

Desempenho Laboratorial de uma Chaminé de Indução para um Esquentador

Simão Pedro Almeida Valente

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho

Orientador no INEGI: Victor Daniel Camilo Ferreira



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho 2017

*“Do just once what others say you can't do and
you will never pay attention to their limitations again.”*

James R. Cook

Resumo

O principal objetivo deste trabalho recai sobre a análise do desempenho de uma chaminé de indução para um esquentador, chaminé esta que funciona sobre o princípio do venturi, recorrendo ainda ao ventilador de extração normalmente usado nos esquentadores ventilados, tendo sido testada no Laboratório de Combustão do INEGI. Para além dos testes realizados à chaminé, que constitui o cerne da dissertação, foram ainda testadas outras duas chaminés, a chaminé convencional de convecção natural e uma outra denominada por chaminé INEGI, a funcionar em convecção forçada, para ser possível realizar algumas comparações e retirar ilações das diferenças existentes.

Durante os ensaios realizados à chaminé venturi, verificou-se que a mesma não permitia o funcionamento em pleno do esquentador, por esse motivo foram realizadas algumas alterações estruturais no sentido de tentar solucionar os problemas encontrados. Como as mudanças realizadas não surtiram efeito desejado recorreu-se à substituição do ventilador previamente testado pela injeção de ar comprimido, de modo a intensificar efeito de venturi que se pretendia implementar.

Contudo, verificou-se que o ideal seria a aplicação deste conceito da injeção de ar a uma chaminé pré-existente. Foi então implementada a solução da injeção de ar comprimido na chaminé convencional e foram realizados testes de forma a determinar quais as condições de operação que minimizavam as emissões gasosas. A melhor solução obtida verificou-se para uma pressão relativa de injeção de ar de 0,5 bar e com um injetor de 2 mm de diâmetro interno.

Por fim, estimaram-se os diversos parâmetros exigidos pela configuração para funcionar assim como as incertezas associadas aos resultados das medições e realizou-se ainda uma breve pesquisa sobre aparelhos que pudessem assegurar o funcionamento da solução encontrada, não se encontrando no mercado equipamentos que satisfizessem tal objetivo.

Abstract

The main objective of this dissertation was to evaluate the performance of an induction chimney for a gas burning water heater operating under the venturi principle. The chimney used the traditional fan form the ventilated heaters and the work was carried out in the Combustion Laboratories of INEGI. Beyond the tests done with the venturi chimney, complementary tests were carried out with a conventional free convection chimney and with a forced convection chimney, the INEGI chimney, in order to have terms of comparison.

During the performance tests done with the venture chimney, it was verified that it did not allow the water heater to run adequately, reason why there were made some structural changes to it in order to solve the problems found. As the changes made did not solve the problems, it was necessary another solution and so it was resorted to compressed air injection to enhance the venture effect, instead of using the fan.

Considering that the ideal scenario was to try to apply this air injection concept to the conventional chimney this was the path followed. After this implementation, performance testes were made and the best results were reached for an air injection relative pressure of 0,5 bar through an injector with a 2 mm inner diameter.

Finally, several parameters demanded by the solution to work properly were estimated as well as the uncertainties associated with the results obtained. A brief international market research was also made to find out available small size air compressors capable to assure the air injection required for this solution to work. No suitable equipment was found.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Carlos Manuel Tavares de Pinho, a quem agradeço toda a disponibilidade, orientação e motivação que facultou e sem as quais a realização desta dissertação não teria sido bem sucedida.

Ao meu co-orientador, Engenheiro Vitor Daniel Camilo Ferreira pela enorme colaboração na preparação da instalação experimental, na realização dos ensaios e ainda por todos os conselhos, que foram cruciais no trabalho desenvolvido diariamente.

Uma palavra de agradecimento ao INEGI por ceder as instalações necessárias à realização desta dissertação.

Para finalizar, gostaria ainda de agradecer aos meus familiares, com especial ênfase para os meus pais, e à minha namorada, pelo apoio e motivação dados a todos os níveis ao longo do Mestrado.

Índice de Conteúdos

1-Introdução.....	1
1.1-Enquadramento do projeto e motivação.....	2
1.2-O INEGI.....	2
1.3-Objetivos do projeto.....	2
1.4-Metodologia seguida no projeto.....	2
1.5-Estrutura da dissertação.....	2
2-Enquadramento bibliográfico.....	5
2.1-Esquentadores.....	5
2.2-Componentes de um esquentador tradicional.....	6
3-Instalação e procedimento experimental.....	11
3.1-A banca de ensaios instalada.....	11
3.2-Procedimento experimental adotado.....	13
4-O esquentador em teste.....	15
4.1-Chaminé em convecção natural.....	16
4.1.1-Apresentação de resultados dos ensaios.....	17
4.2-Chaminé INEGI.....	24
4.2.1-Apresentação dos resultados dos ensaios.....	25
4.3- Chaminé a testar.....	32
4.3.1-Chaminé Venturi.....	32
4.3.2-Testes à chaminé.....	34
4.4-Alterações realizadas à chaminé.....	35
4.4.1-Protótipo A.....	35
4.4.2-Protótipo B.....	36
4.4.2.1-Ensaio ao protótipo B.....	37
4.4.2.2-Modulação da tensão de alimentação.....	46
4.4.3-Protótipos C, D e E.....	51
5-Injeção de ar.....	63
5.1-Chaminé venturi com injeção de ar.....	63
5.2-Chaminé standard com injeção de ar.....	67
5.2.1-Injetor 4 mm.....	67
5.2.2-Injetor 2 mm.....	71
5.3-Comparação entre as melhores soluções das diversas configurações.....	75
5.4-Injeção de azoto.....	79
5.5- Medição de caudais de injeção.....	80
5.6-Ensaio de transbordo.....	82
5.7-Análise a dispositivos para injeção de ar.....	88
6-Conclusões.....	93
7-Sugestões de trabalho futuro.....	95
8-Referências.....	97
ANEXO A:Normas.....	99
A.1-Transbordo.....	99

A.2-Temperatura do esquentador	99
A.2.1- Temperatura dos dispositivos de controlo, ajuste e segurança	99
A.2.2-Temperatura das diversas superfícies do esquentador.	99
A.2.3-Testes suplementares para esquentadores.	100
A.3- Requerimentos de combustão	100
ANEXO B:Método do deslocamento positivo	103
ANEXO C:Estimativa de Incerteza	105

Nomenclatura

Designação	Definição	Unidades
$\left(\frac{A}{C}\right)$	Razão ar-combustível	-
B	Incerteza sistemática	[% ou ppm]
e	Excesso de ar	-
$\dot{m}$	Caudal mássico	[kg/s]
$m_{água}$	Massa de água	[kg]
$\dot{m}_{gás}$	Caudal mássico de gás	[kg/s]
M_M	Massa molecular	[kg/kmol]
P	Incerteza aleatória	[% ou ppm]
P_a	Pressão ambiente	[Pa]
$PCI_{combustível}$	Poder calorífico inferior do combustível	[kJ/kg]
$P_{fornecida}$	Potência fornecida	[kW]
R	Constante universal	[Pa.m ³ /(kmol.K)]
T_a	Temperatura ambiente	[°C]
U	Incerteza global	[ppm]
Δp	Variação de pressão	[Pa]
ΔT	Intervalo de temperatura	[°C]
Δt	Intervalo de tempo	[s]
$\rho_{água}$	Massa volúmica da água	[kg/m ³]

Índice de figuras

Figura 2.1 - Vista em corte de um esquentador.	6
Figura 2.2 - Fotografia de um queimador tradicional visto de cima.	7
Figura 2.3 - Vista de lado de uma flauta do queimador.	7
Figura 2.4 - Fotografia da câmara de combustão de um esquentador tradicional.	8
Figura 2.5 - Fotografia de um permutador de calor alhetado.	9
Figura 2.6 - Fotografia de um coletor de gases com um ventilador associado.	9
Figura 3.1 - Imagem ilustrativa da banca de ensaios (adaptado Pilão, 1997).	11
Figura 3.2 - A-Imagem do sistema de desumidificação da amostra; B-Imagem do sistema de aquisição de dados.	13
Figura 4.1 - Fotografia do esquentador Bosch.	15
Figura 4.2 - Imagens da chaminé standard, à esquerda vista de frente e à direita vista interior da mesma.	16
Figura 4.3 - Aspeto da chaminé standard associada ao esquentador.	17
Figura 4.4 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração standard e gás natural.	18
Figura 4.5 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração standard e gás natural.	19
Figura 4.6 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração standard e propano.	20
Figura 4.7 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração standard e propano.	21
Figura 4.8 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração standard e butano.	22
Figura 4.9 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração standard e butano.	23
Figura 4.10 - Resultados obtidos para as emissões da chaminé standard, para os diferentes gases em função da potência fornecida.	24
Figura 4.11 - Imagens da chaminé INEGI, à esquerda vista de frente e à direita vista interior da mesma.	25
Figura 4.12 - Aspeto da chaminé INEGI acoplada ao esquentador.	25
Figura 4.13 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração INEGI e butano.	27

Figura 4.14 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração INEGI e butano.....	27
Figura 4.15 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração INEGI e propano.....	29
Figura 4.16 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração INEGI e propano.....	29
Figura 4.17 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração INEGI e gás natural.	31
Figura 4.18 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração INEGI e gás natural.	31
Figura 4.19 - Resultados de emissões da chaminé INEGI obtidos, para os diferentes gases em função da potência fornecida.	32
Figura 4.20 – A - Fotografia da chaminé venturi vista de frente; B - Fotografia dos dois compartimentos que constituem a chaminé. Acima o dos gases de combustão e em baixo o do ar insuflado.....	33
Figura 4.21 - Fotografia da chaminé venturi acoplada ao esquentador.	34
Figura 4.22 - Fotografia elucidativa do fenómeno de fuga de chama.	35
Figura 4.23 - Fotografia do interior do topo da chaminé venturi ao qual foi acrescentada uma divisória.....	35
Figura 4.24 - Fotografias da vista frontal e de topo da chaminé em que são visíveis as “rampas”.	36
Figura 4.25 - Fotografias da vista de frente e de lado do topo contruído no laboratório.....	36
Figura 4.26 - Fotografias das areas de passagem do ar insuflado correspondentes às aberturas da válvula borboleta. A -abertura máxima; B -abertura intermédia ; C -abertura mínima.	37
Figura 4.27 - Configuração da chaminé venturi com o topo fabricado no laboratório....	38
Figura 4.28- Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura máxima da válvula borboleta e gás natural.	40
Figura 4.29 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo B abertura máxima da válvula borboleta e gás natural.	40
Figura 4.30 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura intermédia da válvula borboleta e gás natural.....	42
Figura 4.31 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo B abertura intermédia da válvula borboleta e gás natural	42

Figura 4.32 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura mínima da válvula borboleta e gás natural.....	44
Figura 4.33- Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo B abertura mínima da válvula borboleta e gás natural.	44
Figura 4.34 - Médias dos pontos obtidos para cada uma das posições da borboleta ensaiadas com a chaminé venturi protótipo B e gás natural.	45
Figura 4.35 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura máxima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 85 V e gás natural.	47
Figura 4.36 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo B abertura máxima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 85 V e gás natural.	48
Figura 4.37 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura mínima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 75 V e gás natural.	49
Figura 4.38 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo B abertura mínima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 75 V e gás natural.	50
Figura 4.39 - Conjunto dos pontos médios obtidos nos dois ensaios configuração venturi protótipo B abertura máxima e mínima, com tensão de alimentação de 85 e 75 V (respetivamente) e gás natural.	50
Figura 4.40 - Desenho em Solidworks do novo topo projetado para a chaminé.	52
Figura 4.41 - Fotografias, à esquerda o oco tubular e à direita o mesmo montado no compartimento de insuflação de ar da chaminé venturi.....	52
Figura 4.42 - Fotografia da redução da secção de saída do oco tubular.	53
Figura 4.43 - Associação de um funil à saída do oco tubular.	53
Figura 4.44 - Fotografia do protótipo E.	54
Figura 4.45 - Fotografia da cantoneira utilizada na divisória entre o compartimento dos gases de combustão e da insuflação de ar,.....	54
Figura 4.46 - Fotografias das duas posições da chapa do protótipo E. À esquerda a posição 2 e à direita a posição 1.....	55
Figura 4.47 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo E posição 1 e gás natural.....	57

Figura 4.48 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo E posição 1 e gás natural.	57
Figura 4.49 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo E posição 2 e gás natural.....	59
Figura 4.50 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo E posição 2 e gás natural.	59
Figura 4.51 - Conjunto dos pontos médios obtidos nos dois ensaios configuração venturi protótipo E posições 1 e 2 e gás natural.....	60
Figura 4.52 - Fotografias do ventilador da chaminé venturi, à esquerda parcialmente tapada com fita de alumínio e à direita completamente livre.....	61
Figura 4.53 - Aspeto final do topo do protótipo C.....	61
Figura 5.1 - A- Fotografia da instalação de ar comprimido; B- Fotografia do aspeto final do esquentador com a configuração atual; C- Fotografia do tubo de poliuretano colocado no compartimento de insuflação de ar da chaminé.	64
Figura 5.2 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com configuração venturi e injeção de ar comprimido tendo como combustível gás natural.	65
Figura 5.3 - Fotografias do injetor metálico de 4 mm; A e C vista lateral B- vista de cima.	67
Figura 5.4-Fotografia da fixação do injetor na chaminé standard.	68
Figura 5.5 - Fotografias do esquentador com e sem tampa.	68
Figura 5.6- Resultados experimentais dos ensaios realizados com configuração standard com injeção de ar comprimido (injetor 4 mm) e tendo como combustível gás natural..	70
Figura 5.7- A- Fotografia do injetor de 2 mm; B- Fotografia do injetor de 2mm acoplado ao injetor de 4 mm; C-Aspeto da montagem do injetor na chaminé standard.....	72
Figura 5.8 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com configuração standard com injeção de ar comprimido (injetor 2 mm) e tendo como combustível gás natural..	73
Figura 5.9 - Conjunto dos melhores resultados experimentais obtidos para as diversas configurações em que foi utilizada a injeção de ar comprimido.	76
Figura 5.10 - Conjunto dos melhores resultados experimentais obtidos para as diversas configurações tendo como combustível gás natural.	77
Figura 5.11 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com azoto e ar comprimido ,injetor de 2 mm com pressão relativa de injeção de 0,6 bar.	79
Figura 5.12 - Figura explicativa do cálculo do arrasto de ar.	81

Figura 5.13 – A- Fotografia da sonda em T; B- Fotografia da sonda num dos pontos de medição do ensaio de transbordo; C- Pontos de medição de transbordo.....	83
Figura 5.14 - Fotografia do esquentador com a instalação de uma conduta que induz uma perda de carga correspondente a 4 metros.	83
Figura 5.15 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com injeção de ar (injetor 4mm) e 4 metros de perda de carga equivalente.....	85
Figura 5.16 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com injeção de ar (injetor 2mm) e 4 metros de perda de carga equivalente.....	87
Figura 5.17 - Imagem e características funcionais de uma bomba de membrana excêntrica (Schwarzer, 2017).....	89
Figura 5.18 - Imagem e características funcionais de uma bomba de diafragma oscilante (Schwarzer, 2017).....	90
Figura 5.19 - Imagem e caracteritíscas funcionais de uma bomba linear (Schwarzer, 2017).	90
Figura B.1 - Figura ilustrativa da instalação utilizada para a medição de caudais (adaptado Pimenta, 2007).	103

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração standard e gás natural.....	17
Tabela 4.2 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração standard e propano.	19
Tabela 4.3- Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração standard e butano.	21
Tabela 4.4 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 143 V e butano.	26
Tabela 4.5 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 230 V e butano.	26
Tabela 4.6 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 143 V e propano.	28
Tabela 4.7 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 230V e propano.	28
Tabela 4.8 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 143 V e gás natural.....	30
Tabela 4.9 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 230V e gás natural.....	30
Tabela 4.10 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo B, gás natural e abertura máxima da válvula borboleta.	39
Tabela 4.11 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo B, gás natural e abertura intermédia da válvula borboleta.....	41
Tabela 4.12 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo B, gás natural e abertura mínima da válvula borboleta.....	43
Tabela 4.13 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo B abertura máxima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 85 V e gás natural.	47
Tabela 4.14 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo B abertura mínima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 75 V e gás natural.	49

Tabela 4.15 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo E posição 1 e gás natural.....	56
Tabela 4.16 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo E posição 2 e gás natural.....	58
Tabela 5.1 - Parâmetros médios medidos pelos analisadores dos diversos gases nos ensaios da chaminé INEGI e standard com injeção de ar injetor de 2 mm.	78
Tabela 5.2 - Caudais de ar comprimido e azoto medidos para os diversos injetores e pressões de injeção ensaiadas.	80
Tabela 5.3 - Valores médios do caudal de ar arrastado pelas chaminés INEGI e standard.	82
Tabela 5.4 - Caudal de ar arrastado pelas diversas configurações com injeção de ar. ...	82
Tabela A.1 - Coeficientes de dióxido de carbono máximos definidos pela norma para os diferentes combustíveis.....	101
Tabela C.1 - Valor médio, desvio padrão e erro aleatório dos resultados registados para a pressão relativa no queimador de 2,0 cmH ₂ O.....	106
Tabela C.2 - Valor médio, desvio padrão e erro aleatório dos resultados registados para a pressão relativa no queimador de 4,2 cmH ₂ O.....	106
Tabela C.3 - Valores das incertezas globais associados aos resultados registados para a pressão relativa de 2,0 e 4,2 cmH ₂ O.	106
Tabela C.4 – Valores obtidos para a incerteza global e relativa de cada um dos pontos.	107

1-Introdução

O desenvolvimento natural registado ao longo do tempo permitiu a melhoria do nível de vida das populações e o conseqüente incremento das suas necessidades a nível alimentar, habitacional e, consecutivamente, energético. Por sua vez, o aumento das necessidades energéticas leva ao aumento do consumo de combustíveis fósseis destinados à produção de eletricidade e energia térmica e de energia térmica.

Os esquentadores, que consomem no seu funcionamento combustíveis de origem fóssil, desempenham diversas funções quer a nível habitacional, uma vez que possibilitam o abastecimento rápido de água quente de forma a suprir as necessidades diárias de higiene e saneamento das populações, quer a nível fabril, podendo ser usados para produção de energia térmica destinada ao processo produtivo. O mercado destes aparelhos tem vindo a crescer ao longo do tempo e é extremamente competitivo em países do norte da Europa, no Canadá, na Rússia e nos Estados Unidos da América onde a sua utilização destes equipamentos é recorrente e a informação pública disponível sobre o tema é escassa (Waide e Munro, 2013).

O primeiro equipamento para aquecimento instantâneo de águas surge em 1868, para uso doméstico, tendo sido inventado por Benjamin Waddy Maugh. Esta invenção, conhecida por Geyser, estava vinculada à utilização na banheira. Para além desta limitação, a invenção de Maugh apresentava um risco elevado para os utilizadores uma vez que era desprovida de um sistema coletor de gases de combustão. Algum tempo depois, em 1889, foi inventado por Edwin Rudd, um engenheiro mecânico norueguês, o primeiro equipamento automático que possibilitava o armazenamento de água (termoacumulador). Este aparelho já permitia a disponibilização de água quente para qualquer ponto de uma rede doméstica de acordo com uma dada solicitação. Em 1890, a empresa Junkers apresenta a patente do seu primeiro equipamento, um aquecedor de líquidos, denominado de calorímetro. O calorímetro constituía um aparelho muito semelhante ao esquentador de Benjamin Maughan, uma vez que disponibilizava água quente num único local. No entanto, o aparelho patenteado pela Junkers já apresentava uma chaminé responsável pela remoção dos gases de combustão para o exterior da habitação (Rodrigues, 2012).

Este trabalho focar-se-á no estudo de um dos componentes do esquentador, nomeadamente no desempenho laboratorial de uma chaminé de indução, componente que apresenta um grau de influência muito grande no comportamento térmico e na higiene da combustão do aparelho.

1.1-Enquadramento do projeto e motivação.

Ao longo de uma parceria de longa duração entre o INEGI e a BOSCH realizaram-se diversos projetos de inovação no desenvolvimento de esquentadores domésticos. Num desses projetos foi requisitado pela BOSCH o desenvolvimento de uma chaminé ventilada para um esquentador para um protótipo de um esquentador de baixas emissões de óxidos de azoto. Como consequência da conceção de diversas soluções prévias apresentadas pelo INEGI desenvolveu-se uma chaminé de indução cujo conceito agora se estuda.

1.2-O INEGI.

O Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, INEGI, é um instituto de novas tecnologias, que tira partido da sua interface Universidade–Indústria para a realização de atividade de investigação, inovação e transferência de tecnologia orientada para o tecido industrial. Foi criado em 1986, no seio do que são hoje os Departamentos de Engenharia Mecânica (DEMec) e de Engenharia e Gestão Industrial (DEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). (INEGI, 2017)

Neste instituto, está inserido o laboratório de combustão, incorporado na unidade NOTEGE (Novas Tecnologias Energéticas e Gestão de Energia), a qual tem como principal objetivo a promoção e desenvolvimento de novas tecnologias no âmbito da energia.

1.3-Objetivos do projeto

O principal objetivo da dissertação é avaliar o desempenho laboratorial de uma chaminé de indução para um esquentador, a partir da comparação dos resultados dos ensaios realizados nesta chaminé com outras chaminés, tanto da autoria da Bosch, como anteriormente desenvolvidas e testadas no INEGI.

1.4-Metodologia seguida no projeto

A metodologia adaptada para a realização desta dissertação orienta-se pelos pontos seguidamente apresentados:

- Levantamento de informação acerca dos esquentadores domésticos como por exemplo, o seu princípio de funcionamento, componentes, normas de segurança e ambientais a que estão associados;
- Planeamento dos ensaios a realizar e preparação das instalações experimentais;
- Realização dos ensaios planeados e posterior tratamento de dados e análise dos mesmos.

1.5-Estrutura da dissertação

A presente dissertação divide-se em sete capítulos. Após este capítulo introdutório, no segundo capítulo é feita uma breve introdução aos esquentadores: o que são, que tipos existem, quais os seus principais componentes. O terceiro capítulo aborda a instalação experimental utilizada para a concretização dos testes, assim como o procedimento experimental adotado. No quarto capítulo são apresentadas as diferentes chaminés testadas e os resultados obtidos a partir dos ensaios das mesmas, assim como algumas alterações

morfológicas realizadas à chaminé que constitui o cerne desta dissertação. O quinto capítulo incide sobre a alternativa encontrada para a chaminé de indução que foi o ponto de partida deste estudo. A dissertação é finalizada com uma série de ilações retiradas da sua realização, com algumas propostas de trabalhos futuros e até possíveis dissertações que podem surgir como consequência do trabalho realizado.

2-Enquadramento bibliográfico

2.1-Esquentadores

Os sistemas domésticos de produção de água quente podem ser classificados de acordo com duas categorias, os de armazenamento de água aquecida e os de produção de água quente instantânea. Os esquentadores inserem-se nesta última categoria uma vez que apresentam um funcionamento intermitente dependente das necessidades do utilizador. Estes equipamentos podem ser classificados de diversas formas, sendo os principais critérios a capacidade do esquentador e o tipo de exaustão.

Em termos de linguagem técnica a capacidade de um esquentador refere-se ao volume de água que num minuto este equipamento pode aquecer de forma a produzir um diferencial de temperatura de 25°C. Por exemplo, um esquentador de 11 litros permite aquecer, por minuto este volume de água com um diferencial de temperatura de 25 ° C entre a entrada e a saída.

O tipo de exaustão refere-se ao modo como é realizado o escape dos gases de combustão. De acordo com este critério, os esquentadores podem apresentar exaustão: natural, ventilada e estanque.

Os esquentadores de exaustão natural, os mais baratos e antigos, possuem uma gama mais completa de produtos sendo utilizados recorrentemente quando não existem dúvidas acerca da capacidade de evacuação dos gases. Existe apenas um requerimento na instalação deste tipo de esquentadores, a conduta de escape dos gases de combustão deve ter um troço vertical com um comprimento mínimo de 30 centímetros de forma a garantir uma melhor exaustão. Os esquentadores deste tipo que se encontram no mercado apresentam capacidades que variam entre os 5 e os 18 litros/min (para o já referido $\Delta T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Quando existem dúvidas acerca do cumprimento dos requisitos necessários para a instalação de um esquentador de exaustão natural, nomeadamente das condições de evacuação dos fumos, do comprimento mínimo referido anteriormente ou perdas de carga excessivas no circuito de exaustão posterior ao esquentador, devido às curvas ou troços com comprimentos muito elevados, dever-se-á recorrer a esquentadores ventilados. Estes esquentadores são equipados com um ventilador que é responsável por forçar a saída dos gases de combustão fornecendo energia ao escoamento de forma a permitir que este vença as perdas de carga existentes com maior facilidade. A gama disponível no mercado deste tipo de esquentadores é mais reduzida que a do tipo anterior, variando entre os 11 e 17 litros/min.

Existem ainda outro tipo de esquentadores, os de exaustão estanque e os de queima de pré-mistura. Os esquentadores de exaustão estanque são adequados para instalações em locais com condições de exaustão deficientes ou más condições de admissão de ar. Apresentam a si associados uma câmara de combustão estanque, não sendo necessário utilizar o ar interior da divisão onde o esquentador se encontra instalado. Incorporam também um ventilador que força a saída dos gases de combustão, sendo a admissão de ar efetuada a partir do exterior do edifício, através de condutas independentes. A gama de capacidades deste tipo de esquentadores varia entre os 11 e os 27 litros/min. Já os esquentadores de pré-mistura para além de também serem equipados com um ventilador, responsável por insuflar o ar de combustão, possuem um queimador poroso que tem como vantagem permitir uma melhor homogeneização da mistura ar combustível do que o queimador tradicional, o que resulta em menores emissões de óxidos de azoto. A Figura 2.1 apresenta uma fotografia de um esquentador deste tipo (Catálogo Vulcano, 2010).

2.2-Componentes de um esquentador tradicional

O princípio de funcionamento de um esquentador é bastante simples, tem por base a transferência de calor entre os produtos de combustão, resultantes da queima de um determinado combustível gasoso (propano, butano e gás natural), e a água que se pretende aquecer. Para se compreender melhor o funcionamento deste aparelho é necessário conhecer os seus componentes e as suas respetivas funções. Grande parte dos esquentadores comercializados tem uma constituição muito semelhante, apresentando quatro componentes essenciais. A Figura 2.1 apresenta um esquentador em corte.



Figura 2.1 - Vista em corte de um esquentador.

i) Queimador

O queimador é o componente onde ocorre a mistura do ar primário com combustível e se dá a reação de combustão. Este componente apresenta um conjunto de injetores metálicos, que têm como função controlar a quantidade de combustível introduzido. O diâmetro destes injetores varia de acordo com o combustível a ser injetado. Localizadas a seguir aos injetores encontram-se as flautas, que constituem um conjunto de tubeiras de forma convergente/divergente. Cada uma das flautas recebe o combustível proveniente do injetor que lhe está adjacente, assim como ar primário que é arrastado para o seu interior pelo efeito venturi. O conjunto das flautas pode ser montado de forma perpendicular ou paralela à parte frontal do esquentador. No interior das flautas verifica-se então a mistura entre o combustível gasoso e o ar primário. A mistura é finalizada no difusor, é enviada para a cabeça da flauta, e finalmente inicia-se a queima da mesma. A Figura 2.2 apresenta a imagem de um queimador tradicional enquanto a Figura 2.3 apresenta uma flauta ou tubeira.



Figura 2.2 - Fotografia de um queimador tradicional visto de cima.

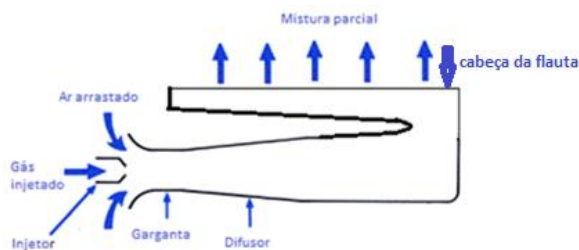


Figura 2.3 - Vista de lado de uma flauta do queimador.

ii) Câmara de combustão

A câmara de combustão, também denominada fornalha, fica localizada acima do queimador e é onde se desenvolve a queima do combustível. Neste componente é adicionado ar secundário, completando-se a queima do combustível com grande excesso de ar. A câmara de combustão é constituída por quatro paredes em cobre (material com elevada condutibilidade térmica) formando uma geometria retangular. No lado exterior destas paredes existe uma conduta de água em forma de helicoidal ascendente que tem por objetivos arrefecer as paredes da câmara de combustão para efetuar o primeiro aquecimento da água e de reduzir a temperaturas dos gases no interior da fornalha atuando no sentido de se diminuïrem as condições possíveis de formação de monóxido de azoto (Pinho, 1998). A Figura 2.4 apresenta uma fotografia de uma câmara de combustão, localizada imediatamente abaixo do permutador de calor.



Figura 2.4 - Fotografia da câmara de combustão de um esquentador tradicional.

iii) Permutador de calor

O permutador de calor é o componente do esquentador onde circula a água a ser aquecida. Trata-se de um permutador compacto, constituído vulgarmente por quatro tubos no interior dos quais circula água a ser aquecida. A compactação do permutador é justificada pela necessidade de uma grande área de transferência de calor por unidade de volume. De forma a maximizar a transferência de calor são colocadas, numa só camada da superfície exterior, alhetas planas contínuas por onde escoam os gases de combustão em escoamento cruzado. À semelhança da camara de combustão a constituição do permutador é geralmente em cobre podendo ou não conter estanho, resultante do processo de soldadura. A Figura 2.5 apresenta uma fotografia de um permutador de calor.



Figura 2.5 - Fotografia de um permutador de calor alhetado.

iv) Coletor de gases

Depois de passarem pelo permutador de calor, os gases de combustão são encaminhados para um coletor de gases (também denominado como chaminé) que os conduz para o sistema de extração existente.

Como já foi referido, a extração pode ser feita com recurso a convecção natural ou forçada. A Figura 2.6 apresenta uma imagem de um coletor com um ventilador associado.

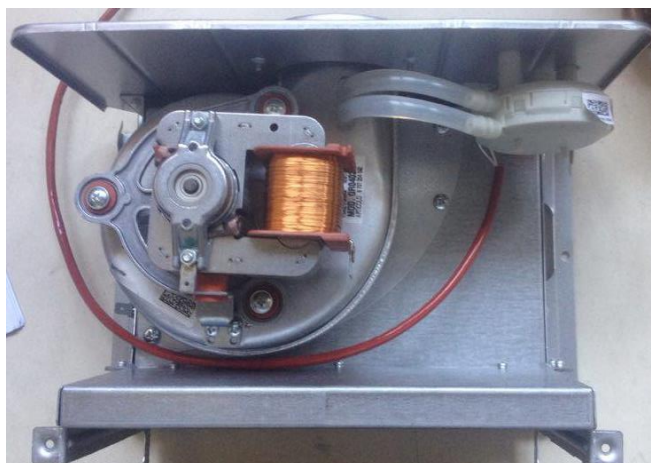


Figura 2.6 - Fotografia de um coletor de gases com um ventilador associado.

3-Instalação e procedimento experimental

3.1-A banca de ensaios instalada

Para fazer os ensaios necessários à elaboração da dissertação recorreu-se a uma instalação experimental existente no Laboratório de Combustão no INEGI, tendo apenas sido necessária uma breve pesquisa sobre os equipamentos existente e os seus princípios de funcionamento. A Figura 3.1 apresenta um esquema operacional da mesma:

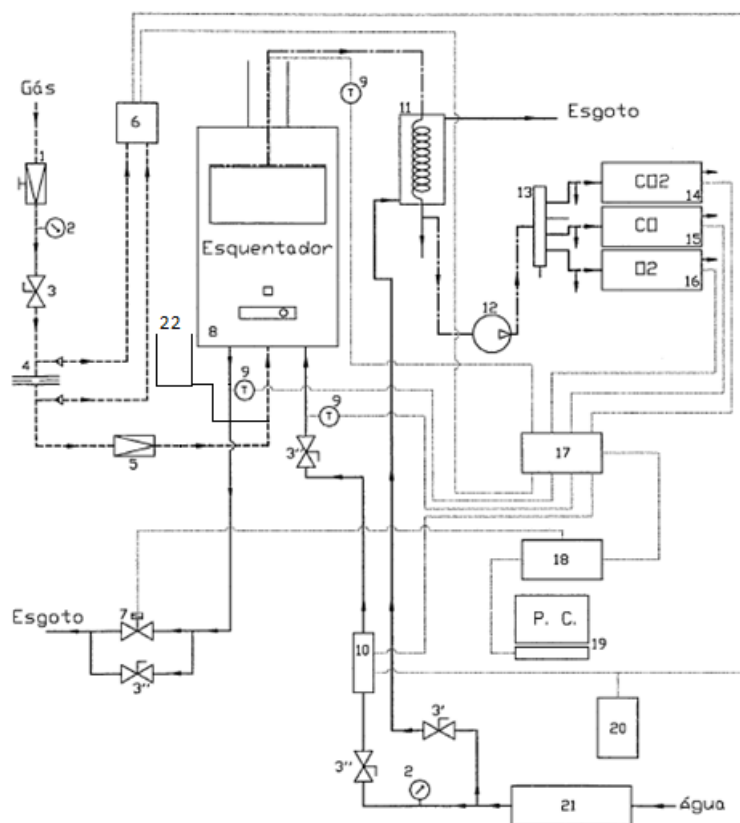


Figura 3.1 - Imagem ilustrativa da banca de ensaios (adaptado Pilão, 1997).

1- 1º Regulador de pressão variável	12- Bomba de vácuo
2- Manómetro	13- Coletor de gases
3- Válvulas de corte	14- Analisador de CO ₂
4 – Placa orifício	15- Analisador de CO
5- 2º Regulador de pressão	16- Analisador de O ₂
6-Transdutor diferencial de pressão para gás	17- Placa de dados externa
7- Eletroválvula	18- Placa de aquisição interna
8- Esquentador	19- Computador de aquisição de dados
9- Termopar	20- Fonte de tensão (0 a 30V)
10- Debitómetro de turbina	21- Grupo hidro-pneumático
11- Condensador	22- Manómetro em U (água)

i) Circuito de água

A água canalizada entra no circuito com recurso à abertura de uma válvula de corte. Seguidamente é medido o caudal de água em circulação assim como a sua temperatura de entrada, para tal são utilizados, respetivamente, um debímetro de turbina e um termopar tipo K. Existe ainda uma outra válvula de corte antes da entrada no esquentador, por razões de segurança.

