

Otimização de um circuito de arrefecimento de fornos para tratamentos térmicos

Maria Catarina Fernandes de Valadares Souto

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Paulo José da Silva Martins Coelho

Orientador na MetalSolvus: Eng. António Paulo Cerqueira Duarte

Orientador na Ramada Aços S.A.: Eng. Paulo Manuel Pinhal Canhola



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2020

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo principal a otimização energética de um circuito de arrefecimento para fornos de tratamentos térmicos. Tal é de extrema relevância pois existe a possibilidade de reduzir os custos de funcionamento da instalação em questão.

Para atingir o objetivo já referido, são sugeridas diversas alternativas tendo todas em comum a pressurização do circuito. A primeira alternativa é a pressurização do circuito sem nenhuma outra alteração. As restantes alternativas envolvem todas a pressurização do circuito e outras modificações: a possibilidade da mudança da disposição dos fornos (caso I), a separação do circuito que arrefece a parede dos fornos do circuito dos permutadores de calor (caso II) e ambas as alterações em conjunto, com três circuitos, um apenas para o arrefecimento das paredes, um segundo para os permutadores de calor com maior perda de carga e o terceiro para os permutadores com menor perda de carga (caso III).

A fim de analisar todas estas situações, começa-se por determinar o coeficiente de perda de carga localizada no circuito de arrefecimento das paredes e nos permutadores de calor de cada forno.

Executa-se então a simulação hidráulica da instalação atual e das quatro variantes sugeridas.

Tendo em conta estes quatro casos possíveis, para cada um deles são ainda analisadas três alternativas construtivas de cada um tendo como variantes o número e disposição das bombas nos circuitos e a pressão no interior do tanque pressurizado.

Por fim, executa-se uma breve análise económica para inferir qual as possibilidades mais vantajosas de onde se conclui que é possível então uma otimização da instalação atual, quer a nível energético quer ambiental, tendo sido fornecidas diversas alternativas que cumprem o objetivo inicial proposto para esta dissertação.

Entre as alternativas construtivas, conclui-se que a melhor opção é uma baixa pressurização do tanque através de tubos de pressurização. Com estas modificações da instalação, são de maior relevo o caso I, mantendo as bombas atuais, e o caso III com a modificação das bombas existentes atualmente.

Optimization of a cooling circuit of oven for heat treatments

Abstract

This dissertation has as main objective the energy optimization of a cooling circuit for heat treatment furnaces. This is extremely important because there is a possibility to reduce the operating costs of the installation in question.

To achieve the mentioned objective, several alternatives are suggested, all having in common the pressurization of the circuit. The first alternative is to pressurize the circuit without any other changes. As the other alternatives involve all pressurizations of the circuit and other modifications: a possibility of changing the furnace layout (case I), the separation of the circuit that cools the furnace walls from the heat exchanger circuit (case II) and both changes in conjunction, with three circuits, one just for cooling the walls, a second for heat exchangers with greater pressure loss and the third for heat exchangers with less pressure loss (case III).

In order to analyse all these situations, we start by determining the pressure loss coefficient located in the cooling circuit of the walls and in the heat exchangers of each oven.

The hydraulic simulation of the current installation circuit and the four suggested variants are then carried out.

Considering these four possible cases, for each one of them, three constructive alternatives of each one is analysed, having as variants the number and arrangement of the pumps in the circuits and the pressure inside the pressurized tank.

Finally, a brief economic analysis is performed to determine which are the most advantageous possibilities from which it is concluded that an optimization of the current installation is possible, both in terms of energy and environment, with several alternatives being provided that meet the initial objective proposed for this dissertation.

Among the constructive alternatives, it is concluded that the best option is a low pressurization of the tank through pressurization tubes. With these modifications of the installation, the most relevant alternatives are case I, keeping the current pumps, and case III with the modification of the pumps that currently exist.

Agradecimentos

Ao longo da realização da presente dissertação, foram várias as pessoas que contribuíram para este projeto e às quais gostaria de deixar um profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, mostrar a minha gratidão ao professor Paulo José Coelho, pelo apoio e ajuda excepcionais que deu e, também, pela disponibilidade incansável que sempre mostrou em todo o desenrolar deste trabalho.

Quero agradecer ao engenheiro Paulo Duarte, da MetalSolvus, pelo acompanhamento e esclarecimento de dúvidas de teor mais relacionadas com a instalação que foram, sem dúvida alguma, uma ajuda preciosa no desenvolvimento desta dissertação.

Gostaria também deixar um agradecimento ao engenheiro Paulo Canhola, da Ramada Aços S.A. que foi essencial no desenrolar deste trabalho, com todo o apoio prestado incluindo dados importantes que não poderiam ser obtidos sem a sua colaboração.

Por último, um obrigado muito sincero a todas as pessoas, família, colegas e amigos, nomeadamente o Henrique Gonçalves, que sempre me motivaram e incentivaram e foram sem dúvida de extrema importância na realização deste trabalho.

Índice de Conteúdos

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	A EMPRESA RAMADA AÇOS S.A.	1
1.2	INSTALAÇÃO ATUAL	1
1.2.1	<i>Circuito Fornos</i>	2
1.2.2	<i>Circuito da Torre de Arrefecimento</i>	3
1.2.3	<i>Grupos de Bombagem</i>	4
1.2.4	<i>Funcionamento típico</i>	6
1.3	SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PROPOSTAS	7
1.4	OBJETIVOS	8
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
2	PERDA DE CARGA NOS PERMUTADORES E PAREDES DOS FORNOS.....	11
2.1	PERDAS DE CARGA NOS PERMUTADORES DE CALOR	11
2.2	PERDAS DE CARGA NO ARREFECIMENTO DAS PAREDES DO FORNO.....	17
3	SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DA INSTALAÇÃO ATUAL	21
3.1	PERDA DE CARGA NAS VÁLVULAS	21
3.1.1	<i>Equilíbrio de caudais dentro do forno e k_{eq}</i>	23
3.1.2	<i>Perdas de carga nas tubagens de ambos os circuitos</i>	25
3.1.3	<i>Pressão no ponto C</i>	26
3.1.4	<i>Cálculo de k_{vforno}</i>	27
3.2	SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DA INSTALAÇÃO ATUAL.....	28
3.3	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	30
3.3.1	<i>Adaptação das curvas da bomba</i>	32
3.3.2	<i>Altura manométrica experimental</i>	33
3.3.3	<i>Comparação entre valores experimentais e analíticos</i>	34
4	SIMULAÇÃO DAS ALTERNATIVAS PROPOSTAS À INSTALAÇÃO ATUAL	37
4.1	CIRCUITO PRESSURIZADO	37
4.2	CIRCUITO COM MUDANÇA DA DISPOSIÇÃO DOS FORNOS (CASO I).....	39
4.3	SEPARAÇÃO DOS CIRCUITOS DOS PERMUTADORES E DAS PAREDES (CASO II)	42
4.4	MUDANÇA DA DISPOSIÇÃO DOS FORNOS E SEPARAÇÃO DOS CIRCUITOS DOS PERMUTADORES E DAS PAREDES (CASO III)....	46
4.5	SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS ALTERNATIVAS.....	49
4.6	CÁLCULO DA POTÊNCIA ELÉTRICA E ANÁLISE ECONÓMICA.....	51
4.6.1	<i>Escolha das bombas novas para cada circuito</i>	51
4.6.2	<i>Determinação dos pontos de funcionamento nominais</i>	53
4.6.3	<i>Análise económica</i>	55
4.6.4	<i>Dimensionamento dos tubos de pressurização instalação C</i>	59
5	CONCLUSÕES	61
5.1	TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS	63
	ANEXO A – DEMONSTRAÇÃO DA EQUAÇÃO DA EQUAÇÃO DE CÁLCULO DO K_{EQ}.....	65
	ANEXO B – CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS ALTERNATIVAS	67
	ANEXO C – DADOS E OBTENÇÃO DO RENDIMENTO DO MOTOR PARA AS DIFERENTES BOMBAS.....	71

Nomenclatura

Símbolo	Descrição	Unidades
A	Área	[m ²]
C_H	Coeficiente de altura adimensional	[-]
C_P	Coeficiente de potência adimensional	[-]
$C_{\dot{V}}$	Coeficiente de caudal adimensional	[-]
D	Diâmetro	[m]
D_h	Diâmetro hidráulico	[m]
E	Energia	[kWh]
f	Fator de atrito	[-]
f	Frequência	[Hz]
g	Aceleração gravítica	[m/s ²]
h	Altura	[m]
h_b	Altura manométrica	[m]
k	Coeficiente de perda de carga localizada	[-]
L	Comprimento	[m]
$\dot{m}$	Caudal mássico	[kg/s]
N	Velocidade de rotação	[rpm]
P	Pressão	[kPa]
$P_{elétrica}$	Potência elétrica	[kW]
P_{veio}	Potência no veio	[kW]
R_c	Raio de curvatura	[m]
Re	Número de Reynolds	[-]
Rel_{Rough}	Rugosidade relativa	[-]
$Rough$	Rugosidade	[mm]
T	Temperatura	[°C]
v	Velocidade	[m/s]
$\dot{V}$	Caudal volúmico	[m ³ /h]

Letras Gregas

Símbolo	Descrição	Unidades
Δp	Diferença de pressão	[kPa]
Δz	Diferença de altura	[m]
ρ	Massa volúmica	[kg/m ³]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema simplificado da instalação.....	2
Figura 2: Esquema do circuito de fornos 2.	3
Figura 3: Esquema do circuito de fornos 1.	3
Figura 4: Esquema do circuito da torre de arrefecimento.....	3
Figura 5: Perda de carga na torre em função do caudal que circula na torre.	4
Figura 6: Curva característica das bombas dos circuitos de arrefecimento dos fornos.	5
Figura 7: Curva característica das bombas do circuito da torre de arrefecimento.	5
Figura 8: Curva de NPSH das bombas dos circuitos de arrefecimento dos fornos.....	5
Figura 9: Curva de potência das bombas dos circuitos de arrefecimento dos fornos.	6
Figura 10: Curva de NPSH das bombas do circuito da torre de arrefecimento.....	6
Figura 11: Curva de potência das bombas do circuito da torre de arrefecimento.	6
Figura 12: Esquema simplificado circuito aberto.	7
Figura 13: Esquema simplificado circuito pressurizado.....	7
Figura 14: Desenho do formato de um tubo dos permutadores de calor.	11
Figura 15: Fotografia de um permutador de calor.....	12
Figura 16: Dados e fórmulas inseridas no programa EES para o caso do permutador de calor do forno B1T.	13
Figura 17: Aplicação das equações 7 e 8 para a 3ª circunferência do permutador do forno B1T.	14
Figura 18: Entrada do primeiro coletor para um tubo.	14
Figura 19: Saída de um tubo para o segundo coletor.....	14
Figura 20: Tabela com valores de $k_{p.l.}$ para o cálculo de $k_{ent.}$ (Idelcik, 1979)	15
Figura 21: Tabela com valores de A para o cálculo de $k_{p.l.}$ para a saída do tubo para o coletor. (Idelcik, 1979)	16
Figura 22: Gráfico da queda de pressão em função do quadrado da velocidade para o permutador do forno B2T.....	17
Figura 23: Gráfico da perda de carga no arrefecimento da parede do forno B1R em função do quadrado da velocidade.	18
Figura 24: Esquema de um percurso possível a ser percorrido no circuito 2.....	23
Figura 25: Esquema do circuito 2 com notação de caudal e perda de carga nas tubagens.....	28
Figura 26: Curva da instalação do circuito 1 sem nenhum forno em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	30
Figura 27: Curva da instalação do circuito 2 sem nenhum forno em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	30
Figura 28: Curva da instalação do circuito 1 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	30
Figura 29: Curva da instalação do circuito 2 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	30
Figura 30: Curva da instalação do circuito 1 com os fornos 1,3,6 e 8 em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	30
Figura 31: Curva da instalação do circuito 2 com os fornos a, d e e em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	30
Figura 32: Curva característica da bomba adimensional.....	33

Figura 33: Curva adimensional de potência no veio da bomba.	33
Figura 34: Gráfico curva da instalação do circuito 1 sem nenhum forno em arrefecimento.	34
Figura 35: Gráfico de curva da instalação do circuito 2 sem nenhum forno em arrefecimento.	35
Figura 36: Gráfico da curva da instalação do circuito 1 com os fornos 1, 6 e 8 em arrefecimento.	35
Figura 37: Gráfico da curva de instalação do circuito 1 com os fornos 3,5 e 6 em arrefecimento.	35
Figura 38: Gráfico da curva da instalação do circuito 2 com o forno a em arrefecimento.	36
Figura 39: Curva da instalação do circuito 1 sem nenhum forno em arrefecimento.	38
Figura 40: Curva da instalação do circuito 2 sem nenhum forno em arrefecimento.	38
Figura 41: Curva da instalação do circuito 1 com todos os fornos em arrefecimento.	39
Figura 42: Curva da instalação do circuito 2 com todos os fornos em arrefecimento.	39
Figura 43: Curva da instalação do circuito 1 com os fornos 1,3,6 e 8 em arrefecimento.	39
Figura 44: Curva da instalação do circuito 2 com os fornos a, d e e em arrefecimento.	39
Figura 45: Disposição dos fornos no circuito 3.	40
Figura 46: Disposição dos fornos no circuito 4.	40
Figura 47: Curva da instalação do circuito 3 sem nenhum forno em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	42
Figura 48: Curva da instalação do circuito 4 sem nenhum forno em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	42
Figura 49: Curva da instalação do circuito 3 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	42
Figura 50: Curva da instalação do circuito 4 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	42
Figura 51: Curva da instalação do circuito 3 com os fornos 1,2,3 e 4 em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	42
Figura 52: Curva da instalação do circuito 4 com os fornos c, d, e e f em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	42
Figura 53: Esquema do circuito 6, circuito de todos os permutadores de calor, com ponto C assinalado. O circuito 5 é em tudo idêntico a este mas relativo agora às paredes.	43
Figura 54: Curva da instalação do circuito 5. ■ Ponto de funcionamento nominal.	45
Figura 55: Curva da instalação do circuito 6 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	45
Figura 56: Curva da instalação com os fornos 1, 3, 6, 8, 9, 12 e 13. ■ Ponto de funcionamento nominal.	46
Figura 57: Curva da instalação do circuito 7. ■ Ponto de funcionamento nominal.	48
Figura 58: Curva da instalação do circuito 8 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	48
Figura 59: Curva da instalação do circuito 8 com os fornos 1, 2, 3 e 4 em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	48
Figura 60: Curva da instalação do circuito 9 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	48
Figura 61: Curva da instalação do circuito 9 com os fornos 10, 11, 12 e 13 em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.	48
Figura 62: Esquema geral da instalação A.	49
Figura 63: Esquema geral da instalação B.	49
Figura 64: Esquema geral da instalação C.	50

Figura 65: Esquema da alteração do tanque e dos tubos de pressurização.....	59
Figura 66: Esquema do interior do forno com os coeficientes de perda de carga localizada envolvidos assinalados.....	65
Figura 67: Curva característica da bomba Wilo CronoNorm-NL 150-250.....	67
Figura 68: Curva de potência da bomba Wilo CronoNorm-NL 150-250.....	67
Figura 69: Curva de NPSH da bomba Wilo CronoNorm-NL 150-250.....	67
Figura 70: Curva característica da bomba Wilo CronoNorm-NL 100-160.....	68
Figura 71: Curva de potência da bomba Wilo CronoNorm-NL 100-160.....	68
Figura 72: Curva de NPSH da bomba Wilo CronoNorm-NL 100-160.....	68
Figura 73: Curva característica da bomba Wilo CronoNorm-NLG 200-315.....	69
Figura 74: Curva de potência da bomba Wilo CronoNorm-NLG 200-315.....	69
Figura 75: Curva de NPSH da bomba Wilo CronoNorm-NLG 200-315.....	69
Figura 76: Curva característica da bomba Wilo CronoNorm-NL 80-160.....	70
Figura 77: Curva de potência da bomba Wilo CronoNorm-NL 80-160.....	70
Figura 78: Curva de NPSH da bomba Wilo CronoNorm-NL 80-160.....	70

Índice de Tabelas

Tabela 1: Duração média do arrefecimento das peças em cada forno	7
Tabela 2: Raios de curvatura das circunferências do permutador de calor de cada forno	12
Tabela 3: Dados inseridos comuns a todos os permutadores de calor	13
Tabela 4: Quocientes de caudal e área para o cálculo de k_{ent}	15
Tabela 5: Quocientes de caudal e área para o cálculo de k_{sai}	15
Tabela 6: Resultados de $k_{p.i.}$ e de k_{ent} e k_{sai} para cada forno	16
Tabela 7: Valores dos coeficientes de perda de carga localizada dos permutadores de calor.....	17
Tabela 8: Dimensões exteriores dos fornos.....	17
Tabela 9: Valores dos coeficientes de perda de carga localizada no arrefecimento das paredes.....	19
Tabela 10: Caudais nominais nos permutadores de calor e arrefecimento das paredes do circuito 1	22
Tabela 11: Caudais nominais nos permutadores de calor e arrefecimento das paredes do circuito 2	22
Tabela 12: Resultados do coeficiente de perda de carga localizada equivalente de cada forno no circuito 1.....	24
Tabela 13: Resultados do coeficiente de perda de carga localizada equivalente de cada forno do circuito 2.....	25
Tabela 14: Valores do coeficiente de perda de carga localizada dos três tipos de perdas localizadas nas tubagens.....	25
Tabela 15: Valores dos dados e resultados do cálculo do coeficiente de atrito no circuito 1	26
Tabela 16: Valores dos dados e resultados do cálculo do coeficiente de atrito no circuito 2	26
Tabela 17: Valores da pressão absoluta no ponto C consoante os diversos caminhos do circuito 1..	27
Tabela 18: Valores da pressão absoluta no ponto C consoante os diversos caminhos do circuito 2..	27
Tabela 19: Resultados de $k_{v\text{forno}}$ do circuito 1	27
Tabela 20: Resultados de $k_{v\text{forno}}$ do circuito 2	28
Tabela 21: Medições de pressão à entrada e saída da bomba e rotação e frequência para diferentes situações de funcionamento real dos circuitos	31
Tabela 22: Par de dados rotação - frequência para uma situação de funcionamento em cada circuito	31
Tabela 23: Valores de m para cada circuito.....	32
Tabela 24: Valores de rotação calculados para as situações onde se mediu a frequência	32
Tabela 25: Altura da bomba obtida a partir das pressões experimentais e com base na Eq. (58)	34
Tabela 26: Valores da altura manométrica obtida analiticamente e experimentalmente.	36
Tabela 27: Resultados de $k_{v\text{forno}}$ do circuito 1	38
Tabela 28: Resultados de $k_{v\text{forno}}$ do circuito 2	38
Tabela 29: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 3	40
Tabela 30: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 4	40
Tabela 31: Valores da pressão no ponto C consoante os diversos trajetos do circuito 3	41
Tabela 32: Valores da pressão no ponto C consoante os diversos trajetos do circuito 4	41
Tabela 33: Valores de $k_{v\text{forno}}$ do circuito 3	41
Tabela 34: Resultados de $k_{v\text{forno}}$ do circuito 4	41
Tabela 35: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 5	43
Tabela 36: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 6	43

Tabela 37: Valores de P_{C_i} para o circuito 5	44
Tabela 38: Valores de P_{C_i} para o circuito 6	44
Tabela 39: Valores de k_{vpar} para o circuito 5	45
Tabela 40: Valores de k_{vper} para o circuito 6	45
Tabela 41: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 8	46
Tabela 42: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 9	47
Tabela 43: Valores da pressão no ponto C e k_{vpar} para o circuito 7	47
Tabela 44: Valores da pressão no ponto C e de k_{vper} consoante os diversos trajetos do circuito 8.....	47
Tabela 45: Valores da pressão no ponto C e de k_{vper} consoante os diversos trajetos do circuito 9.....	47
Tabela 46: Casos e circuitos analisados.....	49
Tabela 47: Alternativas e casos que serão analisados.....	51
Tabela 48: Valores de caudal e altura manométrica do ponto crítico da bomba B4 para todos os casos.	52
Tabela 49: Valores de caudal e altura manométrica do ponto crítico da bomba B3 para as instalações alternativas	53
Tabela 50: Referências e diâmetro do impulsor da bomba escolhida para cada situação	53
Tabela 51: Potência elétrica, kW, em cada situação de funcionamento para as alternativas à instalação atual	55
Tabela 52: Valores das parcelas do custo inicial para cada alternativa	56
Tabela 53: Tempo de retorno de investimento e retorno ao fim de 10 anos para a situação analisada	57
Tabela 54: Valores de energia, custo e CO ₂ poupados anualmente consoante as diferentes alternativas	58
Tabela 55: Valores da potência nominal do motor para cada bomba	71
Tabela 56: Valores do rendimento do motor [%] para diferentes percentagens de carga	71

1 Introdução

Esta dissertação insere-se no Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica, na Especialidade de Energia Térmica.

Este trabalho foi possível devido a uma parceria entre a Ramada Aços S.A, a Metalsolvus e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Conforme indica o título, o objetivo deste trabalho é a otimização de um circuito de arrefecimento de fornos para tratamentos térmicos.

Em primeiro lugar, será feito um estudo e descrito o funcionamento atual dos diferentes circuitos (dos fornos e da torre de arrefecimento) e equipamentos importantes para o entendimento da instalação, bem como as modificações sugeridas para atingir os objetivos iniciais.

Posteriormente, será feita uma simulação hidráulica da instalação atual e das diversas alternativas à instalação atual, de onde se prosseguirá para a análise energética e económica das diversas alternativas.

Neste capítulo de introdução será feita uma breve apresentação à empresa e uma descrição da instalação atual e das mudanças sugeridas para alcançar o objetivo final.

1.1 A empresa Ramada Aços S.A.

A Ramada Aços é uma empresa especializada maioritariamente no comércio, tratamento e soluções de aço. Foi fundada em Ovar no ano de 1935 por Francisco F. Ramada e, atualmente, possui filiais no Porto, Braga, Águeda, Marinha Grande e Lisboa.

Quando foi criada, a principal área de negócio desta empresa era a fita de serra para madeira. Uns anos mais tarde, desenvolve-se a área de comercialização de aços e, posteriormente, em 1950, dá-se início a prestação de serviços de tratamentos térmicos. Mais recentemente, em 2010 e 2012 houve um alargamento da gama de produtos com a comercialização de aços inoxidáveis e de ligas não ferrosas.

Atualmente, a empresa apresenta uma forte presença no mercado dos tratamentos térmicos, sendo capaz de fornecer serviços de têmpera, nitruração, cementação, precipitação, entre outros. Além disto, também possibilita a produção customizada de peças com maquinaria de alta precisão permitindo ir ao encontro dos requisitos do cliente.

1.2 Instalação Atual

Nesta secção segue-se a descrição da instalação atual de arrefecimento dos fornos para tratamentos térmicos.

A instalação é constituída por um tanque, que funciona como volante de inércia térmico, a torre de arrefecimento e dois circuitos, em paralelo e independentes, de arrefecimento dos fornos que serão mostrados com maior pormenor mais à frente nesta secção.

O tanque tem 80 m³ de volume para armazenamento da água (que se encontra à pressão atmosférica) e está dividido em três zonas através de duas divisórias que permitem a passagem de água entre as diferentes zonas através de aberturas retangulares no fundo das divisórias.

Para a torre de arrefecimento, a água é bombeada a partir da zona do tanque onde é depositada a água proveniente dos circuitos de arrefecimento dos fornos, ou seja, a zona do tanque onde, em princípio, a água estará a uma temperatura maior. Depois de arrefecida, a água é conduzida novamente para o tanque, sendo colocada numa zona distinta da já considerada, de onde saem também as condutas que conduzem a água para os circuitos de arrefecimento dos fornos.

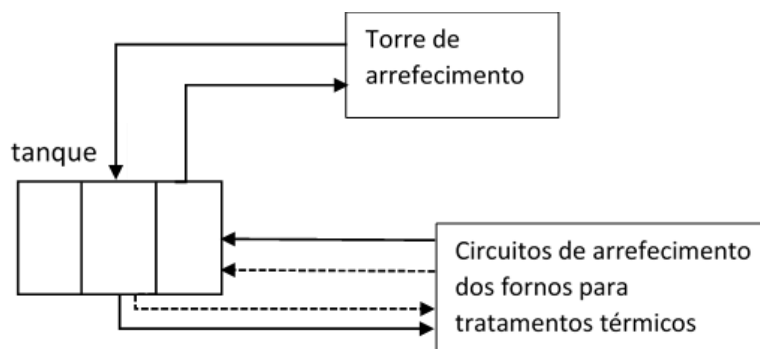


Figura 1: Esquema simplificado da instalação.

1.2.1 Circuito Fornos

Nesta instalação existem 2 circuitos de arrefecimento de fornos para tratamentos térmicos que a passam a ser designados como circuito 1 e 2. Cada um destes tem um número diferente de fornos, todos com a mesma linha de fornecimento de água ao forno (ida), a mesma linha de retorno ao tanque, atualmente aberto para a atmosfera, e o mesmo grupo de bombagem.

Na entrada dos fornos a pressão está a 3 bar relativos e, no retorno, encontra-se a 0 bar relativos.

Em cada forno é necessária água para o arrefecimento das paredes do mesmo e para o arrefecimento indireto das peças. O arrefecimento das paredes do forno é feito através de uma conduta helicoidal encostada à parede do forno e funciona permanentemente com um caudal constante, quer o forno esteja em fase de aquecimento, arrefecimento ou desligado, por questões de segurança. Para o arrefecimento das peças, cada forno tem um permutador de calor interno (água-gás) no qual passa a água e requer um caudal diferente consoante o forno, que apenas é necessário no período de arrefecimento das peças.

No circuito 1 há 8 fornos e no circuito 2 existem 5 fornos com necessidades de arrefecimento diferentes e diferentes permutadores de calor, representados nos esquemas abaixo.

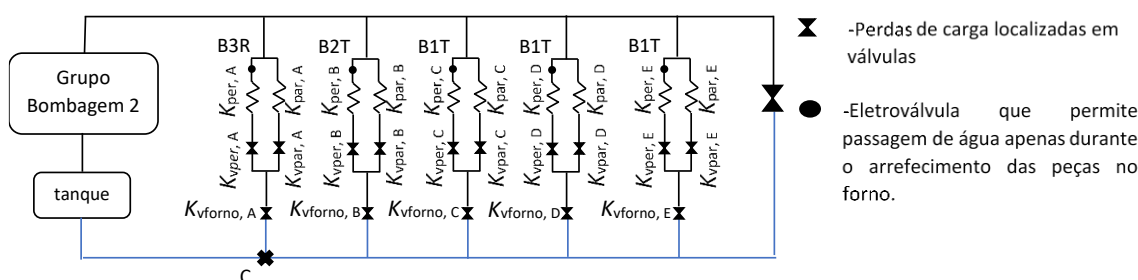


Figura 2: Esquema do circuito de fornos 2.

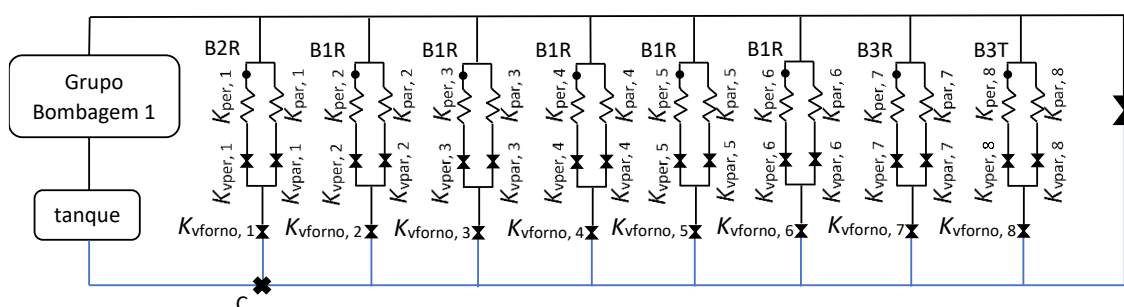


Figura 3: Esquema do circuito de fornos 1.

