



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS GALVÃO AMORIM

**RESULTADOS DE TESTES PRELIMINARES DO APERFEIÇOAMENTO EXPERIMENTAL
DE UM TUBO DE VÓRTICE UTILIZANDO DIFERENTES CÂMARAS DE INJEÇÃO**

FORTALEZA

2018

MATHEUS GALVÃO AMORIM

RESULTADOS DE TESTES PRELIMINARES DO APERFEIÇOAMENTO
EXPERIMENTAL DE UM TUBO DE VÓRTICE
UTILIZANDO DIFERENTES CÂMARAS DE INJEÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para o título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A542r Amorin, Matheus Galvão.

Resultados de testes preliminares do aperfeiçoamento experimental de um tubo de vórtice utilizando diferentes câmaras de injeção / Matheus Galvão Amorin. – 2018.
37 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

1. Refrigeração não-convencional. 2. Tubo de vórtice. 3. Número de entradas. I. Título.

CDD 620.1

RESUMO

O tubo de vórtice é um equipamento capaz de separar um fluxo de gás em 2 correntes, uma corrente fria e outra quente. Esse equipamento é usado como um refrigerador geralmente, não necessita de manutenção e possui alta confiabilidade, mas o baixo rendimento dificulta a sua utilização. Este trabalho tem como objetivo melhorar o rendimento de um tubo de vórtice através da seleção de um número de entradas para a câmara de injeção que apresente maior eficiência. Foram realizados testes com câmaras de injeção com número de entradas entre 2 e 6, com pressões de entrada variando de 1 até 4 bar. Os melhores resultados foram alcançados com uma câmara de injeção com 3 entradas. A menor temperatura encontrada nos ensaios foi de $-8,7^{\circ}\text{C}$, com uma pressão de 4 bar, e o maior coeficiente de desempenho encontrado foi de 14%, também com uma pressão de 4 bar.

Palavras-Chave: Refrigeração não-convencional, Tubo de vórtice, Número de entradas.

ABSTRACT

The vortex tube is an equipment capable of separating a stream of gas into two streams, one cold stream and one hot stream. This equipment is generally used as a refrigerator, requires no maintenance and has high reliability, but low performance makes it difficult to use. This work aims to improve the efficiency of a vortex tube by selecting a number of inputs to the injection chamber that are more efficient. Tests were carried out with injection chambers with a number of entries between 2 and 6, with inlet pressures ranging from 1 to 4 bar. The best results were achieved with a 3 nozzles injection chamber. The lowest temperature found in the tests was -8.7°C , with a pressure of 4 bar, and the highest coefficient of performance was 14%, also with a pressure of 4 bar.

Keywords: Unconventional Refrigeration, Vortex Tube, Nozzle Number.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de traje especial para soldagem (Avdhoot et al, 2015, Adaptado).	8
Figura 2: tubo de vórtice em contracorrente (Eiamsa et al,2007).	12
Figura 3: Volume de controle do tubo de vórtice (Gao, 2005).	13
Figura 4: Representação esquemática do Sistema (Autor)	16
Figura 5: Representação esquemática do Sistema (Aragão,2017).	17
Figura 6: Câmara (Aragão, 2017).	17
Figura 7: câmaras de injeção do tubo de vórtice (Autor).	18
Figura 8: Válvula de separação (Aragão, 2017).	19
Figura 9: Compressor.	19
Figura 10: Filtro (Werk-Schott Pneumática, Catálogo 0104).	20
Figura 11: Coletor de dados (Omega, Manual modelo RDXL12SD).	21
Figura 12: Tanque (Silva, 2012).	21
Figura 13: Máximas temperaturas quentes e mínimas temperaturas frias.	22
Figura 14: Maiores diferenças de temperatura fria.	23
Figura 15: Temperaturas do injetor de 2 entrada com pressão de 1 bar	23
Figura 16: Temperaturas do injetor de 2 entrada com pressão de 2 bar	24
Figura 17: Temperaturas do injetor de 2 entrada com pressão de 3 bar	24
Figura 18: Temperaturas do injetor de 2 entrada com pressão de 4 bar	25
Figura 19: Temperaturas do injetor de 3 entrada com pressão de 1 bar	25
Figura 20: Temperaturas do injetor de 3 entrada com pressão de 2 bar	26
Figura 21: Temperaturas do injetor de 3 entrada com pressão de 3 bar	26
Figura 22: Temperaturas do injetor de 3 entrada com pressão de 4 bar	27
Figura 23: Temperaturas do injetor de 4 entrada com pressão de 1 bar	27
Figura 24: Temperaturas do injetor de 4 entrada com pressão de 2 bar	28
Figura 25: Temperaturas do injetor de 4 entrada com pressão de 3 bar.	28
Figura 26: Temperaturas do injetor de 4 entrada com pressão de 4 bar.	29
Figura 27: Temperaturas do injetor de 5 entrada com pressão de 1 bar.	29
Figura 28: Temperaturas do injetor de 5 entrada com pressão de 2 bar.	30
Figura 29: Temperaturas do injetor de 5 entrada com pressão de 3 bar.	30
Figura 30: Temperaturas do injetor de 5 entrada com pressão de 4 bar.	31
Figura 31: Temperaturas do injetor de 6 entrada com pressão de 1 bar.	31
Figura 32: Temperaturas do injetor de 6 entrada com pressão de 2 bar.	32
Figura 33: Temperaturas do injetor de 6 entrada com pressão de 3 bar.	32
Figura 34: Temperaturas do injetor de 6 entrada com pressão de 4 bar.	33
Figura 35: Coeficiente de desempenho para 1 bar.	34
Figura 36: Coeficiente de desempenho para 2 bar.	35
Figura 37: Coeficiente de desempenho para 3 bar.	35
Figura 38: Coeficiente de desempenho para 4 bar.	36

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p	Calor específico molar [J/(kg.K)]
COP	Coefficiente de desempenho
E	Energia Interna [J/kg]
g	Altura [m]
h	Entalpia [J]
k	Razão de calores específicos
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
P	Pressão [Pa]
\dot{Q}	Transferência de calor [J/s]
R	Constante dos gases ideais [J/(kg.K)]
t	Tempo [s]
T	Temperatura [K]
V	Velocidade [m/s]
W	Trabalho do Compressor [W]
z	Altura [m]
ε	Fração de massa fria
Δ	Diferença

SUBSCRITOS

in	Entrada
c	Saída fria
h	Saída quente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS.....	10
2.1	Objetivos Específicos	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
4	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	12
4.1	Funcionamento do Tubo de Vórtice.....	12
4.2	Análise Termodinâmica	13
4.2.1	<i>Balço de Massa</i>	13
4.2.2	<i>Primeira Lei da Termodinâmica</i>	13
4.2.3	<i>Eficiência do Tubo de Vórtice</i>	14
5	METODOLOGIA	16
5.1	Configuração do Sistema.....	16
5.2	Tubo de Vórtice.....	17
5.2.1	<i>Câmara</i>	17
5.2.2	<i>Câmaras de Injeção</i>	18
5.2.3	<i>Tubo</i>	19
5.2.4	<i>Válvula de Separação</i>	19
5.3	Compressor	19
5.4	Unidade de Preparação de Ar.....	20
5.5	Coletor de Dados e Termopares	20
5.7	Tanque	21
6	RESULTADOS	22
6.1	Medições Experimentais	22
6.2	Eficiência Energética	34
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

1 INTRODUÇÃO

Nos sistemas de refrigeração, geralmente, é utilizado o ciclo termodinâmico de compressão de vapor. É o mais aplicado por apresentar a melhor relação entre eficiência e custo iniciais, principalmente quando utilizado em larga escala, para câmaras frias, condicionamento de ar e processos industriais. Esses sistemas apresentam boa confiabilidade e baixo custo de manutenção, mas evidenciam problemas relativos a vazamentos que causam grande impacto ambiental.

Os fluidos de trabalho utilizados na maioria dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor são os HCFCs e os HFCs. Quando liberados para ao ambiente, os HCFCs causam a redução da camada de ozônio e os HFCs possuem alto potencial de aquecimento global, portanto, contribuem com as mudanças climáticas. Para reduzir o impacto causado por esses sistemas, estão sendo propostos como alternativa para sistemas de grande porte a utilização de CO₂ como fluido de trabalho, por ser um gás atóxico e, relativamente, ter baixo potencial de aquecimento global. Por suas características termodinâmicas, o CO₂ necessita de altas pressões para sua utilização em um ciclo de compressão de vapor, o que inviabiliza a sua utilização em sistemas de pequena escala. Diante disso, é necessário encontrar alternativas para sistemas de pequeno porte.

Uma alternativa para a resfriamento localizado é a utilização de tubos de vórtice. Apesar de possuírem baixa capacidade de refrigeração em comparação com os sistemas tradicionais, os tubos de vórtice apresentam vantagens competitivas quando existe disponibilidade de ar comprimido. Possuem altíssima confiabilidade; são praticamente livres de manutenção; seus custos iniciais são pequenos; não há a produção de faíscas, aspecto importante para locais com risco de explosão; não possuem partes móveis; e dispõem de um sistema compacto. Além disso, apresentam baixa inércia térmica e uma grande variedade de temperaturas de trabalho, com ajuste simples. O grande obstáculo na utilização de refrigeração por tubo de vórtice está na baixa eficiência do equipamento, em comparação com os sistemas convencionais de refrigeração.

Esse dispositivo é empregado em diversas aplicações. Pode-se citar como exemplo a refrigeração de placas eletrônicas, arrefecimento em processos de usinagem, refrigeração de trajes especiais para soldagem, mineração em atmosferas agressivas e conservação de alimentos em pequenas embarcações e pequenos veículos. A figura 1 mostra um modelo de traje especial para soldagem.

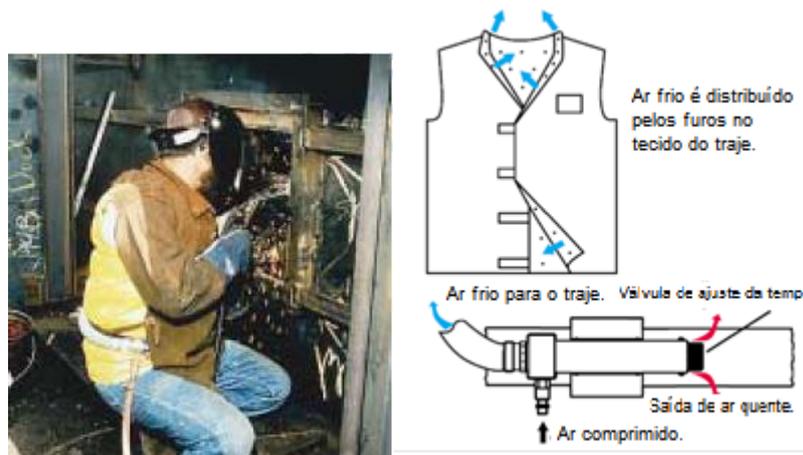


Figura 1: Exemplo de traje especial para soldagem (Avdhoot et al, 2015, Adaptado).

Neste trabalho, foi investigada a influência do número de entradas do tubo de vórtice no coeficiente de desempenho (COP), por se tratar de um parâmetro fundamental para o projeto de sistemas de refrigeração, com o objetivo de selecionar o injetor mais eficiente.

2 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foram os testes preliminares para o aperfeiçoamento de um tubo de vórtice fabricado por Aragão (2017) para operação em baixa pressão por meio da escolha do injetor mais eficaz.

2.1 Objetivos Específicos

Para a realização dos trabalhos experimentais, foram seguidas as seguintes etapas:

- a) Projeto das navos câmaras de injeção;
- b) Fabricação em ABS, por impressão 3D;
- c) Montagem do sistema;
- d) Realização de ensaios para diferentes pressões;
- e) Análise dos resultados experimentais e determinação do injetor mais eficiente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os estudos relevantes que analisam diferentes parâmetros do tubo de vórtice, iniciando pelo fenômeno de separação térmica primeiramente reportado por Ranque (1933). Anos mais tarde, Hilsch (1947) deu continuidade aos estudos de Ranque. Realizou experimentos com tubos de vórtice com orifícios de saída fria com diâmetros variados. Concluiu que o aumento da pressão melhorava o efeito de separação térmica e recomendou a utilização de um tubo com razão L/D igual a 50.

Nos estudos experimentais de Cockerill (1998), foi observado que as menores temperaturas frias eram encontradas com fração de massa fria de 0,3. Foi observado também que a temperatura da saída quente crescia com o aumento da razão de massa fria até o valor de 0,8 aproximadamente. Foram realizados experimentos com diferentes pressões de entrada e frações de massa fria variando de 0 a 1. Concluiu-se que as maiores eficiências de refrigeração eram encontradas com fração de massa fria entre 0,6 e 0,8.