Depois de receber calor no esquentador, é efetuada uma nova medição da temperatura da água à saída do mesmo antes de enviar a mesma para o esgoto. Existe ainda um circuito hidráulico complementar que tem como finalidade arrefecer e retirar a humidade da amostra de gases de combustão antes destes serem admitidos aos analisadores.

ii) Circuito de gás combustível

O primeiro componente deste circuito é uma válvula de corte localizada antes do regulador de pressão para efeitos de segurança. Após este acessório existe um regulador de pressão que permite controlar a pressão de alimentação a uma placa orifício previamente calibrada (equipamento de medição do caudal de gás), depois da placa orifício está localizado um segundo regulador de pressão que irá permitir o controlo do caudal de gás a alimentar ao esquentador. Essa regulação de caudal irá traduzir-se em diferentes pressões no queimador que serão lidas com o auxílio de um manómetro em U. No caso presente não se usou o medidor de caudal do gás combustível porque se recorreu a valores previamente definidos pela BOSCH que dão o valor do caudal de gás que está a ser consumido em função da pressão de alimentação no queimador.

iii) Circuito de gases de combustão

Os gases de combustão formados no esquentador são captados na saída da conduta por uma sonda e respetivo sistema de amostragem (concordante com a norma EN 26), associada a uma bomba de vácuo da marca KNF modelo N726FT.18 e em simultâneo é medida a temperatura dos mesmos com recurso a um termopar do tipo K. Depois de ser captada pela sonda, a amostra de gases é arrefecida e desumidificada, posteriormente é encaminhada a um coletor sendo depois enviada para os três analisadores de gases:

- Medidor infravermelho para CO₂ da marca ADC modelo MGA 3000;
- Medidor infravermelho para CO da marca SIGNAL modelo 7000FM;
- Medidor paramagnético para O₂ da marca Servomex modelo 570 A;

Os diversos dispositivos de medição (caudalímetros, termopares e analisadores) enviam um sinal elétrico em tensão, que representa o parâmetro a ser medido, a um programa de aquisição de dados que recebe e trata o sinal, sendo controlado por um computador pessoal. A leitura e conversão dos parâmetros a medir é feita por um programa em DASyLab, que permite o armazenamento dos dados em ficheiros ASCII.

As Figuras 3.2 A e B mostram imagens do sistema de desumidificação da amostra e do sistema de aquisição de dados, respectivamente.

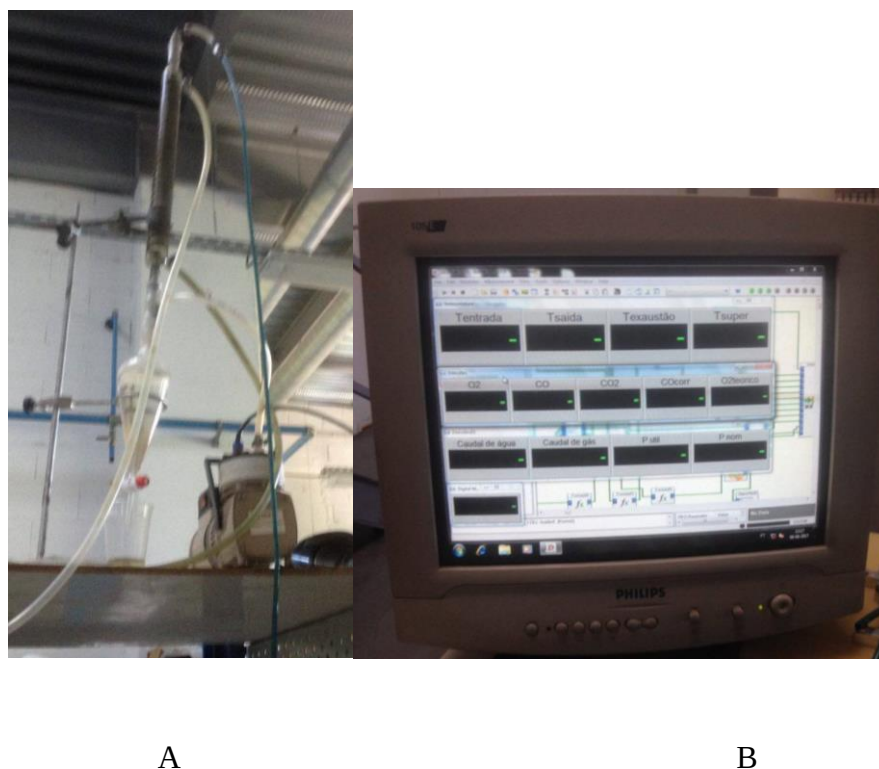


Figura 3.2 - A-Imagem do sistema de desumidificação da amostra; B-Imagem do sistema de aquisição de dados

3.2-Procedimento experimental adotado

O primeiro passo no procedimento experimental consiste em ligar o computador, as placas de rede que fazem a conexão entre os analisadores e os equipamentos de medição dos caudais de gás e de água ao computador e posteriormente o programa responsável pelo controlo dos parâmetros de ensaio assim como pelo armazenamento dos dados de amostragem. Depois ativa-se o caudalímetro, a bomba de vácuo e os analisadores, sendo também necessário regular o caudal de azoto que o analisador de CO necessita para funcionar corretamente. O próximo passo está relacionado com seleção do caudal de água a aquecer. No caso da presente dissertação, como apenas foi utilizado um esquentador de onze litros por minuto, o caudal de água foi sempre constante (11 L/min), sendo regulado numa válvula de débito de caudal localizada na parte frontal do esquentador e visualizado no monitor do computador com recurso à criação de um ficheiro no sistema de tratamento

de dados para esse efeito. Seguidamente abre-se a válvula de corte do gás, pressiona-se o botão do faiscador do esquentador, que é responsável pela ignição da chama piloto e regula-se o caudal de gás com recurso a um manómetro de coluna de água, onde se lê a pressão do mesmo na admissão do queimador, até o esquentador entrar em funcionamento. Quando o esquentador estiver em funcionamento, regula-se a pressão do queimador que se pretende com recurso ao referido manómetro. Finalmente cria-se um ficheiro com o nome relativo à pressão e referente à alimentação do queimador e inicia-se o registo de dados. No final dos ensaios referentes a um dado dia de trabalho efetua-se nova calibração dos medidores de forma a que sejam efetuadas as devidas correções no momento do tratamento de dados.

Foi ainda realizada uma estimativa da incerteza global associada aos resultados dos ensaios realizados, esta estimativa e a forma como foi calculada é apresentada no Anexo C.

4-O esquentador em teste

O esquentador em teste corresponde a um protótipo desenvolvido pela marca BOSCH com uma capacidade de 11 litros. A Figura 4.1 apresenta uma imagem do esquentador acima referido.



Figura 4.1 - Fotografia do esquentador Bosch.

De forma a ser possível aferir acerca do funcionamento do conceito de chaminé, que constitui o cerne desta dissertação, é necessário existirem termos com os quais seja possível comparar a solução agora proposta. Foram então ensaiadas, para o mesmo esquentador, duas chaminés com métodos de exaustão diferentes, uma que funciona de acordo com o princípio da convecção natural e uma outra que possui ventilação forçada. Estas duas chaminés foram anteriormente desenvolvidas para este esquentador, a primeira pela BOSCH e a segunda pelo INEGI. De referir que os ensaios realizados a cada pressão do

queimador tiveram todos a duração de oito minutos, de forma a existir a certeza de que o estado estacionário é alcançado, tendo sido utilizados para cálculos os dados recolhidos nos últimos três dos oito minutos.

Em relação aos resultados que se pretendem obter, para a gama de operação do esquentador e emissões, o objetivo seria que o esquentador pudesse operar numa gama de 2,0 a 17,7 (no mínimo) cmH₂O e apresentasse emissões inferiores a 250 ppm (v/v) em toda a gama.

Outra nota importante antes de se iniciar a apresentação de resultados é referir que os mesmos são apresentados em termos das emissões de CO corrigido sendo que a explicação de como se efetua a correção está localizada no Anexo A.

4.1-Chaminé em convecção natural

Os primeiros ensaios foram realizados numa chaminé que funciona tendo como princípio a convecção natural, baseia-se no facto de que os gases quentes de combustão apresentam uma menor densidade que o ar e por isso ascendem facilmente pela chaminé. Estes ensaios foram importantes, porque permitiram perceber o funcionamento do esquentador, dos diversos aparelhos de medição, dos mecanismos de segurança, entre outros conceitos cujo conhecimento se revelou essencial no decorrer dos ensaios experimentais. Nas Figuras 4.2 e 4.3 é possível observar o aspeto desta chaminé e o aspeto da mesma associada ao esquentador.

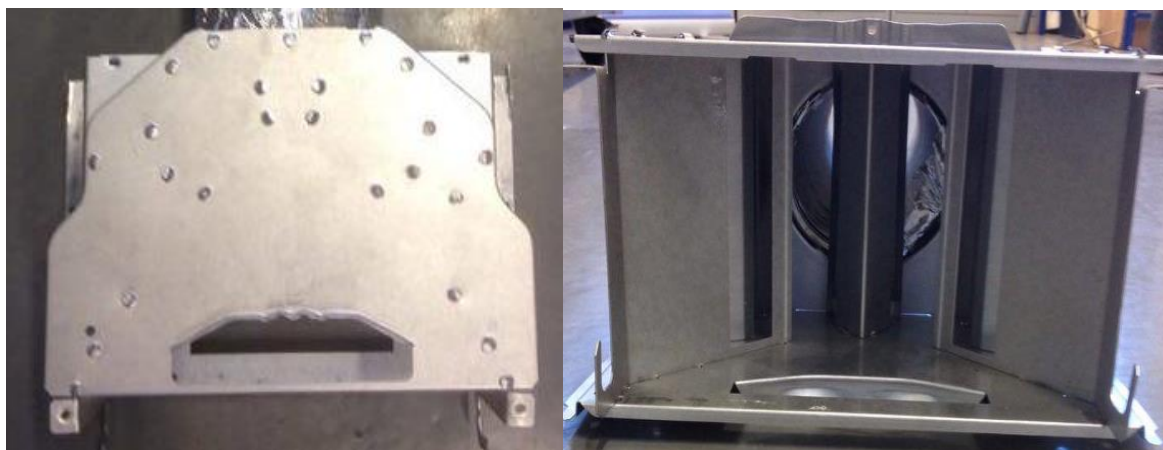


Figura 4.2 - Imagens da chaminé standard, à esquerda vista de frente e à direita vista interior da mesma.



Figura 4.3 - Aspeto da chaminé standard associada ao esquentador.

4.1.1-Apresentação de resultados dos ensaios

Foram realizados ensaios utilizando três combustíveis comerciais, propano, butano e gás natural. Os resultados dos ensaios realizados são apresentados seguidamente.

i) Gás Natural

A escolha dos pontos de ensaio teve como premissa o varrimento da gama de operação destes equipamentos, bem como a definição clara da sua curva de funcionamento. As pressões do queimador e respetivas potências nominais ensaiadas são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração standard e gás natural.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
2,0	2,0	8,1
3,0	2,9	9,7
4,2	4,1	11,6
5,8	5,7	13,8
7,8	7,6	16,4
10,0	9,8	18,9
12,7	12,5	21,5

14,7	14,4	23,0
15,7	15,4	23,6
17,0	16,7	24,4
17,7	17,4	24,7

Foram realizados dois ensaios para cada pressão do queimador de forma a ser possível efetuar uma avaliação da reprodutibilidade dos mesmos. Os resultados dos ensaios realizados são apresentados na Figura 4.4.

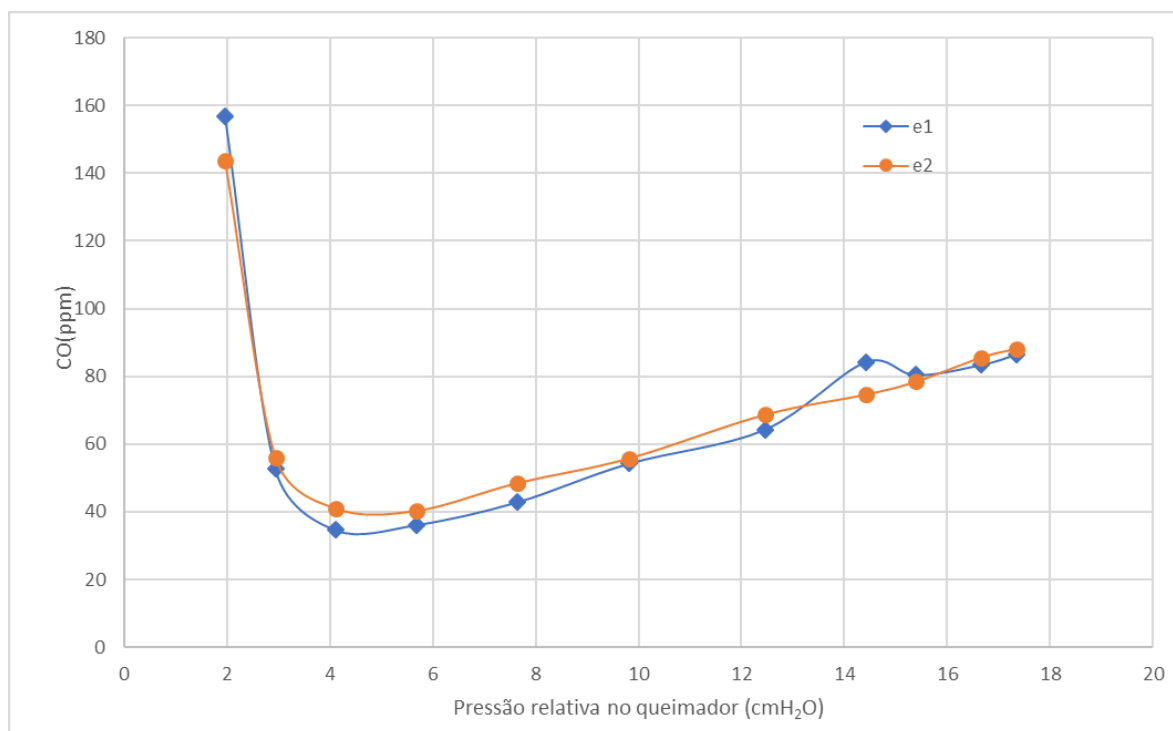


Figura 4.4 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração standard e gás natural.

Analisando as curvas da Figura 4.4 verifica-se que os resultados dos ensaios estão bastante próximos sendo a diferença maior de 10 ppm (v/v), o que é pouco relevante. Seguidamente com uma média dos dois ensaios efetuou-se um gráfico que virá a ser utilizado para comparações posteriores, Figura 4.5.

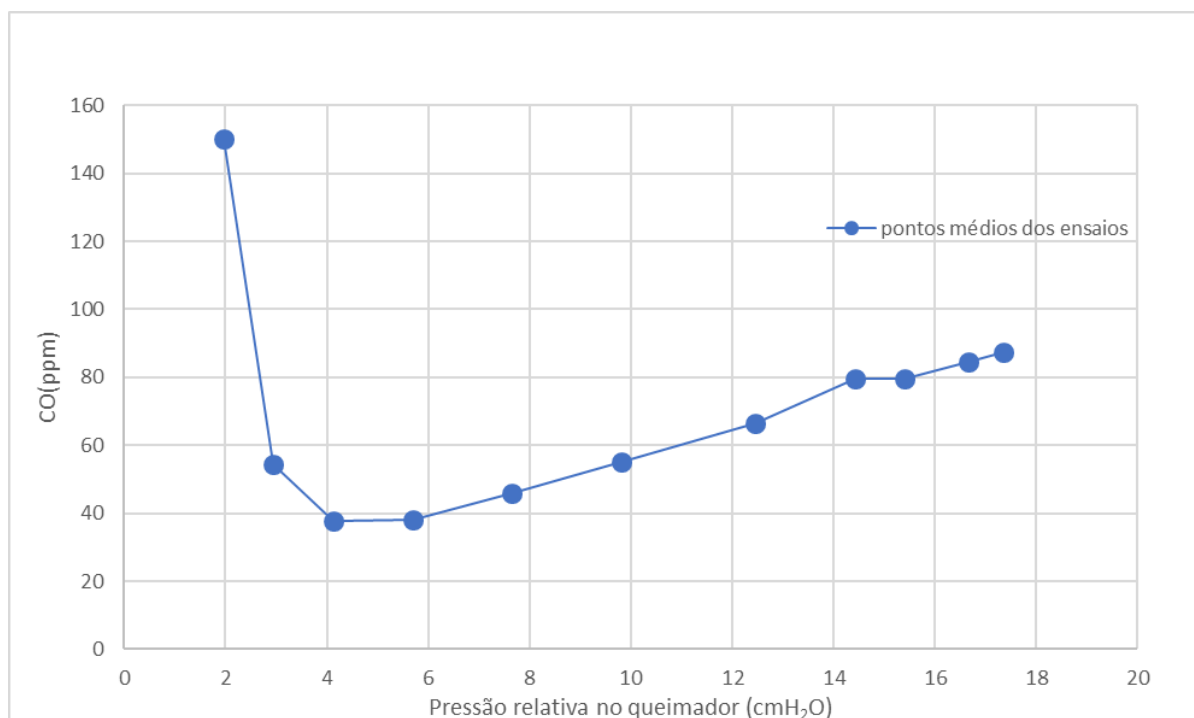


Figura 4.5 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração standard e gás natural.

De acordo com a Figura 4.5, verifica-se que a curva de funcionamento apresenta a forma de uma parábola. O teor de CO mais elevado (150 ppm(v/v)) encontra-se para o valor de pressão relativa do queimador mais baixa (2 cmH₂O) e o valor mais baixo (37 ppm (v/v)) ocorre para a pressão relativa de 4 cmH₂O.

ii) Propano

O procedimento para este combustível foi análogo ao do gás natural. Antes da realização do ensaio foi necessário proceder à troca do queimador, os queimadores utilizados para o gás natural e para o propano/butano são diferentes devido às diferentes características dos combustíveis. Outro fator que é bastante diferente nos ensaios realizados com gás natural e propano/butano são as pressões do queimador. A pressão no caso do butano e propano é superior à do gás natural, o que está relacionado com o índice de Wobbe dos gases (produto entre a densidade do combustível em relação ao ar e o poder calorífico). As pressões de queimador e respetivas potências nominais ensaiadas são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração standard e propano.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
5,3	5,2	8,2
7,3	7,2	9,4
9,4	9,2	10,6
13,7	13,4	13,0
18,0	17,7	15,2
22,5	22,1	17,3

31,0	30,4	20,6
35,3	34,6	22,0
40,6	40,0	23,5
42,6	41,8	23,9

Assim como no caso do gás natural foram realizados dois ensaios de forma a ser possível avaliar a reprodutibilidade entre ensaios. Os resultados dos dois ensaios são apresentados na Figura 4.6.

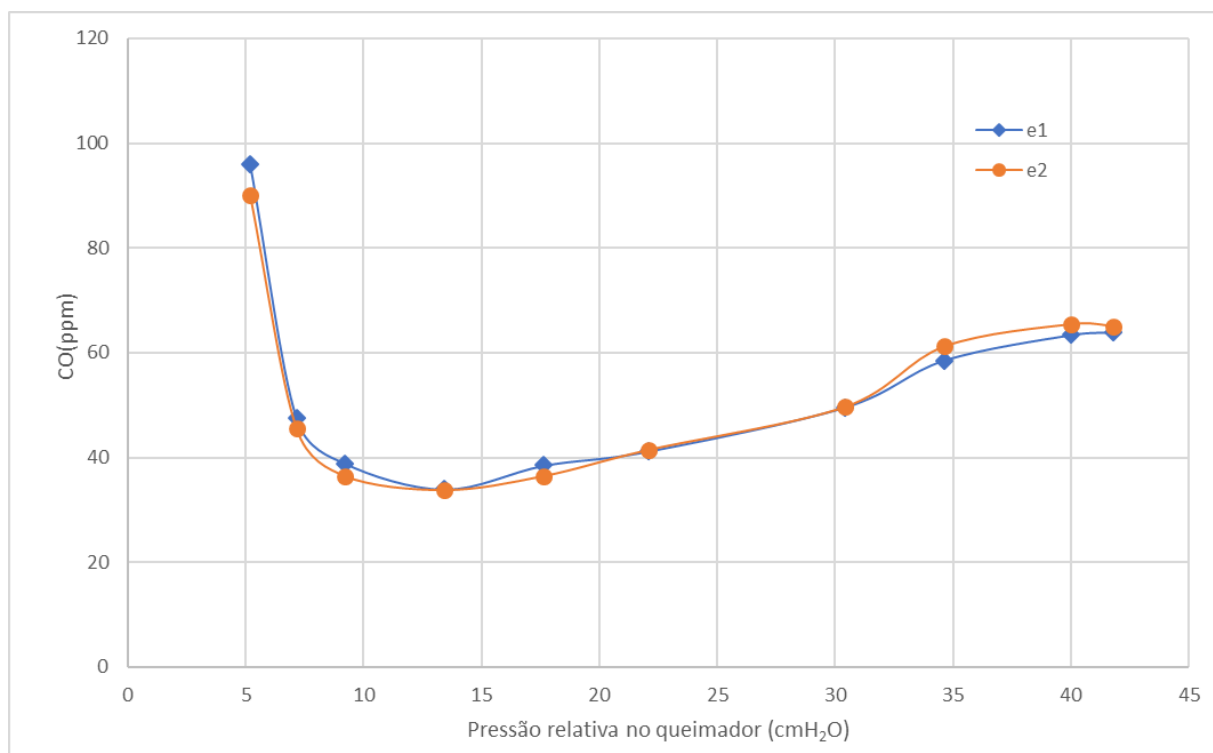


Figura 4.6 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração standard e propano.

Uma vez mais verifica-se que os ensaios apresentam uma boa reprodutibilidade entre si, não apresentando diferenças significativas. Seguiu-se a determinação da curva correspondente à média dos dois ensaios e que se apresenta na Figura 4.7.

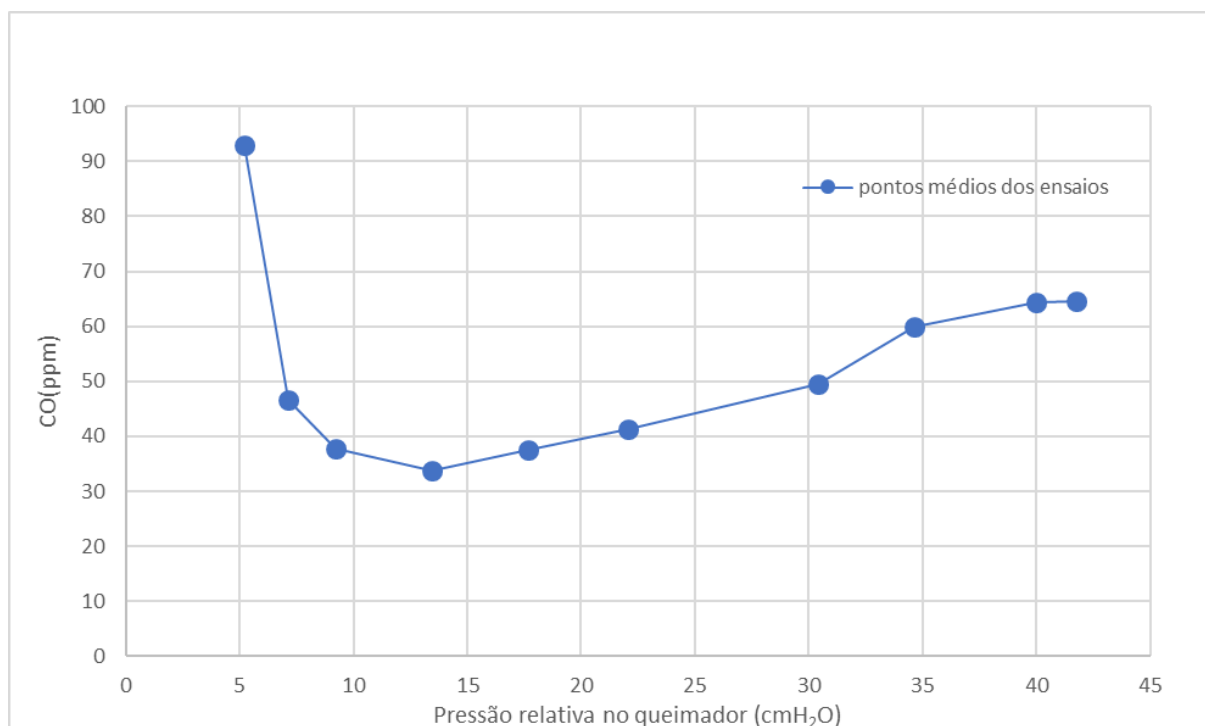


Figura 4.7 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração standard e propano.

Analisando o gráfico da figura anterior, à semelhança do que foi feito para o gás natural, verifica-se que o valor de concentração de CO corrigido mais elevado se encontra, uma vez mais, na pressão relativa mais baixa (5 cmH₂O) com um valor de 93 ppm (v/v), o valor de concentração mais baixo ocorre para 14,7 cmH₂O e tem um valor de 34 ppm (v/v).

iii) Butano

O ultimo gás testado nesta chaminé foi o butano. O conjunto de ensaios realizados com este combustível exigiu uma maior atenção e um maior controlo relativamente à pressão do queimador. O fornecimento do butano é feito na forma de botijas comerciais convencionais cuja pressão interior pode diminuir à medida que o gás vai sendo extraído, se a taxa de vaporização for muito elevada. Com efeito, uma taxa de vaporização elevada levará a um arrefecimento da botija e do butano nela contido, o que causará uma variação da pressão de alimentação do queimador ao longo do ensaio, a menos que se façam ajustamentos frequentes no redutor da pressão instalado à entrada da alimentação ao dito queimador. As pressões do queimador e respetivas potências nominais estão indicadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração standard e butano.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
4,0	3,9	8,2
7,0	6,9	10,6
10,0	9,8	12,8
13,6	13,3	15,3
15,6	15,3	16,5

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
18,5	18,1	18,2
22,5	22,1	20,3
26,5	26,0	22,0
30,6	30,0	23,5
32,0	31,4	23,9

Foram realizados, assim como dos combustíveis anteriores dois ensaios cujos resultados são introduzidos pela Figura 4.8.

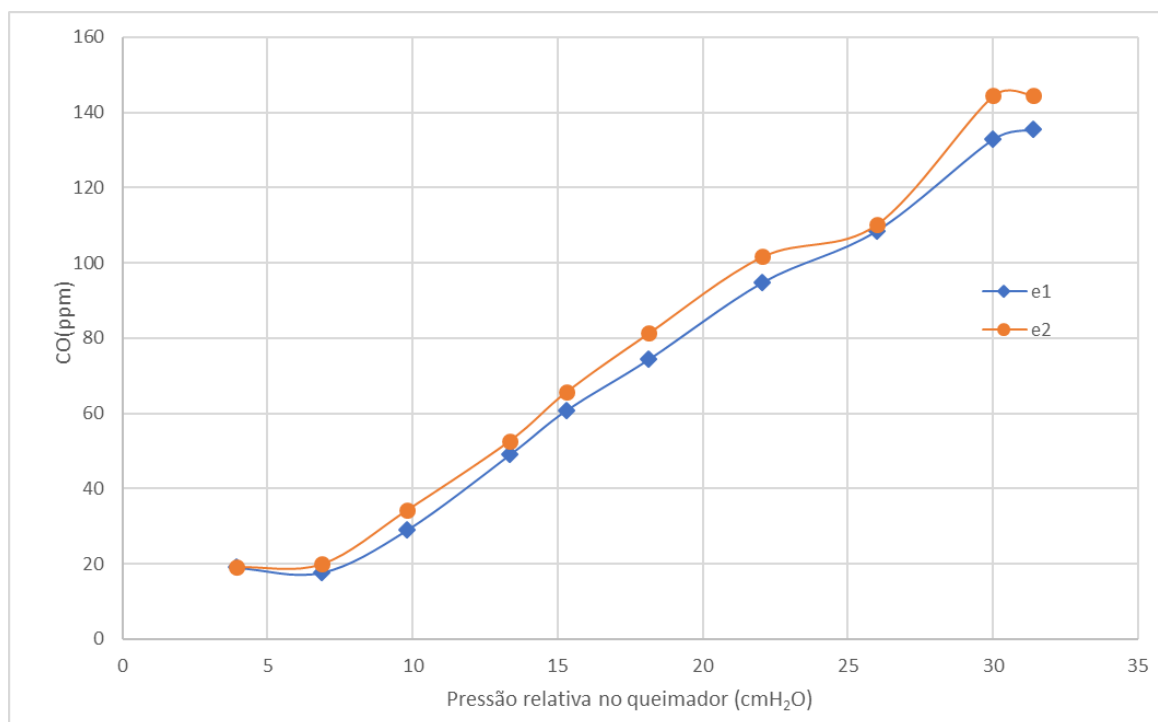


Figura 4.8 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração standard e butano.

Aplicando a mesma metodologia de tratamento de dados efetuada anteriormente verifica-se a existência de boa reprodutividade sendo que a diferença máxima verificada entre dois pontos é de 10 ppm(v/v). Na Figura 4.9 apresenta-se a curva média relativa a estes dois ensaios.

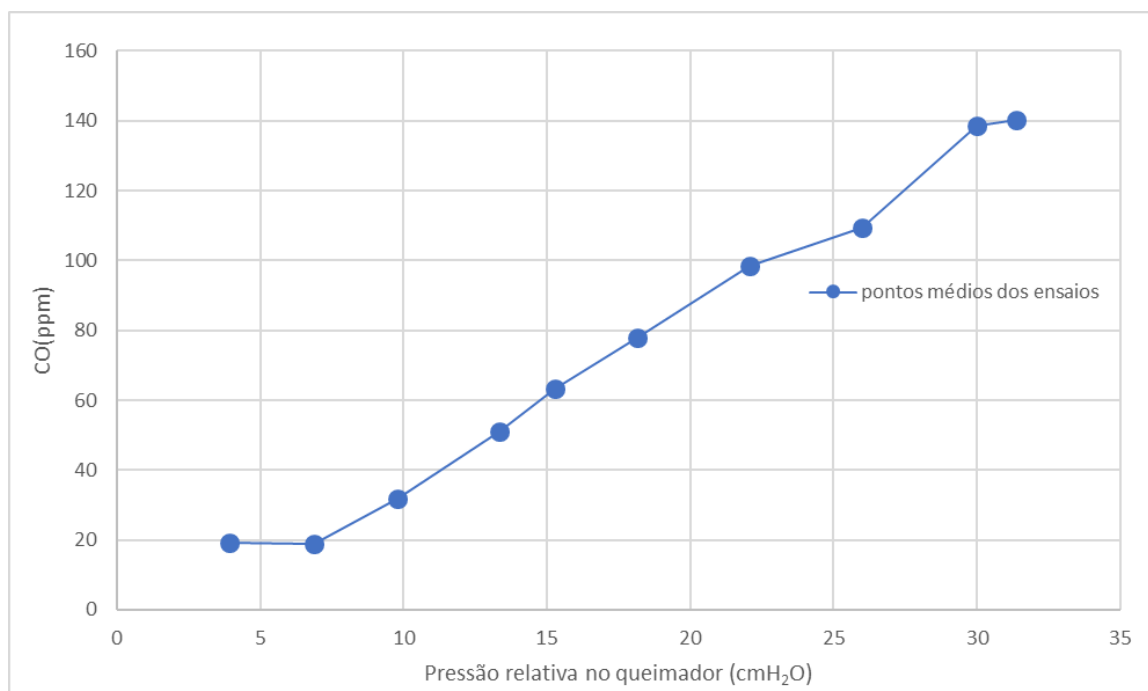


Figura 4.9 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração standard e butano.

Analisando a figura anterior constata-se, em contraste com os outros combustíveis, que o valor mais elevado em termos de concentração de CO corrigido se encontra no valor de pressão relativa do queimador mais elevado (32 cmH₂O) sendo tal concentração de 140 ppm (v/v). O valor de concentração de CO corrigido mais baixo é de 20 ppm (v/v) e ocorre para a pressão relativa mínima do queimador de 4 cmH₂O.

Para finalizar a análise a esta chaminé resta fazer uma comparação entre as emissões apresentadas pela mesma tendo em conta o combustível do esquentador. Esta comparação deve ser feita em relação à potência fornecida e não em relação à pressão do queimador, uma vez que, como foi visto anteriormente para diferentes gases, as pressões serão diferentes em virtude das diferenças existentes no índice de Wobbe. A Figura 4.10 permite aferir as diferenças existentes entre os três combustíveis:

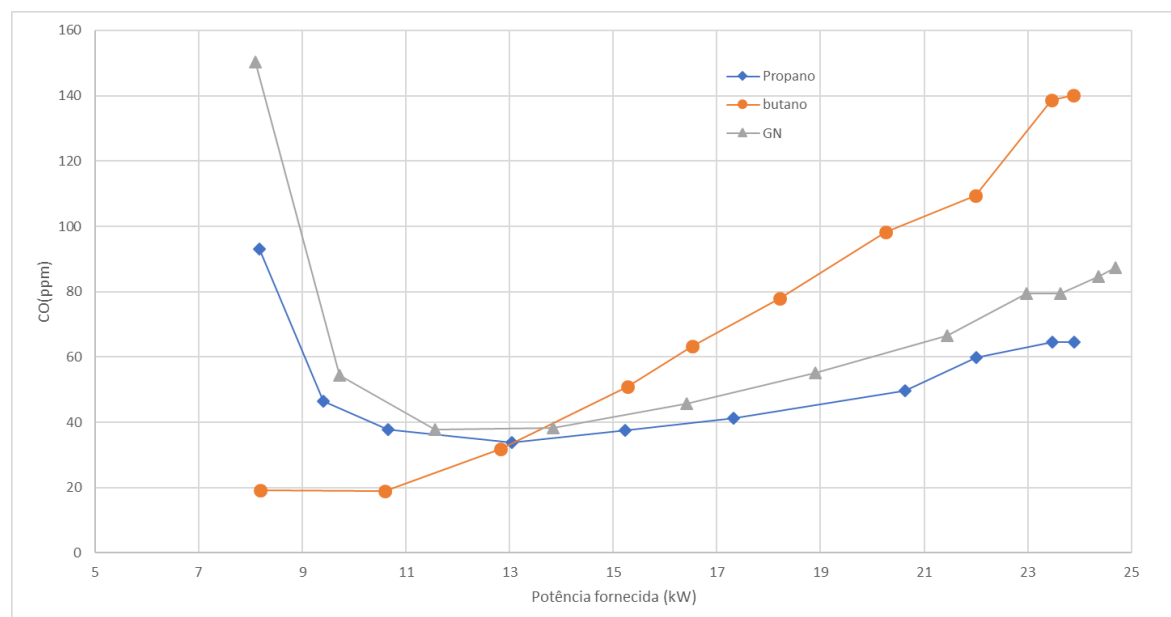


Figura 4.10 - Resultados obtidos para as emissões da chaminé standard, para os diferentes gases em função da potência fornecida.

Da análise da Figura 4.10 podem retirar-se as seguintes conclusões:

- O butano é o combustível que apresenta menores emissões nas potências mínimas (20 ppm (v/v)), sendo por outro lado o que apresenta maiores emissões nas potências mais elevadas (140 ppm (v/v));
- Em relação ao gás natural denota-se que é o combustível que apresenta emissões mais elevadas nas baixas potências (150 ppm (v/v)), enquanto nas altas potências apresenta valores intermédios aos dos outros dois gases;
- Analisando finalmente a curva relativa ao propano, conclui-se que este combustível é o mais estável dos três, em termos de emissões apresentando o menor diferencial (de 60 ppm (v/v)) entre o máximo e o mínimo. É ainda o combustível que apresenta menores emissões a potências nominais elevadas (65 ppm (v/v)).