A perda de carga no interior do permutador de calor e a perda de carga para arrefecimento das paredes é diferente consoante os fornos. Para equilibrar os caudais em circulação no interior do forno, isto é, o caudal que circula no permutador de calor e o que circula na conduta de arrefecimento das paredes, foi considerado existirem válvulas cujos coeficientes de perda de carga localizada estão assinalados na figura e serão denominados a partir deste ponto como k_{vpar} para as válvulas que se situam após o arrefecimento das paredes e k_{vper} para as válvulas colocadas após o permutador de calor.

Para regular o caudal que circula em cada ramal e obter a mesma pressão no retorno de todos os fornos no ponto C existem válvulas após cada forno, cujo coeficiente de perda de carga localizada é k_{vforno} , que garantem a pressão desejada antes de estas condutas se voltarem a juntar.

Para diferenciar os coeficientes de perda de carga localizada das válvulas referidas anteriormente, para o circuito 1 utilizam-se números e para o circuito 2 utilizam-se letras.

1.2.2 Circuito da Torre de Arrefecimento

O circuito da torre de arrefecimento, já referido anteriormente e do qual se encontra um esquema abaixo, permite o arrefecimento da água no tanque.

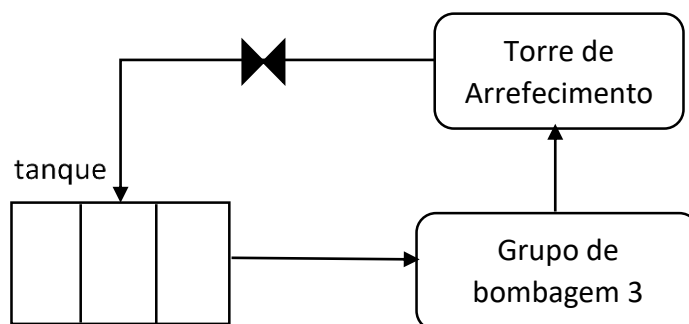


Figura 4: Esquema do circuito da torre de arrefecimento.

A torre de arrefecimento tem uma perda de carga que, através de dados fornecidos pela empresa onde a torre foi comprada podemos saber que se relaciona com o caudal através do gráfico da figura 5 e pode também ser caracterizada pelo seguinte polinómio:

$$\Delta p_{torre} = 0.00106 * \dot{V}^2 + 0.0631 * \dot{V} + 0.154 \quad (1)$$

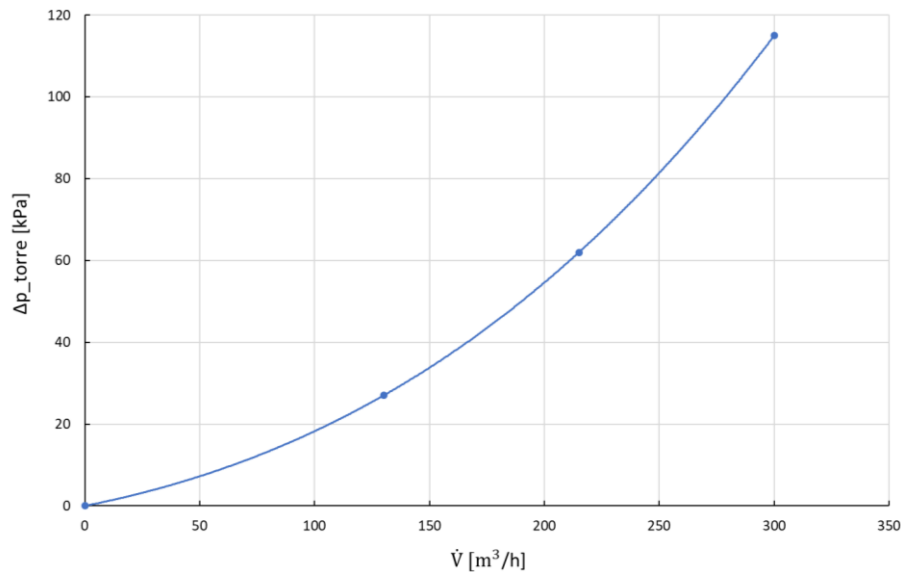


Figura 5: Perda de carga na torre em função do caudal que circula na torre.

1.2.3 Grupos de Bombagem

Na totalidade da instalação existem 3 grupos de bombagem, um para cada um dos dois circuitos de arrefecimento dos fornos e um para o circuito da torre de arrefecimento.

Cada grupo de bombagem é composto por 2 bombas iguais colocadas em paralelo e que funcionam em alternância. As bombas dos circuitos para arrefecimento dos fornos são iguais em ambos os circuitos, mas diferem das do grupo de bombagem 3. As curvas das bombas existentes em ambos os circuitos, cujo fabricante é a Wilo e que têm um diâmetro do impulsor de 200 mm para os circuitos 1 e 2 (série Wilo-CronoNorm) e de 270 mm (série Wilo-CronoBloc) para o circuito da torre estão representadas nas figuras 6 e 7 respectivamente que se seguem.

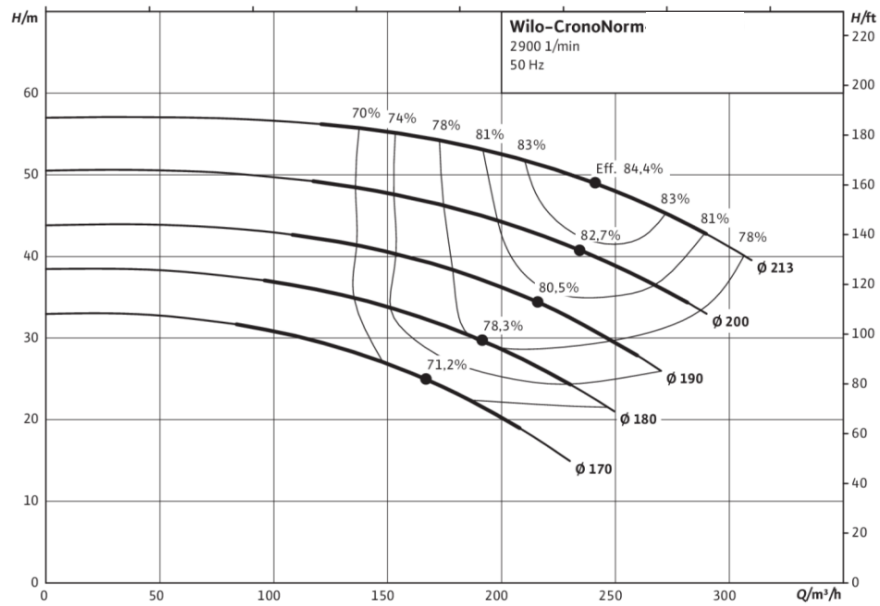


Figura 6: Curva característica das bombas dos circuitos de arrefecimento dos fornos.

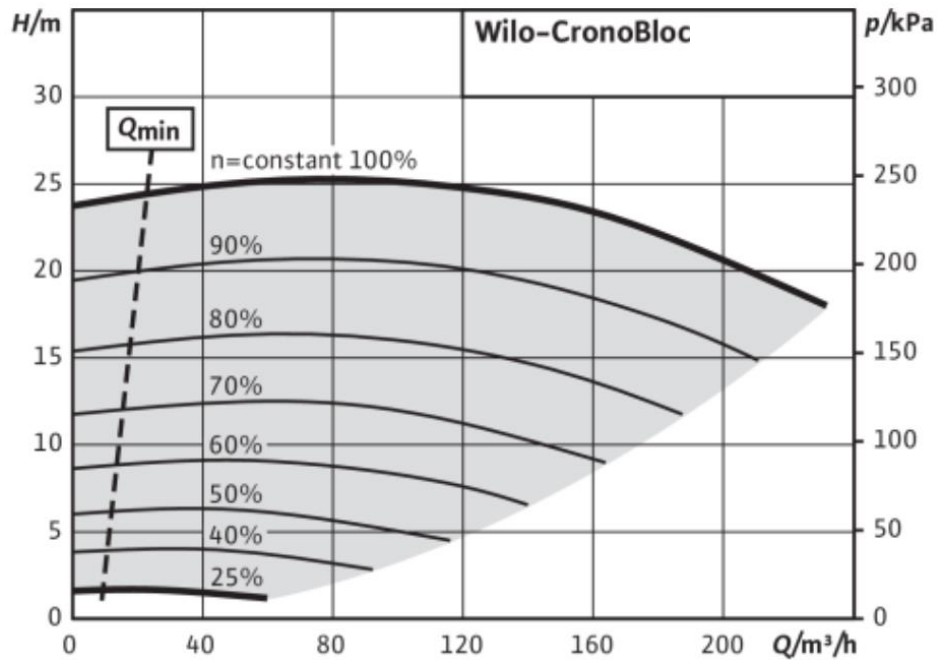


Figura 7: Curva característica das bombas do circuito da torre de arrefecimento.

Além das curvas já apresentadas, nas figuras seguintes estão representadas as curvas de NPSH e de potência para ambos os tipos de bomba usados na instalação.

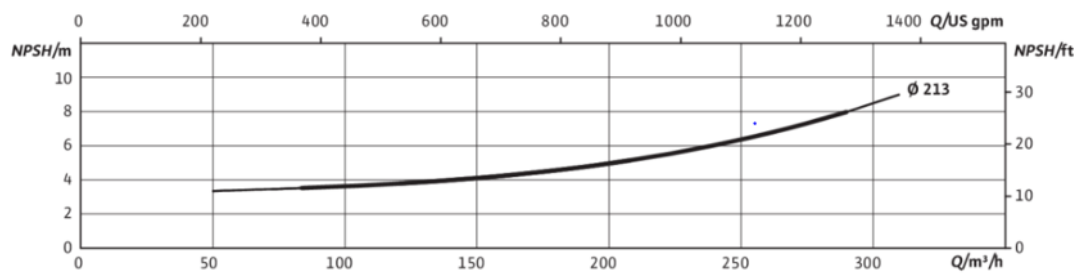


Figura 8: Curva de NPSH das bombas dos circuitos de arrefecimento dos fornos.

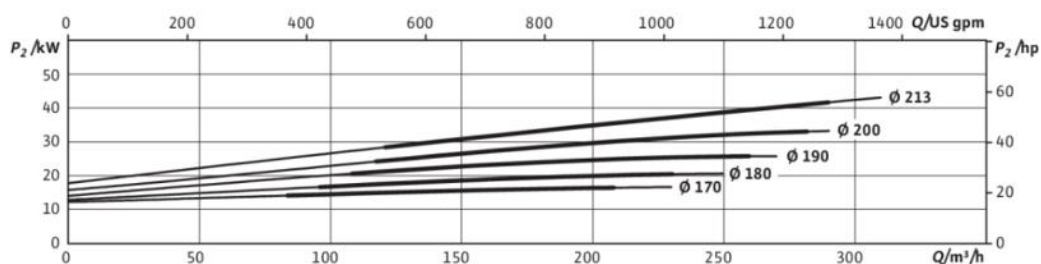


Figura 9: Curva de potência das bombas dos circuitos de arrefecimento dos fornos.

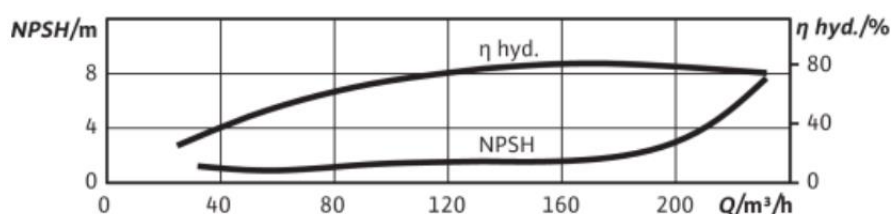


Figura 10: Curva de NPSH das bombas do circuito da torre de arrefecimento.

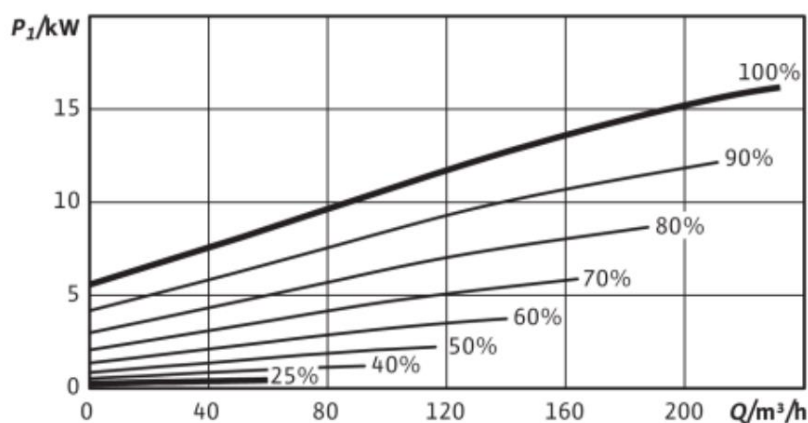


Figura 11: Curva de potência das bombas do circuito da torre de arrefecimento.

1.2.4 Funcionamento típico

Para analisar os circuitos é importante saber que, além dos fornos não arrefecerem peças a totalidade do seu tempo de trabalho, também não o fazem todos em simultâneo.

A parte do arrefecimento das paredes de cada forno está em permanente funcionamento, ainda que o forno esteja desligado.

O arrefecimento de peças, quando está a circular água no permutador de calor do forno, possui tempos de execução distintos consoante o forno em questão, mas também consoante o volume de peças a serem arrefecidas no interior do forno. Na tabela 1, estão os intervalos de tempo aproximados que dura o arrefecimento das peças consoante o forno.

Tabela 1: Duração média do arrefecimento das peças em cada forno

Forno	Tempo
B1R	2 a 3 horas
B2R	6 horas
B3R	6 horas
B1T	20 a 40 minutos
B2T	3 a 4 horas
B3T	3 a 4 horas

A situação mais comum de funcionamento para cada circuito é no circuito 1 estarem 3 fornos de revenido, com a letra R na designação, e 1 de têmpera, com a letra T na designação, em arrefecimento em simultâneo e no circuito 2 estarem 2 fornos de têmpera e 1 de revenido.

1.3 Soluções alternativas propostas

Com o objetivo da otimização energética da instalação serão propostas algumas alternativas à instalação atual. Grande parte da energia utilizada na instalação e que se pretende diminuir é a da bombagem da água num circuito para 3 bar relativos e a do outro circuito para 2.5 bar relativos.

Na instalação atual, o tanque encontra-se à pressão atmosférica, ou seja, tem de se utilizar as bombas para aumentar a pressão da água dos 0 bar relativos para o valor pretendido à ida para os fornos.

A primeira alternativa consiste na pressurização do circuito, ou seja, estando o tanque pressurizado, o grupo de bombagem apenas tem de superar a perda de carga (queda de pressão) que ocorre nos fornos, como se pode observar nos esquemas das figuras 12 e 13. Com a pressurização do circuito, em todas as alternativas propostas, pretende-se também evitar o contacto da água com o oxigénio do ar.

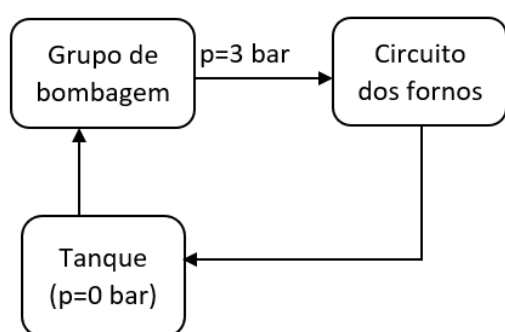


Figura 12: Esquema simplificado circuito aberto.

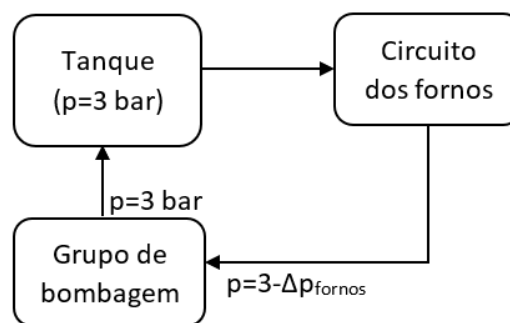


Figura 13: Esquema simplificado circuito pressurizado.

A segunda alternativa à instalação atual é a mudança de fornos de local em conjunto com a pressurização dos circuitos. Em cada circuito, a queda de pressão a ser superada pela bomba é imposta pelo forno com maior perda de carga uma vez que os fornos estão em paralelo e há a necessidade de equilibrar os caudais. Assim sendo, ao agrupar os fornos com perda de carga mais baixa num circuito e os restantes no outro

circuito, a queda de pressão a ser superada no circuito dos fornos com baixa perda de carga seria bastante menor levando a um menor consumo energético.

A terceira alternativa passa por, além da pressurização, a separação dos circuitos de arrefecimento das peças e de arrefecimento das paredes. Tal deverá ser vantajoso pois, além de ser previsto uma menor perda de carga no arrefecimento das paredes dos fornos em relação aos permutadores de calor, o arrefecimento das paredes funciona constantemente e com um caudal constante o que permite ter a bomba a funcionar sempre no mesmo ponto de funcionamento.

A quarta alternativa procura aliar a segunda e terceira alternativa e consiste na separação do circuito de arrefecimento das paredes e dos permutadores em conjunto com a mudança da disposição dos fornos. Nesta situação, existem 3 circuitos, um para o arrefecimento das paredes de todos os fornos, um para os permutadores dos fornos de maior perda de carga e outro para os permutadores dos fornos de menor perda de carga. Esta alternativa deverá ser vantajosa pois, além de ter o circuito das paredes sempre com o mesmo ponto de funcionamento e baixa perda de carga, também se pode poupar energia nos permutadores de menor perda de carga por estarem num circuito à parte dos restantes.

1.4 Objetivos

Conforme referido anteriormente, o objetivo deste trabalho é a otimização energética do circuito de arrefecimento de fornos para tratamentos térmicos.

Este estudo é necessário pois a instalação, no seu funcionamento normal, gasta bastante energia na bombagem da água para os circuitos de arrefecimento, o que se reflete também num elevado gasto económico e custo ambiental.

Para atingir este objetivo foi realizada a simulação hidráulica da instalação atual com posterior comparação com os valores reais disponíveis e também a simulação hidráulica com as variantes descritas na secção anterior.

Além da simulação hidráulica da instalação e suas variantes, pretende-se fazer uma comparação entre elas e uma breve análise económica de modo a determinar qual a opção mais vantajosa.

1.5 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos e 3 anexos.

No segundo capítulo apresenta-se o cálculo dos coeficientes de perda de carga localizada correspondentes à queda de pressão nos permutadores de calor dos diferentes fornos e também da conduta de arrefecimento das paredes dos fornos, a fim de nos capítulos seguintes ser possível a simulação hidráulica da instalação atual e suas variantes. Tal foi necessário pois o fabricante dos fornos não disponibiliza esta informação.

No terceiro capítulo é apresentada a simulação hidráulica da instalação atual, isto é, de ambos os circuitos e em situações diferentes de funcionamento como nenhum, todos e apenas alguns fornos em arrefecimento. Além disto, é realizada uma comparação entre os resultados obtidos através das simulações com dados experimentais.

No quarto capítulo está descrita a simulação hidráulica dos circuitos pressurizados sem qualquer outra modificação da instalação atual, da instalação pressurizada com modificação do local dos fornos, da instalação com separação dos circuitos dos permutadores de calor e do arrefecimento das paredes dos fornos e a instalação que além

da separação do circuito das paredes dos permutadores também existe uma variação na disposição dos fornos. Mostra-se ainda uma comparação entre os circuitos alternativos e a instalação atual através de uma breve análise económica

No quinto capítulo, inserem-se as principais conclusões que derivam deste trabalho assim como as sugestões de trabalhos futuros.

2 Perda de carga nos permutadores e paredes dos fornos

Neste capítulo será realizado o cálculo dos coeficientes de perda de carga localizada dos permutadores de calor e do arrefecimento das paredes do forno, em virtude desta informação não ter sido disponibilizada pelo fornecedor do equipamento.

Os resultados obtidos são os que irão permitir simular a instalação atual e as variantes em estudo e, posteriormente, obter uma comparação entre elas.

2.1 Perdas de carga nos permutadores de calor

Os permutadores de calor gás-água dos diferentes fornos, embora todos de dimensões e número de tubos diferentes, possuem um formato semelhante. São constituídos por um número diverso de tubos com um formato semelhante a uma serpentina constituída por circunferências de raio sucessivamente menor como a da figura 14 por onde passa a água para arrefecer o azoto que é por sua vez utilizado para arrefecer as peças no interior do forno. Os tubos em serpentina estão dispostos paralelamente entre si e a água é distribuída nos diversos tubos através de um coletor e recolhida no final dos tubos através de um segundo coletor.

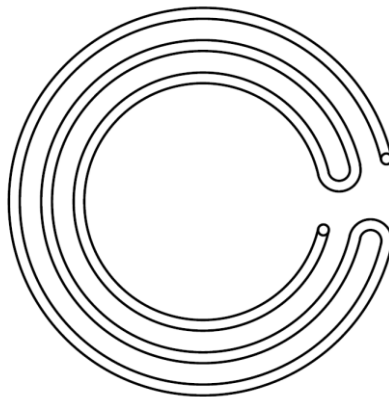


Figura 14: Desenho do formato de um tubo dos permutadores de calor.

Para permitir uma troca mais eficiente de calor, os tubos possuem alhetas conforme é possível observar na figura 15.



Figura 15: Fotografia de um permutador de calor.

O número de circunferências que os tubos do permutador de calor de cada forno percorrem é diferente e, na tabela 2, são representados os raios de curvatura das circunferências percorridas em cada forno. Os raios de curvatura estão numerados da circunferência exterior até à interior.

Tabela 2: Raios de curvatura das circunferências do permutador de calor de cada forno

Forno	B1R	B2R	B3R	B1T	B2T	B3T
Raio curvatura 1 [m]	0.634		0.980	0.633	0.870	0.918
Raio curvatura 2 [m]	0.545		0.925	0.577	0.775	0.8485
Raio curvatura 3 [m]	-		0.870	0.522	0.680	0.779
Raio curvatura 4 [m]	-		0.815	0.467	0.585	0.7095
Raio curvatura 5 [m]	-		0.760	-	0.490	0.640

A fim de posteriormente ser possível simular o comportamento hidráulico dos circuitos, não tem interesse apenas calcular um valor específico de perda de carga para um dado caudal, mas sim calcular o coeficiente de perda de carga localizada associado ao permutador de calor de cada forno. Para se obter este valor, é necessário obter a perda de carga para diferentes valores de velocidade no interior dos tubos do permutador de calor.

Como se pode verificar na tabela 2, não foi possível obter as medidas do permutador de calor do forno B2R. Por esta mesma razão, a partir deste ponto, considera-se que o coeficiente de perda de carga vai ser igual ao do forno B3R por se tratar do forno, em termos de dimensões, mais idêntico. Além disto, uma vez que a dimensão do forno B3R é superior à do B2R, utiliza-se um coeficiente mais elevado do que deverá ser o real e, assim, estudar uma possibilidade pior do que a realidade.

A perda de carga total no permutador é igual à que ocorre em cada tubo do permutador cujos raios de curvatura se apresentam na tabela 2 mais a dos coletores. No entanto, a perda de carga em linha dentro dos coletores não irá ser contabilizada nesta fase, mas sim posteriormente nas perdas de carga das condutas da instalação, incluindo as condutas de acesso aos fornos.

Assim sendo, calcula-se a perda de carga num tubo somando as diversas perdas de carga em linha ao longo das sucessivas condutas circulares, as perdas de carga localizadas

nas curvas a 180° que unem as circunferências e as perdas localizadas inicial e final da ramificação em “T” do coletor para o tubo e do final do tubo para o segundo coletor, através do programa *Engineering Equation Solver* (EES).

Para iniciar o cálculo, é necessário inserir todos os dados necessários, dispostos na tabela 3, antes de prosseguir. Como o objetivo é executar o mesmo cálculo para diferentes velocidades não se vai explicitar nenhuma neste momento.

Tabela 3: Dados inseridos comuns a todos os permutadores de calor

Pressão inicial	380 kPa
Temperatura média	23± 2°C
Diâmetro do tubo (D)	0.020 ± 0.002 m
Rugosidade (Rough)	0.046 ± 0.001 mm

Quanto às propriedades do fluido, apesar de a temperatura sofrer alterações ao longo do permutador, considera-se uma temperatura média de 23°C e a densidade da água é fornecida pelo programa para os valores de temperatura média e pressão inicial já explicitados.

Para cada velocidade calcula-se o caudal volúmico e o caudal mássico através das equações 2 e 3, onde $\dot{V}$ é o caudal volúmico e $\dot{m}$ o caudal mássico que percorre cada tubo do permutador, v é a velocidade no interior dos tubos, D é o diâmetro interno dos tubos do permutador e ρ é a densidade da água.

$$\dot{V} = v * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (2)$$

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} \quad (3)$$

De seguida, calcula-se a rugosidade relativa e o perímetro da primeira circunferência, pois vai ser o comprimento da primeira conduta circular.

$$RelRough = \frac{Rough}{D} \quad (4)$$

$$L = 2 * \pi * R_{c1} \quad (5)$$

A perda de carga ao longo de cada circunferência foi calculada através da função *helicalpipeflow* que quando fornecidos os valores específicos de cada circunferência calcula diversos valores incluindo a queda de pressão ao longo da tubagem.

```
Fluid$='water'
p_1=380 [kPa]
T=23 [C]
rho=density(Fluid$,T=T,P=p_1)
V_dot=v*pi#*D^2/4
m_dot=rho*V_dot
D=0.02 [m]
R_c1=0.633
L1=pi#*R_c1^2
Rough=0.046 [mm]
RelRough=Rough/(D*convert(m,mm))
Call helicalpipeflow( Fluid$, T, p_1, m_dot, D, L1,RelRough,R_c1 : h_T1, h_H1, DELTAP1,Nusselt_T1,f1,Re1)
```

Figura 16: Dados e fórmulas inseridas no programa EES para o caso do permutador de calor do forno B1T.

Após esta fase inicial, utiliza-se a função *k_returnbend* para obter o coeficiente de perda de carga localizada nas curvas a 180° que unem as diferentes circunferências, k_c .

Esta função fornece o valor desejado a partir da rugosidade relativa. Com estes coeficientes de perda de carga localizada, k_c , calcula-se a perda de pressão em cada uma das curvas existentes entre as circunferências (Δp_c).

$$\Delta p_c = k_c * \rho * \frac{v^2}{2} \quad (6)$$

Posteriormente, para cada uma das circunferências seguintes até à última (a mais interior) nas seguintes equações (7) e (8), assinaladas com i , calcula-se a pressão inicial e o perímetro de cada circunferência.

$$P_i = P_{i-1} - \Delta p_{i-1} - \Delta p_c \quad (7)$$

$$L_i = 2 * \pi * R_{ci} \quad (8)$$

Com os valores obtidos destas duas equações calcula-se a perda de carga ao longo da respetiva circunferência e assim sucessivamente até efetuar o cálculo em todas as circunferências.

```
"84T_3"
P_3=P_2-DELTA P2-DELTA P_c1
R_c3=0.522
L3=pi*R_c3*2
Call helicalpipeflow( Fluid$, T, P_3, m_dot, D, L3,RelRough,R_c3 : h_T3, h_H3, DELTA P3,Nusselt_T3,f3,Re3)
```

Figura 17: Aplicação das equações 7 e 8 para a 3ª circunferência do permutador do forno B1T.