Aydin (2006) realizou vários testes com diferentes razões de comprimento e diâmetro variando de 14 até 42. Conclui que os melhores resultados de separação térmica foram encontrados com o tubo de comprimento de aproximadamente 20 vezes o diâmetro.

Eiamsa-ard e Promvongse (2007) estudaram o efeito de diversos parâmetros geométricos para o tubo de vórtice. Encontraram que a razão de comprimento e diâmetro de 20, o ângulo da válvula de separação de 50° apresentam os melhores resultados.

Nimbalkar e Muller (2009) investigaram a influência do diâmetro de saída fria e a influência da fração de massa fria no efeito de refrigeração. Concluíram que o valor da fração de massa que apresenta a maior separação térmica é igual a 60%, independentemente da pressão de entrada e do diâmetro do furo de saída fria.

Kirmarci (2009) testou experimentalmente tubos de vórtice com número de entradas variando entre 2 e 6 com pressões entre 150 kPa até 700 kPa. Realizou ensaios com frações de massa fria fixa de 50% e utilizou nos ensaios ar e oxigênio. Concluiu que o aumento do número de bocais de entrada reduziu a diferença de temperatura da saída fria e quente para pressões superiores a 600 kPa e que o oxigênio apresentava resultados superiores na diferença térmica.

Hamdan (2011) investigou experimentalmente a influência do isolamento térmico nas temperaturas de saída fria e quente do tubo de vórtice. Realizou testes com o tubo de vórtice com e sem isolamento. Concluiu que a transmissão térmica pelas paredes do tubo era muito pequena em comparação com a transmissão dentro do tubo, portanto, a utilização de isolamento térmico tem pouco efeito na capacidade de refrigeração do tubo de vórtice.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, são descritos os princípios de funcionamento do tubo de vórtice e os fundamentos termodinâmicos utilizados na análise do tubo de vórtice. A análise termodinâmica do tubo de vórtice tem como objetivo mensurar os COPs alcançados por cada câmara de injeção utilizada, para a seleção da câmara com melhor eficiência energética de refrigeração.

4.1 Funcionamento do Tubo de Vórtice

O tubo de vórtice é um mecanismo capaz de separar uma corrente de gás em duas correntes, uma corrente com temperatura inferior à entrada e uma corrente com temperatura superior à entrada. O mecanismo é de simples fabricação, não possui partes móveis e alcança facilmente temperaturas baixas, considerando que para o seu funcionamento é necessário apenas o fornecimento de gás.

O tubo de vórtice consiste de um ou mais bocais de entrada, câmara, tubo e válvula cônica. O gás comprimido entra tangencialmente na câmara através dos bocais. Por entrar tangente à câmara, forma-se um vórtice dentro do mecanismo. O gás na parte externa do vórtice possui temperatura superior à temperatura da entrada, e o gás na parte interna possui temperatura inferior à temperatura de entrada. A separação dos dois fluxos é feita pela válvula cônica, que retira o fluxo quente, e pelo furo central, que retira o fluxo frio. Várias teorias foram propostas para explicar o efeito de separação de energia que ocorre dentro do tubo de vórtice. Ahlborn e Groves (1997) apresentaram a teoria da circulação secundária para explicar o efeito de separação de energia. Lewis e Bejan (1999) sugeriram que o diferencial de velocidade angular radial causa atrito entre as diferentes camadas do escoamento rotacional resultando em migração de energia por trabalho de cisalhamento da região central para as bordas. Esse fenômeno está esquematizado na Figura 2.

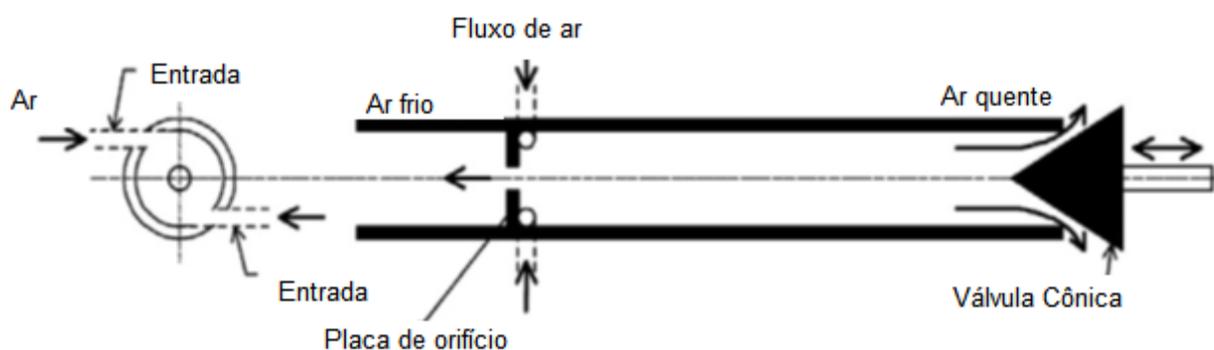


Figura 2: tubo de vórtice em contracorrente (Eiamsa *et al*,2007).

Existem duas configurações de tubo de vórtice: contracorrente e concorrente. A diferença

está na posição do furo de saída fria, oposta à válvula cônica – para a configuração contracorrente – e no centro da válvula cônica – na configuração concorrente.

4.2 Análise Termodinâmica

A análise termodinâmica apresentada neste tópico é baseada no trabalho apresentado por Gao (2005). O tubo de vórtice é tratado como um volume de controle. A entrada, a saída quente e a saída fria são consideradas como superfícies de controle. O volume de controle estudado está representado na Figura 3. As legendas in, c e h representam a entrada, a saída fria e a saída quente, respectivamente.

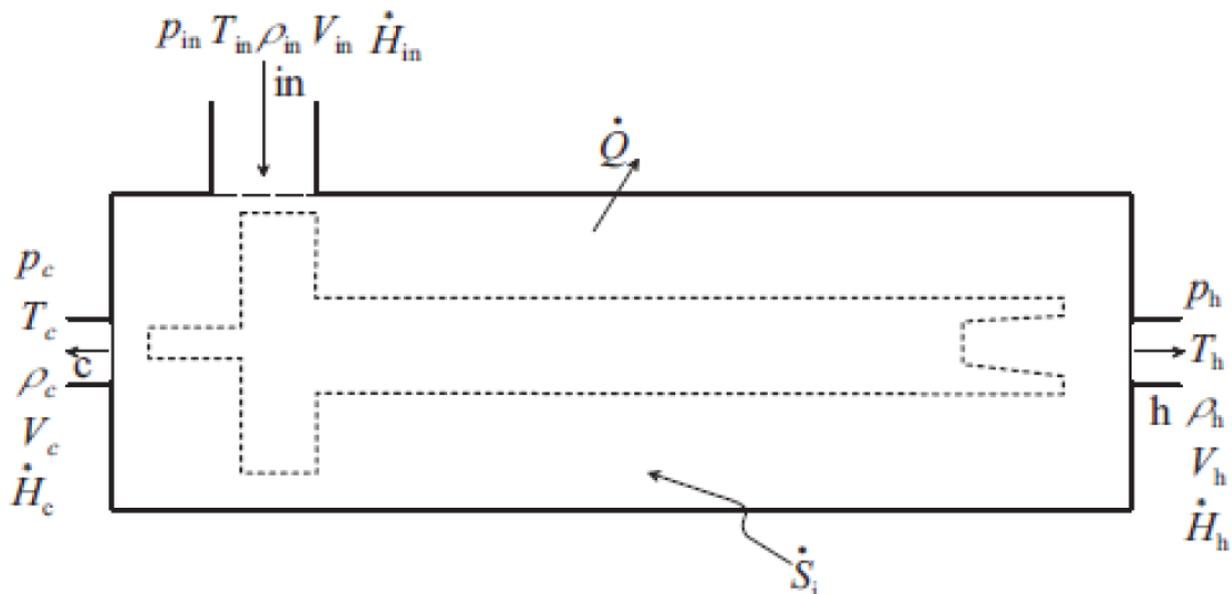


Figura 3: Volume de controle do tubo de vórtice (Gao, 2005).

4.2.1 Balanço de Massa

Aplicando o balanço de massa ao volume de controle, em regime permanente, encontra-se:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_c + \dot{m}_h \quad (4.1)$$

A fração de massa fria é o parâmetro físico determinado pela posição da válvula cônica, é definida como a razão entre fluxo de massa da saída fria e o fluxo de massa da entrada,

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{in}} \quad (4.2)$$

4.2.2 Primeira Lei da Termodinâmica

Analisando o tubo de vórtice pela primeira lei da termodinâmica, considerou-se negligenciáveis as variações de energia cinética e potencial, os fluxos de calor fora das superfícies

de controle, corroborando com os estudos de Hamdan (2011), o trabalho realizado pelo ambiente; que o equipamento opera em regime permanente; que o ar é um gás ideal.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_{in}(h_{in} + V_{in} + gz_{in}) - \dot{m}_c(h_c + V_c + gz_c) - \dot{m}_h(h_h + V_h + gz_h) \quad (4.3)$$

Aplicando as hipóteses citadas à equação da primeira lei da termodinâmica para o volume de controle, encontra-se:

$$\dot{m}_{in}h_{in} = \dot{m}_ch_c + \dot{m}_hh_h \quad (4.4)$$

Sendo a entalpia definida como:

$$h = c_p T \quad (4.5)$$

Substituindo as equações (4.1), (4.2) e (4.5) na equação (4.4), chega-se a expressão:

$$\varepsilon = \frac{T_h - T_{in}}{T_h - T_c} \quad (4.6)$$

4.2.3 Eficiência do Tubo de Vórtice

Considerando que o interesse do trabalho está na análise do tubo de vórtice como um refrigerador, é utilizado na análise de eficiência o parâmetro coeficiente de desempenho (COP). O COP para um ciclo de refrigeração é definido como a razão entre o efeito de refrigeração e o trabalho necessário para a realização desse efeito. Está representado na Equação (4.7):

$$COP = \frac{\dot{m}_ch_c}{W} \quad (4.7)$$

O efeito de refrigeração representa a energia necessária para a taxa de massa da saída fria retorne à temperatura de entrada. É expresso por:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c c_p (h_{in} - h_c) \quad (4.8)$$

O trabalho de compressão foi considerado como compressão isotérmica ideal. É calculado pela Equação (4.9):

$$W = \dot{m}_{in} RT_{in} \ln \frac{P_{in}}{P_{atm}} \quad (4.9)$$

Substituindo as Equações (4.3), (4.4), (4.5), (4.8) e (4.9) na Equação (4.7) e rearranjando os termos; encontra-se a Equação (4.10) utilizada no cálculo do COP.

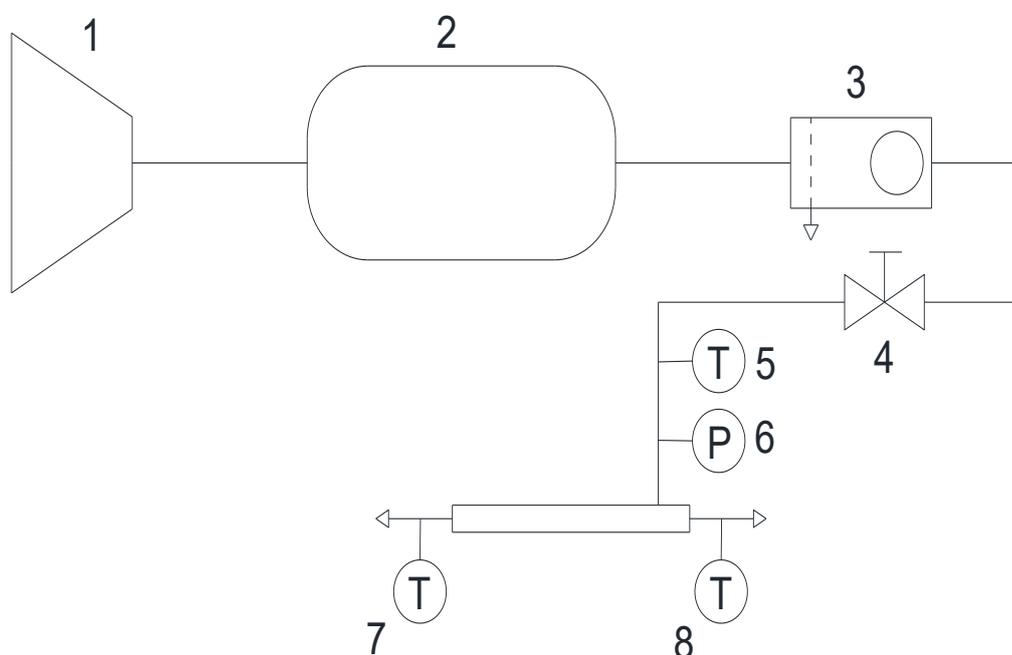
$$COP = \frac{\varepsilon k (1 - \frac{T_c}{T_{in}})}{(k-1) \ln \frac{P_{in}}{P_{atm}}} \quad (4.10)$$

5 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os materiais e os métodos utilizados na realização dos ensaios.

