INCT RT

Instituto Nacional
de Ciência e Tecnologia
em Refrigeração
e Termofísica

RELATÓRIO TÉCNICO PARCIAL (23/11/2016 – 30/09/2019)

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 2019

DESCRIÇÃO DO GRUPO, SEUS OBJETIVOS E LINHAS DE PESQUISA

APRESENTAÇÃO

O **Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Refrigeração e Termofísica (INCT-RT)** tem como sede o POLO - Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica da UFSC. O núcleo de pesquisadores principais é formado por professores que atuam no POLO (UFSC) e em outras instituições de ensino superior (IES) nacionais (UFF, UEM, UFMG, UTFPR), além de pesquisadores que atuam em empresas que mantêm convênio de colaboração técnico-científica com o INCT-RT. A principal característica – que o distingue da maioria dos INCT's em atuação – é a realização de pesquisa aplicada de alto nível nas áreas de Refrigeração e Termofísica de maneira fortemente sintonizada com o setor produtivo.

Este relatório apresenta um status das atividades conduzidas por membros do INCT entre as datas de 23/11/2016 e 30/09/2019. Em virtude do falecimento do Coordenador, Prof. Cláudio Melo, a liderança do INCT-RT foi transferida ao Vice Coordenador, Prof. Jader Riso Barbosa Junior. Além do novo Coordenador, integram o Comitê Gestor os Professores César José Deschamps (UFSC, Vice Coordenador), Christian Johann Losso Hermes (UFSC), Mario de Souza Reis Junior (UFF) e Cleber Santiago Alves (UEM). Pesquisadores de instituições como UTFPR, IFSC e UFMG também integram o INCT-RT.

Em números, o INCT-RT conta com mais de 150 integrantes em todas as instituições, perfazendo uma verdadeira rede de colaboração técnico-científica em Refrigeração e Termofísica. O programa de pesquisa do INCT-RT se baseia, portanto, em uma coleção de propostas interconectadas e interdependentes, em assuntos estratégicos para o avanço tecnológico das áreas de Refrigeração e Termofísica.

Neste contexto, a missão, a visão e os objetivos gerais do Instituto Nacional de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica são:

Missão:
"Desenvolver soluções criativas e inovadoras em tecnologias de Refrigeração, atuando de forma multidisciplinar e através de atividades comprometidas com as fortes relações de parceria com o setor produtivo e com a formação de profissionais qualificados".

Visão:
"Ser referência de excelência na geração de conhecimentos avançados na ciência da Refrigeração, oferecendo tecnologias inovadoras e formando profissionais competentes e empreendedores".

Figura 1
Fachada do POLO – Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica.

LINHAS DE PESQUISA

Os trabalhos desenvolvidos no INCT em Refrigeração e Termofísica (INCT-RT) se originam de problemas tecnológicos associados com as necessidades do setor produtivo, sobretudo, mas não exclusivamente, na área de Refrigeração. Os projetos de pesquisa buscam o avanço do conhecimento para subsidiar o desenvolvimento de novas tecnologias e a geração de produtos inovadores. A atuação dos pesquisadores líderes (INCT-RT) pode ser descrita com base nas principais frentes:

i. Desenvolvimento e análise de sistemas de refrigeração inovadores, incluindo tanto novas tecnologias para a produção de frio como ciclos alternativos de compressão mecânica de vapor;

ii. Análise, otimização e integração de componentes à sistemas de refrigeração, com foco tanto em aspectos térmicos como acústicos;

iii. Melhoria do desempenho energético e ambiental de sistemas de refrigeração. Neste aspecto, inclui-se o desenvolvimento de novas estratégias de controle e o uso de substâncias com baixo impacto ambiental;

iv. Pesquisa em problemas fundamentais da área de Ciências Térmicas. Esta frente visa ampliar o entendimento de fenômenos físicos para facilitar a atuação dos integrantes do INCT problemas aplicados de Engenharia.

As atividades de pesquisa e desenvolvimento do INCT em Refrigeração e Termofísica podem ser divididas nas seguintes áreas temáticas: (i) Novas Tecnologias, (ii) Eficiência Energética e Impacto Ambiental, (iii) Conforto Acústico, (iv) Confiabilidade de Componentes e Sistemas, (v) Avaliação e Certificação, e (vi) Sistemas Multifásicos e Multicomponentes.

O presente relatório parcial de atividades foi formulado a fim de destacar as principais contribuições científicas e tecnológicas, além de aspectos de inovação, formação de recursos humanos, difusão do conhecimento, internacionalização e desenvolvimento social.

FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS

A equipe do INCT-RT é reconhecida internacionalmente pelo alto grau de liderança e inovação em técnicas avaliação e projeto de sistemas de refrigeração convencionais e seus componentes (compressores, trocadores de calor, dispositivos de expansão), e também por sua atuação em novas tecnologias de refrigeração, mais especificamente a Refrigeração Magnética.

A política de capacitação de recursos humanos se sustenta em três pilares: 1) Treinamento de alunos para posterior ingresso no mercado de trabalho; 2) Aperfeiçoamento de alunos participantes dos vários projetos de pesquisa; e 3) Garantia de apoio técnico e científico aos projetos de pesquisa e extensão desenvolvidos através dos programas e parcerias instituídas.

Desde o início do projeto, foram formadas dezenas de mestres e doutores nas quatro instituições participantes do INCT. Além destes, cerca de 150 alunos de graduação receberam formação, sendo que vários deles encontram-se atualmente em formação na pós-graduação (mestrado e doutorado). O INCT em Refrigeração e Termofísica tem formado recursos humanos de alto nível em Engenharia Mecânica, fato comprovado pelas premiações recebidas por seus egressos ao longo da vigência do projeto:

PEDRO MAGALHÃES DE OLIVEIRA
Prêmio ABCM/Embraer 2014 (categoria mestrado)

DANIEL HENSE
Best Student Paper Award (3rd Place) - 9th Inter. Conference of Boiling and Condensation Heat Transfer 2015

FRANCISCO LAJÚS JR.
Best Student Paper Award - 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference 2015

MARCO CARRILHO DINIZ
Best Student Paper Presentation Award - 9th International Conference on Compressors and Their Systems 2015.

JAIME LOZANO
Prêmio CAPES de Tese (Engenharias III) 2016

PAULO VINICIUS TREVIZOLI
Prêmio ABCM/Embraer 2016 (categoria DOUTORADO)

PABLO ADAMOGLU DE OLIVEIRA
Menção Honrosa Prêmio CAPES de Tese (Engenharias III) 2017

ISABEL JANKE
Best Student Paper Award - International Refrigeration Conference at Purdue 2018.

BRUNO PIMENTEL
Prêmio de Melhor Dissertação de Mestrado concedido pela UFF, 2018.

DIFUSÃO DO CONHECIMENTO, INTERNACIONALIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO SOCIAL

FORMAÇÃO TECNOLÓGICA/ TREINAMENTO EMPRESARIAL

A equipe de professores e pesquisadores do POLO tem experiência de mais de vinte anos na realização de cursos de treinamento em ambiente empresarial. Edições mais recentes de cursos de capacitação em Princípios de Refrigeração foram oferecidas em 2014 para profissionais da Embraco, oriundos da planta do Brasil e de todas do exterior (México, Eslováquia, Estados Unidos, Itália e China) e para profissionais da da América Latina, em 2019.

O grupo de pesquisadores do POLO tem atuado em parceria com o IFSC (antigo CEFET-SC e, anteriormente, ETF-SC) há mais de vinte anos com o intuito de formar pessoal altamente qualificado (tanto no nível superior quanto no nível técnico) nas áreas de Mecânica e Refrigeração. Esta atuação conjunta se dá de duas formas: contribuição para a formação do corpo docente e capacitação do corpo discente.

INTERNACIONALIZAÇÃO

A atuação como INCT-RT permitiu às instituições integrantes ampliar suas redes de cooperação internacional no âmbito acadêmico, possibilitando o intercâmbio de alunos de graduação e de pós-graduação e de pesquisadores visitantes. Atualmente, existem relações de cooperação institucional (em maior ou menor grau de intensidade) com as seguintes instituições:

Miami University (Estados Unidos)
Formação de geada (Prof. Andrew Sommers)

Universidade da Beira Interior (Portugal)
Sistemas de Refrigeração (Prof. Pedro Dinis Gaspar)

Brunel University (Reino Unido)
Sistemas de Refrigeração (Prof. Savvas Tassou)

Universidade de Liubliana (Eslovênia)
Sistemas de Refrigeração (Prof. Andrej Kitanovski)

Massachusetts Institute of Technology (Estados Unidos)
Intensificação da Transferência de Calor (Prof. Matteo Bucci)

Oregon State University (Estados Unidos)
Transferência de Calor com mudança de fase (Prof. Brian Fronk)

Universitat Jaume I (Espanha)
Sistemas de Refrigeração (Dr. Adrián Mota-Babiloni)

Aix-Marseille University (França)
Escoamentos em microcanais (Prof. Irina A. Graur)

Brno University of Technology (República Tcheca)
Modelação do desempenho termodinâmico de compressores (Prof. Miroslav Jicha)

University of Glasgow (Reino Unido)
Escoamentos multifásicos (Prof. Gioia Falcone)

École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suiça)
Trocadores de calor compactos, transferência de calor com mudança de fase (Prof. John R. Thome)

Karlsruher Institut für Technologie (Alemanha)
Escoamento em tubos capilares (Prof. Steffen Grohmann)

Technical University of Denmark (Dinamarca)
Refrigeração magnetoclórica (Dr. Christian Bahl, Dr. Kaspar Nielsen, Dr. Rasmus Bjork, Dr. Nini Pryds)

Royal Institute of Technology (Suécia)
Sistemas de refrigeração com amônia (Prof. Bjorn Palm)

Texas A&M University (EUA)
Transferência de calor em poços de petróleo (Prof. Rashid Hasan)

Universidad Autónoma de Nuevo León UANL (México)
Trocadores de calor tubo aleta (Prof. Simón Martinez Martinez)

Universidad Pontificia Bolivariana (Colômbia)
Minimização da carga de refrigerante (Prof. César Alejandro Isaza Roldán)

Université Lille 1 (França)
Modelagem de escoamentos turbulentos (Prof. Emmanuel Leriche).

University of Michigan (EUA)
Trocadores de calor compactos (Prof. Massoud Kaviany)

University of Southampton (Reino Unido)
Aeroacústica (Prof. Rod Self).

University of Twente (Holanda)
Transferência de calor (Prof. Harry Hoeijmakers).

University of Victoria (Canadá)
Refrigeração magnetocalórica (Prof. Andrew Rowe)

Universidade de Aveiro (Portugal)
Síntese de magnetos moleculares (Paula Brandão)

Universidade de Aveiro (Portugal)
Cálculo DFT (João Amaral)

Universidade do Porto (Portugal)
Produção de óxidos e nanopartículas (João Pedro Araújo)

Universidad de Vina del Mar (Chile)
Síntese de magnetos moleculares (Yanko Moreno)

Oak Ridge National Lab. (EUA)
Medidas de difração de neutrons (António dos Santos)

Prokhorov General Physics Institute (Russia)
Teoria em materiais quânticos (Zaur Alisultanov)

Lomonosov Moscow State University (Russia)
Medidas magnéticas (Vladimir Zverev)

Lomonosov Moscow State University (Russia)
Medidas magneeticas (Alexander Pyatakov)

Xi'an Jiaotong University, Xi'an (China)
Teoria em materiais quânticos (Ning Ma)

DESENVOLVIMENTO SOCIAL

O impacto potencial do INCT-RT se concentra nos âmbitos científico e tecnológico. No primeiro, as principais contribuições dizem respeito à caracterização e à quantificação de fenômenos e suas relações com (i) a melhoria do rendimento, (ii) a redução do uso de matéria-prima, (iii) a confiabilidade de componentes e/ou sistemas de engenharia. No âmbito tecnológico, a principal característica do INCT-RT é a sua proximidade com empresas do setor, provedoras de produtos e serviços de alto valor agregado. Desta forma, os objetivos vinculados a cada atividade prevista no projeto foram formulados a fim de se obter o maior impacto tecnológico possível.

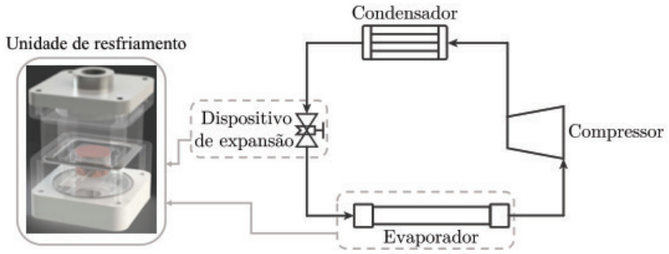
Ao realizarem atividades em parceria com empresas líderes do setor de refrigeração, os pesquisadores associados ao INCT-RT não só pesquisam novos materiais ou fenômenos capazes de revolucionar o conhecimento e suas aplicações a longo prazo, como também é responsável por desenvolvimentos que reduzem o consumo energético e o impacto ambiental das tecnologias convencionais (usadas em equipamentos de refrigeração domésticos e comerciais leves, condicionamento de ar residenciais e automotivos), contribuindo assim para (i) aumentar a competitividade de empresas que geram empregos no Brasil, (ii) reduzir o impacto ambiental das tecnologias, (iii) fazer um melhor uso dos recursos naturais, (iv) assegurar segurança alimentar e (v) redução de desigualdades sociais.

ATIVIDADES E INDICADORES DE PROGRESSO E DESEMPENHO NO PERÍODO

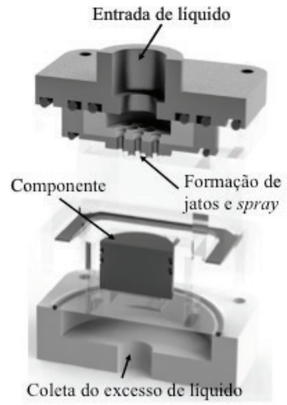
Esta seção apresenta os principais avanços realizados ao longo do primeiro triênio, para cada uma das atividades propostas no projeto. As principais publicações resultantes em cada atividade são listadas para que se tenha uma dimensão das contribuições científicas e tecnológicas. Para facilitar, utiliza-se a mesma numeração adotada na proposta, de acordo com a área temática.

ATIVIDADE 6.1.1 (NOVAS TECNOLOGIAS) SISTEMAS COMPACTOS PARA RESFRIAMENTO DE ELETRÔNICOS

Um sistema de refrigeração convencional é composto por quatro componentes principais: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador. O objeto de estudo deste projeto é um sistema de refrigeração inovador que integra em uma unidade de resfriamento as funções desempenhadas pelo dispositivo de expansão e pelo evaporador. O fluido refrigerante, ao se expandir no(s) orifício(s) do dispositivo de expansão, produz jatos (ou sprays, dependendo das características do orifício) que incidem diretamente sobre uma superfície aquecida, conforme mostra a Figura 2. Esta tecnologia reúne dois aspectos importantes para o resfriamento de altos fluxos de calor, o alto coeficiente de transferência de calor típico de jatos bifásicos colidentes e a obtenção de temperaturas de evaporação inferiores à temperatura ambiente.



(a)



(b)

Figura 2
(a) Componentes de um sistema de refrigeração;
(b) unidade de resfriamento.

O conceito apresentado na Figura 2 possibilita reduzir o volume do sistema de refrigeração, sendo propícia para aplicações em que se deseja remover altos fluxos de calor, como os encontrados em alguns sistemas eletrônicos. A Figura 3 ilustra os detalhes construtivos da unidade de resfriamento.

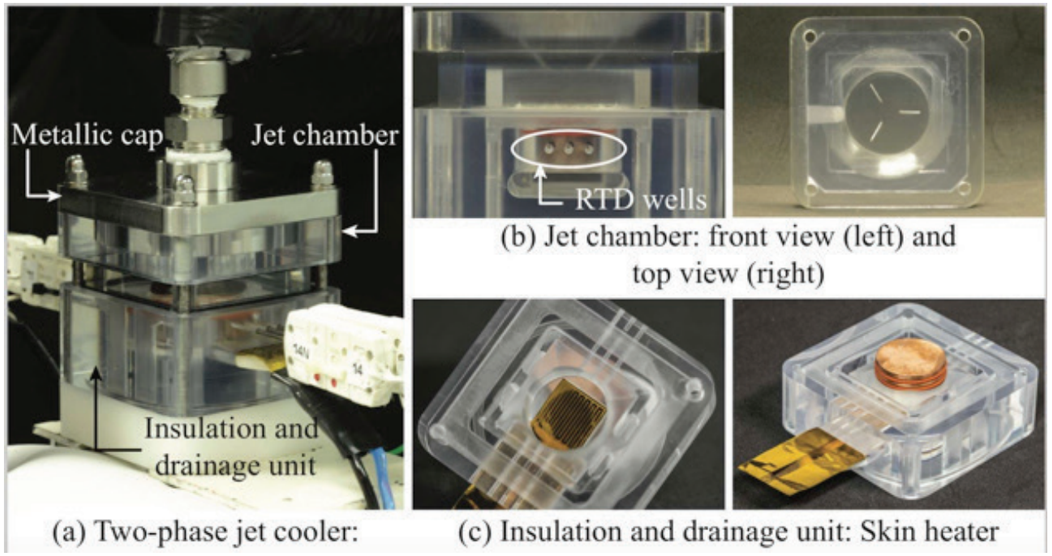
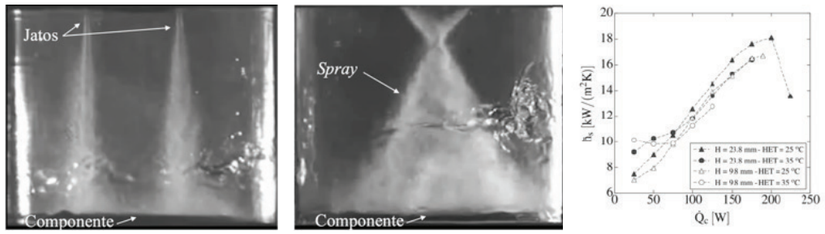


Figura 3
Detalhes construtivos da unidade de resfriamento.

No âmbito da tese de doutorado de Pablo Adamoglu de Oliveira (concluída em 2016) e da dissertação de mestrado de Marcus Vinicius Pedron Carneiro (concluída em 2018) foram realizadas análises detalhadas da influência da geometria dos injetores sobre o comportamento da temperatura da superfície e do coeficiente de transferência de calor em evaporadores a jatos bifásicos integrados a sistemas de refrigeração miniaturizados. A geometria de jatos colidentes apresentou o melhor desempenho no tocante ao fluxo de calor crítico, possibilitando alcançar fluxos de calor da ordem de 50 W/cm2 e coeficientes de transferência de calor próximos a 20 kW/m2.K com R-134a (Figura 4). A tese de Pablo Oliveira apresentou um modelo matemático do sistema (usado para projetar a bancada experimental) e uma análise detalhadas da eficiência termodinâmica do sistema (determinada experimentalmente). Na dissertação de mestrado de André Provensi (em andamento) está sendo avaliada a influência do acabamento superficial do aquecedor (microfabricação por ablação a laser) sobre o comportamento térmico do sistema (temperatura da superfície, coeficiente de transferência de calor e fluxo de calor crítico).



(a) (b) (c)

Figura 4
Geometria de (a) jatos colidentes, (b) spray e (c) coeficientes de transferência de calor para diferentes configurações (Carneiro et al., 2018)

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. CARNEIRO, M. V. P., OLIVEIRA, P. A., BARBOSA Jr., J. R., 2018. A compact refrigeration system based on multijet sprays for electronics thermal management. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 97, p. 180-191.

2. OLIVEIRA, P. A., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Novel two-phase jet impingement heat sink for active cooling of electronic devices. Applied Thermal Engineering, v. 112, p. 952-964, 2017.

3. OLIVEIRA, P. A., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Effect of Jet Length and Ambient Temperature on the Performance of a Two-Phase Jet Impingement Heat Sink Refrigeration System. International Journal of Refrigeration, v. 75, p. 331-342.

4. OLIVEIRA, P. A., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Performance Assessment of Single and Multiple Jet Impingement Configurations in a Refrigeration-based Compact Heat Sink for Electronics Cooling. Journal of Electronic Packaging, v. 139, p. 031005.

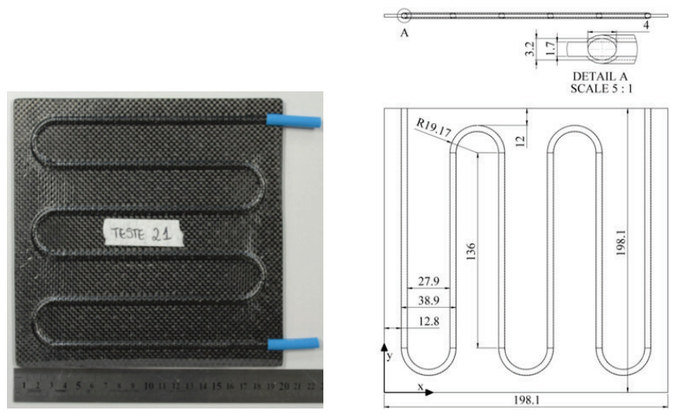
5. OLIVEIRA, P. A., CARNEIRO, M. V. P., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Experimental evaluation of enhanced cooling schemes in a novel refrigeration-based heat sink for thermal management of electronic devices. In: 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Foz do Iguaçu. Proc. of the 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics.

6. OLIVEIRA, P. A., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Two-Phase Jet Impingement Heat Sink Integrated with a Compact Vapor Compression System for Electronics Cooling. In: ITHERM 2016 - The Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Las Vegas. 15th IEEE ITHERM Conference. p. 976-987.

7. OLIVEIRA, P. A., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Compact Refrigeration System for Electronics Cooling Based on a Novel Two-Phase Jet Impingement Heat Sink. In: 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette.

ATIVIDADE 6.1.2 (NOVAS TECNOLOGIAS) TROCADORES DE CALOR POLIMÉRICOS

No âmbito da tese de doutorado de Silvia Teles Viana (concluída em 2016), foi realizada uma avaliação de desempenho térmico e da fabricação de trocadores de calor de placas feitos de tecido de fibra de carbono e resina epóxi (Figura 5). Para aumentar o desempenho térmico do material dos trocadores de calor, a resina epóxi foi misturada com 1% (wt.) de partículas de carbono, resultando em um aumento de condutividade térmica de aproximadamente 39% e 25% para nano-plaquetas de grafeno e misturas de grafite expandido, respectivamente. Micrografias da matriz polimérica do trocador são apresentadas na Figura 6.



(a) (b)

Figura 5
(a) Protótipo de trocador de calor de placas fabricado com fibra de carbono e resina epóxi, (b) dimensões em mm.

Uma avaliação direta do desempenho térmico dos trocadores de calor de compostos poliméricos foi realizada por meio de termografia infravermelha (Fig. 7) para determinar sua eficiência global de superfície e através de medições calorimétricas em um túnel de vento para determinar sua condutância térmica global. Uma eficiência de superfície global da ordem de 0,86 e uma condutividade térmica efetiva na faixa de 6,1-6,5 W/(m.K) foram encontrados. Embora a adição de 1% (wt.) de partículas de carbono melhorou significativamente a condutividade térmica da resina epóxi, sua contribuição geral para a condutividade térmica efetiva do trocador de calor de tecido de fibra de carbono foi menos expressiva.

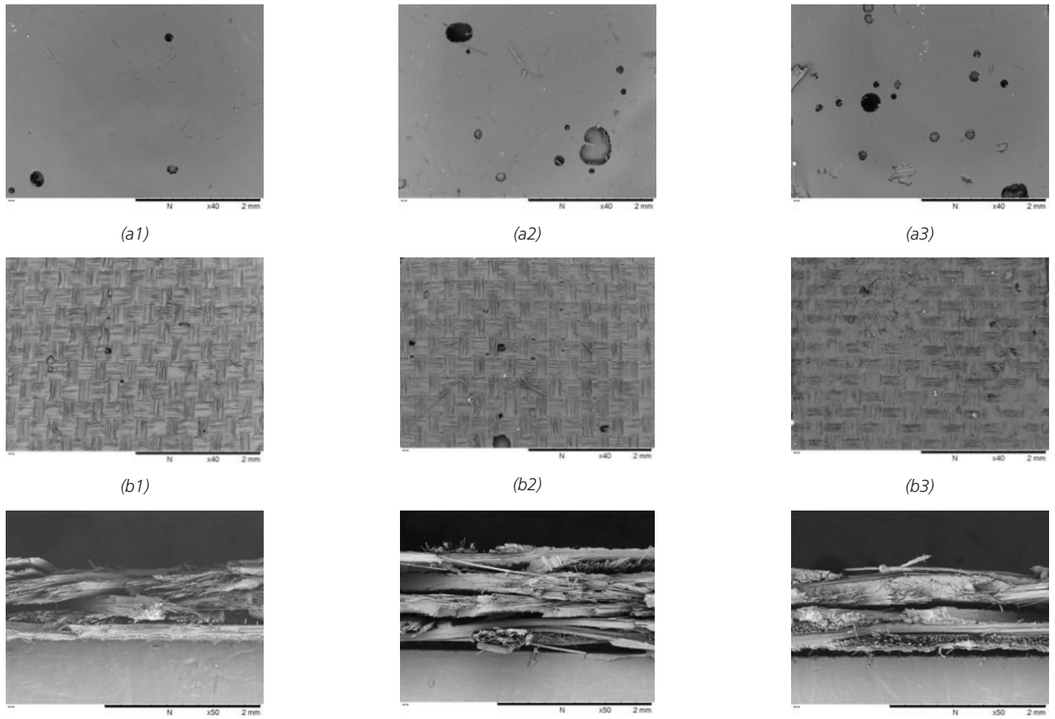


Figura 6
Micrografias obtidas com microscopia eletrônica de varredura das amostras de trocador de calor.