A perda de carga localizada na entrada do tubo do permutador, saída do coletor (Δp_{ent}), e da saída do tubo do permutador para o segundo coletor (Δp_{sai}) são calculadas a partir das equações (9) e (10), onde v é a velocidade a que a água percorre os tubos do permutador. (Idelcik, 1979)

$$\Delta p_{ent} = k_{ent} * \rho * \frac{v^2}{2} \quad (9)$$

$$\Delta p_{sai} = k_{sai} * \rho * \frac{v^2}{2} \quad (10)$$

Para o cálculo dos coeficientes de perda de carga localizada na entrada do tubo do permutador, saída do primeiro coletor e saída do tubo do permutador para o segundo coletor, k_{ent} e k_{sai} , considera-se as duas situações descritas nas figuras seguintes.

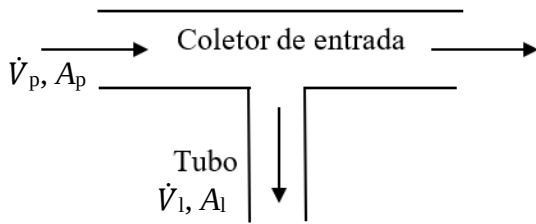


Figura 18: Entrada do primeiro coletor para um tubo.

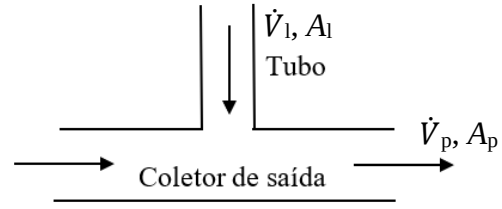


Figura 19: Saída de um tubo para o segundo coletor.

Em primeiro lugar, é necessário calcular os quocientes entre o caudal do tubo e o caudal no coletor e entre a área do tubo e a área do coletor. O diâmetro do coletor é igual ao diâmetro do tubo de acesso a cada forno que é de 0,078 m para todos os fornos exceto o forno B3T cujo diâmetro do coletor é de 0,102 m.

Conforme o tubo em consideração, o quociente entre caudais vai ser diferente. Assim sendo, considera-se os caudais em questão para o tubo intermédio do permutador.

Para os permutadores de calor com um número par de tubos, considera-se o primeiro dos dois tubos intermédios. Os valores dos quocientes de área e caudal estão presentes nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Quocientes de caudal e área para o cálculo de k_{ent}

Forno	número de tubos do permutador	Tubo em consideração	A_l/A_p	$\dot{V}_l/\dot{V}_p$
B1R	8	4	0,0659	0,20
B3R	9	5	0,0659	0,20
B1T	12	6	0,0659	0,14
B2T	12	6	0,0659	0,14
B3T	19	10	0,0383	0,10

Tabela 5: Quocientes de caudal e área para o cálculo de k_{sai}

Forno	número de tubos do permutador	Tubo em consideração	A_l/A_p	$\dot{V}_l/\dot{V}_p$
B1R	8	4	0,0659	0,25
B3R	9	5	0,0659	0,20
B1T	12	6	0,0659	0,17
B2T	12	6	0,0659	0,17
B3T	19	10	0,0383	0,10

Ainda antes de calcular o coeficiente de perda de carga localizada, é necessário determinar o coeficiente de perda de carga localizada calculado com base na velocidade no coletor em ambos os casos denominados de $k_{p.l.}$.

No caso da entrada para o tubo, este valor é retirado da figura 20, que apresenta os coeficientes de perda de carga localizados com base na velocidade no coletor, consoante os quocientes de área e caudal previamente calculados. Na tabela, o caudal está representado por Q e a área por F .

$\frac{F_l}{F_p}$	$\frac{Q_l}{Q_p} \left(\frac{Q_l}{Q_p} \right)$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	Valeurs de $\xi_{p.l.}$									
0,09	2,80	4,50	6,00	7,88	9,40	11,1	13,0	15,8	20,0	24,7
0,19	1,41	2,00	2,50	3,20	3,97	4,95	6,50	8,45	10,8	13,3
0,27	1,37	1,81	2,30	2,83	3,40	4,07	4,80	6,00	7,18	8,90
0,35	1,10	1,54	1,90	2,35	2,73	3,22	3,80	4,32	5,28	6,53
0,44	1,22	1,45	1,67	1,89	2,11	2,38	2,58	3,04	3,84	4,75
0,55	1,09	1,20	1,40	1,59	1,65	1,77	1,94	2,20	2,68	3,30
1,00	0,90	1,00	1,13	1,20	1,40	1,50	1,60	1,80	2,06	2,30

Figura 20: Tabela com valores de $k_{p.l.}$ para o cálculo de k_{ent} . (Idelcik, 1979)

No caso da saída do tubo para o segundo coletor, $k_{p.l.}$ é obtido a partir da equação 11. O valor de A presente na equação, é retirado da tabela da figura 21 através do quociente entre as áreas.

$\frac{F_l}{F_p}$	0-0,2	0,3-0,4	0,6	0,8	1,0
A	1,00	0,75	0,70	0,65	0,60

 Figura 21: Tabela com valores de A para o cálculo de $k_{p.l.}$ para a saída do tubo para o coletor. (Idelcik, 1979)

$$k_{p.l.} = A * \left[1 + \left(\frac{\dot{V}_l}{\dot{V}_p} * \frac{A_p}{A_l} \right)^2 - 2 * \left(1 - \frac{\dot{V}_l}{\dot{V}_p} \right) \right] \quad (11)$$

Para o cálculo quer de k_{ent} como de k_{sai} , com base na velocidade nos tubos, recorre-se à expressão (12) e obtém-se os resultados apresentados na tabela 6.

$$k = \frac{k_{p.l.}}{\left(\frac{\dot{V}_l}{\dot{V}_p} * \frac{A_p}{A_l} \right)^2} \quad (12)$$

 Tabela 6: Resultados de $k_{p.l.}$ e de k_{ent} e k_{sai} para cada forno

Forno	$k_{p.l.}$ entrada	k_{ent}	$k_{p.l.}$ saída	k_{sai}
B1R	5.13	0.56	13.90	0.97
B3R	5.13	0.56	8.62	0.94
B1T	4.00	0.85	5.72	0.90
B2T	4.00	0.85	5.72	0.90
B3T	3.15	0.46	6.04	0.88

Para finalizar, calcula-se a perda de carga total no permutador com a equação (13), assumindo que n é o número de circunferências que o tubo do permutador tem.

$$\Delta p_t = \Delta p_{sai} + \Delta p_{ent} + \sum_1^n \Delta p_i + (n - 1) * \Delta p_c \quad (13)$$

Com toda esta informação, cria-se uma tabela paramétrica onde se inserem diversos valores de velocidade no interior dos tubos do permutador e, correndo o algoritmo realizado no EES, obtém-se o valor da queda de pressão no permutador para cada valor de velocidade inserido. Para todos os permutadores, na tabela em questão, foram utilizados trinta valores de velocidade com o mesmo intervalo entre 0.1 e 4 m/s.

Com estes valores fez-se um ajustamento linear do gráfico da queda de pressão total em função do quadrado da velocidade para obter o coeficiente de perda de carga localizada de cada permutador (k_{per}), como se pode ver nas equações 14 e 15.

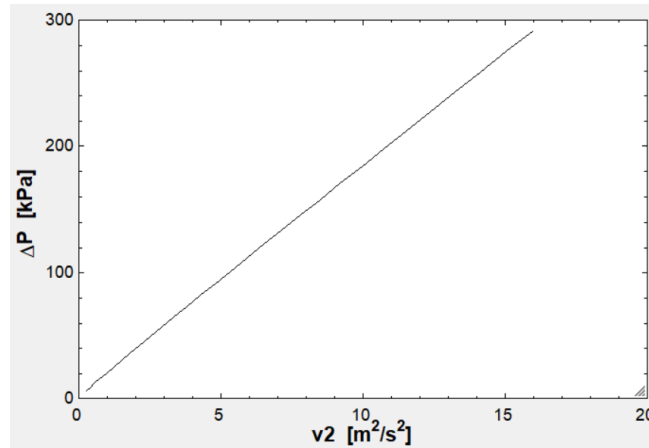


Figura 22: Gráfico da queda de pressão em função do quadrado da velocidade para o permutador do forno B2T.

$$\Delta p_t = a * v^2 \quad (14)$$

$$a = k_{per} * \rho * \frac{1}{2} \quad (15)$$

Realizando o mesmo processo para todos os permutadores de calor, obtém-se os resultados dos coeficientes de perda de carga calculados com base na velocidade nos tubos patentes na tabela 7. A incerteza de cada valor foi calculada através do EES atribuindo incertezas às variáveis independentes. Aos raios de curvatura das circunferências de cada permutador foi atribuída uma incerteza de $\pm 0,05$ m, aos k_{ent} e k_{sai} , uma incerteza de $\pm 0,1$ e aos diâmetros dos tubos uma incerteza de $\pm 0,002$ m.

Tabela 7: Valores dos coeficientes de perda de carga localizada dos permutadores de calor

Forno	B1R	B2R	B3R	B1T	B2T	B3T
k_{per}	14.2 ± 1.6	46.1 ± 5.1	46.1 ± 5.1	26.4 ± 2.9	38.1 ± 4.5	43.4 ± 4.8

2.2 Perdas de carga no arrefecimento das paredes do forno

O arrefecimento das paredes do forno é realizado através duma conduta de secção retangular que percorre helicoidalmente as paredes do forno. A dimensão da secção da conduta é de 0.02×0.2 m² em todos os fornos exceto no forno B3T que se considera ser de 0.02×0.4 m². A dimensão menor é a que está perpendicular à parede do forno. As dimensões exteriores do forno, também necessárias estão descritas na tabela 8.

Tabela 8: Dimensões exteriores dos fornos

Forno	B1R	B2R	B3R	B1T	B2T	B3T
Comprimento forno, L_f [m]	1.3 ± 0.2	1.8 ± 0.2	2.2 ± 0.2	1.3 ± 0.2	1.8 ± 0.2	2.2 ± 0.2
Diâmetro forno, D_f [m]	1.55 ± 0.10	1.40 ± 0.10	2.27 ± 0.10	1.70 ± 0.10	2.00 ± 0.10	2.45 ± 0.10

Supondo que a espessura da parede de todos os fornos é a mesma e igual a 0.020 m e que, para as dimensões da conduta denomina-se h e l para as arestas de menor e maior dimensão respetivamente e cujas incertezas são de $\pm 0,002$ m e $\pm 0,05$ m, obtém-se o raio de curvatura (R_c), a área (A) e o perímetro (P).

$$R_c = \frac{D_f - (2 * 0.03)}{2} \quad (16)$$

$$A_{parede} = l * h \quad (17)$$

$$P = 2 * l + 2 * h \quad (18)$$

Estes valores permitem o cálculo do diâmetro hidráulico (D_h) a partir da equação (19) e o número de voltas que a conduta dá em torno do forno (n) e o comprimento total da conduta (L), nas equações (20) e (21).

$$D_h = \frac{4 * A_{parede}}{P} \quad (19)$$

$$n = \frac{L_f}{l} \quad (20)$$

$$L = n * 2 * \pi * R_c \quad (21)$$

Após o cálculo da rugosidade relativa com a equação (4) onde, no local do diâmetro se utiliza o diâmetro hidráulico calculado na equação (19) e obtidos os valores das equações anteriores, utiliza-se a função *helicalpipeflow* do EES para calcular a perda de carga no arrefecimento das paredes (Δp_p).

Conforme o realizado para cálculo da perda de carga no permutador de calor, obtém-se o valor da perda de carga para diversos valores de velocidade no interior da conduta de arrefecimento das paredes, neste caso, dez valores de velocidade igualmente distanciados entre 0.1 e 1 m/s. Com os valores obtidos, faz-se um ajustamento linear ao gráfico da perda de carga em função do quadrado da velocidade sendo assim possível o cálculo do coeficiente de perda de carga localizada correspondente ao arrefecimento da parede do forno.

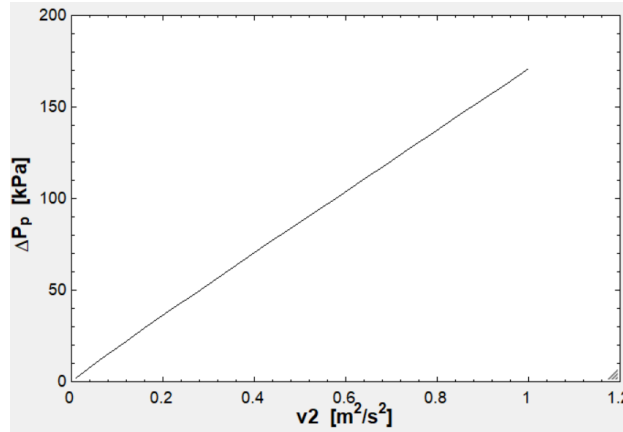


Figura 23: Gráfico da perda de carga no arrefecimento da parede do forno B1R em função do quadrado da velocidade.

$$\Delta p_p = a * v^2 \quad (22)$$

$$a = k_{par} * \rho * \frac{1}{2} \quad (23)$$

Realizados os cálculos para todos os fornos, estão apresentados na tabela 9 os resultados obtidos do coeficiente de perda de carga localizada da conduta de

arrefecimento das paredes. Estes valores são calculados com base na velocidade no interior da conduta de arrefecimento das paredes.

Tabela 9: Valores dos coeficientes de perda de carga localizada no arrefecimento das paredes

Forno	B1R	B2R	B3R	B1T	B2T	B3T
k_{par}	328.6 ± 59.1	413.2 ± 72.3	786.0 ± 153.3	358.1 ± 64.5	576.2 ± 98.0	1330.0 ± 246.0

Para o cálculo das incertezas dos valores obtidos, utilizam-se os valores de incerteza atribuídos às variáveis independentes.

3 Simulação hidráulica da instalação atual

Neste capítulo, é abordada a simulação hidráulica dos circuitos atuais permitindo obter a curva da instalação correspondente a cada um destes circuitos e ainda, a comparação desta com dados obtidos experimentalmente, mais concretamente a altura manométrica da bomba, uma vez que cada bomba possui um manómetro a montante e a jusante.

Esta simulação pretende representar o funcionamento da instalação atual e os resultados obtidos irão permitir a comparação entre as variantes dos circuitos otimizados estudadas no capítulo 4 com o funcionamento atual da instalação.

Ainda antes da execução da simulação hidráulica da instalação atual, é necessário o cálculo dos coeficientes de perda de carga localizada, k_{vper} , k_{vpar} e k_{vforno} , das válvulas presentes em cada circuito que podem ser observadas nas figuras 2 e 3 no capítulo 1, e cuja função é equilibrar os caudais nos diversos ramais e no interior do forno de forma a que nestes circule um caudal próximo do nominal.

Realizado o cálculo dos coeficientes de perda de carga, prosseguir-se-á para a execução da simulação hidráulica e uma comparação entre os resultados experimentais e os obtidos através das simulações.

3.1 Perda de carga nas válvulas

As válvulas, que estão colocadas após o permutador de calor e após a conduta de arrefecimento das paredes dos fornos, k_{vper} , k_{vpar} e k_{vforno} , regulam o caudal que percorre o permutador de calor, k_{vper} , a conduta de arrefecimento das paredes de cada forno, k_{vpar} , e, também, o caudal de cada ramal do circuito, k_{vforno} .

Os coeficientes de perda de carga localizada das válvulas serão calculados para a situação em que todos os fornos estão em arrefecimento. Isto permite que, na realização da simulação hidráulica com todos os fornos simultaneamente em arrefecimento, cada forno seja percorrido pelo seu caudal nominal e quando alguns circuitos estiverem fechados, o caudal não difira muito do nominal. Nas tabelas 10 e 11 estão apresentados os valores dos caudais nominais que percorrem o permutador de calor e o arrefecimento das paredes de cada forno.

Tabela 10: Caudais nominais nos permutadores de calor e arrefecimento das paredes do circuito 1

número	forno	$\dot{V}_{parede}[\text{m}^3/\text{h}]$	$\dot{V}_{permutador}[\text{m}^3/\text{h}]$
1	B2R	10	20
2	B1R	10	15
3	B1R	10	15
4	B1R	10	15
5	B1R	10	15
6	B1R	10	15
7	B3R	10	35
8	B3T	15	75

Tabela 11: Caudais nominais nos permutadores de calor e arrefecimento das paredes do circuito 2

letra	forno	$\dot{V}_{parede}[\text{m}^3/\text{h}]$	$\dot{V}_{permutador}[\text{m}^3/\text{h}]$
a	B3R	10	35
b	B2T	10	50
c	B1T	10	40
d	B1T	10	30
e	B1T	10	40

Para garantir que, na situação de todos os fornos em funcionamento, o caudal que atravessa cada forno seja o nominal, em primeiro lugar, é necessário garantir que dentro de cada forno, o caudal que percorre o permutador e a conduta de arrefecimento das paredes é o nominal. Para isto, calcula-se k_{vper} ou o k_{vpar} de modo a que a queda de pressão na conduta do permutador e na do arrefecimento das paredes tenham a mesma queda de pressão para os seus caudais nominais.

De seguida, calcula-se o coeficiente de perda de carga localizada equivalente a cada forno (k_{eq}), que engloba k_{per} , k_{par} e k_{vper} ou k_{vpar} . Determinado este valor, segue-se o cálculo das perdas de carga em linha e localizadas ao longo da instalação, tendo sempre em conta o caudal nominal que percorre cada tubagem.

Visto que as perdas de carga diferem entre os fornos, o passo seguinte é o cálculo de diferentes valores de pressão no ponto C, visível na figura 24. Cada um destes valores corresponde a um percurso que a água faz dentro do circuito, como o que está assinalado na mesma figura. O número de percursos possíveis é idêntico à quantidade de fornos existentes em cada circuito.

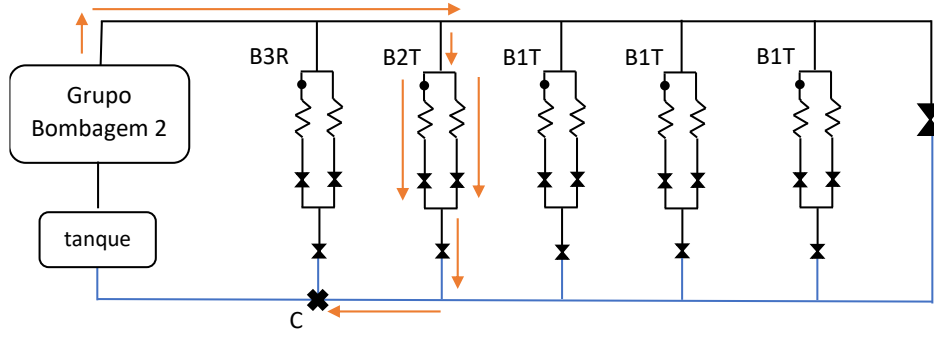


Figura 24: Esquema de um percurso possível a ser percorrido no circuito 2.

Tratando-se de um circuito aberto, pois o tanque está à pressão atmosférica, também se vai calcular a pressão no ponto C somando à pressão atmosférica do tanque a perda de carga ocorrida entre o ponto C e o tanque. Esta pressão será a pressão real para o ponto C.

Sendo assim, para cada percurso ter o caudal pretendido, a pressão no ponto C em cada percurso tem de ser igual à pressão real. Ou seja, o coeficiente da válvula existente após cada forno, k_{vforno} , vai ser aquele que introduz, para os caudais em questão, uma perda de carga igual à diferença entre a pressão em C de cada percurso e a pressão em C real.

3.1.1 Equilíbrio de caudais dentro do forno e k_{eq}

Para o cálculo do coeficiente de perda de carga localizada equivalente à perda de carga total no interior de cada forno, k_{eq} , serão utilizados inicialmente os coeficientes de perda de carga localizada dos permutadores, k_{per} , e do arrefecimento das paredes, k_{par} , calculados no capítulo 2.

Com estes valores vai-se calcular a perda de carga no permutador e no arrefecimento das paredes de cada forno para o seu caudal nominal.

$$\Delta p_{per} = \rho * k_{per} * \frac{v_{permutador}^2}{2} \quad (24)$$

$$\Delta p_{par} = \rho * k_{par} * \frac{v_{parede}^2}{2} \quad (25)$$

De referir também que de modo a que seja possível calcular um coeficiente equivalente, todos os coeficientes envolvidos no cálculo têm de estar associados a uma velocidade numa tubagem de igual diâmetro, ou seja, calcula-se o coeficiente de perda de carga equivalente, k_{eq} , referido à velocidade para o diâmetro da tubagem à entrada do forno, D_{ramal} , o que também facilitará posteriormente a simulação hidráulica.

Com o intuito de calcular o coeficiente de perda de carga localizada do forno e, de modo a que o caudal quer na parede do forno quer no permutador sejam os pretendidos, a perda de carga em cada tubagem deverá ser a mesma para os respetivos caudais. Visto que os valores da perda de carga para os respetivos caudais não são idênticos, deve colocar-se uma perda de carga na válvula do percurso que tem uma menor queda de pressão. Caso a perda de carga na parede seja menor que a do permutador, calcula-se o coeficiente necessário na válvula através das equações (26) e (27).

$$\Delta p_{válvula} = \Delta p_{per} - \Delta p_{par} \quad (26)$$

$$k_{vpar} = \frac{2 * \Delta p_{válvula}}{\rho * v_{parede}^2} \quad (27)$$

No caso de a perda de carga no permutador ser inferior à do arrefecimento da parede do forno, utiliza-se as expressões (28) e (29).

$$\Delta p_{válvula} = \Delta p_{par} - \Delta p_{per} \quad (28)$$

$$k_{vper} = \frac{2 * \Delta p_{válvula}}{\rho * v_{permutador}^2} \quad (29)$$

Por fim, calcula-se o coeficiente equivalente à perda de carga localizada de cada forno em relação à velocidade no ramal através da equação (30) cuja demonstração se encontra no Anexo A.

$$k_{eq} = \frac{A_{ramal}^2 * (k_{per} + k_{vper})(k_{par} + k_{vpar})}{(A_{permutador} * \sqrt{k_{par} + k_{vpar}} + A_{parede} * \sqrt{k_{per} + k_{vper}})^2} \quad (30)$$

Para cálculos posteriores, de outros cenários possíveis, é necessário também o cálculo do coeficiente de perda de carga localizada na conduta de arrefecimento das paredes referente à velocidade no ramal, $k_{par,r}$, dado pela equação (31).

$$k_{par,r} = k_{par} * \frac{v_{parede}^2}{v_{ramal}^2} \quad (31)$$

Realizando o processo explicitado para cada forno, obtém-se os coeficientes presentes nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12: Resultados do coeficiente de perda de carga localizada equivalente de cada forno no circuito 1

número	forno	Δp_{par} [kPa]	Δp_{per} [kPa]	k_{vpar} [-]	$k_{vpar,r}$ [-]	k_{vper} [-]	k_{eq} [-]
1	B2R	99.34	88.70	0	0	5.5	65.25
2	B1R	79.01	19.49	0	0	43.4	74.73
3	B1R	79.01	19.49	0	0	43.4	74.73
4	B1R	79.01	19.49	0	0	43.4	74.73
5	B1R	79.01	19.49	0	0	43.4	74.73
6	B1R	79.01	19.49	0	0	43.4	74.73
7	B3R	189.0	271.6	343.9	488.7	0	79.30
8	B3T	179.9	263.5	618.4	651.8	0	57.04

Tabela 13: Resultados do coeficiente de perda de carga localizada equivalente de cada forno do circuito 2

letra	forno	Δp_{par} [kPa]	Δp_{per} [kPa]	k_{vpar} [-]	$k_{vpar,r}$ [-]	k_{vper} [-]	k_{eq} [-]
a	B3R	189.0	271.6	343.9	488.7	0	79.30
b	B2T	138.5	257.3	494.7	703.1	0	42.28
c	B1T	86.1	114.3	117.3	166.7	0	27.03
d	B1T	86.1	64.24	0	0	9.0	31.81
e	B1T	86.1	114.3	117.3	166.7	0	27.03

3.1.2 Perdas de carga nas tubagens de ambos os circuitos

De modo a considerar a perda de carga em linha e localizada na conduta principal e em cada um dos ramais onde estão colocados os fornos, estas serão calculadas através das equações (32) e (33) respetivamente, utilizando sempre a velocidade na conduta em questão.

$$\Delta p_f = \rho * f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2} \quad (32)$$

$$\Delta p_l = \rho * k * \frac{v^2}{2} \quad (33)$$

No circuito principal existem três tipos de perda de carga localizada, as perdas de carga nas curvas a 90° e nas junções em “T” quer o fluido permaneça na mesma direção quer o fluido prossiga na direção perpendicular à conduta principal. Os valores dos coeficientes de perda de carga localizada, k , correspondentes a estas perdas são retirados do programa EES a partir das funções k_{90deg_elbow} , $k_{tee_straight}$ e $k_{tee_branched}$ através do valor da rugosidade relativa. O material da tubagem das condutas de ida é PVC com um diâmetro interno de 0,15 metros enquanto que o material das tubagens de retorno ao tanque é PP-RCT com um diâmetro interno de 0,164 metros. Ambos os materiais apresentam uma rugosidade de 0,0015 mm, a partir da qual através da equação 4 se obtém a rugosidade relativa (Cameira, M. 2020). Calculada a rugosidade relativa, obtém-se os coeficientes de perda de carga localizada apresentados na tabela 14.

Tabela 14: Valores do coeficiente de perda de carga localizada dos três tipos de perdas localizadas nas tubagens

função	k
k_{90deg_elbow}	0.360
$k_{tee_straight}$	0.240
$k_{tee_branched}$	0.720

Quanto às perdas de carga em linha também foi necessário calcular o coeficiente de atrito, f , através das seguintes expressões (Frenkel, N. Z. 1956).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{Relrough}{3.7} + \left(\frac{6.1}{Re} \right)^{0.9} \right) \quad (34)$$

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\mu} \quad (35)$$

$$\dot{V} = v * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * \pi \quad (36)$$

Apesar do número de Reynolds variar em quase todas as secções de conduta devido à diferença de diâmetros e de velocidades, foram calculados quatro valores de f e os restantes foram aproximados a estes. Isto é, calculou-se f para a conduta principal de ida, conduta principal de retorno e para os ramais quer da conduta de entrada do forno quer da saída do forno para a conduta principal de retorno. Nas condutas principais, o caudal utilizado foi o que é bombeado para cada circuito. Na situação em questão, o valor de 290 m³/h para o circuito 1 e de 245 m³/h para o circuito 2. Nas condutas dos ramais foi considerado um caudal de 10 m³/h visto se tratar do valor de caudal necessário para o arrefecimento das paredes e esta ser a situação mais comum em cada ramal. A densidade da água para as pressões em causa é de 997 kg/m³.

Tabela 15: Valores dos dados e resultados do cálculo do coeficiente de atrito no circuito 1

conduta	$\dot{V}$ [m ³ /h]	D [m]	μ [Pa.s]	Re [-]	f [-]
Principal ida	290	0.1500	9.321×10^{-4}	731922	0.01386
Principal retorno	290	0.1633	8.901×10^{-4}	646264	0.01403
Ramal ida	10	0.0779	9.321×10^{-4}	48584	0.02119
Ramal retorno	10	0.0779	8.901×10^{-4}	50844	0.02099

Tabela 16: Valores dos dados e resultados do cálculo do coeficiente de atrito no circuito 2

conduta	$\dot{V}$ [m ³ /h]	D [m]	μ [Pa.s]	Re [-]	f [-]
Principal ida	245	0.1500	9.321×10^{-4}	618348	0.01410
Principal retorno	245	0.1633	8.901×10^{-4}	545981	0.01429
Ramal ida	10	0.0779	9.321×10^{-4}	48584	0.02119
Ramal retorno	10	0.0779	8.901×10^{-4}	50844	0.02099

Nas tabelas 15 e 16, estão apresentados os valores de coeficiente de atrito para as situações em que foi calculado. Com estes valores e, tendo em conta a planta de cada circuito com os comprimentos de cada tubagem e a totalidade das perdas de carga localizadas, é possível calcular as perdas de carga em linha e localizadas ao longo das condutas principais e de cada ramal.