5.1 Configuração do Sistema

O sistema utilizado para os ensaios de câmaras de injeção com diferentes números de entradas está representado no diagrama da figura 4. O sistema foi montado para a medição das temperaturas de entrada, saída quente e saída fria, com a pressão mantida constante.



1. Compressor de ar.
2. Tanque.
3. Filtro
4. Válvula.
5. Termopar de entrada
6. Manômetro
7. Termopar de saída quente.
8. Termopar de saída fria.

Figura 4: Representação esquemática do Sistema (Autor)

5.2 Tubo de Vórtice

Foi utilizado o tubo de vórtice fabricado por Aragão (2017). O tubo de vórtice utilizado possui a configuração de contracorrente e é composto de câmara de vórtice, câmaras de injeção de ar, tubo e válvula de separação. O tubo está representado na Figura 5.

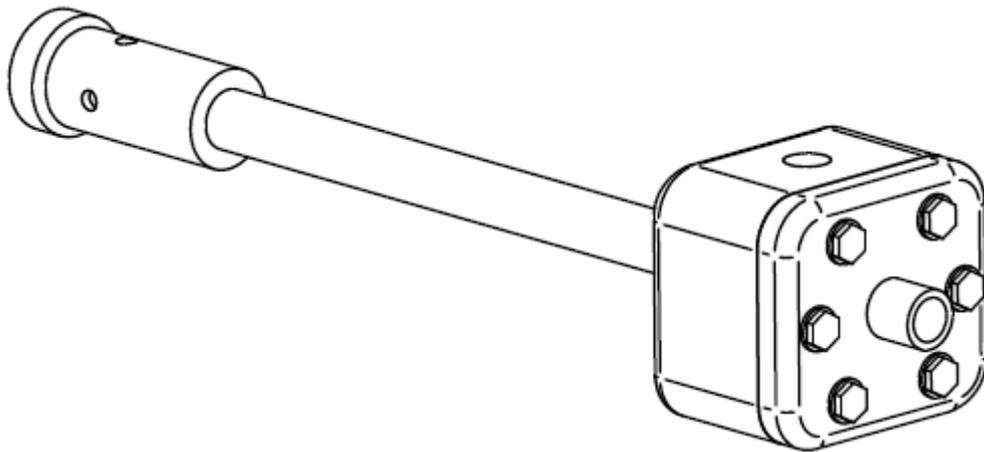


Figura 5: Representação esquemática do Sistema (Aragão,2017).

5.2.1 Câmara

A câmara de vórtice utilizada está representada na Figura 6. Foi fabricada por Aragão (2017) pelo processo de usinagem em Nylon. Possui um furo lateral rosqueado para entrada de ar, onde é fixado o engate da tomada de ar comprimido, um furo na base, para a fixação do tubo, um furo na tampa da câmara, para a fixação do injetor de ar, e seis furos ao redor da tampa e corpo da câmara de vórtice, para a fixação da tampa no corpo por parafusos. A vedação é feita por uma junta de borracha.

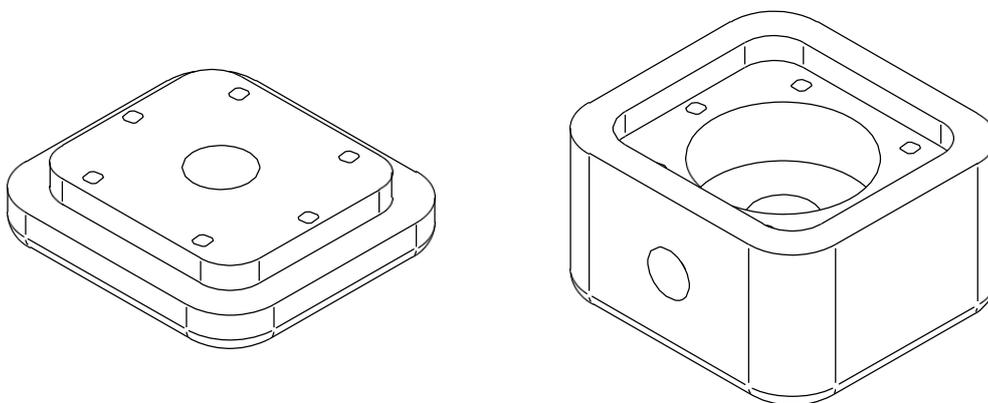


Figura 6: Câmara (Aragão, 2017).

5.2.2 Câmaras de Injeção

Foram utilizadas as câmaras de injeção de 4 e 6 entradas fabricadas em nylon pelo processo de usinagem por Aragão (2017) e as câmaras de injeção 2, 3, e 5 fabricadas em ABS pelo processo de impressão 3D. As entradas das câmaras de injeção são tangentes à parede interna da câmara, favorecendo formação de vorticidade. As câmaras de injeção estão representadas na Figura 7. As câmaras de injeção utilizadas tem o projeto baseado no trabalho de Silva (2014).

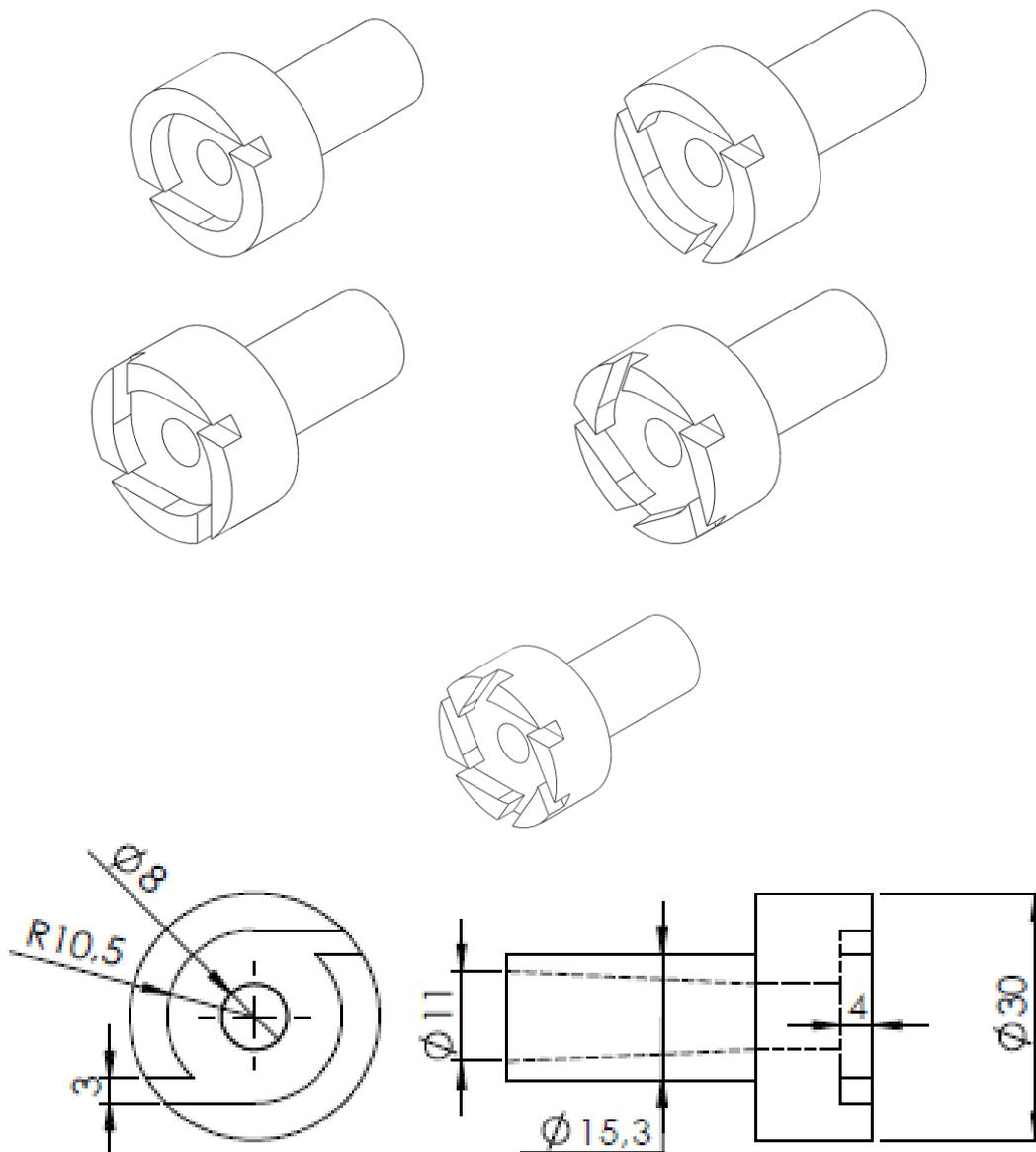


Figura 7: câmaras de injeção do tubo de vórtice (Autor).

5.2.3 *Tubo*

O tubo utilizado é de PVC para instalações de água quente domésticas da marca Aquatherm, o mesmo utilizado por Aragão (2017). O diâmetro utilizado é de 11,3 mm, e foi escolhido por ser um valor comercial. O tubo possui o comprimento de 226 mm, para corresponder a 20 vezes o diâmetro. Essa relação entre o diâmetro e comprimento foi definida como ótima por Aydin (2006).

5.2.4 *Válvula de Separação*

A válvula de separação utilizada foi fabricada em nylon por usinagem por Aragão (2017). Tem a função de separar as correntes de ar quente e ar frio. A válvula possui encaixe rosqueado, como representado na figura 8, com o ângulo da ponta da válvula de 50°. Esse ângulo é considerado ótimo por Eiamsa e Provong (2007).

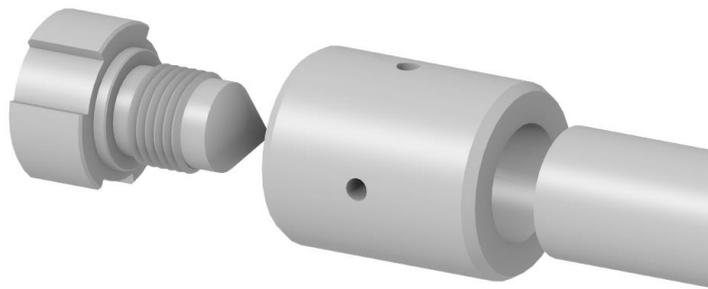


Figura 8: Válvula de separação (Aragão, 2017).

5.3 **Compressor**

Foi utilizado o compressor de ar da marca Chiaperini, modelo MC7.6/24L2HP, representado na Figura 9, com alimentação monofásica. Esse motocompressor foi escolhido por ser similar ao selecionado por Aragão (2017). O compressor admite pressão de trabalho de 8 bar e vazão 510 pés cúbicos por hora, pressão e vazão suficientes para a operação do tubo de vórtice.



Figura 9: Compressor (Chiaperini Compressores, 2015).

5.4 Unidade de Preparação de Ar

Foi utilizado o filtro da marca Werk-Schott, modelo 21-F252, representado na Figura 10. Tem como objetivo retirar impurezas que passam pelo compressor, evitando o acúmulo de óleo e umidade dentro do tubo de vórtice.



Figura 10: Filtro (Werk-Schott Pneumática, Catálogo 0104).

5.5 Coletor de Dados e Termopares

No recolhimento de dados de temperatura do ensaio, foi utilizado um data logger da marca Omega, modelo RDXL12SD, representado na Figura 11. Nele, foram conectados os termopares 3 do tipo K. As juntas dos termopares foram posicionadas na entrada, saída quente e saída fria, para que fossem realizadas as medições de temperatura. O intervalo de coleta de dados utilizado foi de 1s.



Figura 11: Coletor de dados (Omega, Manual modelo RDXL12SD).

5.7 Tanque

O tanque utilizado para armazenar o ar atmosférico usado nos ensaios possui 135L de volume, e está representado na Figura 12. Foi o mesmo utilizado por Silva (2012).



Figura 12: Tanque (Silva, 2012).

6 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios.