4.2-Chaminé INEGI

A segunda chaminé a ser ensaiada foi a chaminé INEGI, assim denominada porque resultou de um trabalho, que antecedeu esta dissertação, durante o qual se desenvolveu uma chaminé que permitisse ter baixas emissões em toda a gama de funcionamento do esquentador respeitando todas as normas de segurança e higiene de combustão abordadas no enquadramento bibliográfico, sendo, porém, agora o aparelho equipado com um ventilador de exaustão dos gases queimados. Desenvolveu-se assim uma solução que tem por base uma chaminé que recorre a um ventilador para aspirar os gases de combustão. Foi necessário implementar uma solução em que o ventilador apresenta duas velocidades de funcionamento, de forma a que se pudesse garantir o funcionamento do esquentador em toda a gama de operação dentro dos limites legais. Como os ventiladores disponíveis no processo de desenvolvimento tecnológico eram apenas de uma velocidade, optou-se por alimentar o ventilador com duas tensões distintas, de modo a otimizar o funcionamento do esquentador e simular assim um futuro ventilador de duas velocidades alimentado sempre com o mesmo valor de tensão. Para baixas pressões do queimador usa-se uma tensão de

alimentação de 143 V, enquanto para altas pressões o ventilador é alimentado com 230 V. Com estas duas tensões, obtém-se um funcionamento do ventilador com duas velocidades, sendo que estas duas velocidades foram determinadas com recurso a ensaios experimentais. As Figuras 4.11 e 4.12 que se seguem mostram o aspeto desta chaminé assim como o do esquentador quando acoplado à mesma.

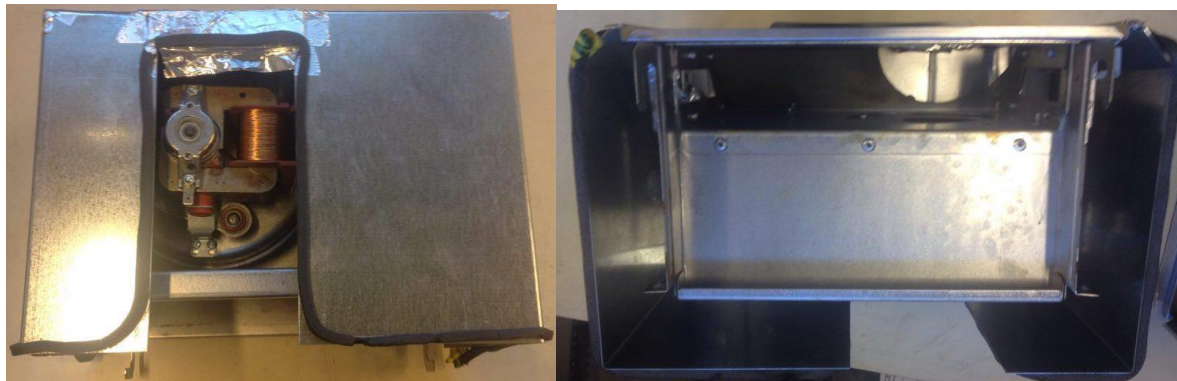


Figura 4.11 - Imagens da chaminé INEGI, à esquerda vista de frente e à direita vista interior da mesma.

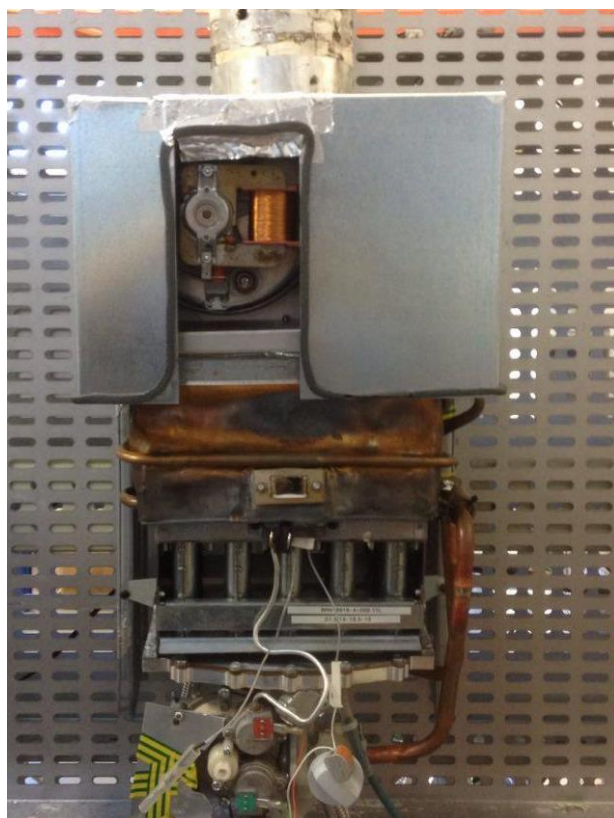


Figura 4.12 - Aspeto da chaminé INEGI acoplada ao esquentador.

4.2.1-Apresentação dos resultados dos ensaios

Os ensaios que foram realizados para esta chaminé decorreram em condições idênticas aos anteriormente realizados no caso da chaminé de convecção natural, diferindo apenas na ordem pela qual os ensaios foram realizados. Como foi referido anteriormente os ensaios com butano implicam garrafas de gás comercial e um queimador com uma morfologia diferente da do caso do gás natural. De forma a minimizar tempo perdido, quer com o

transporte das garrafas, quer com a troca de queimador efetuaram-se primeiro os ensaios com butano seguidos pelos do propano e finalizando com os do gás natural.

i) Butano

A chaminé em questão implica, como já foi referido, um ventilador que funciona a duas velocidades sendo a cada uma delas está associada uma gama de pressões do queimador distinta. Esta gama de pressões foi otimizada num trabalho realizado previamente. As Tabelas 4.4 e 4.5 que se seguem apresentam as pressões do queimador para cada uma das velocidades do ventilador:

Tabela 4.4 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 143 V e butano.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência nominal (kW)
4,0	3,9	8,2
5,5	5,4	9,4
7,0	6,9	10,6
8,5	8,3	11,7
10,0	9,8	12,8
11,8	11,6	14,1

Tabela 4.5 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 230 V e butano.

Pressão relativa no queimador (cm H ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência nominal (kW)
9,3	9,1	9,8
10,0	9,8	10,4
11,8	11,6	11,4
13,6	13,3	12,2
15,6	15,3	13,1
18,5	18,1	14,4
22,5	22,1	15,8
26,5	26,0	17,4
30,6	30,0	18,6
32,0	31,4	19,0

Com as pressões do queimador acima apresentadas foram realizados dois ensaios idênticos de forma a possibilitar uma análise da reprodutibilidade dos resultados obtidos. A Figura 4.13 que se segue apresenta os resultados dos dois ensaios realizados.

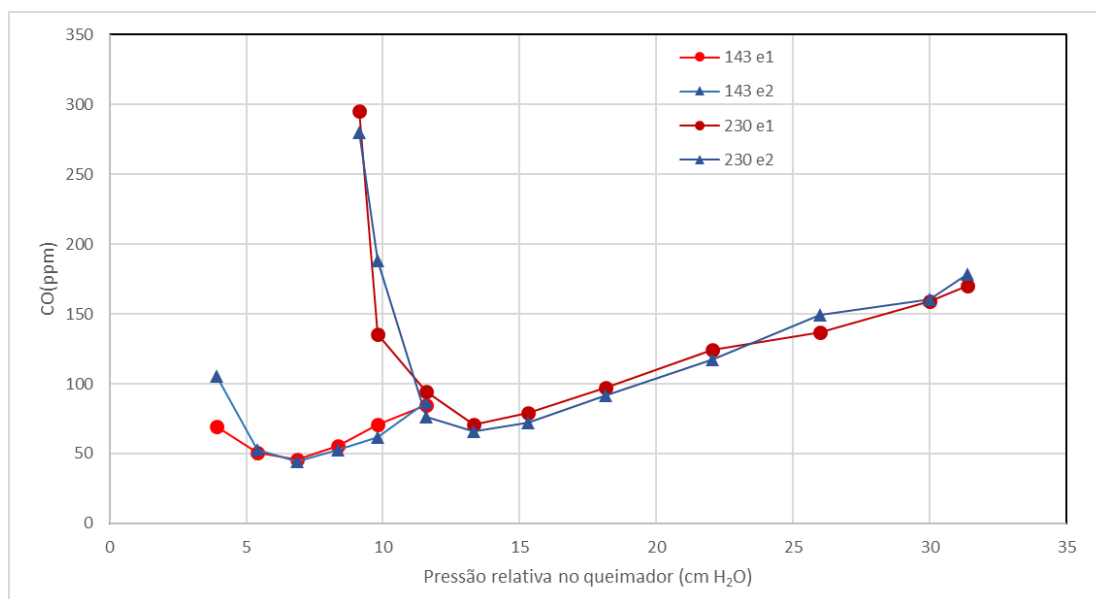


Figura 4.13 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração INEGI e butano.

Analisando a Figura 4.13 verifica-se que existe, na maioria dos pontos, uma boa reprodutibilidade relativamente aos ensaios realizados com butano. No entanto, deve destacar-se a existência de diferenças de cerca de 30 ppm no ponto de pressão 4 cmH₂O para a tensão de 143 V e, de cerca de 40 ppm na pressão 10 cmH₂O para a tensão de 230 V. A justificação para tais diferenças pode estar relacionada com a localização destes pontos na curva de emissões. Sabendo que a curva corresponde a uma parábola, qualquer desacerto da pressão do queimador, quer no início da mesma, quer no fim, pode levar a ligeiras discrepâncias nos valores medidos.

Com os resultados dos dois ensaios obtiveram-se os pontos representados na Figura 4.14.

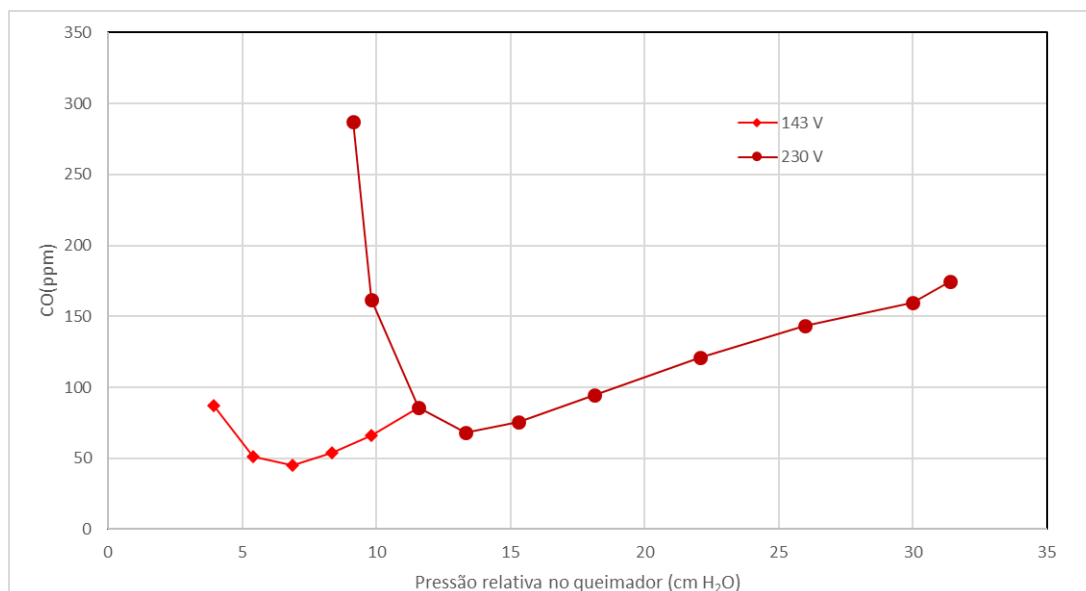


Figura 4.14 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração INEGI e butano.

Tal como se observa na Figura 4.14, obteve-se para a voltagem de 230 V e para a pressão relativa do queimador de 9,3 cmH₂O o valor de concentração de CO corrigido mais elevado do ensaio de 286 ppm (v/v). Relativamente à voltagem de 143 V o valor máximo obtido (97 ppm (v/v)) verificou-se para a pressão mínima relativa do queimador de 4,0 cmH₂O.

ii) Propano

Após a realização dos ensaios com butano apenas foi necessário trocar a fonte de combustível para realizar os mesmos ensaios com propano, usando, contudo, o mesmo queimador, já que se tratam de gases da mesma família. As Tabelas 4.6 e 4.7 seguintes contêm as pressões do queimador e respectivas potências fornecidas para quais os ensaios foram realizados:

Tabela 4.6 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 143 V e propano.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência nominal (kW)
5,3	5,2	8,2
6,3	6,2	8,8
7,3	7,2	9,4
9,4	9,2	10,6
13,7	13,4	13,0
15,0	14,7	13,7

Tabela 4.7 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 230V e propano.

Pressão relativa no queimador (cm H ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência nominal (kW)
13,7	13,4	13,0
15,0	14,7	13,7
18,0	17,7	15,2
22,5	22,1	17,3
25,0	24,5	18,4
31,0	30,4	20,6
35,3	34,6	22,0
40,8	40,0	23,5
42,6	41,8	23,9

Os resultados dos dois ensaios realizados com as pressões do queimador acima referidas estão representados na Figura 4.15.

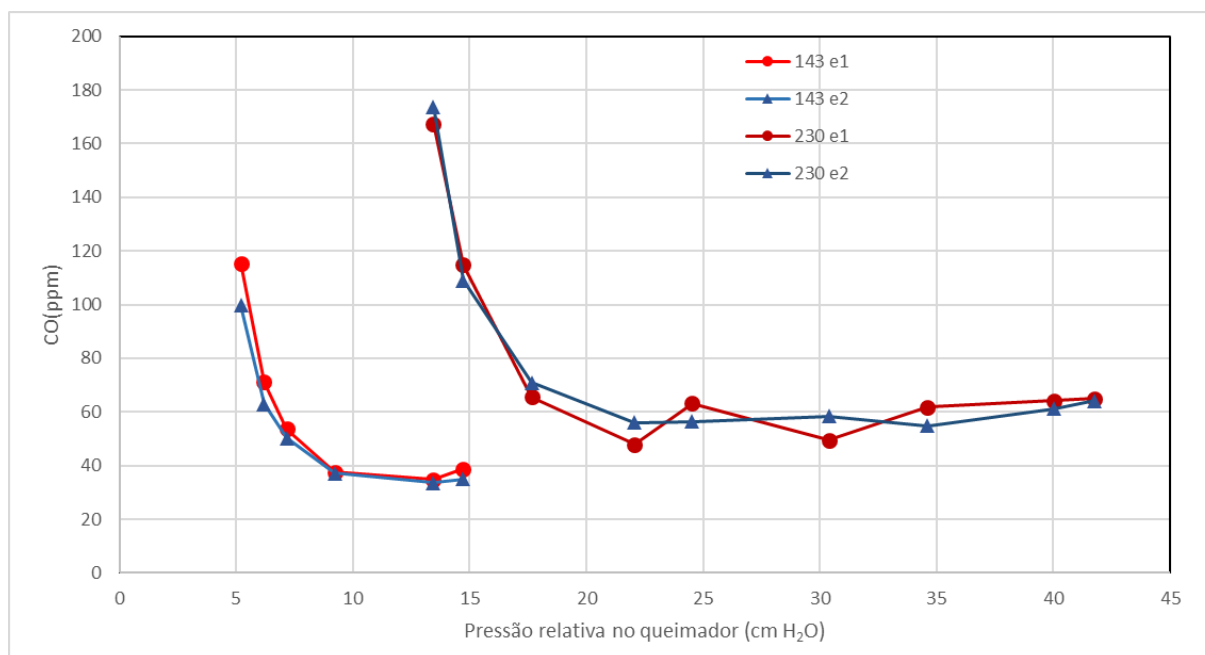


Figura 4.15 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração INEGI e propano.

Analisando as curvas da Figura 4.15 é visível que para 143 V as curvas são quase idênticas com a exceção do ponto de pressão 5,3 cmH₂O onde existe uma diferença nas emissões de 20 ppm (v/v), esta diferença é, no entanto, pouco relevante tendo em conta que ocorre numa zona em que qualquer desacerto na pressão do queimador pode conduzir a diferenças de emissões elevadas. Relativamente à curva com o ventilador a operar a 230 V, as diferenças, entre os pontos referentes às mesmas pressões, são na ordem dos 10 ppm(v/v) não sendo, por conseguinte, assinaláveis. Com os dois ensaios anteriores elaborou-se a curva média representada na Figura 4.16.

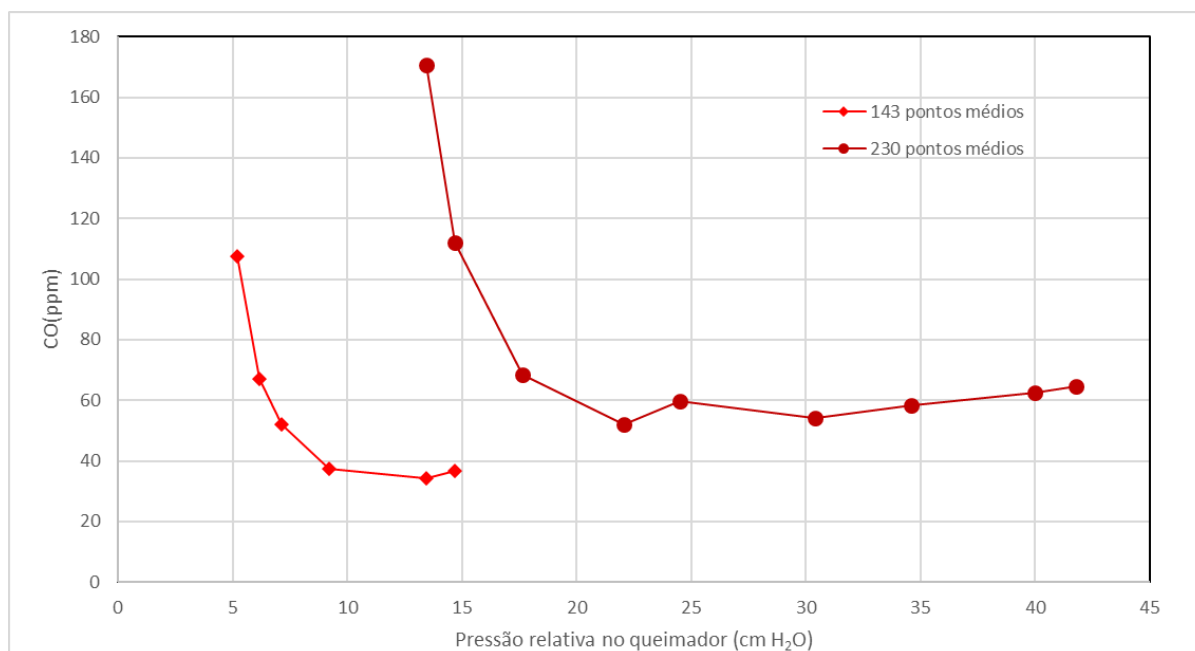


Figura 4.16 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração INEGI e propano.

Analisando o conjunto de pontos patente na Figura 4.16, verifica-se que o valor do teor de CO corrigido máximo de 172 ppm (v/v) ocorre para a voltagem mais elevada e para a

pressão relativa do queimador de 13,7 cmH₂O. Relativamente à tensão de 143 V denota-se a existência de um máximo de 108 ppm (v/v) para a pressão relativa do queimador de 5,3 cmH₂O e de um mínimo de 37 ppm (v/v) que corresponde também ao mínimo do ensaio.

iii) Gás natural

O último conjunto de ensaios foi realizado para o gás natural. Para tal foi necessário trocar o queimador, para além da fonte do combustível. As Tabelas 4.8 e 4.9 contêm as pressões do queimador e respetivas potências nominais para cada uma das tensões de alimentação do queimador, de lembrar que o motivo da diferença das pressões entre gás natural e os restantes está relacionada com o índice de Wobbe.

Tabela 4.8 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 143 V e gás natural.

Pressão relativa no queimador (cm H ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência nominal(kW)
2,0	2,0	8,1
3,0	2,9	9,7
4,2	4,1	11,6
5,8	5,7	13,8
7,8	7,6	16,4

Tabela 4.9 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração INEGI 230V e gás natural.

Pressão relativa no queimador (cm H ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência nominal (kW)
5,0	4,9	12,7
5,8	5,7	13,8
7,8	7,6	16,4
10,0	9,8	18,9
12,7	12,5	21,5
14,7	14,4	23
15,7	15,4	23,6
17,0	16,7	24,4
17,7	17,4	24,7

A Figura 4.17 apresenta o conjunto de ensaios realizados para o gás natural.

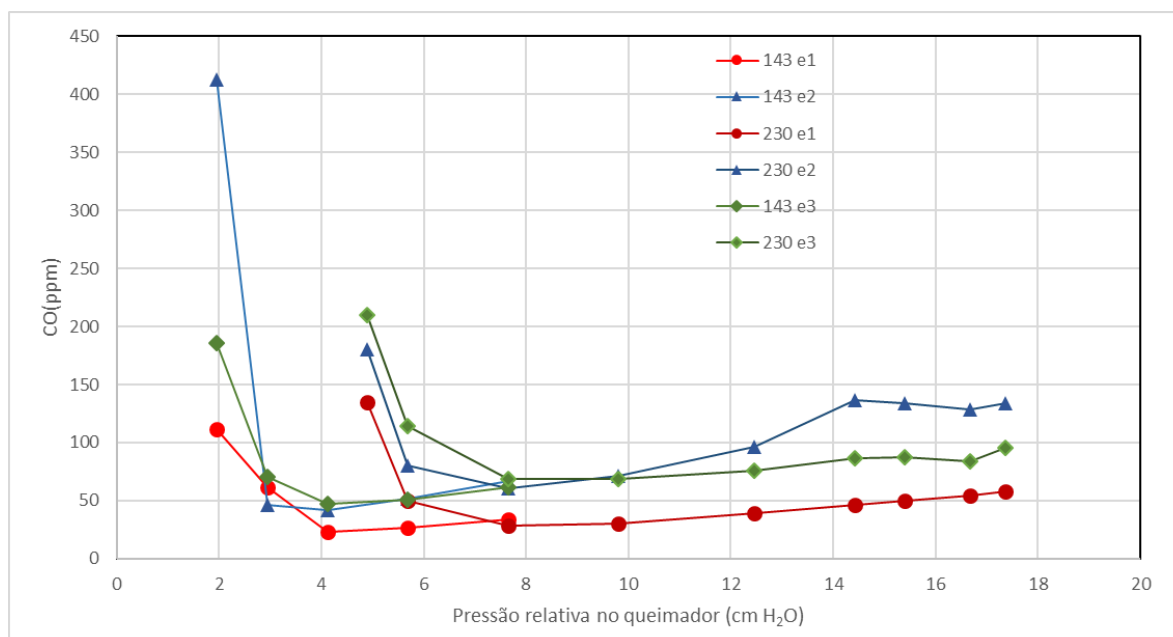


Figura 4.17 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração INEGI e gás natural.

De acordo com a Figura 4.17 é visível a existência de uma grande discrepância em quase todos os pontos entre os resultados dos ensaios 1 e 2, no entanto é mais notória no ponto de pressão 2,0 cmH₂O em toda a curva que corresponde à voltagem 143 V. Esta diferença entre dois ensaios levou à realização de um terceiro ensaio, apresentado na mesma figura. Verifica-se que os ensaios mais próximos são o 2 e o 3. Por esse motivo os resultados do ensaio 1 foram desprezados na curva média dos ensaios apresentada seguidamente na Figura 4.18.

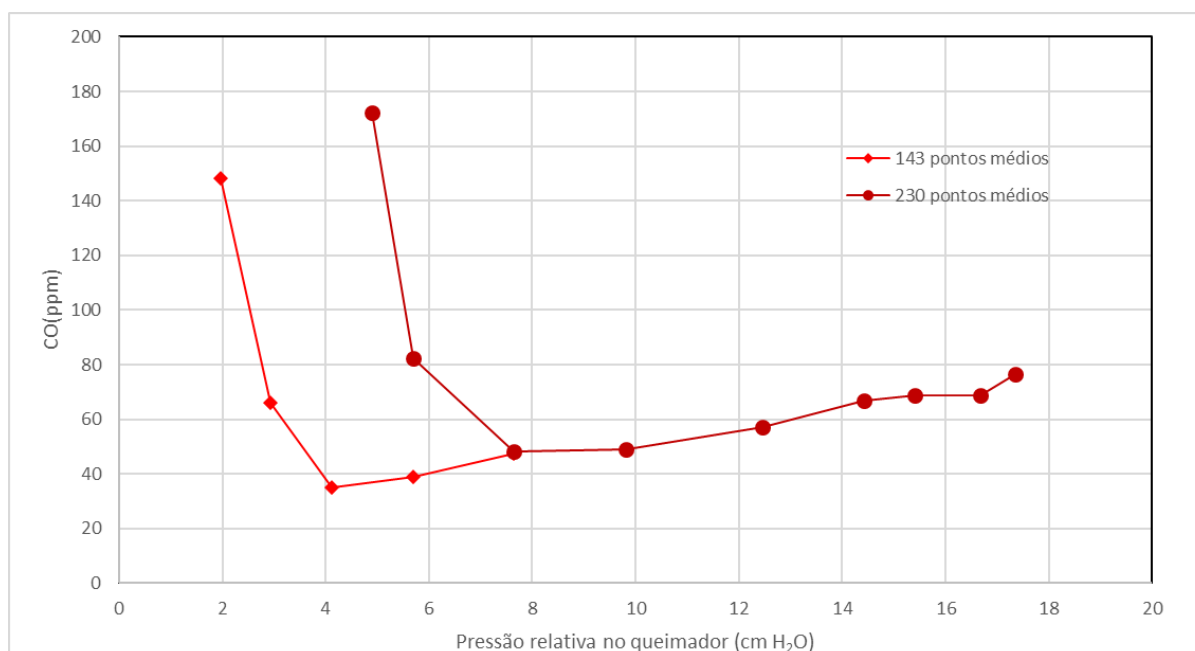


Figura 4.18 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração INEGI e gás natural.

Da Figura 4.18, conclui-se que o valor mais elevado em termos de concentração de CO corrigido para 230 V é de 174 ppm (v/v) ocorrendo para uma pressão relativa do queimador de 5,0 cmH₂O. Relativamente à tensão de 143 V, o máximo ocorre para 2,0 cmH₂O e é de

148 ppm (v/v). Também se pode verificar que, para as duas voltagens, os valores máximos de concentração de CO corrigido correspondem aos valores mínimos de pressão relativa no queimador para cada uma das voltagens ensaiadas.

De forma a dar por terminada a análise à chaminé INEGI resta comparar e analisar as emissões dos três combustíveis utilizados. Para tal converteu-se, assim como no caso da chaminé de convecção natural, as pressões do queimador para potências nominais de forma a que as comparações sejam efetuadas na mesma escala. A Figura 4.19 contém as emissões da chaminé INEGI para os diferentes gases combustíveis testados.

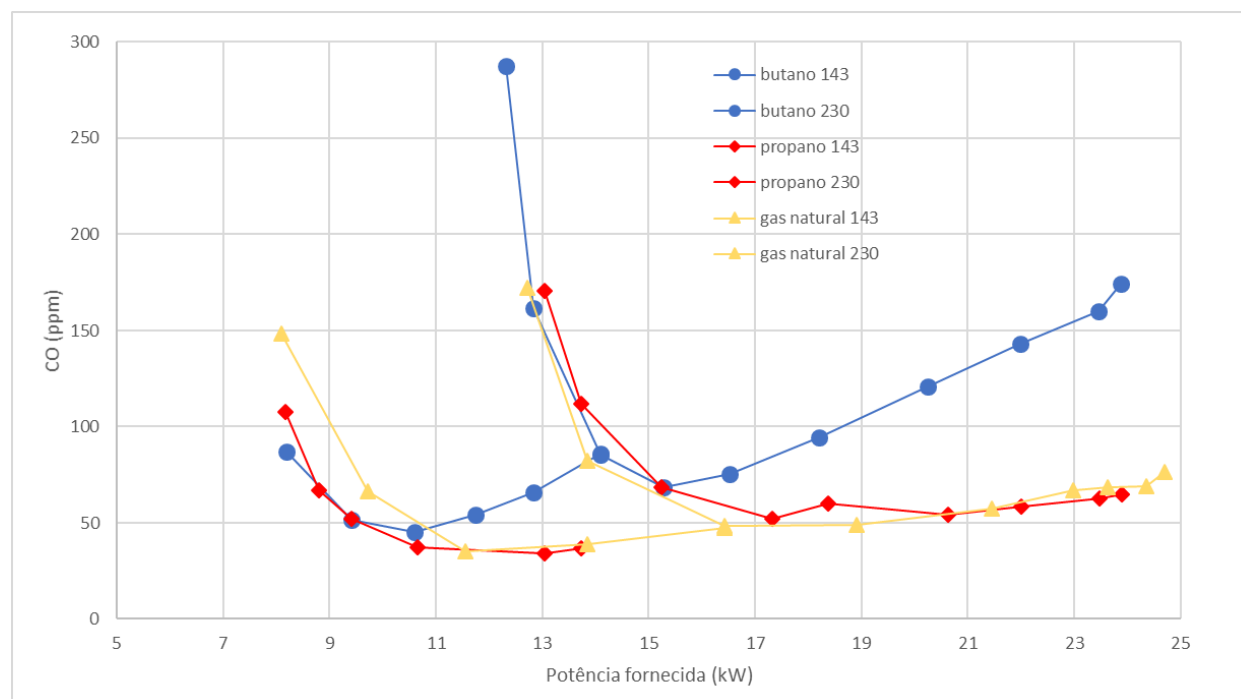


Figura 4.19 - Resultados de emissões da chaminé INEGI obtidos, para os diferentes gases em função da potência fornecida.

Da análise da Figura 4.19 podem retirar-se algumas conclusões:

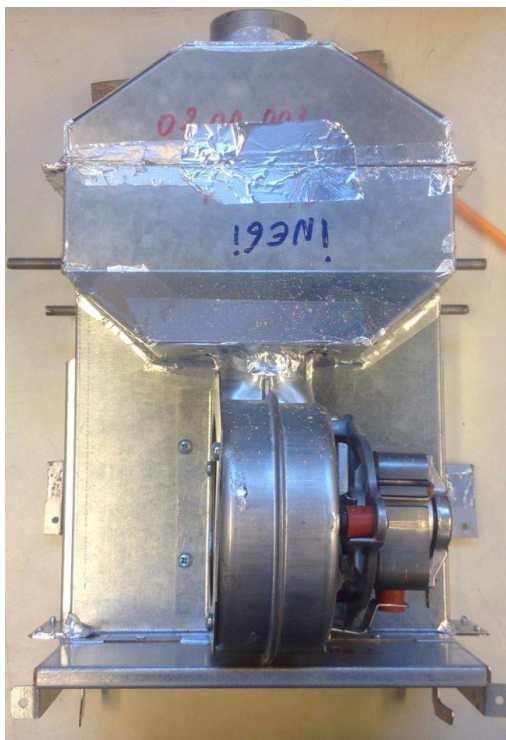
- Como no caso da chaminé de convecção natural, para potências nominais elevadas (em cada uma das voltagens) o combustível que apresenta emissões maiores é o butano, enquanto que o propano e o gás natural apresentam resultados muito semelhantes;
- Para potências baixas, o butano é o combustível que apresenta emissões mais baixas;
- Conjugando as duas voltagens o combustível que apresenta emissões mais interessantes, em termos médios, é o gás natural;

4.3- Chaminé a testar

4.3.1-Chaminé Venturi

A chaminé que constitui o tema central desta dissertação foi ponderada pela equipa do INEGI na sequência do processo de desenvolvimento da chaminé equipada com ventilador, não tendo, contudo, sido testada. Foi pensada para funcionar de acordo com o princípio do

venturi, em que uma diferença de pressão provoca uma aceleração do escoamento criando um efeito de sucção. As Figuras 4.20 A e B seguintes apresentam fotografias retiradas à chaminé.



A



B

Figura 4.20 – A - Fotografia da chaminé venturi vista de frente; B - Fotografia dos dois compartimentos que constituem a chaminé, o compartimento superior corresponde aos gases de combustão e o inferior ao ar insuflado.

A chaminé apresenta, como se pode verificar pelas imagens, dois compartimentos num dos quais circulam os gases de combustão provenientes da câmara de combustão e no outro circula ar nas condições ambiente insuflado por um ventilador. Cada um destes compartimentos apresenta uma válvula de borboleta cuja abertura é regulável com o intuito de permitir o estudo do efeito provocado pela variação da posição das mesmas nas emissões e tendo como fim determinar a posição que permite obter emissões mais baixas. Finalmente existe acima destes compartimentos um topo ao qual deve ser associada uma conduta de saída.

4.3.2-Testes à chaminé

Após montagem da chaminé anteriormente descrita e de todos os outros componentes essenciais à realização do ensaio deram-se início aos primeiros testes da mesma. Estes testes foram realizados utilizando gás natural, uma vez que, este é canalizado, ao contrário do propano e do butano, sendo menos provável a existência de irregularidades no escoamento de combustível. A Figura 4.21 que se segue apresenta a chaminé associada ao esquentador nas condições em que ocorreram os primeiros ensaios.



Figura 4.21 - Fotografia da chaminé venturi acoplada ao esquentador.

O primeiro ensaio realizado foi sem ventilação de forma a conceber qual seria o alcance da chaminé no modo de convecção natural. Durante os ensaios verificou-se que a partir de uma determinada pressão do queimador ocorria fuga de chama e de gases de combustão pela zona inferior do queimador, a Figura 4.22 é ilustrativa desse fenómeno.



Figura 4.22 - Fotografia elucidativa do fenómeno de fuga de chama.

Depois desta primeira experiência tentou repetir-se o ensaio com o ventilador ligado, alimentado a 230 V. Uma vez mais ocorreu a saída de chama e gases de combustão pela zona inferior do queimador, no entanto desta vez o fenómeno ocorreu para uma pressão do queimador inferior, pelo que se concluiu que o ventilador agravava o problema. Tentou-se ainda repetir a experiência utilizando uma tensão reduzida na alimentação do ventilador, no entanto o problema anteriormente referido persistiu.

4.4-Alterações realizadas à chaminé

4.4.1-Protótipo A

Numa primeira fase supôs-se que a saída de gases de combustão pela zona inferior do queimador era causada por recirculação de ar, ou seja, o ar proveniente do ventilador não seria direcionado para a saída, mas para a câmara de combustão não permitindo a ascensão dos produtos de combustão.

Tentou então solucionar-se o problema com recurso a uma extensão da divisória existente entre a zona de saída dos gases de combustão e a zona de entrada do ar ventilado. Associou-se então uma chapa de aço, devidamente cortada ao topo da chaminé, como mostra a Figura 4.23, tendo-se observado experimentalmente que esta alteração em nada ajudava na resolução do problema.



Figura 4.23 - Fotografia do interior do topo da chaminé venturi ao qual foi acrescentada uma divisória.