3.1.3 Pressão no ponto C

Executado o levantamento da totalidade das perdas de carga em linha e localizadas existentes na instalação, é possível calcular a pressão no ponto C para cada percurso possível realizado pela água.

No cálculo da pressão no ponto C, para cada caminho existente, começa-se por determinar a perda de carga no forno.

$$\Delta p_{forno} = \rho * k_{eq} * \frac{v_{ramal}^2}{2} \quad (37)$$

De seguida, executa-se o levantamento de todas as perdas de carga em linha e localizadas de cada caminho entre a saída da bomba e o ponto C (Δp_{f_i} e Δp_{l_i}) sendo possível, por fim, calcular a pressão no ponto C.

$$P_{C_i} = P_{inicial} - \left(\Delta p_{forno} + \sum \Delta p_{f_i} + \sum \Delta p_{l_i} \right) \quad (38)$$

A pressão à saída da bomba, $P_{inicial}$, é considerada em ambos os circuitos 3,5 bar relativos, ou seja, 450 kPa absolutos. Os valores obtidos para a pressão absoluta no ponto C consoante os diversos trajetos possíveis estão dispostos nas tabelas 17 e 18.

Tabela 17: Valores da pressão absoluta no ponto C consoante os diversos caminhos do circuito 1

trajeto	1	2	3	4	5	6	7	8
forno	B2R	B1R	B1R	B1R	B1R	B1R	B3R	B3T
P_{C_i} [kPa]	330.2	343.2	335	328.9	325.1	321.6	118.6	121.8

Tabela 18: Valores da pressão absoluta no ponto C consoante os diversos caminhos do circuito 2

trajeto	a	b	c	d	e
forno	B3R	B2T	B1T	B1T	B1T
P_{C_i} [kPa]	134.8	135.6	281.3	312.5	279.5

Conforme referido anteriormente, a pressão real no ponto C para cada circuito é obtida somando à pressão do tanque, a queda de pressão existente entre o ponto C e o tanque. Dado que o tanque se encontra à pressão atmosférica, a pressão no ponto C para o circuito 1 e 2 é de 111,1 kPa e 122,8 kPa absolutos respetivamente.

3.1.4 Cálculo de k_{vforno}

Com o objetivo de que o caudal que percorra cada forno seja o nominal no caso de estarem todos os fornos em arrefecimento simultaneamente, a pressão no ponto C tem de ser igual, em todos os caminhos possíveis, à pressão real.

Para isto, tem de se colocar uma queda de pressão em cada válvula colocada no seguimento de cada forno, como se pode observar nas figuras 2 e 3, correspondente à diferença de pressão entre P_{C_i} e a pressão real em C. Os valores calculados de k_{vforno} estão apresentados nas tabelas 19 e 20.

$$\Delta p_C = P_{C_i} - P_C \quad (39)$$

$$k_{vforno} = \frac{2 * \Delta p_C}{\rho * v_{ramal}^2} \quad (40)$$

Tabela 19: Resultados de k_{vforno} do circuito 1

trajeto	1	2	3	4	5	6	7	8
forno	B2R	B1R	B1R	B1R	B1R	B1R	B3R	B3T
k_{vforno}	143.9	219.5	211.7	205.9	202.4	199.0	2.2	2.3

Tabela 20: Resultados de $k_{v\text{forno}}$ do circuito 2

trajeto	a	b	c	d	e
forno	B3R	B2T	B1T	B1T	B1T
$k_{v\text{forno}}$	3.5	2.1	37.5	70.1	37.1

3.2 Simulação hidráulica da instalação atual

Para a realização da simulação hidráulica tem de se ter em conta todos os coeficientes de perda de carga em linha e localizadas calculados até este ponto. As quedas de pressão são calculadas através das equações (32) e (33). A fim de executar bem a simulação tem de se garantir a conservação de massa e de energia ao longo da instalação.

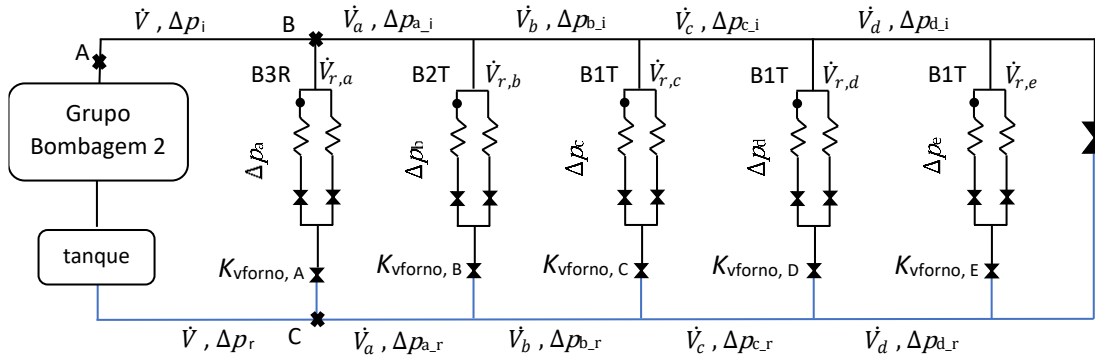


Figura 25: Esquema do circuito 2 com notação de caudal e perda de carga nas tubagens.

A queda de pressão no ramal a , Δp_a , é igual à perda de carga entre o ponto B e C, visíveis na figura 25 e, a perda de carga nos restantes ramais é calculada de forma análoga a esta. Para garantir a conservação de massa e energia no circuito 2 inserem-se as equações (41) a (45) e (46) a (49) respetivamente. Para o circuito 1, inserem-se equações análogas, sendo necessárias mais equações devido ao número acrescido de fornos.

$$\dot{V} = \dot{V}_{r,a} + \dot{V}_a \quad (41)$$

$$\dot{V}_a = \dot{V}_{r,b} + \dot{V}_b \quad (42)$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_{r,c} + \dot{V}_c \quad (43)$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_{r,d} + \dot{V}_d \quad (44)$$

$$\dot{V}_d = \dot{V}_{r,e} \quad (45)$$

$$\Delta p_a = \Delta p_b + \Delta p_{a_i} + p_{a_r} \quad (46)$$

$$\Delta p_b = \Delta p_c + \Delta p_{b_i} + p_{b_r} \quad (47)$$

$$\Delta p_c = \Delta p_d + \Delta p_{c_i} + p_{c_r} \quad (48)$$

$$\Delta p_d = \Delta p_e + \Delta p_{d_i} + p_{d_r} \quad (49)$$

O cálculo da diferença de pressão em cada ramal vai ser diferente conforme o forno esteja em arrefecimento ou não. Para ambas as situações, soma-se a perda de carga na conduta do ramal até ao forno, do forno de volta até à tubagem principal de retorno,

que inclui a válvula cujo coeficiente de perda de carga localizada é k_{vforno} , e no interior do forno. Nas duas primeiras, a queda de pressão é calculada do mesmo modo variando apenas o valor de caudal no interior da tubagem.

Para a perda de carga no interior do forno, caso esteja em arrefecimento utiliza-se a equação (50) e a equação (51) caso esteja apenas em funcionamento o arrefecimento das paredes do forno.

$$\Delta p_{forno} = \rho * k_{eq} * \frac{v_{ramal}^2}{2} \quad (50)$$

$$\Delta p_{forno} = \rho * (k_{parede,r} + k_{vpar,r}) * \frac{v_{ramal}^2}{2} \quad (51)$$

Apesar de nas expressões (50) e (51) aparecerem velocidades, estas e as perdas de carga são calculadas por método iterativo pelo programa EES na execução da simulação. Pois, para a execução da simulação, vai-se impor um caudal de entrada, $\dot{V}$, e através das equações de conservação de massa e energia, obtém-se as perdas de carga e caudais em cada ramal.

Além disto, é necessário calcular a altura manométrica que a bomba teria de impor no circuito, h_b , que resulta da aplicação da equação de conservação de energia entre o ponto C e A da figura 25.

Para o cálculo de h_b , equação (52), é pois necessário calcular também, para além da perda de carga entre o ponto C e o tanque, Δp_{C_t} , a perda de pressão entre o tanque e a saída da bomba, Δp_{t_A} , onde se vai considerar a perda de carga em linha e localizadas, curvas, entrada do tanque para a tubagem em questão e também a perda de carga na válvula anti-retorno que, para o diâmetro de tubagem de 0,125m (como é o caso da tubagem à entrada da bomba), possui um coeficiente de perda de carga localizada de 1,6.(Idelcik, 1979)

$$\rho * g * h_b = (p_A - p_C) + \rho * \frac{v_A^2 - v_C^2}{2} + \rho * g * (z_A - z_C) + \Delta p_{C_t} + \Delta p_{t_A} \quad (52)$$

$$p_A = p_{tanque} + \Delta p_r + \Delta p_a + \Delta p_i \quad (53)$$

Para obter a curva da instalação, que é o objetivo da simulação, através de uma tabela paramétrica tem de se impor diferentes caudais iniciais, $\dot{V}$, e obtém-se a respetiva altura da instalação, h_b , para cada caudal permitindo por fim, ter a curva da instalação.

Inicialmente simulou-se cada circuito para 3 situações diferentes: nenhum forno a arrefecer a carga, isto é, apenas funcionando o arrefecimento das paredes; todos os fornos em arrefecimento e apenas alguns fornos em arrefecimento. Para a terceira situação, no circuito 1 considerou-se em arrefecimento os fornos B2R, B1R2, B1R5 e B3T, correspondentes aos números 1,3,6 e 8 na figura 2 e para o circuito 2 os fornos B3R, B1T2 e B1T3, correspondendo às letras *a*, *d* e *e* na figura 3. Nas figuras 26 a 31 estão apresentadas as curvas da instalação para as situações descritas.

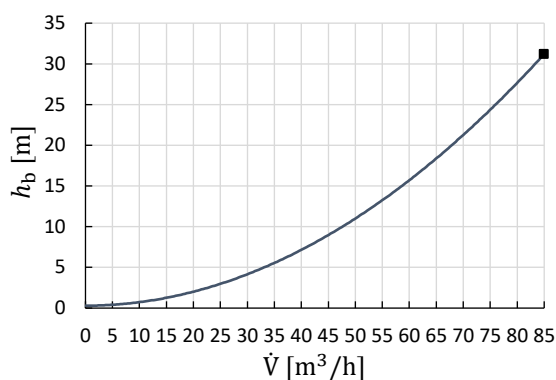


Figura 26: Curva da instalação do circuito 1 sem nenhum forno em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

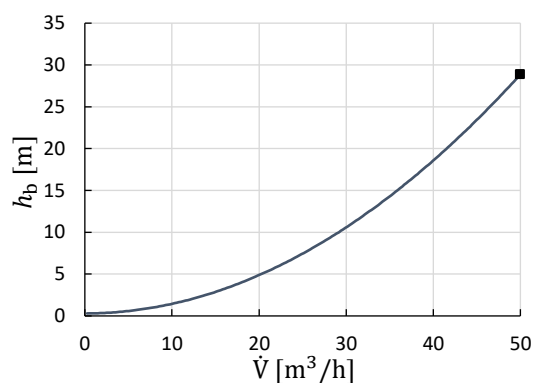


Figura 27: Curva da instalação do circuito 2 sem nenhum forno em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

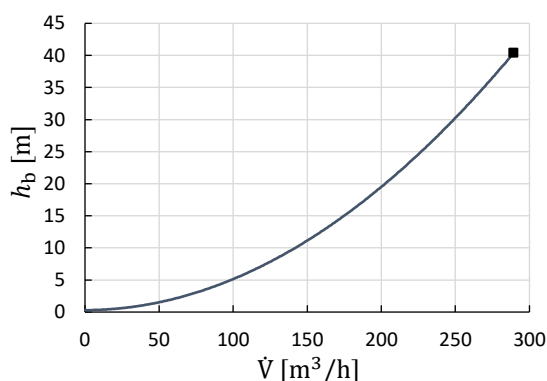


Figura 28: Curva da instalação do circuito 1 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

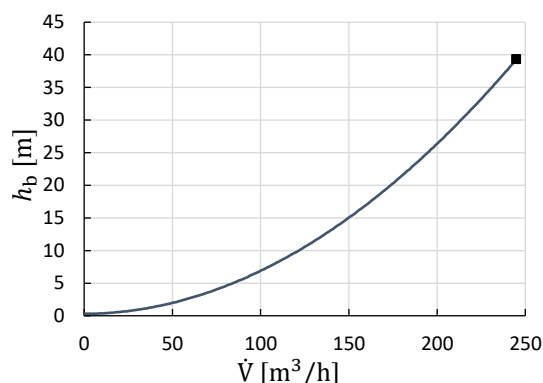


Figura 29: Curva da instalação do circuito 2 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

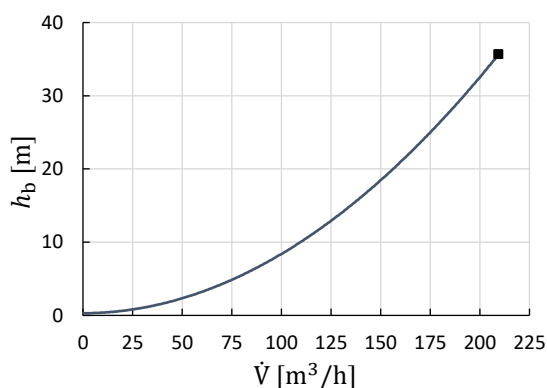


Figura 30: Curva da instalação do circuito 1 com os fornos 1, 3, 6 e 8 em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

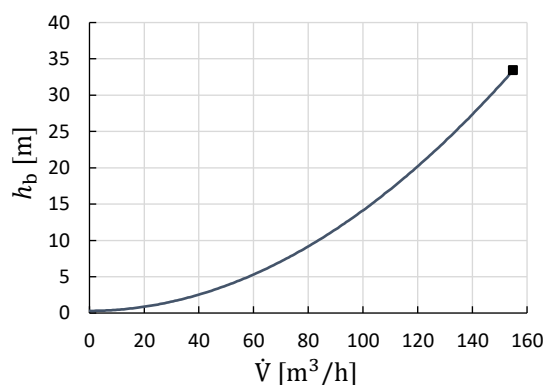


Figura 31: Curva da instalação do circuito 2 com os fornos a, d e e em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

3.3 Validação dos resultados obtidos

De modo a conseguir de alguma forma validar as curvas da instalação obtidas com o funcionamento atual da instalação, mediu-se, para determinadas situações de funcionamento de cada circuito, a velocidade de rotação (N), a frequência (f) de acionamento da bomba e a pressão a montante e a jusante da bomba. Com esta informação, é possível realizar uma comparação entre valores analíticos e experimentais uma vez que com a velocidade de rotação pode-se determinar a curva da bomba para cada situação de funcionamento e com a diferença de pressão a altura manométrica real.

Com os referidos dados, é possível assim determinar o ponto de funcionamento da instalação analítico, intercetando a curva da instalação com a curva da bomba para a velocidade de rotação da respetiva situação de funcionamento e, comparar a altura manométrica assim determinada com o valor homólogo obtido experimentalmente.

Foram medidos experimentalmente os dados em ambos os circuitos para as seguintes situações: circuito 1 sem nenhum forno em arrefecimento, isto é, só arrefecimento das paredes; circuito 1 com os fornos B2R, B1R5 e B3T (1,6 e 8) em arrefecimento; circuito 1 com os fornos B1R2, B1R4 e B1R5 (3,5 e 6) em arrefecimento; circuito 2 sem nenhum forno em arrefecimento, só arrefecimento das paredes; e finalmente circuito 2 com o forno B3R (*a*) em arrefecimento. Na tabela 21 apresenta-se os dados fornecidos pela empresa relativos à pressão à entrada e saída da bomba, velocidade de rotação e frequência para as diferentes situações onde foram medidas.

Tabela 21: Medições de pressão à entrada e saída da bomba e rotação e frequência para diferentes situações de funcionamento real dos circuitos

Situação	$p_{\text{saída bomba}}$ [bar]	$p_{\text{entrada bomba}}$ [bar]	N [rpm]	f [Hz]
Circuito 1 – sem fornos em arrefecimento	3.2	-0.2	-	41.4
Circuito 2 – sem fornos em arrefecimento	2.5	-0.2	-	35.4
Circuito 1 – fornos 1,6 e 8 em arrefecimento	3.6	-0.2	-	52
Circuito 1 – fornos 3,5 e 6 em arrefecimento	3.2	-0.2	2505	-
Circuito 2 – forno <i>a</i> em arrefecimento	2.5	-0.2	2158	-

Para obter o valor da velocidade de rotação de um modo mais preciso nas situações onde esta não foi registada, aproveitou-se o facto de ser medido para cada circuito, numa dada situação, a rotação e a frequência. Na tabela 22 apresenta-se a velocidade de rotação e frequência medidas para cada circuito.

Tabela 22: Par de dados rotação - frequência para uma situação de funcionamento em cada circuito

	Circuito 1	Circuito 2
N [rpm]	2478	2158
f [Hz]	41.7	35.9

Com estes dados, é possível para cada circuito determinar a relação correta entre a velocidade de rotação, N [rpm], e a frequência, f [Hz], uma vez que estas duas variáveis se relacionam do seguinte modo.

$$N = m * f \quad (54)$$

O coeficiente m é obtido para cada circuito através do quociente entre a rotação e a frequência expostas na tabela 22. Conhecido este valor, é possível estimar a velocidade de rotação nos casos em que só a frequência de acionamento da bomba foi medida com uma incerteza máxima espectável de ± 7 [rpm]. Os valores de m para cada circuito

encontram-se na tabela 23 e os valores da velocidade de rotação calculados para as situações onde apenas se mediu a frequência estão apresentados na tabela 24.

Tabela 23: Valores de m para cada circuito

	m [rpm/Hz]
Circuito 1	59.4
Circuito 2	60.1

Tabela 24: Valores de rotação calculados para as situações onde se mediu a frequência

Situação	N [rpm]
Circuito 1 – sem fornos em arrefecimento	2460
Circuito 2 – sem fornos em arrefecimento	2127
Circuito 1 – fornos 1,6 e 8 em arrefecimento	3090

3.3.1 Adaptação das curvas da bomba

As curvas características de altura manométrica e de potência no veio das bombas, apresentadas nas figuras 6 e 9 do capítulo 1, estão assinaladas para a velocidade de rotação de 2900 rpm e, visto que nas situações que se pretende analisar esta não é a rotação da bomba, tem de se calcular a curva característica da bomba para cada rotação.

Inicialmente, tem de se obter as curvas adimensionais visto estas serem válidas para qualquer velocidade de rotação. Para isto, retira-se alguns pontos das curvas características da bomba dadas pelo fabricante e, adimensionalizar cada uma delas através das equações (55), (56) e (57), onde C_V , C_H e C_P são os coeficientes adimensionais do caudal, altura e potência respetivamente e D é o diâmetro do rotor que é de 0,200 metros. (Munson, B. , Young, D. e Okiishi, T. 1990)

$$C_V = \frac{\dot{V}}{n * D^3} \quad (55)$$

$$C_H = \frac{g * h_b}{n^2 * D^2} \quad (56)$$

$$C_P = \frac{\dot{W}_{veio}}{\rho * n^3 * D^5} \quad (57)$$

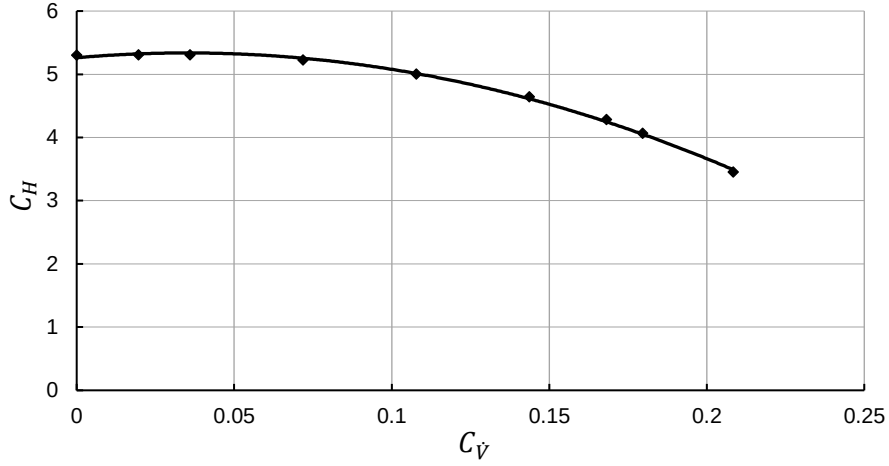


Figura 32: Curva característica da bomba adimensional.

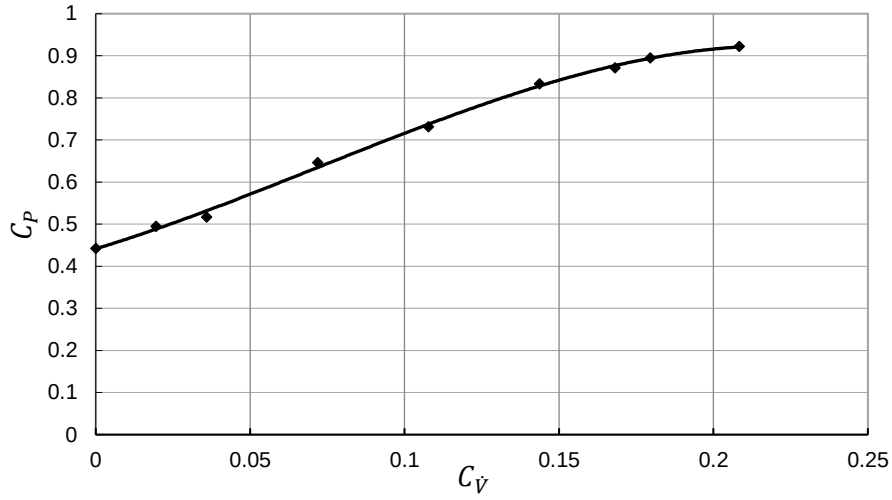


Figura 33: Curva adimensional de potência no veio da bomba.

A partir destas curvas, é possível obter as curvas da bomba para diversas rotações através das equações (55), (56) e (57), substituindo a rotação de 2900 rpm pelo N desejado. Antes de expor as curvas obtidas da bomba para as diferentes rotações, determina-se o ponto de funcionamento experimental da bomba a fim de se conseguir comparar os resultados experimentais com os analíticos.

3.3.2 Altura manométrica experimental

Para calcular a altura manométrica experimental, começa-se por estabelecer a expressão da altura manométrica da bomba na equação (58), onde Δz é a diferença de cotas entre os locais onde estão os manómetros a montante e jusante da bomba onde foi lida a pressão. O diâmetro da tubagem na entrada da bomba (D_{entrada}) é de 0.125 m e na tubagem de saída ($D_{\text{saída}}$) é de 0.100 m.

$$h_b = \frac{p_{\text{saída bomba}} - p_{\text{entrada bomba}}}{\rho * g} + \Delta z + \frac{v_{\text{saída bomba}}^2 - v_{\text{entrada bomba}}^2}{2 * g} \quad (58)$$

$$v_{\text{saída bomba}} = \frac{\dot{V}}{D_{\text{saída}}} \quad (59)$$

$$v_{\text{entrada bomba}} = \frac{\dot{V}}{D_{\text{entrada}}} \quad (60)$$

O termo da energia cinética, visto depender do caudal, que não foi medido, foi estimado utilizando o caudal do ponto de funcionamento analítico, visto o erro produzido com esta aproximação ser desprezável uma vez que o valor máximo desta parcela foi de aproximadamente 2 m.c.a..

Como o caudal não foi medido experimentalmente, o que se irá comparar essencialmente é a altura manométrica obtida experimentalmente com a altura manométrica do ponto de funcionamento obtido analiticamente. Na tabela 25 apresenta-se os valores da altura manométrica obtidos experimentalmente.

Tabela 25: Altura da bomba obtida a partir das pressões experimentais e com base na Eq. (58)

Situação	h_b [m]
Circuito 1 – sem fornos em arrefecimento	36.1 ± 1.8
Circuito 2 – sem fornos em arrefecimento	28.6 ± 1.8
Circuito 1 – fornos 1,6 e 8 em arrefecimento	42.3 ± 1.8
Circuito 1 – fornos 3,5 e 6 em arrefecimento	36.3 ± 1.8
Circuito 2 – forno a em arrefecimento	28.6 ± 1.8

3.3.3 Comparação entre valores experimentais e analíticos

Uma vez obtidos os resultados experimentais e analíticos, já é possível compará-los. Conforme apresentado na tabela 25, a incerteza da altura manométrica experimental, h_b , é 1.8 metros. As incertezas na curva da instalação foram obtidas através do programa EES tendo em conta as incertezas dos coeficientes de perda de carga localizada do permutador e do circuito de arrefecimento das paredes calculadas no capítulo 2. Embora existam outros valores como comprimentos e diâmetros das tubagens com incertezas associadas, estas não possuem a mesma relevância até porque são reduzidas tendo sido então desprezadas no cálculo da incerteza da curva da instalação.

Nas figuras 34 a 38 estão apresentados os gráficos que contêm a curva da instalação e respetiva incerteza a azul, a curva da bomba para a rotação pretendida em cada situação a vermelho e a altura da bomba obtida experimentalmente a preto.

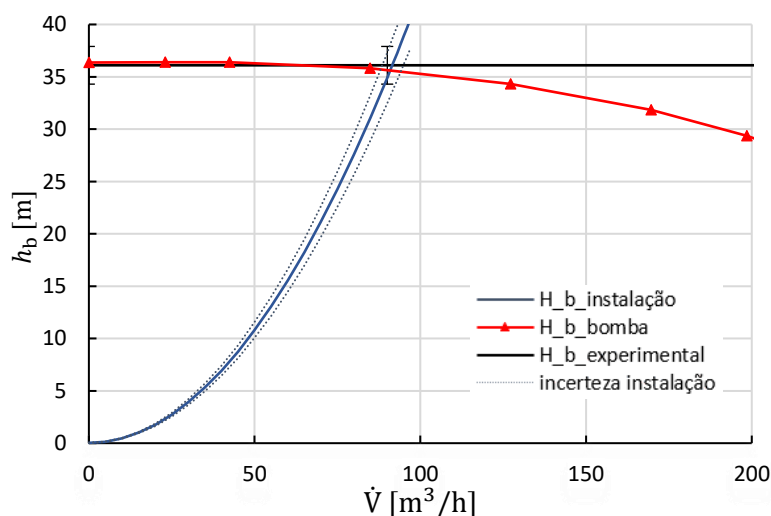


Figura 34: Gráfico curva da instalação do circuito 1 sem nenhum forno em arrefecimento.

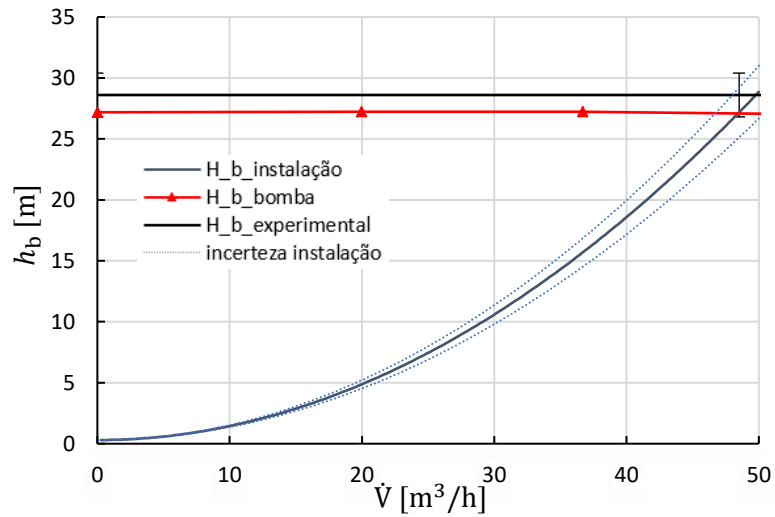


Figura 35: Gráfico de curva da instalação do circuito 2 sem nenhum forno em arrefecimento.