6.1 Medições Experimentais

Nesta seção, os resultados serão apresentados em gráficos que mostram as temperaturas encontradas em diferentes pressões de entrada do tubo de vórtice e diferentes frações de massa fria, a qual foi regulada através da válvula de separação.

Os ensaios mostram que as maiores separações de temperatura ocorreram com o injetor de 3 entradas. A Figura 13 mostra o comportamento do tubo de vórtice nas diferentes configurações utilizadas nos ensaios e estão representadas as maiores temperaturas quentes e as menores temperaturas frias encontradas nas diferentes pressões de ensaio. Os resultados apresentados possuem frações de massa fria diferentes.

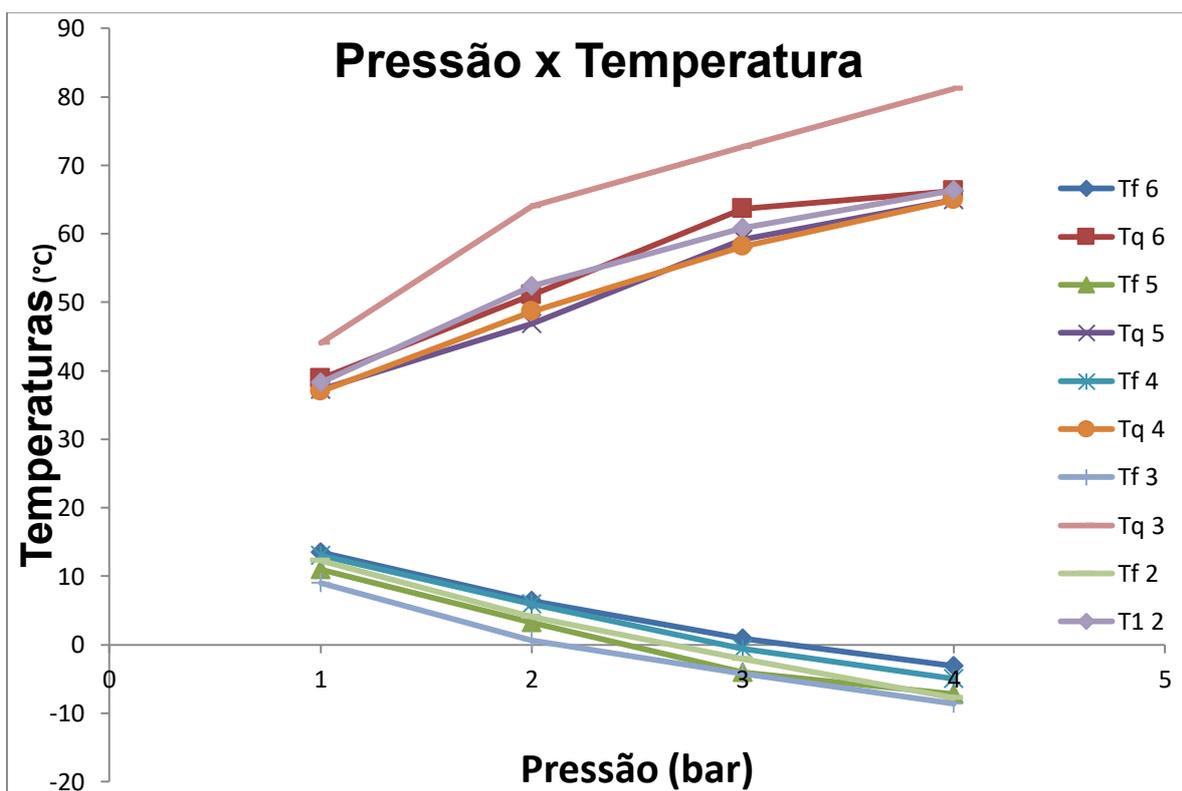


Figura 13: Máximas temperaturas quentes e mínimas temperaturas frias.

A Figura 14 mostra a diferença de temperatura entre a entrada e a saída fria, ΔT_f . Os ΔT_f s apresentados são para as menores temperaturas encontradas em cada injetor. O injetor com 3 entradas alcançou os maiores diferenciais de temperatura. As câmaras de injeção fabricados em ABS obtiveram maiores diferenciais de temperatura fria em comparação com as câmaras de injeção fabricados em nylon.

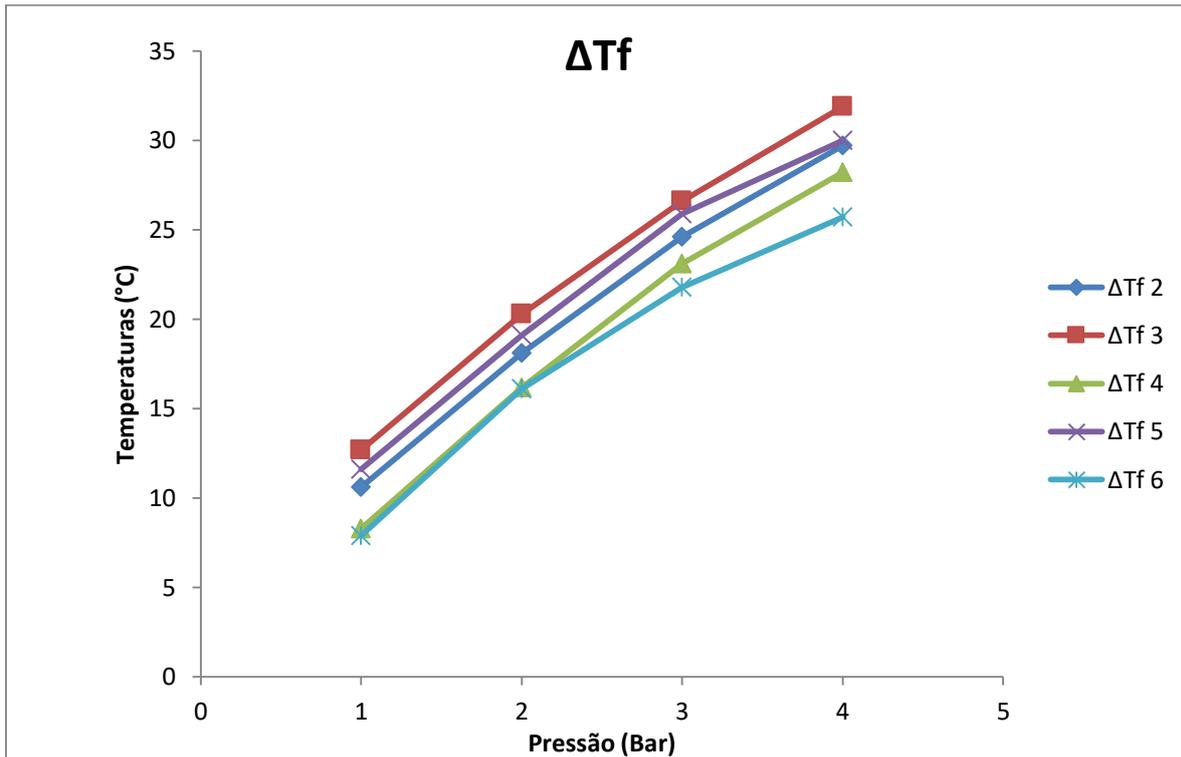


Figura 14: Maiores diferenças de temperatura fria.

A figura 15 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 2 entradas com a pressão de 1 bar. A temperatura mínima encontrada foi de 12,3 °C com uma fração massa fria de 0,49. A variação da fração de massa fria teve pouca influência na temperatura da saída fria em comparação com a temperatura de saída quente.

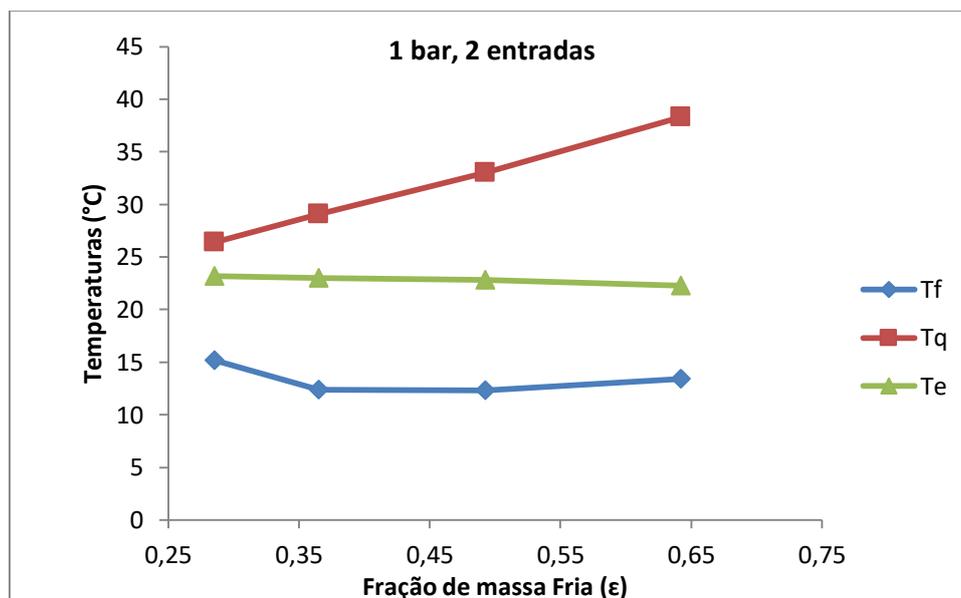


Figura 15: Temperaturas do injetor de 2 entrada com pressão de 1 bar.

A Figura 16 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 2 entradas com a pressão de 2 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de 4,1 °C com a fração de massa fria de 0,53.

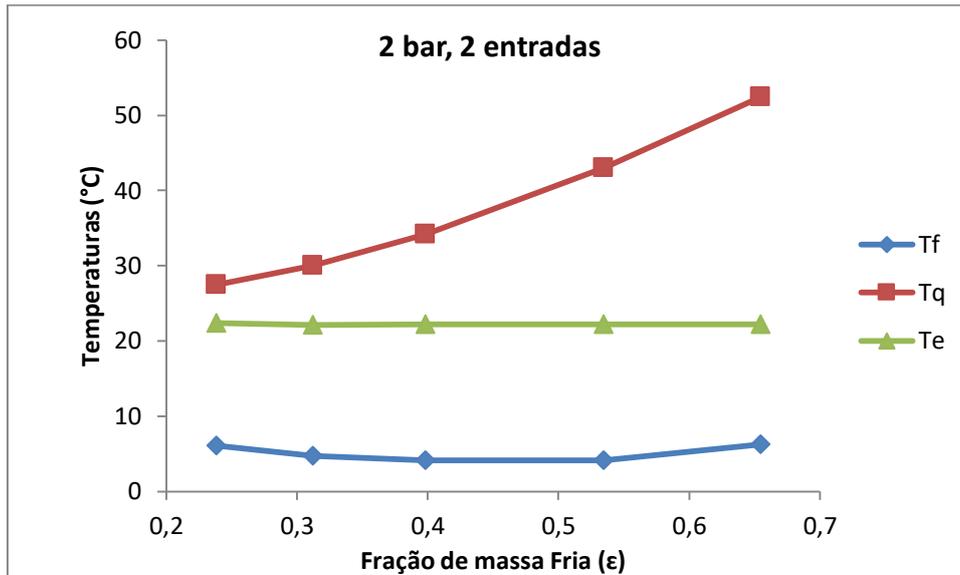


Figura 16: Temperaturas do injetor de 2 entrada com pressão de 2 bar.

A Figura 17 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 2 entradas com a pressão de 3 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de $-2,1$ °C com a fração de massa fria de 0,53.

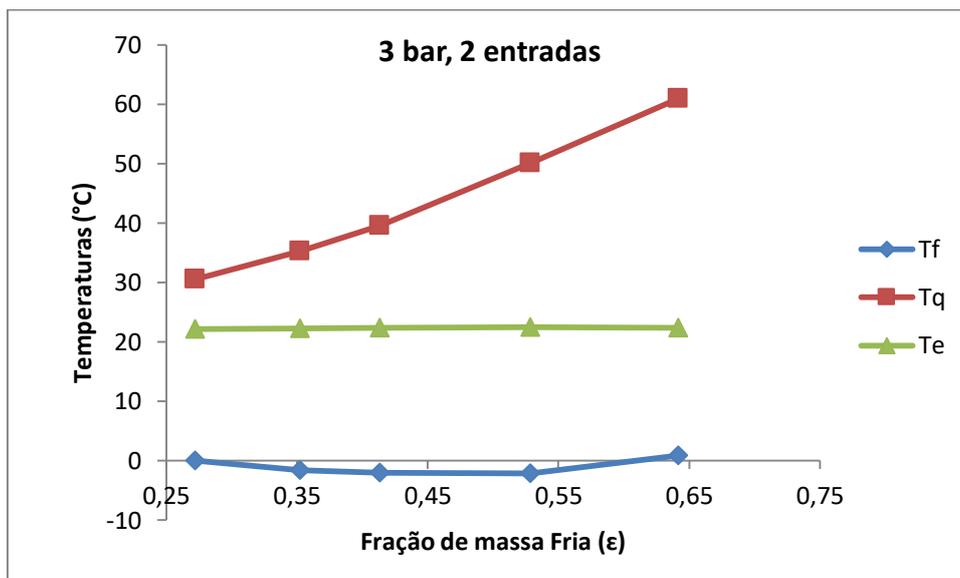


Figura 17: Temperaturas do injetor de 2 entrada com pressão de 3 bar.