4.4.2-Protótipo B

Como a introdução de um prolongamento da divisória existente entre os dois compartimentos não solucionou o problema, pensou-se que a causa da recirculação de ar para a zona da câmara seria a morfologia do topo da chaminé, as rampas, originadas pela grande redução de secção numa altura muito curta, poderiam de certa forma refletir o ar insuflado para a zona dos produtos de combustão provocando um efeito tampão. A Figura 4.24 mostra o topo da chaminé.



Figura 4.24 - Fotografias da vista frontal e de topo da chaminé em que são visíveis as “rampas”.

Este topo foi então retirado e construiu-se no laboratório, com recurso a chapas de aço, um topo novo com abertura franca que permitisse testar o conceito na base da formulação desta chaminé. O novo topo referido anteriormente está patente na Figura 4.25.



Figura 4.25 - Fotografias da vista de frente e de lado do topo contruído no laboratório.

Para além disso foi retirada também a válvula de borboleta localizada na zona de saída dos gases uma vez que apenas dificultava os escoamentos dos mesmos uma vez que adicionava perda de carga ao circuito dos gases.

Efetuuou-se então um primeiro teste em convecção natural a esta solução, aumentando-se sucessivamente a pressão do queimador e verificando quando é que se iniciava a fuga de gases de combustão pela zona inferior do queimador. Esta nova solução permitiu atingir uma pressão do queimador de 18,0 cm H₂O pelo que se concluiu que seria passível efetuar a operação desta solução com ventilador e analisar os resultados obtidos.

4.4.2.1-Ensaio ao protótipo B

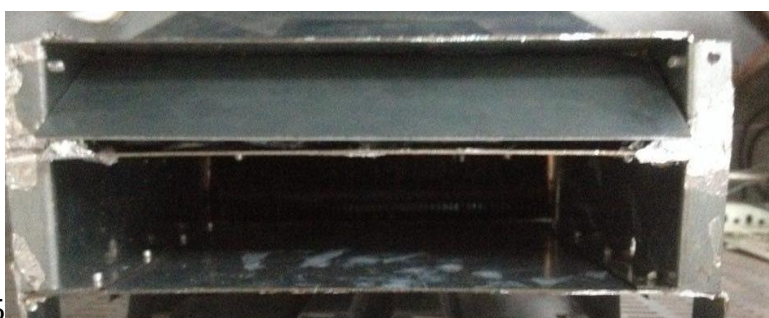
Tendo por base a possibilidade de operação em toda a gama observada na experiência anterior, optou-se pela realização de três ensaios, para três posições da borboleta, do lado do ar insuflado, correspondentes a abertura máxima, abertura média e mínima. As Figuras 4.26 A, B e C seguintes contêm as imagens correspondentes às três aberturas da borboleta.



A



B



C

Figura 4.26 - Fotografias das áreas de passagem do ar insuflado correspondentes às aberturas da válvula borboleta. A -abertura máxima; B -abertura intermédia ; C -abertura mínima.

Cada uma das posições anteriormente referidas teve uma gama de operação ligeiramente diferente, uma vez que consoante a sua posição o fenómeno de levantamento de chama era

maior ou menor levando a um aumento ou diminuição da pressão mínima relativa no queimador. Pelo mesmo motivo a pressão máxima da gama de operação também difere consoante a posição da borboleta.

A Figura 4.27 é representativa da configuração da chaminé para a qual foram realizados os ensaios que se seguem.



Figura 4.27 - Configuração da chaminé venturi com o topo fabricado no laboratório.

É visível na figura 4.27, uma placa divisória de cartão que foi colocada debaixo do ventilador. Esta placa foi colocada porque durante um dos ensaios verificou-se que o ventilador poderia estar a insuflar algum ar para a zona do queimador, interferindo com a combustão. É também por este motivo que posteriormente é realizado um teste em que é tapada uma parte da secção de entrada do ventilador.

i) ABERTURA MÁXIMA

A primeira posição a ser ensaiada correspondeu à abertura máxima da borboleta. A gama de operação com os respetivos pontos ensaiados vem apresentada na Tabela 4.10:

Tabela 4.10 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo B, gás natural e abertura máxima da válvula borboleta.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
4,5	4,4	12,0
5,8	5,7	13,8
7,8	7,6	16,4
10,0	9,8	18,9
12,6	12,4	21,4
14,8	14,5	23,0
15,7	15,4	23,6
17,0	16,7	24,4
17,7	17,4	24,7
19,0	18,6	25,2
20,5	20,1	25,7 (*)
21,5	21,1	25,9 (*)
22,5	22,1	26,0 (*)
23,5	23,0	26,1 (*)
25,0	24,5	26,0 (*)
26,0	25,5	25,9 (*)

(*) (os valores a itálico representam valores fora da gama de calibração por conseguinte a incerteza destes valores é grande)

Foram realizados dois ensaios de forma a ser possível avaliar a reprodutibilidade dos mesmos. Os resultados dos dois ensaios mencionados anteriormente estão representados na Figura 4.28.

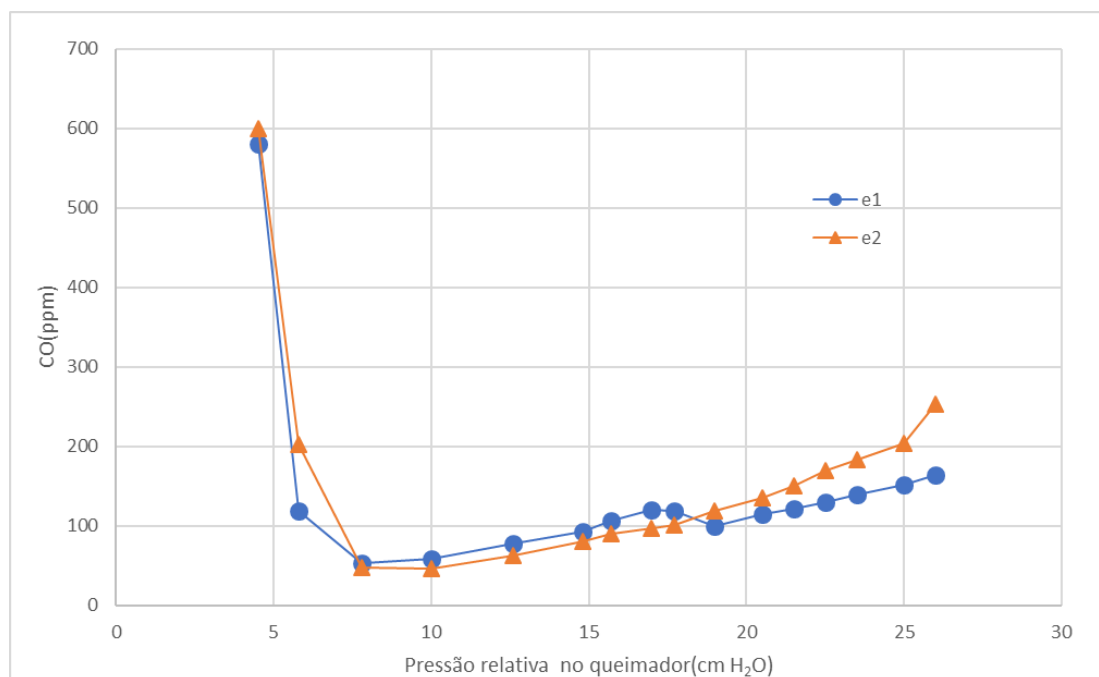


Figura 4.28- Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura máxima da válvula borboleta e gás natural.

Da análise da Figura 4.28 pode retirar-se que, de um modo geral, existe uma boa reprodutibilidade entre os ensaios. Nas pressões mais baixas a discrepância existente pode ser devida a ligeiros desacertos na pressão do queimador, nas mais altas denota-se uma maior diferença que aumenta à medida que aumenta a pressão relativa do queimador, sendo que esta zona de pressões altas corresponde a um funcionamento do esquentador mais instável. A Figura 4.29 seguinte apresenta a curva média relativa aos ensaios anteriormente apresentados.

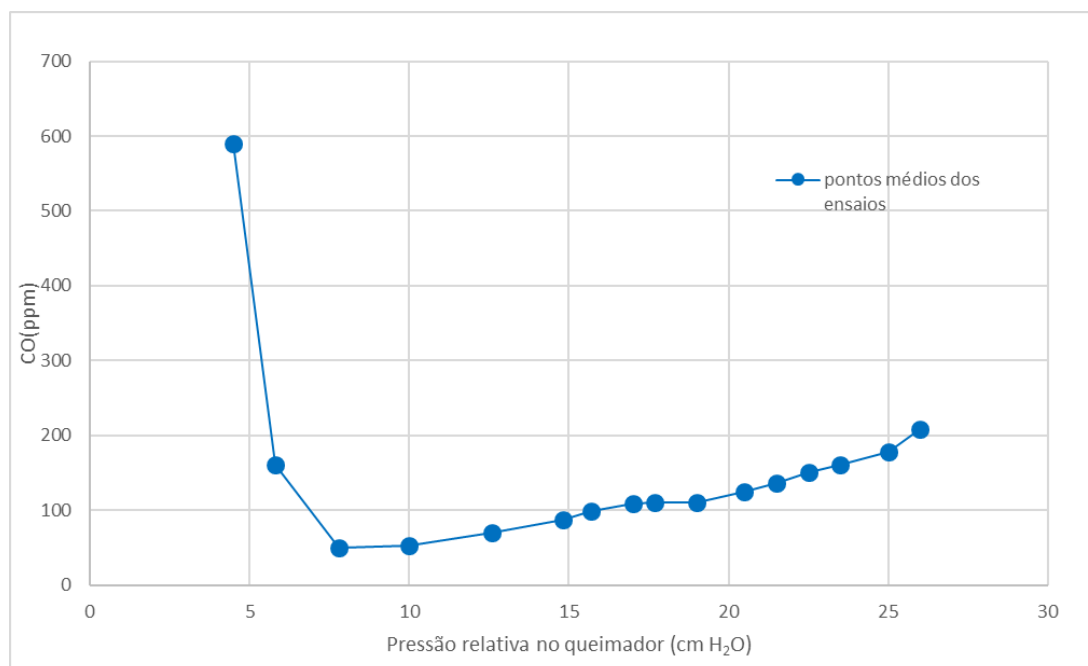


Figura 4.29 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo B abertura máxima da válvula borboleta e gás natural.

Como se pode observar na figura anterior, a gama de operação da configuração em questão variou desde 4,5 até 26,0 cmH₂O. O teor máximo de CO corrigido obtido foi de 590 ppm (v/v) para a pressão mínima relativa do queimador, que é um valor bastante acima do valor limite imposto pelo critério da BOSCH (250 ppm (v/v)).

ii) ABERTURA INTERMÉDIA

Depois de realizar os ensaios com a abertura máxima regulou-se a borboleta relativa ao ar insuflado, fechando-a até um ponto intermédio. Seguidamente realizaram-se os ensaios com a gama de operação apresentada na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo B, gás natural e abertura intermédia da válvula borboleta.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
4,5	4,4	12,0
5,1	5,0	12,9
5,8	5,7	13,8
7,8	7,6	16,4
10,0	9,8	18,9
12,6	12,4	21,4
14,8	14,5	23,0
15,7	15,4	23,6
17,0	16,7	24,4
17,7	17,4	24,7
19,0	18,6	25,2
20,5	20,1	25,7 (*)
21,5	21,1	25,9 (*)
22,5	22,1	26,0 (*)
23,5	23,0	26,1 (*)
25,0	24,5	26,0 (*)
26,0	25,5	25,9 (*)

(*) (os valores a itálico representam valores fora da gama de calibração por conseguinte a incerteza destes valores é grande).

Novamente se salienta que os valores em itálico dizem respeito a valores fora da gama de caudais conhecida e por isso em relação aos quais existem grandes incertezas. Uma vez mais foram feitos dois ensaios cujos resultados se encontram na Figura 4.30.

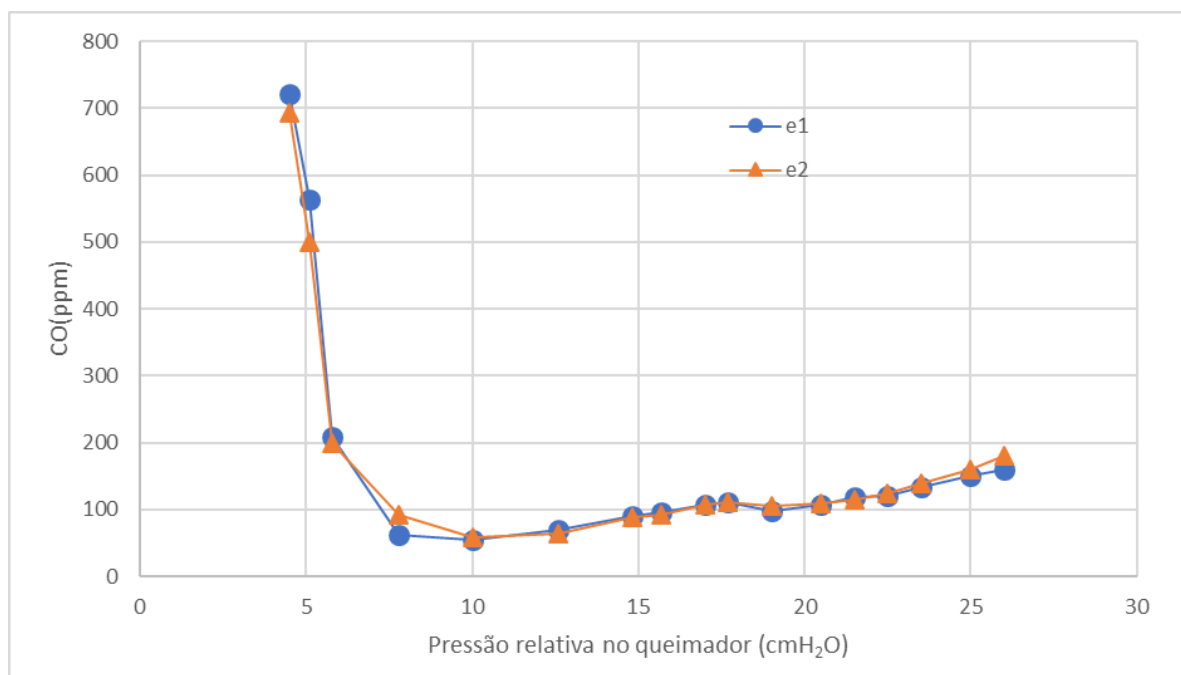


Figura 4.30 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura intermédia da válvula borboleta e gás natural.

A reprodutibilidade dos ensaios representados na Figura 4.30 é quase perfeita, tendo a maioria dos pontos diferenças na ordem dos 10 ppm (v/v), à exceção dos primeiros dois pontos que apresentam diferenças na ordem dos 50 ppm (v/v). Com as curvas anteriormente apresentadas construiu-se a curva média dos ensaios representada na Figura 4.31.

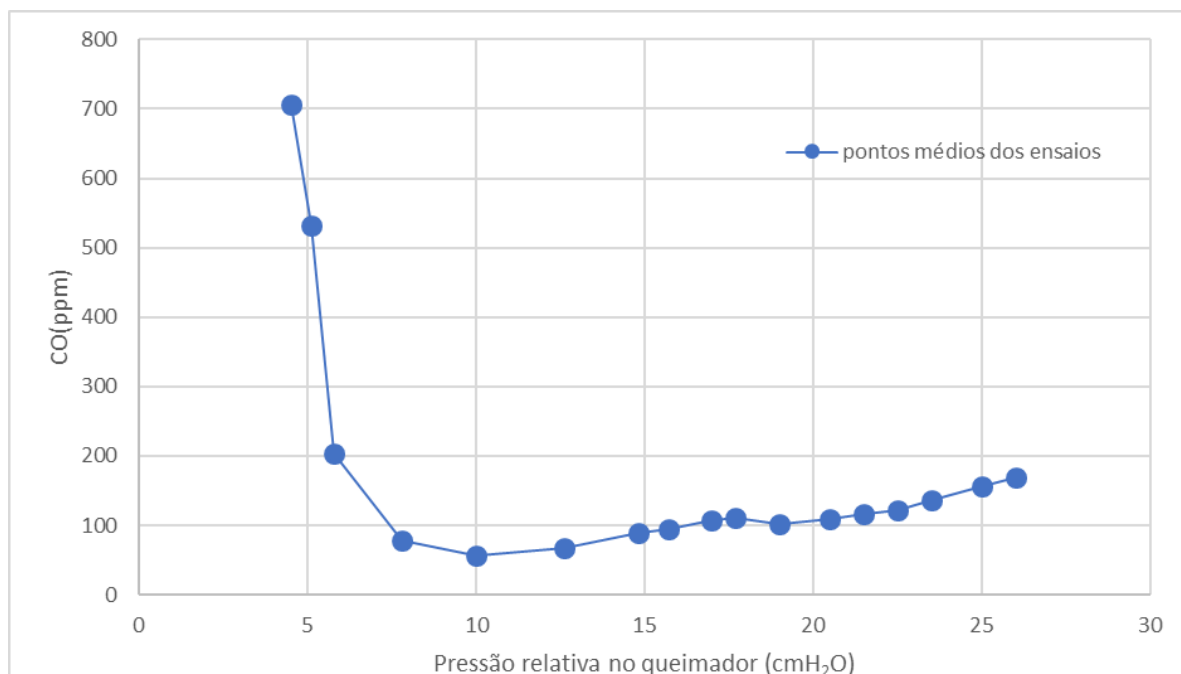


Figura 4.31 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura intermédia da válvula borboleta e gás natural

Para esta abertura, constatou-se que o valor de CO corrigido para a pressão mais baixa (4,5 cmH₂O) corresponde ao máximo da média dos ensaios com o valor de 700 ppm (v/v). Verificou-se também que o valor de emissões para a pressão mais elevada do queimador

foi de 180 ppm (v/v). Observa-se que, em relação à abertura anterior, existe um aumento das emissões nas pressões mais baixas e uma diminuição nas mais altas. Este fenómeno deve-se a que, com a redução da abertura, o efeito arrasto é mais intenso o que provoca um maior levantamento de chama nas pressões mais baixas aumentando consequentemente as emissões gasosas. Nas potências mais altas o efeito causado é contrário, um maior arrastamento leva a uma maior quantidade de ar disponível causando uma diminuição das emissões.

iii) ABERTURA MÍNIMA

A última posição da borboleta a ser ensaiada foi a correspondente à abertura mínima. Para tal regulou-se esta válvula para o aperto máximo e repetiu-se o mesmo procedimento realizado para as duas aberturas ensaiadas anteriormente, com a seguinte gama de operação, Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo B, gás natural e abertura mínima da válvula borboleta.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
5,1	5,0	12,9
5,8	5,7	13,8
7,8	7,6	16,4
10,0	9,8	18,9
12,6	12,4	21,4
14,8	14,5	23,0
15,7	15,4	23,6
17,0	16,7	24,4
17,7	17,4	24,7
19,0	18,6	25,2
20,5	20,1	25,7 (*)
21,5	21,1	25,9 (*)
22,5	22,1	26,0 (*)
23,5	23,0	26,1 (*)
25,0	24,5	26,0 (*)
26,0	25,5	25,9 (*)
27,0	26,5	25,7 (*)
29,0	28,4	25,0 (*)

(*) (os valores a itálico representam valores fora da gama de calibração por conseguinte a incerteza destes valores é grande)

Nesta tabela, tal como nas anteriores e seguintes, que estarão devidamente assinaladas, os valores a itálico representam valores com um grau de incerteza elevado. O primeiro ponto desta configuração corresponde ao segundo da configuração anterior. Tal acontece pelo

facto de que ao se fechar a abertura a massa de ar insuflado é obrigada a passar por uma restrição espacial menor o que faz com que a velocidade depois da restrição seja maior. Este incremento de velocidade leva a um aumento do arrasto dos gases de combustão contribuindo para um levantamento da chama, de tal forma que para a pressão correspondente aos 4,5 cmH₂O o esquentador apaga. Por outro lado, o mesmo fenómeno permite aumentar a gama de operação já que foi possível atingir os 29,0 cmH₂O sem que houvesse fuga de gases de combustão pela zona inferior do queimador. Foram realizados os ensaios para os restantes pontos, em que o levantamento de chama não forçava o esquentador a desligar-se e foram registados os resultados que estão apresentados na Figura 4.32.

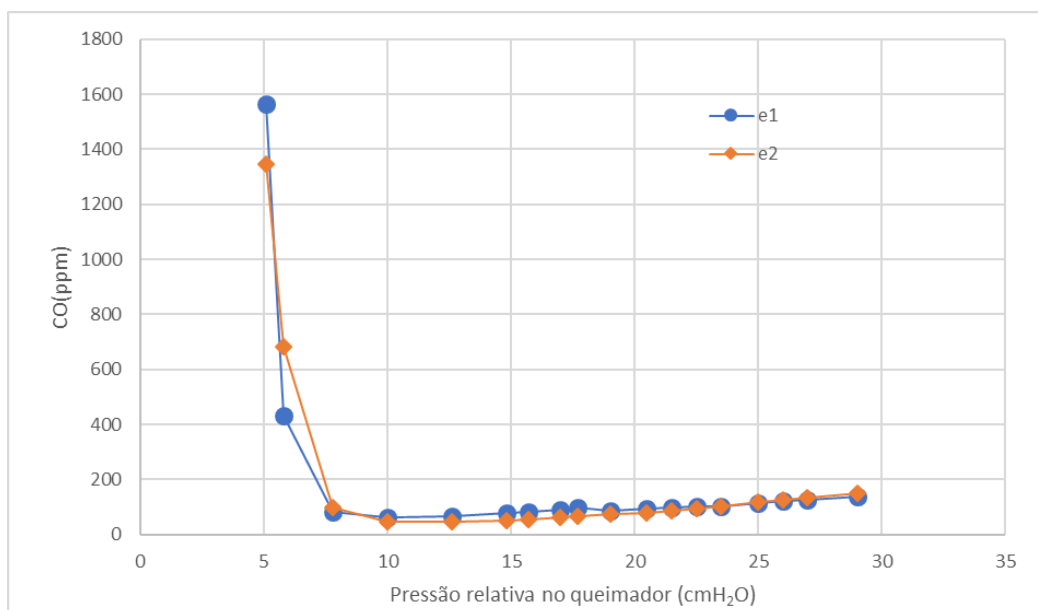


Figura 4.32 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura mínima da válvula borboleta e gás natural.

A Figura 4.33 que se segue, apresenta a média dos dois ensaios realizados.

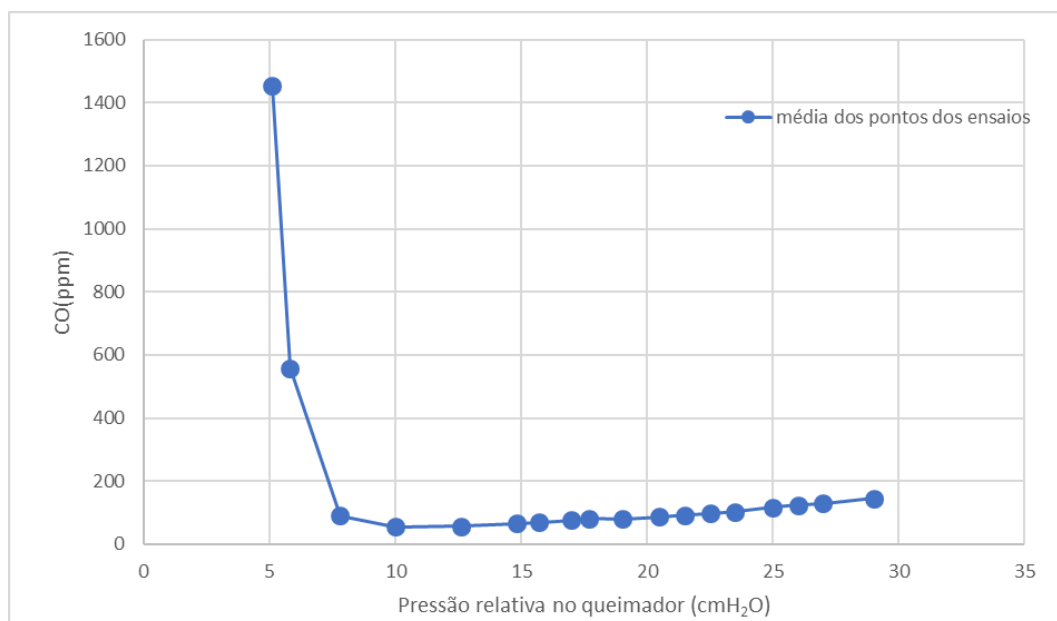


Figura 4.33- Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura mínima da válvula borboleta e gás natural.

Da análise da Figura 4.32 verifica-se a existência de uma boa reprodutibilidade dos ensaios existindo apenas algumas discrepâncias nos pontos de pressão relativa no queimador mais baixa que é devida à sensibilidade existente nesta zona perante variações no caudal de combustível.

Já em relação à Figura 4.33, observa-se que o valor máximo para as emissões de CO corrigido dos dois ensaios foi de 1445 ppm (v/v) para a pressão relativa no queimador de 2,0 cmH₂O. O valor mínimo foi de 48 ppm (v/v) para a pressão relativa de 10 cmH₂O e o valor registado para a pressão relativa de 29,0 cmH₂O, máxima da configuração em análise foi 168 ppm (v/v).

Terminados os ensaios relativos a estas configurações foi necessário determinar qual seria a configuração mais interessante tendo em vista dois fatores: a gama de operação e as emissões. Relativamente à gama de operação a configuração mais interessante é a corresponde à abertura mínima uma vez que tem uma gama de operação mais ampla. No que toca à questão das emissões, é necessário analisar as três configurações na mesma imagem de forma a ser mais perceptível qual a mais interessante. A Figura 4.34 apresenta a sobreposição das médias dos pontos de cada uma das configurações ensaiadas.

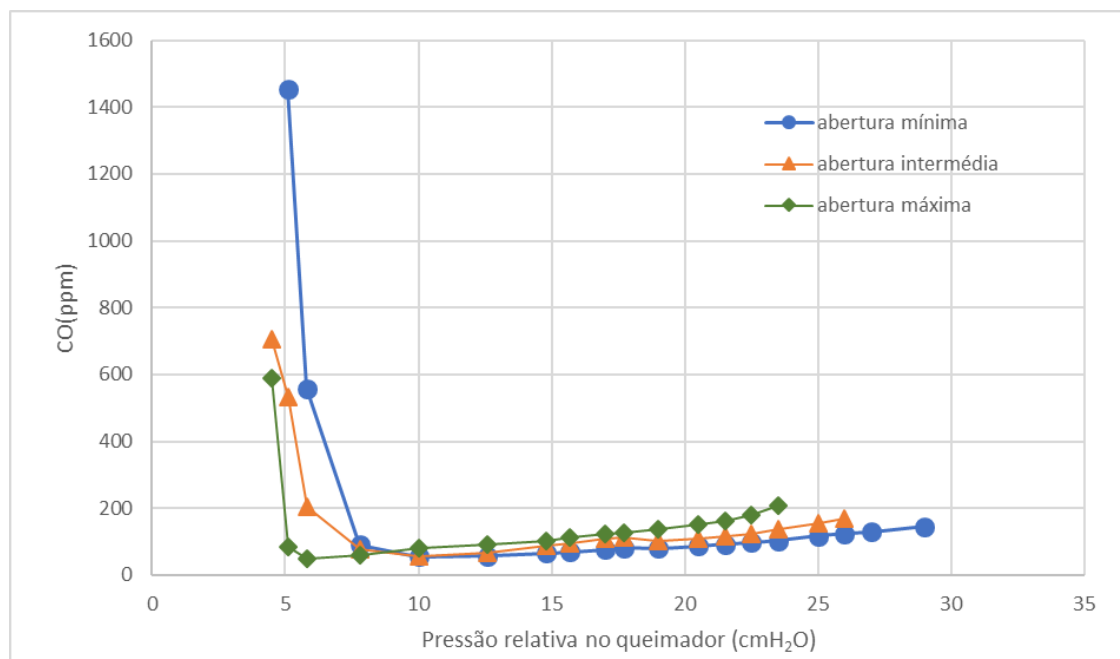


Figura 4.34 - Médias dos pontos obtidos para cada uma das posições da borboleta ensaiadas com a chaminé venturi protótipo B e gás natural.

Da análise da Figura 4.34 retira-se que:

- Nas pressões mais baixas, até 7,8 cmH₂O, quanto maior a abertura da borboleta menores são as emissões obtidas;
- Para pressões superiores a 10,0 cmH₂O, a diminuição da abertura da borboleta promove o fenómeno de levantamento de chama o que leva ao favorecimento da diminuição das emissões;

Do balanceamento dos dois fatores referidos anteriormente, gama de operação e emissões surge que a abertura mínima seria a configuração mais interessante. No entanto nas condições dos ensaios esta configuração não permite o funcionamento do esquentador em

toda a gama pretendida (de 2,0 a 17,7 cmH₂O ou superior se possível). O ideal seria conseguir que a curva referente à abertura mínima fosse deslocada para a esquerda até que toda a gama de funcionamento fosse abrangida. Para tentar fazê-lo optou-se por, mantendo a configuração que se provou mais interessante, modular a tensão de alimentação do ventilador.

4.4.2.2-Modulação da tensão de alimentação

Numa primeira fase, regulou-se a pressão relativa no queimador para o mínimo pretendido (2 cmH₂O) e tentou verificar-se o que ocorria diminuindo a voltagem (esta modelação foi realizada para as configurações de abertura máxima e mínima da válvula borboleta). Aferiu-se que:

- O ventilador entrava em funcionamento para uma tensão de 50 V;
- Quando a tensão de alimentação estava situada nos 120 V a chama na parte superior do queimador começava a ficar instável;
- Quando a voltagem de alimentação do ventilador atingia os 180 V a chama apagava.

Com base nos pontos referidos anteriormente concluiu-se que a tensão de alimentação ideal estaria entre os 50 e os 120 V. Para determiná-la de forma mais rigorosa resolveu implementar-se um segundo critério, para a maior tensão de alimentação possível as emissões brutas indicadas no analisador não poderiam ultrapassar os 250 ppm (v/v). Com este segundo critério determinaram-se duas tensões de alimentação, 75 V para a abertura mínima e 85 V para a abertura máxima.

i) Ensaio da abertura máxima 85 V

Após regular a posição da abertura da válvula borboleta, de forma a corresponder à abertura máxima, efetuou-se também a redução da voltagem de alimentação do ventilador para o valor pretendido de 85 V e iniciou-se o ensaio. A gama de operação foi determinada experimentalmente, tal como tinha sido feito em situações anteriores. O primeiro ponto ensaiado foi o de pressão relativa no queimador de 2 cmH₂O, uma vez que quando foi realizada a determinação experimental da voltagem adequada, foi considerado um critério que exigia que o esquentador com a configuração em questão para além de funcionar a esta pressão relativa, o esquentador deveria ainda apresentar emissões inferiores a 300 ppm (v/v). A restante gama de operação, obtida de forma experimental vem apresentada na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo B abertura máxima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 85 V e gás natural.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
2,0	2,0	8,1
4,2	4,1	11,6
5,8	5,7	13,8
7,8	7,6	16,4
10,0	9,8	18,9
12,6	12,4	21,4
14,8	14,5	23,0
15,7	15,4	23,6
17,0	16,7	24,4
17,7	17,4	24,7
19,0	18,6	25,2

De referir que, como esperado, com a redução da voltagem foi possível deslocar a curva apresentada anteriormente (abertura máxima) para a esquerda o que permitiu cobrir toda a gama de operação das chaminés anteriormente ensaiadas e ainda aumentar a mesma gama até aos 19,0 cmH₂O. No entanto o mais importante é analisar as emissões de monóxido de carbono para verificar se o desempenho da chaminé é melhor ou pior. A Figura 4.35 seguinte contém os resultados dos ensaios realizados.

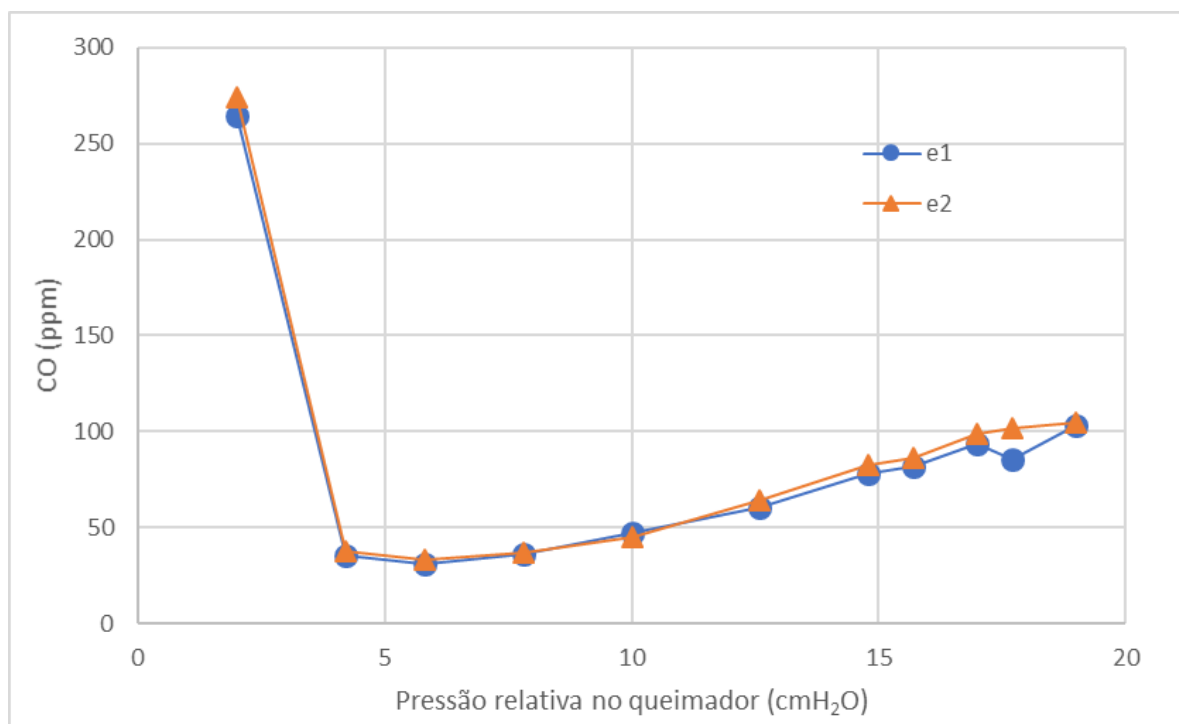


Figura 4.35 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura máxima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 85 V e gás natural.

Como se pode verificar pela Figura 4.35 não existe uma grande discrepância entre os valores registados nos dois ensaios realizados, sendo os as concentrações de CO corrigido quase coincidentes. Existe, no entanto, um ponto correspondente à pressão no queimador de 17,7 cmH₂O que constitui uma exceção, diferindo nesse ponto os valores das emissões de CO corrigido registadas em 23 ppm (v/v). Esta diferença registada nas emissões pode ser justificada com um erro na regulação da pressão relativa no manómetro em U. Seguidamente, tendo em consideração todos os pontos dos dois ensaios efetuou-se a média entre os relativos à mesma pressão relativa no queimador tendo-se obtido a curva apresentada na Figura 4.36.

