	Erro (%)	Nominal	Depois	Erro (%)	Nominal	Depois	Erro (%)
Ajustar VEV do GB 1		53,32	0,60		48,62	1,29		60,88	1,47
Ajustar VEV do GB 2	53,00	52,85	0,28	48,00	48,23	0,48	60,00	60,29	0,48
Ajustar VEV ventiladores		53,29	0,55		48,68	1,42		60,72	1,20