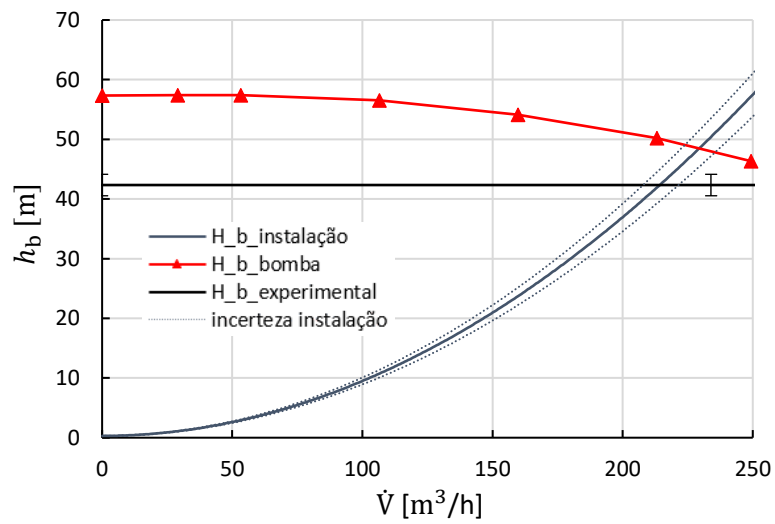


Figura 36: Gráfico da curva da instalação do circuito 1 com os fornos 1, 6 e 8 em arrefecimento.

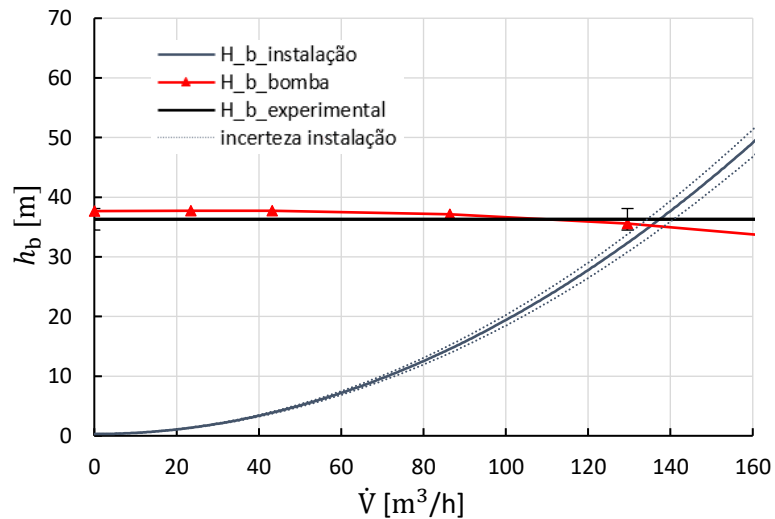


Figura 37: Gráfico da curva de instalação do circuito 1 com os fornos 3, 5 e 6 em arrefecimento.

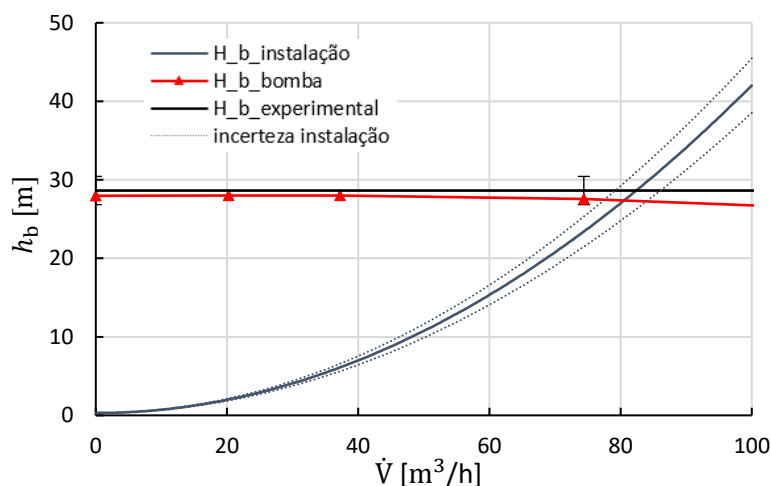


Figura 38: Gráfico da curva da instalação do circuito 2 com o forno a em arrefecimento.

A partir dos gráficos pode-se observar que o ponto de funcionamento analítico da instalação está sempre dentro da incerteza da altura medida experimentalmente exceto na situação do circuito 1 com os fornos 1, 6 e 8 em arrefecimento. A existência de bombas de vácuo em paralelo neste circuito, que utilizam água para o seu arrefecimento e não foram contabilizadas na análise, pode ter contribuído também para este maior desvio.

Para facilitar a observação dos resultados, na tabela 26, apresenta-se os resultados da altura experimental e a altura do ponto de funcionamento analítico e respectivas incertezas.

Tabela 26: Valores da altura manométrica obtida analiticamente e experimentalmente.

Situação	h_b experimental [m]	h_b analítico [m]
Circuito 1 – sem fornos em arrefecimento	36.1 ± 1.8	35.7 ± 2.2
Circuito 2 – sem fornos em arrefecimento	28.6 ± 1.8	27.2 ± 2.0
Circuito 1 – fornos 1,6 e 8 em arrefecimento	42.3 ± 1.8	48.1 ± 4.0
Circuito 1 – fornos 3,5 e 6 em arrefecimento	36.3 ± 1.8	35.7 ± 1.7
Circuito 2 – forno a em arrefecimento	28.6 ± 1.8	27.5 ± 2.4

Como é possível observar através da tabela 26, até a situação em que as alturas diferem mais, incluindo a incerteza de ambos os valores, existe um intervalo de possível sobreposição de valores.

Pode-se então concluir que as simulações estão bastante próximas daquilo que é a realidade, fundamentando assim as aproximações e métodos de cálculo executados e conferindo também uma maior confiança nas simulações que ainda serão realizadas.

4 Simulação das alternativas propostas à instalação atual

Neste capítulo serão executadas as simulações hidráulicas das alternativas propostas à instalação atual de modo a atingir o objetivo inicial da otimização energética da instalação e uma breve análise económica para facilitar a comparação entre as diferentes alternativas.

Inicialmente, será realizada a simulação do circuito com os fornos na mesma disposição que a instalação atual, mas pressurizado, isto é, o tanque estar à pressão de 3,5 bar relativos em vez de se encontrar à pressão atmosférica.

Posteriormente, simula-se o circuito pressurizado, mas com os fornos numa disposição diferente da atual, colocando os fornos de maior perda de carga todos no mesmo circuito.

A terceira alternativa a ser simulada é a separação do circuito de arrefecimento das paredes dos fornos do circuito dos permutadores de calor. Isto é, um circuito a abastecer os permutadores de calor de todos os fornos e um segundo circuito a fornecer água a todas as condutas de arrefecimento das paredes.

A última alternativa pressupõe a mudança da disposição dos fornos e a existência de três circuitos, um a abastecer todas as condutas de arrefecimento das paredes, um a abastecer os permutadores de calor dos fornos com uma maior perda de carga e outro a fornecer água aos permutadores de calor de menor perda de carga.

Por último, far-se-á uma comparação entre os gastos energéticos da instalação atual e todas estas variantes de modo a ser possível concluir quais as possibilidades que permitem um menor gasto energético.

4.1 Circuito pressurizado

A primeira alternativa a ser simulada é a pressurização do circuito atual sem nenhuma alteração na disposição dos fornos. Esta era a solução inicial proposta.

Antes de proceder à simulação, tem de se calcular o k_{vforno} das válvulas a jusante de cada forno. Para calcular estes valores, o processo de cálculo do k_{eq} e das perdas de carga nas tubagens da instalação é idêntico ao descrito no capítulo 3, obtendo-se os mesmos resultados. No entanto, o cálculo da pressão real em C já difere do método anteriormente utilizado.

Na instalação atual, circuito aberto, a pressão real no ponto C é dada pela soma da pressão no tanque (pressão atmosférica) com a queda de pressão entre o ponto C e o tanque.

Com a pressurização do circuito, o circuito deixa de ser um circuito aberto passando a ser fechado. Deste modo, ao calcular o valor da pressão em C para os diferentes trajetos

possíveis de percorrer pela água e respetivos caudais nominais, vai-se definir a pressão final no ponto C como sendo o menor destes valores.

Visto que o modo de calcular a pressão no ponto C, pelo lado dos fornos, e a disposição destes permanece idêntica ao circuito atual, a pressão no ponto C para os diferentes trajetos executados pela água está presente nas tabelas 17 e 18 no capítulo 3. Analisando os valores descritos nestas tabelas, pode-se concluir assim que a pressão real no ponto C para o circuito 1 terá de ser de 118,6 kPa e para o circuito 2 terá de ser de 134,2 kPa.

O cálculo final de $k_{v\text{forno}}$ é idêntico também ao descrito no capítulo 3, utilizando, porém, as novas pressões reais no ponto C. Os resultados de $k_{v\text{forno}}$ obtidos estão apresentados nas tabelas 27 e 28.

Tabela 27: Resultados de $k_{v\text{forno}}$ do circuito 1

trajeto	1	2	3	4	5	6	7	8
forno	B2R	B1R	B1R	B1R	B1R	B1R	B3R	B3T
$k_{v\text{forno}}$	139.0	212.4	204.6	198.8	195.3	191.9	0	0.7

Tabela 28: Resultados de $k_{v\text{forno}}$ do circuito 2

trajeto	a	b	c	d	e
forno	B3R	B2T	B1T	B1T	B1T
$k_{v\text{forno}}$	0	0.1	34.6	65.7	34.2

Calculados os valores de $k_{v\text{forno}}$, procede-se à simulação hidráulica do circuito pressurizado. A simulação é realizada de modo análogo ao explicitado no capítulo 3, obtendo-se como resultado a curva da instalação.

Foram simuladas as mesmas situações que no capítulo 3, para ambos os circuitos: todos os fornos em arrefecimento, nenhum forno em arrefecimento e alguns fornos em arrefecimento (1,3,6 e 8 para o circuito 1 e *a*, *d* e *e* para o circuito 2) de modo a ser possível uma comparação entre o circuito aberto e pressurizado.

Nas figuras 39 a 44 estão representados os gráficos da curva da instalação para as situações descritas. A curva da instalação para o circuito pressurizado está representada a vermelho enquanto que a curva da instalação atual (circuito aberto) está representada a azul.

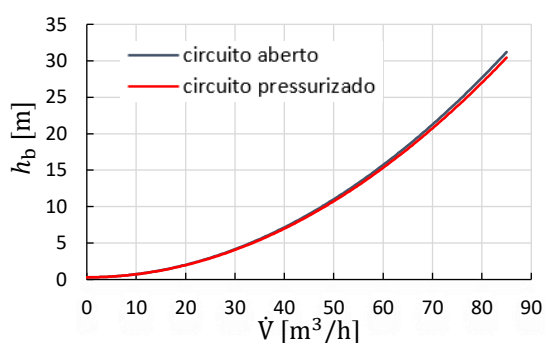


Figura 39: Curva da instalação do circuito 1 sem nenhum forno em arrefecimento.

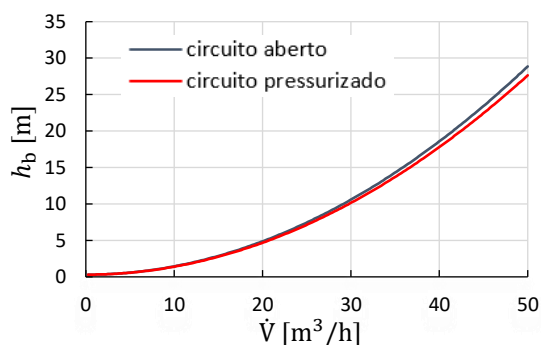


Figura 40: Curva da instalação do circuito 2 sem nenhum forno em arrefecimento.

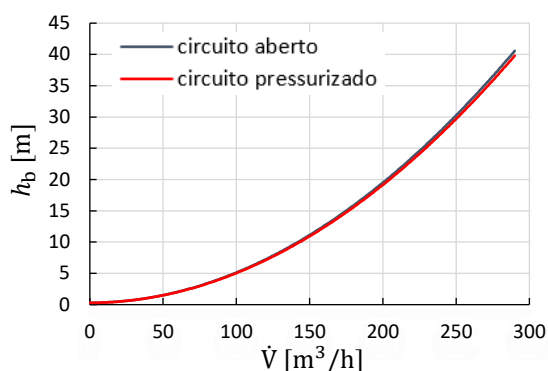


Figura 41: Curva da instalação do circuito 1 com todos os fornos em arrefecimento.

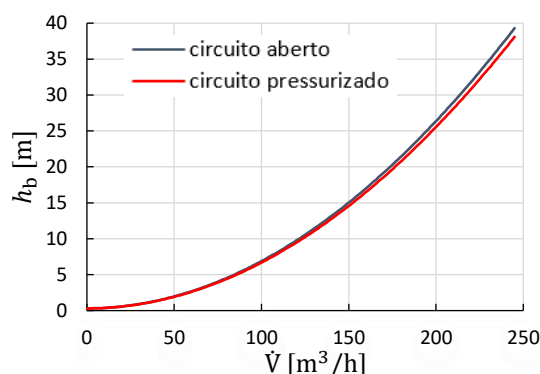


Figura 42: Curva da instalação do circuito 2 com todos os fornos em arrefecimento.

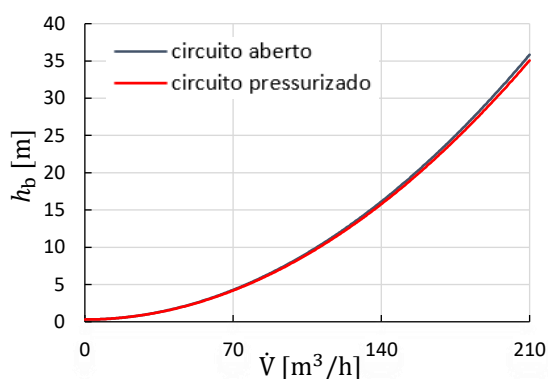


Figura 43: Curva da instalação do circuito 1 com os fornos 1, 3, 6 e 8 em arrefecimento.

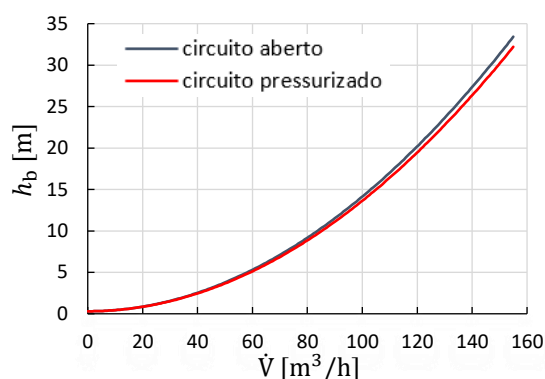


Figura 44: Curva da instalação do circuito 2 com os fornos a, d e e em arrefecimento.

É possível observar nos gráficos da curva da instalação do circuito pressurizado, que não existe uma grande diferença entre a curva da instalação do circuito aberto e pressurizado. Embora seja possível detetar uma diferença entre as duas curvas, elas estão praticamente sobrepostas em todas as situações, o que implica que os pontos de funcionamento em ambas as situações não difiram muito e não exista uma grande diferença em termos de gastos de energéticos. O motivo por que tal sucede surge da necessidade de se ter de equilibrar os caudais que percorrem os vários fornos, o que faz com que o ramal em paralelo com maior perda de carga imponha o seu efeito aos restantes ramares e por último à instalação.

Dado que a pressurização do circuito sem alteração da disposição dos fornos não é tão vantajosa quanto esperado inicialmente, na fase posterior de comparação energética e monetária entre a instalação atual e as diferentes alternativas não se vai considerar esta situação.

4.2 Circuito com mudança da disposição dos fornos (caso I)

A segunda alternativa à instalação atual é a mudança da disposição dos fornos em conjunto com a pressurização do circuito. Com a alteração da localização dos fornos, consegue-se colocar todos os fornos com uma maior perda de carga (B3R, B3R, B2T e B3T) todos no mesmo circuito e, assim, no outro circuito obter-se uma perda de carga bastante menor.

Inicialmente, visto se tratar de quatro fornos com uma grande perda de carga, a opção que seria mais vantajosa era colocar estes quatro fornos no circuito 2, onde há apenas cinco fornos. No entanto, devido à necessidade que o forno B3T tem de azoto, o

posicionamento deste não se pode alterar, pelo que se colocou todos estes fornos no circuito 1.

Devido às diferentes dimensões entre estes fornos e os de menor perda de carga, ao colocar os fornos de maior perda de carga no mesmo circuito teve de se alterar o número de fornos em cada circuito. De modo a facilitar posteriormente a comparação entre os circuitos vai-se denominar o circuito com os fornos de maior perda de carga como circuito 3 e circuito 4 aquele que apenas tem fornos de menor perda de carga. Estes novos circuitos estão representados nas figuras 45 e 46.

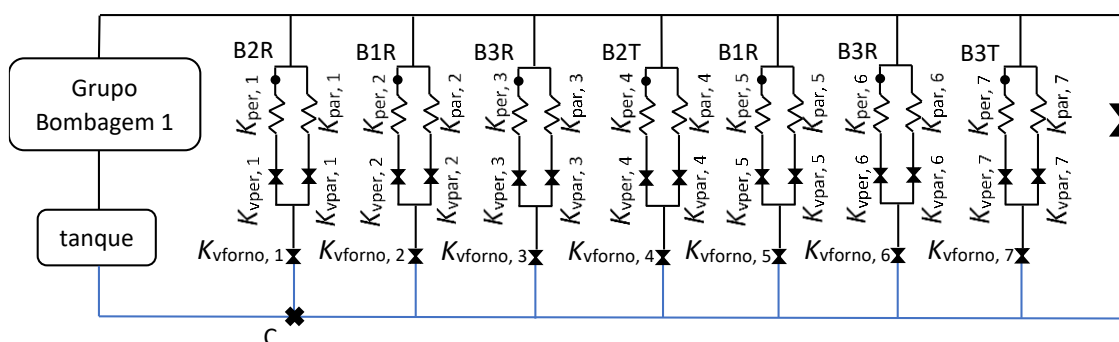


Figura 45: Disposição dos fornos no circuito 3.

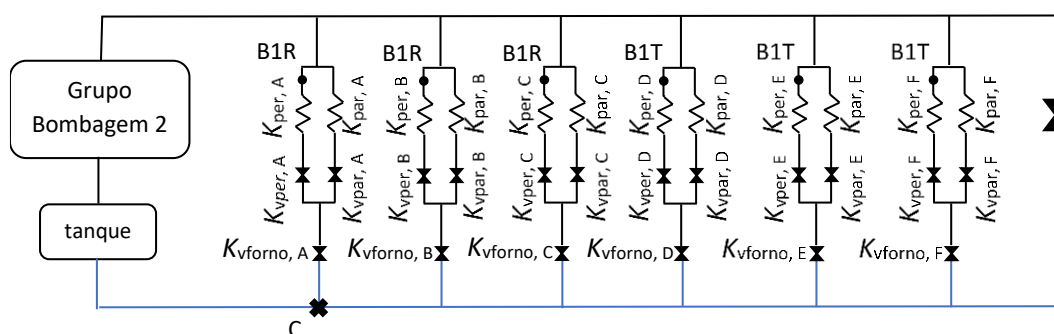


Figura 46: Disposição dos fornos no circuito 4.

Para a execução da simulação hidráulica destes circuitos, aproveita-se os k_{eq} calculados no capítulo 2. O levantamento das perdas de carga em linha e localizadas é feito de modo análogo ao do capítulo 2 tendo em conta que devido à movimentação dos fornos, houve comprimentos de tubagens que se alteraram. Além disso, houve alterações nos caudais em cada tubagem pelo que se calculou novamente os coeficientes de atrito para os novos caudais nominais nas condutas principais e cujos resultados estão apresentados nas tabelas 29 e 30.

Tabela 29: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 3

conduta	$\dot{V}$ [m ³ /h]	D [m]	μ [Pa.s]	Re [-]	f [-]
Principal ida	320	0.1500	9.321×10^{-4}	807651	0.01373
Principal retorno	320	0.1633	8.901×10^{-4}	713119	0.01390

Tabela 30: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 4

conduta	$\dot{V}$ [m ³ /h]	D [m]	μ [Pa.s]	Re [-]	f [-]
Principal ida	215	0.1500	9.321×10^{-4}	542641	0.01430
Principal retorno	215	0.1633	8.901×10^{-4}	479127	0.01450

Calculados os novos coeficientes de atrito a serem considerados e executando o levantamento de todas as perdas de carga em cada tubagem, é possível calcular a pressão no ponto C consoante os diferentes percursos da água. Uma vez que houve uma mudança na posição dos fornos, a pressão no ponto C de cada percurso é diferente da calculada para a instalação atual. Para o cálculo da pressão no ponto C, cujos resultados estão dispostos nas tabelas 31 e 32, assume-se uma pressão de 450 kPa absolutos à saída da bomba em ambos os circuitos.

Tabela 31: Valores da pressão no ponto C consoante os diversos trajetos do circuito 3

trajeto	1	2	3	4	5	6	7
forno	B2R	B1R	B3R	B2T	B1R	B3R	B3T
P_{C_i} [kPa]	326.8	337.7	127.1	125.3	314.5	112.3	114.8

Tabela 32: Valores da pressão no ponto C consoante os diversos trajetos do circuito 4

trajeto	a	b	c	d	e	f
forno	B1R	B1R	B1R	B1T	B1T	B1T
P_{C_i} [kPa]	341.9	337.9	334.8	287.9	319.1	286.1

Através dos resultados das tabelas 31 e 32, no circuito 3 pode-se definir a pressão real no ponto C de 112,3 kPa e no circuito 4, 286.1 kPa. Com estes valores de pressão no ponto C definidos, calcula-se o k_{vforno} para as válvulas de ambos os circuitos. Nas tabelas 33 e 34 estão apresentados os valores de k_{vforno} para os circuitos 3 e 4.

Tabela 33: Valores de k_{vforno} do circuito 3

trajeto	1	2	3	4	5	6	7
forno	B2R	B1R	B3R	B2T	B1R	B3R	B3T
k_{vforno}	140.9	213.2	4.3	2.1	191.3	0	0.5

Tabela 34: Resultados de k_{vforno} do circuito 4

trajeto	a	b	c	d	e	f
forno	B1R	B1R	B1R	B1T	B1T	B1T
k_{vforno}	52.77	48.97	46.11	0.42	12.21	0

Determinados os valores de k_{vforno} , procede-se à simulação hidráulica destes circuitos. Cada circuito será simulado para as situações de nenhum forno em arrefecimento, todos os fornos em arrefecimento e apenas alguns fornos em arrefecimento. Para a terceira situação, de alguns fornos em arrefecimento, considerou-se a situação habitual, isto é, no circuito 3 considerou-se os fornos B2R, B1R, B3R e B2T (1, 2, 3 e 4) em funcionamento e no circuito 4 os fornos B1R e todos os B1T (c, d, e e f) em arrefecimento. Nas figuras 47 a 52 estão representadas as curvas da instalação das situações descritas.

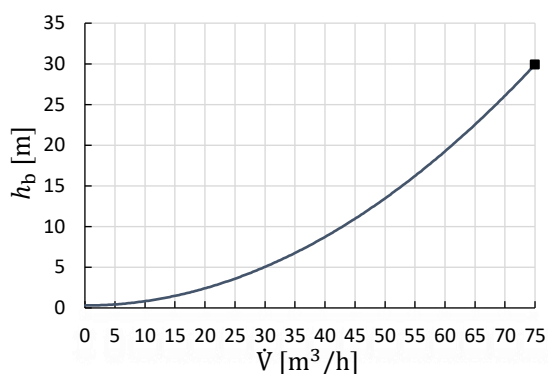


Figura 47: Curva da instalação do circuito 3 sem nenhum forno em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

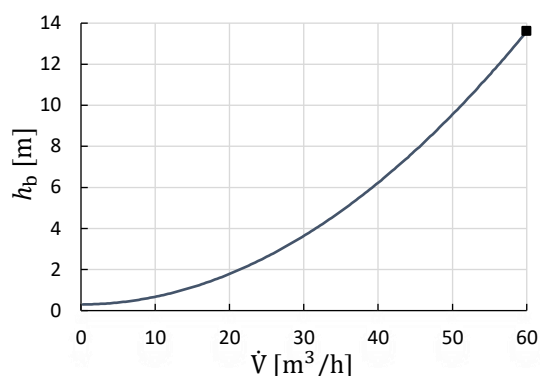


Figura 48: Curva da instalação do circuito 4 sem nenhum forno em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

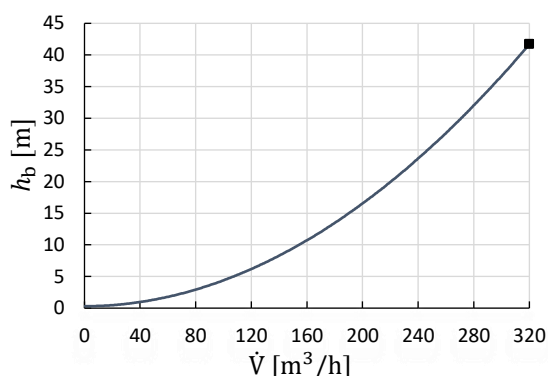


Figura 49: Curva da instalação do circuito 3 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

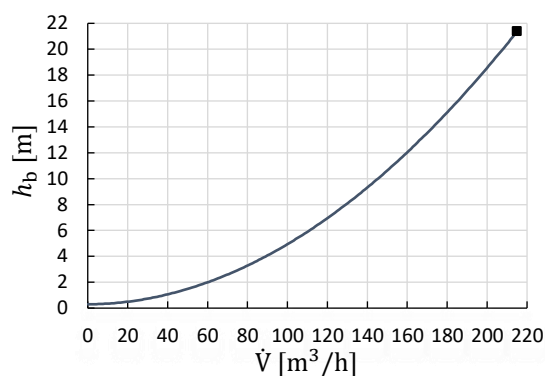


Figura 50: Curva da instalação do circuito 4 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

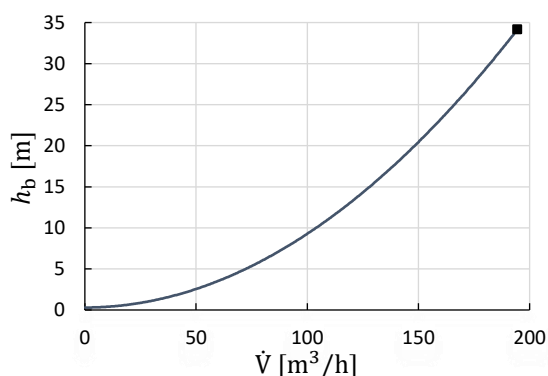


Figura 51: Curva da instalação do circuito 3 com os fornos 1, 2, 3 e 4 em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

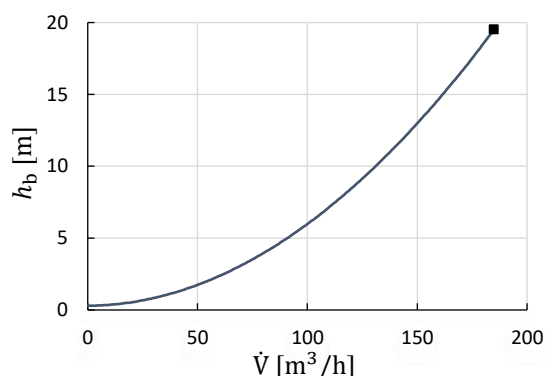


Figura 52: Curva da instalação do circuito 4 com os fornos c, d, e e f em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

Pode observar-se através das curvas da instalação que, para o mesmo caudal, o circuito 3 requer uma altura manométrica da bomba mais elevada do que o circuito 4, o que já era previsível visto que o circuito 4 é aquele que contém agora os fornos que possuem uma menor perda de carga.