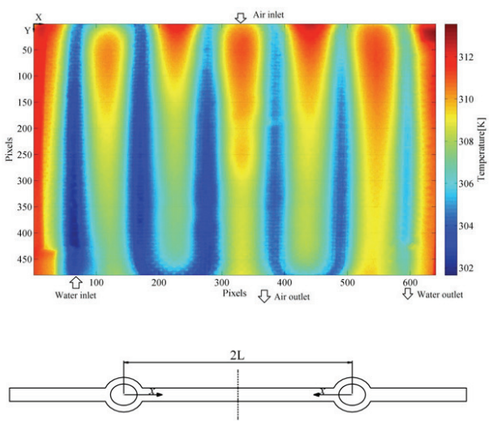


Figura 7
(a) Distribuição de temperaturas da superfície do trocador de calor (termografia infravermelha.
(b) Geometria das aletas.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. VIANA, SILVIA T., SCARIOT, V. K., PROVENSI, A., M. O. BARRA, G., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Fabrication and thermal analysis of epoxy resin-carbon fiber fabric composite plate-coil heat exchangers. Applied Thermal Engineering, v. 127, p. 1451-1460.

2. VIANA, S. T., SCARIOT, V. K., PROVENSI, A., Barra, G. M. O., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Fabrication and thermal analysis of epoxy resin-carbon fiber fabric composite plate heat exchangers. In: 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Foz do Iguaçu. Proc. of the 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics.

ATIVIDADE 6.1.3 (NOVAS TECNOLOGIAS) REFRIGERAÇÃO MAGNETOCALÓRICA

A refrigeração magnética é uma tecnologia alternativa para a produção de frio que se baseia no efeito magnetocalórico, o qual se manifesta em certos materiais pela variação de temperatura em função de uma variação de campo magnético aplicado ao material. Esta tecnologia possui um elevado potencial de eficiência energética devido à reversibilidade do efeito magnetocalórico e ao emprego de ímãs permanentes. Trata-se de uma das atividades de maior envergadura do INCT, para as quais uma série de subatividades relacionadas ao desenvolvimento da tecnologia de refrigeração magnética vêm sendo conduzidas. Dentre elas, cabe destacar:

(i) o projeto integrado de circuitos magnéticos e regeneradores magnético-ativos (destinados à construção de protótipos de uma adega magnética e de um condicionador de ar magnético – ver item 6.1.6). Por exemplo, Fortkamp et al. (2019) foram os primeiros a avaliar de forma conjunta o projeto de circuitos magnéticos e de regeneradores magnético-ativos (Figuras 8 a 10);

(ii) análise de geometrias de meios porosos e composição de regeneradores multicamadas (Figuras 11 e 12) visando identificar aquelas que resultam no melhor desempenho térmico, hidráulico e magnético de regeneradores magnético-ativos;

(iii) o projeto de sistemas de gerenciamento hidráulico. A equipe do POLO/INCT tem avaliado diferentes tecnologias de válvulas para utilização em sistemas de refrigeração magnética (Figura 13), tendo sido um dos grupos pioneiros na investigação de válvulas eletrônicas (Figura 14), as quais têm as vantagens de fácil sincronização com o campo magnético, controle flexível da fração de escoamento e moderado consumo de potência a altas frequências;

(iv) acoplamento entre gabinete, trocadores de calor e regenerador. Experimentos e modelos matemáticos estão sendo implementados/desenvolvidos no sentido de identificar as geometrias de trocador de calor que maximizem o desempenho do sistema como um todo. A equipe do POLO/INCT, com toda a experiência adquirida na caracterização de sistemas convencionais (compressão mecânica de vapores) tem liderado as pesquisas nesta área em nível mundial (Figura 15).

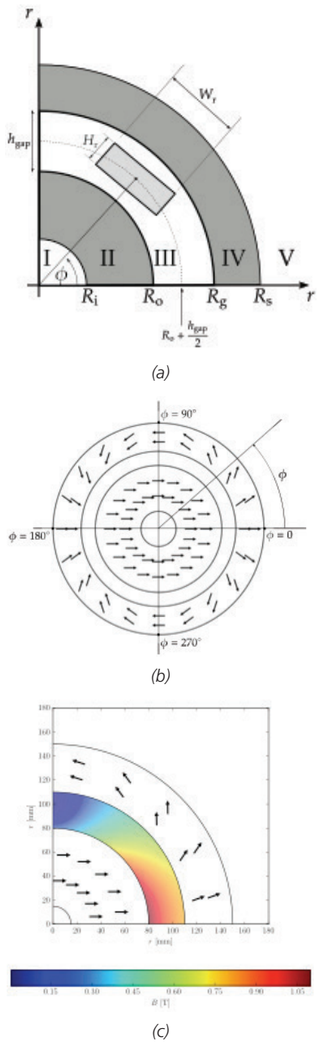


Figura 8
(a) Geometria do circuito magnético composto por cilindros de Halbach concêntricos. Regiões: I: eixo; II: ímã de Halbach interno; III: gap de ar (somente um regenerador poroso é mostrado); IV: ímã de Halbach externo; V: ambiente externo.
(b) Campo de remanências para os cilindros de Halbach.
(c) Densidade de fluxo magnético no gap de ar (Fortkamp et al.*, 2019).*

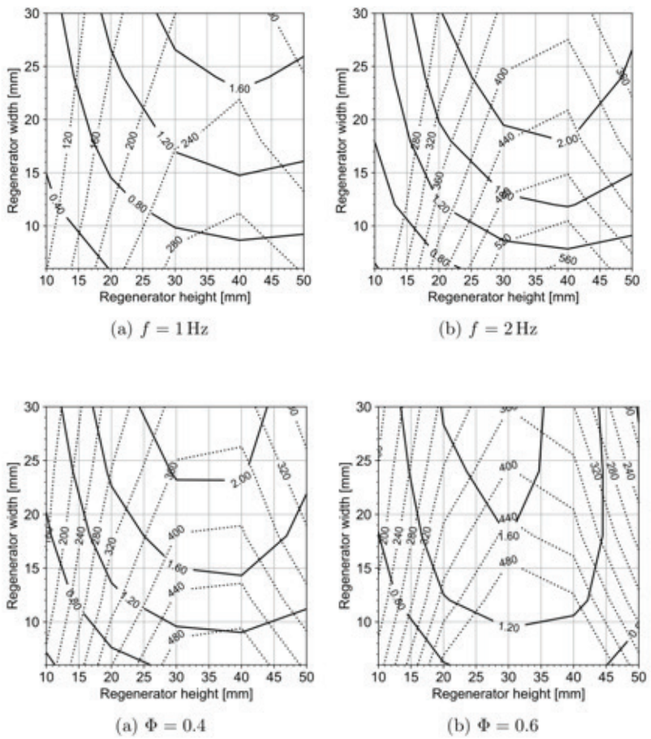


Figura 9
Mapas de projeto para frequências de operação de 1 e 2 Hz e um fator de utilização Φ = 0.2. Linhas tracejadas indicam a capacidade de refrigeração e as linhas cheias o coeficiente de performance (Fortkamp et al.*, 2019).*

Figura 10
Mapas de projeto para fatores de utilização de 0,4 e 0,6 e frequência de operação de 1 Hz. Linhas tracejadas indicam a capacidade de refrigeração e as linhas cheias o coeficiente de performance (Fortkamp et al.*, 2019).*

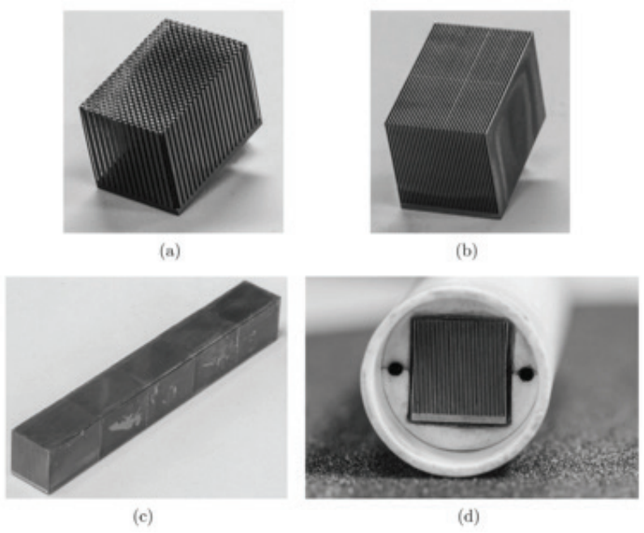


Figura 11
Regeneradores de (a) pinos quadrados e (b) placas paralelas.
(c) Montagem dos blocos de placas.
(c) Regenerador de placas montado (carcaça de fibra de vidro G10) (Trevizoli et al.*, 2017).*

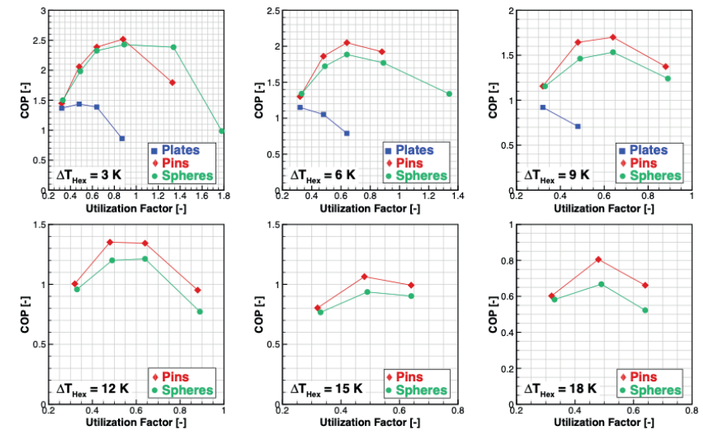
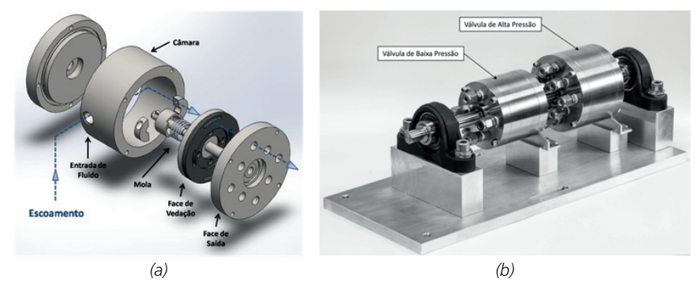


Figura 12
Comparação dos valores do coeficiente de performance (COP) para as geometrias de regenerador magnético ativos de pinos quadrados, placas paralelas e esferas (Trevizoli et al.*, 2017).*



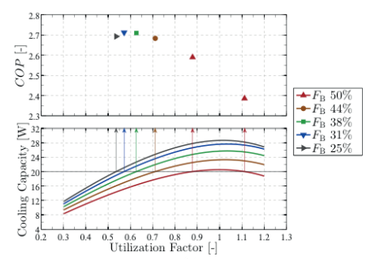
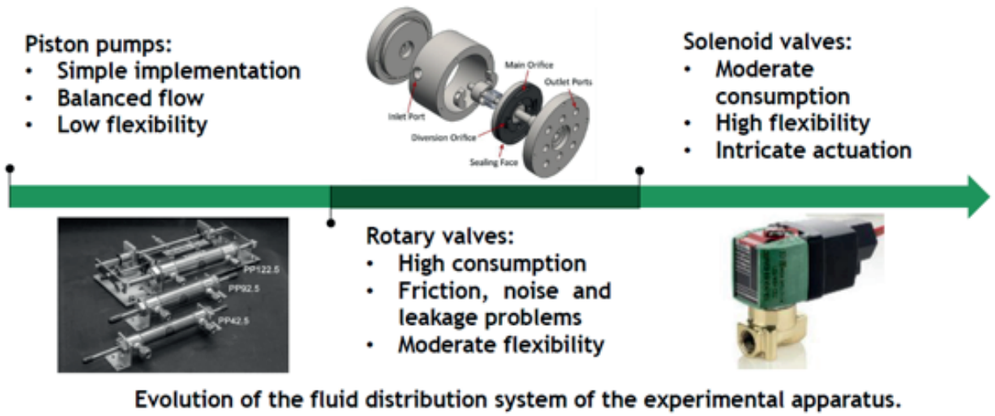
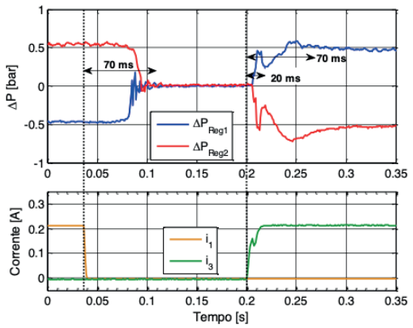


Figura 13
(a) Conceito de válvulas rotativas desenvolvido para avaliar o efeito da variação da fração de escoamento sobre o desempenho do regenerador magnético ativo;
(b) Fotografia do conjunto de válvulas desenvolvido e testado;
(c) Influência da fração de escoamento (F_B) sobre a capacidade de refrigeração e COP (Nakashima et al.*, 2018a,b).*

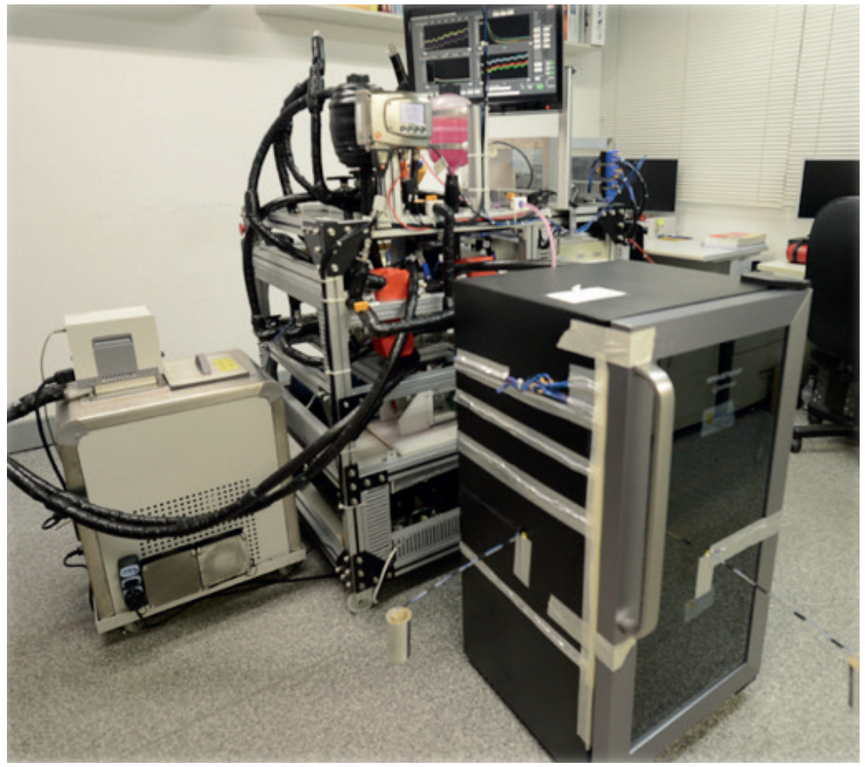


(a)

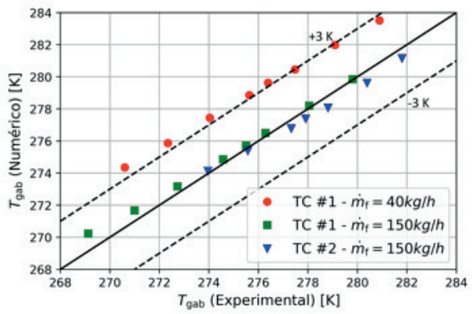


(b) Fonte: Elaborada pela Autora.

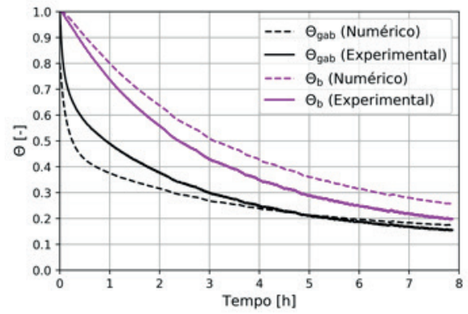
Figura 14
(a) Evolução dos sistemas de gerenciamento de escoamentos (válvulas e bombas) desenvolvidos pela equipe do POLO/ INCT para sistemas de refrigeração magnética;
(b) Caracterização de válvulas quanto ao seus tempos de abertura e fechamento, queda de pressão e corrente elétrica.



(a)



(b)



(c)

Figura 15
(a) Bancada experimental construída para emular o sistema de refrigeração magnética, integrando o gabinete refrigerado de uma adega e os trocadores de calor (quente e frio);
(b) Comparação entre resultados numéricos e experimentais da temperatura do ar dentro do gabinete para diferentes vazões do fluido do refrigerador magnético e da geometria do trocador de calor;
(c) comparação entre o modelo matemático para operação transiente do gabinete e dados experimentais.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. FORTKAMP, F. P., LANG, G., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2019. Design trade-offs for na active magnetic regenerator device. Applied Thermal Engineering, in press.

2. TREVIZOLI, P. V., PEIXER, G. F., NAKASHIMA, A. T., CAPOVILLA, M. S., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2018. Influence of inlet flow maldistribution and carryover losses on the performance of thermal regenerators. Applied Thermal Engineering, v. 133, p. 472-482.

3. FORTKAMP, F. P., ERIKSEN, D., ENGELBRECHT, K., BAHL, C. R. H., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2018. Experimental investigation of different fluid flow profiles in a rotary multi-bed active magnetic regenerator device. International Journal of Refrigeration, v. 91, p. 46-54.

4. NAKASHIMA, A. T. D., DUTRA, S. L., TREVIZOLI, P. V., BARBOSA Jr., J. R., 2018a. Influence of the flow rate waveform and mass imbalance on the performance of active magnetic regenerators. Part I: Experimental analysis. International Journal of Refrigeration, v. 93, p. 236-248.

5. NAKASHIMA, A. T. D., DUTRA, S. L., TREVIZOLI, P. V., BARBOSA Jr., J. R., 2018b. Influence of the flow rate waveform and mass imbalance on the performance of active magnetic regenerators. Part II: Numerical simulation. International Journal of Refrigeration, v. 93, p. 159-168.

6. TREVIZOLI, P. V., NAKASHIMA, A. T., PEIXER, G. F., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Performance assessment of different porous matrix geometries for active magnetic regenerators. Applied Energy, v. 187, p. 847-861.

7. FORTKAMP, F. P., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Analytical solution of concentric two-pole Halbach cylinders as a preliminary design tool for magnetic refrigeration systems. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 444, p. 87-97.

8. TREVIZOLI, P. V., PEIXER, G. F., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Thermal-hydraulic evaluation of oscillating-flow regenerators using water: Experimental analysis of packed beds of spheres. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 99, p. 918-930.

9. TREVIZOLI, P. V., CHRISTIAANSE, T., GOVINDAPPA, P., NIKNIA, I., TEYBER, R., BARBOSA Jr., J. R., ROWE, A., 2016. Magnetic heat pumps: an overview of design principles and challenges. Science and Technology for the Built Environment, v. 22, p. 507-519.

10. TREVIZOLI, P. V., NAKASHIMA, A. T., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Performance evaluation of an active magnetic regenerator for cooling applications - part II: mathematical modeling and thermal losses. International Journal of Refrigeration, v. 72, p. 206-217.

11. TREVIZOLI, P. V., NAKASHIMA, A T., PEIXER, G. F., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Performance evaluation of an active magnetic regenerator for cooling applications - part I: experimental analysis and thermodynamic performance. International Journal of Refrigeration, v. 72, p. 192-205.

ATIVIDADE 6.1.4 (NOVAS TECNOLOGIAS) ESTUDO MAGNÉTICO E MAGNETOCALÓRICO DE MATERIAIS PARA USO NA REFRIGERAÇÃO MAGNÉTICA A TEMPERATURA AMBIENTE

O grupo de pesquisa de magnetismo e materiais magnéticos do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense tem investigado diversos materiais para avaliar seu potencial para aplicação em refrigeração magnética. O objetivo do grupo neste projeto é a produção, a caracterização estrutural e magnética, e a avaliação da capacidade de refrigeração de materiais magnéticos considerados promissores para a refrigeração magnética.

Na linha de pesquisa de "Desenvolvimento de materiais magnetocalóricos", o grupo da UFF procura otimizar as propriedades magnéticas e magnetocalóricas de compostos através de substituições químicas. Em seguida, a caracterização cristalográfica, magnética e térmica é realizada em colaboração com outras universidades no Brasil e exterior [1-5]. As Figuras 16 e 17 mostras imagens de nanopartículas sintetizadas do material La0,6Ca0,4MnO3 e curvas de variação isotérmica de entropia para em função do tamanho das nanopartículas e do campo magnético aplicado (Andrade et al., 2016).

Desenvolvimento de novos materiais magnéticos relacionados com materiais magnetocalóricos: a otimização magnetocalórica não pode ser realizada apenas com substituição química; sendo preciso conhecermos o comportamento magnético dos materiais. Por este motivo, sempre exploramos em detalhes o comportamento magnético dos compostos de interesse [6-12].

Efeito magnetocalórico de materiais quânticos: novas propriedades surgem através do estudo e previsão teórica de novos materiais; sendo esta a atividade realizada nesta linha de pesquisa, com a colaboração fundamental de grupos na Rússia e China [13-19].

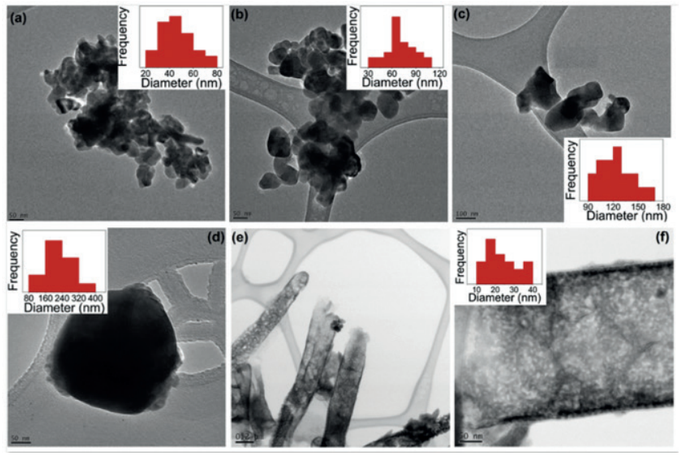


Figura 16
Imagens de Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM) de nanopartículas sintetizadas a (a) 973 K, (b) 1073 K, (c) 1173 K, (d) 1273 K e (e) nanotubos (em 973 K). Na imagem (f), foi obtida uma imagem em modo de alta resolução para verificar as características das nanopartículas que constituem a parede dos nanotubos. Os histogramas para cada amostra também são mostrados, onde os valores correspondentes são tamanhos de partículas estimados (Andrade et al., 2016).

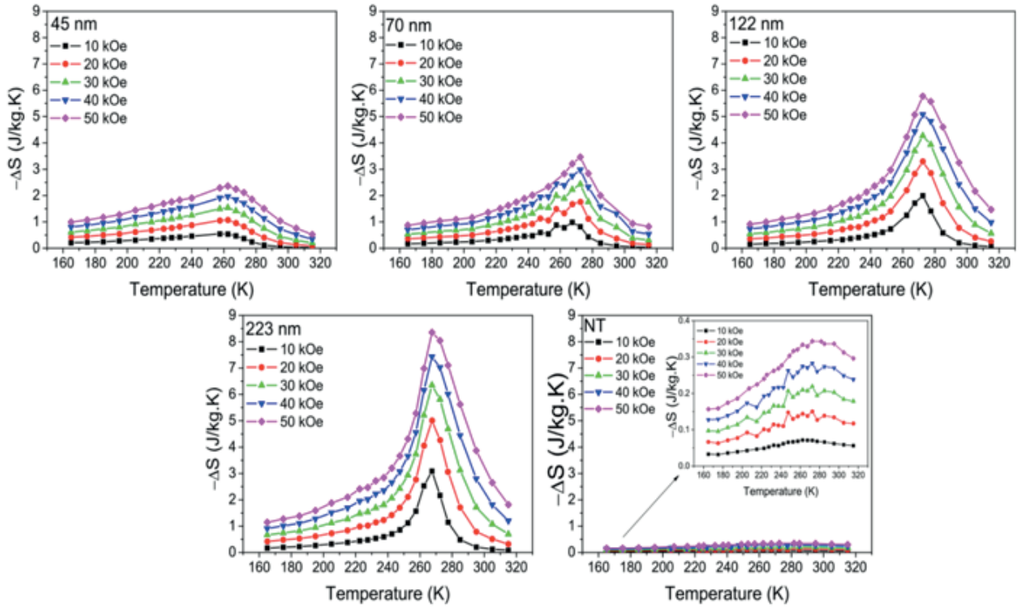


Figura 17
Variação isotérmica de entropia para o material La0,6Ca0,4MnO3 em função do campo magnético e do tamanho de nanopartículas (Andrade et al., 2016).