A Figura 18 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 2 entradas com a pressão de 4 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de $-7,6$ °C com a fração de massa fria de 0,47.

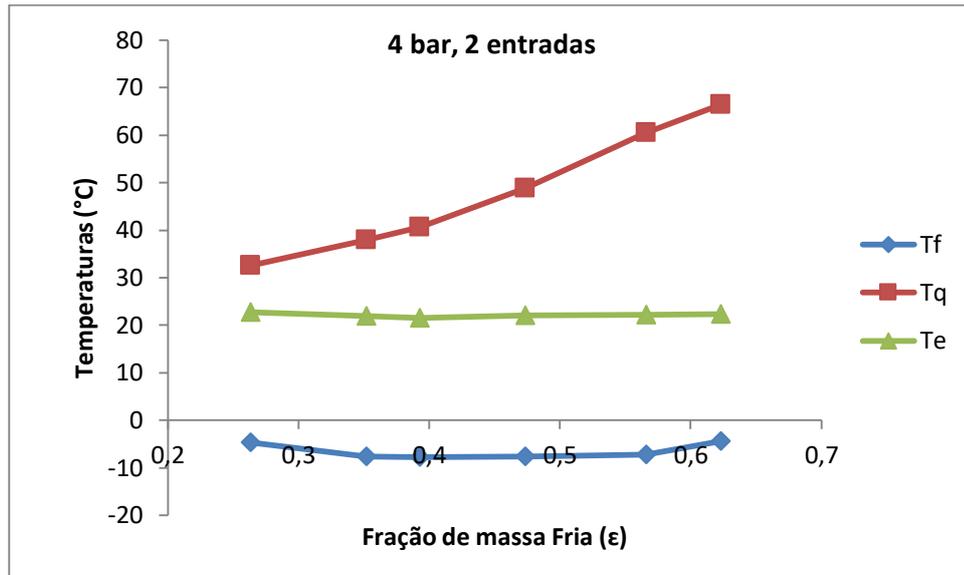


Figura 18: Temperaturas do injetor de 2 entrada com pressão de 4 bar.

A Figura 19 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 3 entradas com a pressão de 1 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de 9 °C com a fração de massa fria de 0,48.

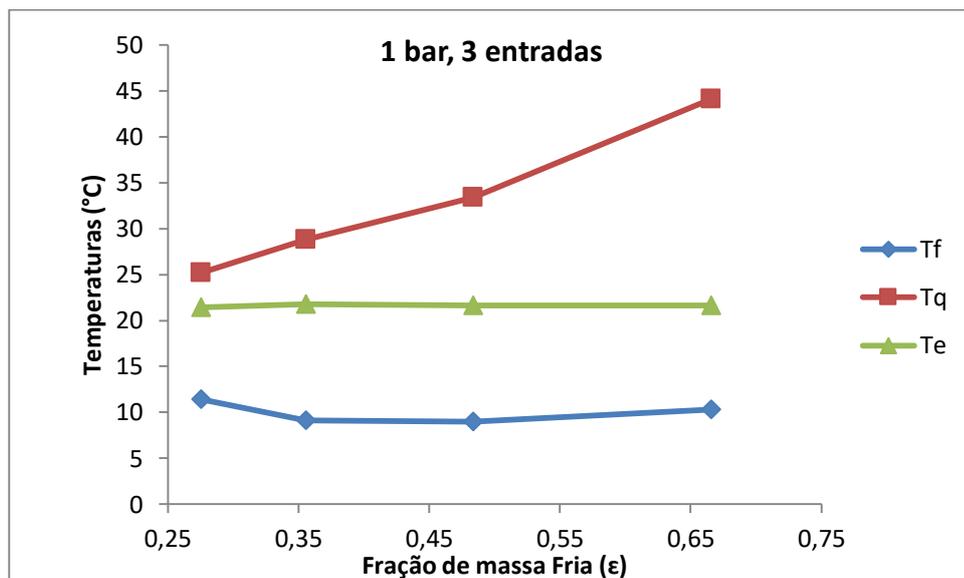


Figura 19: Temperaturas do injetor de 3 entrada com pressão de 1 bar.

A Figura 20 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 3 entradas com a pressão de 2 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de -0,5 °C com a fração de massa fria de 0,38.

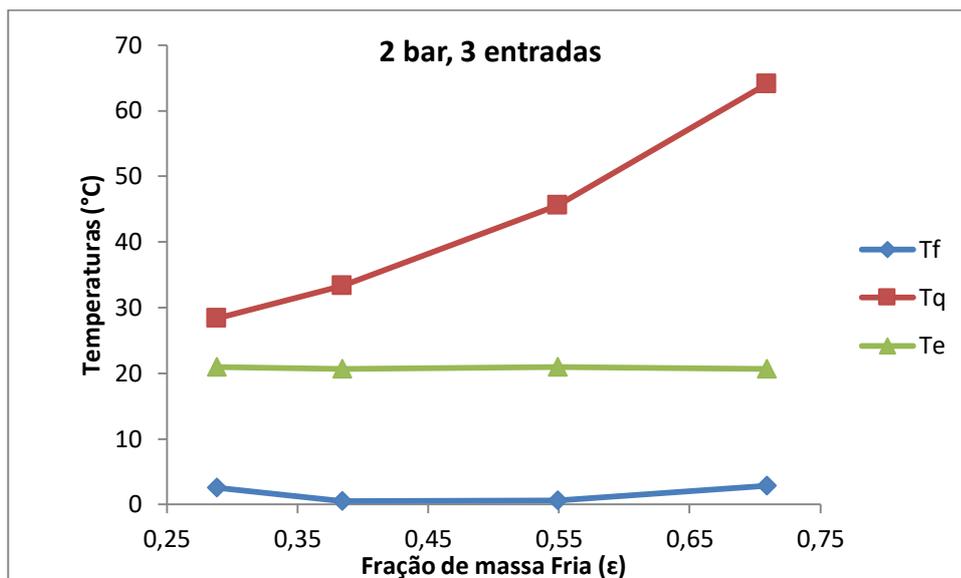


Figura 20: Temperaturas do injetor de 3 entrada com pressão de 2 bar.

A Figura 21 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 3 entradas com a pressão de 3 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de $-3,7\text{ °C}$ com a fração de massa fria de 0,49.

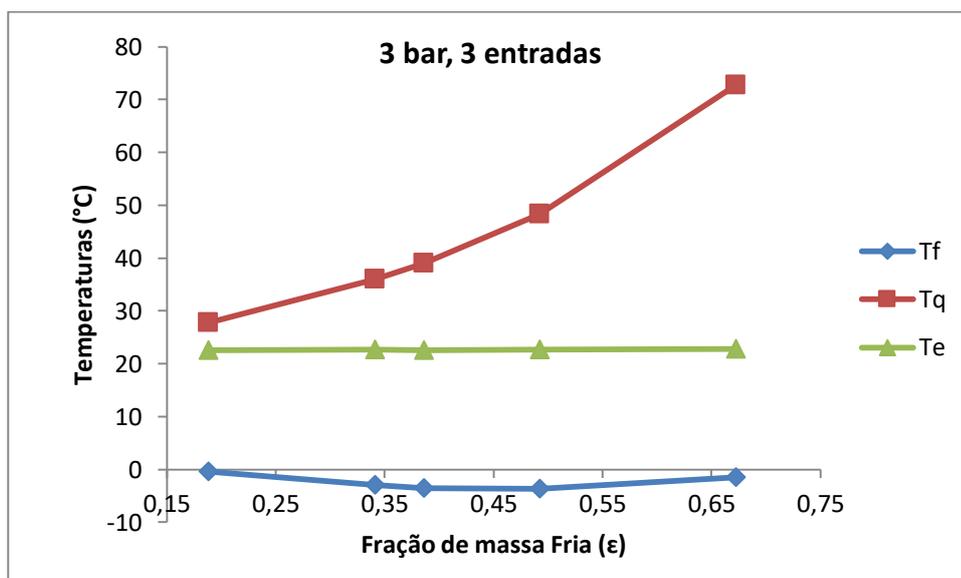


Figura 21: Temperaturas do injetor de 3 entrada com pressão de 3 bar.

A Figura 22 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 3 entradas com a pressão de 4 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de $-8,7\text{ °C}$ com a fração de massa fria de 0,44.

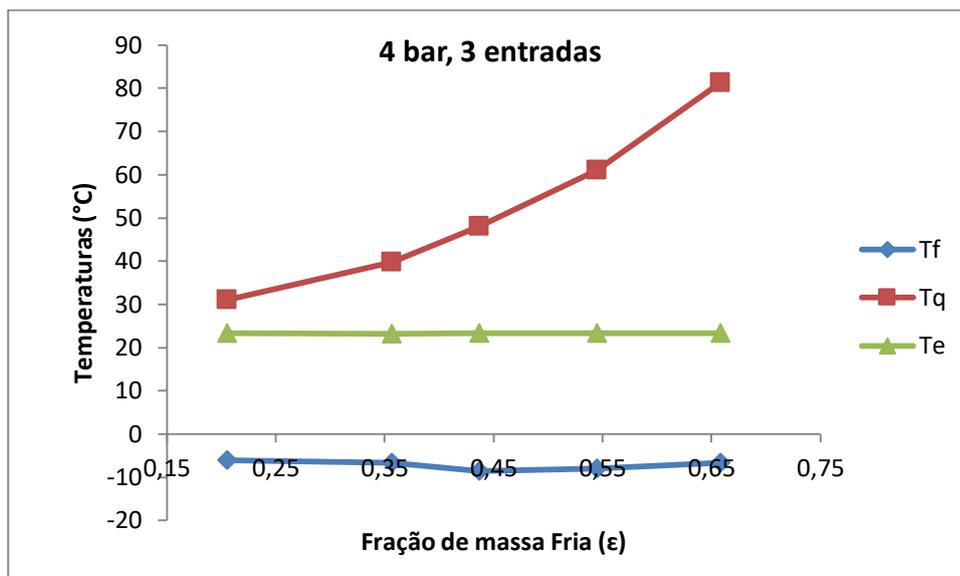


Figura 22: Temperaturas do injetor de 3 entrada com pressão de 4 bar.

A Figura 23 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 4 entradas com a pressão de 1 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de 14,5 °C com a fração de massa fria de 0,48.

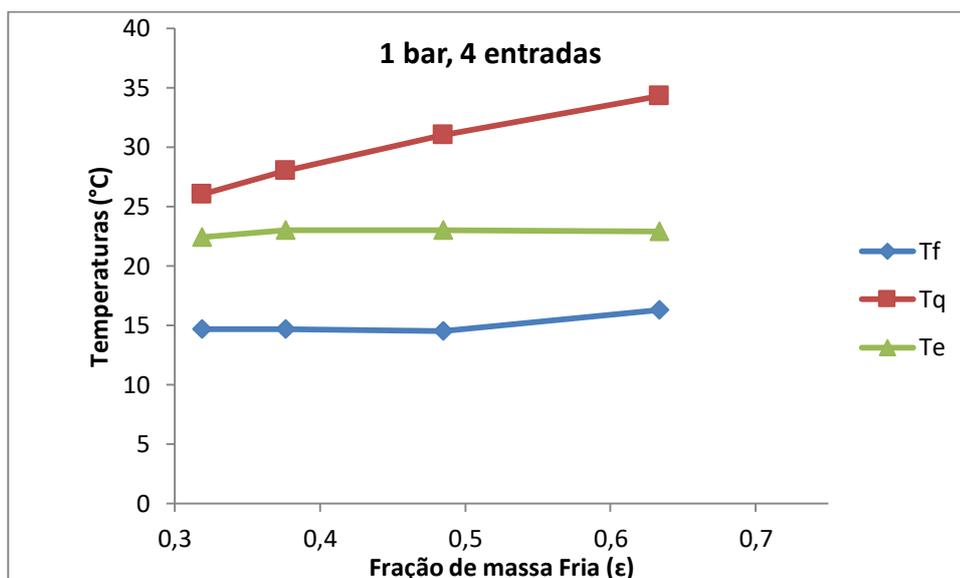


Figura 23: Temperaturas do injetor de 4 entrada com pressão de 1 bar.