4.3 Separação dos circuitos dos permutadores e das paredes (caso II)

A terceira alternativa analisada nesta dissertação, é a separação dos circuitos do permutador de calor e de arrefecimento das paredes. Isto é, existe um circuito que fornece a água ao arrefecimento das paredes de todos os fornos e um segundo circuito, em tudo

idêntico ao anterior, que fornece os permutadores de calor de todos os fornos que se irão denominar de circuito 5 e 6 respetivamente.

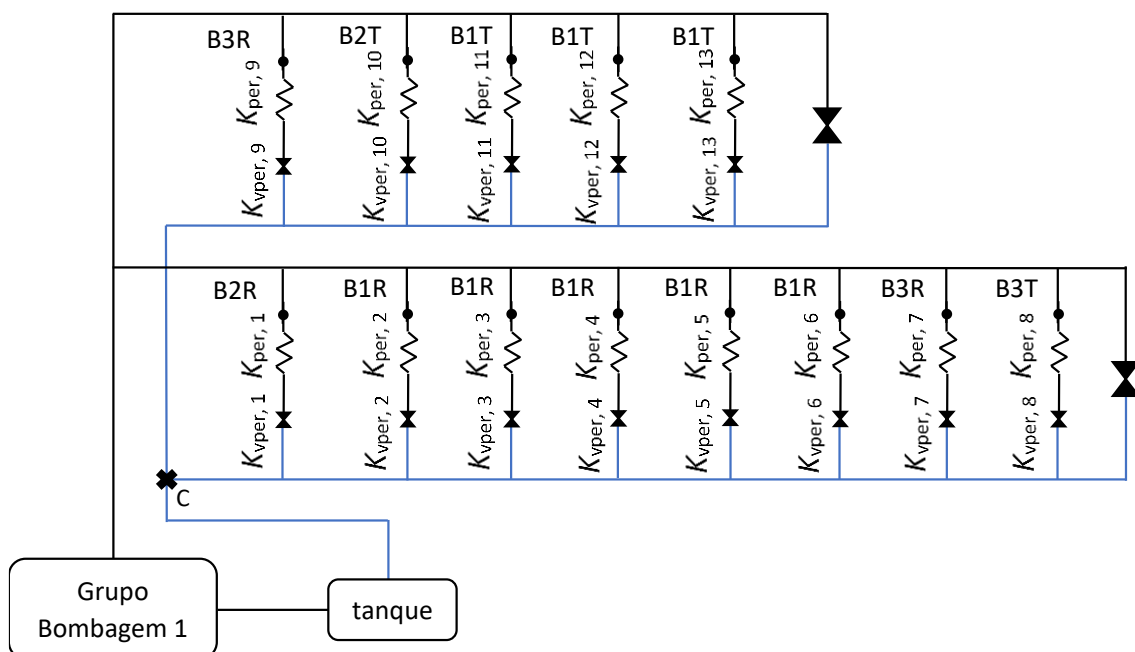


Figura 53: Esquema do circuito 6, circuito de todos os permutadores de calor, com ponto C assinalado. O circuito 5 é em tudo idêntico a este mas relativo agora às paredes.

Para esta alternativa, considerou-se que as válvulas cujo coeficiente de perda de carga localizada é k_{vpar} e k_{vper} não estão colocadas no interior do forno e, deste modo, em cada ramal apenas se tem um permutador ou conduta de arrefecimento das paredes seguido de uma válvula com coeficiente de perda de carga localizada k_{vpar} ou k_{vper} , deixando de existir k_{vfor} , como é possível observar na figura 53 para o caso do circuito dos permutadores. Também se considerou que os diâmetros das tubagens de ambos os circuitos são iguais entre si e iguais às tubagens que existem atualmente. A disposição dos fornos também se considerou ser igual à do circuito atual representado nas figuras 2 e 3.

Visto não ser necessário o cálculo de k_{eq} , passa-se diretamente ao levantamento das perdas de carga em linha e localizadas de cada conduta. Conforme o sucedido no caso anterior, o caudal nas condutas principais difere da situação atual pelo que se calcula novamente o coeficiente de atrito para as condutas principais. Os resultados do cálculo estão apresentados nas tabelas 35 e 36.

Tabela 35: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 5

conduta	$\dot{V}$ [m ³ /h]	D [m]	μ [Pa.s]	Re [-]	f [-]
Principal ida	135	0.1500	9.321×10^{-4}	340728	0.01513
Principal retorno	135	0.1633	8.901×10^{-4}	300847	0.01538

Tabela 36: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 6

conduta	$\dot{V}$ [m ³ /h]	D [m]	μ [Pa.s]	Re [-]	f [-]
Principal ida	400	0.1500	9.321×10^{-4}	1.010×10^6	0.01347
Principal retorno	400	0.1633	8.901×10^{-4}	891398	0.01361

Efetuada o levantamento das perdas de carga em linha e localizadas de ambos os circuitos, segue-se o cálculo da pressão no ponto C consoante os diferentes trajetos possíveis. O ponto C foi colocado em ambos os circuitos na tubagem de retorno onde ocorre a junção daquilo que seria inicialmente o circuito 1 e 2, ver exemplo na figura 53. Os valores da pressão no ponto C para cada trajeto em cada circuito estão apresentados nas tabelas 37 e 38.

Tabela 37: Valores de P_{C_i} para o circuito 5

trajeto	forno	P_{C_i} [kPa]
1	B2R	345.8
2	B1R	365.4
3	B1R	364.7
4	B1R	364.3
5	B1R	364.1
6	B1R	363.9
7	B3R	253.8
8	B3T	263.0
9	B3R	255.5
10	B2T	305.7
11	B1T	358.0
12	B1T	358.0
13	B1T	357.9

Tabela 38: Valores de P_{C_i} para o circuito 6

trajeto	forno	P_{C_i} [kPa]
1	B2R	325.6
2	B1R	391.3
3	B1R	387.1
4	B1R	383.9
5	B1R	381.7
6	B1R	379.6
7	B3R	120.7
8	B3T	124.8
9	B3R	120.6
10	B2T	125.0
11	B1T	270.9
12	B1T	323.5
13	B1T	269.9

Com base nos valores da pressão no ponto C em cada circuito pode-se definir a pressão C como 253,8 kPa no circuito 5 e 120,6 kPa no circuito 6.

Para que o caudal em cada forno seja o nominal, a pressão em C tem de ser a mesma independentemente do trajeto realizado pela água sendo, por isto, necessário o cálculo de k_{vpar} para o circuito 5 (paredes) e k_{vper} para o circuito 6 (permutadores) que estão apresentados nas tabelas 39 e 40 respetivamente.

Tabela 39: Valores de k_{vpar} para o circuito 5

trajeto	forno	k_{vpar}
1	B2R	543.9
2	B1R	659.6
3	B1R	655.7
4	B1R	653.0
5	B1R	651.6
6	B1R	650.6
7	B3R	0
8	B3T	71.64
9	B3R	10.06
10	B2T	306.8
11	B1T	615.9
12	B1T	615.5
13	B1T	615.4

Tabela 40: Valores de k_{vper} para o circuito 6

trajeto	forno	k_{vper}
1	B2R	302.9
2	B1R	711.2
3	B1R	700.1
4	B1R	691.5
5	B1R	686.0
6	B1R	680.4
7	B3R	0.045
8	B3T	1.30
9	B3R	0
10	B2T	1.03
11	B1T	55.51
12	B1T	133.3
13	B1T	55.13

Para a simulação hidráulica, no circuito 5 apenas existe uma situação de funcionamento que é com todas as paredes em arrefecimento. No circuito 6 simulou-se com todos os fornos em arrefecimento e apenas com os fornos B2R, B1R2, B1R5, B3T, B3R, B1T2 e B1T3 (1, 3, 6, 8, 9, 12 e 13).

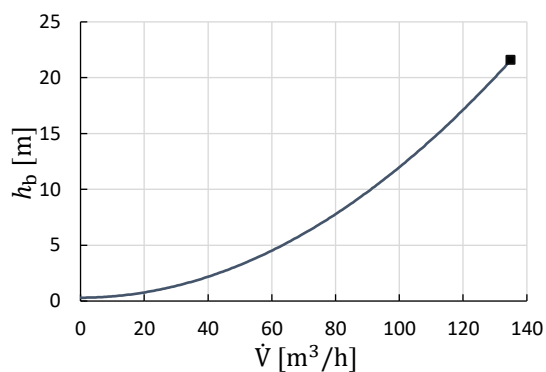


Figura 54: Curva da instalação do circuito 5. ■ Ponto de funcionamento nominal.

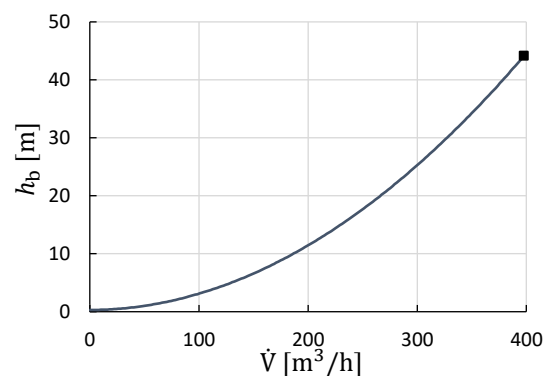


Figura 55: Curva da instalação do circuito 6 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

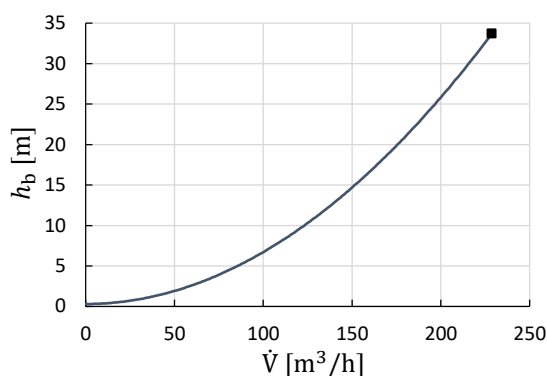


Figura 56: Curva da instalação com os fornos 1, 3, 6, 8, 9, 12 e 13. ■ Ponto de funcionamento nominal.

Pode-se observar nas figuras 54, 55 e 56, onde estão representadas as curvas da instalação de ambos os circuitos e para situações diferentes que a altura da bomba é inferior no circuito 5 do que no circuito 6. É necessário ter em conta que não é usual todos os fornos estarem em arrefecimento simultâneo pelo que apesar da situação ser analisada, não deverá acontecer na prática.

4.4 Mudança da disposição dos fornos e separação dos circuitos dos permutadores e das paredes (caso III)

Para uma das alternativas construtivas da instalação que serão mostradas na subsecção 4.5, existe a possibilidade da existência de três circuitos em vez de apenas dois, o que permite a tentativa de aliar ambos os casos já referidos com um circuito para as paredes de todos os fornos, um circuito para os permutadores de calor dos fornos com menor perda de carga e um circuito para os permutadores de calor para os fornos de perda de carga mais elevada.

A alteração da disposição dos fornos nesta situação é a mesma do caso I patente nas figuras 45 e 46. Como em cada circuito, apenas existem ou permutadores de calor ou condutas de arrefecimento das paredes, os cálculos dos coeficientes de perda localizada são realizados de modo análogo ao caso II.

Para facilitar a compreensão desta subsecção, o circuito das paredes será denominado de circuito 7, de circuito 8 o que contém os permutadores dos fornos com perda de carga mais elevada e de circuito 9 aquele que tem os permutadores de calor dos fornos com menor perda de carga.

Conforme os casos anteriores, mudando o caudal nas condutas principais, recalcula-se o coeficiente de atrito a usar nas condutas principais. Para o circuito 7, não foi necessário recalcular este valor pois o caudal nominal é o mesmo que no circuito 5 e os seus valores estão patentes na tabela 35. Os valores do coeficiente de atrito para os circuitos 8 e 9 estão apresentados nas tabelas 41 e 42 respetivamente.

Tabela 41: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 8

conduta	$\dot{V}$ [m³/h]	D [m]	μ [Pa.s]	Re [-]	f [-]
Principal ida	245	0.1500	9.321×10^{-4}	618258	0.01410
Principal retorno	245	0.1633	8.901×10^{-4}	545981	0.01429

Tabela 42: Valores dos dados e resultados do cálculo dos coeficientes de atrito no circuito 9

conduta	$\dot{V}$ [m ³ /h]	D [m]	μ [Pa.s]	Re [-]	f [-]
Principal ida	155	0.1500	9.321×10^{-4}	391206	0.01486
Principal retorno	155	0.1633	8.901×10^{-4}	345417	0.01510

Realizando o levantamento das perdas de carga em linha e localizadas em cada circuito, pode-se então calcular a pressão no ponto C para cada circuito e, posteriormente, os valores de k_{vpar} ou k_{vper} consoante o circuito em questão. Estes valores estão apresentados nas tabelas 43, 44 e 45. A pressão real no ponto C para cada circuito está assinalada em cada tabela a sombreado.

Tabela 43: Valores da pressão no ponto C e k_{vpar} para o circuito 7

trajeto	forno	P_{C_i} [kPa]	k_{vpar}
1	B2R	346.1	540.2
2	B1R	365.8	657
3	B3R	255.4	3.9
4	B2T	305.4	299.9
5	B1R	364.7	650.6
6	B3R	254.7	0
7	B3T	263.9	71.6
8	B1R	364.8	650.7
9	B1R	364.5	649
10	B1R	364.3	647.9
11	B1T	357.1	605.3
12	B1T	357	604.9
13	B1T	357	604.8

Tabela 44: Valores da pressão no ponto C e de k_{vper} consoante os diversos trajetos do circuito 8

trajeto	1	2	3	4	5	6	7
forno	B2R	B1R	B3R	B2T	B1R	B3R	B3T
P_{C_i} [kPa]	345.4	509.9	145.0	147.8	399.4	139.8	144.1
k_{vper}	310.7	719.1	4.6	2.9	680.3	0	1.1

Tabela 45: Valores da pressão no ponto C e de k_{vper} consoante os diversos trajetos do circuito 9

trajeto	8	9	10	11	12	13
forno	B1R	B1R	B1R	B1T	B1T	B1T
P_{C_i} [kPa]	413.5	411.7	410.4	305.5	359.8	305.3
k_{vper}	284.4	278.6	273.9	0.4	35.3	0

Calculados os coeficientes de perda de carga localizada nas válvulas, prossegue-se para a simulação hidráulica de cada circuito.

Para o circuito 7, existe apenas um modo de funcionamento, pelo que apenas vai ser simulado com todas as paredes em arrefecimento. O circuito 8 será simulado com todos os fornos em arrefecimento e com os fornos B2R, B1R, B3R e B2T (fornos 1, 2, 3 e 4) em arrefecimento. O circuito 9 será simulado com todos os fornos em arrefecimento e com os fornos B1R, B1T1, B1T2 e B1T3 (9,10, 11, 12) em arrefecimento. Nas figuras 57 a 61 estão apresentadas as curvas da instalação para as situações descritas.

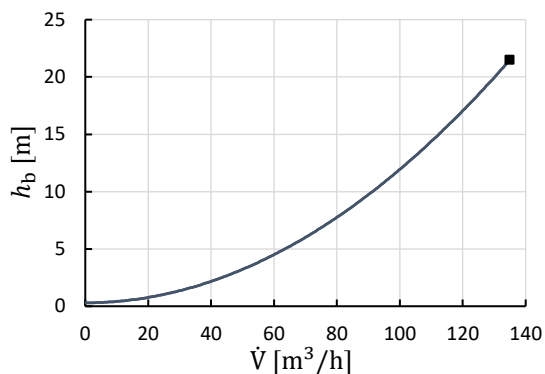


Figura 57: Curva da instalação do circuito 7. ■ Ponto de funcionamento nominal.

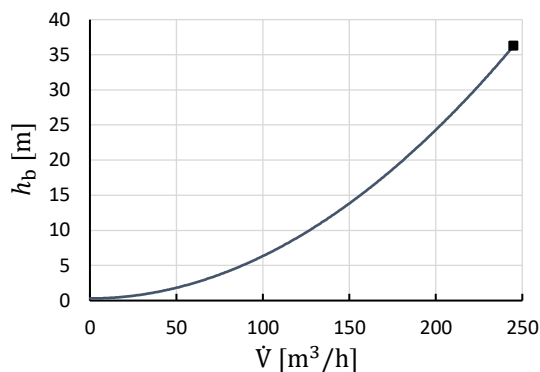


Figura 58: Curva da instalação do circuito 8 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

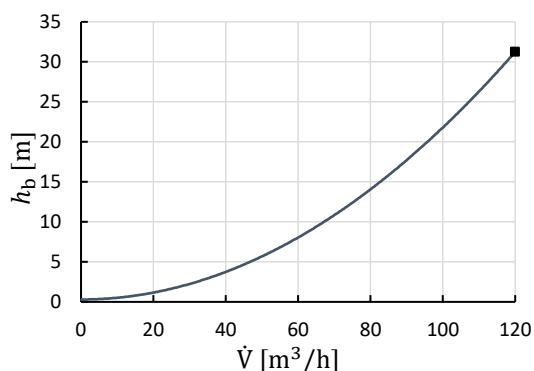


Figura 59: Curva da instalação do circuito 8 com os fornos 1, 2, 3 e 4 em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

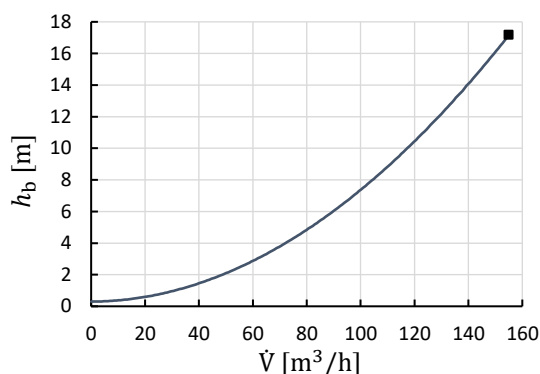


Figura 60: Curva da instalação do circuito 9 com todos os fornos em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

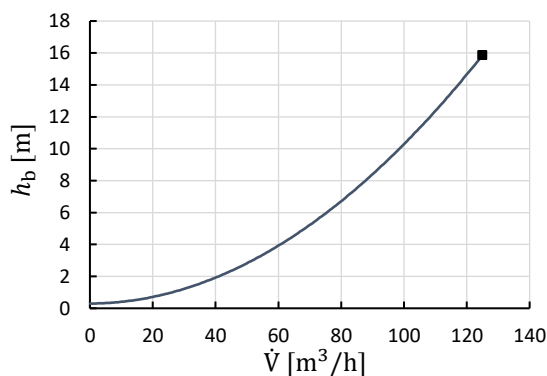


Figura 61: Curva da instalação do circuito 9 com os fornos 10, 11, 12 e 13 em arrefecimento. ■ Ponto de funcionamento nominal.

É possível observar na tabela 46 um resumo de todos os circuitos que foram simulados e que serão analisados na seguinte subsecção.

Tabela 46: Casos e circuitos analisados

Caso I	Circuito 3	Circuito 4	
	Fornos de maior perda de carga	Fornos de menor perda de carga	
Caso II	Circuito 6	Circuito 5	
	Só permutadores	Só paredes	
Caso III	Circuito 9	Circuito 8	Circuito 7
	Permutadores dos fornos de maior perda de carga	Permutadores de menor perda de carga	Só paredes

4.5 Soluções construtivas alternativas

Para todos os casos analisados, com a pressurização do tanque, é necessária uma adaptação do circuito. Dado que, para ambas as situações, um dos circuitos possui uma perda de carga substancialmente menor que o outro, fizeram-se três propostas de alteração da instalação visíveis nas figuras 62, 63 e 64.

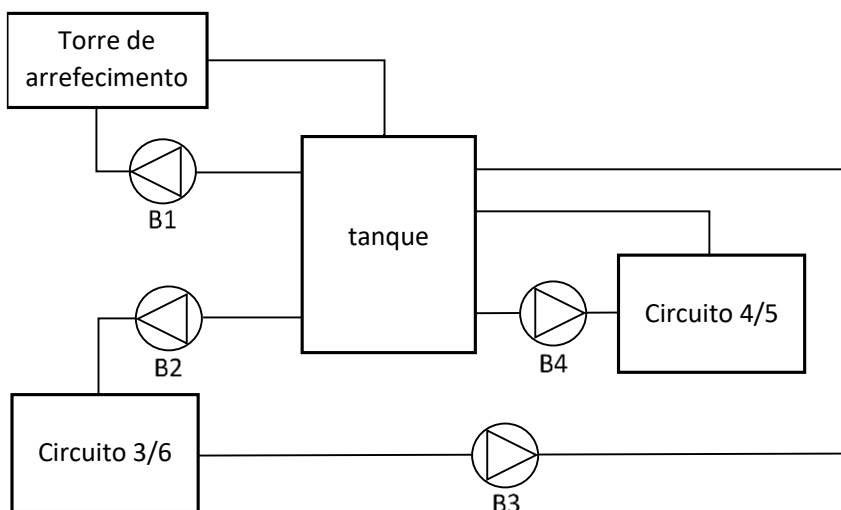


Figura 62: Esquema geral da instalação A.

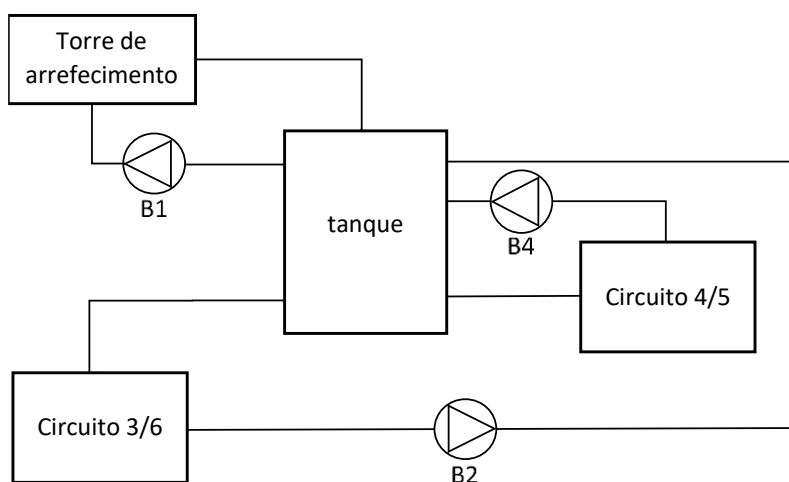


Figura 63: Esquema geral da instalação B.

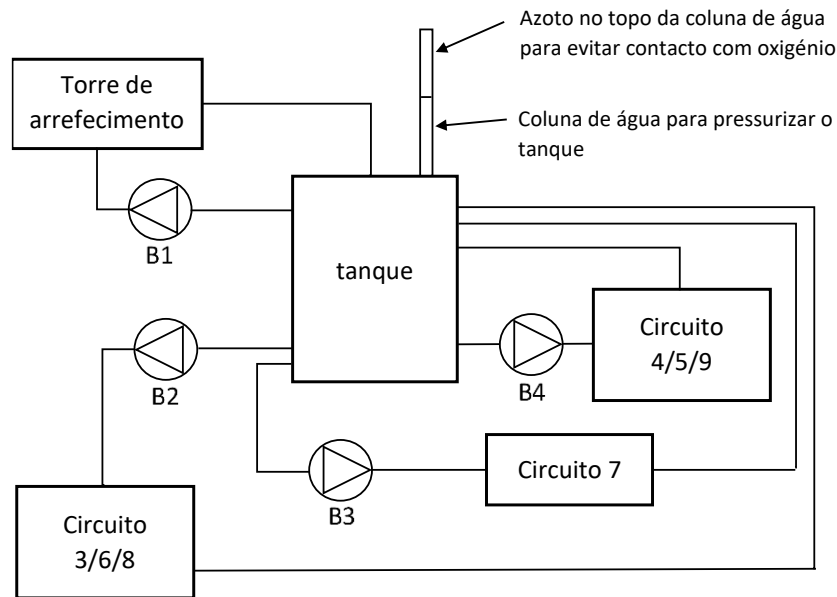


Figura 64: Esquema geral da instalação C.

Nas alterações sugeridas, as bombas B1 e B2 seriam as mesmas que as existentes atualmente no circuito da torre de arrefecimento e nos circuitos dos fornos respetivamente. Para as bombas B3 e B4 serão propostas novas bombas mais adequadas a cada situação. No entanto, para cada situação também vai-se estudar a possibilidade de no local da bomba B4 se manter as bombas que existem atualmente no circuito dos fornos.

A pressão no interior do tanque não se encontra definida na figura visto que depende de qual a instalação a ser considerada, se a da mudança do local dos fornos, a da separação do circuito das paredes e dos fornos ou ambas (caso III), e de qual a situação de funcionamento da mesma.

Na terceira alternativa é importante referir que o objetivo é, em alternativa ao tanque estar a uma pressão muito elevada, algo que acarreta grandes custos, o depósito estar a uma pressão bastante mais baixa, pouco acima da pressão atmosférica, como 20 kPa, o que evita também a necessidade de se utilizar válvulas de pesca, já que a superfície livre fica acima das bombas, impede na mesma o contacto da água com o oxigénio e permite controlar mais facilmente a pressão em cada circuito. Como a pressão no interior do tanque é relativamente reduzida, pode-se até consegui-la através da colocação de uma, ou várias, coluna de água com a altura necessária para a pressão desejada no interior do tanque, colocando azoto no topo dessas colunas.

O caso III apenas é possível na terceira alternativa, a instalação C, representada na figura 64. Na tabela 47 estão representados os casos que vão ser analisados.

Tabela 47: Alternativas e casos que serão analisados.

Instalação A	Caso I - A	Modificando B3 e B4
		Mantendo B4
	Caso II - A	Modificando B3 e B4
		Mantendo B4
Instalação B	Caso I - B	Modificando B4
		Mantendo B4
	Caso II - B	Modificando B4
		Mantendo B4
Instalação C	Caso I - C	Modificando B4
		Mantendo B4
	Caso II - C	Modificando B4
		Mantendo B4
	Caso III - C	Modificando B3 e B4
		Mantendo B4

4.6 Cálculo da potência elétrica e análise econômica

Com a finalidade de comparar as diferentes soluções alternativas de implementar os casos analisados e a instalação atual é necessário calcular a potência elétrica gasta em cada instalação para a mesma situação de funcionamento.

Em semelhança ao executado no capítulo 2, calcula-se os pontos de funcionamento para cada situação, através da obtenção das curvas características e de potência das bombas adimensionais e, posteriormente, obtendo a curva para a velocidade rotação desejada. Obtendo-se a potência no veio para o ponto de funcionamento, é possível calcular a potência elétrica, $P_{elétrica}$, através da equação (61).

$$P_{elétrica} = \frac{P_{veio}}{\eta_{motor}} \quad (61)$$

Para as diferentes instalações irão ser calculadas as potências elétricas para 3 situações de funcionamento diferentes: sem nenhum forno em arrefecimento, estando apenas a circular água no arrefecimento das paredes; todos os fornos em arrefecimento e os fornos B2R, B1R2, B1R4 do circuito 1 e B3R, B2T, B1T1, B1T2 e B1T3 do circuito 2. Nas propostas alternativas à instalação atual em que existe uma mudança na disposição dos fornos, casos I e III, a terceira situação, alguns fornos em arrefecimento, será simulada com os mesmos fornos em funcionamento, apesar de situados em locais diferentes.