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. V.M. Andrade, J.H. Belo, M.S. Reis, R.M. Costa, A.M. Pereira, J.P. Araujo, 2018. Lanthanum Dilution Effects on the Giant Magnetocaloric Gd Si Ge Compound Physica Status Solidi B - Basic Solid State Physics 255 1800101.

2. R.J. Caraballo-Vivas, S.S. Pedro, C. Cruz, J.C.G. Tedesco, A.A. Coelho, A. M. Carvalho, D.L. Rocco, M.S. Reis, 2016. Experimental evidences of enhanced magnetocaloric properties at room temperature and half-metallicity on Fe2MnS-based Heusler alloys, Materials Chemistry and Physics 174 23.

3. V.M. Andrade, S.S. Pedro, R.J. Caraballo, D.L. Rocco, M.S. Reis, A.P.C. Campos, A.A. Coelho, M. Escote, A. Zenatti, A.L. Rossi, 2016. Magnetocaloric functional properties of Sm0.6Sr0.4MnO3 manganite due to advanced nanostructured morphology, Materials Chemistry and Physics 172 20.

4. S.S. Pedro, L.P. Sosman, M.S. Reis, J.C.G. Tedesco, H.N. Bordallo, 2016. Paramagnetic Fluorides: a green alternative, Magnetics Technology International 58.

5. V.M. Andrade, R.J. Caraballo Vivas, S.S. Pedro, J.C.G. Tedesco, A.L. Rossi, A.A. Coelho, D.L. Rocco, M.S. Reis, 2016. Magnetic and magnetocaloric properties of La0.6Ca0.4MnO3 tunable by particle size and dimensionality, Acta Materialia 102 49.

6. R.J. Caraballo-Vivas, J.C.G. Tedesco, N.R. Checca, N.M. Fortunato, J.N. Gonçalves, D.R. Sanchez, A.M.G. Carvalho, J.S. Amaral, M.S.Reis, 2019. Experimental and theoretical evidences that atomic disorder suppresses half-metallicity of Heusler compounds, Intermetallics 111 106502.

7. B. Pimentel, R.J. Caraballo-Vivas, N.R. Checca, D.L. Rocco, M.S. Reis, 2019. Defect induces effect on LaCoO3: From diamagnetism to ferrimagnetism due to vacancy in the bulk lattice, Journal of Alloys and Compounds 796 331.

8. N.R. Checca, W.S. Torres, R.J. Caraballo-Vivas, M.A. Heringer, D.R. Sanchez, A. Rossi, M.S. Reis, D.L. Rocco, 2019. Off-stoichiometry LaFe5Six cubic phase induced by the reduced size of the nanoparticles produced by pulsed laser deposition, Journal of Alloys and Compounds 803 417.

9. N.R. Checca, R.J. Caraballo-Vivas, A.A. Coelho, A. Rossi, N.M. Fortunato, F. Mohseni, J.N. Gonçalves, J.S. Amaral, D.L. Rocco, M.S. Reis, 2018. Experimental realisation of off-stoichiometric Fe-Mn-Si full Heusler alloy with hexagonal crystal structure by pulsed laser deposition, Materials and Design 143 268.

10. M.S. Reis, D.L. Rocco, R.J. Caraballo-Vivas, B. Pimentel, N.R. Checca, R. Torrão, L.S. Paixão, A.M. dos Santos, 2017. Spin state and magnetic ordering of half-doped Nd0.5Sr0.5CoO3 cobaltite, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 422 197.

11. N.R. Checca, R.J. Caraballo-Vivas, R. Torrão, A. Rossi, M.S. Reis, 2017. Phase composition and growth mechanisms of half-metal Heusler alloy produced by Pulsed Laser Deposition: From core-shell nanoparticles to amorphous randomic clusters. Materials Chemistry and Physics 196 103.

12. J C G Tedesco, S S Pedro, R J Caraballo Vivas, C Cruz, V M Andrade, A M dos Santos, A M G Carvalho, M Costa, P Venezuela, D L Rocco, M S Reis, 2016. Chemical disorder determines the deviation of the Slater–Pauling rule for Fe2MnSi-based Heusler alloys: evidences from neutron diffraction and density functional theory, J. Phys.: Condens. Matter 28 476002.

13. N. Ma and M.S. Reis, 2019. Anomalous acoustic phonons as the physical mechanism behind the adiabatic barocaloric effect on graphene, Scientific Reports 9 219.

14. N. Ma, Z. Alisultanov, M.S. Reis, 2019. External mechanisms for valley polarisation and its effect on the magnetisation of graphene: strain and electric field, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 482 178.

15. N. Ma, M.S. Reis, 2017. Barocaloric effect on graphene, Scientific Reports 7 13257.

16. M.S. Reis and L.S. Paixão, 2016. Magnetocaloric Effect of Graphenes, CRC Graphene Science Handbook, Nanostructure and atomic arrangement, cap 34, pg 541.

17. Z.Z. Alisultanov, M.S. Reis, 2016. Quantum capacitance oscillations in graphene under crossed magnetic and electric fields, Europhysics Letters 113 28004.

18. Z.Z. Alisultanov, M.S. Reis, 2016. Magneto-oscillations on specific heat of graphene monolayer, Physics Letters A 380 470.

19. Z.Z. Alisultanov, M.S. Reis, 2016. On the quantum magnetic oscillations of electrical and thermal conductivities of graphene, Solid State Communications 234 26.

ATIVIDADE 6.1.5 (NOVAS TECNOLOGIAS) PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS MAGNETOCALÓRICOS PARA USO NA REFRIGERAÇÃO MAGNÉTICA

No Grupo de Estudos em Materiais e Máquinas Térmicas (GEMMAT) da Universidade Estadual de Maringá, no primeiro triênio, foi possível produzir e testar 4 tipos de compósitos magnetocalóricos diferentes: 1. Sn-GdGeSi (Figura 18); 2. PaNI-GdGeSi (Figura 19); 3. PMMA-GdGeSi (Figura 20) e 4. PMMA-Gd (Figura 21). Além disso, desenvolvemos um motor de Tesla baseado em um circuito magnético do tipo duplo-C, à base de ímãs permanentes. O projeto e construção deste motor era uma meta que não estava prevista para ser alcançada neste momento do projeto e deve resultar em um pedido de depósito de patente ao longo do segundo semestre de 2019. Dentre a série de estudos relacionados aos compósitos magnetocalóricos, um deles foi concluído no final de 2016 (compósito de Sn-GdGeSi), e outros foram iniciados nos anos subsequentes, com resultados promissores (caso dos compósitos identificados como 2 a 4 no parágrafo anterior), que foram publicados em dissertações de mestrado, anais de eventos científicos internacionais e periódicos da área. O grupo também inaugurou uma nova linha de pesquisa, com foco na produção de materiais poliméricos com propriedades mecanocalóricas. Acreditamos que seja possível seu emprego em máquinas térmicas de modo a aproveitar ambos os efeitos – magnetocalórico e mecanocalórico – para a geração de calor.

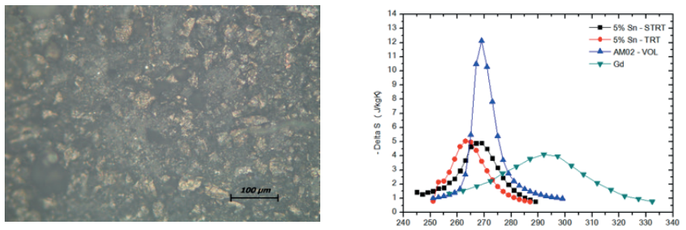


Figura 18
Imagem de microscopia óptica e curva de variação da entropia em função do campo magnético para o compósito Sn-GdGeSi

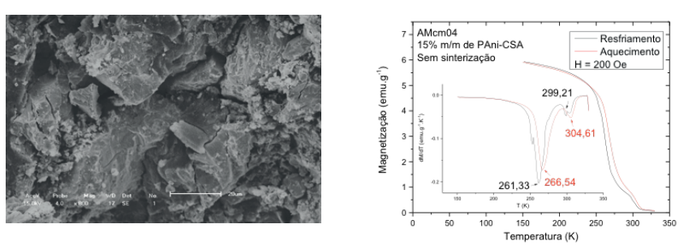


Figura 19
Imagem de MEV e curva de magnetização por temperatura (MxT) para o compósito PaNI-GdGeSi

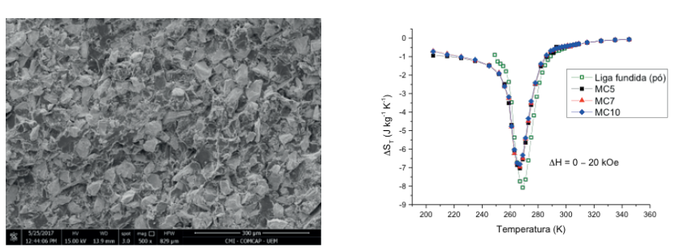


Figura 20
Imagem de MEV e curva de variação da entropia em função do campo magnético para o compósito PMMA-GdGeSi

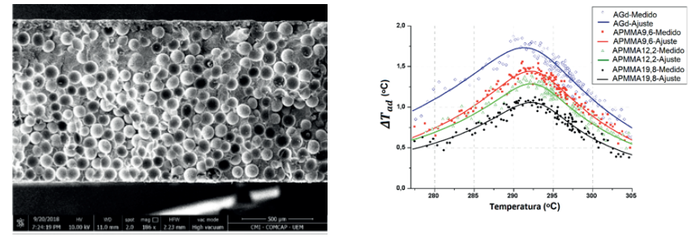


Figura 21
Imagem de MEV e variação da ΔT_{ad} durante o processo de magnetização para os compósitos de PMMA-Gd

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. BOCCA, J. R., ALVES, C. S., IMAMURA, W., CARVALHO, A. M. G, TREVIZOLI, P. V., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Efeito Magnetocalórico da Liga Gd5,09Ge2,03Si1,88 Impregnada de Estanho. Revista Tecnológica, v. 25, p. 25-34.

2. IMAMURA, W.; COELHO, A.A.; KUPFER, V.L.; CARVALHO, A. MAGNUS G., ZAGO, J. G., RINALDI, A.W., FAVARO, S. L., ALVES, C. S., 2017. A new type of magnetocaloric composite based on conductive polymer and magnetocaloric compound. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 425, p. 65-71.

3. CARVALHO, A. M. G., ALVES, C. S., TREVIZOLI, P. V., DOS SANTOS, A. O., GAMA, S., COELHO, A. A., 2018. Unusual effects of manual grinding and subsequent annealing process observed in Gd5.09Ge2.03Si1.88 compound. Applied physics. A, materials science & processing (internet), v. 124, p. 269.

4. SOUZA, A. C., GARGARO, B. M., CONCEICAO, W. A. S., KANEKO, G. H., COLMAN, F. C., TREVIZOLI, P. V., CARVALHO, A. M. G., ALVES, C. S., 2018. Modelling and simulation of a Gd-based thermomagnetic motor. In: Thermag VIII - International Conference on Caloric Cooling, Darmstadt. Refrigeration Science and Technology Proceedings. France: IIR, v. 1. p. 108-113.

ATIVIDADE 6.1.6 (NOVAS TECNOLOGIAS) PROTÓTIPO DE REFRIGERADOR MAGNÉTICO

As atividades descritas no âmbito do item 6.1.3 acima têm possibilitado o grupo de pesquisa do POLO/UFSC desenvolver modelos matemáticos para simulação numérica e otimização de regeneradores magnético-ativos, além de bancadas experimentais para validação de tais modelos. Esses modelos têm gradativamente se convertido em métodos de projeto e de avaliação de desempenho de sistemas de refrigeração baseados no efeito magnetocalórico. Esta atividade contempla o desenvolvimento de protótipos de refrigeradores magnéticos. Em 2015, na tese de doutorado de Jaime Lozano, desenvolvemos o primeiro protótipo de refrigerador magnético do tipo rotativo de capacidade de refrigeração nominal de 200 W, único no Brasil e pioneiro no hemisfério sul (Figuras 22 e 23). Desde então, estamos desenvolvendo, em parceria com empresas, protótipos de uma adega de vinhos doméstica (Figuras 24 a 26) e um condicionador de ar de 9000 BTU/h.

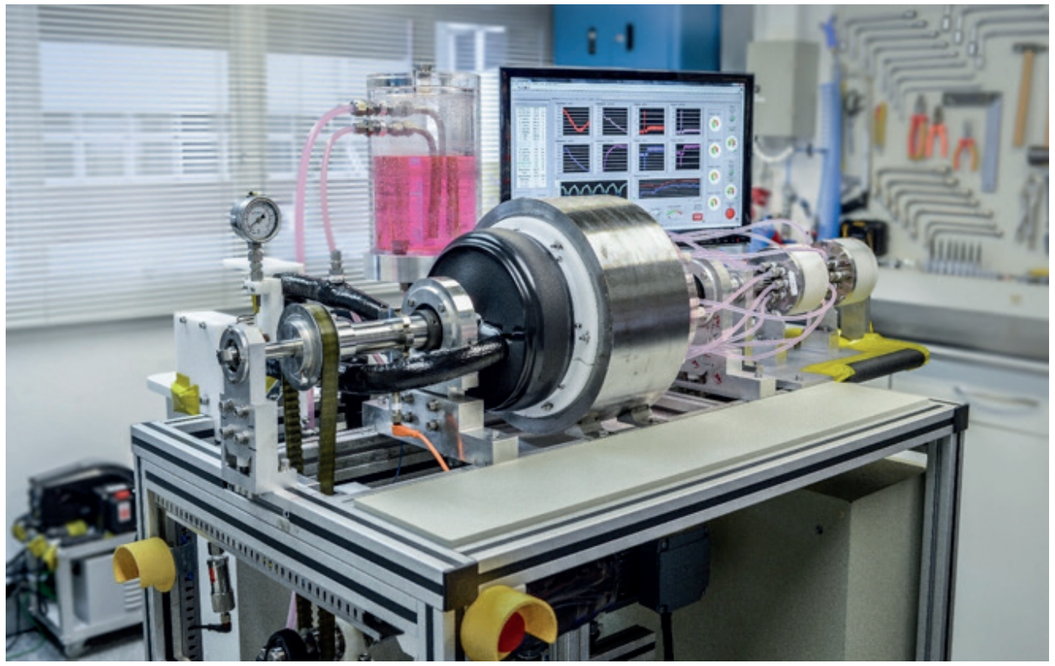


Figura 22
Protótipo de refrigeração magnética desenvolvido no POLO.

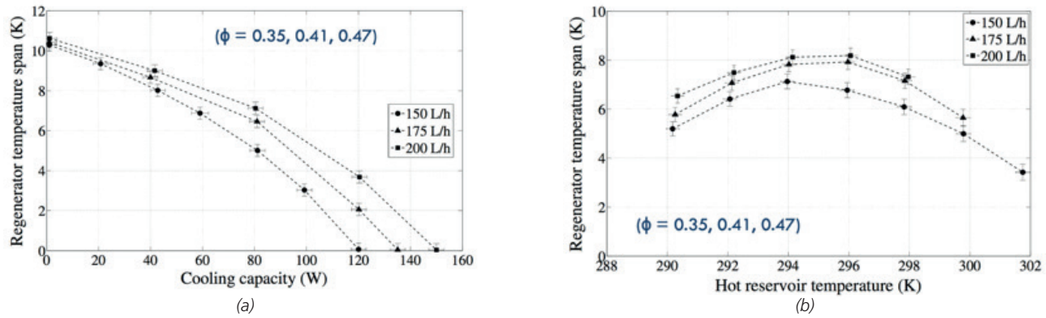


Figura 23
Curvas de desempenho obtidas no protótipo desenvolvido por Lozano et al. (2016).
(a) Span *de temperatura em função da vazão e da carga térmica para uma frequência de 0,8 Hz e temperatura da fonte quente de 21°C;*
(b) Span de temperatura em função da temperatura da fonte quente e da vazão para uma carga térmica de 60 W e uma frequência de 0,8 Hz (Lozano et al.*, 2016).*

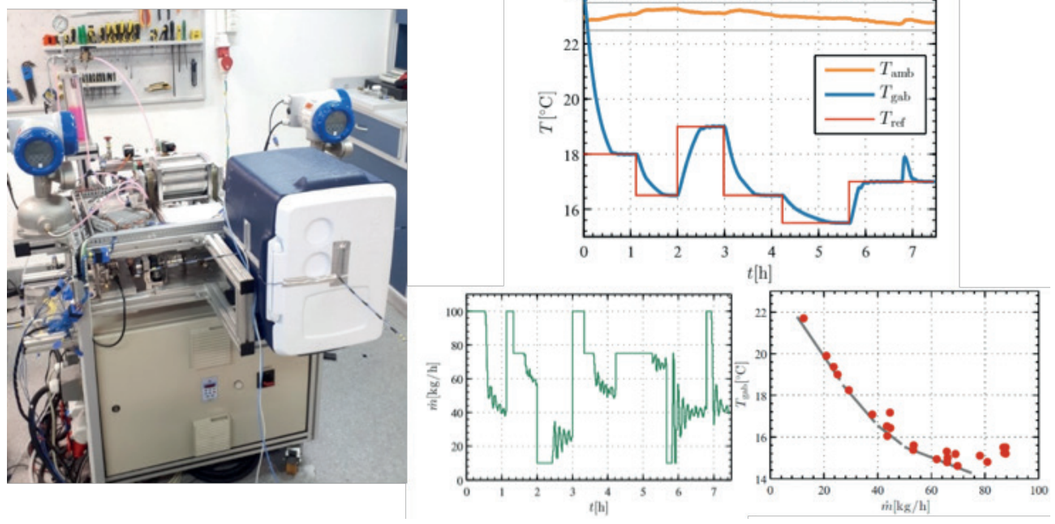


Figura 24
Bancada experimental para avaliar estratégias de controle de sistemas de refrigeração magnética.

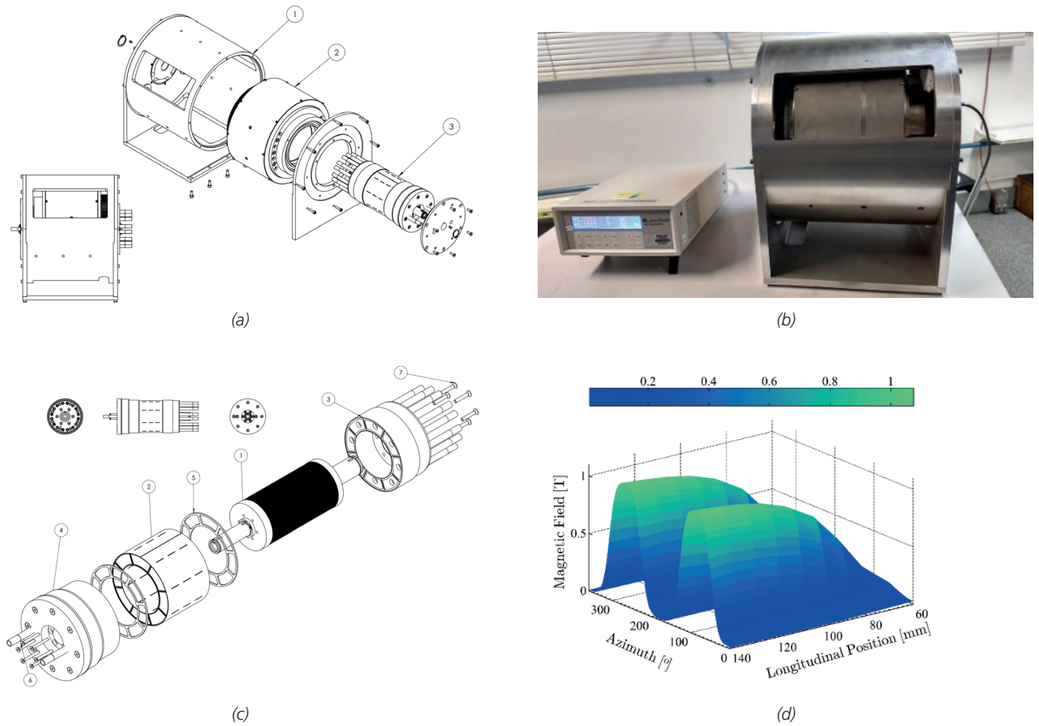


Figura 25
Projeto do conjunto ímã-regenerador da adega magnética.
(a) Vista explodida do íma-regenerador;
(b) Vista explodida do regenerador;
(c) Medição do campo magnético no ímã;
(d) Perfil magnético no "gap".

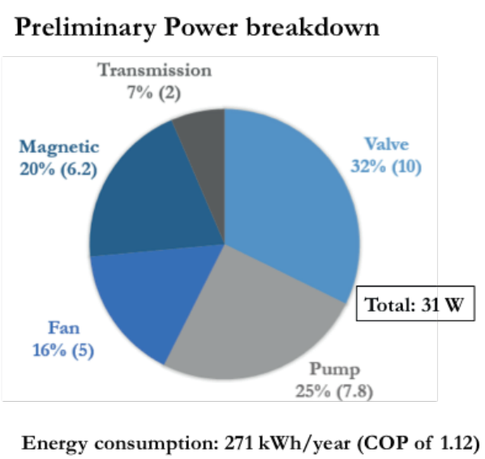


Figura 26
Expectativa de desempenho da adega magnética (consumo energético por sub-sistema).

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. CAPOVILLA, M. S., LOZANO, J., TREVIZOLI, P. V., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Performance Evaluation of a Magnetic Refrigeration System. Science and Technology for the Built Environment, v. 22, p. 534-543.

2. LOZANO, J. A., CAPOVILLA, M. S., TREVIZOLI, P. V., ENGELBRECHT, K., BAHL, C. R. H., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Development of a novel rotary magnetic refrigerator. International Journal of Refrigeration, v. 68, p. 187-197.

3. DUTRA, S. L., de SÁ, N. M., CALOMENO, R., PEIXER, G. F., SANTOS, V. M., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2019. Avaliação experimental de gabinete e trocadores de calor acoplados a um sistema emulador de regenerador magnético-ativo. In: Escola de Verão em Refrigeração, 2019, Florianópolis. EVR-2019. Rio de Janeiro: ABCM.

4. BEZ, H. N., NAKASHIMA, A. T., LANG, G., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2018. Numerical simulations and experimental tests of Gd-Y multi-layered active magnetic regenerators. In: THERMAG VIII - International Conference on Caloric Cooling, 2018, Darmstadt. Proceedings of THERMAG VIII. Paris: IIR.

5. DUTRA, S. L., de SÁ, N. M., CALOMENO, R. S., PEIXER, G. F., BARBOSA Jr., J. R., LOZANO, J. A., 2018. Experimental evaluation of a cabinet and heat exchangers emulated by an active magnetic regenerator by an active magnetic regenerato. In: THERMAG VIII - International Conference on Caloric Cooling, Darmstadt. Proceedings of THERMAG VIII.

6. PEIXER, G. F., CALOMENO, R., LANG, G., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2018. Integrated design of active magnetic regenerators and heat exchangers for magnetic refrigerators. In: THERMAG VIII - International Conference on Caloric Cooling, Darmstadt. proceedings of THERMAG VIII. Paris: IIR.

7. NAKASHIMA, A. T., DUTRA, S. L., HOFFMAN, G., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2018. Performance Assessment of Solenoid Valves as Flow Distributors for an Active Magnetic Regenerator. In: THERMAG VIII - International Conference on Caloric Cooling, Darmstadt. Proceedings of THERMAG VIII. Paris: IIR.

8. FORTKAMP, F. P., LANG, G., PEIXER, G. F., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2018. Integrated design of a magnetic circuit and an active magnetic regenerator for a 100-W compact device. In: THERMAG VIII - International Conference on Caloric Cooling, Darmstadt. Proceedings of THERMAG VIII. Paris: IIR.

9. NAKASHIMA, A. T., DUTRA, S. L., BARBOSA Jr., J. R., TREVIZOLI, P. V., 2017. Experimental evaluation of the flow imbalance in an active magnetic regenerator. In: 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Foz do Iguaçu. Proc. of the 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics.

10. de SÁ, N. M., LOZANO, J. A., CALOMENO, R. S., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Transient heat transfer analysis of a wine storage cabinet. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Curitiba. Proc. of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering.