A Figura 24 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 4 entradas com a pressão de 2 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de 5,9 °C com a fração de massa fria de 0,40.

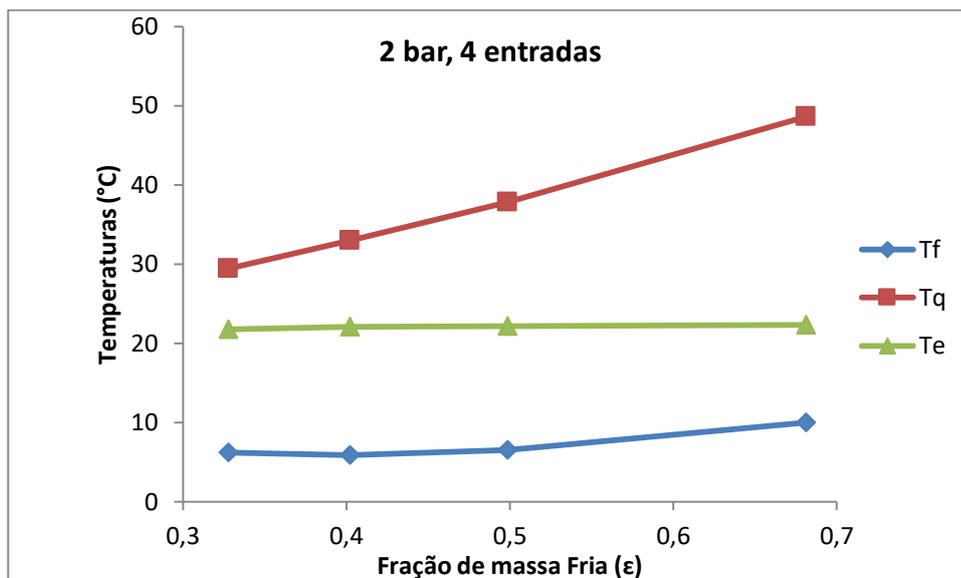


Figura 24: Temperaturas do injetor de 4 entrada com pressão de 2 bar.

A Figura 25 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 4 entradas com a pressão de 3 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de $-0,3$ °C com a fração de massa fria de 0,44.

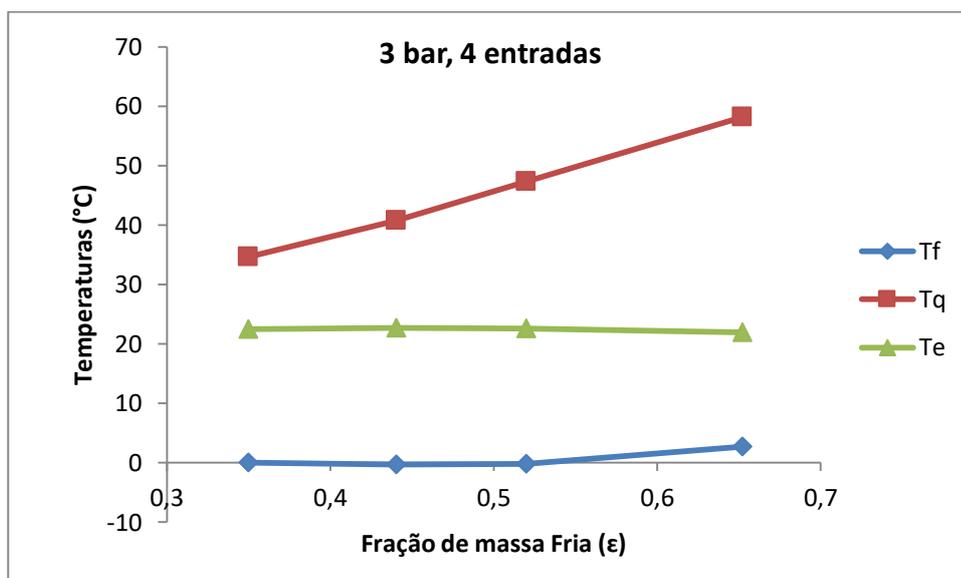


Figura 25: Temperaturas do injetor de 4 entrada com pressão de 3 bar.

A Figura 26 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 4 entradas com a pressão de 4 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de $-5,0$ °C com a fração de massa fria de 0,44.

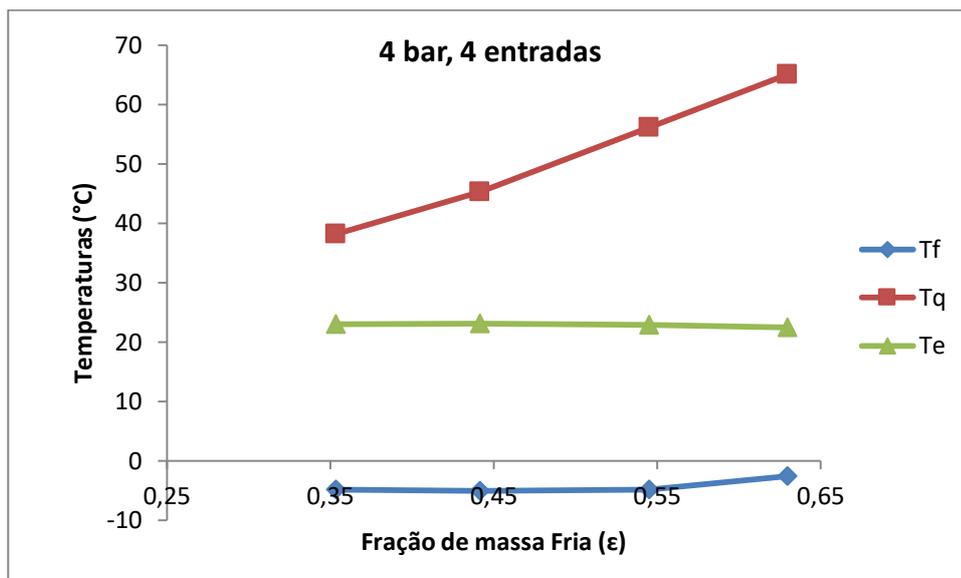


Figura 26: Temperaturas do injetor de 4 entrada com pressão de 4 bar.

A Figura 27 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 5 entradas com a pressão de 1 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de 11,0 °C com a fração de massa fria de 0,48.

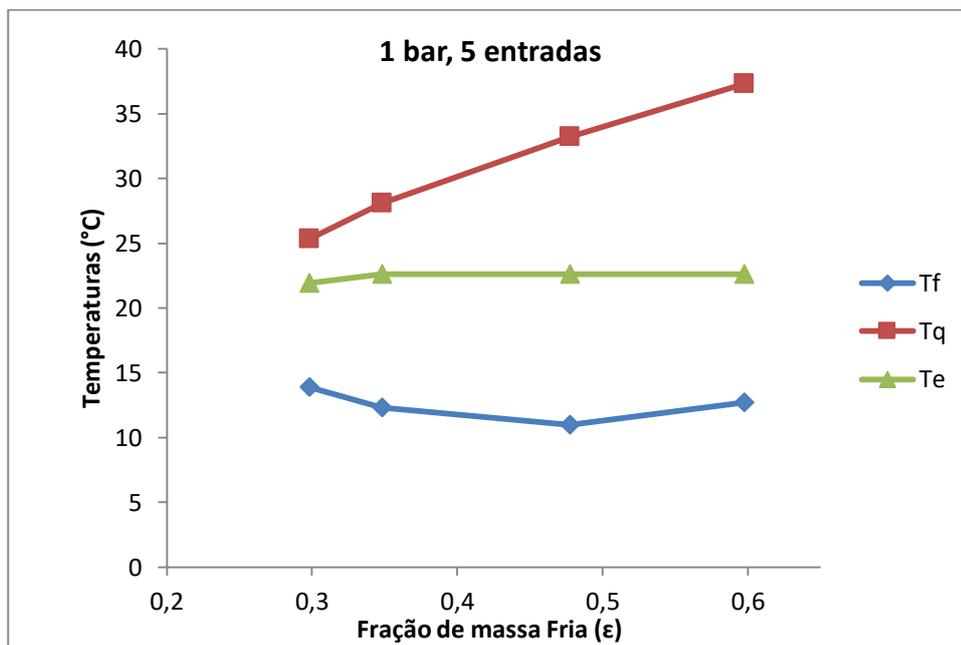


Figura 27: Temperaturas do injetor de 5 entrada com pressão de 1 bar.

A Figura 28 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 5 entradas com a pressão de 2 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de 3,2 °C com a fração de massa fria de 0,45.

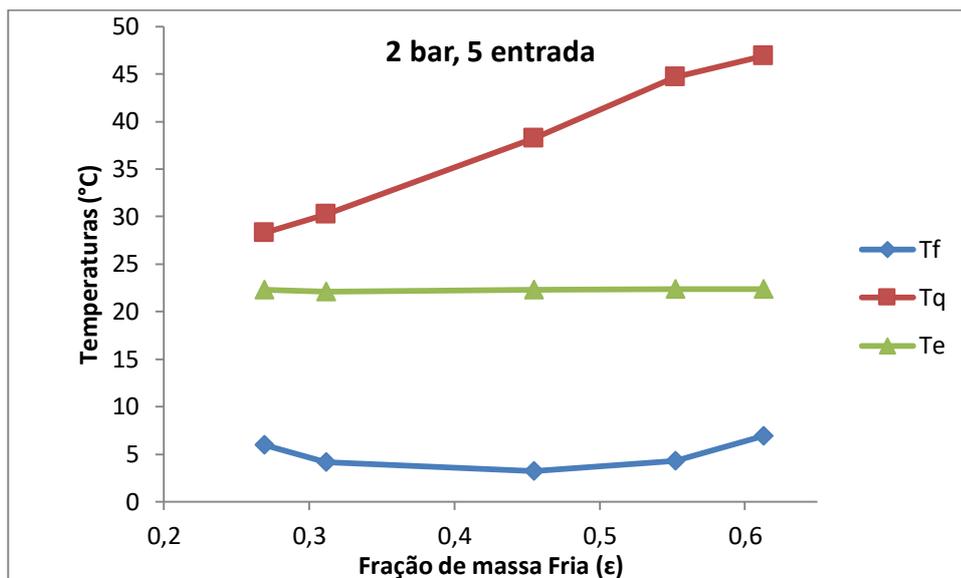


Figura 28: Temperaturas do injetor de 5 entrada com pressão de 2 bar.

A Figura 29 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 5 entradas com a pressão de 3 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de -4 °C com a fração de massa fria de 0,54.

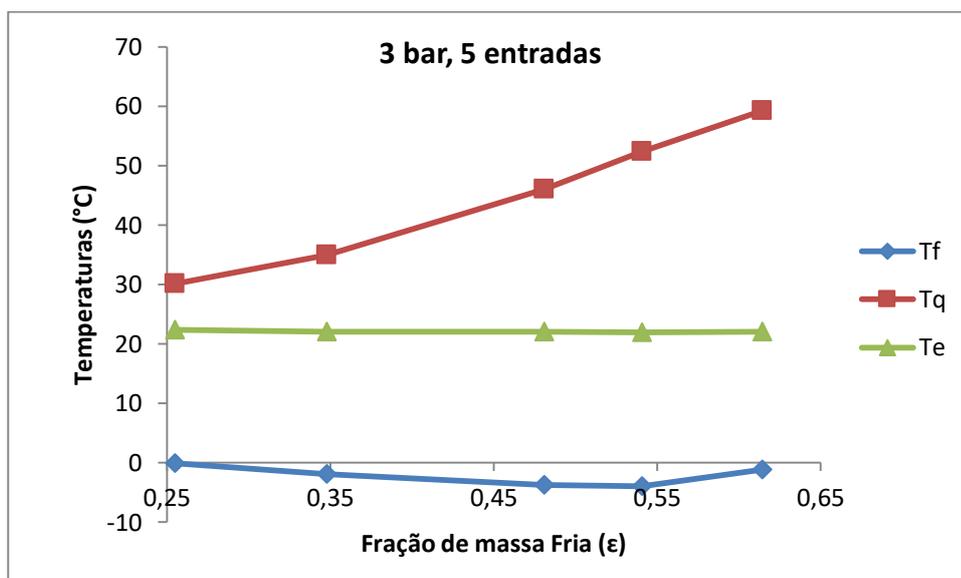


Figura 29: Temperaturas do injetor de 5 entrada com pressão de 3 bar.