4.6.1 Escolha das bombas novas para cada circuito

Para a escolha das bombas B3 e B4, foi necessário calcular primeiro o ponto crítico de funcionamento esperado em cada bomba, para posteriormente escolher bombas que permitam o alcance deste ponto com alguma margem de segurança. O ponto crítico da bomba B4 é o mesmo independentemente da instalação em análise apresentadas na figura 62, 63 ou 64, ou seja, as bombas vão ser escolhidas através do mesmo processo e

serão as mesmas independentemente da instalação. No entanto, irão variar consoante o caso, I, II ou III, em estudo.

Para calcular este ponto, em ambas as situações, seguiu-se o mesmo processo. Em primeiro lugar, verifica-se que a bomba B4 tem de fornecer uma altura manométrica exatamente igual à perda por atrito no circuito 4/5 consoante o caso em estudo, seja a mudança da disposição dos fornos ou a separação do circuito de arrefecimento das paredes dos dos permutadores.

Visto que os circuitos 5 e 7 apenas têm uma situação de funcionamento, estes são os pontos críticos. Para o circuito 4, o ponto crítico é quando todos os fornos do circuito se encontram em arrefecimento. Na tabela 48 estão apresentados os valores de caudal e altura manométrica dos pontos críticos da bomba B4 para os casos I, II e III.

Tabela 48: Valores de caudal e altura manométrica do ponto crítico da bomba B4 para todos os casos.

	$\dot{V}$ [m ³ /h]	h_b [m]
Mudança de local dos fornos (caso I)	215	21.4
Separação do circuito das paredes e dos permutadores (caso II)	135	21.6
Mudança de local dos fornos e separação do circuito das paredes e permutadores (caso III)	135	21.5

De modo a obter o ponto crítico da bomba B3 da instalação A, figura 62, facilita ter uma pressão no interior do tanque e, para isso, definiu-se a pressão do mesmo embora estes valores não afetem os resultados. No caso I, separação dos circuitos das paredes e dos permutadores, vai-se definir a pressão no interior do tanque como 140 kPa relativos. No caso II, situação de mudança da disposição dos fornos, a pressão no tanque considera-se de 170 kPa relativos.

No caso da bomba B3 nesta mesma instalação A, além de se definir a pressão no interior do tanque, tem de se definir a pressão a jusante da bomba B2, isto devido à possibilidade de variação da velocidade de rotação em cada uma das bombas em série nesse circuito.

Deste modo, para ambos os casos, I e II, assume-se uma pressão à saída da bomba B2 de 400 kPa relativos. O ponto crítico da bomba B3, para ambos os casos vai ser o que contém o caudal total em circulação no circuito e a altura manométrica que corresponde à diferença de pressão entre o tanque e o ponto imediatamente a montante da bomba B3 da situação em questão.

Para a bomba B3 na instalação alternativa C, figura 64, o ponto crítico é igual à perda de carga no circuito 8 na sua situação de funcionamento mais crítica que é com todos os fornos em arrefecimento. Na tabela 49, estão apresentados os valores de caudal e altura manométrica dos pontos críticos da bomba B3 para ambas as instalações onde esta existe.

Tabela 49: Valores de caudal e altura manométrica do ponto crítico da bomba B3 para as instalações alternativas

	$\dot{V}$ [m ³ /h]	h_b [m]
Caso I – A	320	18.4
Caso II – A	400	18.1
Caso III – C	155	17.2

Através da consulta do site da *Wilo*, tendo em conta aquele que deverá ser o ponto de funcionamento mais exigente, escolheu-se a bomba indicada para cada situação cujas referências em conjunto com o diâmetro do impulsor, D_{impulsor} , estão apresentadas na tabela 50. (Wilo.com, 2020)

Tabela 50: Referências e diâmetro do impulsor da bomba escolhida para cada situação

	$\dot{V}$ [m ³ /h]	h_b [m]	referência	D_{impulsor} [m]
Caso I – A – B3	320	18.4	Wilo CronoNorm-NL 150-250	0,258
Caso I – A, B, C–B4	215	21.4	Wilo CronoNorm-NL 100-160	0,160
Caso II – A – B3	400	18.1	Wilo CronoNorm-NLG 200-315	0,304
Caso II – A, B, C–B4	135	21.6	Wilo CronoNorm-NL 80-160	0,160
Caso III – C – B3	155	17.2	Wilo CronoNorm-NL 80-160	0,160
Caso III – C – B4	135	21.5	Wilo CronoNorm-NL 80-160	0,160

Escolhidas as bombas necessárias para cada instalação alternativa, é necessário determinar qual os pontos de funcionamento de cada bomba em cada situação de funcionamento e cada alternativa à instalação atual. De referir que as curvas de altura manométrica e potência das bombas referidas na tabela 50 estão apresentadas no anexo B.

4.6.2 Determinação dos pontos de funcionamento nominais

Os pontos de funcionamento, caudal e altura manométrica, pretendidos em cada situação são obtidos através da simulação dos circuitos conforme situação de funcionamento desejada e o caudal nominal pretendido.

Além da simulação, também é necessário, para cada situação de funcionamento nas instalações alternativas definir a pressão no interior do reservatório. Para a instalação alternativa A disposta na figura 62, as pressões estabelecidas após as bombas B2 e no tanque são as que foram definidas na subsecção anterior. No entanto, no caso de estarem todos os fornos em funcionamento nesta alternativa, no caso II, separação do circuito das paredes dos permutadores de calor, para evitar riscos de cavitação à entrada da bomba B3, coloca-se a pressão à saída de B2 450 kPa relativos.

Para a instalação alternativa B apresentada na figura 63, quer na mudança da disposição dos fornos quer na separação dos circuitos das paredes dos permutadores, define-se como 450 kPa relativos a pressão no interior do tanque.

Para a instalação alternativa C patente na figura 64, a pressão no tanque foi definida como 20 kPa relativos.

Definidas as pressões, calcula-se a variação de pressão a ser superada em cada situação por cada bomba, Δp , e a altura manométrica associada a esta, h_b , através da equação (62).

$$h_b = \frac{\Delta p}{\rho * g} \quad (62)$$

Determinados os pontos de funcionamento, calcula-se a velocidade de rotação da bomba de modo a que a curva característica da bomba passe no ponto de funcionamento pretendido. Isto é possível através das curvas de altura manométrica e potência no veio adimensionais obtidas para cada bomba de modo análogo ao realizado na subsecção 3.3.1 desta dissertação.

Com a velocidade de rotação e o ponto de funcionamento, através das curvas adimensionais, é possível retirar o valor da potência no veio, P_{veio} , para a situação em questão.

A potência no veio relaciona-se com a potência elétrica através da equação (61). O rendimento do motor é obtido através da percentagem da carga, $\%_{\text{carga}}$ e a relação entre estas duas variáveis difere consoante a bomba em questão e é conseguida através de dados provenientes do fabricante das bombas. Tanto as expressões para obtenção do rendimento como os dados necessários para a sua obtenção encontram-se dispostos no anexo C.

Uma vez determinados os valores de potência elétrica para cada bomba individualmente, obtém-se a potência elétrica necessária em cada situação de funcionamento para cada instalação alternativa. Os resultados obtidos de potência elétrica estão apresentados na tabela 51 em kW.

Nas variantes, as letras A, B e C referem-se às instalações alternativas das figuras 62, 63 e 64, respetivamente.

Tabela 51: Potência elétrica, kW, em cada situação de funcionamento para as alternativas à instalação atual

Situação	Só paredes em funcionamento	Alguns fornos (igual em todas as instalações)	Todos os fornos em funcionamento
Instalação atual	28.9	52.3	81.5
Caso I – A	32.7	45.3	69.4
Caso II – A	11.3	58.1	86.4
Caso I – A *	34	45.8	69.5
Caso II – A *	14.3	61.1	89.4
Caso I – B	24.4	39.3	69.1
Caso II – B	11.3	39.5	77.5
Caso I – B *	25.7	39.8	69.2
Caso II – B *	14.3	42.5	80.5
Caso I – C	24.4	39.3	69.1
Caso II – C	11.3	39.5	77.5
Caso III – C	11.1	35.8	54.5
Caso I – C *	25.7	39.8	69.2
Caso II – C *	14.3	42.5	80.5
Caso III – C *	11.1	40.6	57.1

*- Mantendo em B4 as bombas existentes atualmente na instalação.

Determinada a potência elétrica despendida em cada situação de funcionamento e o tempo de funcionamento estimado, já é possível executar uma breve análise económica comparando as diferentes alternativas entre si e com a instalação atual.

4.6.3 Análise económica

Antes de prosseguir para a análise económica de cada situação é necessário fazer um levantamento dos custos iniciais.

O investimento inicial encontra-se dividido em quatro parcelas que são as mais preponderantes: o preço das bombas novas; o preço dos variadores de frequência; o preço do tanque e o custo das restantes alterações a efetuar nos circuitos em cada situação, que vêm apresentados na tabela 52.

Tabela 52: Valores das parcelas do custo inicial para cada alternativa

Situação	Preço bombas [€]	Preço Variadores de frequência [€]	Preço do tanque [€]	Custo restantes alterações [€]
Caso I – A	33 952	10 000	30 000	10 000
Caso II – A	49 686	26 000	30 000	25 000
Caso I – A *	18 722	10 000	30 000	10 000
Caso II – A *	41 600	20 000	30 000	25 000
Caso I – B	15 230	0	30 000	10 000
Caso II – B	8 086	6 000	30 000	25 000
Caso I – B *	0	0	30 000	10 000
Caso II – B *	0	0	30 000	25 000
Caso I – C	15 230	0	10 000	10 000
Caso II – C	8 086	6 000	10 000	25 000
Caso III – C	16 172	12 000	10 000	35 000
Caso I – C *	0	0	10 000	10 000
Caso II – C *	0	0	10 000	25 000
Caso III – C *	8 086	6 000	10 000	35 000

*- Mantendo em B4 as bombas existentes atualmente na instalação.

A fim de obter algumas conclusões acerca das alternativas que compensarão mais, vai-se colocar a seguinte situação: em cada mês durante 4 dias funciona apenas o arrefecimento das paredes e, no tempo restante, funciona a situação de alguns fornos em arrefecimento, são eles B2R, B1R2, B1R4 do circuito 1 e B3R, B2T, B1T1, B1T2 e B1T3 do circuito 2.

Para analisar esta situação é primeiro necessário calcular a energia gasta mensalmente em cada situação, E_{mensal} , e o preço associado à mesma, custo mensal, obtida através das equações (63) e (64). Na expressão (64), para o custo por kWh de energia admitiu-se 0.15 que é um valor hipotético.

$$E_{\text{mensal}}[\text{kWh/mês}] = (30 * 24)[\text{h/mês}] * P_{\text{elétrica}}[\text{kW}] \quad (63)$$

$$\text{Custo mensal}[\text{€/mês}] = 0,15 * E_{\text{mensal}}[\text{kWh/mês}] \quad (64)$$

Posteriormente calcula-se quanto tempo necessário para se obter o retorno do investimento inicial, $\text{tempo}_{\text{retorno}}$, e o retorno de cada investimento ao fim de 10 anos, retorno , para cada alternativa.

$$\text{tempo}_{\text{retorno}}[\text{anos}] = \frac{\text{Investimento inicial}_{\text{alternativa}}}{(\text{Custo mensal}_{\text{atual}} - \text{Custo mensal}_{\text{alternativa}}) * 12} \quad (65)$$

$$\text{retorno}[\text{€}] = - \text{Investimento inicial}_{\text{alternativa}} + (\text{Custo mensal}_{\text{alternativa}} - \text{Custo mensal}_{\text{atual}}) * 12 * 10 \quad (66)$$

Na tabela 53 está apresentado o custo energético mensal e o tempo onde se obtém o retorno para as instalações alternativas em análise.

Tabela 53: Tempo de retorno de investimento e retorno ao fim de 10 anos para a situação analisada

Situação	E_{mensal} [kWh]	Investimento inicial [€]	Custo mensal [€]	$\text{tempo}_{\text{retorno}}$ [anos]	Retorno ao fim de 10 anos [€]
Instalação atual	35 409.6	0	5 311.44	-	-
Caso I – A	31 406.4	83 952	4 710.96	11.65	- 11 894
Caso II – A	37 339.2	130 686	5 600.88	-	-
Caso I – A *	31 843.2	68 722	4 776.48	10.71	- 4 527
Caso II – A *	39 499.2	116 600	5 924.88	-	-
Caso I – B	26 865.6	55 230	4 029.84	3.59	98 562
Caso II – B	25 732.8	69 086	3 859.92	3.97	105 096
Caso I – B *	27 302.4	40 000	4 095.36	2.74	105 930
Caso II – B *	27 892.8	55 000	4 183.92	4.06	80 302
Caso I – C	26 865.6	35 230	4 029.84	2.29	118 562
Caso II – C	25 732.8	49 086	3 859.92	2.81	125 096
Caso III – C	23 404.8	73 172	3 510.72	3.38	142 914
Caso I – C *	27 302.4	20 000	4 095.36	1.37	125 930
Caso II – C *	27 892.8	35 000	4 183.92	2.59	100 302
Caso III – C *	26 400.0	59 086	3 960.00	3.64	103 086

*- Mantendo em B4 as bombas existentes atualmente na instalação.

Na tabela 53, as alternativas para as quais não se apresenta o tempo de retorno é devido ao seu consumo energético mensal ser superior ao da instalação atual e, por esta razão, a solução é pior que a existente atualmente não existindo retorno do investimento.

Pode-se verificar que as alternativas B e C à instalação atual representadas nas figuras 63 e 64 apresentam melhores resultados que a alternativa A representada na figura 62.

Também é de grande relevo que, consoante a situação de funcionamento, a análise económica tem uma grande variação. Escolheu-se esta situação visto ser a que se assemelha mais ao funcionamento real da instalação atual.

Entre as alternativas B e C, para os mesmos casos, o custo mensal energético é igual. No entanto, investimento inicial é sempre menor na instalação C devido à menor pressão no interior do tanque que permite um investimento inicial menor. Sendo que, a partir deste ponto, o foco será posto nesta alternativa.

Em termos de custo energético mensal, a melhor opção é a instalação alternativa C com o caso III, divisão em 3 circuitos, um só para as paredes, um para os permutadores de grande perda de carga e outro para os permutadores de menor perda de carga e com mudança das bombas B3 e B4 presentes na figura 64, onde existe uma redução de custo de aproximadamente 44%, relativamente à instalação atual.

Atendendo apenas ao tempo de retorno, a melhor opção tendo em conta esta situação de funcionamento e a alternativa em questão, é a mudança da disposição dos fornos mantendo as bombas atuais pois, apesar de não ser a melhor a nível de consumo energético mensal, é a que tem menor investimento inicial e, consequentemente, menor tempo de retorno.

Entre as últimas opções referidas, calculou-se quantos anos seriam necessários ter a instalação em funcionamento para o caso III compensar relativamente ao caso I, para a alternativa e situação de funcionamento em questão, donde se determinou que são necessários 7.6 anos para tal acontecer, o que pode ser comprovado através do retorno ao fim de 10 anos onde o caso III surge como a melhor alternativa.

Além das informações já fornecidas, na tabela 54 estão apresentados os valores, para cada alternativa, de energia poupada anualmente, da diminuição de custo anual, a redução de emissão de CO₂ anual e o consumo energético anual para cada alternativa.

Para o cálculo da redução de CO₂, utilizou-se o valor de 248.53 g(CO₂)/kWh (edp.pt. 2020).

Tabela 54: Valores de energia, custo e CO₂ poupados anualmente consoante as diferentes alternativas

Situação	Energia poupada anualmente [kWh]	Redução custo anual [€]	CO ₂ poupado anualmente[ton]	Consumo energético anual [tep]
Caso I – A	48 038	7 206	11.9	109.3
Caso II – A	-	-	-	-
Caso I – A *	42 797	6 420	10.6	110.8
Caso II – A *	-	-	-	-
Caso I – B	102 528	15 379	25.5	93.5
Caso II – B	116 122	17 418	28.9	89.6
Caso I – B *	97 286	14 593	24.2	95.0
Caso II – B *	90 202	13 530	22.4	97.1
Caso I – C	102 528	15 379	25.5	93.5
Caso II – C	116 122	17 418	28.9	89.6
Caso III – C	144 058	21 609	35.8	81.4
Caso I – C *	97 286	14 593	24.2	95.0
Caso II – C *	90 202	13 530	22.4	97.1
Caso III – C *	108 115	16 217	26.9	91.9

*- Mantendo em B4 as bombas existentes atualmente na instalação.

Na tabela 54, pode-se observar, além da energia e custo da mesma já comentados anteriormente, a redução nas emissões de CO₂. Para se ter em conta a redução nas emissões, é importante referir que para a instalação atual, calculou-se que se emite 105.6 toneladas de CO₂ equivalente pelo que reduções entre 20 e 30 toneladas são valores com uma certa preponderância e uma diferença de 10 toneladas tem a repercussão da redução de aproximadamente 10% nas emissões atuais.

Entre as alternativas que já eram mais chamativas, pode-se observar que aquela que tem maior diminuição nas emissões de CO₂ é o caso III – C e que emite menos 10 toneladas de CO₂ anualmente que o caso I – C que em termos de tempo de retorno é a melhor opção.

Uma outra possibilidade é também usar as bombas existentes na instalação atualmente e, numa próxima substituição, optar pelas novas bombas.

4.6.4 Dimensionamento dos tubos de pressurização instalação C

Na instalação alternativa C, apresentada na figura 64, o objetivo é o tanque estar a uma pressão reduzida de 20 kPa relativos, pressão esta obtida através de tubos de pressurização como é possível observar na figura 65.

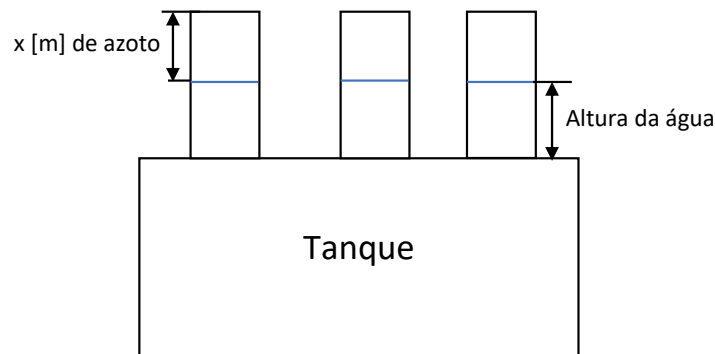


Figura 65: Esquema da alteração do tanque e dos tubos de pressurização.

As colunas de água, no interior dos tubos de pressurização são o que garante a pressurização do tanque. A altura destas colunas é de 2 metros a fim de se obter uma pressão proposta de 0,20 bar relativos no interior do tanque.

A temperatura da água na instalação é variável, o que provoca uma mudança na densidade da água que muda, por sua vez, o volume de água na instalação. Como o circuito e tanque são fechados, é necessário azoto dentro dos tubos de pressurização para absorver estas variações de volume e também evitar que o oxigénio contacte com a água. Os tubos vão também como vasos de expansão que serão seguidamente dimensionados.

Para dimensionar os tubos de pressurização, estima-se 86,5 m³ para o volume de água na instalação. Inicialmente, considera-se tanto a água como o azoto inicialmente a 1 bar e temperatura 15°C. Com o funcionamento da instalação a temperatura da água aumenta. Para a situação crítica na qual se dimensionam os tubos, considera-se metade da massa de água na instalação a 23°C e a massa restante a 60°C. Na mesma situação, considera-se que o azoto atinge uma temperatura de 50°C e pressão máxima de 0,3 bar relativos.

Tendo a pressão e temperatura para cada fluido em cada situação, consegue-se obter a densidade através da qual consegue-se estabelecer a relação entre a massa e o volume.

É preciso garantir a conservação da massa na instalação e, além disto, que a variação de volume na água é igual à diminuição de volume do azoto, através das equações (67) e (68).

$$V_{\text{água},\text{crítico}} - V_{\text{água},\text{inicial}} = V_{\text{azoto},\text{inicial}} - V_{\text{azoto},\text{crítico}} \quad (67)$$

$$V_{\text{azoto},\text{inicial}} * \rho_{\text{azoto},\text{inicial}} = V_{\text{azoto},\text{crítico}} * \rho_{\text{azoto},\text{crítico}} \quad (68)$$

Visto que os valores de volume de água inicial, $V_{\text{água,inicial}}$, e volume de água crítico, $V_{\text{água,crítico}}$, são conhecidos, das equações (67) e (68) é possível retirar o volume inicial de azoto, que é o que permite determinar qual a altura necessária dos tubos.

Considerou-se que seriam utilizados 3 tubos de pressurização com 1m de diâmetro cada. Tendo em conta, as condições de pressão e temperatura já referidas, obteve-se que a altura dos tubos teria de ser de 4,4 metros, destinando-se 2 metros para água e os restantes 2,4 para azoto. Altura esta do azoto no estado inicial quando a instalação é cheia com água. Se se optar por utilizar quatro tubos com as mesmas dimensões dos anteriores a pressão final máxima do azoto será de 21 kPa relativos.

É importante referir que, na análise económica, não se considerou possível custo de azoto, pois este depende também da instalação e das fugas que a mesma tiver.

5 Conclusões

Nesta dissertação conclui-se que é possível a otimização energética da instalação em questão conforme está patente nos valores alcançados no capítulo 4.

Antes de mais, é importante referir que, embora seja possível retirar algumas conclusões das simulações realizadas e da análise económica, foram feitas diversas aproximações na execução das mesmas, que podem fazer variar um pouco os resultados alcançados.

Uma questão extremamente relevante é também a variação dos resultados obtidos na análise económica consoante a situação de funcionamento que se coloca. Quanto mais tempo se coloca os permutadores em arrefecimento, o caso I, mudança da disposição dos fornos, aparenta ser mais vantajoso. Em contraste, o caso II, separação dos circuitos das paredes e permutadores, surge como uma melhor solução quanto menor for a percentagem de tempo em que os permutadores estão em arrefecimento. O caso III, onde ocorre a divisão em 3 circuitos, é mais independente da situação de funcionamento, visto que obtém bons resultados independentemente da situação de funcionamento em questão.

Quanto às soluções construtivas alternativas patentes nas figuras 62, 63 e 64, a alternativa B, em relação à alternativa A, tem diversas vantagens como uma menor necessidade de alteração da instalação e da compra de menor quantidade de equipamento novo (apenas duas bombas em vez de três) e, conseqüentemente, não é necessário um novo variador de frequência. No entanto, aquela que pode ser uma desvantagem desta solução, é a necessidade de pressão no interior do tanque ser bastante elevada, 4.5 bar relativos. Dependendo do volume do reservatório, a necessidade desta pressão no seu interior pode fazer elevar bastante o custo do mesmo.

Face a esta última desvantagem, a instalação C surge como a melhor solução, visto que a necessidade de um reservatório de grande volume a uma pressão tão elevada é um custo muito elevado. Além deste problema, a instalação C é a que, entre as duas melhores alternativas, permite controlar mais facilmente a pressão à entrada dos permutadores de calor e das paredes dos fornos sendo também mais fiável uma vez que a pressão no tanque só depende da coluna de água.

Tendo em conta que melhor se adapta a todas as situações de funcionamento, o caso III, com divisão em 3 circuitos e com substituição das bombas atuais para dois dos circuitos, aparenta ser uma boa solução. No entanto, visto o investimento inicial ser bastante elevado, para esta situação de funcionamento, demora-se bastante a obter o retorno do investimento inicial, o que torna o caso I, com apenas a mudança da disposição atual dos fornos e mantendo as bombas existentes nos circuitos atuais, uma boa opção.

Entre estas duas opções, a mais vantajosa economicamente depende de qual a previsão de tempo para o funcionamento da instalação modificada pois, se esta for menor que 8 anos, a alteração que mais compensa é o caso I. Se esta alteração for vista como

uma mudança para durar bastante mais que 8 anos, então o caso III deverá ser uma opção a ter em conta.

A nível ambiental, excluindo as emissões de CO₂ no fabrico das bombas, apenas considerando as emissões de CO₂ durante o funcionamento da instalação, o caso III – C é claramente a melhor opção diminuindo em 36 toneladas de CO₂ anualmente para a situação de funcionamento considerada.

Em suma, para a situação de funcionamento considerada, destaca-se como melhor opção a instalação C. Dentro desta alternativa, salienta-se o caso I mantendo as bombas utilizadas atualmente, onde se tem um tempo de retorno de 1.37 anos e uma poupança anual no custo energético de 14600€, e o caso III com a troca das bombas que existem atualmente onde, apesar do investimento inicial elevado e do tempo de retorno de 3.38 anos, tem-se uma poupança anual no custo energético de 21600€.

5.1 Trabalhos futuros

Conforme referido nas conclusões, a melhor opção difere consoante a situação de funcionamento considerada, isto é, o tempo que cada forno está em arrefecimento e o tempo em que apenas está em funcionamento o arrefecimento das paredes. Caso se pretenda alterar a situação de funcionamento mensal considerada, também é possível a realização de simulações de diferentes situações de funcionamento intermédias a fim de ser possível concluir acerca das mesmas.

Para os cálculos das diferentes simulações hidráulicas, foi necessário o cálculo prévio da perda de carga no interior dos diferentes permutadores de calor e nas condutas de arrefecimento das paredes. Estes dados, geralmente, podem ser fornecidos pelo fabricante, algo que faria com que houvesse uma menor incerteza nos cálculos executados posteriormente. Além disto, não se encontrou o desenho do permutador do forno B2R e, teve de se aproximar o seu coeficiente de perda de carga localizada ao do forno B3R. No futuro, sendo possível a ida presencial à empresa, seria uma melhor opção calcular a perda de carga neste forno em vez de o aproximar a outro forno.

Na simulação hidráulica dos circuitos dos fornos, é sugerida a consideração do consumo de água das bombas de vácuo e dos fornos de cementação que não se teve em conta nas simulações realizadas.

Na análise económica, os custos do tanque, dos variadores de frequência e das alterações à instalação foram estimados. Embora os valores sejam próximos daquilo que deverá ser a realidade, antes de prosseguir com a decisão de alterar a instalação, é sugerida uma análise económica mais pormenorizada.

É sugerido também, na possível situação de compra de novos fornos, a simulação hidráulica dos circuitos em questão uma vez que, por exemplo, um forno de elevada perda de carga no local errado pode alterar completamente o funcionamento da instalação.

Referências

Idelcik, I. (1979). *Memento des pertes de charge*. 2^a ed. Editeur Paris

Cameira, M. *Mecânica de Fluidos – Tabelas*. [online] Disponível em <https://www.scribd.com/document/324935386/3-Tabelas-rugosidade-Escoamentopressao> [acedido a 20 de Abril de 2020]

Frenkel, N. Z. (1956). *Hydraulics* (Russian). Gosenergizdat, Moscow

Munson, B.; Young, D. e Okiishi T. (1990). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons

Wilo.com (2020). Disponível em: <https://wilo.com/il/en/Products-and-expertise/Series-Finder/index.html> [acedido pela última vez a 20 de Junho de 2020]

Edp.pt (2020). Disponível em: <https://www.edp.pt/origem-energia/?sector=Empresas&year=2020&period=-1> [acedido pela última vez a 24 de Junho de 2020]

Anexo A - Demonstração da equação da equação de cálculo do k_{eq}

Conforme referido no capítulo 3 desta dissertação, para calcular o k_{eq} é necessário que todos os coeficientes de perda de carga localizada envolvidos no cálculo estejam referentes à mesma velocidade.