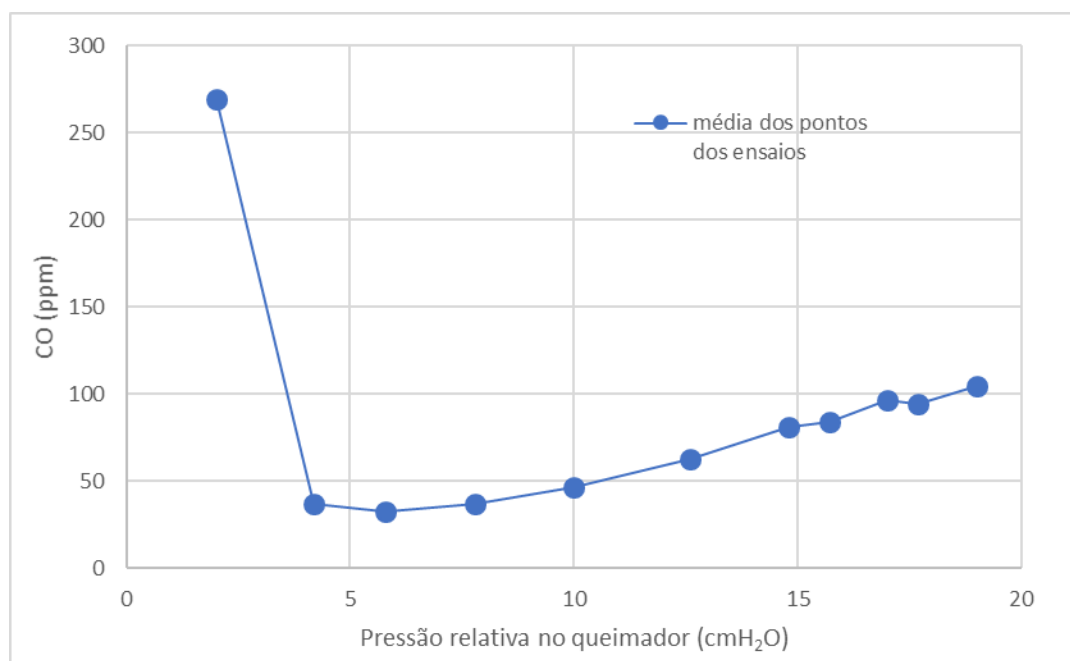


Figura 4.36 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo B abertura máxima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 85 V e gás natural.

Da Figura 4.36 anterior, constata-se que o valor máximo observado para as emissões gasosas de 273 ppm (v/v) corresponde ao valor mínimo de pressão relativa do queimador, enquanto o valor mínimo das mesmas emissões de 43 ppm (v/v) foi obtido para o valor de pressão relativa de 5,8 cmH₂O.

ii) Ensaio da abertura mínima 75 V

Depois de realizar o ensaio para a abertura máxima e devida tensão de alimentação do ventilador, seguiu-se o da abertura mínima. Para a realização deste ensaio foi necessário ajustar uma vez mais a válvula borboleta para a posição mais fechada possível e regular a voltagem de alimentação do ventilador para 75 V. A gama de operação registada para esta configuração definida anteriormente vem apresentada na Tabela 4.14 apresenta a gama de operação obtida para esta configuração.

Quando a voltagem de alimentação do ventilador era 230 V verificava-se que a gama de operação se alterava com a abertura ou fecho da borboleta, em virtude do incremento de velocidade e por conseguinte, aumento do efeito de arrasto que o estrangulamento da borboleta causava. Neste caso o incremento anteriormente referido é de certa forma minorado pela redução da voltagem de alimentação do ventilador.

Tabela 4.14 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo B abertura mínima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 75 V e gás natural.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
2,0	2,0	8,1
4,2	4,1	11,6
5,8	5,7	13,8
7,8	7,6	16,4
10,0	9,8	18,9
12,6	12,4	21,4
14,8	14,5	23,0
15,7	15,4	23,6
17,0	16,7	24,4
17,7	17,4	24,7
19,0	18,6	25,2

Com a gama de operação apresentada na Tabela 4.14 foram efetuados dois ensaios. Os resultados dos mesmos são apresentados na Figura 4.37.

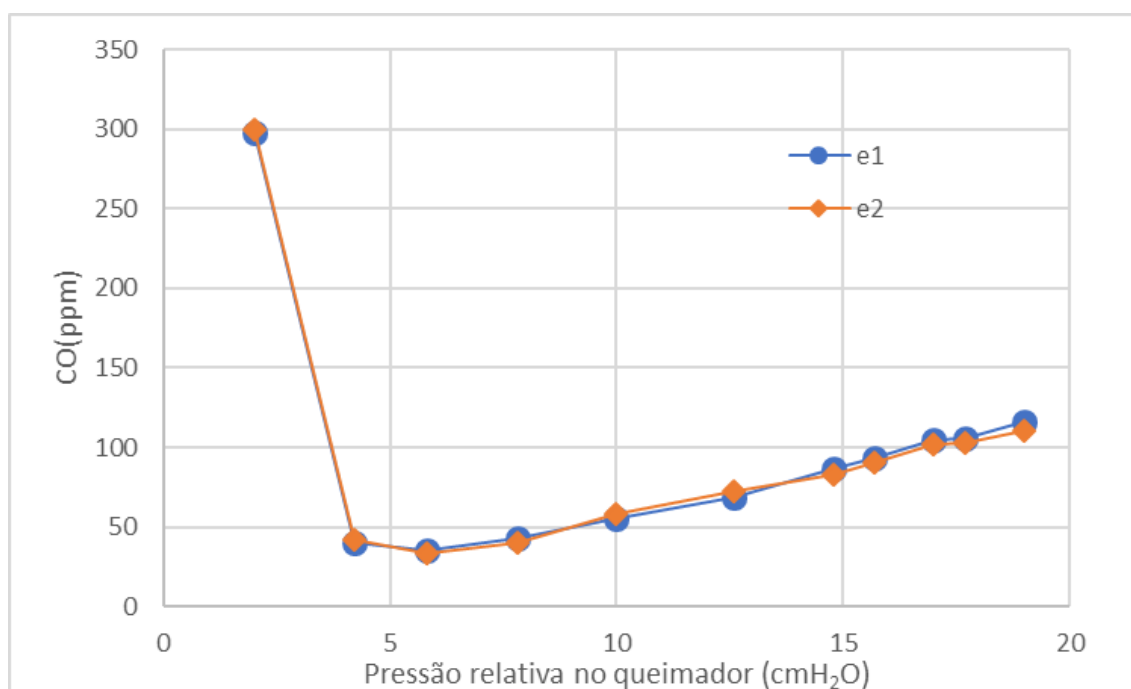


Figura 4.37 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo B com abertura mínima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 75 V e gás natural.

Este conjunto de ensaios é ainda mais preciso que o anterior, uma vez que não existe nenhum ponto que apresente diferença significativa de ensaio para ensaio. Da média dos dois ensaios apresentados anteriormente resulta o conjunto de pontos apresentados na Figura 4.38 seguinte.

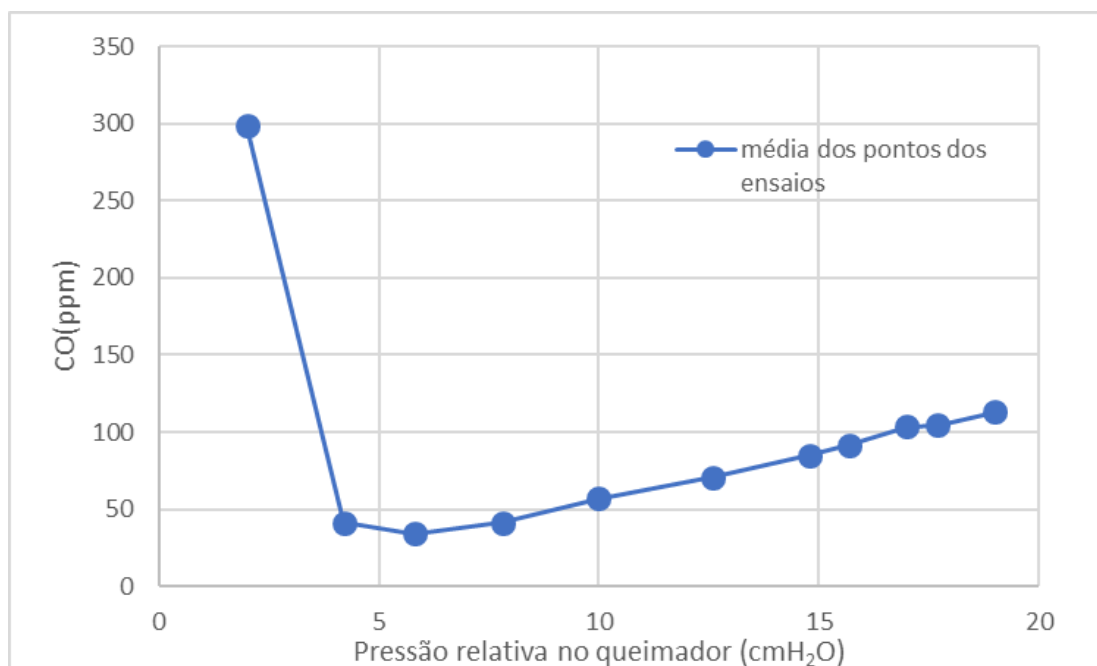


Figura 4.38 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo B abertura mínima da válvula borboleta, tensão de alimentação do ventilador de 75 V e gás natural.

De acordo com a figura anterior obteve-se para o ponto de pressão relativa de 2,0 cmH₂O o máximo do ensaio de 300 ppm (v/v). O mínimo do ensaio foi registado para a pressão de 5,8 cmH₂O tendo o valor de 36 ppm (v/v). Já relativamente ao ponto de pressão máxima (19,0 cmH₂O) do ensaio realizado, foi obtido o valor de 111 ppm (v/v) para as concentrações de CO corrigido.

A Figura 4.39 contém os dois conjuntos de pontos dos ensaios realizados anteriormente de forma a permitir uma melhor análise e compreensão dos resultados.

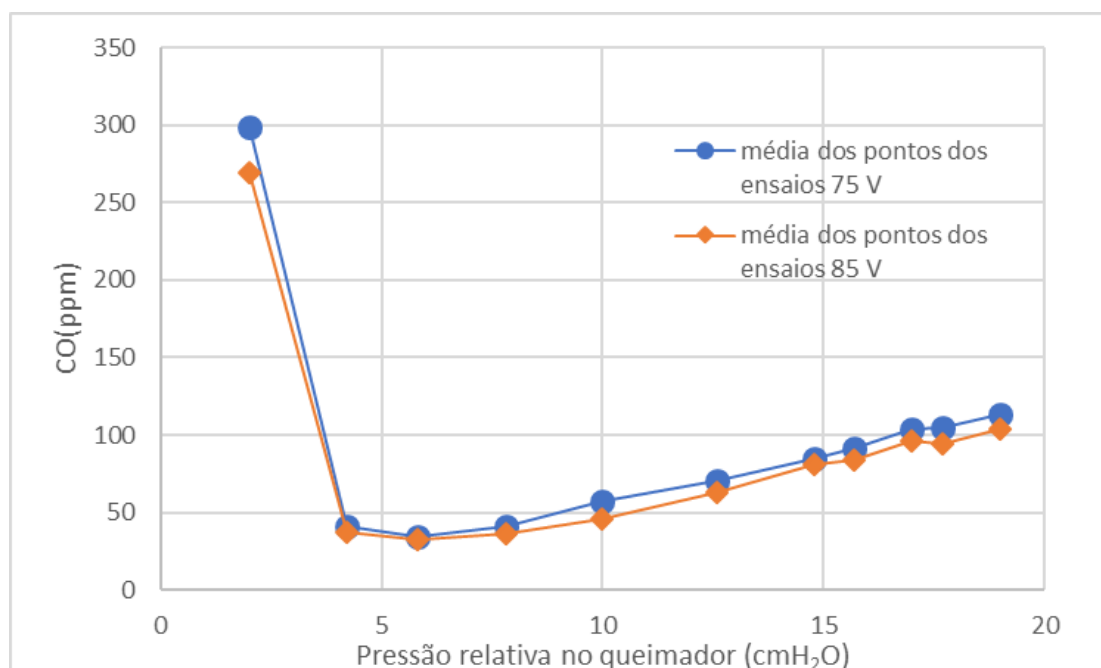


Figura 4.39 - Conjunto dos pontos médios obtidos nos dois ensaios configuração venturi protótipo B abertura máxima e mínima, com tensão de alimentação de 85 e 75 V (respetivamente) e gás natural.

Da análise da Figura 4.39 podem retirar-se as seguintes conclusões:

- Como já foi referido anteriormente, a gama de operação das duas configurações em análise é a mesma;
- As diferenças entre as configurações, relativamente a emissões, são reduzidas, sendo o ponto em que a diferença é maior 10,0 cmH₂O e o valor da diferença 18 ppm;
- A configuração que apresenta valores de emissões mais interessantes é, neste caso, a de tensão de alimentação 85 V e abertura máxima da borboleta, o que indica que neste caso a tensão de alimentação tem um peso maior, provocando um maior efeito de arrastamento, do que a redução de secção de passagem do ar;

É ainda importante referir que os queimadores destes esquentadores apresentam baixas emissões de NO_x. Para se verificar que as chaminés testadas não afetavam o desempenho dos queimadores foram realizadas, em simultâneo com os ensaios, medições dos valores de NO_x, tendo estes sido sempre inferiores a 10 ppm.

4.4.3-Protótipos C, D e E

i) Protótipo C

Depois de analisar as soluções da secção anterior sem o topo da Figura 4.24, foi necessário voltar a colocar o mesmo e repetir os ensaios para verificar a funcionalidade das soluções. Como já foi referido anteriormente, com a voltagem de alimentação situada nos 230 V independentemente da abertura da válvula borboleta os gases de combustão saíam pela zona inferior do queimador em vez de seguirem o trajeto desejado, que seria pela chaminé e depois conduta de saída. Verificou-se que, já com o topo montado, para as duas situações de voltagem reduzida analisadas anteriormente, o fenómeno de saída de produtos de combustão pela zona do queimador continuava a ocorrer, o que as inviabilizou como possíveis soluções, assim como qualquer hipótese do funcionamento desta chaminé sem que lhe fossem feitas alterações morfológicas. O passo seguinte foi então proceder a outras alterações na chaminé de forma a que fosse possível o funcionamento normal do esquentador com mesma. O primeiro pensamento que surgiu foi o de alterar o topo, uma vez que as configurações anteriores tinham apresentado bons resultados sem o mesmo. Foi posta a hipótese, de que a morfologia do topo e a drástica redução de secção com a altura do mesmo poderia estar a perturbar o escoamento de insuflação gerando fenómenos de turbulência e provocando recirculação de ar para zonas indevidas. Realizou-se então com recurso ao *Solidworks* um novo topo, com uma altura ligeiramente superior, mas com uma redução de secção menos drástica, o que talvez permitisse o funcionamento da chaminé. A Figura 4.40 apresenta uma imagem do desenho realizado.

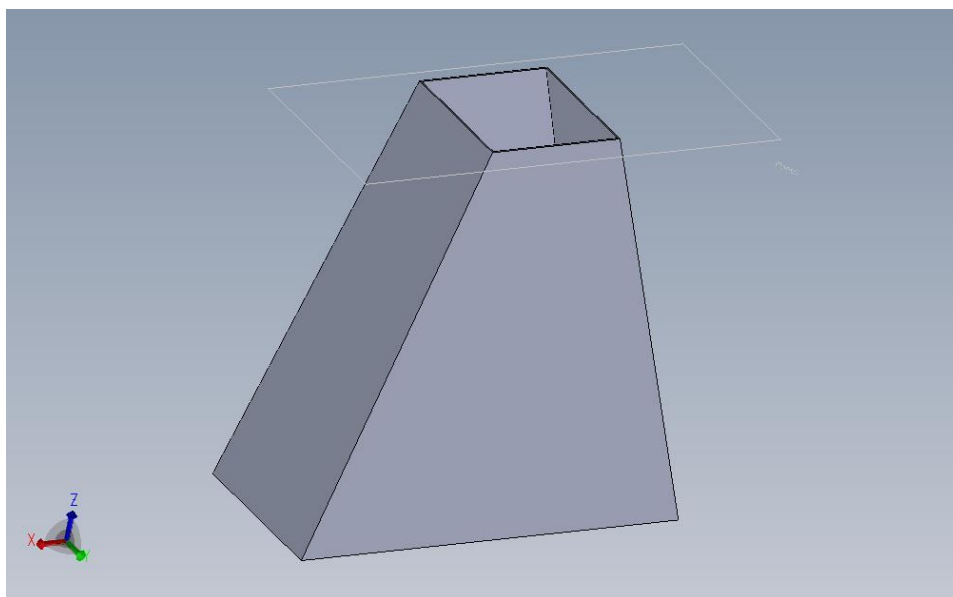


Figura 4.40 - Desenho em Solidworks do novo topo projetado para a chaminé.

ii) Protótipo D

Enquanto se aguardava pelo fabrico da estrutura do topo idealizado na Figura 4.40, foram testadas outras alternativas para tentar solucionar o problema introduzido pelo topo. Uma vez que não seria possível alterar a morfologia do topo imediatamente optou-se por tentar desviar o escoamento de ar insuflado de possíveis zonas que poderiam causar turbulência, ou seja, tentou direcionar-se o escoamento de ar insuflado diretamente para a saída.

Para tal, colocou-se um oco tubular na zona de saída do ar insuflado, o objetivo era como já foi referido direcionar o mesmo ar para a saída. A Figura 4.41 seguinte apresenta imagens do oco tubular e da sua montagem no compartimento de insuflação de ar.



Figura 4.41 - Fotografias, à esquerda o oco tubular e à direita o mesmo montado no compartimento de insuflação de ar da chaminé venturi.

No entanto esta tentativa revelou-se infrutífera uma vez que continuava a ocorrer a saída de gases de combustão pela zona do queimador, ainda que este fenómeno ocorresse para uma pressão do queimador superior à qual ocorria anteriormente.

Seguidamente tentou reduzir-se a secção de saída do oco tubular, com recurso a fita de alumínio o que teve resultados semelhantes à tentativa anterior, a Figura 4.42 mostra a secção de saída do oco após introdução da fita de alumínio.

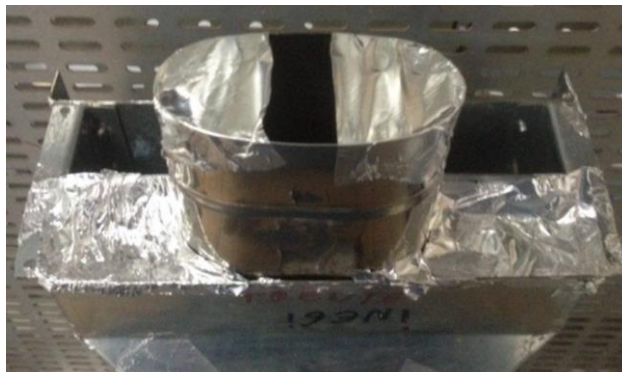


Figura 4.42 - Fotografia da redução da secção de saída do oco tubular.

Numa última tentativa, surgiu a ideia se associar um funil à secção de saída do oco tubular que não produziu resultados. No entanto é desta tentativa que emerge o conceito de utilizar ar comprimido como mecanismo indutor de arrasto, conceito que será abordado posteriormente. A Figura 4.43 apresenta a associação acima mencionada.



Figura 4.43 - Associação de um funil à saída do oco tubular.

iii) Protótipo E

Ainda antes de ser terminado o fabrico do novo topo para o protótipo C, pensou-se numa outra solução, com a mesma chaminé e sem o topo, que fosse alternativa à válvula borboleta, produzindo um efeito semelhante ao que era pretendido com a última. Colocar-se-ia uma chapa de aço a tapar parcialmente a secção de saída do ar insuflado e retirar-se ia a borboleta. A Figura 4.44 apresenta o aspeto final do esquentador com esta solução montada, pronto a entrar em funcionamento.



Figura 4.44 - Fotografia do protótipo E.

Para além disso, colocou-se na zona da divisória entre os dois compartimentos da chaminé uma pequena cantoneira, numa posição em que interferisse no escoamento desviando-o para a saída. A Figura 4.45 apresenta uma fotografia da cantoneira referida anteriormente.



Figura 4.45 - Fotografia da cantoneira utilizada na divisória entre o compartimento dos gases de combustão e da insuflação de ar,

Foram ensaiadas duas posições para a chapa, a posição 1 que corresponde a um terço da superfície de insuflação coberta e a posição 2 que corresponde a dois terços coberta. A Figura 4.46 apresenta imagens das áreas das posições 1 e 2.



Figura 4.46 - Fotografias das duas posições da chapa do protótipo E. À esquerda a posição 2 e à direita a posição 1.

O efeito provocado por esta solução seria semelhante ao da válvula borboleta. Na situação da válvula borboleta, verificava-se que um maior estrangulamento da mesma conduzia ao acentuar do fenómeno de levantamento de chama que por sua vez conduzia a emissões menores na gama de pressões relativas no queimador média-alta. No entanto, a gama de operação tinha um limite inferior superior em relação a estrangulamentos menores, ou seja, o valor da pressão relativa mínima no queimador era maior. Nesta nova solução, uma maior área da zona de insuflação coberta deveria induzir um levantamento de chama mais intenso, uma vez que, segundo a mecânica dos fluidos, quando um escoamento de ar é restringido e apresenta um número de Mach inferior a 1 a velocidade do mesmo tem tendência a aumentar. Com uma maior velocidade do ar insuflado a quantidade de produtos de combustão arrastados deveria também aumentar.

Em relação à posição 1 foi seguida a mesma metodologia adotada até então, verificar qual a pressão mínima relativa no queimador que permite o funcionamento do esquentador nesta configuração com a ventilação ligada e seguidamente realizar ensaios incrementando a pressão do queimador até que se verifique a evacuação de produtos de combustão pela zona do queimador.

A Tabela 4.15 que se segue contém a gama de operação abrangida pela posição 1.

Tabela 4.15 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo E posição 1 e gás natural.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
6,5	6,4	14,8
7,8	7,6	16,4
10,0	9,8	18,9
12,6	12,4	21,4
14,8	14,5	23,0
15,7	15,4	23,6
17,0	16,7	24,4
17,7	17,4	24,7
19,0	18,6	25,2
20,5	20,1	25,7
21,5	21,1	25,9 (*)
22,5	22,1	26,0 (*)
23,5	23,0	26,1 (*)
25,0	24,5	26,0 (*)
26,0	25,5	25,9 (*)
27,0	26,5	25,7 (*)
29,0	28,4	25,0 (*)

(*) (os valores a *itálico* representam valores fora da gama de calibração por conseguinte a incerteza destes valores é grande).

Como já foi referido anteriormente, a partir de um determinado valor de pressão relativa do queimador, o método de determinação da potência de alimentação do esquentador torna-se ineficaz, motivo pelo qual alguns valores da tabela, os correspondentes à maior incerteza, estão em *itálico*.

Analisando a gama de operação desta configuração e comparando-a com a gama de operação dos ensaios em que se recorria à válvula borboleta denota-se que o valor mínimo de pressão relativa no queimador da posição 1 é superior a qualquer um dos valores mínimos das configurações referentes à borboleta. Tal indica que, em princípio, esta configuração provoca um maior arrastamento de ar em relação às outras, mas para se ter uma melhor perceção é necessário analisar as emissões da configuração em questão para a

correspondente gama de operação. Os resultados dos ensaios realizados estão representados na Figura 4.47.

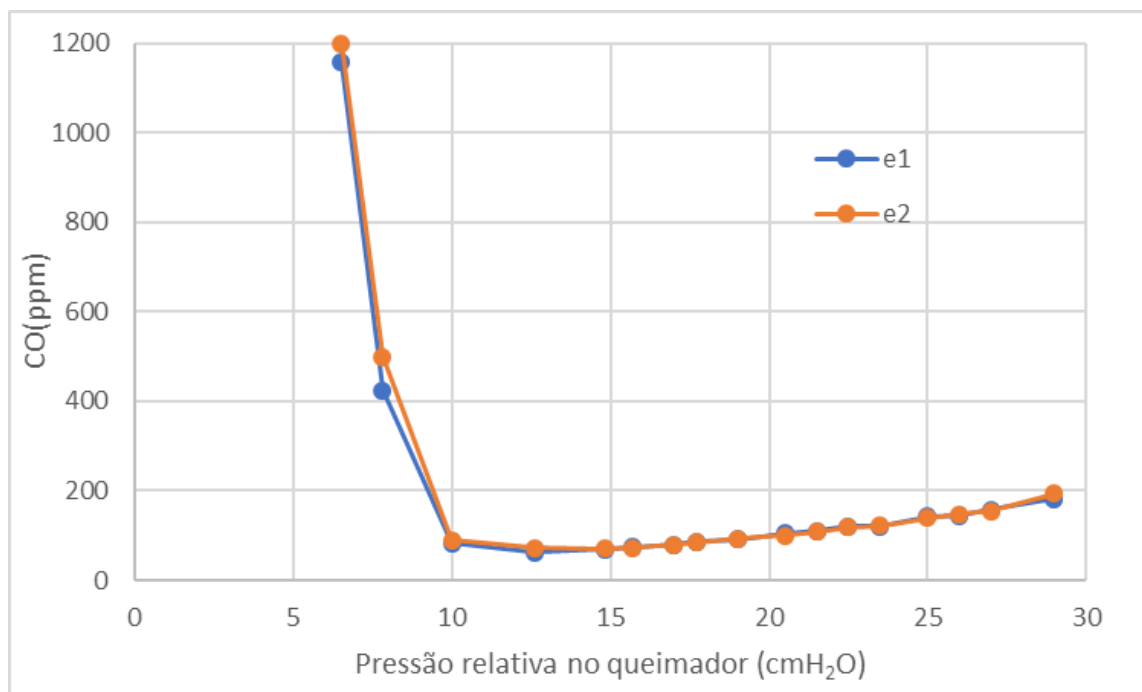


Figura 4.47 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo E posição 1 e gás natural.

No caso desta posição, recorrendo à Figura 4.47, denota-se que a reprodutibilidade dos ensaios é excelente, existindo apenas algumas diferenças nas pressões mais baixas (aproximadamente 60 ppm (v/v)). A Figura 4.48 que se segue apresenta um conjunto de pontos obtidos a partir da média dos dois ensaios apresentados anteriormente:

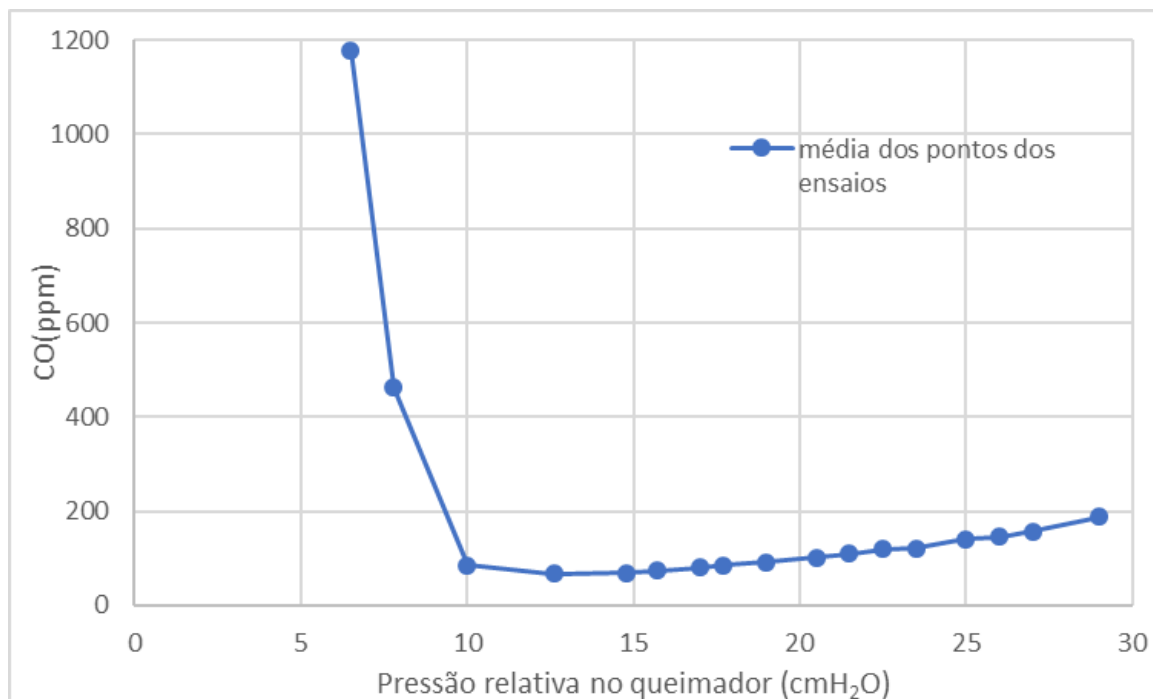


Figura 4.48 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo E posição 1 e gás natural.

Denota-se que o valor de pressão relativa, em que se obteve maiores emissões, foi o valor mínimo de 6,5 cmH₂O tendo sido registadas emissões de CO corrigido de 1193 ppm (v/v). Relativamente ao valor mínimo de concentrações de CO corrigido, foi de 74 pm (v/v) para a pressão relativa no queimador de 12,6 cmH₂O.

Depois de ensaiada a posição 1 realizou-se o ensaio da segunda posição, em que um terço da área por onde insuflado o ar está descoberta. A gama de operação ensaiada com esta solução é apresentada na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Pressões relativas no queimador e potências fornecidas para a configuração venturi protótipo E posição 2 e gás natural.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	Pressão relativa no queimador (mbar)	Potência fornecida (kW)
6,5	6,4	14,8
7,8	7,6	16,4
10,0	9,8	18,9
12,6	12,4	21,4
14,8	14,5	23,0
15,7	15,4	23,6
17,0	16,7	24,4
17,7	17,4	24,7
19,0	18,6	25,2
20,5	20,1	25,7
21,5	21,1	25,9 (*)
22,5	22,1	26,0 (*)
23,5	23,0	26,1 (*)
25,0	24,5	26,0 (*)
26,0	25,5	25,9 (*)
27,0	26,5	25,7 (*)

(*) (os valores a itálico representam valores fora da gama de calibração por conseguinte a incerteza destes valores é grande).

Era esperado que a gama de operação fosse diferente da obtida. Uma vez que, por princípio, o efeito de arrasto é maior quanto maior for a velocidade do escoamento de ar insuflado, era espectável que a pressão mínima neste caso fosse superior à do anterior, o que não se verificou. Também a pressão máxima diminui em relação ao caso anterior ao contrário do que seria de prever. Os factos referidos anteriormente indicam que uma diminuição da área por onde o ar é insuflado tende a piorar o desempenho. Para verificar esta indicação é necessário analisar os resultados experimentais dos dois ensaios, mas primeiro serão analisados os resultados experimentais da configuração 2 apresentados na Figura 4.49.

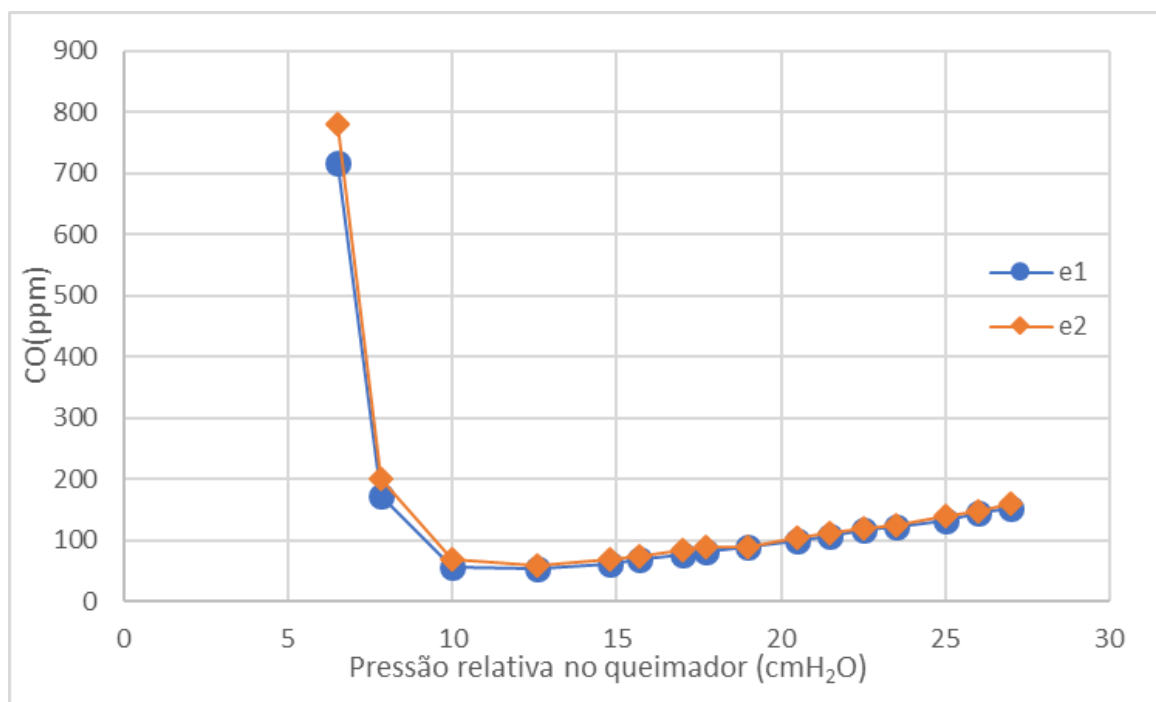


Figura 4.49 - Resultados experimentais dos dois ensaios realizados com configuração venturi protótipo E posição 2 e gás natural.

A reprodutibilidade dos ensaios é uma vez mais quase perfeita com exceção dos primeiros dois pontos que devido às suas localizações são de elevada incerteza. A Figura 4.50 apresenta a média dos pontos dos dois ensaios realizados.