A Figura 30 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 5 entradas com a pressão de 4 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de $-7,2$ °C com a fração de massa fria de 0,46.

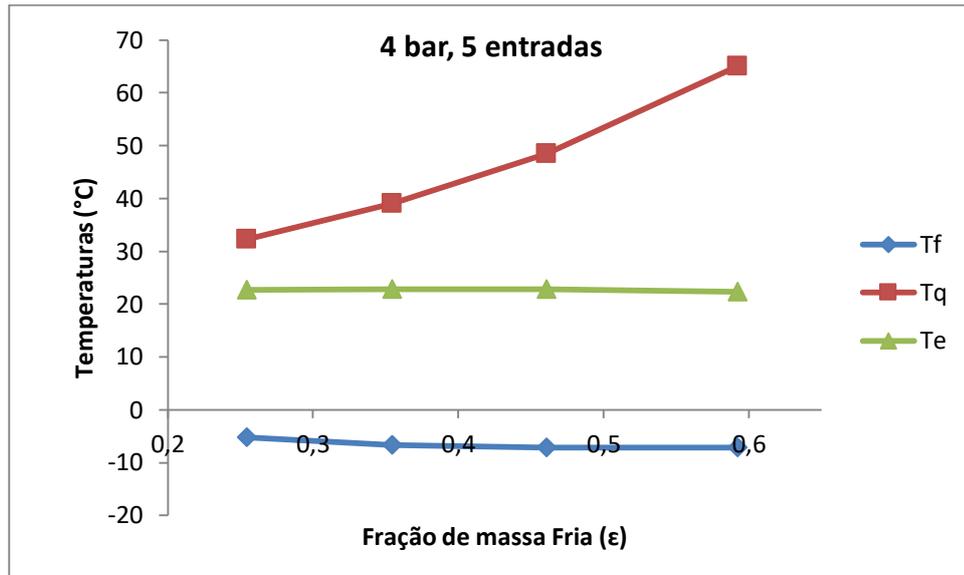


Figura 30: Temperaturas do injetor de 5 entrada com pressão de 4 bar.

A Figura 31 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 6 entradas com a pressão de 1 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de 13,5 °C com a fração de massa fria de 0,53.

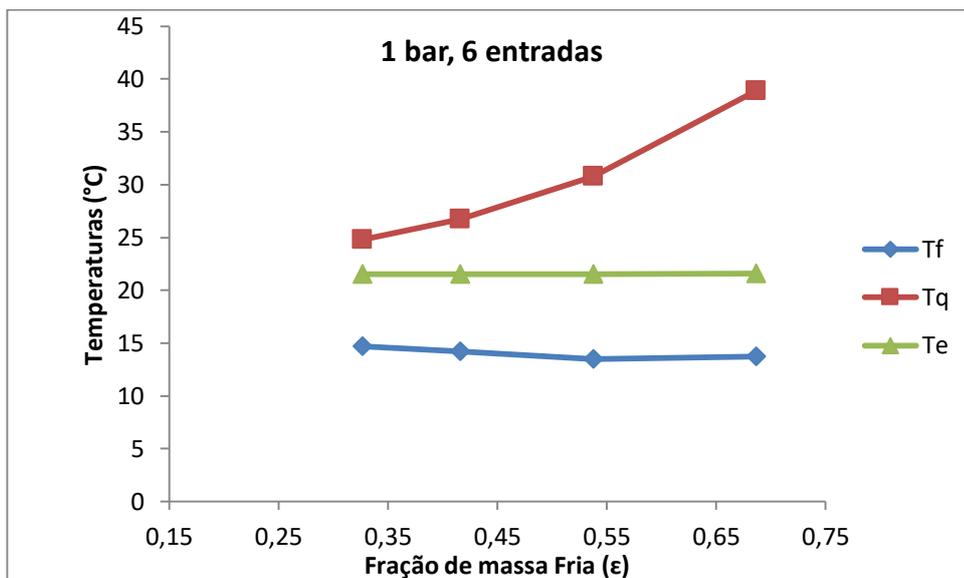


Figura 31: Temperaturas do injetor de 6 entrada com pressão de 1 bar.

A Figura 32 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 6 entradas com a pressão de 2 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de 6,4 °C com a fração de massa fria de 0,56.

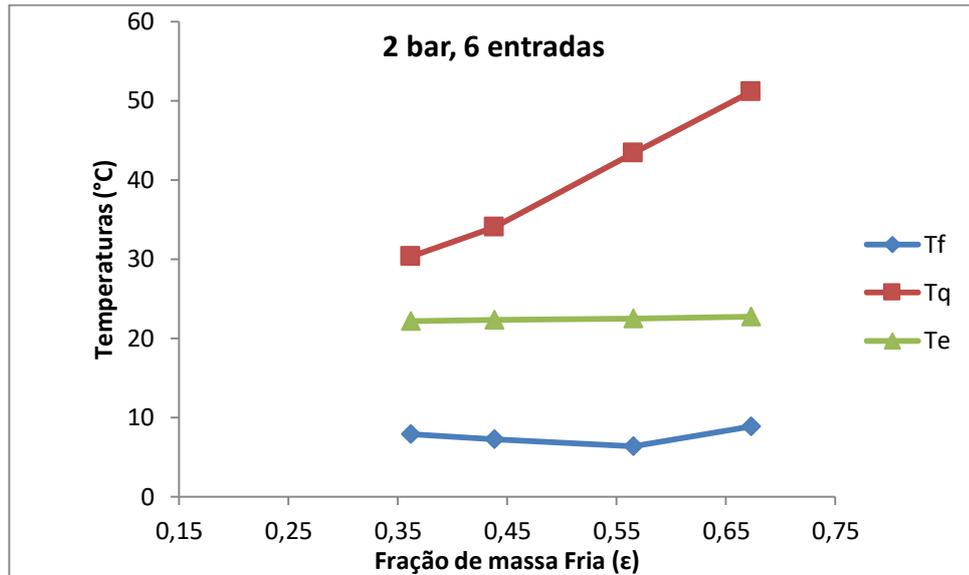


Figura 32: Temperaturas do injetor de 6 entrada com pressão de 2 bar.

A figura 33 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 6 entradas com a pressão de 3 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de 0,9 °C com a fração de massa fria de 0,53.

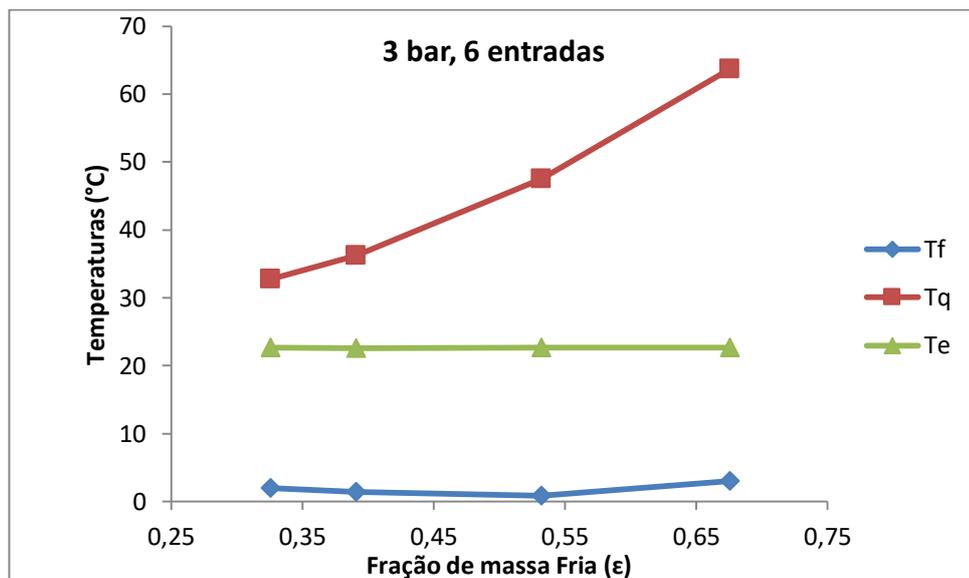


Figura 33: Temperaturas do injetor de 6 entrada com pressão de 3 bar.

A Figura 34 mostra os resultados obtidos no ensaio do injetor de 6 entradas com a pressão de 4 bar. A menor temperatura encontrada no ensaio foi de -3,1 °C com a fração de massa fria de 0,4.

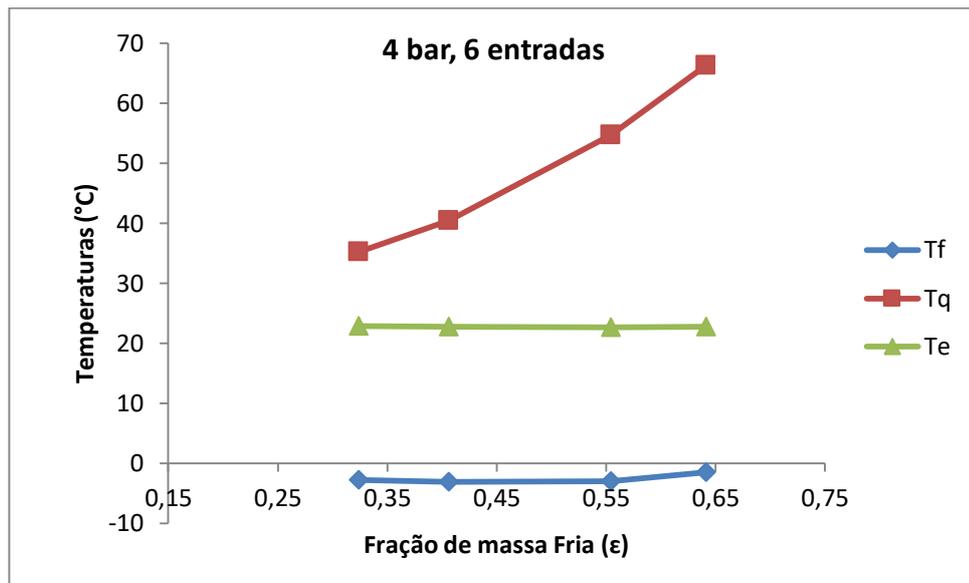


Figura 34: Temperaturas do injetor de 6 entrada com pressão de 4 bar.

Os gráficos de temperatura obtidos para as diversas câmaras de injeção utilizadas apresentaram comportamento semelhante e seguiram as tendência indicadas em trabalhos anteriores. O aumento da pressão de entrada causou o incremento nos diferenças de temperaturas nas saídas do tubo de vórtice, como descrito por Hilsch (1947). O aumento da fração de massa fria, fechamento da válvula de separação, ocasionou o acréscimo da temperatura da saída quente, como exposto por Cockerill (1998). As menores temperaturas frias foram encontradas com frações de massa fria entre 0,3 e 0,5, isso é semelhante ao que foi encontrado por Cockerill (1998).

6.2 Eficiência Energética

A Figura 35 mostra o Coeficiente de Performance obtido para a pressão de 1 bar. O maior COP encontrado foi de 0,129 com a fração de massa fria 0,67. Os maiores COPs foram encontrados para frações de 60% de massa fria, corroborando com Nimbalkar e Muller (2009). O injetor 3 entradas apresentou os maiores COPs para a pressão de 1 bar. As câmaras de injeção 2 e 5 entradas apresentaram valores semelhantes de COP, com os COPs do injetor de 5 entradas ligeiramente maiores que o injetor de 2 entradas para valores de fração de massa fria maiores que 0,4. Os resultados das câmaras de injeção 4 e 6 entradas foram próximos, com o injetor de 4 entradas obtendo valores maiores até frações de massa fria de 0,5.