No capítulo 2 e 3, o k_{par} e k_{vpar} foi calculado relativo à velocidade na conduta de arrefecimento das paredes e o k_{per} e k_{vper} foi calculado relativamente à velocidade nos tubos do permutador de calor.

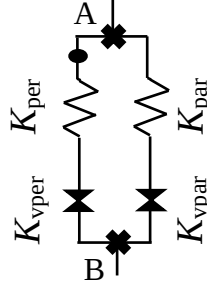


Figura 66: Esquema do interior do forno com os coeficientes de perda de carga localizada envolvidos assinalados.

A diferença de pressão entre A e B é a mesma independentemente do caminho que a água percorrer e é a esta queda de pressão que vai equivaler o k_{eq} .

$$\Delta p = \rho * k_{eq} * \frac{\dot{V}_{ramal}^2}{2 * A_{ramal}^2} \quad (A.1)$$

$$\Delta p = \rho * (k_{par} + k_{vpar}) * \frac{\dot{V}_{par}^2}{2 * A_{par}^2} = \rho * (k_{per} + k_{vper}) * \frac{\dot{V}_{per}^2}{2 * A_{per}^2} \quad (A.2)$$

Também se sabe a relação existente entre os 3 caudais volúmicos.

$$\dot{V}_{ramal} = \dot{V}_{par} + \dot{V}_{per} \quad (A.3)$$

Pode-se alterar as equações (A.1) e (A.2) para se obter o valor do caudal de cada conduta obtendo-se as equações (A.4), (A.5) e (A.6).

$$\dot{V}_{ramal} = \sqrt{\frac{2 * \Delta p * A_{ramal}^2}{\rho * k_{eq}}} \quad (A.4)$$

$$\dot{V}_{par} = \sqrt{\frac{2 * \Delta p * A_{par}^2}{\rho * (k_{par} + k_{vpar})}} \quad (A.5)$$

$$\dot{V}_{per} = \sqrt{\frac{2 * \Delta p * A_{per}^2}{\rho * (k_{per} + k_{vper})}} \quad (A.6)$$

Substituindo as expressões de caudal presentes nas equações (A.4), (A.5) e (A.6) na equação (A.3) e simplificando a mesma obtém-se a expressão do k_{eq} descrita na equação (A.10).

$$\sqrt{\frac{2 * \Delta p * A_{ramal}^2}{\rho * k_{eq}}} = \sqrt{\frac{2 * \Delta p * A_{par}^2}{\rho * (k_{par} + k_{vpar})}} + \sqrt{\frac{2 * \Delta p * A_{per}^2}{\rho * (k_{per} + k_{vper})}} \quad (A.7)$$

$$\sqrt{\frac{A_{ramal}^2}{k_{eq}}} = \sqrt{\frac{A_{par}^2}{(k_{par} + k_{vpar})}} + \sqrt{\frac{A_{per}^2}{(k_{per} + k_{vper})}} \quad (A.8)$$

$$\frac{A_{ramal}^2}{k_{eq}} = \frac{A_{par}^2}{(k_{par} + k_{vpar})} + \frac{A_{per}^2}{(k_{per} + k_{vper})} + 2 * \sqrt{\frac{A_{par}^2 * A_{per}^2}{(k_{par} + k_{vpar}) * (k_{per} + k_{vper})}} \quad (A.9)$$

$$k_{eq} = \frac{A_{ramal}^2 * (k_{par} + k_{vpar}) * (k_{per} + k_{vper})}{A_{per} \sqrt{(k_{par} + k_{vpar})} + A_{par} \sqrt{(k_{per} + k_{vper})}} \quad (A.10)$$

Anexo B - Curvas características das bombas alternativas

Neste anexo, irão ser apresentadas as curvas características das bombas para as instalações alternativas escolhidas no capítulo 4.

Em primeiro lugar, nas figuras 67 a 69 estão apresentadas as curvas características da bomba Wilo CronoNorm-NL 150-250.

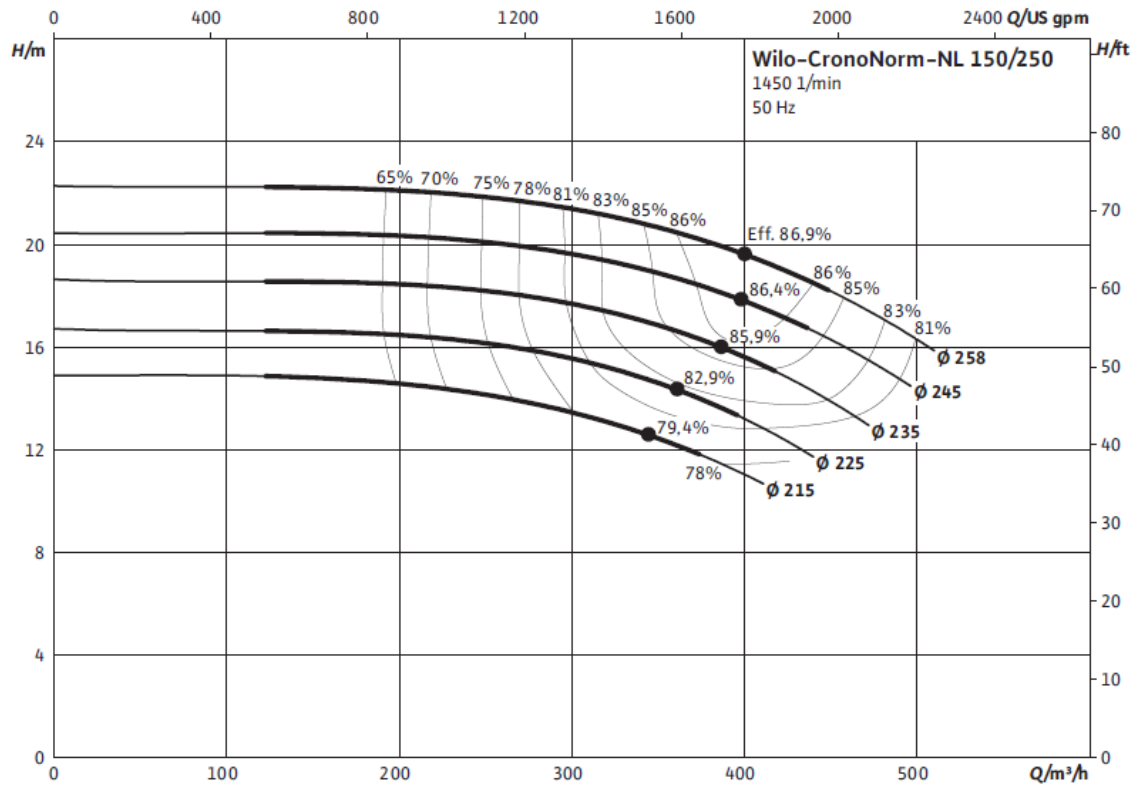


Figura 67: Curva característica da bomba Wilo CronoNorm-NL 150-250.

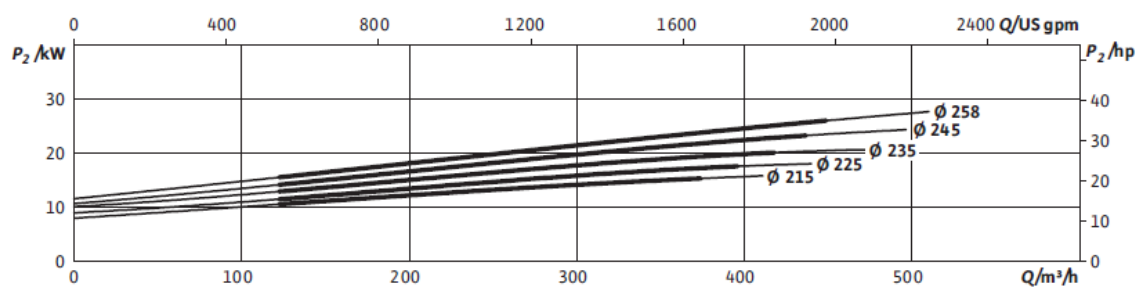


Figura 68: Curva de potência da bomba Wilo CronoNorm-NL 150-250.

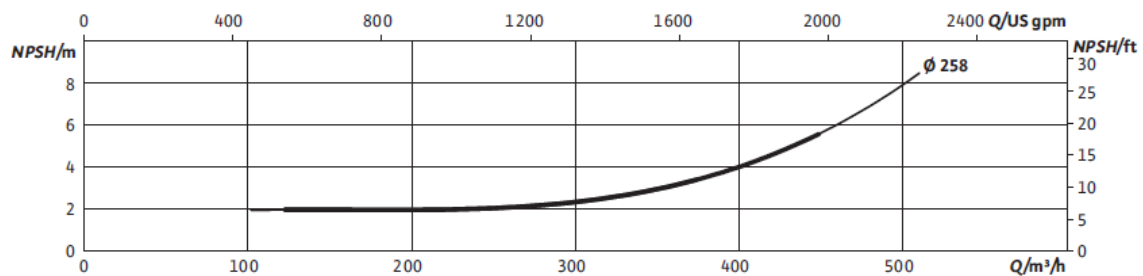


Figura 69: Curva de NPSH da bomba Wilo CronoNorm-NL 150-250.

Nas figuras 70 a 72 estão apresentadas as curvas da bomba Wilo CronoNorm-NL 100-160.

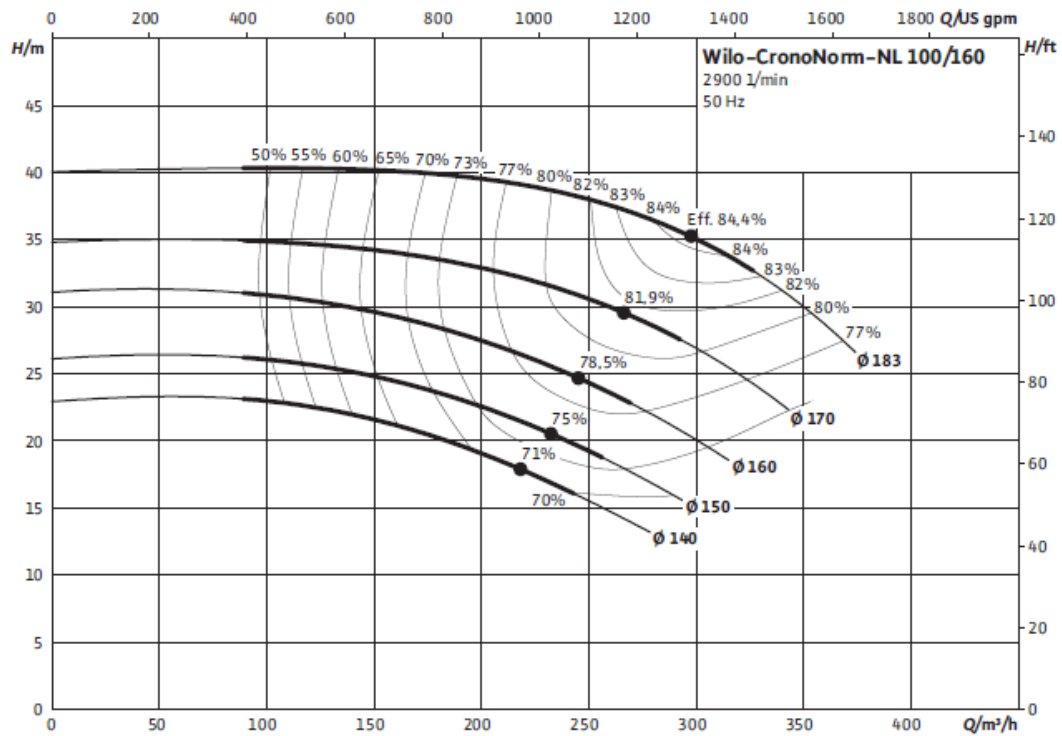


Figura 70: Curva característica da bomba Wilo CronoNorm-NL 100-160.

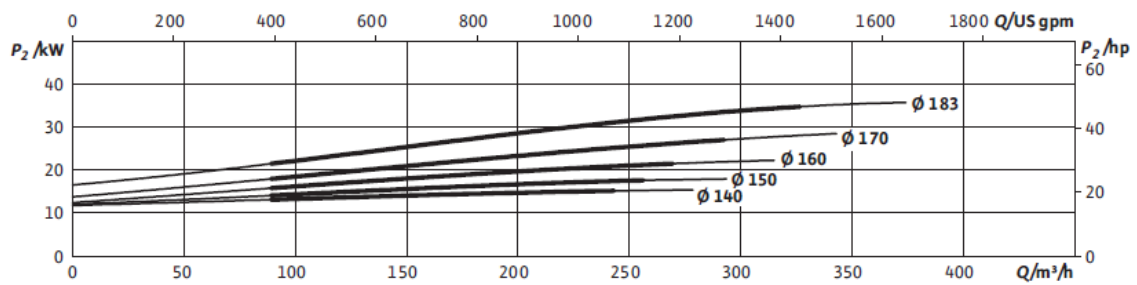


Figura 71: Curva de potência da bomba Wilo CronoNorm-NL 100-160.

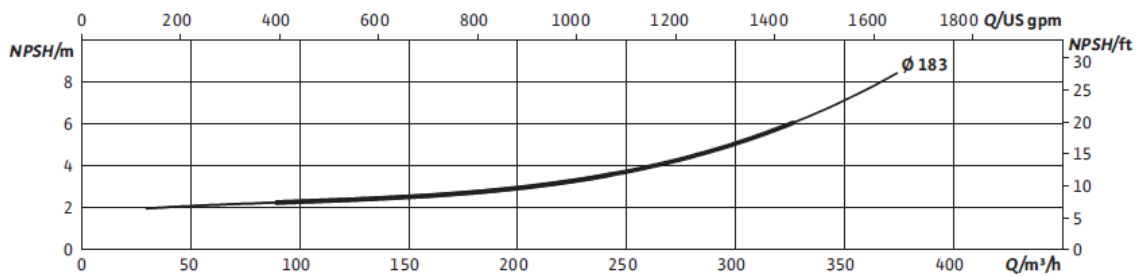


Figura 72: Curva de NPSH da bomba Wilo CronoNorm-NL 100-160.

Nas figuras 73 a 75 estão apresentadas as curvas da bomba Wilo CronoNorm-NLG 200-315.

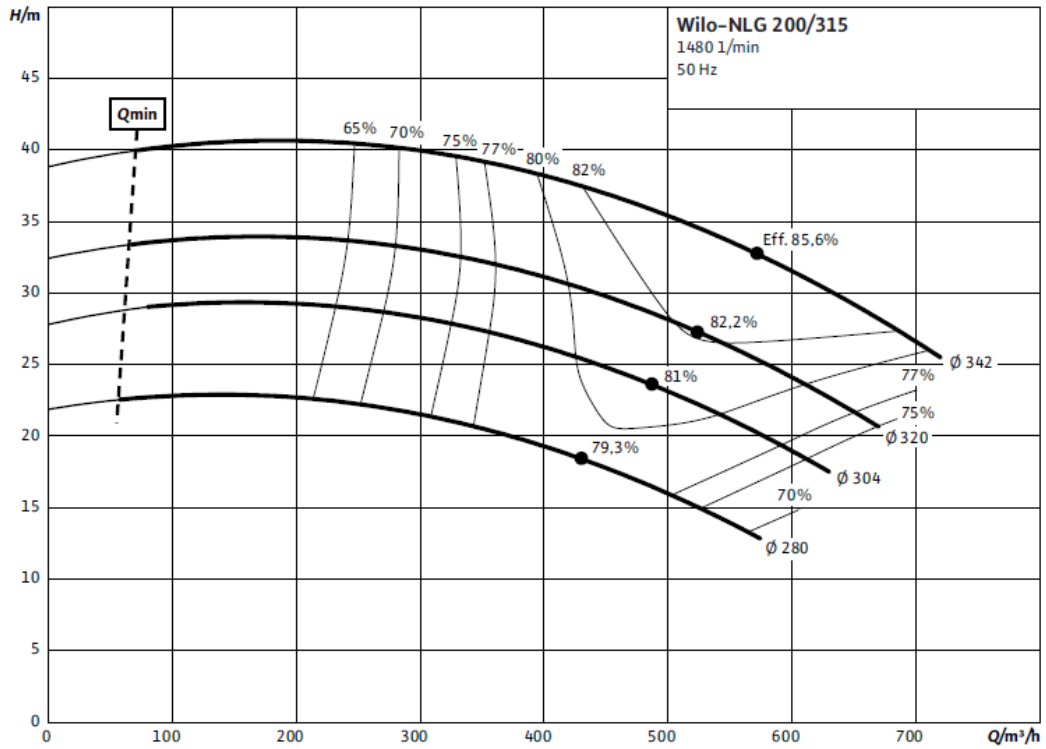


Figura 73: Curva característica da bomba Wilo CronoNorm-NLG 200-315.

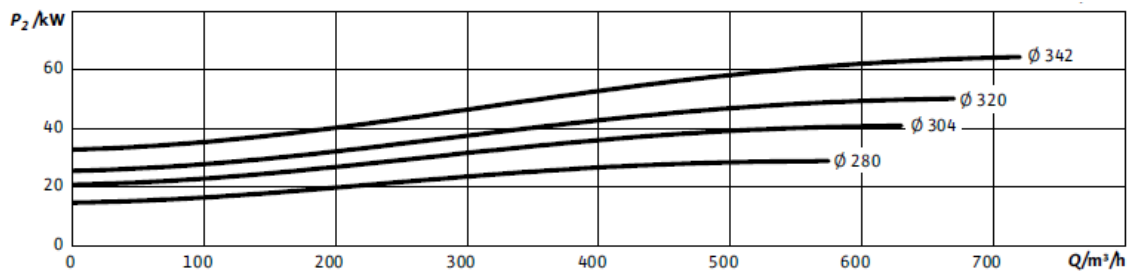


Figura 74: Curva de potência da bomba Wilo CronoNorm-NLG 200-315.

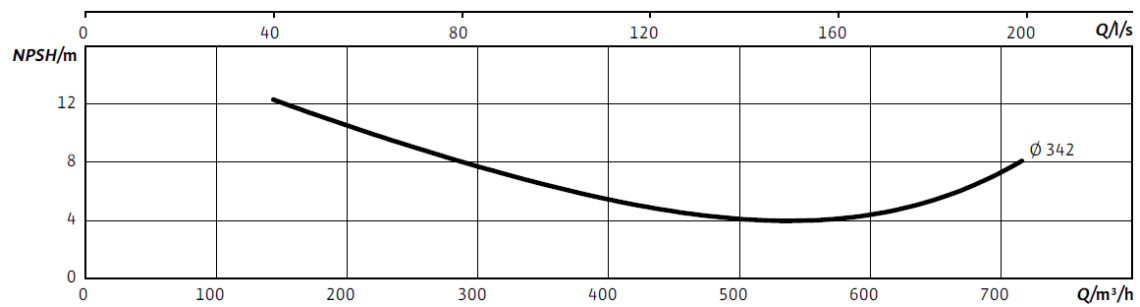


Figura 75: Curva de NPSH da bomba Wilo CronoNorm-NLG 200-315.

Nas figuras 76 a 78 estão apresentadas as curvas da bomba Wilo CronoNorm-NL 80-160.

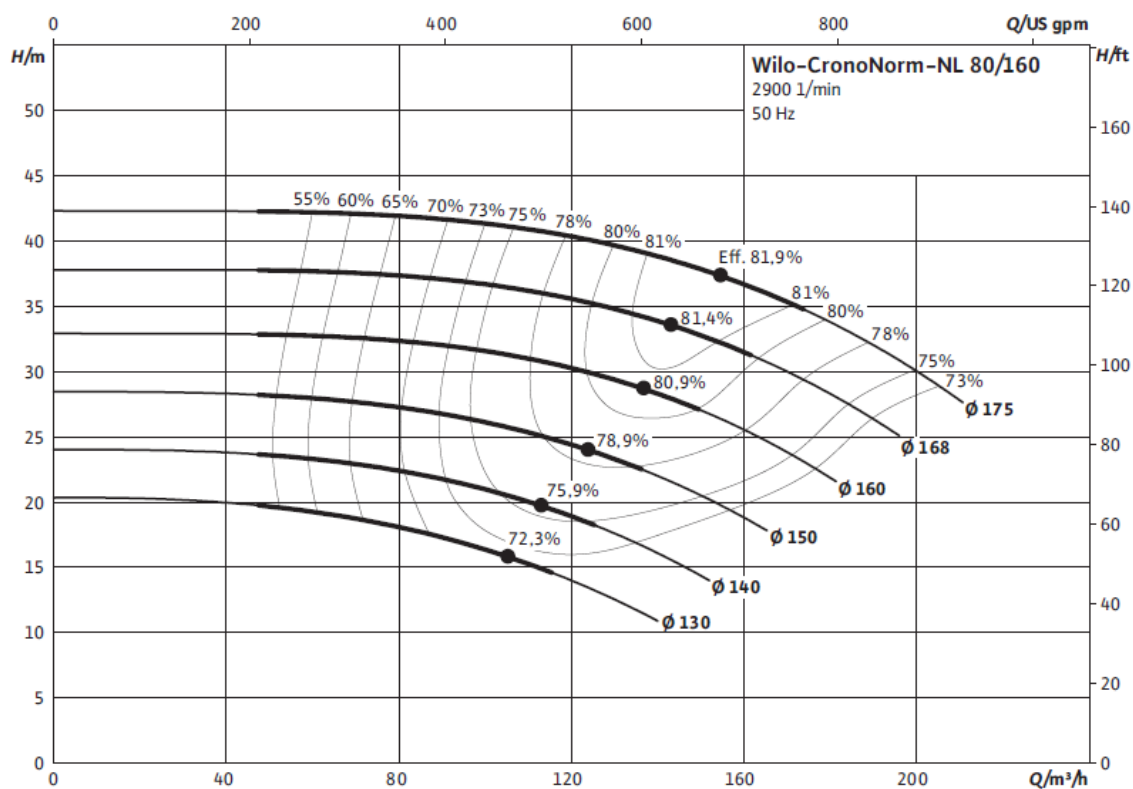


Figura 76: Curva característica da bomba Wilo CronoNorm-NL 80-160.

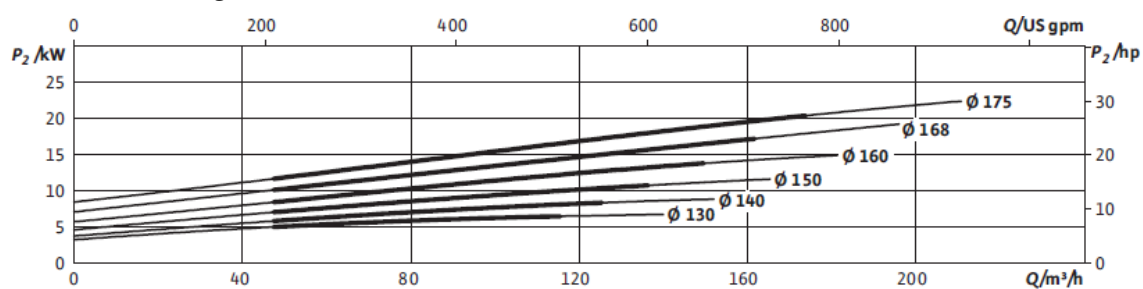


Figura 77: Curva de potência da bomba Wilo CronoNorm-NL 80-160.

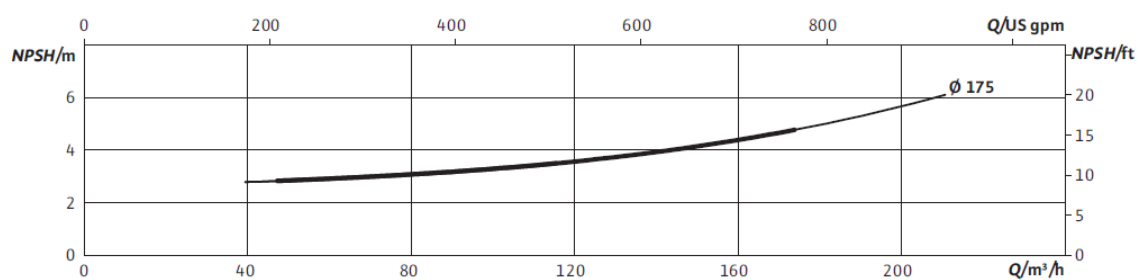


Figura 78: Curva de NPSH da bomba Wilo CronoNorm-NL 80-160.

Anexo C - Dados e obtenção do rendimento do motor para as diferentes bombas

Conforme referido nesta dissertação, o rendimento do motor é função da percentagem de carga. A percentagem é obtida para cada caso de funcionamento através da equação (C.1) onde $P_{\text{nominal motor}}$ é a potência nominal do motor associado à bomba fornecida também pelo fabricante.

$$\%_{\text{carga}} = \frac{P_{\text{veio}}}{P_{\text{nominal motor}}} \quad (\text{C.1})$$

Para cálculo do rendimento, além da potência nominal do motor, o fabricante fornece o rendimento do motor para três percentagens de carga diferentes. Com estes dados e sabendo que para uma percentagem de carga nula, o rendimento do motor é igualmente nulo, é possível aproximar a estes pontos uma função polinomial de terceiro grau. Nas tabelas 55 e 56 estão apresentados os dados fornecidos pelo fabricante da potência nominal do motor e do rendimento do motor respetivamente.

Tabela 55: Valores da potência nominal do motor para cada bomba

bomba	$P_{\text{nominal motor}}$ [kW]
Wilo CronoNorm-NL 100-200	37.0
Wilo CronoNorm-NL 150-250	30.0
Wilo CronoNorm-NL 100-160	30.0
Wilo CronoNorm-NLG 200-315	90.0
Wilo CronoNorm-NL 80-160	11.0

Tabela 56: Valores do rendimento do motor [%] para diferentes percentagens de carga

Percentage de carga (% _c)	0%	50%	75%	100%
Wilo CronoNorm-NL 100-200	0	90.1	91.9	92.5
Wilo CronoNorm-NL 150-250	0	92.2	93.0	93.1
Wilo CronoNorm-NL 100-160	0	89.6	91.4	92.0
Wilo CronoNorm-NLG 200-315	0	94.9	95.4	95.4
Wilo CronoNorm-NL 80-160	0	87.5	89.3	89.4

Aproximando uma função polinomial de terceiro grau aos valores da tabela 56, obtém-se a expressão do rendimento do motor em função da percentagem de carga para cada bomba. As equações (C.2), (C.3), (C.4), (C.5) e (C.6) são as expressões obtidas para as bombas Wilo CronoNorm-NL 100-200, Wilo CronoNorm-NL 150-250, Wilo CronoNorm-NL 100-160, Wilo CronoNorm-NLG 200-315 e Wilo CronoNorm-NL 80-160 respetivamente.

$$\eta_{\text{motor}} = 2.21 * 10^{-4} * \%_c^3 - 0.0507 * \%_c^2 + 3.784 * \%_c - 2.25 * 10^{-11} \quad (\text{C.2})$$

$$\eta_{\text{motor}} = 2.36 * 10^{-4} * \%_c^3 - 0.0537 * \%_c^2 + 3.937 * \%_c - 2.26 * 10^{-11} \quad (\text{C.3})$$

$$\eta_{\text{motor}} = 2.20 * 10^{-4} * \%_c^3 - 0.0504 * \%_c^2 + 3.763 * \%_c - 2.24 * 10^{-11} \quad (\text{C.4})$$

$$\eta_{\text{motor}} = 2.46 * 10^{-4} * \%_c^3 - 0.0558 * \%_c^2 + 4.074 * \%_c - 2.33 * 10^{-11} \quad (\text{C.5})$$

$$\eta_{motor} = 2.10 * 10^{-4} * \%_c^3 - 0.0486 * \%_c^2 + 3.657 * \%_c - 2.19 * 10^{-11} \quad (C.6)$$