11. FORTKAMP, F. P., LANG, G., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Performance of magnetic refrigerators operating with different magnetic profiles. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Curitiba. Proc. of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering.

12. PEIXER, G. F., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Designing an active magnetic regenerator for a fixed magnetic circuit. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Curitiba. Proc. of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering.

13. DUTRA, S. L., CARDOSO, P. O., NAKASHIMA, A. T., LOZANO, J. A., HOFFMAN, G., Barbosa Jr., J. R., 2017. Actuation and control of electric valves for a magnetic refrigerator. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Curitiba. Proc. of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering.

14. NAKASHIMA, A. T., HOFFMAN, G., DUTRA, S. L., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Using electrovalves as a flow distribution system for an active magnetic regenerator. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Curitiba. proc. of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering.

15. CARARO, J. E., LOZANO, J., TREVIZOLI, P. V., TEYBER, R., ROWE, A., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Optimization of active magnetic regenerators with two and three layers of gd and gd-alloys. In: Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag VII, Torino. Proceedings of THERMAG VII.

16. TREVIZOLI, P. V., CAPOVILLA, M. S., PEIXER, G. F., NAKASHIMA, A., LOZANO, J., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Influence of void volume and inlet flow maldistribution on the performance of thermal regenerators. In: Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag VII, Torino. Proceedings of THERMAG VII.

17. FORTKAMP, F. P., LOZANO, J., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Analytical solutions of the magnetic field generated by two-pole nested halbach cylinders. In: Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag VII, 2016, Torino. Proceedings of THERMAG VII.

18. CARDOSO, P. O., DESTRO, M. C., ALVARES, M. G., LOZANO, J., DE NEGRI, V. J., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Modeling of a novel digital hydraulic system for a magnetic refrigerator. In: Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag VII, Torino. Proceedings of THERMAG VII.

19. CALOMENO, R. S., LOZANO, J., TREVIZOLI, P. V., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Influence of the heat exchangers thermal conductance on the thermodynamic performance of a magnetic refrigerator. In: Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag VII, Torino. Proceedings of THERMAG VII.

20. EBEL, T. R. V., LOZANO, J., CARDOSO, P. O., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Simulation of a hydraulic circuit for a magnetic refrigerator. In: Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag VII, Torino. Proceedings of THERMAG VII.

21. CARARO, J. E., LOZANO, JAIME A., TREVIZOLI, P. V., TEYBER, R., ROWE, A., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Optimization of active magnetic regenerators with two and three layers of gd and gd-alloys. In: Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Torino. Proc. Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature.

22. TREVIZOLI, P, V., CAPOVILLA, M. S., PEIXER, G. F., NAKASHIMA, A. T., LOZANO, J., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Influence of void volume and inlet flow maldistribution on the performance of thermal regenerators. In: Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Torino. Proc. Seventh IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature.

23. CALOMENO, R. S., LOZANO, J. A., TREVIZOLI, P. V., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Performance of a magnetic refrigerator operating with finite thermal conductance heat exchangers. In: 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), Vitória. Proc. 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT). Rio de Janeiro: ABCM.

24. FORTKAMP, F. P., LOZANO, J. A., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Analytical model of the magnetic field generated by nested infinite Halbach cylinders. In: 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), Vitória. Proc. 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT). Rio de Janeiro: ABCM.

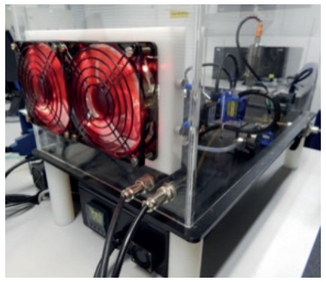
25. CARDOSO, P., DESTRO, M. C., ALVARES, M. G., LOZANO, J. A., DE NEGRI, V. J., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Transient model and energy assessment of a digital solenoid valve system for a magnetic refrigerator. In: 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), Vitória. Proc. 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT). Rio de Janeiro: ABCM.

26. EBEL, T. R. V., LOZANO, J. A., CARDOSO, P., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Qualitative evaluation and numerical simulation of a hydraulic circuit for a Rotary magnetic refrigerator. In: 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), Vitória. Proc. 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT). Rio de Janeiro: ABCM.

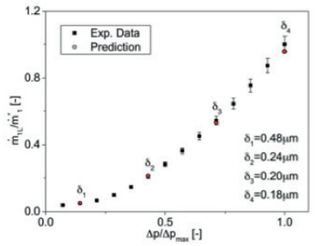
27. CARARO, J. E., LOZANO, J. A., TREVIZOLI, P. V., TEYBER, R., ROWE, A., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Optimization of Multilayer Active Magnetic Regenerators. In: 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), Vitória. Proc. 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT). Rio de Janeiro: ABCM.

ATIVIDADE 6.1.7 (NOVAS TECNOLOGIAS) COMPRESSORES SEM ÓLEO LUBRIFICANTE

O objetivo das atividades sendo desenvolvidas consiste em reduzir ineficiências de compressores que operam sem óleo lubrificante, originadas pelo escoamento de gás na folga pistão-cilindro, vazamentos em válvulas e superaquecimento do gás no sistema de sucção. Uma das atividades envolveu o projeto e construção de uma bancada experimental (Figura 27) para a determinação da folga e vazamentos em diferentes geometrias de válvulas. Além disso, outra bancada (Figura 28) foi construída para a determinação de coeficientes de acomodação da quantidade de movimento tangencial necessários para a previsão numérica de vazamentos em microcanais. Finalmente, um modelo foi também elaborado para prever a complexa interação térmica entre os componentes de compressores lineares (Figura 29a) que operam sem óleo lubrificante em diferentes condições de operação. Esses modelos permitiram avaliar, através de resultados dos campos de temperatura do gás e componentes sólidos (Figura 29b), alternativas de projeto para a redução do superaquecimento do fluido refrigerante no processo de sucção.

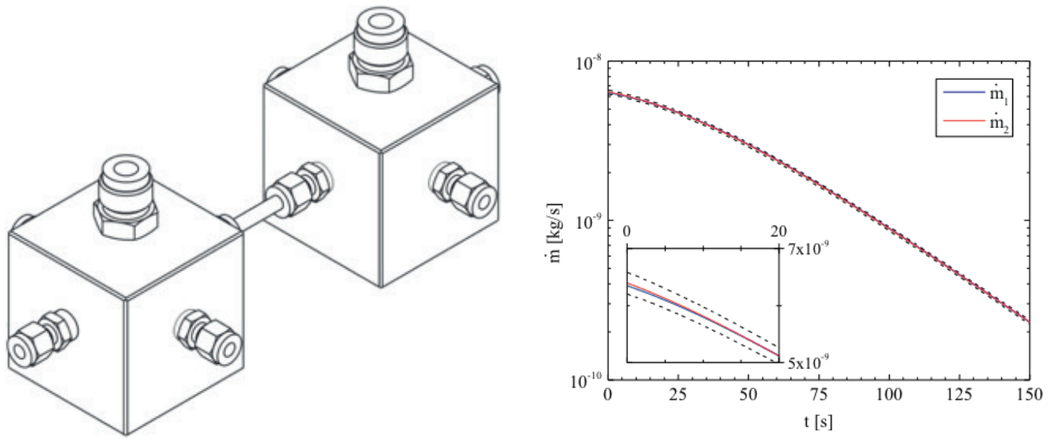


(a)



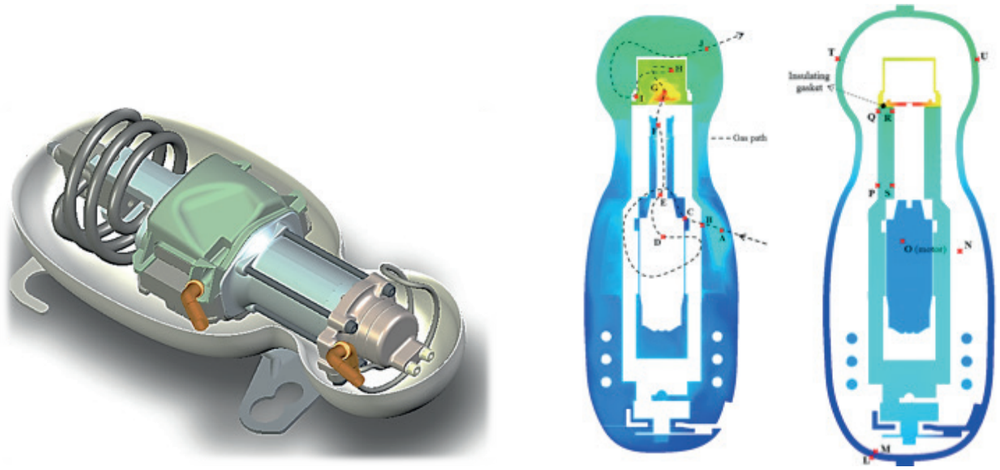
(b)

Figura 27
(a) Bancada experimental;
(b) Medições de vazamento em função da diferença de pressão e folga.



(a) (b)

Figura 28
(a) Seção de teste de escoamento em microcanal;
(b) Vazão no microcanal em função do tempo.



(a) (b)

Figura 29
(a) Compressor linear;
(b) Campos de temperatura do gás e de componentes sólidos.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. SANTOS, C. J., DUTRA, T., DESCHAMPS, C. J., 2019. Scrutinizing the Sources of Inefficiencies in the Piston-Cylinder Clearance of an Oil-Free Linear Compressor, International Journal of Refrigeration.

2. SILVA, E., DESCHAMPS, C. J., ROJAS-CARDENAS, M., COLIN, S., BALDAS, L., BARROT-LATTES, C., 2018. A time-dependent method for the measurement of mass flow rate of gases in microchannels. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 120, p. 422-434.

3. REZENDE, G. C., SILVA, E., DESCHAMPS, C. J., 2018. Edge Gap as a Geometric Parameter to Characterize the Sealing Performance of Compressor Valves. International Journal of Refrigeration, p. 257-263.

4. ROJAS-CARDENAS, M., SILVA, E., HO, M. T., DESCHAMPS, C. J., GRAUR, I., 2017. Time-dependent methodology for non-stationary mass flow rate measurements in a long micro-tube. Microfluidics and Nanofluidics, v. 21, p. 86.

5. OLIVEIRA, M. J., DINIZ, M. C., DESCHAMPS, C. J., 2016. Predicting the temperature distribution and suction gas superheating of an oil-free linear compressor. Proc. IMechE Part E – J. Process Mech. Eng., v. 231, p. 47-56.

6. SILVA, E., ROJAS-CARDENAS, M., DESCHAMPS, C.J., 2016. Experimental analysis of velocity slip at the wall for gas flows of nitrogen, R134a, and R600a through a metallic microtube. International Journal of Refrigeration, v. 66, p. 121-132.

7. BRAGA, V. M., DESCHAMPS, C. J., 2018. Effects of Gas Compressibility and Piston Secondary Motion on Leakage in the Piston-Cylinder Clearance of Reciprocating Compressors. In: Proc. 24th Int. Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, p. 1-10.

ATIVIDADE 6.1.8 (NOVAS TECNOLOGIAS) COMPRESSORES DE DUPLA-SUCÇÃO

Uma etapa inicial foi a montagem de um refrigerador doméstico com compressor dupla-sucção realizada com emulador, ou seja, o sistema de chaveamento rápido da sucção do *freezer* e do *fresh-food* era emulado por válvulas solenoides externas à carcaça do compressor. Nesta etapa, foram empregados também tubos capilares com controle PWM e micro válvulas solenoides. Este sistema permitiu a validação de conceito para o emprego de compressores de dupla sucção em refrigeradores domésticos e sua conclusão foi uma etapa importante na evolução do desenvolvimento do projeto. Na etapa seguinte, foi construída uma bancada para monitorar um refrigerador acionado por um compressor protótipo de dupla-sucção. Foram realizados seis testes: um em regime permanente e os outros cinco com eventos transientes, como ciclo de degelo, partida após descanso, mudanças de rotação, ciclo on/off e mudanças de fração de sucção do compressor. O consumo médio entre todos os testes ficou em 29 kWh/mês, 33% abaixo da média dos refrigeradores em 2014, reportada pelo Procel (2015). Por fim, foi desenvolvida uma metodologia para avaliar o comportamento transiente da circulação de óleo em eventos decorrentes da operação normal do refrigerador. Foi criada, então, uma rotina de processamento de imagens que, transforma a imagem do escoamento num sinal de fração de óleo que está passando pela seção de visualização. Verificou-se, que há uma tendência de o óleo retornar pelo circuito do freezer, o que possivelmente está relacionado com a sucção direta do compressor. Também se observou após o degelo, uma forte tendência de aumento no retorno de óleo pelo circuito do freezer, pois este é no evaporador desse compartimento onde atua a resistência de degelo. Tais resultados são fundamentais para direcionar o projeto e o ajuste de refrigeradores domésticos que empreguem compressores de dupla-sucção.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. MELLO, I., MELO, C., BOENG, J., 2016. Um estudo sobre separadores de líquido para refrigeração doméstica. In: VI congresso ibero-americano de ciências e técnicas do frio. Coimbra, Portugal.

2. VALSANGIACOMO, L. S., 2016. Desenvolvimento de um calorímetro de ciclo quente para compressores de dupla sucção. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

3. SANTOS, G. Z., 2017. Análise do desempenho de um refrigerador acionado por um compressor de dupla sucção. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ATIVIDADE 6.1.9 (NOVAS TECNOLOGIAS) SEPARADORES DE LÍQUIDO

Nesse período, um aparato experimental (Figuras 30 e 31) composto essencialmente por um refrigerador e por uma seção de visualização, foi construído para analisar a influência da geometria dos separadores sobre o desempenho do sistema e também para validar qualitativamente as previsões do modelo matemático. Nesse contexto, desenvolveu-se um modelo matemático para separadores de líquido do tipo T. Tal modelo foi divido em três sub-modelos, quais sejam: i) ramal de entrada, ii) ramal de vapor e iii) ramal de líquido. Experimentos, realizados a partir do projeto de três protótipos com geometria distintas e fabricados em acrílico, indicaram que a metodologia de dimensionamento adotada é adequada e que o diâmetro do ramal de vapor é a variável com maior impacto sobre o processo de separação de fases (Figuras 32 e 33). Verificou-se ainda através de uma matriz de testes em diferentes condições de funcionamento que o arraste de líquido aumenta o coeficiente de performance (COP) do compartimento *freezer* em até 55%, reduz o do *fresh-food* em até 29%, e restringe o envelope de operação e a integridade do compressor, conforme mostrado na Figura 34. Por outro lado, separadores maiores, que não permitem o arraste de líquido, ampliam a faixa de operação e garantem a integridade do sistema, podendo apresentar performance comparável à de sistemas com separadores menores, se houver selo de líquido.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. JANKE, I., DOS SANTOS, S. A., MELO, C., 2018. A design approach for liquid separators applied to household refrigerators. 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue.

2. JANKE, I., DOS SANTOS, S. A., MELO, C., 2019. A design approach for liquid separators applied to household refrigerators. International Journal of Refrigeration, v. 98, p. 354-361.

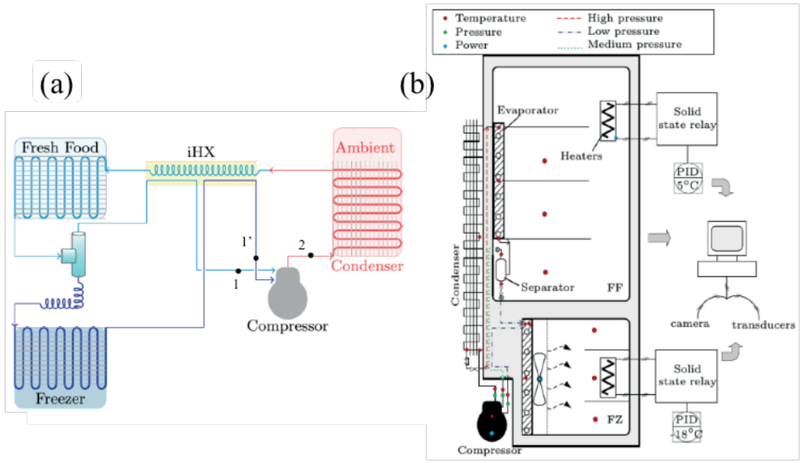


Figura 30
Ciclo serial de dois estágios com separador de fases (a) e esboço da instalação de teste (b).

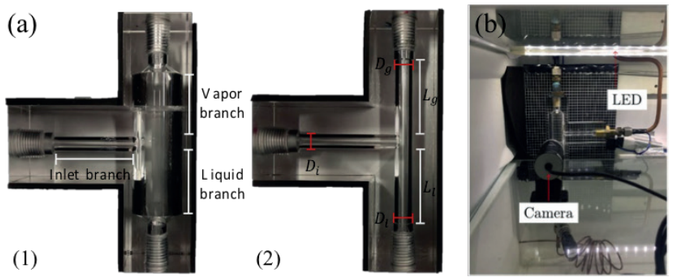


Figura 31
Separador (1) e (2), os três ramos e suas principais dimensões (a) e a seção de visualização (b).

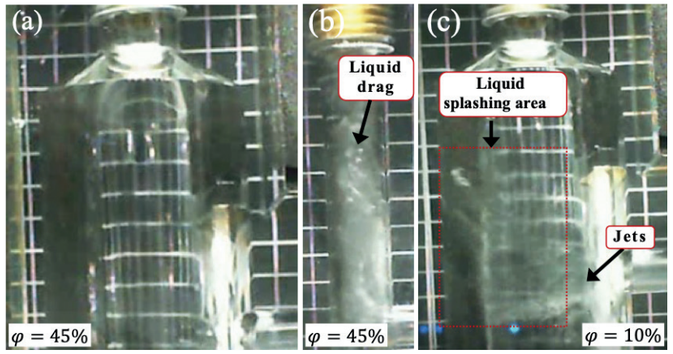


Figura 32
Ramificações de vapor durante o modo FF para o separador (1) (a) e separador (2) (b) e para o separador (1) após o impacto líquido (c).

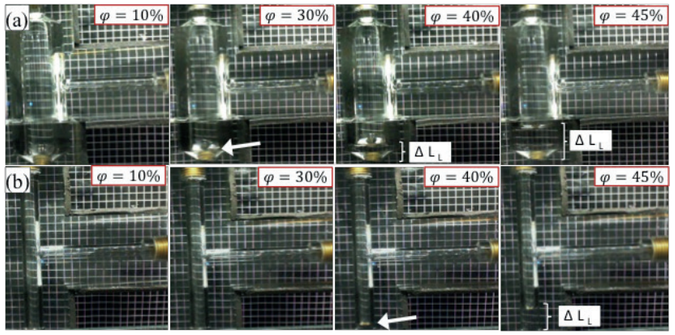


Figura 33
Nível de líquido no separador (1) (a) e (2) (b) a ϕ = 10, 35, 40 e 45% durante o modo FZ.

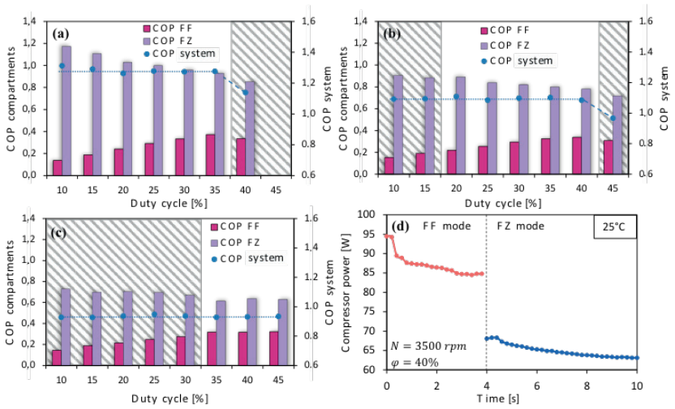
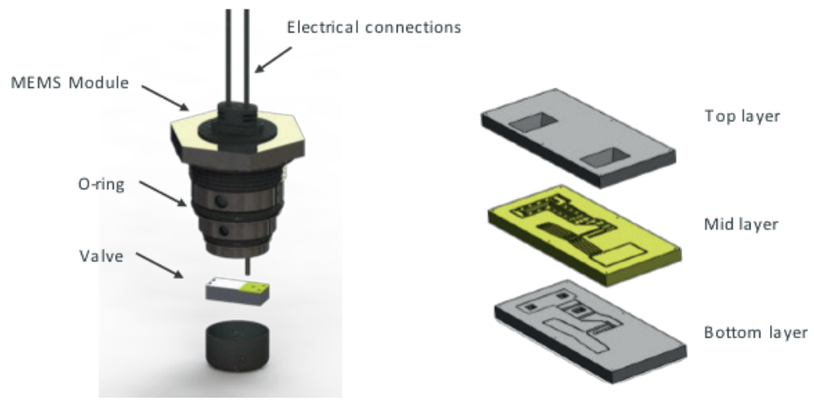


Figura 34
Envelope operacional e coeficientes de desempenho do sistema usando o separador (2) a 16 ° C (a), 25 ° C (b) e 32 ° C (c) e potência do compressor durante um período de comutação de 10s usando o separador (2) a 25 ° C, 3500 rpm e ϕ = 40%.

ATIVIDADE 6.1.10 (NOVAS TECNOLOGIAS) DISPOSITIVOS DE EXPANSÃO DE AÇÃO VARIÁVEL

Três micro válvulas eletrônicas, compostas de acordo com o diagrama esquemático da Figura 35, foram experimentalmente caracterizadas através de ensaios com nitrogênio seco. Para tanto, uma bancada foi especialmente construída para medir a vazão mássica em função da abertura do orifício e da pressão de entrada (Figura 36). Os resultados, ilustrados na Figura 37, mostraram que a válvula de maior orifício se comporta como tubos capilares com diâmetro interno entre 0.4 e 0.85 mm. Para tornar a análise mais realista, outra bancada foi projetada e construída para operar com fluido refrigerante em condições tipicamente observadas em refrigeração doméstica (Figura 38). O aparato permite o controle automático das pressões na entrada e saída da válvula, além do grau de sub-resfriamento. As válvulas intermediária e maior foram testadas e observou-se que a vazão mássica resultante é pouco sensível ao sub-resfriamento na entrada. Além disso, verificou-se o escoamento é blocado em praticamente todas as condições observadas na prática, conforme mostrado na Figura 39.



PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. MONTIBELLER, A. L., KNABBEN, F. T., MELO, C., 2016. Uma Metodologia para Prever o Desempenho de Válvulas de Expansão Eletrônicas com Foco em Refrigeração Doméstica, Anais do IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza, Brasil.

2. KNABBEN, F. T., MELO, C., 2018. An Experimental Study of HC-600a Flow Through Variable Expansion Devices for Household Refrigerators, 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, EUA.

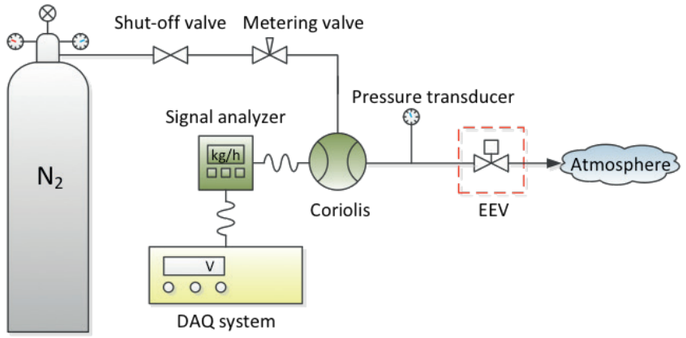


Figura 36
Esquema da bancada de testes de nitrogênio

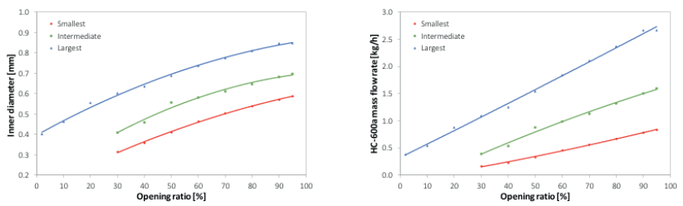


Figura 37
Tubos capilares equivalentes (a) e previsões de taxa de fluxo de massa do HC-600a (b)

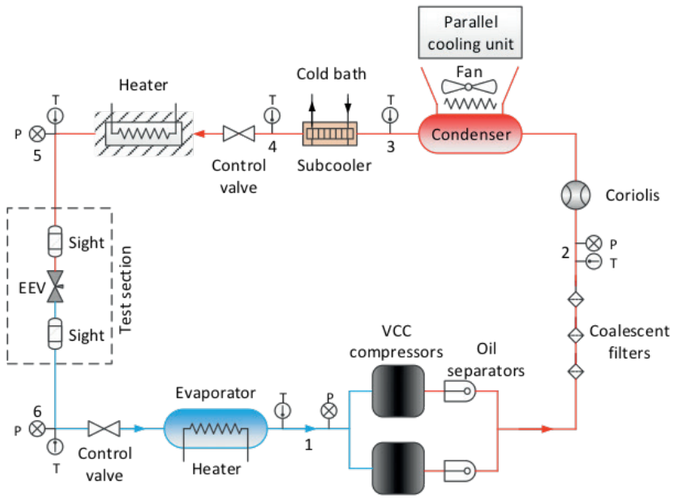


Figura 38
Esquema da bancada de testes para EEV operando com isobutano

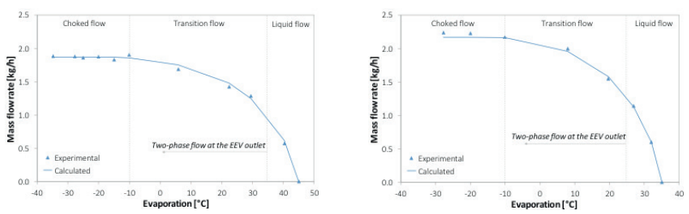


Figura 39
Taxa de fluxo de massa vs evaporação para o maior EEV: (a) Tc = 45 ° C e taxa de abertura = 50% eb) Tc = 35 ° C e taxa de abertura = 75% (direita)

ATIVIDADE 6.2.1 (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E IMPACTO AMBIENTAL) TECNOLOGIAS DE COMPRESSÃO DE VAPOR

A presente atividade objetiva a análise termodinâmica comparativa de diferentes tecnologias de compressão aplicadas à refrigeração, tais como compressores alternativo, scroll e pistão rolante (Figura 40). A análise visa também identificar pontos críticos para a aplicação desses compressores, permitindo identificar os desenvolvimentos tecnológicos necessários para torná-los competitivos. Na primeira etapa da atividade, três modelos de simulação de compressores foram desenvolvidos: (i) modelo para análise termodinâmica de compressores scroll; (ii) modelo para simulação de compressor alternativo sob condições de transiente do sistema; (iii) modelo para a simulação de compressores de pistão-rolante. Além disso, bancadas experimentais foram construídas para validação dos modelos de simulação. A partir desses modelos, análises comparativas de desempenho foram realizadas para esses compressores em aplicações de refrigeração comercial leve (Figura 41a), condicionamento de ar e bomba de calor para aquecimento de água de uso doméstico (Figura 41b).