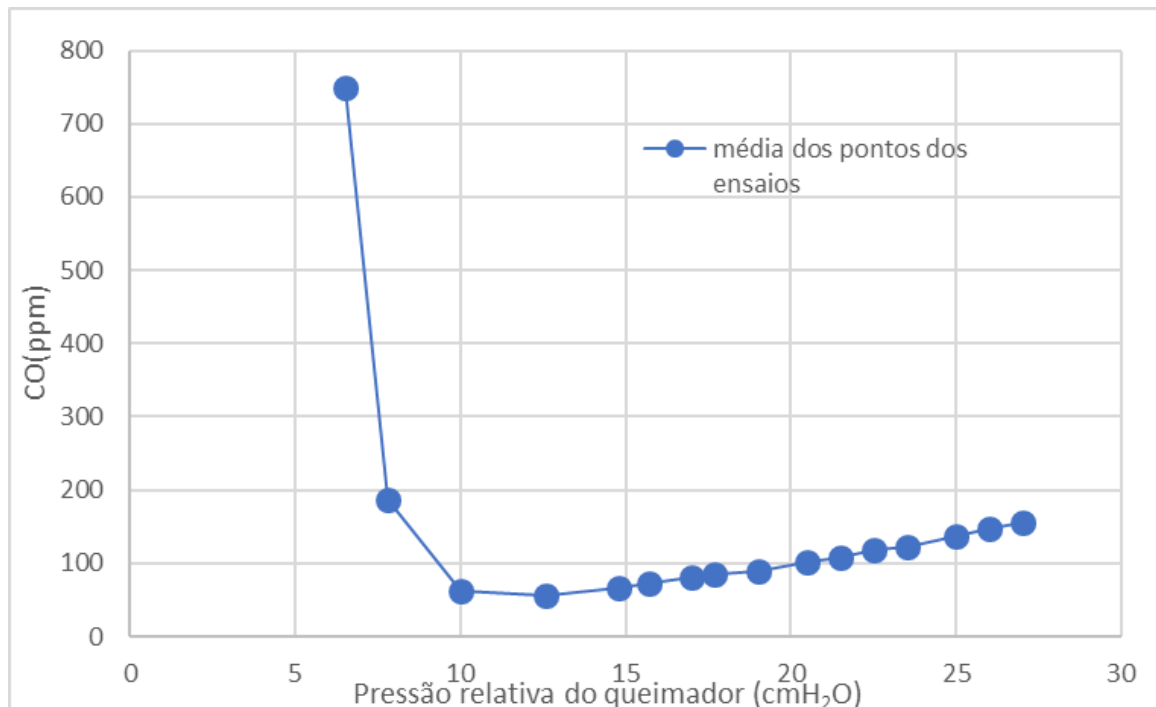


Figura 4.50 - Média dos resultados obtidos dos ensaios realizados com configuração venturi protótipo E posição 2 e gás natural.

Da análise da Figura 4.50 verifica-se a existência de um máximo para a concentração de CO corrigido de 757 ppm (v/v) para o ponto de pressão relativa mínima no queimador

atingida neste ensaio. O mínimo com o valor de 65 ppm (v/v) foi registado para a pressão de 12,6 cmH₂O. O ponto com a pressão relativa máxima deste ensaio teve um valor de emissões de 156 ppm (v/v).

Resta então realizar uma comparação dos resultados experimentais das duas soluções ensaiadas anteriormente (posição 1 e 2). A Figura 4.51 apresenta as médias dos pontos dos ensaios das duas soluções, essencial para ser possível tecer comparações.

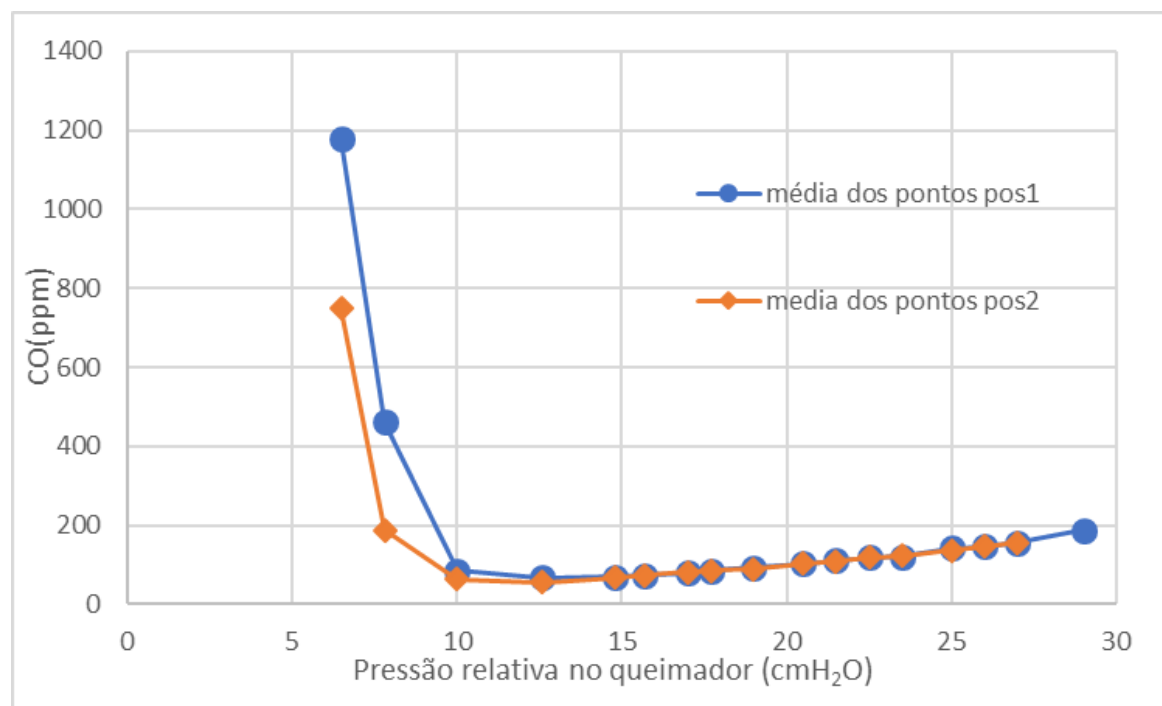


Figura 4.51 - Conjunto dos pontos médios obtidos nos dois ensaios configuração venturi protótipo E posições 1 e 2 e gás natural

Analisando os resultados patentes na Figura 4.51 denota-se que as diferenças significativas estão presentes nas baixas potências (baixas pressões do queimador) com a posição 2 a apresentar melhores resultados do que a posição 1. O facto das emissões nas baixas potências serem inferiores na posição 2 em relação à posição 1 e também a primeira posição referida apresentar uma potência máxima menor leva a concluir que para essa posição o fenómeno de levantamento de chama é menor em comparação com a posição 1. Isto significa que uma redução da área por onde ocorre a insuflação do ar leva a um aumento do efeito de arrasto pretendido levando a emissões mais elevadas.

Depois de realizar este primeiro conjunto de ensaios relativo às duas posições 1 e 2 referidas anteriormente foi realizada uma experiência, já referida anteriormente, com o fim de testar o efeito de diminuir a secção de entrada de ar no ventilador nos resultados das emissões. Como tinha sido referido, pensava-se que o ventilador não insuflava todo o ar possível para a zona pretendida. Verificou-se a existência de uma ligeira corrente de ar numa das secções do ventilador e de forma a extinguir essa corrente e conseguir que todo o ar captado pelo ventilador fosse insuflado para o interior da chaminé, começou-se por reduzir ligeiramente a secção de entrada de ar com recurso a fita de alumino até que a corrente de ar se extinguísse. A Figura 4.52 mostram a entrada de ar antes e depois do final da redução de secção.

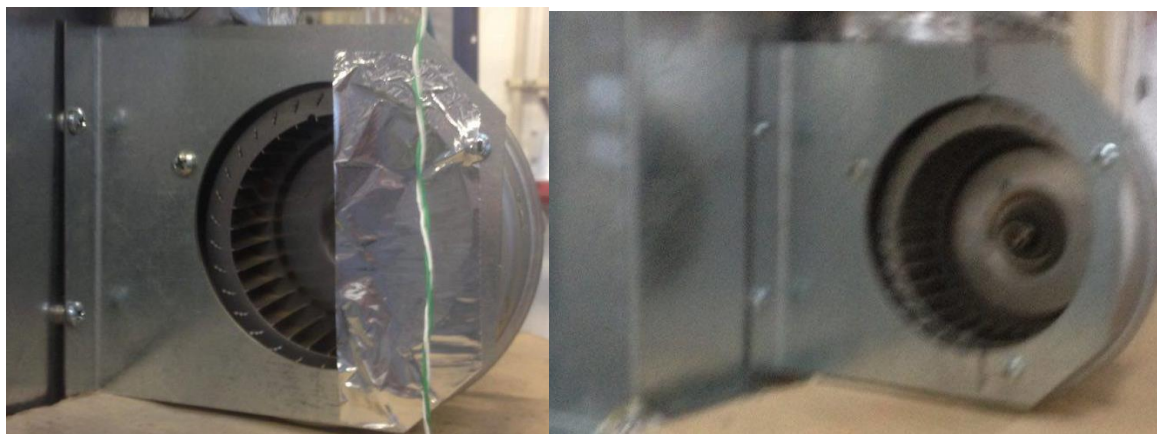


Figura 4.52 - Fotografias do ventilador da chaminé venturi, à esquerda parcialmente tapada com fita de alumínio e à direita completamente livre.

Foram então repetidos os ensaios, para as duas posições e concluiu-se que a obstrução parcial da entrada de ar do ventilador:

- Permitia uma melhoria nas emissões nas duas posições para pressões relativas no queimador mais baixas (6,5 e 7,8 cmH₂O);
- Conduzia a emissões significativamente maiores, em cerca de 30 a 35 ppm, em todos os pontos com pressão relativa do queimador superior a 10,0 cm H₂O.

Pelos fatos referidos anteriormente foi feita a opção de retirar redução de seção e realizar todos os ensaios que se seguissem sem a mesma.

Depois de realizados os ensaios analisados anteriormente, foi novamente montada a válvula borboleta e foram retirados todos os componentes que tinham sido adicionados para realizar os ensaios das posições 1 e 2. Foi também montado o novo topo, apresentado na Figura 4.53, assim como uma conduta de saída para a realização de ensaios o mais próximo possível da situação de funcionamento com esta nova solução.



Figura 4.53 - Aspeto final do topo do protótipo C.

Uma vez mais verificou-se que não era possível cumprir toda a gama de funcionamento pretendida para o esquentador. Apesar da solução apresentada funcionar até à pressão

relativa de 12,6 cm H₂O, a partir da mesma verificava-se que os produtos de combustão saíam pela zona do queimador, fenómeno mostrado na Figura 4.22. Conclui-se então que o funcionamento deste protótipo da forma que foi concebido não era possível tendo sido identificado duas possíveis causas para o mesmo:

- A área que permitia o escoamento dos gases de combustão para a saída do esquentador era muito reduzida, esta redução era causada pela grande área existente para a insuflação de ar;
- Verificou-se experimentalmente, ligando apenas o sistema de ventilação que a ventilação associada à restrição da válvula borboleta em qualquer uma das posições da mesma criava uma lâmina de ar que não permitia a ascensão dos produtos de combustão, conduzindo a que a partir de uma determinada pressão do queimador os mesmos gases fossem forçados a sair pela zona do queimador. Isto é, ocorria um fenómeno de tamponamento dos gases de combustão face ao ar insuflado.

5-Injeção de ar

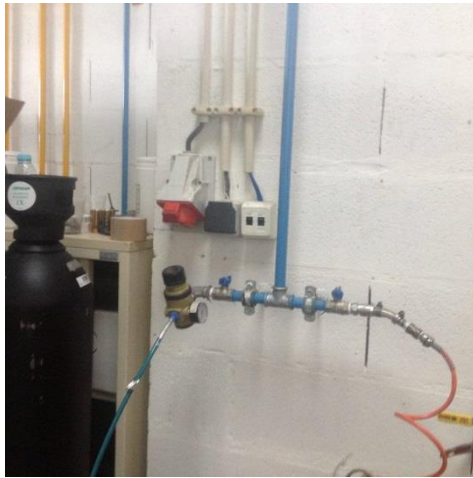
5.1-Chaminé venturi com injeção de ar.

Já foi referido anteriormente que, durante as experiências, surgiu a ideia de recorrer a ar comprimido para tentar induzir arrasto dos produtos de combustão para o exterior da chaminé. No entanto, esta ideia só foi possível pôr em prática devido à existência de uma rede de ar comprimido no laboratório de combustão. Numa primeira fase tentou-se executar esta ideia com a chaminé de efeito venturi, analisada no capítulo anterior. Para tal, foi necessário retirar, uma vez mais, a válvula borboleta e determinar qual a melhor forma de injetar ar comprimido na chaminé. Optou-se por associar um redutor de pressão à alimentação de ar comprimido, de forma a ser possível ajustar a pressão de injeção de ar comprimido e utilizar um tubo de poliuretano de 6 mm de diâmetro interno para efetuar a injeção do ar para dentro da chaminé. O tubo de poliuretano foi fixado com recurso a fita de alumínio à divisória entre os dois compartimentos da chaminé e direcionado para a saída da mesma. A Figura 5.1 mostra imagens do sistema de alimentação de ar comprimido, do tubo de poliuretano na chaminé e também do aspeto final da instalação após montagem.

Seguidamente iniciaram-se os testes a esta configuração. Definiu-se uma pressão relativa de injeção do ar comprimido de 1 bar, regulada através do manoredutor, e tentou verificar-se se era possível percorrer a gama de operação pretendida para as duas chaminés ensaiadas inicialmente, ou seja, de 2,0 a 17,7 cmH₂O. A configuração em análise revelou-se funcional na gama pretendida e então foi necessário definir quais as pressões de injeção que seriam ensaiadas. Optou-se por realizar quatro ensaios para diferentes pressões relativas de ar comprimido, como teste ao conceito. As quatro pressões relativas ensaiadas foram 0,5, 0,6, 0,7 e 1,25 bar.

A metodologia de exposição de resultados experimentais será alterada a partir deste capítulo sob pena de torná-la muito repetitiva e pouco compreensível. Assim os resultados experimentais obtidos para as diferentes pressões de injeção ensaiadas serão apresentados numa mesma figura à qual se seguirá um comentário da mesma.

A Figura 5.2 apresenta os resultados obtidos para as pressões de injeção anteriormente referidas.



A



B



C

Figura 5.1 - A- Fotografia da instalação de ar comprimido; B- Fotografia do aspeto final do esquentador com a configuração atual; C- Fotografia do tubo de poliuretano colocado no compartimento de insuflação de ar da chaminé.

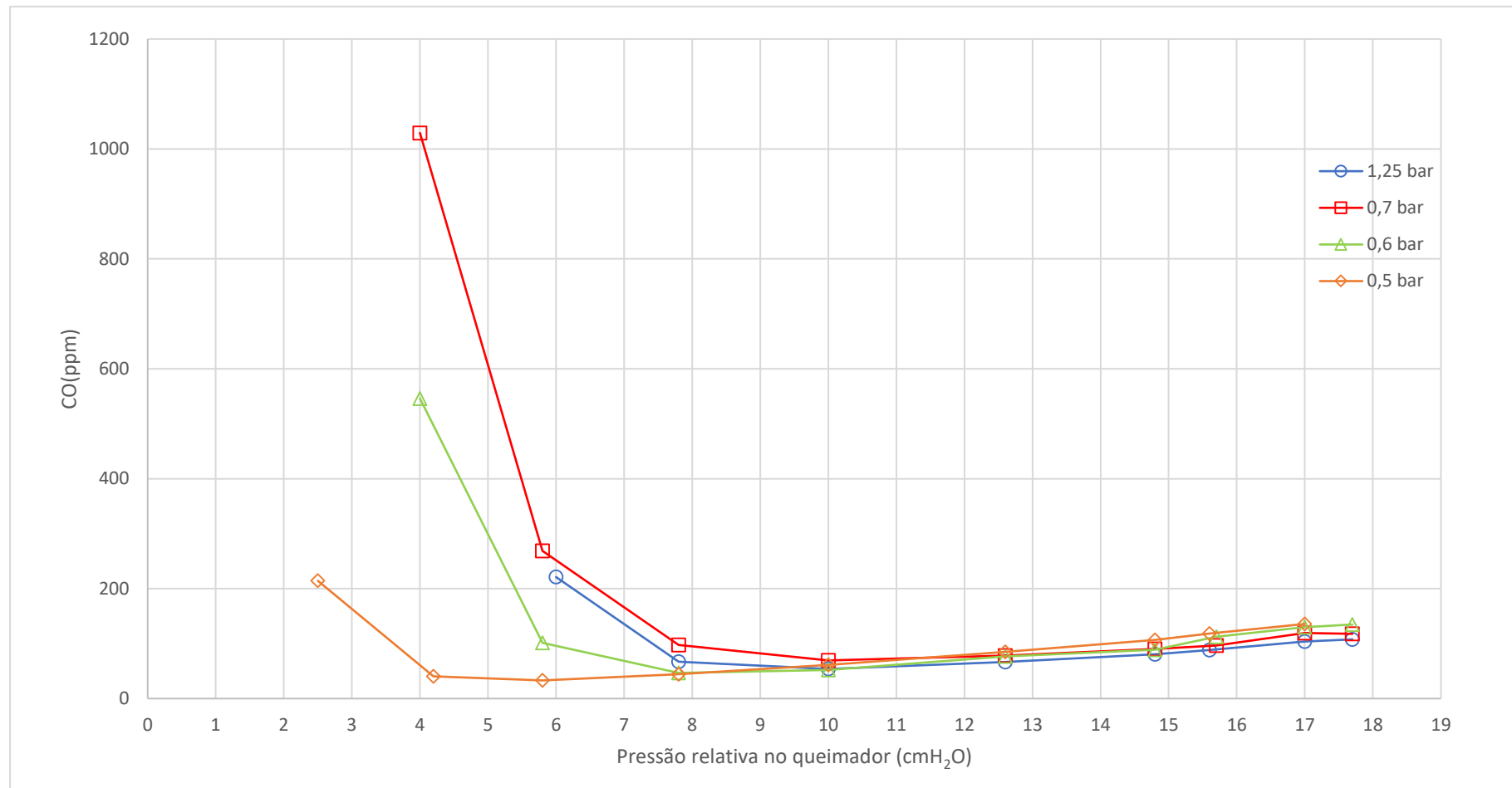


Figura 5.2 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com configuração venturi e injeção de ar comprimido tendo como combustível gás natural.

A Figura 5.2 tem de ser analisada segundo duas componentes, uma componente relacionada com a gama de operação do esquentador obtida para cada ensaio e uma componente referente às concentrações de CO corrigido registadas para o mesmo ensaio.

Para o ensaio de 0,5 bar verifica-se que não é possível cumprir a gama de operação pretendida, de 2,0 a 17,7 cmH₂O uma vez que a gama experimental verificada para o mesmo teve como mínimo 2,5 cmH₂O e como máximo 17,0 cmH₂O. No que se refere às emissões, obteve-se um máximo de concentração de CO corrigido de 214 ppm (v/v) para a pressão de 2,5 cmH₂O e um mínimo de 32 ppm (v/v) para a pressão de 5,8 cmH₂O. De referir ainda que para o valor máximo de pressão relativa no queimador, foi obtido um valor de emissões de 138 ppm (v/v).

Para o ensaio de 0,6 bar, observa-se que o incremento da pressão de insuflação do ar faz diminuir a gama de operação do esquentador, uma vez que o funcionamento do esquentador para pressões inferiores a 4,0 cmH₂O torna-se muito instável. A gama de operação obtida teve como mínimo os 4,0 bar referidos anteriormente e como máximo os 17,7 cmH₂O pretendidos. Alterando o foco da análise para as emissões gasosas, registou-se, para o ponto de pressão do gás no queimador de 4,0 cmH₂O o valor máximo de concentração de CO corrigido de 648 ppm (v/v). Observou-se, também, que o valor mínimo de concentração de CO corrigido é de 47 ppm (v/v) para o valor de pressão relativa do queimador de 7,8 cmH₂O e que para o valor de pressão relativa máxima no queimador as emissões têm o valor de 134 ppm (v/v).

Já para a pressão injeção de 0,7 bar inferiu-se que, ao contrário do que seria espectável, a gama de funcionamento não diminuiu, sendo idêntica à do ensaio anterior. No entanto, seria previsível que o contraste entre os dois ensaios fosse confirmado pela diferença presente nas emissões registadas, o que se verificou. Assim, as emissões para o ponto de pressão relativa do queimador mínima foram de 1015 ppm (v/v), sendo quase o dobro das do ensaio de 0,6 bar no mesmo ponto. O ponto correspondente ao valor mínimo de emissões foi de 10,0 cmH₂O tendo como valor 54 ppm (v/v). Em relação ao ponto de pressão relativa máxima de 17,7 cmH₂O, o valor de teor de CO corrigido registado foi de 118 ppm (v/v).

Para o último ensaio realizado, com a pressão de injeção de 1,25 bar, registou-se, uma vez mais uma diminuição da gama de operação do esquentador, tendo-se registado como novo valor de pressão mínima relativa no queimador 6,0 cmH₂O e tendo-se mantido o máximo de 17,7 cmH₂O. No que se refere às concentrações de CO corrigido obtidas para este ensaio, para 6,0 cmH₂O foi registado o valor de 220 ppm (v/v), que corresponde ao valor máximo do ensaio. O valor de emissões mínimo foi de 54 ppm (v/v) para a pressão relativa de 10,0 cmH₂O. É ainda importante referir o novo valor de CO corrigido registado para o ponto de pressão relativa máxima, de 108 ppm (v/v).

Fazendo uma análise geral dos resultados obtidos vem que:

- À medida que se aumenta a pressão do ar comprimido a gama de operação vai diminuindo, nomeadamente através do aumento da pressão mínima relativa do queimador;
- Para pressões relativas do queimador mais baixas, verifica-se um aumento das emissões gasosas com o aumento da pressão do ar comprimido;
- A pressão de injeção de ar que se revela mais interessante é a de 0,5 bar uma vez que, permite o funcionamento do esquentador a pressões relativas do queimador menores sem comprometer em demasia as mais elevadas.

5.2-Chaminé standard com injeção de ar

5.2.1-Injetor 4 mm

Finalizados os ensaios anteriores e a sua análise, pensou-se em aplicar o conceito anterior, que se provou funcional, à chaminé standard. A chaminé standard corresponde, como já foi dito, a uma chaminé que funciona tendo como o princípio a convecção natural tendo sido projetada e otimizada pela BOSCH para esse efeito. O cenário ideal para o conceito de injeção de ar ser aplicável e viável na vida real seria o de se utilizar esta chaminé convencional, uma vez que não estaria envolvida qualquer alteração à sua morfologia sendo apenas necessária a introdução de um mecanismo capaz de injetar o ar, o que levaria à minimização de custos. De forma a poder aplicar esta alteração à chaminé seria necessário arranjar uma forma de introduzir e fixar um injetor na mesma, assim como encontrar um injetor metálico, uma vez que o tubo de poliuretano não resistirá à temperatura de chama a que estará sujeito no caso de ser utilizado na chaminé standard. Optou então por utilizar-se um injetor metálico com um diâmetro interno de 4 milímetros. A Figura 5.3 apresenta imagens do injetor metálico utilizado.



A



B



C

Figura 5.3 - Fotografias do injetor metálico de 4 mm; A e C vista lateral B- vista de cima.

De forma a garantir a fixação e o funcionamento da solução, optou-se por tentar fixar a saída do injetor o mais próximo possível da saída da chaminé como mostra a Figura 5.4.



Figura 5.4-Fotografia da fixação do injetor na chaminé standard.

Seguidamente, montou-se a chaminé standard no esquentador e ligou-se um tubo de poliuretano entre o redutor de pressão da linha de ar comprimido e o injetor metálico concluindo a preparação do esquentador para o ensaio. Para testar esta nova configuração, escolheram-se três pressões relativas de injeção de ar com base nos testes realizados com a chaminé anterior. As pressões escolhidas foram 0,5, 0,6 e 0,7, tendo ainda os ensaios relativos á pressão de 0,6 bar sido realizados de duas formas, um sem a tampa de proteção colocada e outro com este acessório. O motivo de se efetuar o ensaio anteriormente referido sem a tampa prendeu-se com a necessidade de verificar qual a gama de operação do esquentador com esta configuração uma vez que a pressão máxima fica definida quando se inicia a saída de produtos de combustão pela zona do queimador, obviamente por motivos de segurança o esquentador nunca poderia operar sem tampa. A Figura 5.5 que se segue mostra o aspeto do esquentador com e sem a tampa referida anteriormente, assim como o tubo de poliuretano que conecta a saída do redutor (ausente da figura) ao injetor metálico.



Figura 5.5 - Fotografias do esquentador com e sem tampa.

i) Ensaaios

Tal como foi realizado na seção anterior deste capítulo, a apresentação de resultados e discussão dos mesmos será realizada de uma forma mais expedita. A Figura 5.6 que se segue apresenta os resultados dos ensaios realizados com injetor de 4 mm de diâmetro interno e pressões de injeção previamente mencionadas. Como no caso dos ensaios realizados para a chaminé anterior serão analisadas as duas componentes dos resultados, gama de operação e emissões de CO corrigido.

Para o primeiro ensaio realizado, 0,6 bar sem tampa, a gama de operação obtida, indicia que a configuração sujeita a ensaio pode constituir uma solução interessante. A gama da mesma chaminé sem o mecanismo de injeção de ar varia entre os 2,0 e os 17,7 cm de H₂O, com a injeção, apesar de ter início nos 4 cmH₂O, é possível ir até aos 22 o que representa um ganho de operação muito interessante. Já no que diz respeito às emissões, é visível, a partir da Figura 5.6, que o critério de as emissões de CO corrigido não ultrapassarem os 250 ppm (v/v) é cumprido. O ponto para o qual as emissões são máximas corresponde ao mínimo da gama de operação, ou seja, 4,0 cmH₂O com um valor de 243 ppm (v/v). O mínimo obtido foi de 65 ppm (v/v) para o ponto de pressão relativa do queimador de 10,0 cmH₂O. De referir ainda que para o ponto de pressão relativa do queimador máxima foi obtido um valor de concentração de CO corrigido de 131 ppm (v/v).

Para o ensaio com pressão de injeção de 0,6 bar, com a tampa colocada sobre o esquentador, verifica-se que a gama de operação é idêntica à do ensaio anterior, a presença ou não da tampa não possui qualquer influência na gama de operação do esquentador. No que se refere às emissões, verifica-se que o ponto mínimo da gama de operação corresponde ao valor máximo de emissões de CO corrigido de 404 ppm (v/v). O valor mínimo das concentrações de CO corrigido foi registado uma vez mais para o ponto de pressão relativa do queimador de 10,0 cmH₂O sendo o valor 79 ppm(v/v). Para o novo máximo da gama de operação de 21,0 cmH₂O registou-se um valor de 113 ppm (v/v). Portanto, a tampa aparenta ter alguma influência nas emissões obtidas, piorando-as ligeiramente (exceção para o ponto de pressão relativa máxima), no entanto ligeiros desacertos na regulação da pressão podem levar a esta discrepância, principalmente no ponto de pressão relativa mínima, uma vez que é uma zona especialmente sensível a pequenas variações no caudal de combustível.

O terceiro ensaio a ser realizado foi com pressão de injeção de 0,7 bar. Observa-se pela Figura 5.6 que a gama de operação do esquentador permaneceu inalterável, apesar do aumento da pressão de injeção. Pelo contrário, as emissões de CO corrigido sofreram alterações. No ponto correspondente ao mínimo da gama de operação, o valor de CO corrigido disparou para os 1029 ppm (v/v). O valor mínimo de emissões foi, uma vez mais, registado para o ponto de pressão relativa do queimador de 10,0 cmH₂O com o valor de 69 ppm (v/v) e o valor registado para o ponto máximo da gama de operação foi de 118 ppm (v/v). Denota-se então que, o aumento de pressão de injeção conduziu:

- A um aumento significativo no valor máximo de emissões para a pressão mínima;
- A uma ligeira diminuição no valor mínimo de emissões;
- A um ligeiro aumento no valor de emissões correspondente ao ponto máximo da gama de operação.

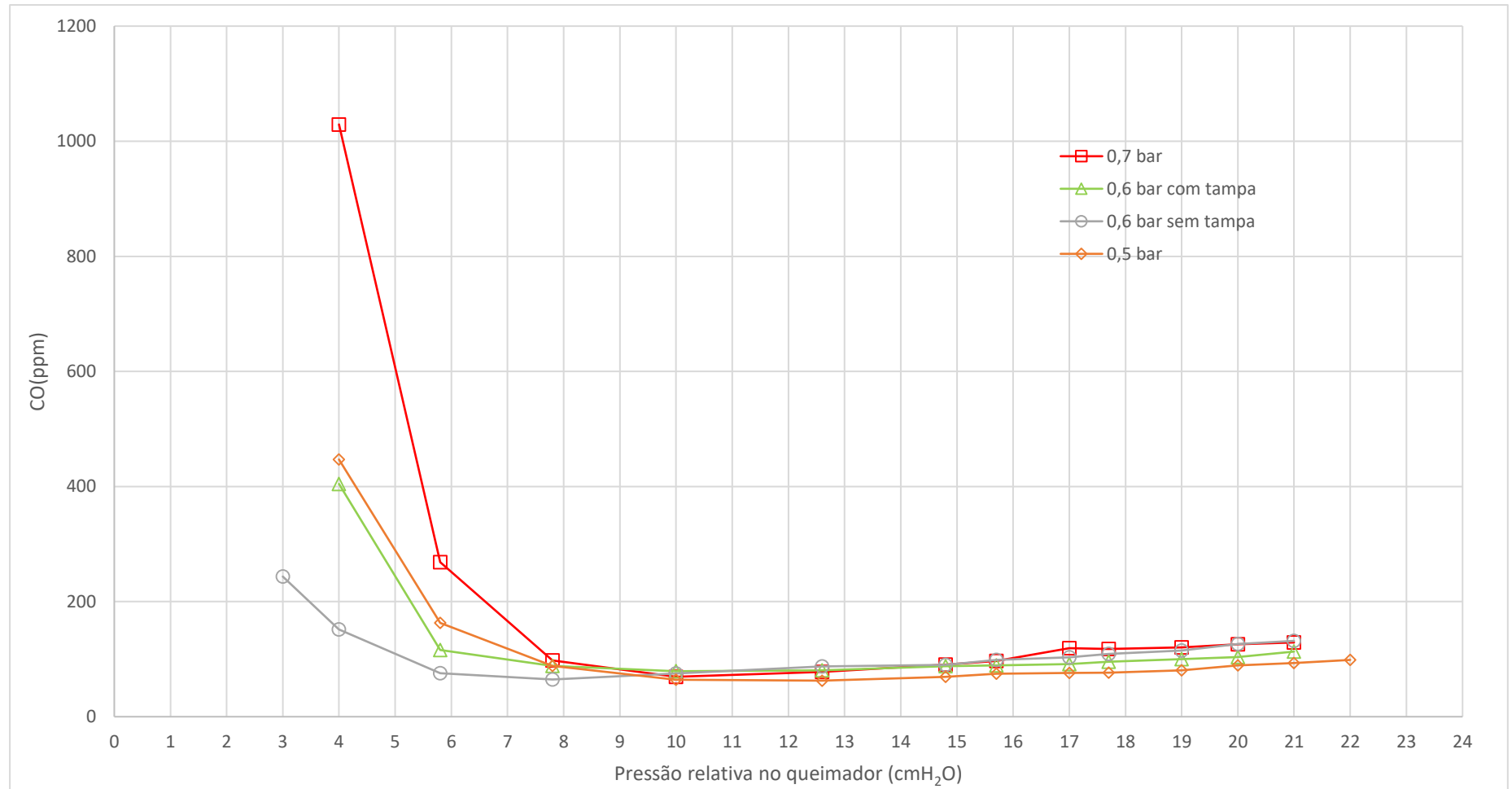


Figura 5.6- Resultados experimentais dos ensaios realizados com configuração standard com injeção de ar comprimido (injetor 4 mm) e tendo como combustível gás natural.

O último ensaio realizado, de 0,5 bar de pressão de injeção, teve como finalidade observar quais as implicações de uma diminuição da pressão de injeção na gama de operação e nas emissões obtidas. Com a diminuição da pressão de injeção, diminuiu também a pressão relativa mínima de operação no queimador de 4,0 para 3,0 cm H₂O sem ser necessário diminuir o valor máximo de pressão, que se manteve nos 21 cmH₂O, aumentando assim a amplitude gama de operação do esquentador. Quanto às emissões de CO corrigido, registou-se o valor de 447 ppm(v/v) para o ponto de pressão relativa no queimador mínima de 3,0 cmH₂O. O valor mínimo de emissões fixou-se em 63 ppm (v/v), tendo sido obtido para a pressão relativa de 10,0 cmH₂O, assim como nos casos anteriores. Relativamente ao ponto de pressão máxima relativa, obteve-se um valor de concentração de CO corrigido de 99 ppm(v/v).

Podem ainda retirar-se algumas ilações do conjunto de ensaios em análise:

- A pressão de injeção de ar que permite obter uma gama de operação mais ampla é a de 0,5 bar;
- Como era esperado e já foi referido, para a pressão relativa de injeção de 0,7 bar o fenómeno de levantamento de chama é mais intenso nas pressões relativa mais baixas, diminuindo a amplitude da gama de operação e aumentando as emissões nas baixas potências. No entanto, nas pressões relativas médias e altas esse fenómeno já não tem uma influência tão grande nas diferenças registadas entre os ensaios
- Tanto nas baixas como nas altas pressões relativas, a pressão de injeção de ar que apresenta melhores resultados em termos de concentrações de CO corrigido é a de 0,5 bar.

5.2.2-Injetor 2 mm

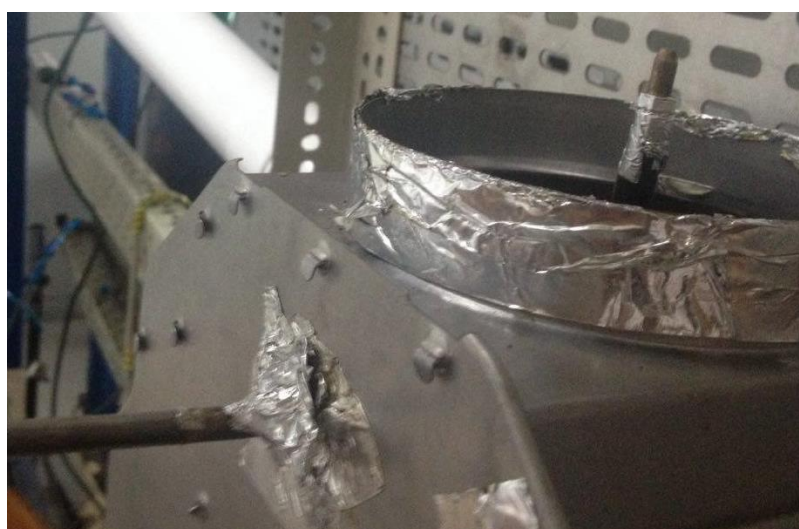
Quando se efetuou a alteração de chaminé, de efeito venturi para a convencional ou standard, também se trocou o injetor, do tubo de poliuretano para um tubo metálico de 4 mm de diâmetro interno. Isto teve como resultado uma melhoria na gama de operação do esquentador assim como nas emissões de CO corrigido. A gama de operação obtida nos ensaios anteriores ainda não é a pretendida, já que o mínimo da mesma deveria ser o valor de 2,0 cmH₂O. Também as emissões de CO corrigido estão longe de cumprir os critérios limite estipulados, de 250 ppm (v/v). Para tentar corrigir esta situação, surgiu a ideia de recorrer a um injetor com uma seção de saída menor. Este injetor, colocado na saída do tubo metálico da Figura 5.3 teria como objetivo introduzir uma perda de carga adicional, uma vez que estrangularia ainda mais o fluxo de ar injetado, diminuindo o caudal de ar injetado e como consequência diminuía também o efeito de arrasto de produtos de combustão, o que poderia contribuir para que fosse possível atingir pressões mais baixas e obter valores de concentrações de CO corrigido menores. Para testar a hipótese utilizou-se um injetor de 2 mm. A Figura 5.7 que se segue mostra o injetor de 2 mm utilizado, o mesmo injetor associado ao tubo anteriormente existente e o aspeto final da sua associação à chaminé.