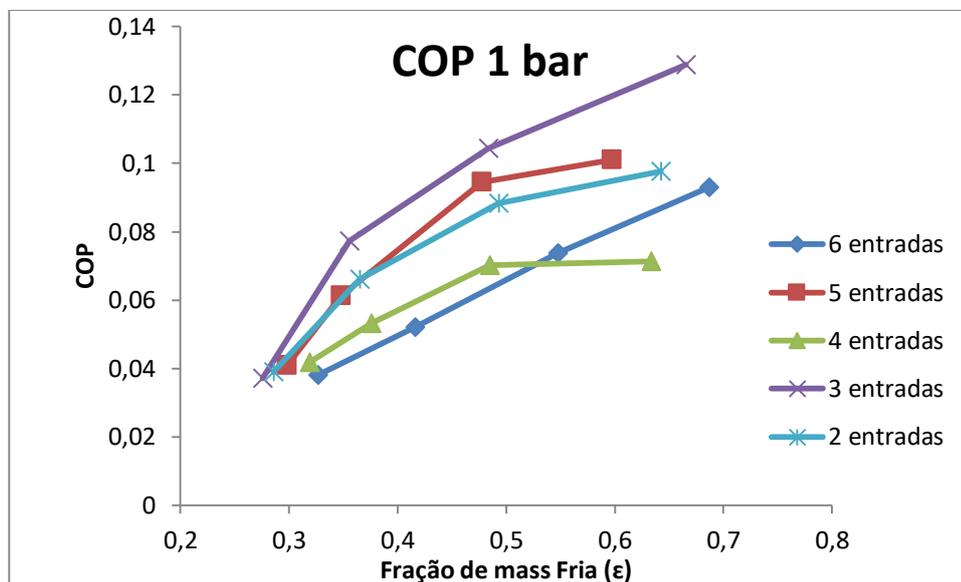


Figura 35: Coeficiente de desempenho para 1 bar.

A Figura 36 mostra os resultados com a pressão de 2 bar. O maior COP encontrado foi 0,137 com a fração de massa fria 0,71, utilizando o injetor de 3 entradas. O injetor com 3 entradas apresentou os maiores COPs entre as câmaras de injeção testadas. A média dos COP aumenta para pressões maiores. Os resultados das câmaras de injeção 2 e 5 foram muito próximos no intervalo de 0,3 a 0,55 de fração de massa fria. O injetor de 6 entradas apresentou melhores resultados que o injetor de 4 entradas para frações de massa fria maiores que 0,5.

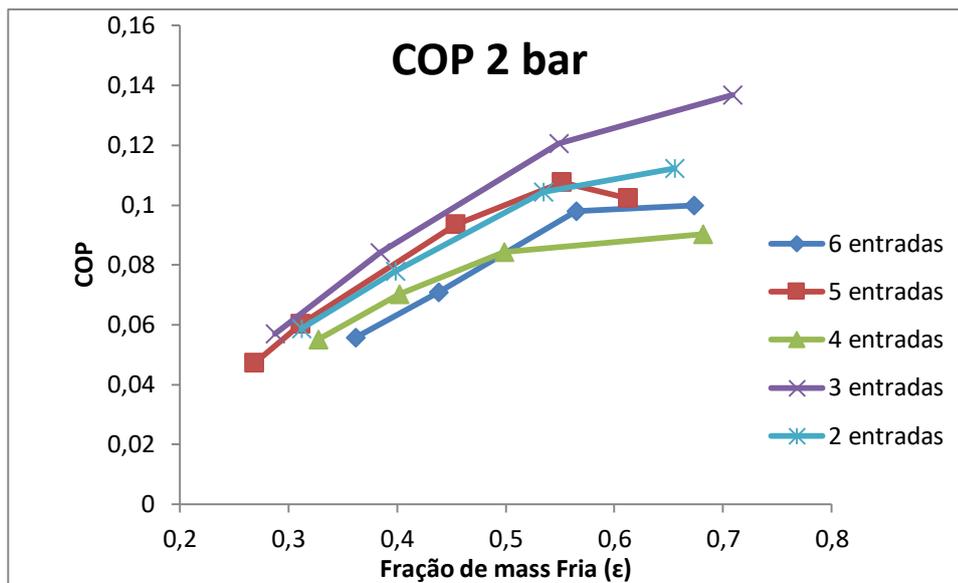


Figura 36: Coeficiente de desempenho para 2 bar.

A Figura 37 mostra os resultados obtidos para o Coeficiente de Performance com a pressão 3 bar. O maior COP encontrado foi 0,139 com a fração de massa fria 0,67 e com o injetor de 3 entradas. O injetor com 3 entradas apresentou os maiores COPs entre as câmaras de injeção testadas. Para frações de massa fria até 0,4, as câmaras de injeção de 4 e 6 entradas obtiveram resultados semelhantes. Para frações maiores que 0,4, o injetor de 6 entradas apresentou COPs maiores que o de 4 entradas, tendência presente nos gráficos anteriores. O injetor de 4 entradas obteve valores de COP maiores que o de 6 entradas para frações de massa fria menores que 0,5 e valores de COP menores para frações de massa fria maiores que 0,5.

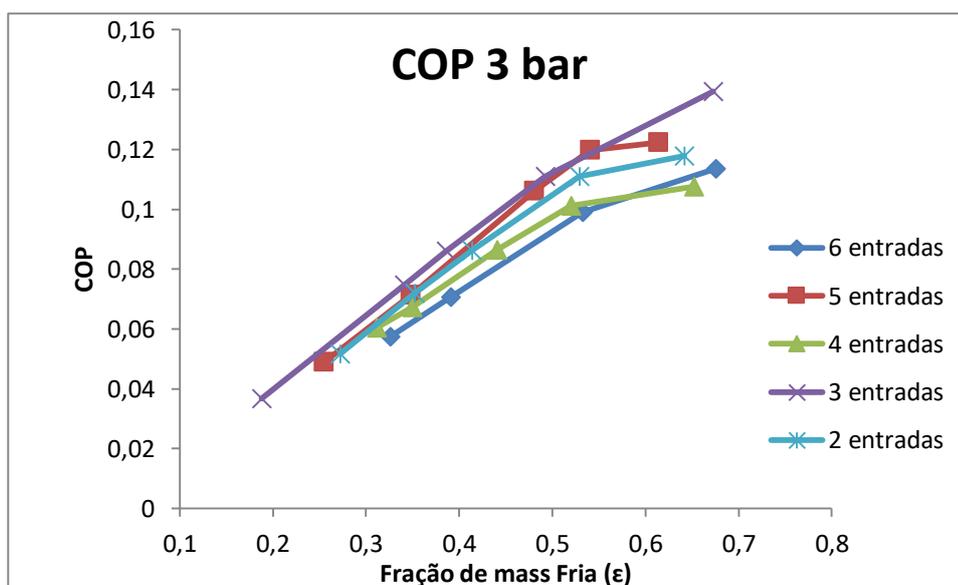


Figura 37: Coeficiente de desempenho para 3 bar.

A Figura 38 mostra os resultados obtidos para o Coeficiente de Performance com a pressão 4 bar. O maior COP encontrado foi 0,145 com a fração de massa fria 0,66 e com o injetor de 3 entradas. As câmaras de injeção de 5 e 2 entradas apresentaram resultados muito semelhantes. Para a pressão de 4 bar, o injetor de 4 entradas obteve COPs superiores ao injetor de 6 entradas. O injetor de 3 entradas apresentou os maiores COPs e menores temperaturas na saída fria em todas as pressões testadas. Portanto, é o mais indicado para ser utilizado nessa faixa de pressão com o objetivo de refrigeração, com os parâmetros definidos. Na maioria dos ensaios, as câmaras de injeção fabricadas em ABS apresentaram COPs maiores que as câmaras de injeção fabricadas em Nylon, para razões de massa fria similares.

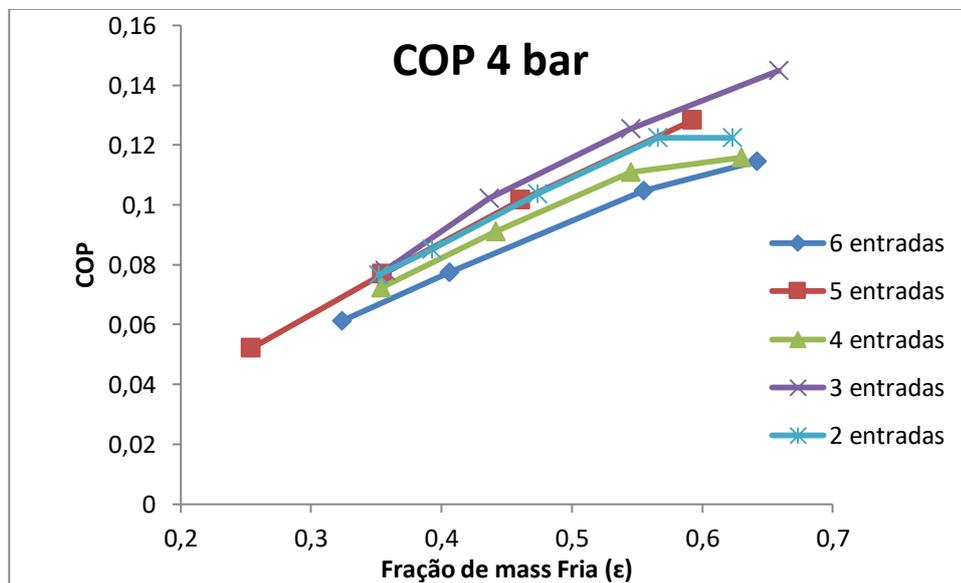


Figura 38: Coeficiente de desempenho para 4 bar.

5 CONCLUSÃO

Foram construídos as câmaras de injeção de 2, 3 e 5 entradas por impressão 3D em plástico ABS. O sistema foi montado e instrumentado. Realizou-se os experimentos utilizando o tubo de vórtice de contracorrente projetado e construído por Aragão (2017) e determinou-se que o injetor de três entradas possui o maior coeficiente de performance entre as câmaras de injeção estudados. As câmaras de injeção fabricadas em ABS apresentaram resultados superiores considerando as menores temperaturas alcançadas e os COPs mais elevados.

O injetor de 3 entradas apresentou o máximo coeficiente de performance de 14% com a pressão de entrada de 4 bar e a menor temperatura fria de $-8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Foram atingidas temperaturas abaixo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ com apenas 2 bar de pressão de entrada, com injetor de 3 entradas. As menores temperaturas frias foram encontradas entre 35% e 55% de massa fria e as maiores eficiências foram encontradas em torno de 60% de massa fria.

Para trabalhos futuros, sugere-se estudar qual parâmetro das câmaras de injeção fabricadas por impressão 3D em ABS, além do número de entradas, melhorou o funcionamento do tubo de vórtice, tendo em vista que essas apresentaram resultados superiores aos fabricados previamente por Aragão (2017), e analisar a eficiência do tubo de vórtice para pressões maiores que 4 bar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHLBORN, B., GROVES, S. **Secondary flow in a vortex tube**. Fluid Dynamics Research 21, 73–86. 1997.

ARAGAO, X. **Aperfeiçoamento experimental de um Tubo de Vórtice para acionamento por Sistema Solar Fotovoltaico**. Dissertação de Mestrado. 2017.

AYNDIN, O. BAKI, M. **An Experimental Study on the Design Parameters of a Counter Flow Vortex Tube**. Energy J 31(14):2763–2772. 2006.

CHIAPERINE COMPRESSORES. Disponível em: <http://chiaperine.com.br/wp-content/upload/2015/12/mc-7624-2hp-ficha.pdf>. 2015.

COCKERRILL, T. **Thermodynamics and Fluid Mechanics of a Ranque – Hilsch Vortex Tube**. PhD Thesis, University of Cambridge. 1998.

EIAMSA-ARD, S. PROVOMGE, P. **Review of Ranque-Hilsch Effects in Vortex Tube**. Renew Sustain Energy Rev. 2007.

GAO, C. **Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube**. PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven. 2005.

HAMDAN, O. **Experimental analysis on vortex tube energy separation performance**. Heat Mass Transfer. 2011.

HILSCH, R. **The Use of Expansion of Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process**. Rev SciInstrum 18(2):108–113.1947.

JEJURKAR, A. SHUKLA, A. **An Overview on Vortex Tube Applications**. National Conference on Research Engineering and Technology. 2015.

KIRMACE, V. **Exergy analysis and performance of a counter flow Ranque–Hilsch vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air**. IntJRefrigeration; 32:1626–33.

LEWINS, J., BEJAN, A. **Vortex tube optimization theory**. Energy 24, 931–943. 1999.

NIMBALKAR, S. MULLER, M. **An Experimental Investigation of the Optimum Geometry for the Cold End Orifice of a Vortex Tube**, Applied Thermal Engineering, Vol. 29, 2009, pp. 509-514. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.03.032.

SILVA, M. **Dimensionamento, construção e realização de testes de desempenho de um tubo de vórtice que opere em baixas pressões para acionamento por energia solar**. Dissertação de Mestrado. 2012.

RANQUE, J. **The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process**. Review of Scientific Instruments, 18(2). 1947.

WERK-SCHOTT. Disponível em: <https://www.werk-schott.com.br/downloads/catalogos/CatalogoUndadePreparacaoAr0104-1pdf>. 2018.