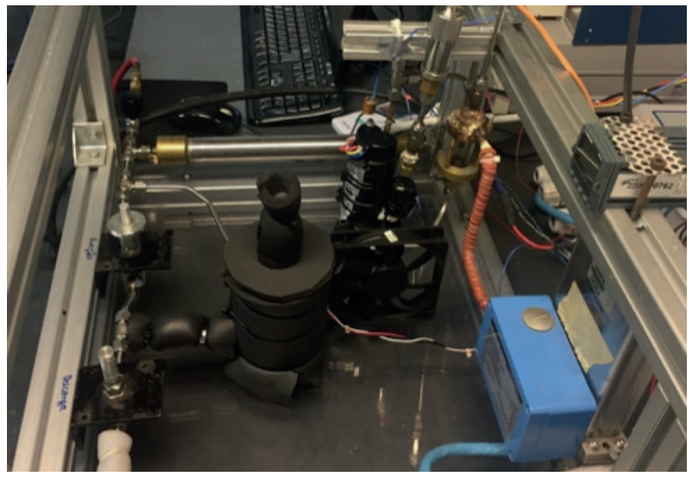
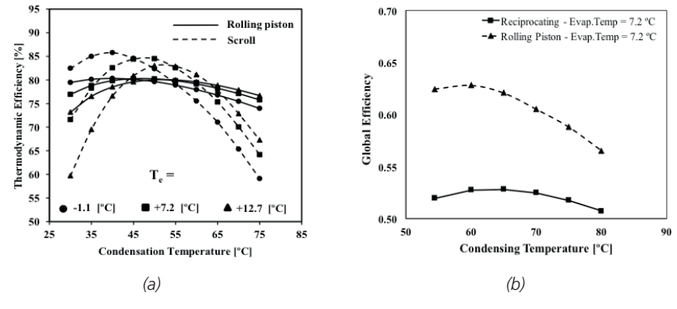


Figura 40
Bancada calorimétrica para avaliação de microcompressores.



(a) (b)

Figura 41
(a) Eficiências de compressores scroll e rotativo para refrigeração comercial leve; (b) Eficiências de compressores alternativo e rotativo em bomba de calor para aquecimento de água de uso doméstico.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. ENGEL, R. C., DESCHAMPS, C. J., 2019. Comparative Analysis between the Performances of Reciprocating and Rolling Piston Compressors Applied to a Domestic Heat Pump Water Heater. International Journal of Refrigeration, v. 102, p. 130-141.

2. PEREIRA, E. L. L., DESCHAMPS, C. J., 2017. A heat transfer correlation for the suction and compression chambers of scroll compressors. International Journal of Refrigeration, v. 82, p. 325-334.

3. SILVEIRA, J. V. T., ENGEL, R. C., DINIZ, M. C., DESCHAMPS, C. J., 2017. Effect of the piston position on the effective flow and force areas of rolling-piston compressors. In: Proc. IIR Compressors, Bratislava, p. 1-8.

4. PEREIRA, E. L. L., DESCHAMPS, C. J., 2017. A Simulation Model for Scroll Compressors with New Correlations for Leakage and Heat Transfer. In: Proc. 8th Int. Conference on Compressors and Refrigeration, Xi'an, p. 1-10.

5. SILVA, L. R., DUTRA, T., DESCHAMPS, C. J., RODRIGUES, T. T., 2017. A new modeling strategy to simulate the compression cycle of reciprocating compressors. In: Proc. IIR Compressors, Bratislava, p. 1-8.

6. DINIZ, M. C., DESCHAMPS, C. J., 2016. Comparative Analysis of Two Types of Positive Displacement Compressors for Air Conditioning Applications. In: Proc. 24th Int. Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, p. 1-8.

7. SILVA, E., FONSECA, W. M., DESCHAMPS, C. J., 2016. A Calibration Procedure for Compressor Simulation Models using Evolutionary Algorithm. In: Proc. 24th Int. Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, p. 1-8.

ATIVIDADE 6.2.2 (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E IMPACTO AMBIENTAL) GERENCIAMENTO TÉRMICO

A transferência de calor no escoamento de fluido refrigerante no interior de compressores é caracterizada por fenômenos complexos, evolvendo geometrias intricadas, gradientes elevados de temperatura e processos termodinâmicos interdependentes, conforme ilustra a Figura 42. Na primeira etapa do projeto, modelos de simulação e experimentos foram elaborados para o detalhamento das fontes de calor no interior do compressor e quantificação de ineficiências termodinâmicas. Uma das atividades se concentrou no desenvolvimento de uma correlação de transferência de calor para o escoamento no sistema de sucção de um compressor de velocidade variável, através de medições de temperatura em pontos cuidadosamente definidos (Figura 43). Além disso, medições de fluxo de calor em vários componentes internos do compressor foram realizadas, permitindo avaliar a escala de tempo do transiente térmico de cada um desses componentes (Figura 44). A partir dessas atividades, um novo modelo de simulação foi desenvolvido, permitindo prever o superaquecimento do gás no interior do compressor em diferentes condições de operação, incluindo transientes do sistema.

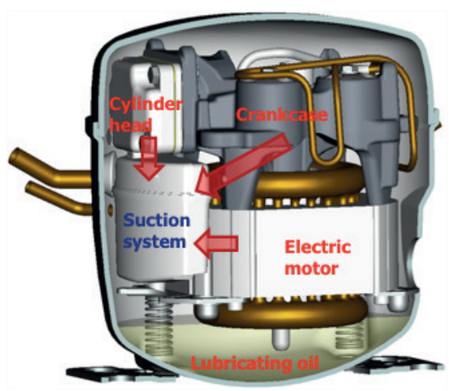
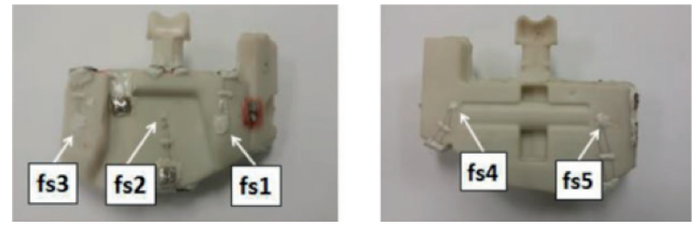
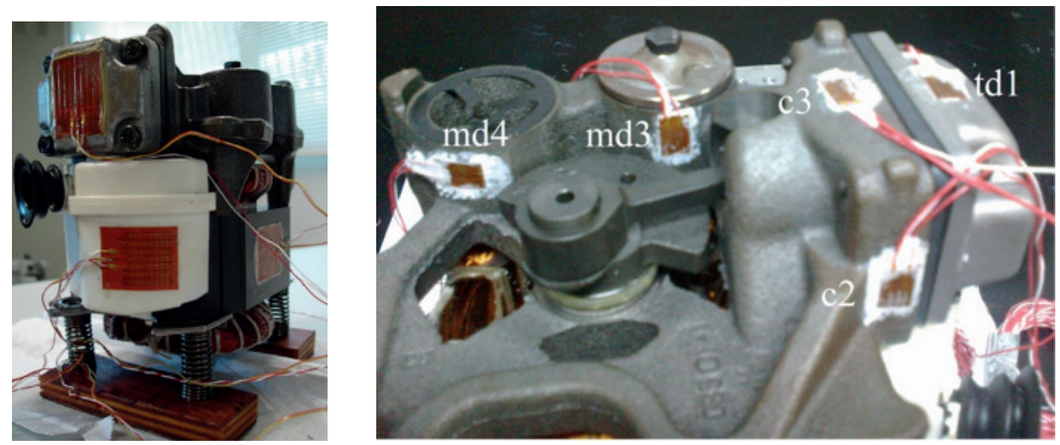


Figura 42
Representação esquemática das interações térmicas em um compressor de refrigeração doméstica.



(a) *(b)*

Figura 43
Posições de medições de temperatura;
(a) superfície do lado oposto ao motor elétrico;
(b) superfície do lado do motor elétrico.



(a) *(b)*

Figura 44
Posições de medição de fluxo de calor:
(a) motor, muffler de sucção e tampa da placa de válvulas;
(b) Muffler de descarga e superfície externa da câmara de compressão.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. ARCENO, E., DUTRA, T., DESCHAMPS, C. J., 2016. Experimental Determination of Correlations for Heat Transfer Coefficients in the Suction Muffler of a Hermetic Reciprocating Compressor. In: Proc. 24th Int. Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, p. 1-8.

2. SILVA, G. L. M., DUTRA, T., DESCHAMPS, C. J., 2016. Experimental Investigation of Heat Transfer in Components of a Hermetic Reciprocating Compressor under Thermal Transient. In: Proc. 24th Int. Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, p. 1-8.

3. LOHN, S. K., DINIZ, M. C., DESCHAMPS, C. J., 2015. A Thermal Model for the On-Off Cycling Operating Condition of Refrigeration Compressors. In: Proc. 9th Int. Conference on Compressors and their Systems, London, p. 1-8.

ATIVIDADE 6.2.3 (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E IMPACTO AMBIENTAL) CONCEPÇÃO INTEGRADA DE COMPRESSORES

Essa atividade objetiva investigar o desempenho de compressores submetidos a transientes do sistema de refrigeração. Um modelo de simulação foi desenvolvido para prever a distribuição de temperaturas e o desempenho termodinâmico de um compressor alternativo em um sistema de refrigeração doméstica controlado por termostato, o qual liga e desliga o compressor de acordo com a temperatura interna do refrigerador. O regime transiente foi caracterizado na simulação através de curvas experimentais de pressão nos passadores de sucção e descarga de um compressor operando em um sistema de refrigeração, conforme ilustra a Figura 45. Um aparato experimental (Figura 46) foi construído para fornecer os dados necessários para a validação dos resultados numéricos. Após validado, o modelo foi adotado na análise do desempenho de um compressor em diferentes condições de operação do sistema, através de diagramas p-V, vazão de massa e potência consumida (Figura 47).

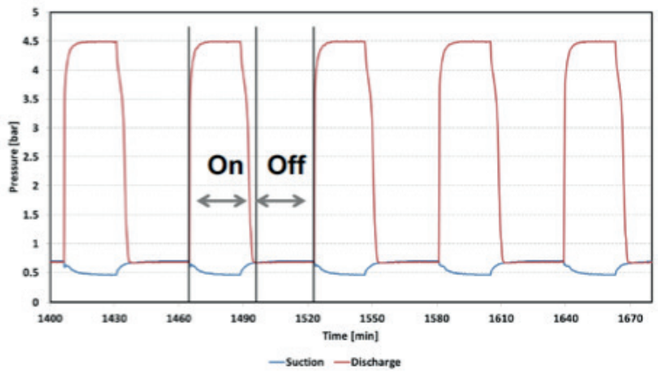
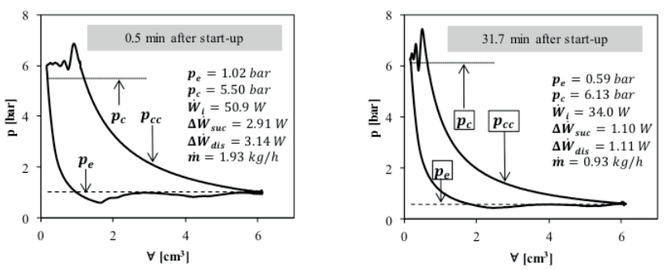


Figura 46
Compressor instrumentado operando em um refrigerador doméstico.



(a) *(b)*

Figura 47
Diagramas p-V de um compressor operando em condições transientes de um refrigerador doméstico: (a) 0,5 min após ser ligado; (b) 31,7 min após ser ligado.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. DINIZ, M. C., HERMES, C. J. L., DESCHAMPS, C. J., 2019. Transient simulation of small-capacity reciprocating compressors in on-off controlled refrigerators. International Journal of Refrigeration, v. 102, p. 12-21.

2. DINIZ, M. C., MELO, C., DESCHAMPS, C. J., 2018. Experimental Performance Assessment of a Hermetic Reciprocating Compressor Operating in a Household Refrigerator under On-Off Cycling Conditions. International Journal of Refrigeration, p. 587-598.

3. BALVEDI, D. F., DINIZ, M. C., DESCHAMPS, C. J., 2018. An Experimental-Numerical Procedure to Characterize Compressor Performance under Cycling Operating Conditions of Refrigerators. In: Proc. 24th Int. Compressor Engineering Conference at Purdue, West Layette, p. 1-9.

4. DINIZ, M. C., DESCHAMPS, C. J., 2016. Thermodynamic Performance of a Reciprocating Compressor under Typical Transients of Refrigeration Systems. In: Proc. 24th Int. Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, p. 1-8.

ATIVIDADE 6.2.4 (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E IMPACTO AMBIENTAL) DIÓXIDO DE CARBONO

Uma bancada experimental que permite a montagem de diferentes configurações de ciclo de forma rápida e fácil foi projetada e construída no laboratório, conforme mostrada na Figura 48. Diferentes arquiteturas de sistema foram avaliadas e comparadas com o ciclo padrão (Figuras 49 e 50). Os ensaios experimentais mostraram que o uso de um trocador de calor interno pode levar a um aumento de até 30% no desempenho do sistema. O uso de uma válvula termostática contribui para um superaquecimento reduzido, mas afasta a pressão de descarga do valor ideal. Observou-se que a configuração com dupla expansão garante o controle simultâneo do superaquecimento e da pressão de descarga. As três configurações apresentaram COPs semelhantes. A configuração com extração de vapor reduz a temperatura de descarga, mas penaliza o COP devido a redução da capacidade de refrigeração em função da redução da vazão mássica circulante no evaporador. O uso de um compressor de duplo estágio e capacidade variável também foi avaliado. Nesse caso, para os testes com trocador de calor interno, foi identificado que existe um superaquecimento mínimo necessário, abaixo do qual a operação do sistema fica instável. Com o uso de uma válvula termostática para controlar o superaquecimento foi possível identificar um aumento progressivo no COP conforme a rotação aumenta, chegando a 17% em 75Hz. Por fim, foi explorada uma arquitetura com trocador de calor interno, controle de pressão de descarga e separador de líquido com injeção de vapor saturado entre os estágios de compressão. Essa arquitetura de ciclo proporcionou um aumento do COP, quando comparado ao ciclo de referência, de 15,5%, 18,4%, e 18,1% nas frequências de 45, 60 e 75 Hz, respectivamente, conforme mostrado na Figura 51.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. CARVALHO, B. Y. K, MELO, C., PEREIRA, R. H., 2019. An experimental study on the use of variable capacity two-stage compressors in transcritical carbon dioxide light commercial refrigerating systems, International Journal of Refrigeration.

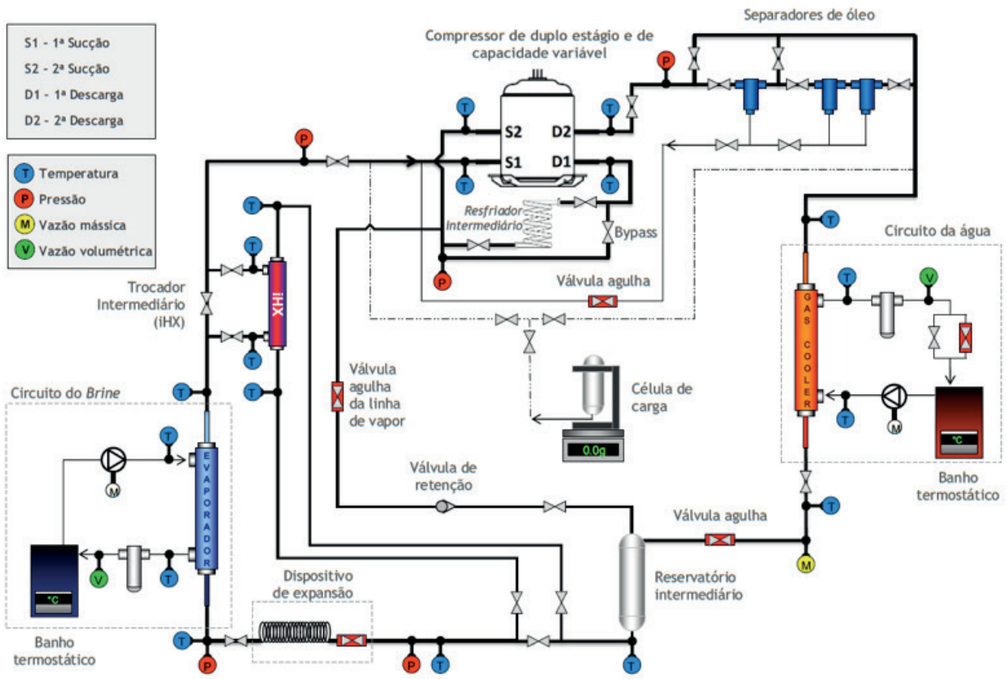


Figura 48
Represetação esquemática do aparato experimental para testes do sistema com CO2

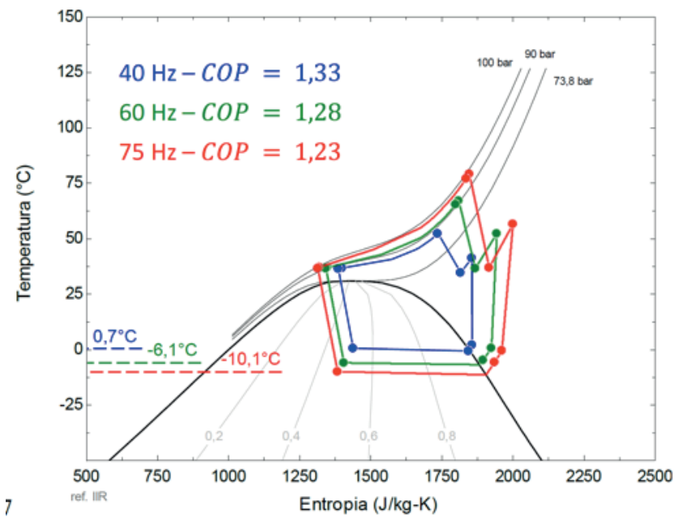


Figura 49
Diagramas T-s para o ciclo de referência com 740g, 4,5 voltas de abertura e frequências de 40, 60 e 75 Hz

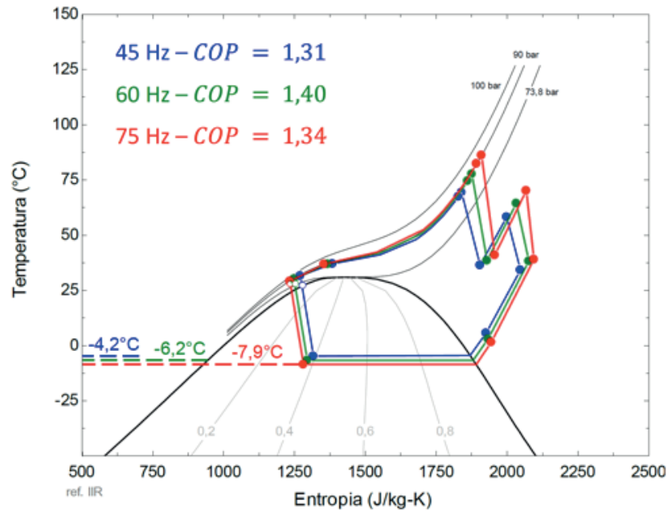


Figura 50
Diagramas T-s para o ciclo com trocador de calor interno para as frequências de 45, 60 e 75 Hz

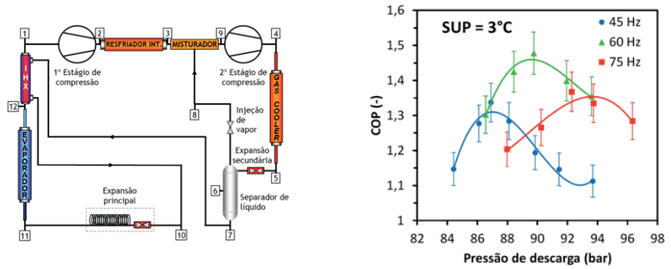


Figura 51
Esquema do ciclo com separador de líquido (esq.) e coeficiente de desempenho em função da pressão decarga para o ciclo com separador de líquido (dir.)

ATIVIDADE 6.2.5 (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E IMPACTO AMBIENTAL) PAINÉIS DE VÁCUO

Dezesseis refrigeradores do mesmo modelo foram fabricados com diferentes quantidades, posições e áreas de painéis de vácuo em torno do gabinete (Figura 52). Para tanto, foram utilizados painéis de 8 mm de espessura, constituídos por um núcleo de fibra de vidro e por um involucro de filme laminado multicamadas. As amostras foram submetidas a testes de fluxo de calor reverso e consumo cíclico de energia, e verificou-se que, apesar do aumento da área de cobertura proporcionar condutâncias térmicas globais e consumos de energia menores, isso não ocorreu de modo linear. Refrigeradores com áreas de painéis idênticas apresentaram consumo de energia e condutâncias térmicas globais distintas, conforme mostrado na Figura 53. Concluiu-se que os testes de fluxo de calor reverso não são adequados para a caracterização de refrigeradores com paredes cujo isolamento térmico seja heterogêneo.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. THIESSEN, S., KNABBEN, F. T., MELO, C., GONÇALVES, J. M., 2016. An Experimental Study on the Use of Vacuum Insulation Panels in Household Refrigerators, 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, EUA.

2. THIESSEN, S., KNABBEN, F. T., MELO, C., GONÇALVES, J. M., 2016. Caracterização Experimental de Gabinetes Refrigerados Isolados com Painéis de Vácuo, VIII Congresso Ibérico | VI Congresso Ibero-Americano de Ciências e Técnicas do Frio, Coimbra, Portugal.

3. THIESSEN, S., KNABBEN, F. T., MELO, C., GONÇALVES, J. M., 2018. A study on the effectiveness of applying vacuum insulation panels in domestic refrigerators. International Journal of Refrigeration, v. 98, p. 10-16.