A



B



C

Figura 5.7- A- Fotografia do injetor de 2 mm; B- Fotografia do injetor de 2mm acoplado ao injetor de 4 mm; C-Aspetto da montagem do injetor na chaminé standard.

i) Ensaios

Com a chaminé montada já com o novo injetor repetiram-se os ensaios para as pressões selecionadas para o conjunto de ensaios anterior, de forma a manter a coerência para quando for necessário efetuar comparações e retirar conclusões das mesmas. A única variável existente será então a secção de saída do injetor. As pressões ensaiadas foram, como já foi referido anteriormente 0,5, 0,6 e 0,7 bar relativos. A Figura 5.8 apresenta os resultados obtidos da realização destes ensaios.

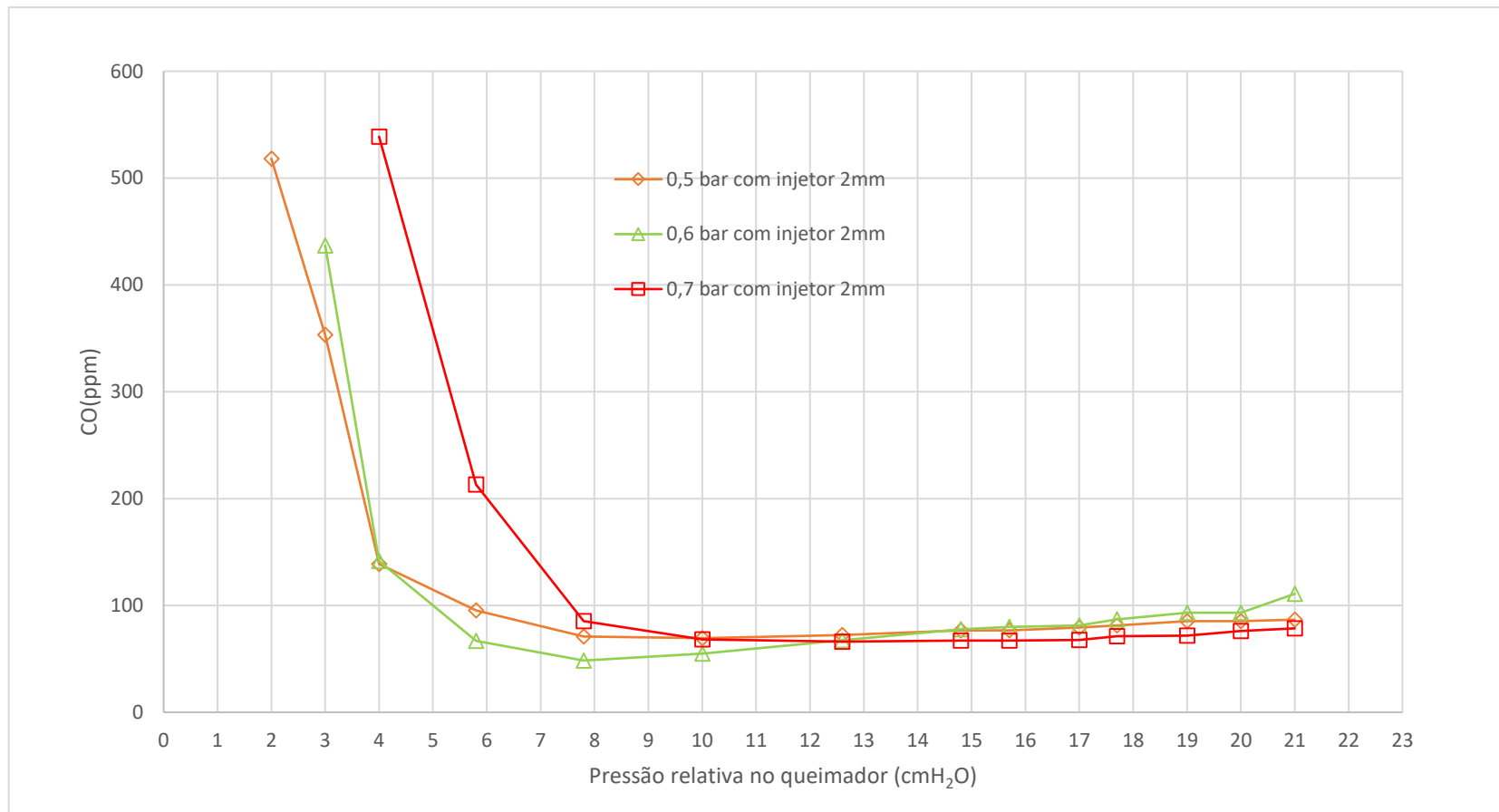


Figura 5.8 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com configuração standard com injeção de ar comprimido (injetor 2 mm) e tendo como combustível gás natural.

Como nos dois subcapítulos anteriores, a Figura 5.8 será analisada para cada uma das pressões ensaiadas com base na sua gama de operação e em alguns valores chave das concentrações de CO corrigido obtidas.

O primeiro ensaio realizado, após a colocação do injetor de diâmetro menor, foi para a pressão de injeção de ar de 0,5 bar. Com o novo injetor, a gama de operação aumenta a sua amplitude, permitindo atingir um novo mínimo de pressão relativa do queimador de 2,0 cmH₂O. Com este novo mínimo, já se verifica que esta solução permite o esquentador funcionar em toda a gama de operação pretendida de 2,0 a 17,7 cmH₂O, para além de permitir atingir pressões relativas do queimador superiores ao pretendido. No entanto o valor obtido para as emissões de CO corrigido de 518 ppm (v/v) está longe do estipulado como máximo (250 ppm (v/v)). O mínimo de emissões de CO corrigido obtido foi de 69 ppm (v/v) para a pressão relativa no queimador de 10,0 cmH₂O e o valor das emissões para o ponto de pressão máxima foi de 86 ppm. Portanto, o ensaio em questão apresenta valores de emissões excelentes para pressões superiores a 5 cm H₂O.

O segundo ensaio a ser realizado foi relativo à pressão de injeção de 0,6 bar. Ao contrário da pressão de injeção de 0,5 bar, com 0,6 bar já não é possível atingir os 2,0 cmH₂O, mantendo-se, contudo, a pressão relativa máxima de 21,0 cmH₂O. Para este ensaio foi obtido um máximo de emissões de CO corrigido de 437 ppm (v/v) para a pressão mínima relativa no queimador de 3 cmH₂O. O mínimo de emissões foi obtido para 7,8 cmH₂O com o valor de 48 ppm (v/v). Para a pressão relativa máxima no queimador de 21,0 cmH₂O foi registado o valor de 110 ppm (v/v).

A última pressão de injeção a ser ensaiada foi de 0,7 bar. A gama de operação para esta pressão de injeção diminuiu em relação à anterior, tendo-se registado um aumento do seu mínimo de 3,0 para 4,0 cmH₂O. Em relação às emissões, registou-se a ocorrência de um valor máximo de 539 ppm (v/v) para o ponto de pressão relativa no queimador de 4,0 cm H₂O. O valor mínimo de emissões obtido foi de 66 ppm (v/v) para 12,6 cmH₂O. Para o ponto de pressão relativa máxima, registou emissões de 78 ppm (v/v) o menor valor para o mesmo ponto dos três ensaios.

Depois de analisados os ensaios em separado, é importante tecer comparações entre eles e retirar algumas indicações:

- Para pressões relativas do queimador muito baixas, entre 2,0 e 4,0 cmH₂O, apenas a pressão de injeção de 0,5 bar consegue atingir a pressão de 2,0 cmH₂O, sendo também esta pressão de injeção que apresenta resultados mais favoráveis;
- Na gama intermédia, entre 5,0 e 12,6 cmH₂O, regista-se que a pressão de 0,6 bar apresenta as concentrações de CO corrigido mais baixas;
- Na restante gama, correspondente às pressões mais elevadas, a pressão de injeção de 0,7 bar é a que apresenta, como era esperado, melhores resultados;
- Como já se tinha verificado anteriormente, também nestes ensaios um incremento na pressão de injeção de ar conduz a uma intensificação do arrasto dos produtos de combustão, conduzindo a uma diminuição da amplitude da gama de operação. Aliado a este facto ocorre um aumento das emissões nos pontos de pressão relativa mínimos da respetiva gama, que corresponde a um deslocamento da curva de funcionamento do esquentador para a direita.
- Apesar de todos os pontos referidos anteriormente, a pressão de injeção que se deve considerar é a de 0,5 bar uma vez que é a única que permite cumprir toda a gama.

5.3-Comparação entre as melhores soluções das diversas configurações

Antes de iniciar a comparação entre chaminés, é necessário inferir em primeiro lugar, qual a melhor solução obtida utilizando a injeção de ar. A partir das figuras analisadas verificou-se que em relação á pressão de injeção, os melhores resultados obtidos são para 0,5 bar, uma vez que é a pressão a que correspondem emissões de CO corrigido mais baixas nas pressões relativas no queimador inferiores, não comprometendo as emissões nas pressões mais elevadas. A Figura 5.9 apresenta os melhores resultados obtidos dos ensaios realizados para a chaminé venturi com o injetor de poliuretano, chaminé standard e injetor de 4 e 2 mm.

Analisando a Figura 5.9, verifica-se que, dos três melhores ensaios das configurações de injeção de ar testadas o único que cumpre o critério relativo à gama de operação é o de 0,5 bar com injetor de 2 mm uma vez que é o único que apresenta permite ao esquentador operar para a pressão de 2,0 cmH₂O. No entanto, no que se refere a emissões, verifica-se que apenas um dos ensaios, chaminé venturi 0,5 bar, cumpre o requisito de apresentar em toda a gama de funcionamento emissões inferiores a 250 ppm (v/v). O ideal seria conseguir a conjugação entre a gama de operação obtida no ensaio de 0,5 bar e injetor de 2 mm e as emissões obtidas com a chaminé venturi entre as pressões relativas do queimador de 2,5 a 10,0 cmH₂O, mas uma vez que tal não é possível optou-se por utilizar como referência o ensaio chaminé standard 0,5 bar com injetor de 2 mm.

Seguidamente foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos para diferentes as diferentes chaminés testadas, chaminé standard convecção natural, chaminé INEGI e chaminé standard com injeção de ar. A Figura 5.10 apresenta os resultados dos ensaios anteriormente referidos.

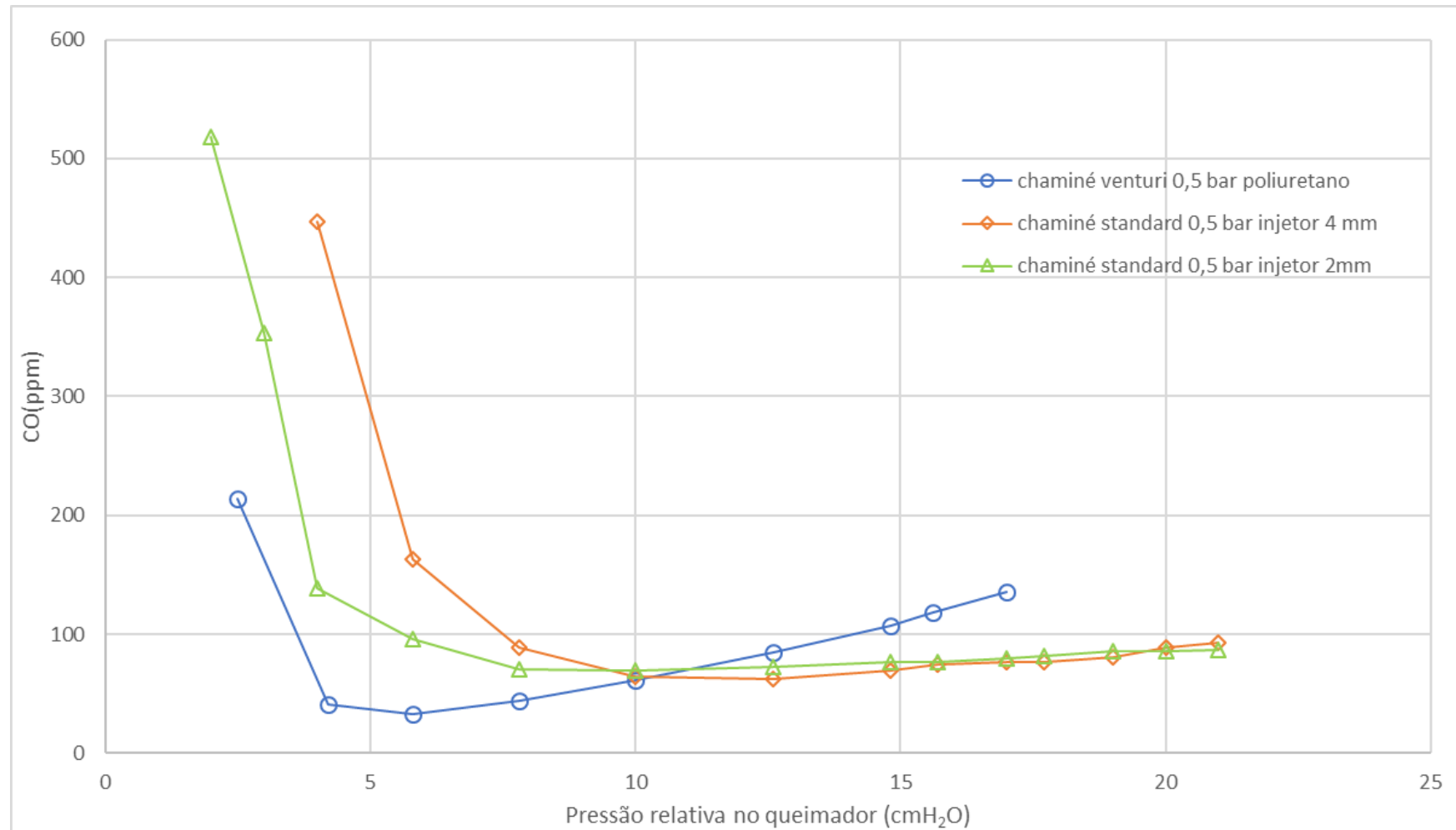


Figura 5.9 - Conjunto dos melhores resultados experimentais obtidos para as diversas configurações em que foi utilizada a injeção de ar comprimido.

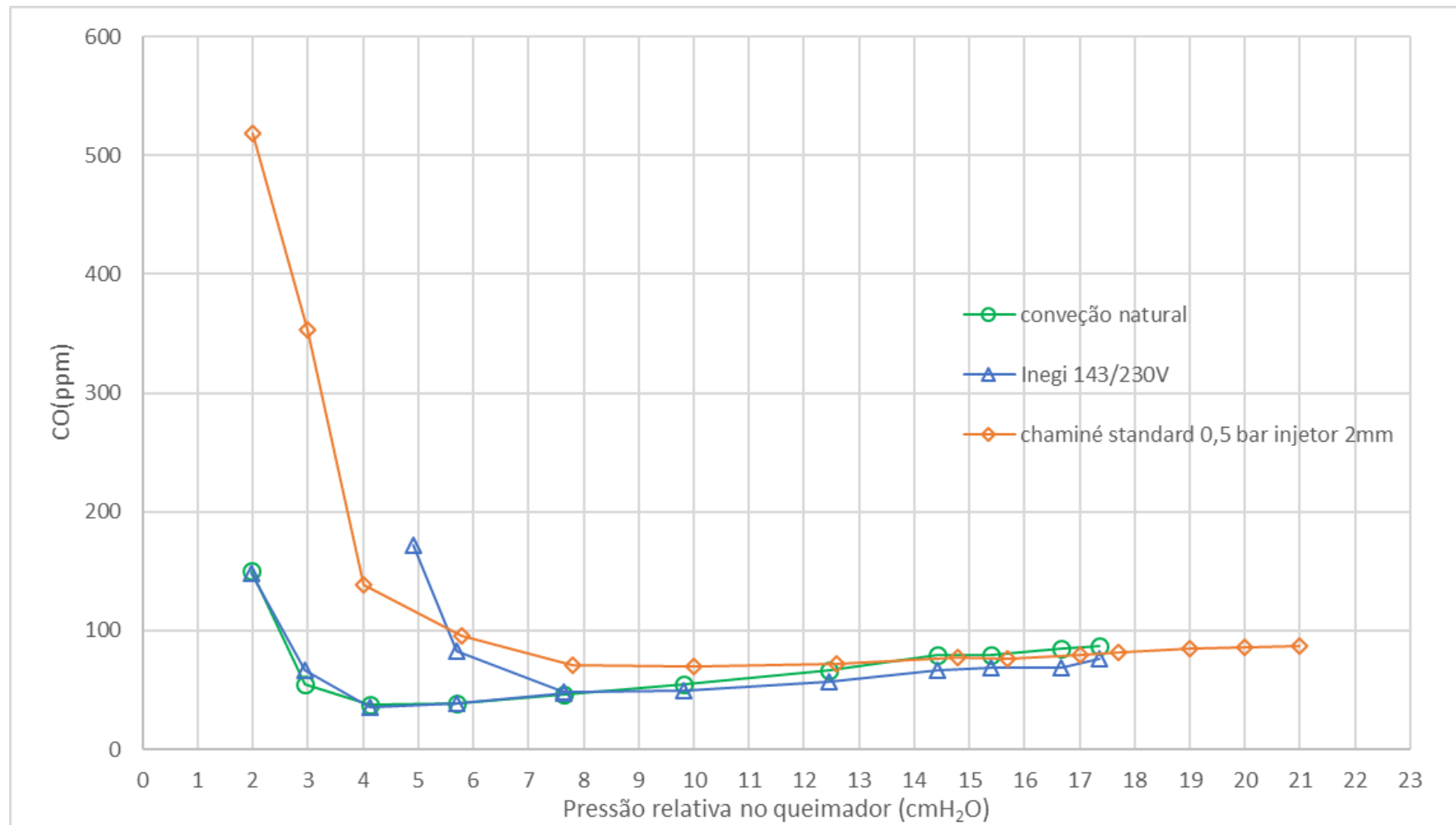


Figura 5.10 - Conjunto dos melhores resultados experimentais obtidos para as diversas configurações tendo como combustível gás natural.

A Figura 5.10 permite inferir que:

- A amplitude da gama de operação é maior para a solução chaminé standard com injeção de ar a 0,5 bar e injetor de 2 mm;
- Nas baixas pressões a melhor solução obtida com injeção de ar está muito longe, em termos de emissões, das restantes;
- A partir da pressão de 12,6 cmH₂O a melhor solução obtida com injeção de ar supera, ainda que por pouco, as emissões obtidas para a configuração de convecção natural.
- Para o caso das chaminés com mecanismo de convecção forçada, a solução obtida pelo INEGI apresenta melhor desempenho do que a obtida com injeção de ar.

De forma a tentar justificar as diferenças existentes para os dois conjuntos de pontos obtidos para as chaminés INEGI e standard 0,5 bar com injetor de 2 mm decidiu-se estudar diferenças nas concentrações obtidas para os diversos gases analisados nos ensaios. As concentrações de oxigénio, dióxido de carbono e monóxido de carbono obtidos para os dois ensaios são apresentados na Tabela 5.1, não estando estes valores corrigidos.

Tabela 5.1 – Concentrações médias medidas pelos analisadores dos diversos gases nos ensaios da chaminé INEGI e standard com injeção de ar injetor de 2 mm.

Pressão relativa no queimador (mbar)	CO (ppm)		O ₂ (%)		CO ₂ (%)	
	INEGI	Standard com injeção	INEGI	Standard com injeção	INEGI	Standard com injeção
2,0	45,7	43,0	17,6	21,3	2,2	1,0
2,9	13,5	31,5	16,4	21,2	2,9	1,1
3,9	13,0	14,9	15,1	20,7	3,7	1,3
5,7	18,4	11,9	13,7	20,4	4,6	1,5
7,6	12,1	11,0	17,2	19,8	2,5	1,8
9,8	15,0	12,2	16,6	19,4	2,8	2,0
12,4	22,3	14,3	15,7	18,9	3,4	2,3
14,5	27,9	16,9	15,5	17,6	3,6	2,6
15,4	29,9	17,8	15,3	17,1	3,8	2,7
16,7	33,3	19,5	14,7	16,8	4,0	2,9
17,4	36,8	21,0	14,4	16,6	4,2	3,0
18,6	-	22,8	-	16,3	-	3,1
19,6	-	23,4	-	16,2	-	3,2
20,6	-	24,6	-	16,0	-	3,3

Da análise da Tabela 5.1 retira-se que:

- As emissões de monóxido de carbono registadas na tabela são menores, em quase todos os pontos, para a configuração standard com injeção de ar;
- Os valores de dióxido de carbono registados para a chaminé INEGI são sempre superiores, sendo algumas vezes mais do dobro dos registados para o caso de existência de injeção de ar;
- Já os dados do oxigénio, inversamente proporcional ao dióxido de carbono, apresentam sempre uma superioridade no ensaio com injeção de ar, revelando que esta chaminé apresenta maior excesso de ar na queima.

Concluiu-se que de forma a aproximar as emissões corrigidas da chaminé standard com injeção de ar das da chaminé INEGI, seria necessário diminuir a percentagem de oxigénio e aumentar a de dióxido de carbono, isto é, diminuir o excesso de ar.

5.4-Injeção de azoto

Depois de refletir sobre os resultados alcançados no fim da seção anterior, optou-se por realizar ensaios com injeção de azoto em substituição do ar comprimido. O azoto, como substância inerte, não iria interferir na combustão, mas permitiria induzir o mesmo efeito de arrastamento que o ar comprimido. Esta foi a forma encontrada para testar se os elevados teores de oxigénio eram devidos à injeção de um elevado caudal de ar comprimido. Obviamente, no caso de funcionar, a solução com injeção de azoto não apresentaria qualquer aplicabilidade em condições normais de funcionamento. O teste foi realizado para a pressão de injeção de 0,6 bar. A Figura 5.11 apresenta os resultados do ensaio obtido em comparação com os resultados do ar comprimido.

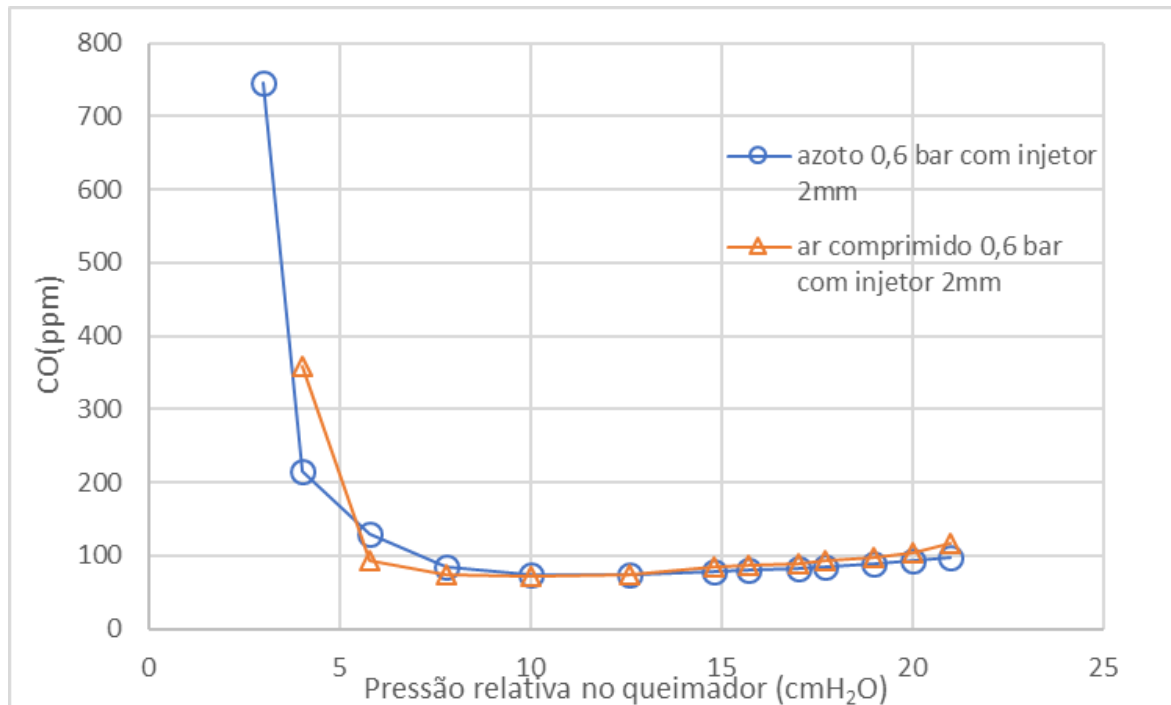


Figura 5.11 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com azoto e ar comprimido, injetor de 2 mm com pressão relativa de injeção de 0,6 bar.

Da análise da Figura 5.11, verifica-se que a diferença registada entre os dois ensaios é quase inexistente, sendo por isso previsível que os valores de oxigénio e dióxido de carbono

registados neste ensaio sejam próximos dos valores registados para a mesma pressão de injeção com ar comprimido.

5.5- Medição de caudais de injeção

A medição de caudais tem uma importância fundamental, já que é com base nos valores dos caudais de injeção que será verificada a existência ou não de um pequeno compressor ou bomba que possa cumprir os requisitos de pressão e caudal necessários à solução em análise. Por outro lado, a medição dos caudais permitirá calcular de uma forma expedita os valores do caudal de ar arrastado por esta solução e compará-los com os valores de outras, como será visto posteriormente. O método utilizado para medir os caudais de injeção foi o método do deslocamento positivo, explicado com mais detalhe no Anexo B. Os resultados obtidos em função do gás e da pressão de injeção são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Caudais de ar comprimido e azoto medidos para os diversos injetores e pressões de injeção ensaiadas.

Pressão de injeção(bar)	Caudal medido (Kg/hr)		
	Azoto	Ar	
	Injetor 2mm	Injetor 2 mm	Injetor 4 mm
0,5	-	33,19	39,96
0,6	37,08	37,80	44,64
0,7	-	42,84	49,68

Com os dados da tabela é possível calcular o caudal de ar arrastado, para cada pressão de injeção, da solução em análise. O cálculo do caudal de ar arrastado e posterior comparação com as outras chaminés pode ser importante na otimização da solução. A Figura 5.12 é uma figura explicativa de como o cálculo do caudal arrastado pode ser efetuado.



Figura 5.12 - Figura explicativa do cálculo do arrasto de ar.

1-Caudal de combustível injetado no queimador;

2-Caudal de ar arrastado;

3-Caudal de ar injetado;

4-Caudal de produtos de combustão;

O caudal de ar arrastado será calculado com base na Lei da conservação da massa de acordo com a Equação 5.1:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_4 - \dot{m}_1 - \dot{m}_3 \quad (5.1)$$

Para as configurações standard sem injeção e INEGI a única diferença na equação anterior para o cálculo do caudal arrastado prende-se com a não existência do caudal injetado. Os termos relativos ao caudal de combustível e caudal de produtos de combustão são calculados a partir das equações 5.2 e 5.3,

$$\dot{m}_1 = \frac{P_{fornecida}}{PCI_{combustivel}} \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_4 = \left(\left((1 + e) * \left(\frac{A}{C} \right) \right) + 1 \right) * \dot{m}_1 \quad (5.3)$$

Onde os valores para a razão ar combustível ($\frac{A}{C}$) e $PCI_{combustivel}$ foram, respetivamente, 15,38 e 44451,0 (kJ/kg). Depois de determinados todos os parâmetros referidos anteriormente, calcularam-se os valores médios do ar arrastado para as configurações standard, INEGI e standard com injeção de ar para as diferentes pressões de injeção e injetores. Os resultados são apresentados nas Tabela 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3 - Valores médios do caudal de ar arrastado pelas chaminés INEGI e standard.

Valor médio do caudal de ar arrastado (kg/hr)	
Standard	INEGI
46,6	80,8

Tabela 5.4 - Caudal de ar arrastado pelas diversas configurações com injeção de ar.

Pressão (bar)	Valor médio do caudal de ar arrastado (kg/hr)		
	Injector de 2mm, ar	Injector de 2mm, azoto	Injector de 4 mm
0,5	156,3	-	146,1
0,6	165,3	169,3	148,3
0,7	170,8	-	150,0

Da análise das duas tabelas anteriores verifica-se que:

- A solução INEGI arrasta 1,8 vezes o caudal de ar arrastado pela solução standard;
- As soluções com injeção de ar arrastam cerca de 4 vezes mais ar que a standard e cerca de duas vezes mais que a INEGI;

Como se tinha verificado anteriormente, os melhores resultados na configuração com injeção de ar, em termos de gama de operação e emissões, foram obtidos para a pressão de 0,5 bar. Tendo isto em consideração, assim como os resultados expressões nas Tabelas 5.3 e 5.4, de forma a otimizar a pressão de injeção de ar deve-se reduzir a mesma até os resultados se aproximarem dos da configuração INEGI.

5.6-Ensaios de transbordo

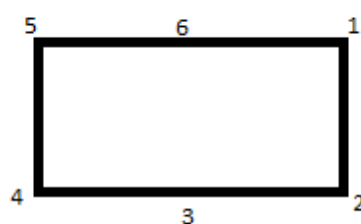
O último conjunto de ensaios realizados, a ser abordado nesta seção, teve como finalidade assegurar que a solução cumpre um requisito de segurança essencial, referido no Anexo A, o transbordo (ponto 6.2.2.4.2). No mesmo anexo é explicado o que é o transbordo e como é medido. No entanto, apesar de explicado o critério para existência de transbordo, não é esclarecido o procedimento do ensaio. O procedimento de medição do transbordo é simples, com o esquentador a funcionar à pressão de alimentação nominal, é colocada uma sonda em T em diferentes pontos superficiais no topo do esquentador, representada na Figura 5.13. Esta sonda, capta os gases nas imediações do ponto selecionado enviando-os para o analisador de dióxido de carbono. Depois de cerca de 2 minutos de ensaio, se o valor lido for superior em 0,2 % ao valor da concentração existente no ambiente, previamente medida, verifica-se a existência de transbordo. A Figura 5.13 que se segue apresentam a sonda em T referida anteriormente, um esquema da vista de cima do esquentador com os pontos em que se verificou se existia ou não transbordo, e a colocação da sonda num dos pontos de medição assinalados.



A



B



C

Figura 5.13 – A- Fotografia da sonda em T; B- Fotografia da sonda num dos pontos de medição do ensaio de transbordo; C- Pontos de medição de transbordo.

O ensaio de transbordo é realizado para as piores condições de funcionamento a que um esquentador possa estar sujeito. No caso dos esquentadores com convecção forçada, de forma a simular as piores condições de funcionamento possíveis, impõe-se uma perda de carga equivalente a quatro metros de comprimento de tubagem à saída da chaminé do esquentador. A Figura 5.14 apresenta uma imagem da instalação na qual foram realizados os ensaios e medido o transbordo.



Figura 5.14 - Fotografia do esquentador com a instalação de uma conduta que induz uma perda de carga correspondente a 4 metros.

Para esta configuração foram realizados, no total, oito ensaios. Para as pressões relativas de injeção de ar de 0,5, 0,6, 0,7 e 0,8 bar com injetor de 2 e 4 mm, tendo sido também realizados o mesmo número de testes ao transbordo.

Os resultados dos primeiros ensaios realizados são apresentados na Figura 5.15 e são referentes ao injetor de 4 mm.

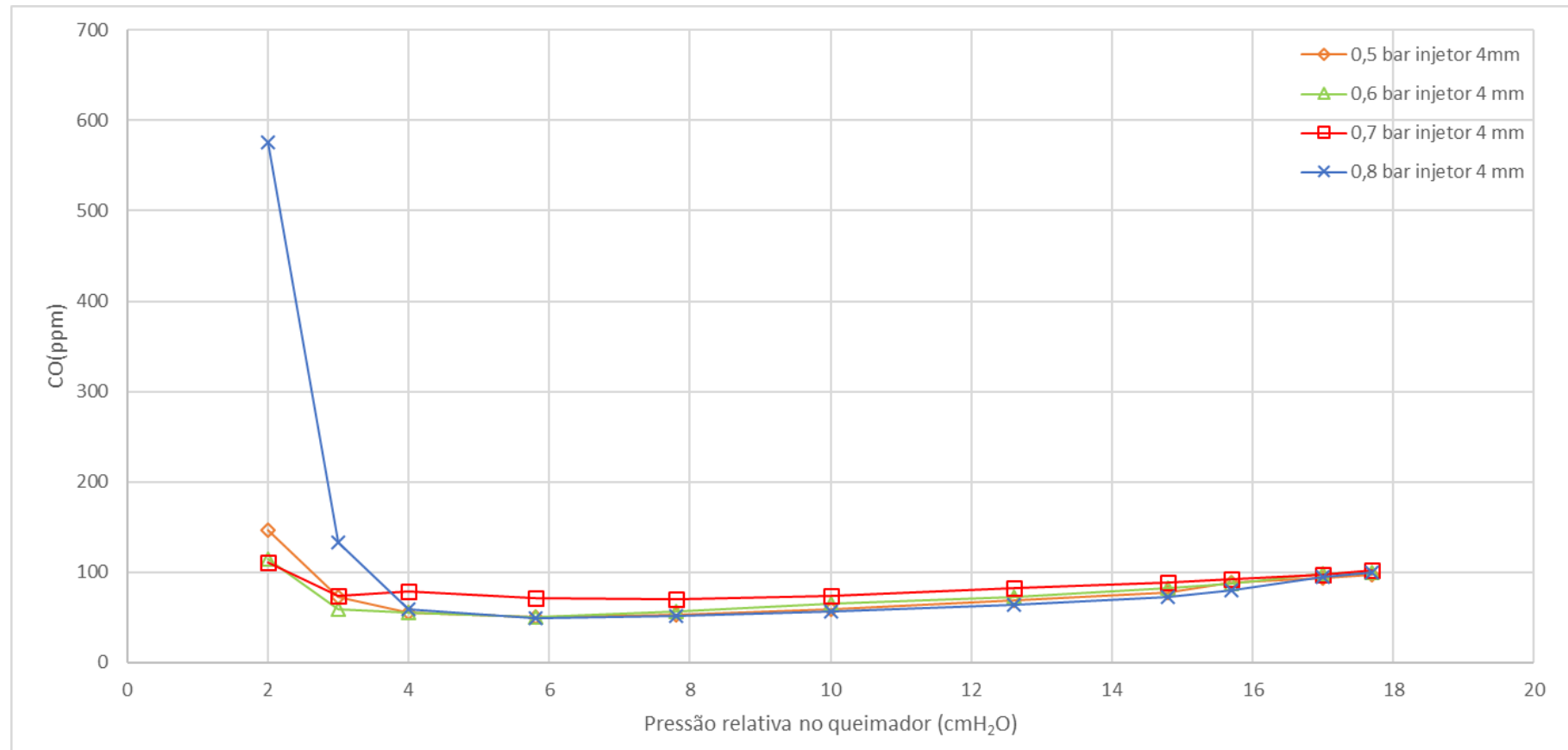


Figura 5.15 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com injeção de ar (injetor 4mm) e 4 metros de perda de carga equivalente.

Relativamente ao teste de transbordo realizado para a pressão nominal do esquentador de 14,7 cmH₂O, obtiveram-se, para todas as pressões de injeção valores de concentração de CO₂ em relação ao valor ambiente, inferiores a 0,1 % pelo que a configuração em análise passa o teste de transbordo.

Abordando em primeiro lugar os resultados dos ensaios em termos de emissões de CO corrigido, para a pressão relativa de injeção de 0,5 bar, obteve-se o valor de 147 ppm (v/v) como valor máximo do ensaio, tendo sido registado para a pressão mínima do queimador de 2,0 cmH₂O. O valor de concentrações de CO corrigido mínimo foi de 50 ppm (v/v), para o valor de pressão relativa do queimador de 5,8 cmH₂O. Já o valor das emissões de CO corrigido para o ponto de pressão relativa máxima do queimador foi de 97 ppm (v/v).

Para a pressão relativa de injeção de 0,6 bar obteve-se como mínimo de ensaio o valor de 49 ppm (v/v), para o valor de pressão relativa no queimador de 5,8 cmH₂O. O valor máximo de concentrações de CO corrigido registado foi de 114 ppm (v/v), para o valor de pressão relativa mínima. Para a pressão relativa máxima no queimador de 17,7 cmH₂O, registou-se o valor de 100 ppm (v/v).

Já para a pressão relativa de injeção de 0,7 bar, verificou-se que o valor máximo das concentrações de CO corrigido obtidas foi de 111 ppm (v/v), para a pressão mínima relativa no queimador. Registou-se o valor de 71 ppm (v/v) como mínimo do ensaio, para o valor de pressão relativa no queimador de 7,8 cmH₂O, tendo ainda sido o valor de emissões de CO corrigido de 102 ppm (v/v) obtido para a pressão máxima relativa do queimador.

Finalmente para a pressão relativa de injeção de 0,8 bar, obteve-se um valor mínimo de emissões de 49 ppm (v/v), para o valor de pressão relativa no queimador de 5,8 cmH₂O. Foi registado, um valor de emissões máximo de 575 ppm (v/v), para o valor de pressão relativa no queimador mínimo e ainda um valor de 99 ppm (v/v), para o valor de pressão máxima relativa no queimador de 17,7 cmH₂O.

As curvas representadas na Figura 5.15 são bastante semelhantes entre si. Para pressões relativas do queimador superiores a 4 cmH₂O, os pontos obtidos são quase coincidentes. Apenas existem alguns diferendos nas pressões relativas do queimador mais baixas, em que o ensaio relativo à pressão de injeção de 0,8 bar, apresenta valores bastante discrepantes em relação às restantes pressões de injeção.

Depois de realizados os ensaios relativos ao injetor metálico de 4 mm, foi colocado o injetor de 2 mm e repetidos os ensaios. Os resultados obtidos para o injetor referido anteriormente são apresentados na Figura 5.16.

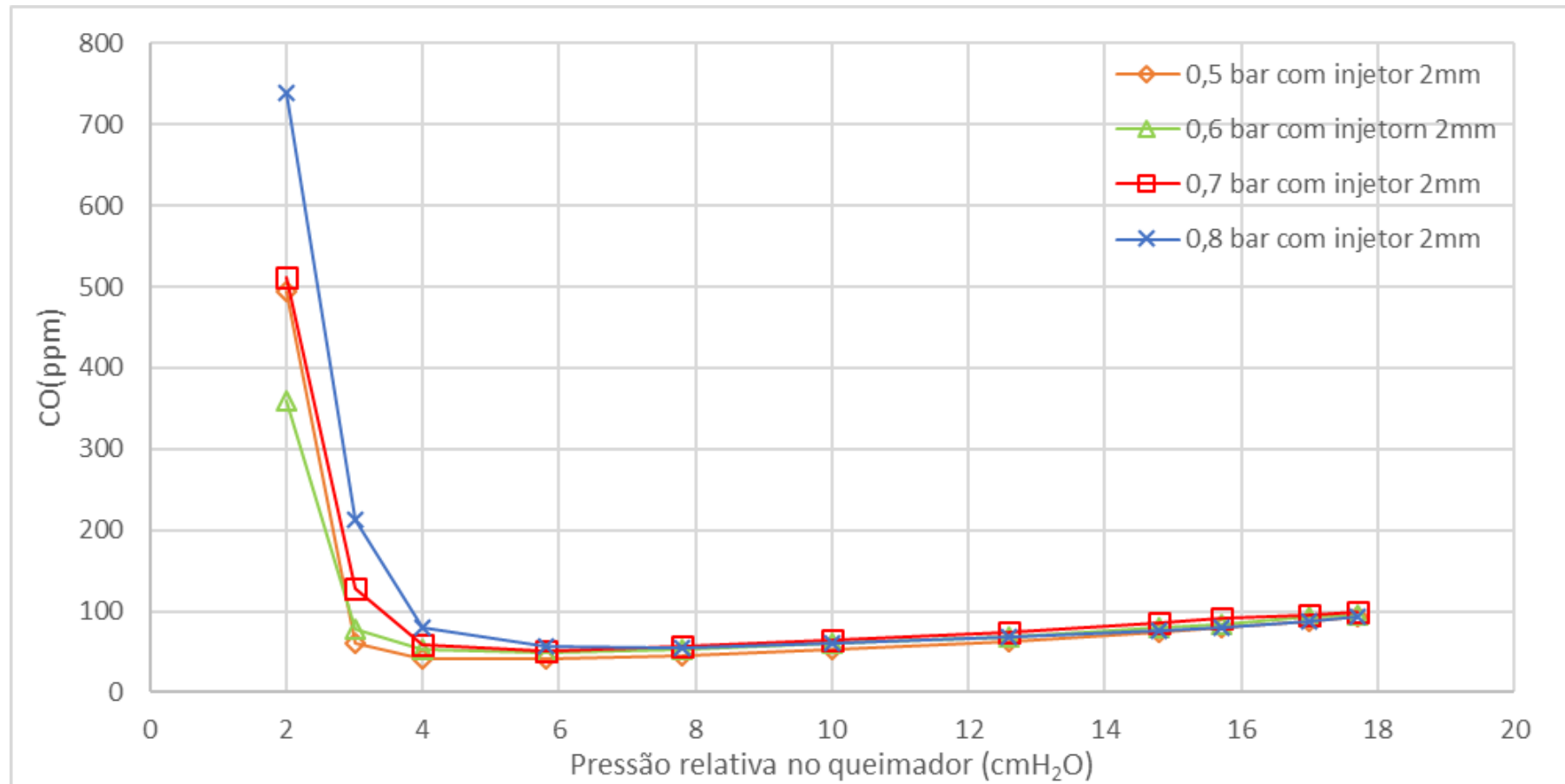


Figura 5.16 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com injeção de ar (injetor 2mm) e 4 metros de perda de carga equivalente.

Nos testes ao transbordo, realizados para cada uma das pressões de injeção representadas na Figura 5.16, verificou-se que a percentagem de dióxido de carbono relativa à da atmosfera nunca ultrapassava os 0,08 %, pelo que não ocorria transbordo. Isto permite afirmar que a configuração com injeção de ar é muito pouco favorável à existência de transbordo.

Assim como no caso dos ensaios anteriores, também se verificou, para o injetor de 2 mm, que a gama de operação permanece inalterada com a variação de pressão de injeção de ar.

No que se refere às emissões de CO corrigidas, para a pressão relativa de injeção de 0,5 bar obteve-se um máximo de emissões de 495 ppm (v/v), para o ponto de pressão relativa mínima do queimador. Obteve-se ainda o valor mínimo de 41 ppm(v/v) para a pressão de 5,8 cmH₂O. O valor registado para pressão relativa máxima do ensaio foi de 94 ppm (v/v).

Para a pressão relativa de injeção de 0,6 bar, registou-se um valor máximo de concentrações de CO corrigidas de 359 ppm (v/v) para o ponto de pressão relativa mínima de 2,0 cmH₂O. Obteve-se um mínimo de emissões de 49 ppm (v/v), para a pressão relativa do queimador de 5,8 cmH₂O. Para a pressão relativa máxima do queimador de 17,7 cmH₂O registou-se o valor de 95 ppm (v/v).

Já para a pressão relativa de injeção de 0,7 bar, foi obtido o valor máximo de concentração de CO corrigido de 512 ppm (v/v) no ponto de pressão relativa do queimador de 2,0 cmH₂O. O mínimo do ensaio foi de 51 ppm (v/v) para a pressão relativa de 5,8 cmH₂O e para a pressão relativa máxima do ensaio foi obtido o valor de 100 ppm (v/v).

Para a última pressão relativa ensaiada de 0,8 bar, foi obtido um máximo de 740 ppm (v/v) para as emissões de CO corrigido no ponto de pressão relativa do queimador de 2,0 cmH₂O. O mínimo de emissões registado no ensaio foi de 55 ppm (v/v), para a pressão relativa de 7,8 cmH₂O. No ponto de pressão relativa máxima do queimador do ensaio, 17,7 cm H₂O, registou-se o valor de 94 ppm (v/v) para a concentração de CO corrigido.

De referir que o melhor ensaio para cada um dos injetores corresponde à pressão de 0,5 bar, uma vez que tendo em conta a gama de operação completa são os que apresentam menores concentrações de CO. Já fazendo uma breve comparação entre os ensaios referidos anteriormente, o ensaio correspondente relativo ao injetor de menor diâmetro interno foi o que apresentou melhores resultados, tal como tinha ocorrido anteriormente.

5.7-Análise a dispositivos para injeção de ar

Para este conceito ser aplicável na vida real, será necessário que no local exista uma rede de ar comprimido e um mecanismo de regulação da pressão do mesmo ou, em alternativa, que haja um dispositivo, um compressor de pequena dimensão, capaz de nutrir as necessidades de ar comprimido. Recorrendo aos resultados das medições de caudal efetuadas na secção 5.5 verificou-se seria necessário um dispositivo com capacidade de injetar um caudal de ar 3,32 kg/h (45,16 l /min) a 3,34 kg/h (45,43 l/min) (valores calculados para a pressão absoluta de 1 atm e 20 °C). Com os valores dos caudais e pressões anteriormente referidos iniciou-se uma pesquisa de eventuais soluções.

Seguidamente serão apresentados alguns dos dispositivos encontrados que apesar de não constituírem soluções exatas para o problema em questão poderiam servir como base para o desenvolvimento de um produto capaz de cumprir os requisitos de caudal e pressão.

O primeiro catálogo a ser consultado foi da empresa alemã *Schwarzer* que apresentava várias soluções para pequenas compressões:

- Bombas de membrana excêntricas;
- Bombas de membrana de rotação;
- Bombas de palhetas;
- Bombas lineares;
- Bombas de diafragma oscilante;

As Figuras 5.17 ,5.18 e 5.19 apresentam imagens e as capacidades de algumas bombas com características semelhantes às pretendidas.

770 EC (AC)

Bombas de membrana excêntricas

Tensão de operação

230 Vac

120 Vac

■ Capacidade pneumática

fluxo livre:

18.0 l/min

15.5 l/min

@ 300 mbar:

13.4 l/min

11.4 l/min

pressão máx.:

1400 mbar

1400 mbar

@ -300 mbar:

7.7 l/min

6.4 l/min

vácuo máx.:

-810 mbar

-810 mbar

■ Motor

tipo de motor (standard):

splitfase motor

tipo de motor (opcional):

-

consumo de corrente máx.:

73 W

73 W

■ Dimensões + peso

dimensões:

169 x 137 x 78 mm

169 x 137 x 78 mm

peso:

1000 g

1000 g

Figura 5.17 - Imagem e características funcionais de uma bomba de membrana excêntrica (Schwarzer, 2017).

		
802 SA-V Bombas de diafragma oscilante		
Tensão de operação	230 Vdc	120 Vdc
■ Capacidade pneumática		
fluxo livre:	7.0 l/min	6.5 l/min
@ 100 mbar:	- l/min	- l/min
pressão máx.:	- mbar	- mbar
@ -100 mbar:	3.0 l/min	2.5 l/min
vácuo máx.:	-250 mbar	-280 mbar
■ Motor		
tipo de motor (standard):	diafragma oscilante	
tipo de motor (opcional):	-	
consumo de corrente máx.:	7.5 W	7.5 W
■ Dimensões + peso		
dimensões:	147 x 72 x 194 mm	147 x 72 x 194 mm
peso:	1600 g	1600 g

Figura 5.18 - Imagem e características funcionais de uma bomba de diafragma oscilante (Schwarzer, 2017).

	
3800 LI-DV Bombas lineares	
Tensão de operação	230 Vac
■ Capacidade pneumática	
fluxo livre:	1250 l/h
@ 100 mbar:	800 l/h
pressão máx.:	270 mbar
@ -100 mbar:	730 l/h
vácuo máx.:	-240 mbar
■ Motor	
tipo de motor (standard):	acionamento linear
tipo de motor (opcional):	
consumo de corrente máx.:	24 W
■ Dimensões + peso	
dimensões:	128 x 120 x 60 mm
peso:	950 g

Figura 5.19 - Imagem e características funcionais de uma bomba linear (Schwarzer, 2017).

Analisando as bombas representadas nas figuras anteriores verifica-se que:

- Em relação a pressões de trabalho apenas a bomba de membrana excêntrica permite atingir os 0,5 a 0,7 bar;

- Relativamente ao caudal necessário, nenhuma das bombas consegue fornecer todo o caudal necessário. Para ser cumprir o requisito dos 45,16 l/min (2760 l/h) seriam necessárias 4 bombas semelhantes às da figura 5.17 (a única que consegue cumprir o requisito de pressão);
- Apesar das soluções serem leves e compactas ao ser necessário colocar várias em paralelo estas vantagens desaparecem.

Depois de verificar que as soluções apresentadas nos catálogos destas e de outras empresas eram incapazes de cumprir as especificações necessárias foram feitos diversos contactos via e-mail não tendo obtido uma resposta positiva sobre a existência de potenciais soluções. Por conseguinte a aplicação deste conceito com um compressor de tamanho reduzido implicará o desenvolvimento do mesmo.

6- Conclusões

Da realização desta dissertação podem retirar-se diversas conclusões, das quais se destacam:

- De uma forma geral, sempre que existe um incremento da ventilação, quer seja por aumento da velocidade de rotação de um ventilador, aumento da pressão de injeção de ar ou estrangulamento da área de passagem do escoamento ventilador, verifica-se um deslocamento da curva de funcionamento do esquentador para a direita, isto é para potências de funcionamento mais elevadas, ocorrendo valores elevados de emissões de CO corrigido nas pressões relativas do queimador mais baixas;
- Relativamente à chaminé venturi, verificou-se que o esquentador não funciona corretamente com a mesma associada, uma vez que por problemas de projeto não permite uma evacuação correta dos produtos de combustão. No entanto, foi possível verificar, através da análise dos resultados das diversas alterações realizadas à chaminé, que o conceito que esteve na génese desta chaminé é válido;
- Fazendo um paralelo entre as três configurações que, funcionando com montagem completa do esquentador, apresentaram bons resultados, convencional, INEGI e convencional com injeção de ar a 0,5 bar (relativos) e injetor de 2 mm, conclui-se que a aquela apresenta melhores resultados na gama de operação de 2,0 a 17,7 cmH₂O é a chaminé convencional, a funcionar em convecção natural. No entanto, em instalações em que a perda de carga a jusante do esquentador seja elevada esta configuração não pode ser utilizada. Já a chaminé INEGI, apesar dos bons resultados que apresenta em termos de emissões e da possibilidade de ser instalada em locais em que a chaminé convencional não pode se aplicada, necessita que o seu ventilador funcione a duas velocidades, o que acarreta alguns problemas no que se refere ao mecanismo de controlo do mesmo. Finalmente, a chaminé convencional com injeção de ar, cuja pressão de injeção ainda não está otimizada, apresenta resultados muito interessantes, principalmente nas pressões relativas do queimador médias e elevadas, permitindo mesmo um aumento da gama de operação do esquentador. Para além do referido anteriormente, esta configuração também pode ser instalada em locais em que existam elevadas perdas de carga após a condução de saída do esquentador. No entanto, necessita que no local da sua instalação exista uma rede de ar comprimido (que pode existir em instalações fabris ou hotéis, por exemplo) ou do desenvolvimento de um dispositivo capaz de assegurar a produção de ar comprimido para alimentar esta solução.

7-Sugestões de trabalho futuro

Quanto a trabalhos futuros, são seguidamente apresentadas algumas sugestões. No caso da chaminé com de efeito venturi:

- Estudar a alteração da geometria da chaminé, aumentando a área transversal ao escoamento de produtos de combustão para facilitar o mesmo;
- Alterar a posição e localização do ventilador. Na posição atual ocupa muito espaço na parte frontal da chaminé (a insuflação pode sempre ser efetuada com recurso a uma conduta estando o ventilador colocado na parte inferior do esquentador, por exemplo);
- Estudar a insuflação de ar, recorrendo à mecânica de fluidos computacional, de forma a que a mesma não impeça o escoamento dos gases de combustão.

No caso da solução com injeção de ar:

- Deve ser realizado um processo de otimização da pressão de injeção;
- Deve ser realizado um estudo dos resultados para outros combustíveis;
- Estudar a existência de uma chaminé cuja geometria favoreça mais este método de ventilação, a título de exemplo, uma chaminé que apenas permita que a entrada de ar arrastado seja feita pela zona do queimador;
- Estudar o desenvolvimento de um pequeno compressor que possa alimentar esta solução;
- Estudar a viabilidade económica da melhor solução encontrada.

8-Referências

Catálogo BOSCH, “2011 Residential Water Heating Solutions”, Irvine, CA, Estados Unidos da América.

Catálogo Vulcano, Outubro 2010, Aveiro, Portugal.

Coelho, P. 2016, “Experimentação e Análise de Incertezas”, Slides da unidade curricular de Laboratórios de Fluidos e Calor.

DIN EN 26:2015 “Gas-fired instantaneous water heaters for the production of domestic hot water”.

Pimenta, M. 2007 “Transferência de calor acima da superfície livre de um leito de um fluidizado borbulhante”, Dissertação, FEUP.

Pilão, R. 1996 “Estudo do comportamento térmico de esquentadores domésticos a gás”, Dissertação, FEUP.

Pinho, C. M. C. T., “Projecto e desenvolvimento de um esquentador de água a gás”, Relatório Técnico, INEGI, 1998.

Rodrigues, N. 2012 “Queimador de chama estagiada: Estudo do difusor central da zona primária da flauta”, Dissertação, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.

Waide P., Munro K., “Scoping Study for Residential Water Heaters Mapping and Benchmarking Project”, Relatório Técnico, Waide Strategic Efficiency, Junho, 2014

http://www.schwarzer.com/pages_po/index_po.php, data do último acesso 1 junho 2017.

INEGI. A Instituição. 2016, data do último acesso: 10 Junho 2017 disponível em: <http://www.inegi.up.pt/instituicao.asp?idm=1&idsubm=5&LN=>

ANEXO A: Normas

Os esquentadores como qualquer outra máquina devem obedecer a normas. A principal norma no que se refere a estes aparelhos é a DIN 26:2015-08, que abrange diversos aspetos desde a classificação de esquentadores, gases, condições de teste dos esquentadores, ruído, acessibilidade, segurança, entre outros. Seguidamente serão abordados os pontos desta norma que são considerados mais importantes de forma a compreender melhor o trabalho a realizar.

A.1-Transbordo

O transbordo é um teste que tem como finalidade medir eventuais fugas nos diversos circuitos associados aos esquentadores (água, gás, produtos de combustão). O tipo de transbordo que interessa abordar no contexto desta dissertação prende-se com os gases de combustão. O ponto da norma que aborda este tópico é o 6.2.2.4.2, sendo que o esquentador se insere nos aparelhos de classe B2 e B5. Este ponto refere o método de teste assim como as condições em que o mesmo deve decorrer. O método a utilizar em casos mais dúbios é também o mais exato, pelo que se for necessário será esse o método a utilizar. O método anteriormente referido consiste em verificar a existência de fugas em torno do esquentador com recurso a uma sonda de CO₂ de rápida resposta. O critério para a existência de transbordo corresponde a existir uma diferença igual ou superior a 0,2 % entre as concentrações de CO₂ no meio envolvente e as concentrações nos pontos medidos.

A.2-Temperatura do esquentador

A.2.1- Temperatura dos dispositivos de controlo, ajuste e segurança

No ponto 6.5.1 é estabelecido um limite para a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura dos diversos dispositivos de controlo ajuste e segurança do esquentador sendo este limite de 25 K.

A.2.2-Temperatura das diversas superfícies do esquentador.

O ponto 6.6.1 é um ponto importante desta norma já que estabelece os limites admissíveis para a temperatura em diversas partes do esquentador. Este ponto estabelece que a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura das diversas faces do revestimento do esquentador não deve ultrapassar os 80 K, excetuando na área limitada por dois planos paralelos localizada respetivamente 10 cm acima e 10 cm abaixo do plano do queimador em que é permitido que a diferença de temperatura atinja os 100 K. Este ponto estabelece

ainda exceções para as quais estes critérios não são aplicáveis, como a conduta dos gases de escape e a janela que permite visualizar o interior do esquentador (se esta tiver uma área inferior a 18 cm²).

A.2.3-Testes suplementares para esquentadores.

O ponto 6.7.16.2 da norma aborda um teste suplementar realizado em esquentadores que está relacionado com a extinção da combustão. Para o teste ser bem-sucedido, as chamas deverão ser estáveis e não se poderão extinguir, no entanto é admissível a existência de levantamento de chama.

O teste é realizado em dois pontos, no ponto de caudal de combustível mínimo e no ponto correspondente ao caudal nominal. É instalado no esquentador uma conduta específica à saída da sua chaminé. Durante o teste a saída desta conduta vai sendo progressivamente tapada. Quando na saída da conduta for atingida uma pressão de 50 Pa e se os requerimentos acima mencionados forem cumpridos, considera-se que o ensaio foi bem-sucedido.

A.3- Requerimentos de combustão

O ponto 6.9 corresponde ao ponto mais importante desta norma, no que se refere a esta dissertação. Este ponto aborda temas essenciais, tais como a maneira correta para realização dos ensaios e da amostragem dos gases de combustão ou ainda como devem ser feitas as correções às amostragens.

Relativamente aos ensaios e amostragens existe uma sequência lógica para o processo. Numa primeira fase define-se a pressão do queimador, que corresponde a um determinado caudal de combustível, seguidamente aguarda-se algum tempo de forma a permitir que o estado estacionário seja atingido e quando tal se verificar efetua-se a amostragem, sendo que normalmente são necessários 2 a 3 minutos desde que se define a pressão do queimador até ao início da amostragem. A amostragem deverá ser efetuada com uma base temporal de um segundo e deve ser tão ampla quanto possível. O valor considerado como resultado do ensaio não é nada mais do que a média correspondente a cada parâmetro a analisar. No caso dos gases de combustão são analisadas as frações volúmicas de oxigénio, de dióxido de carbono, de óxidos de azoto e ainda de monóxido de carbono.

A norma utiliza a quantidade de CO corrigida como parâmetro para avaliar se o esquentador em questão tem ou não boas emissões, definindo como teto máximo os 1000 ppm (v/v), no entanto na realização desta dissertação considerou-se um critério mais apertado (utilizado por uma empresa para a qual foi concebida a chaminé INEGI) de 300 ppm (v/v).

De acordo com a norma DIN EN 26:2015 a quantidade de CO medida pode ser corrigida de duas formas:

- De acordo com o dióxido de carbono (para valores de CO₂ superiores a 2% (v/v));
- De acordo com o oxigénio (para valores de CO₂ inferiores a 2% (v/v)).

De acordo com o CO₂ a correção é realizada de acordo com a equação A.1:

$$CO_{corrigido} = (CO)_M * \frac{CO_{2M}}{CO_{2N}} \quad (A.1)$$

Em que:

CO- é o CO após correção, em ppm;

(CO₂)_N- é a percentagem volumétrica máxima de dióxido de carbono contida nos gases de combustão secos do gás em questão;

(CO)_M- é a média das percentagens volumétricas de monóxido de carbono medidas durante a amostragem, em ppm;

(CO₂)_M- é a média das percentagens volumétricas de dióxido de carbono medidas durante a amostragem, em %;

O (CO₂)_N vem tabelado na norma e os valores para os três combustíveis em estudo são os seguintes:

Tabela A.1 - Coeficientes de dióxido de carbono máximos definidos pela norma para os diferentes combustíveis.

Combustível	Gás Natural	Propano	Butano
(CO ₂) _N (%)	11,7	13,7	14,0

Esta é a correção mais usada, no entanto para percentagens (frações) de dióxido de carbono inferiores a 2 % recomenda-se a utilização da correção a partir do oxigénio que consiste na equação A.2:

$$CO_{Corrigido} = \frac{21}{21-(O_{2M})} * (CO)_M \quad (A.2)$$

Onde (O₂)_M e (CO)_M são as médias das percentagens volumétricas de oxigénio de monóxido de carbono medidas. (DIN EN 26:2015)

ANEXO B:Método do deslocamento positivo

Como já foi referido, o método escolhido para efetuar a medição dos caudais injetados foi o método do deslocamento positivo. A aplicação deste método implica uma instalação como a representada na Figura B.1.

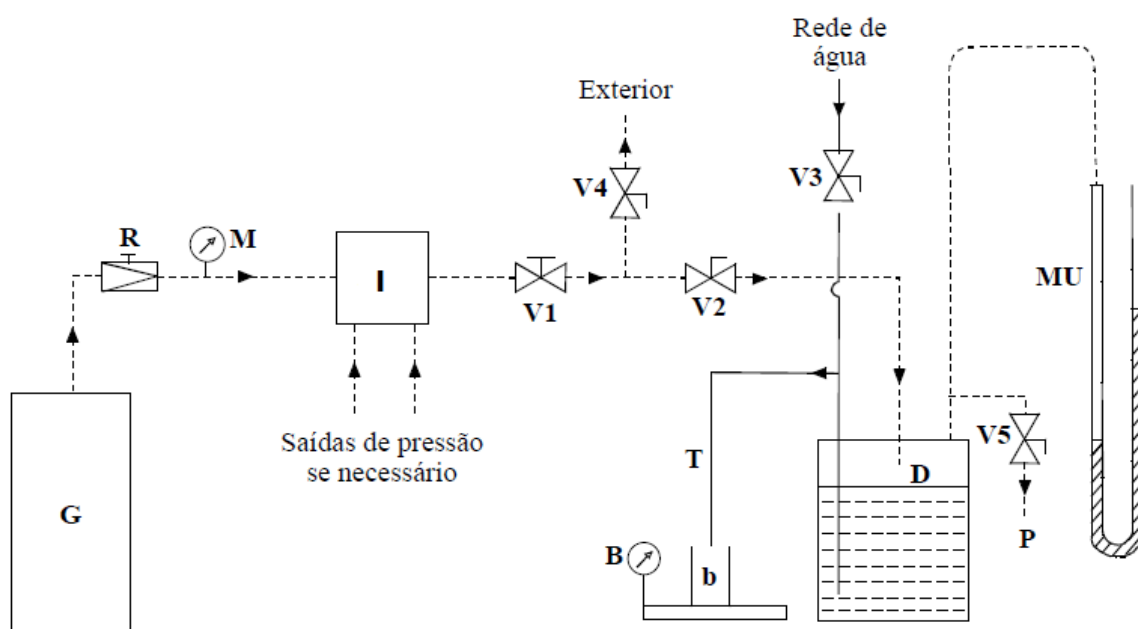


Figura B.1 - Figura ilustrativa da instalação utilizada para a medição de caudais (adaptado Pimenta, 2007).

M- Manómetro

MU- Manómetro de água em U

G- Gás cujo caudal se pretende medir

V1,V2,V3,V4- Válvulas de corte

R- Redutor de pressão variável

T- Tubo de pesca

D- Depósito de 220 kg de capacidade

B- Balança

b- Balde

I- Injetor

P- Purga

O procedimento experimental adotado para aplicar o método do deslocamento positivo foi o seguinte:

- Fechar a válvula V2 que permite a entrada de gás no depósito e abrir a válvula V5 que efetua a ligação ao exterior;

- Com a válvula V5 aberta, abrir a válvula V3 de entrada de água da rede e encher o depósito (D) até que comece a sair água pela purga P. Nesta altura fechar a válvula de entrada de água V3;
- Aguardar pela estabilização da pressão no interior do reservatório e fechar a válvula V5;
- Abrir o circuito do gás, quer seja o circuito de ar comprimido ou azoto e definir a pressão de injeção do gás (0,5,0,6 ,0,7 para o ar,0,6 para o azoto). A verificação da pressão pode ser feita por leitura do manómetro que está acoplado ao redutor de pressão;
- Colocar à saída do tubo de pesca um recipiente para recolha da água a rejeitar;
- Abrir a válvula V2 e fechar a válvula V4, introduzindo assim o gás no depósito;
- Verificar o manómetro em U (MU), uma vez que a pressão começará a subir, até que comece a sair água do depósito pelo tubo de pesca, altura em que a pressão estabiliza dentro deste;
- Introduzir o balde B previamente tarado debaixo do tubo de pesca acionando em simultâneo o cronómetro;
- Ler e registar o desnível no manómetro em U, e se observar variação do mesmo durante o ensaio, realizar a leitura no início e fim do ensaio (Δ_P);
- Esperar o tempo necessário para que o balde fique praticamente cheio, altura em que se volta a introduzir o recipiente de recolha debaixo do tubo de pesca, parando em simultâneo a contagem do tempo e tomando nota do seu valor (Δ_t);
- Fechar as válvulas V1, V2 e abrir a válvula V4 que envia o gás para o exterior;
- Pesar o balde cheio de água e anotar o seu valor ($m_{\text{água}}$);
- Ler e registar a temperatura e pressão ambiente;
- Voltar a encher o depósito, seleccionar uma nova pressão de injeção e repetir o procedimento anterior até estarem efetuadas todas as medições para todas as pressões de medição com os respetivos injetores.

Finalmente, o caudal mássico de gás pode ser determinado pela Equação B.1:

$$\dot{m}_{\text{gás}} = \frac{m_{\text{água}} * (\Delta_P + P_a) * M_M}{\Delta_t * \rho_{\text{água}} * R * T_a} \quad (\text{B.1})$$

Em que P_a e T_a , são respetivamente a pressão e temperatura ambiente, M_M é a massa molecular do gás cujo caudal está a ser medido, $m_{\text{água}}$ é a massa de água registada na balança para um intervalo de tempo (Δ_t), $\rho_{\text{água}}$ é a massa volúmica da água e R a constante universal. (Pimenta, 2007).

ANEXO C: Estimativa de Incerteza

Devido ao elevado número de ensaios realizado apenas foi feita a análise de incertezas para um ensaio. A configuração analisada foi a chaminé standard, convecção natural com gás natural como combustível e foram abordados os pontos correspondentes às emissões de CO corrigido máximas e mínimas do ensaio em questão, de forma a se obter uma gama de valores para a incerteza.

Seguidamente será estimada a incerteza geral associada ao valor de CO corrigido. Este valor é calculado com base na equação A.1. A incerteza total associada à equação anteriormente referida é dada pela equação C.1 (Coelho, 2016).

$$(U_{CO_{Corrigido}})^2 = \left(\frac{\partial CO}{\partial CO_{Corrigido}} * U_{CO}\right)^2 + \left(\frac{\partial CO_2}{\partial CO_{Corrigido}} * U_{CO_2}\right)^2 \quad (C.1)$$

É então necessário analisar os erros associados

- À medição de CO;
- À medição de CO₂;

Os erros globais associados à medição de monóxido de carbono e dióxido de carbono podem ser calculados com recurso à equação C.2 (Coelho, 2016).

$$U = \sqrt{B^2 + P^2} \quad (C.2)$$

B corresponde ao erro sistemático associado ao parâmetro em análise e P o erro aleatório. Os erros sistemáticos, inerentes aos dispositivos de medição são dados pelas equações C.3 para o CO e C.4 para o CO₂.

$$B_{CO} = 1\% \text{ da gama de medição} \quad (C.3)$$

$$B_{CO_2} = 1\% \text{ da gama de medição} \quad (C.4)$$

As gamas de medição dos dispositivos são de 500 ppm (v/v) para o dispositivo de CO e de 10,0 % para o dispositivo de CO₂ pelo que os erros sistemáticos são de 5 ppm (v/v) para o CO e de 0,1 % para o CO₂.

Já os erros aleatórios, estão associados ao número de leituras feitas em cada ensaio e são calculados recorrendo às Tabelas *t* de Student, considerando um limite de confiança de 95% e $n-2$ graus de liberdade, sendo n o número de leituras efetuadas, s o desvio padrão e t o parâmetro de *tstudent* que neste caso é igual a 1,96 ($n > 120$). A equação C.5 apresenta a expressão utilizada para o cálculo do erro aleatório (Coelho, 2016).

$$P = \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{C.5})$$

Para o ensaio anteriormente referido os pontos de pressão relativa no queimador correspondentes ao máximo e mínimo de concentrações do ensaio foram 2,0 e 4,0 cmH₂O, respetivamente. As Tabelas C.1 e C.2 apresentam os valores do desvio padrão, média dos valores registados e o valor do erro aleatório para o monóxido e dióxido de carbono.

Tabela C.1 - Valor médio, desvio padrão e erro aleatório dos resultados registados para a pressão relativa no queimador de 2,0 cmH₂O.

	CO (ppm)	CO ₂ (%)
Valor médio ($\bar{x}$)	39,42	3,89
Desvio padrão (σ)	1,61	0,01
Erro aleatório (P)	0,24	0,00

Tabela C.2 - Valor médio, desvio padrão e erro aleatório dos resultados registados para a pressão relativa no queimador de 4,2 cmH₂O.

	CO (ppm)	CO ₂ (%)
Valor médio ($\bar{x}$)	12,98	5,26
Desvio padrão (σ)	0,20	0,01
Erro aleatório (P)	0,03	0,00

Com os valores das Tabelas C.1 e C.2 é possível calcular os valores das incertezas globais associadas aos dispositivos de medição. Os valores referidos anteriormente foram calculados de acordo com a equação C.2 e são apresentados na Tabela C.3.

Tabela C.3 - Valores das incertezas globais associados aos resultados registados para a pressão relativa de 2,0 e 4,2 cmH₂O.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	U_{CO} (ppm)	U_{CO_2} (%)
2,0	5,01	0,1
4,2	5,00	0,1

Com os resultados para as incertezas globais apresentados na Tabela C.3, calculando as derivadas parciais representadas na equação C.1 (para o gás natural o parâmetro $(CO_2)_N$ tem o valor de 11,7 % de acordo com a tabela A.1) e resolvendo a mesma foram obtiveram-se os valores para a incerteza global . Os valores de CO corrigido registados para os pontos em análise foram de 35 ppm (v/v) para a pressão relativa do queimador de 4,2 cmH₂O e de 157 ppm (v/v) para o ensaio com pressão relativa de 2,0 cmH₂O. A Tabela C.4 apresenta os valores obtidos para a incerteza global e relativa de cada um dos pontos.

Tabela C.4 – Valores obtidos para a incerteza global e relativa de cada um dos pontos.

Pressão relativa no queimador (cmH ₂ O)	$U_{CO_{corrigido}}$ (ppm)	Incerteza relativa (%)
2,0	1,69	1%
4,2	2,25	6%