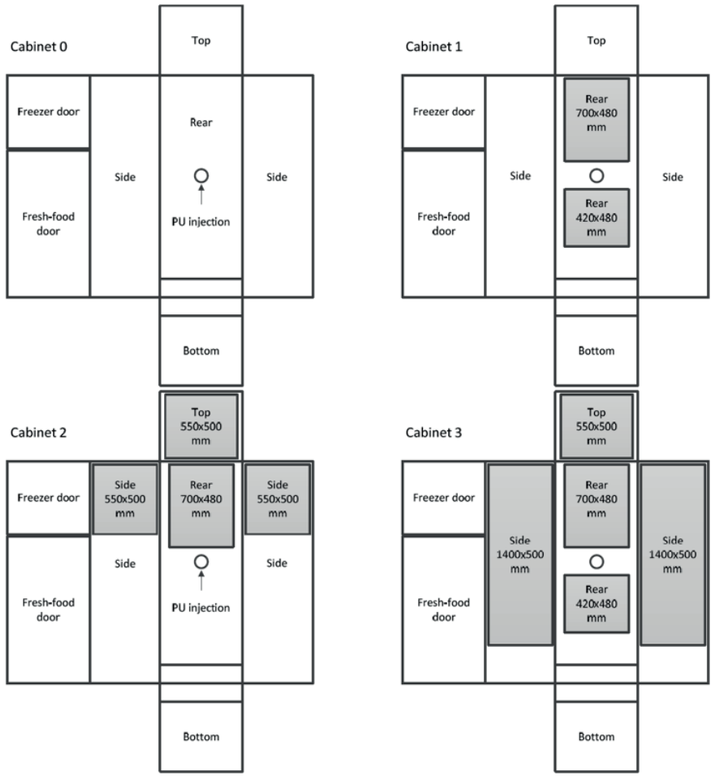


Figura 52
Representação esquemática dos gabinetes testados (sem painéis nas portas)

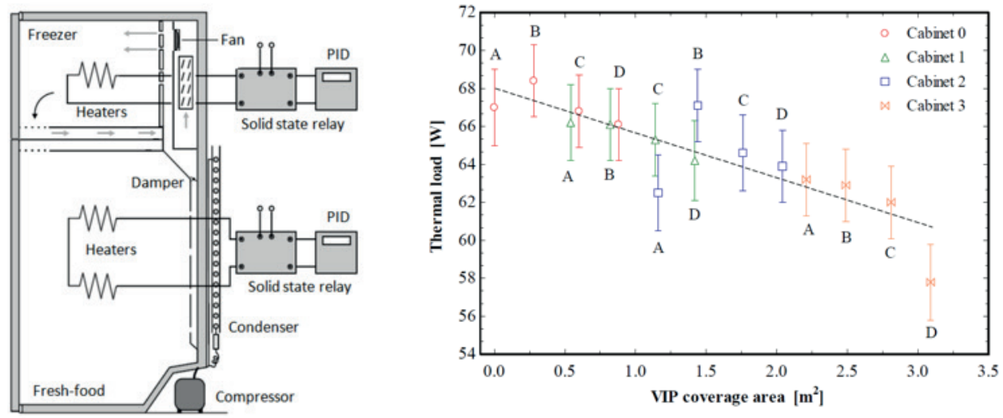


Figura 53
Esquema do ensaio de determinação de carga térmica (esq.) e resultados das medições para os diferentes gabinetes (dir.)

ATIVIDADE 6.2.6 (EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E IMPACTO AMBIENTAL) RESISTÊNCIAS DE DEGELO

Nesse estudo, a eficiência de resistências de degelo aplicadas em refrigeradores domésticos (Figura 54) foi experimentalmente avaliada através de ensaios com uma bancada especialmente construída para tal finalidade. O aparato consiste num calorímetro, num gabinete refrigerado e num sistema de umidificação. Três tipos de resistências (distribuída, calrod e tubo de vidro) e três estratégias de atuação (potência integral, em degraus e pulsada) foram investigadas. Os experimentos foram conduzidos em condições controladas de forma a garantir o mesmo padrão de formação de geada no evaporador. Observou-se que a eficiência de degelo é praticamente a mesma para cada modo de operação. A maior eficiência, de 48%, foi obtida com a resistência de tubo de vidro operando na estratégia de degraus de potência. Porém, elevados níveis de temperatura foram atingidos. A resistência do tipo calrod mostrou-se a mais apropriada, não só pela sua eficiência, mas também por questões de custo e montagem (Figuras 55 e 56).

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. KNABBEN, F.T., MELO, C., 2016. An Experimental Study on the Effect of a New Defrosting Strategy on the Energy Consumption of Household Refrigerators, 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, EUA.

Figura 54
Tecnologias de degelo (aquecedores elétricos) considerados neste trabalho

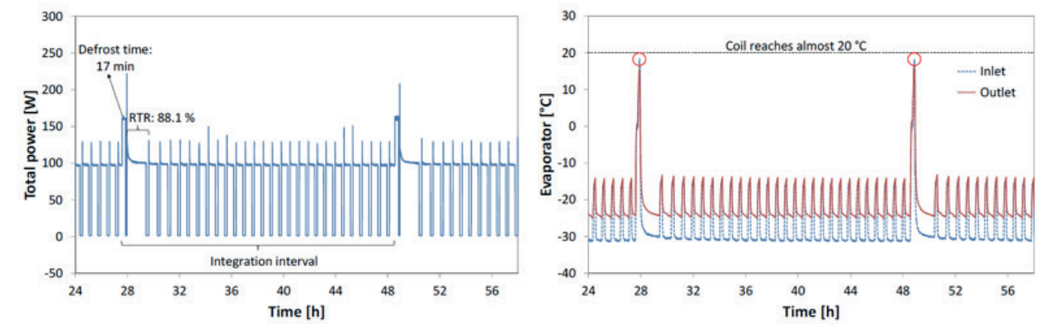


Figura 55
Resultados experimentais típicos de um refrigerador em processo de degelo: potência e fração de funcionamento (esq.) e temperaturas da superfície do evaporador (dir.)

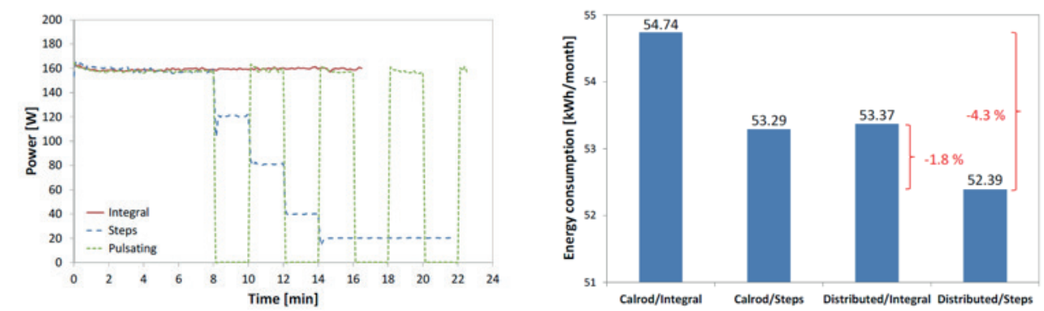


Figura 56
Esquema da estratégia de degelo proposta (esq.) e comparação entre as diferentes tecnologias de degelo (dir.)

ATIVIDADE 6.3.1 (CONFORTO ACÚSTICO) RUÍDO EM SISTEMAS DE SUCÇÃO

Em comum acordo com a empresa parceira do projeto após reunião técnica, decidiu-se não realizar essa investigação a fim de priorizar as demais atividades definidas para melhoria do desempenho de compressores de refrigeração.

ATIVIDADE 6.3.2 (CONFORTO ACÚSTICO) RUÍDO DE EXPANSÃO

Construiu-se um aparato experimental para medir o desempenho termo-acústico de refrigeradores domésticos. Um filtro secador de acrílico foi instalado na entrada do tubo capilar, de maneira a permitir correlacionar o padrão de escoamento de fluido refrigerante com o ruído de expansão (Figuras 57 e 58). Para medição das variáveis termodinâmicas, foram utilizados transdutores de pressão absoluta, termopares e medidor de vazão mássica. Já para variáveis acústicas, foram utilizados transdutores de pressão sonora, acelerômetros e microfones. Testes foram realizados em diferentes condições de operação, como temperatura ambiente, do compartimento refrigerado, carga de refrigerante, rotação do compressor e diferentes geometrias do trocador de calor tubos capilar-linha de sucção. Os resultados apontaram que o aumento da temperatura de evaporação, a redução do diâmetro interno da linha de sucção ao longo do trocador de calor, e a redução do comprimento de entrada do tubo capilar apresentaram o maior potencial para redução da magnitude de todas as variáveis acústicas (Figuras 59 e 60).

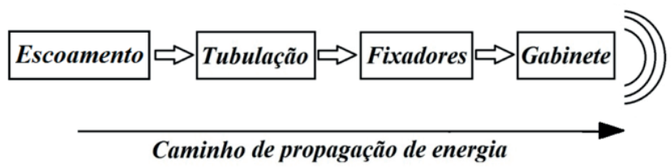


Figura 57
Esquema do caminho da propagação acústica em um refrigerador

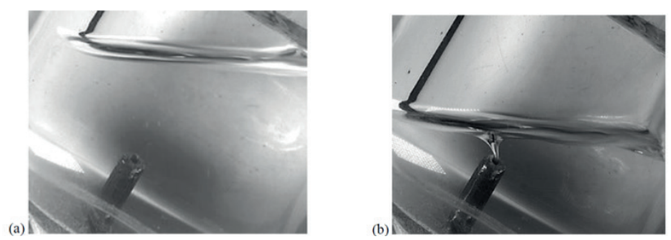


Figura 58
Condição na entrada do filtro secador: a) sem vórtice; b) com vórti-ce (ensaio: condição 8)

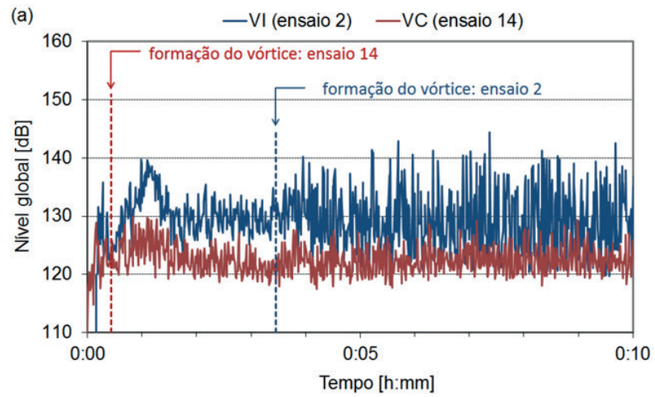


Figura 59
Sinal de P5: comparação entre regimes de vórtice

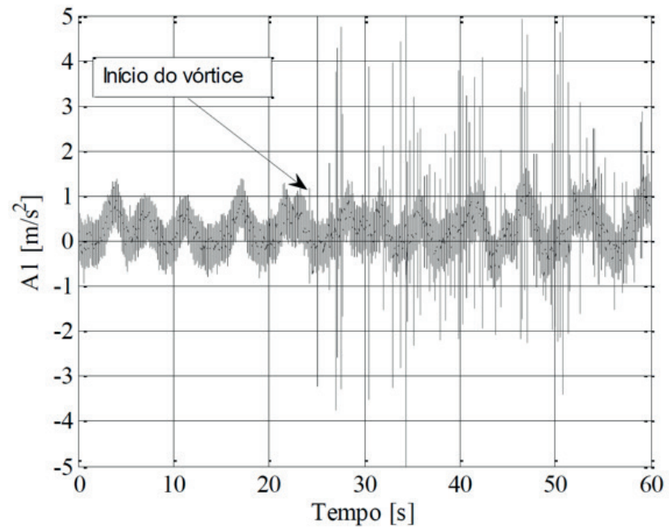


Figura 60
Sinal direto do acelerômetro A1

ATIVIDADE 6.4.1 (CONFIABILIDADE DE COMPONENTES E SISTEMAS) CONFIABILIDADE DE MOTORES DE INDUÇÃO

A temperatura do motor elétrico de compressores é um parâmetro crítico para a confiabilidade de sistemas de refrigeração. Dois modelos de simulação foram desenvolvidos para a previsão da temperatura de motores de indução de compressores. Um desses modelos (SIMI - Sólido-Integral Motor-Integral) considera uma formulação integral para todos os componentes, avaliando a temperatura média do motor. O segundo modelo (SIMPC - Sólido-Integral Motor-Parâmetros-Concentrados) possibilita o cálculo das temperaturas de vários elementos do motor. Em ambos os modelos, o motor é representado pela técnica de circuito equivalente e o ciclo de compressão é resolvido através de equações de balanços integrais de massa e energia na câmara de compressão, conforme indicado no esquema da Figura 61. Medições de temperatura do motor foram realizadas para fins de validação dos modelos, os quais foram posteriormente usados para prever a temperatura do motor de acordo com diferentes materiais construtivos, geometrias e tensão de alimentação, conforme exemplifica a Figura 62.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. DUTRA, T., DESCHAMPS, C. J., 2015. A simulation approach for hermetic reciprocating compressors including electrical motor modeling. International Journal of Refrigeration, v. 59, p. 168-181.

2. DUTRA, T., DESCHAMPS, C. J., 2015. A Thermal Network Model for Induction Motors of Hermetic Reciprocating Compressors. In: Proc. 9th Int. Conference on Compressors and their Systems, London, p. 1-8.

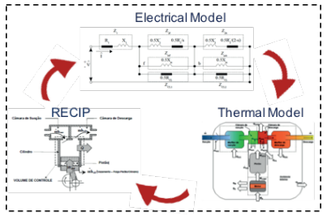
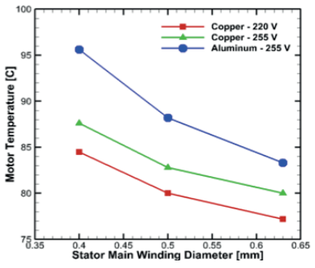


Figura 61
Esquema do acoplamento entre o modelo termodinâmico do ciclo de compressão (RECIP), modelo elétrico e modelo térmico.



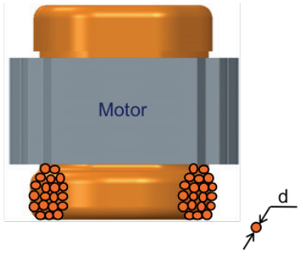


Figura 62
Temperatura do motor em função do diâmetro e material do fio da bobina e da tensão de alimentação.

ATIVIDADE 6.4.2 (CONFIABILIDADE DE COMPONENTES E SISTEMAS) VÁLVULAS DE ALTO DESEMPENHO

Válvulas do tipo palheta são utilizadas em compressores de refrigeração doméstica devido a simplicidade e baixo custo, mas estão sujeitas a falhas estruturais devido à fadiga por flexão e impacto. O critério atualmente empregado para determinar se uma válvula irá falhar ou não na presença de impactos repetitivos está relacionado à velocidade de impacto. Um modelo foi desenvolvido para a previsão da velocidade de impacto de válvulas do tipo palheta, considerando condição de operação, interação fluido-estrutura e força de adesão devido à presença de óleo entre o assento e a palheta. (Figura 63) Medições foram adotadas para a validação do modelo, bem como para avaliar parâmetros de difícil caracterização, tais como o coeficiente de amortecimento da dinâmica da válvula (Figura 64).

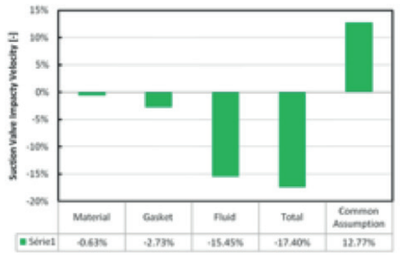


Figura 63
Efeito do coeficiente de amortecimento sobre a velocidade de impacto da válvula de sucção de um compressor de refrigeração doméstica.

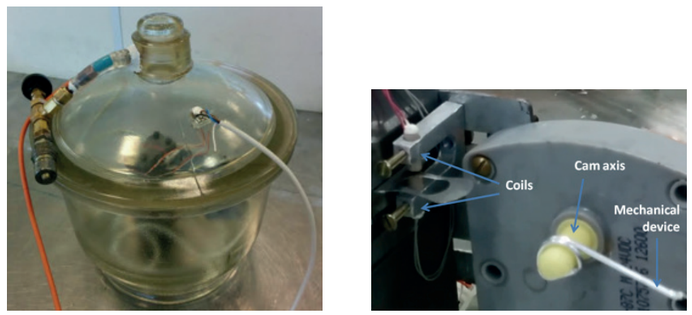
PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. EISENBERG, D. A., DESCHAMPS, C. J., 2015. Experimental Investigation of Pressure Distribution in Turbulent Flow Between Parallel and Inclined Disks. Journal of Fluids Eng., v. 137, p. 114501.

2. PIZARRO-RECABARREN, R. A., DESCHAMPS, C. J., BARBOSA Jr., J. R., 2015. Influence of refrigerant solubility and surface geometry on the wetting properties of lubricating oil. International Journal of Refrigeration, p. 157-167.

3. LOHN, S. K., SILVA, E., BEPPLER, D. L., DESCHAMPS, C. J., 2018. Effect of Fluid Flow Inertia and Backflow on the Effective Force and Flow Areas of Reed-Type Valves. In: Proc. 24th Int. Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, p. 1-8.

4. LOHN, S. K., PEREIRA, E. L. L., CAMARA, H. F., DESCHAMPS, C. J., 2016. Experimental Investigation of Damping Coefficient for Compressor Reed Valves. In: Proc. 24th Int. Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, p. 1-8.



(a) *(b)*

Figura 64
Aparato experimental: (a) Vaso para medição da oscilação da válvula em condição de vácuo; (b) sistema para medição da amplitude de oscilação da válvula.

ATIVIDADE 6.4.3 (CONFIABILIDADE DE COMPONENTES E SISTEMAS) BANDEJAS DE DEGELO

O objetivo desse trabalho foi correlacionar as condições psicrométricas do ar e de operação do compressor com a taxa de evaporação de água em bandejas de degelo distintas. Para tanto, uma bancada foi especificamente projetada para reproduzir as condições de operação do compressor e dos ciclos de degelo, conforme mostrada nas Figuras 65 e 66. No total, 52 testes foram conduzidos com um compressor recíproco de alta eficiência, instrumentado interna e externamente, operando dentro de uma câmara climatizada. Dois tipos de bandeja foram adotados: convencional e membrana. Um modelo matemático para prever a taxa de transferência massa foi desenvolvido e comparado com resultados experimentais, observando-se erros entre ±15%. Os resultados a 32°C e 45% com a bandeja do tipo membrana mostraram um aumento de 100% na taxa de evaporação em relação ao modelo convencional, o que provocou uma redução média de 10°C na temperatura da carcaça do compressor (Figura 67).

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

5. Ronzoni, Adriano Francisco; Melo, Cláudio; and Ries, Carolin, "Numerical and Experimental Analysis of Heat and Mass Transfer Processes on Water Trays in Household Refrigerators" (2014). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1368

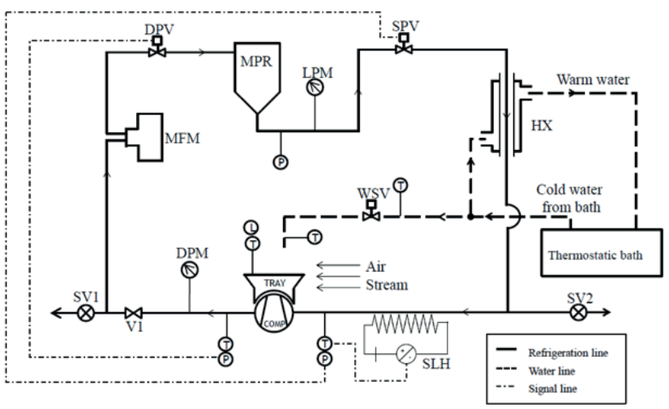


Figura 65
Esquema da banca de testes de bandeja de degelo

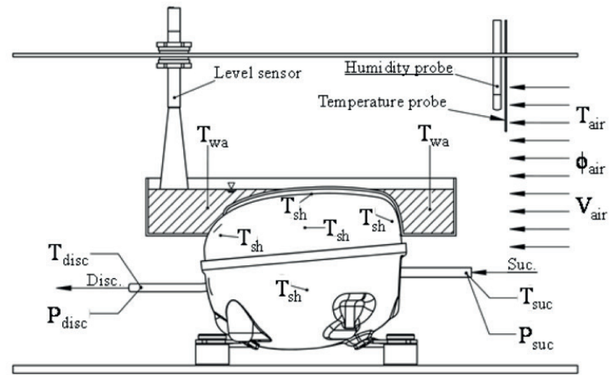


Figura 66
Esquema da instrumentação da bandeja montada no compressor para os experimentos

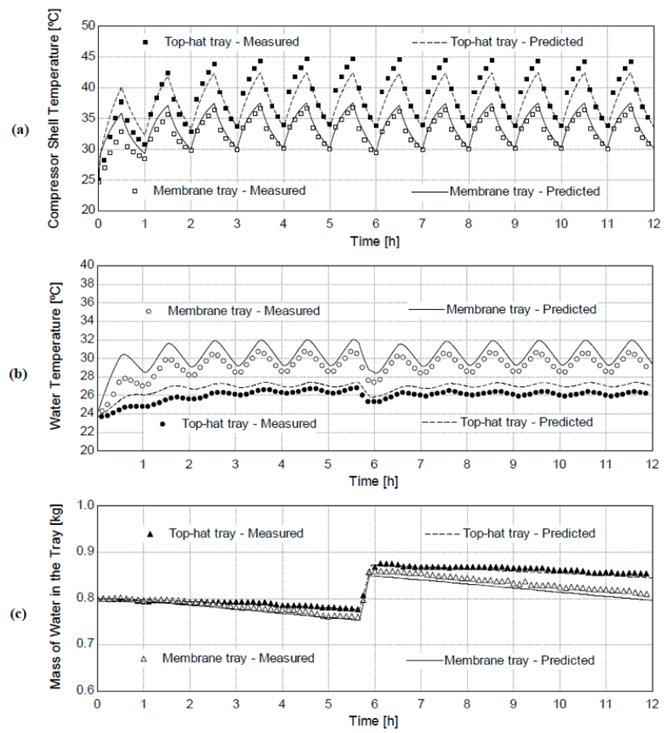


Figura 67
Evolução temporal dos resultados previstos e medidos:
(a) temperatura da carcaça do compressor,
(b) temperatura da água e
(c) massa de água na bandeja

ATIVIDADE 6.4.4 (CONFIABILIDADE DE COMPONENTES E SISTEMAS) INFILTRAÇÃO DE AR

Construiu-se um aparato experimental para medir as taxas de infiltração de ar em refrigeradores domésticos (Figuras 68 e 69). O dispositivo é capaz de distribuir uniformemente o gás traçador (SF6) no compartimento por meio de mangueiras e válvulas de controle e conta com um analisador de gás para monitoramento da concentração ao longo do tempo no refrigerador. Tal aparato foi utilizado para medir as taxas de infiltração de ar em cinco diferentes modelos de refrigeradores, nas condições de compressor ligado e desligado, e pelo método de decaimento da concentração e concentração constante. Os resultados apresentaram boa repetibilidade, com desvios inferiores a ±5%, confirmando a boa aplicabilidade do método selecionado (Figura 70). Além disso, verificou-se que os resultados de infiltração de ar foram similares para ambos os métodos de medição empregados. Por fim, verificou-se que os testes realizados com o compressor ligado apresentaram as maiores taxas de infiltração de ar, uma vez que a diferença de temperatura entre o compartimento refrigerado e o ambiente externo promove um gradiente de pressão que é a força motriz para as trocas de ar.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. PEREIRA, P. V., MELO, C., 2019. A methodology to measure the rates of air infiltration into refrigerated compartments. International Journal of Refrigeration, v. 97, p. 88-96.

2. Pereira, Paula do Vale; Sgrott, André; Back, Lucas F.; Kohara, Débora T.; and Melo, Claudio, "A Methodology for Measuring the Air Infiltration Rates into Refrigerated Compartments" (2016). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1582

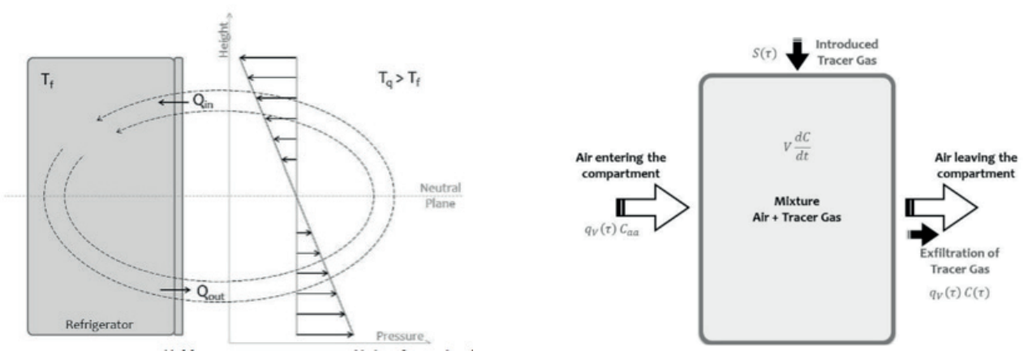


Figura 68
Esquema do processo de infiltração de ar em gabinetes refrigerados (esq.) e balanço de massa no processo de infiltração (dir.)

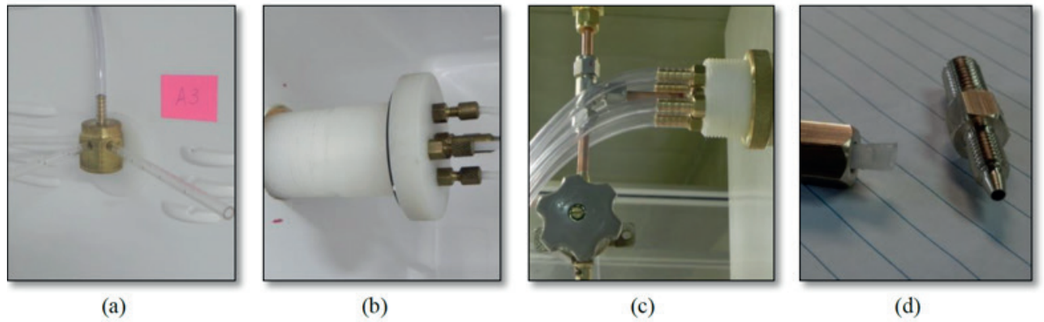


Figura 69
Esquema do aparato experimental:
(a) terminal de amostragem;
(b) junta de passagem;
(c) duto de retorno; e
(d) junta autovedante.

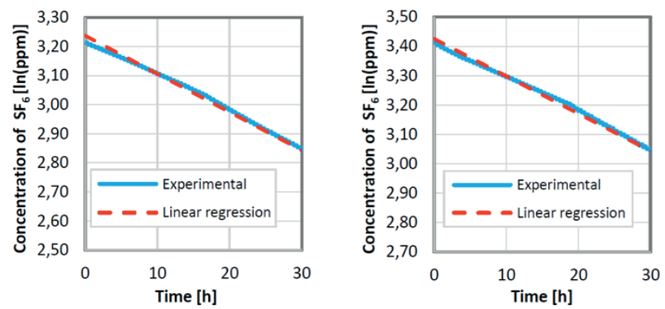


Figura 70
Resultados de infiltração em recipiente de vidro: (a) vazio e (b) com gaxetas.

ATIVIDADE 6.5.1 (AVALIAÇÃO E CERTIFICAÇÃO) MODELO MATEMÁTICO PARA TUBOS CAPILARES NÃO-ADIABÁTICOS

Uma bancada de testes foi projetada e construída para medir a vazão e a troca de calor em tubos capilares não-adiabáticos, conforme esquema mostrado na Figura 71. O aparato consiste em um circuito de refrigeração completo (condensador, evaporador, compressor etc.), medidores de vazão mássica do tipo Coriolis, transdutores de pressão, termopares e uma seção de testes, onde o tubo capilar é colocado. A bancada permite emular as condições de operação de um refrigerador doméstico típico através do controle das pressões de condensação e evaporação, e das temperaturas na entrada do tubo capilar e da linha de sucção. No total, 220 testes foram realizados, contemplando 20 amostras de tubo capilar com diâmetros internos e externos diferentes e 4 tipos de trocadores de calor (concêntrico, lateral brasado, lateral com fita e lateral extrudado) (Figura 72). Adicionalmente, o efeito do uso de diferentes fitas foi investigado (alumínio e polimérica), bem como diferentes materiais de tubo capilar (cobre e alumínio). Os resultados dos testes (Figura 73) foram utilizados, então, para alimentar um modelo matemático capaz de prever o comportamento do tubo capilar em função dos parâmetros de projeto anteriormente citados.

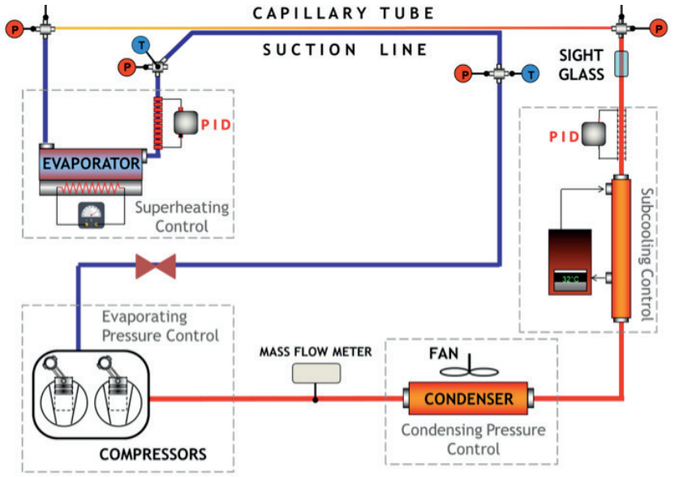


Figura 71
Representação esquemática da bancada de testes de tubos capilares não-adiabáticos

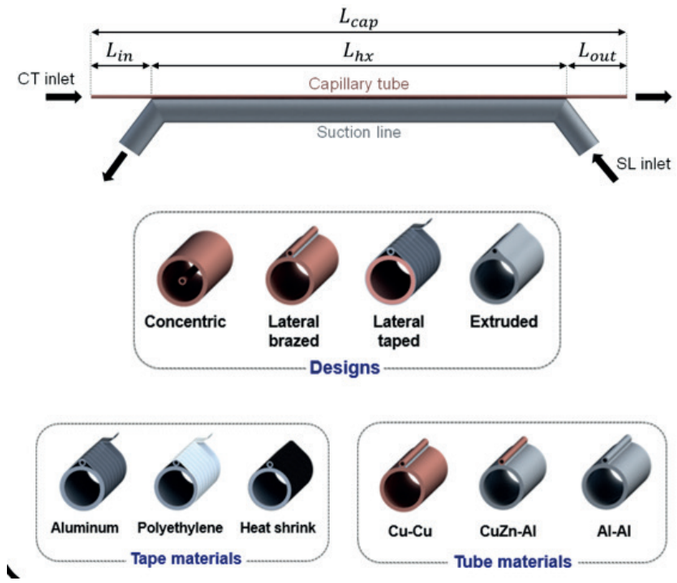


Figura 72
Representação esquemática dos diferentes arranjos de trocador de calor tubo-capilar linha de sucção

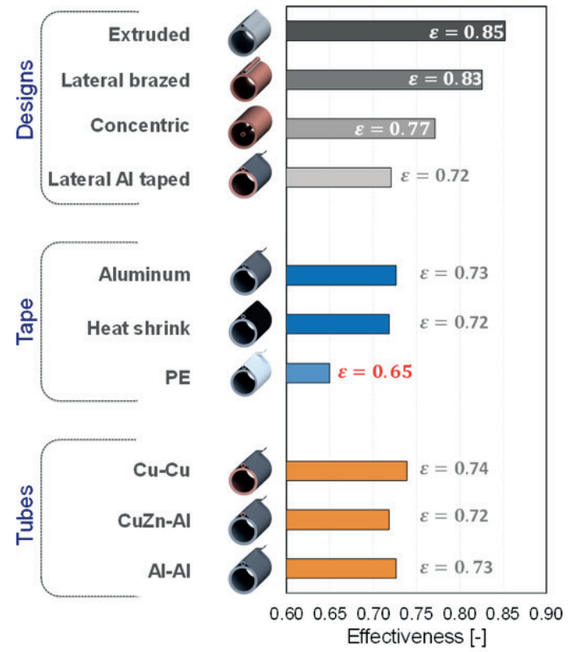


Figura 73
Resultados de medições de efetividade dos diferentes arranjos de trocador de calor tubo-capilar linha de sucção

ATIVIDADE 6.5.2 (AVALIAÇÃO E CERTIFICAÇÃO) PREVISÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

Realizou-se um estudo numérico e experimental com o objetivo de analisar o efeito combinado de evaporadores e condensadores skin sobre o desempenho de um congelador horizontal típico. Para tanto, modelou-se o ciclo de refrigeração, admitindo-se que a temperatura no plano de simetria situado na metade da espessura do isolamento da parede do produto é constante. Em paralelo, o sistema foi devidamente instrumentado com termopares e sensores de vazão mássica, pressão e potência e submetido a testes de consumo de energia em uma câmara climática, mantida a 16°C, 25oC, 32oC e 43°C, conforme mostra a Figura 74. O efeito dos trocadores de calor sobre a fração de funcionamento do compressor foi mapeado, variando-se, para cada temperatura ambiente, a banda do termostato em seis níveis. Em todas as situações o modelo previu os dados experimentais com erros inferiores a 10% (Figura 75). Percebeu-se também que a carga térmica do produto aumenta 11% com a instalação dos dois trocadores de calor e 8% com a instalação apenas do condensador skin. Verificou-se ainda que uma otimização do espaçamento entre os tubos de cada trocador promove uma redução de 46% e 50% no comprimento do condensador e do evaporador, respectivamente, elevando o consumo de energia em 2% (Figura 76). Adicionalmente, observou-se que a substituição da fita adesiva original de polietileno por uma de alumínio diminui o consumo de energia em até 10% em relação ao valor nominal.

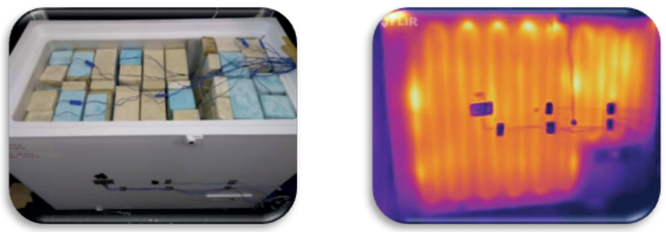


Figura 74
Produto instrumentado para realização de ensaios de consumo de energia para validação do modelo (esq.) e imagem termográfica do condensador tipo hotwall

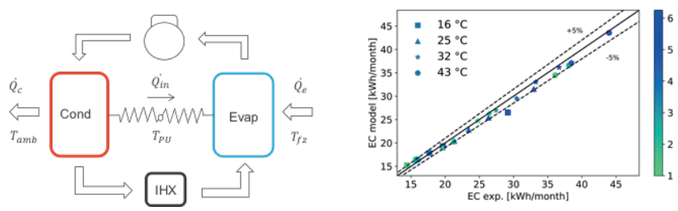


Figura 75
Esquema do modelo de simulação do ciclo com condensador e evaporador tipo hotwall *(esq.) e validação das predições do modelo contra dados de consumo de energia*

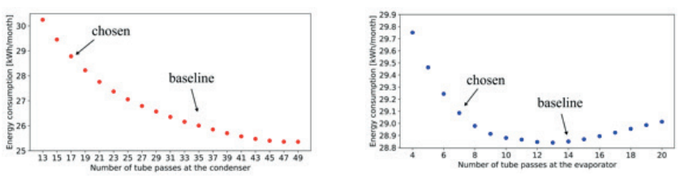


Figura 76
Análise de sensibilidade do consumo de energia do produto em relação ao número de passes no condensador (esq.) e no evaporador (dir.)

ATIVIDADE 6.5.3 (AVALIAÇÃO E CERTIFICAÇÃO) MODELO MATEMÁTICO PARA SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Um modelo matemático na plataforma Dymola (Figura 77) foi desenvolvido para simulação de refrigeradores domésticos (Figura 77). Os componentes foram subdivididos em com acúmulo e sem de massa. Os componentes sem acúmulo de massa (compressor e tubo capilar) foram tratados em regime permanente. Já os componentes com acúmulo (trocadores de calor, acumuladores de líquido, carcaça e óleo do compressor) foram modelados de formar a capturar o transiente de migração de massa. Para os componentes em regime permanente, modelos aprimorados visando à redução do custo computacional e maior robustez foram propostos. Para os componentes com acúmulo de massa, particularmente para os trocadores de calor, foram implementadas duas estratégias de modelagem: fronteiras móveis e volumes finitos. A estratégia de fronteiras móveis permite diminuir consideravelmente o número de equações do problema e, por consequência, o tempo computacional. Entretanto, existem alguns desafios associados às transições de fase do fluido refrigerante, desafios esses que se tornam particularmente morosos na implementação da estratégia de fronteiras móveis para o condensador, justificando o uso de volumes finitos nesse componente. Todos os modelos foram implementados em Modelica formando uma biblioteca de simulação. Resultados preliminares são mostrados na Figura 78.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. BORGES, B. N., MELO, C., HERMES, C. J. L., 2015. Transient simulation of a two-door frost-free refrigerator subjected to periodic door opening and evaporator frosting. Applied Energy, v. 147, p. 386-395.

2. DINIZ, M. C., HERMES, C. J. L., DESCHAMPS, C. J., 2019. Transient simulation of small-capacity reciprocating compressors in on-off controlled refrigerators. International Journal of Refrigeration, v. 102, p. 12-21.

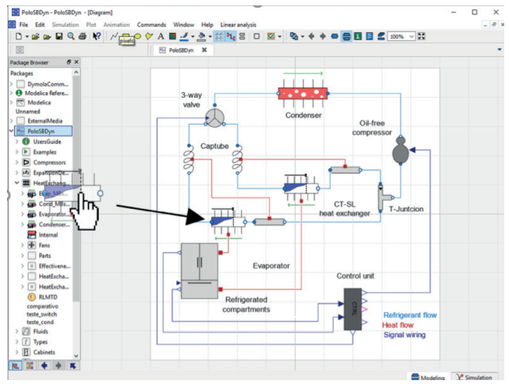


Figura 77
Plataforma Dymola/Modelica contendo os modelos trasientes dos componentes para a simulação integrada do sistema de refrigeração

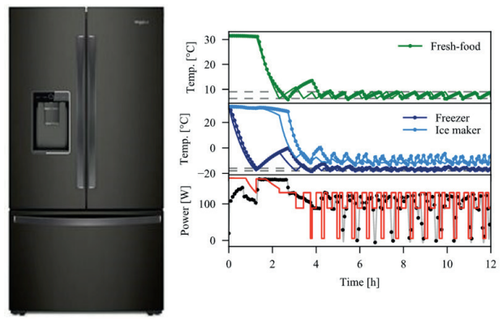


Figura 78
Resultados de simulação transinete de um refrigerador Fernch-door bottom-mount *com dois evaporadores em paralelo*

ATIVIDADE 6.5.4 (AVALIAÇÃO E CERTIFICAÇÃO) EVAPORADORES E CONDENSADORES

Trocadores de calor são componentes essenciais em qualquer sistema de refrigeração, seja ele convencional (baseado no princípio da compressão mecânica de vapores) ou não. Em sistemas de refrigeração por compressão mecânica, os trocadores de calor (evaporador, condensador ou *gas cooler* – este último para ciclos de CO_2 transcríticos) representam uma parcela significativa dos custos do sistema, de modo que a otimização desses componentes é de fundamental importância.

Além da avaliação contínua de evaporadores e condensadores visando aprimorar sua utilização em sistemas de refrigeração convencionais, esta linha de pesqu isa também se dedica à avaliação de novos conceitos e protótipos para diversas aplicações. Novos conceitos de trocadores de calor (como os evaporadores de aletas periféricas, Figuras 79 a 82), bem como extensivos testes com trocadores de calor de microcanais em sistemas de refrigeração foram o foco principal desta atividade no grupo do POLO ao longo do primeiro triênio do projeto. Além disso, foram realizados estudos com materiais com mudança de fase acoplados a trocadores de calor para aumentar a eficiência de refrigeradores.

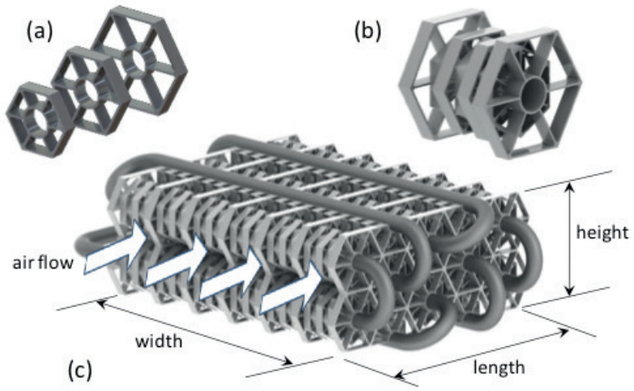


Figura 79
Conceito do evaporador de aletas periféricas (Timmermann et al., 2018).

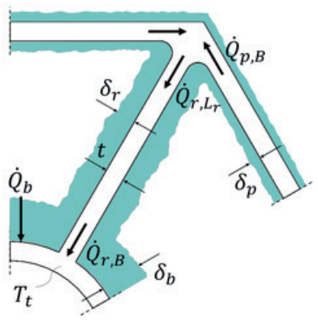


Figura 80
Variáveis envolvidas no modelo de formação de geada no evaporador de aletas periféricas (Timmermann et al., 2018).

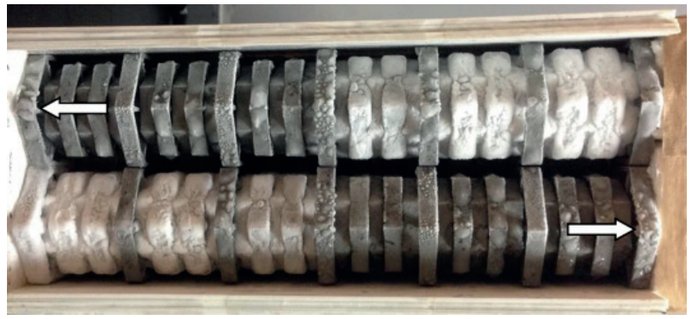
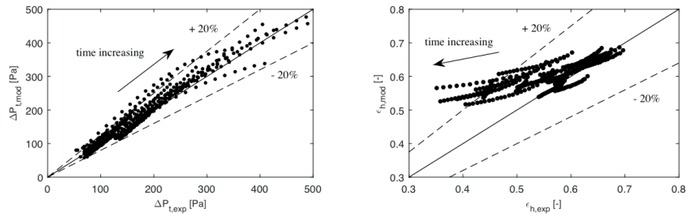


Figura 81
Formação de geada no evaporador de aletas periféricas (experimentos em túnel de vento) (Timmermann et al., 2018).



(a) *(b)*

Figura 82
Comparação do modelo desenvolvido para prever a formação de geada em evaporadores de aletas periféricas e dados experimentais (a) queda de pressão do lado do ar; (b) efetividade de entalpia (Timmermann et al., 2018).

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. RIBEIRO, G. B., BARBOSA Jr., J. R., 2019 Use of peripheral fins for R-290 charge reduction in split-type residential air-conditioners. International Journal of Refrigeration, v. 106, p. 1-6.

2. TIMMERMANN, M. A. S., KAVIANY, M., BARBOSA Jr, J. R., 2018. Thermal performance of peripheral-finned tube evaporators under frosting. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 116, p. 194-207.

3. RIBEIRO, G. B., BARBOSA Jr., J. R., 2018. Numerical Analysis of R-290/POE ISO 22 Condensers based on the Second Law and SEER Rating. International Journal of Refrigeration, v. 88, p. 441-450.

4. RIBEIRO, G. B., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Modelling of an R-290/POE ISO 22 Variable Speed Air Conditioner System under SEER Conditions. In: 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 2016, West Lafayette. Proceedings.

5. TIMMERMANN, M. A. S., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Performance Evaluation of Peripheral-Finned Tube Evaporators under Frosting Conditions. In: 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette.

ATIVIDADE 6.5.5 (AVALIAÇÃO E CERTIFICAÇÃO) FORMAÇÃO DE GEADA E SUAS PROPRIEDADES

O presente trabalho apresenta um estudo experimental dos processos de crescimento e adensamento de geada em canais formados por placas paralelas isotérmicas. Para tanto, foi especialmente projetado e construído um aparato experimental, que consiste em um túnel de vento fechado (Figura 83), em que a condição do ar na entrada do canal e as temperaturas das superfícies da seção de testes são rigorosamente controladas. Um esquema da seção de testes é mostrado na Figura 84. Um sistema de aquisição de imagens foi empregado para medir a evolução da espessura da geada ao longo do tempo, enquanto uma balança de precisão foi utilizada, ao final do teste, para medir a massa de geada depositada. Foram realizados 20 ensaios experimentais a fim de avaliar tanto os efeitos individuais quanto os efeitos simultâneos dos parâmetros-chave que afetam o adensamento e o crescimento da geada (Figuras 85 e 86). Com base em uma análise teórica, realizada com o intuito de identificar as escalas do problema, foi proposta uma equação evolutiva para a porosidade da geada que deu origem à uma correlação semi-empírica para a densidade do meio poroso, que depende não só do tempo, mas também de um grupamento adimensional baseado no número de Jakob, conforme mostrado na Figura 87. Quando comparada com os dados experimentais, a correlação proposta foi capaz de prever aproximadamente 90% dos dados com erros na faixa de ±15%.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. HERMES, C. J. L., NASCIMENTO, V. S., LOYOLA, F. R., CARDOSO, R. P., SOMMERS, A. D., 2019. A study of frost build-up on hydrophilic and hydrophobic surfaces under forced convection conditions, Experimental Thermal and Fluid Science, v. 100, p. 76-88.
2. HERMES, C. J. L., SOMMERS, A. D., GEBHART, C. W., NASCIMENTO, V. S., 2018. A semi-empirical model for predicting the frost accretion on hydrophilic and hydrophobic surfaces, International Journal of Refrigeration, v. 87 p. 164-171.
3. SOMMERS, A. D., GEBHART, C. W., HERMES, C. J. L., 2018. The Role of Surface Wettability on Natural Convection Frosting: Frost Growth Data and a New Correlation for Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 122, p. 78–88.
4. SOMMERS, A. D., NAPORA, A. C., TRUSTER, N. L., CARABALLO, E. J., HERMES, C. J. L., 2017. A semi-empirical correlation for predicting the frost density on hydrophilic and hydrophobic surfaces, International Journal of Refrigeration, v. 74, p. 311–321.
5. NEGRELLI, S., NASCIMENTO, V. S., HERMES, C. J. L., 2016. A study of the effective thermal conductivity of frost formed on parallel plate channels, Experimental Thermal and Fluid Science, v. 78, p. 301-308.
6. NEGRELLI, S., CARDOSO, R. P., HERMES, C. J. L., 2016. A finite-volume diffusion-limited aggregation model for predicting the effective thermal conductivity of frost, International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 101, p. 1263-1272.
7. NEGRELLI, S., HERMES, C. J. L., 2015. A semi-empirical correlation for the thermal conductivity of frost, International Journal of Refrigeration, International Journal of Refrigeration, v. 52, p. 243-252.
8. NASCIMENTO, V. S., LOYOLA, F. R., HERMES, C. J. L., 2015. A study of frost build-up on parallel plate channels, Experimental Thermal and Fluid Science, Experimental Thermal and Fluid Science, v. 60, p. 328-336.

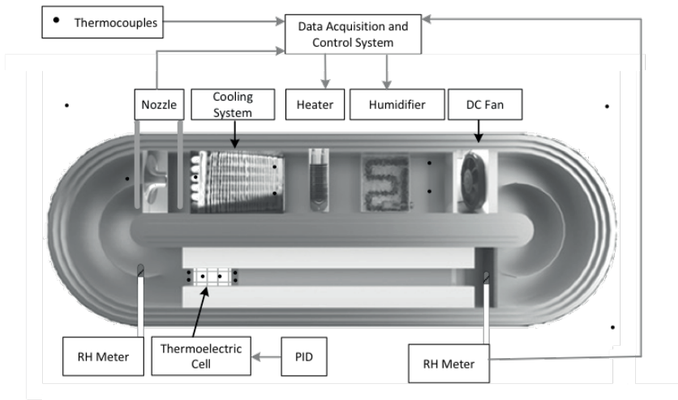


Figura 83
Representação esquemática do túnel de vento fechado para estudos da formação de geada

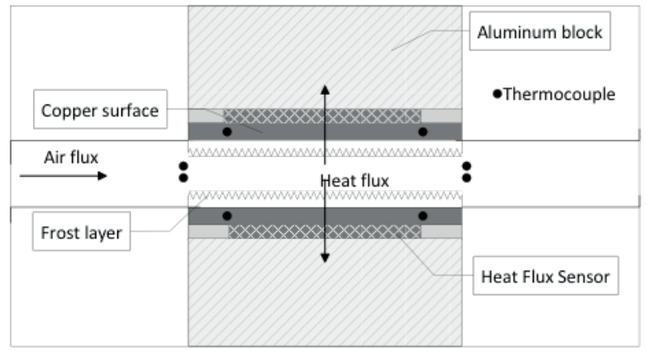


Figura 84
Representação esquemática da seção de testes, que pode ser tanto placa plana horizontal como canal de placas paralelas

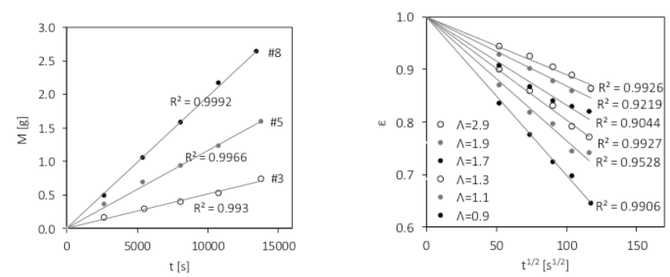


Figura 85
Medições para a massa acumulada (esq.) e porosidade da geada (dir.) ao longo do tempo

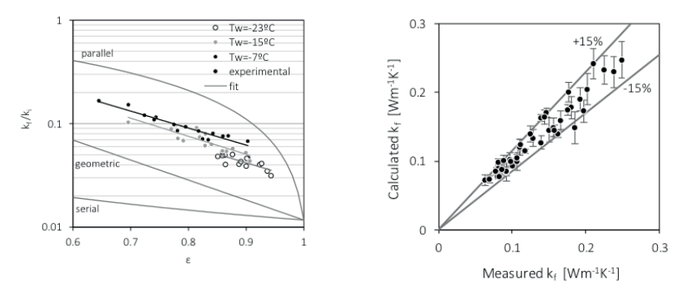


Figura 86
Previsões do modelo proposto para prever a condutividade térmica da geada

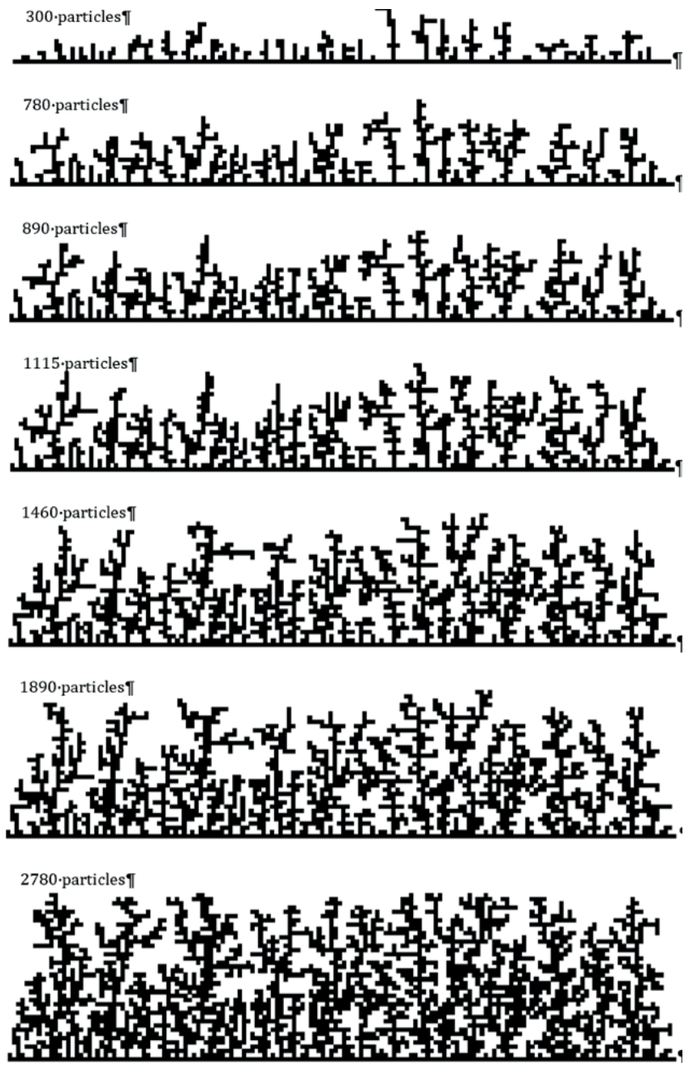


Figura 87
Previsões de crescimento de uma camada de geada através de uma técnica baseada em fractais

ATIVIDADE 6.6.1 (SISTEMAS MULTIFÁSICOS E MULTICOMPONENTES) PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE MISTURAS COMPLEXAS

Esta atividade contemplou diversas ações de caracterização experimental e de modelagem de propriedades termodinâmicas (Figura 88), de transporte (Figura 89) e dielétricas (Figura 90) de misturas de óleos e gases liquefeitos, como o CO2 e o propano (Czubinski et al., 2019; Sedrez et al., 2019). As aplicações principais para estes estudos são encontradas nas indústrias de petróleo e gás e de refrigeração. Nesta última, as atividades são abordadas de forma integrada, com o objetivo de subsidiar o desenvolvimento de novos processos, componentes e sistemas de refrigeração, incluindo a caracterização de novos fluidos refrigerantes de baixo impacto ambiental, como hidrocarbonetos, dióxido de carbono e refrigerantes sintéticos. Modelagem de sistemas contendo misturas como fluidos de trabalho também foram realizados (Ribeiro and Barbosa, 2016).

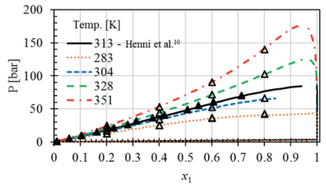


Figura 88
Dados experimentales e correlação via equação de estado PCP-SAFT EoS do ponto de bolha do sistema CO_2+n-$C_{12}H_{26}$.

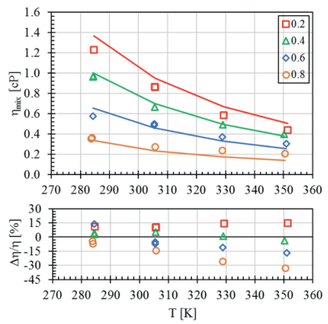


Figura 89
Correlação dos dados experimentais de viscosidade dinâmica da mistura CO_2+n-$C_{12}H_{26}$ em função da temperatura e da fração molar de CO_2 segundo a f-theory/*PR. Gráfico superior: valores absolutos; Gráfico inferior: desvio relativo.*

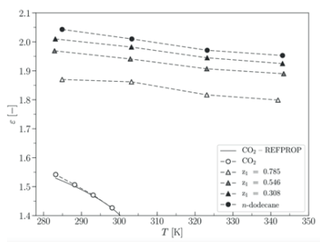


Figura 90
Constante dielétrica da mistura CO2/n-dodecano em função da temperatura e da fração molar global.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. SEDREZ, P. C., NORIEGA-SANCHEZ, C.J., DA SILVA, M.J., BARBOSA Jr., J.R., 2019. Dielectric constant of mixtures of carbon dioxide and n-dodecane between 283 and 343 K. International Journal of Thermophysics, submitted for publication.

2. CZUBINSKI, F.F., DA SILVA, A.K., MARCELINO NETO, M.A., BARBOSA Jr., J.R., 2019. Phase equilibrium and liquid viscosity of CO2 + n-dodecane mixtures between 283 and 353 K. Journal of Chemical and Engineering Data, v. 64, 3375-3384.

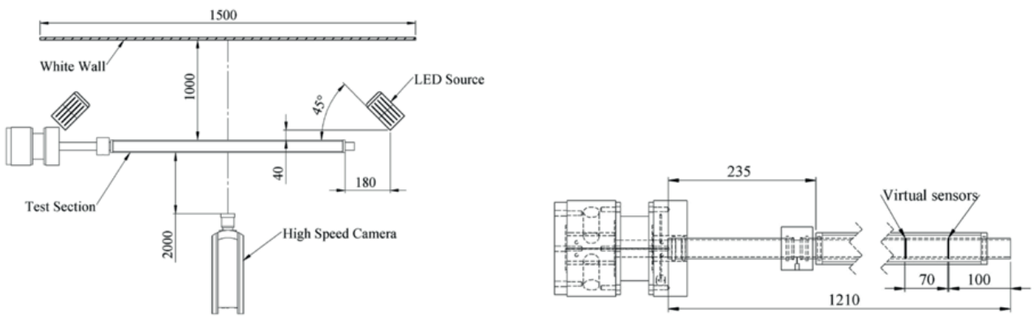
3. RIBEIRO, G. B., BARBOSA Jr., J. R., 2016. Analysis of variable speed air conditioner considering the R-290/POE ISO 22 mixture effect. Applied Thermal Engineering, v. 108, p. 650-659.

4. SEDREZ, P. C., BARBOSA Jr., J. R., 2015. Relative permittivity of mixtures of R-134a and R-1234yf and a polyol ester lubricating oil. International Journal of Refrigeration, v. 49, p. 141-150.

5. PIZARRO-RECABARREN, R.A., EBEL, T. R. V., DESCHAMPS, C. J., BARBOSA Jr., J. R., 2015. Influence of refrigerant solubility and surface geometry on the wetting properties of lubricating oil. International Journal of Refrigeration, v. 59, p. 157-167.

ATIVIDADE 6.6.2 (SISTEMAS MULTIFÁSICOS E MULTICOMPONENTES) ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO EM DUTOS ONDULADOS E SINGULARIDADES

Antes de avaliar escoamentos bifásicos em dutos ondulados, foi realizado um estudo de menor complexidade geométrica, considerando o início do processo de intermitência no escoamento (slugging) no escoamento gás-líquido estratificado em um tubo horizontal. Este problema foi investigado experimentalmente usando uma técnica de processamento de vídeo digital de alta velocidade, em uma seção de testes instalada em um circuito de escoamento bifásico (Figura 91). Mapas de deslocamento espaço-temporal foram produzidos para mostrar a evolução das estruturas bifásicas (ondas, golfadas) na região de entrada do escoamento ar-água. A distribuição das duas fases obtidas pela técnica de visualização mostrou boa concordância com as medições realizadas com sensores de capacitância não intrusivos (Figura 92). Os resultados numéricos de uma abordagem de CFD híbrida que combinou o modelo de dois fluidos e o volume de fluido para rastrear a posição da interface de grande escala no tempo e no espaço também concordaram com os dados quantitativos obtidos pela técnica de visualização (Figuras 93 e 94). Os erros relativos entre as velocidades da estrutura de fluxo calculados pela correlação cruzada dos sinais de distribuição de fase numérica e experimental (análise de imagem) foram de 6,8 e - 7,4% para os casos de slug e plug flow, respectivamente.



(a) (b)

Figura 91
(a) Instalação da câmera rápida e das fontes de LED para gravar imagens do escoamento bifásico na seção de testes.
(b) Posicionamento dos sensors virtuais para análise de imagens. Dimensões em mm (Costa et al., 2018).

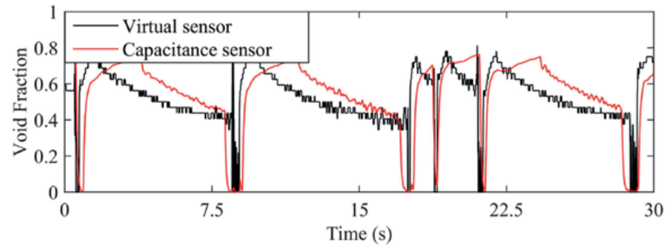


Figura 92
Comparação da fração de vazio obtida com a análise de imagens com aquela medida a partir de sensores de capacitância (Costa et al., 2018).

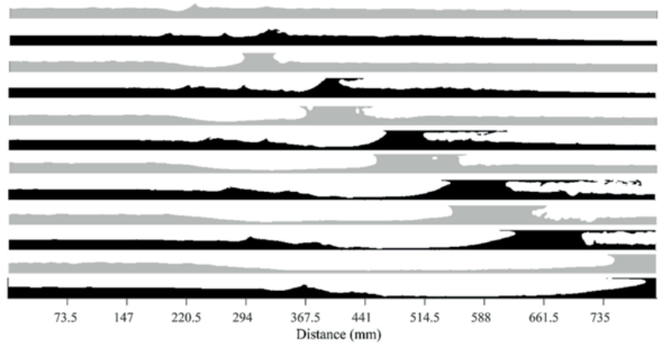


Figura 93
Distribuição das fases líquido e gás na região de entrada da seção de testes (diâmetro interno de 26,4 mm). Contornos cinzas correspondem aos dados experimentais, enquanto que os negros aos resultados numéricos. Velocidades superficiais: 0,27 m/s (líquido), 1,89 m/s (gás).

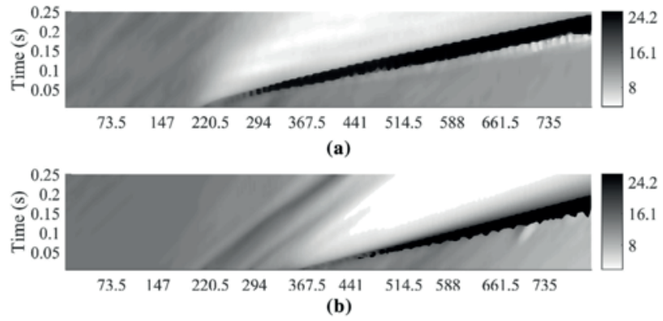


Figura 94
Mapas de deslocamento espaço-temporal: (a) Obtidos a partir do processamento das imagens (b) obtidos a partir das simulações numéricas. Velocidades superficiais: 0,27 m/s (líquido), 1,89 m/s (gás).

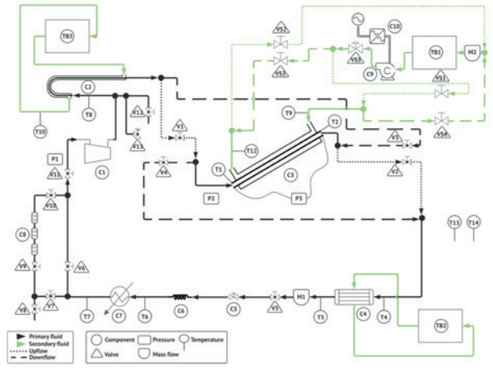
PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. COSTA, C. A. S., DE OLIVEIRA, P. M., BARBOSA Jr., J. R., 2018. Intermittent flow initiation in a horizontal tube: quantitative visualization and CFD analysis. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 40, p. 188.

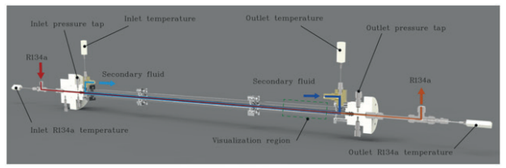
ATIVIDADE 6.6.3 (SISTEMAS MULTIFÁSICOS E MULTICOMPONENTES) CONDENSAÇÃO EM CONTRACORRENTE

Poucos trabalhos na literatura aberta investigaram os fenômenos de *flooding* e *flow reversal* no contexto da condensação de refrigerantes. Em sistemas de refrigeração de pequena capacidade, o uso de compressores sem óleo cria novas opções de como os componentes do sistema podem ser posicionados um em relação ao outro no refrigerador. Os compressores sem óleo não precisam mais estar na posição mais baixa no circuito de refrigeração, porque o retorno do óleo ao cárter não é mais uma restrição de projeto. No entanto, embora exista mais liberdade para posicionar os trocadores de calor em relação ao compressor, algumas configurações do sistema são mais desejáveis que outras para evitar a reversão do fluxo de condensado na linha de condensação.

Neste projeto, a condensação do R-134a no fluxo anular ascendente e descendente foi estudada experimentalmente em uma seção de teste transparente usando uma técnica de processamento de imagem baseada em LED (Figuras 95 e 96). Além da orientação do escoamento, a influência dos seguintes parâmetros na frequência e velocidade das estruturas do filme foi quantificada: vazão mássica total, taxas de transferência de calor por condensação (título do vapor na saída) e inclinação da seção de teste. As dimensões da seção de teste são 5 mm (diâmetro interno) e 950 mm (comprimento). A técnica de visualização de fluxo proposta é aplicada a quadros individuais de sequências de vídeo de alta velocidade (passos da sequência do processamento de imagens são mostrados na Figura 97) com o objetivo de gerar matrizes com a posição da interface do filme em função do tempo. As propriedades de amplitude-frequência de ondas interfaciais em escoamento descendente e em escoamentos ascendentes unidirecionais e bidirecionais (ou seja, regimes anular e churn-anular) foram determinadas através de uma combinação de análise de imagem, processamento de sinal (análise de Fourier) e teoria de estimação. A técnica KDE (*Kernel Density Estimation*) foi usada para calcular a Função de Densidade de Probabilidade bidimensional (amplitude-frequência) da estrutura do filme como uma função dos parâmetros independentes. Exemplos de mapas de deslocamento espaço-temporal das ondas interfaciais são apresentadas na Figura 98.

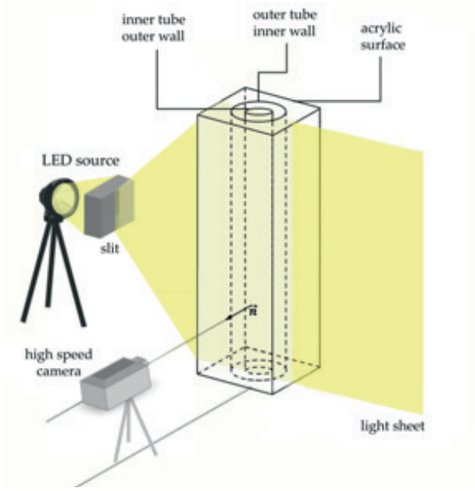


(a)

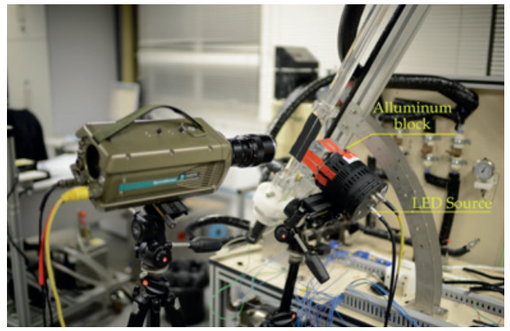


(b)

Figura 95
(a) Diagrama esquemático do aparato experimental.
(b) Seção de testes, mostrando as entradas e saídas de refrigerante e fluido secundário, posições de tomadas de temperatura e pressão.



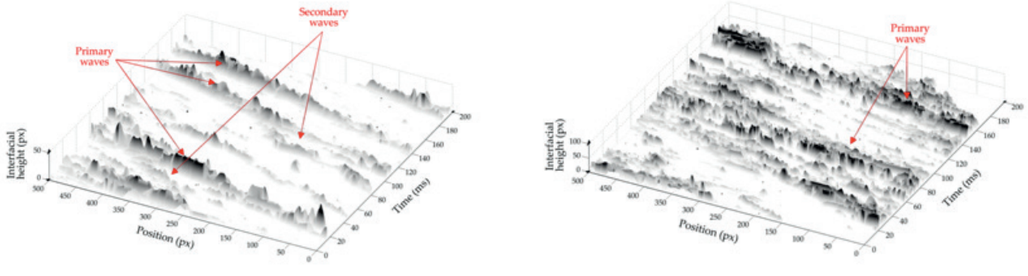
(a)



(b)

Figura 96
(a) Representação esquemática do sistema de visualização.
(b) Fotografia do sistema.

Figura 97
Passos do processo de segmentação das imagens:
*(a) imagem bruta (*raw frame*);*
(b) Subtração do fundo;
(c) Binarização local;
(d) Sequência morfológica;
(e) Extração da altura interfacial;
(f) Superposição de (a) e (e).
Condição: Escoamento descendente: θ =30°, fluxo de massa: 78 kg m^{-2} s^{-1} (Ferreira e Barbosa, 2019).



(a) (b)

Figura 98
Mapas de deslocamento espaço-temporal obtidos a partir do processamento das imagens. Escoamento ascendente: θ =60°, fluxo de massa: 78 kg m⁻² s⁻¹ (Ferreira e Barbosa, 2019).

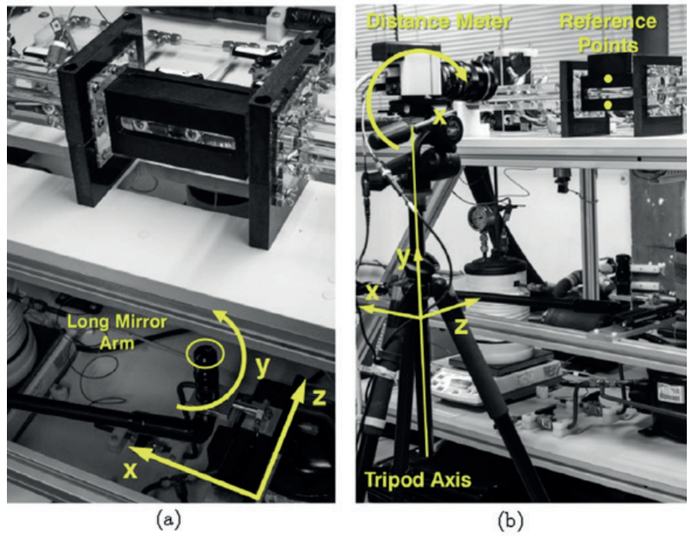
PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. FERREIRA, J.C.A., BARBOSA Jr., J. R., 2019. Quantifying interfacial parameters of upward and downward annular flow condensation from high-speed visualization. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, *submitted for publication*.

2. BARBOSA Jr., J. R., FERREIRA, J.C.A., HENSE, D., 2016. Onset of flow reversal in upflow condensation in an inclinable tube. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 77, p. 55-70.

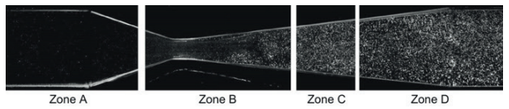
ATIVIDADE 6.6.4 (SISTEMAS MULTIFÁSICOS E MULTICOMPONENTES) ESCOAMENTOS DE MISTURAS COM CAVITAÇÃO EM TUBOS DE VENTURI

Uma instalação experimental foi construída para estudar escoamentos bifásicos intermitentes de misturas binárias em um tubo convergente-divergente (tubo de Venturi). São discutidos os efeitos da vazão mássica, concentração do componente volátil na fase líquida e sub-saturação de entrada (sobrepressão) na distribuição axial da pressão estática. Uma seção de teste transparente (Figura 99) possibilitou a observação visual do escoamento bifásico no Venturi por meio da visualização em alta velocidade e uma avaliação quantitativa do campo de velocidade foi realizada por meio da velocimetria por imagem de partículas (PIV) (Figura 100). Resultados experimentais gerados para misturas de R-134a (componente volátil) e POE ISO 10 (componente não volátil) mostraram que a viscosidade da fase líquida tem um efeito significativo tanto na queda de pressão na garganta como na recuperação de pressão na seção divergente, com este último sendo diretamente proporcional à concentração de refrigerante na fase líquida. A análise visual da cavitação no bocal convergente-divergente revelou que a ocorrência de escoamento bifásico na garganta e a jusante da mesma era bastante sensível a mudanças nas condições do escoamento, que rapidamente evoluiu para uma mistura espumosa homogênea quando a queda de pressão na garganta excedeu um certo limite (Figura 101).

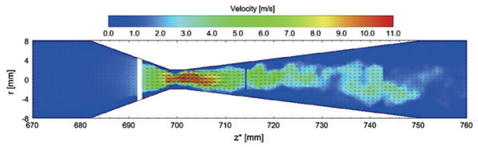


(a) (b)

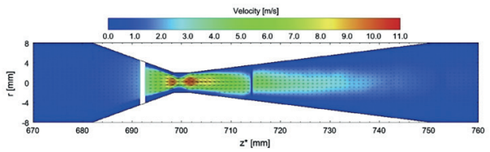
Figura 99
Seção de testes da bancada experimental para o estudo de cavitação de misturas em tubos de Venturi: (a) posicionamento do feixe de laser do sistema PIV; (b) posicionamento da câmera (Bertoldi et al., 2015).



(a)



(b)



(c)

Figura 100
(a) Imagem das partículas usadas no PIV, (b) Campo de velocidades instantâneas e (c) médias no tubo de Venturi (escoamento de uma mistura de óleo POE ISO 10 e R-134a) (Bertoldi et al., 2015).

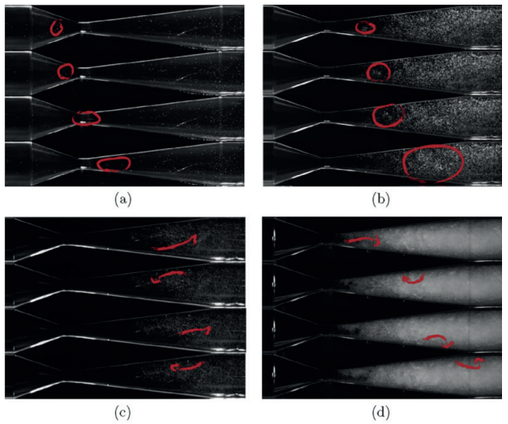


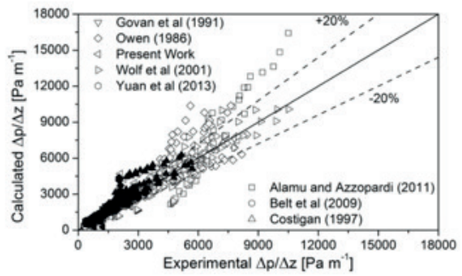
Figura 101
Sequência de imagens obtida com câmera rápida para testes com diferentes concentrações de componente volátil:
(a) menor concentração mássica (16,1%),
(b) maior concentração mássica (39,4%);
e testes com diferentes fluxos de massa:
(c) menor fluxo de massa (611.2 kg/m².s),
(d) maior fluxo de massa (691.6 kg/m².s)
(Bertoldi et al., 2015).

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

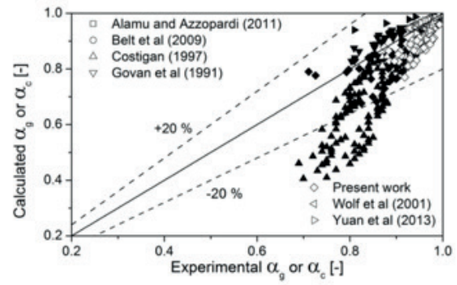
1. BERTOLDI, D., DALLALBA, C., BARBOSA Jr., J. R., 2015. Experimental investigation of two-phase flashing flows of a binary mixture of infinite relative volatility in a Venturi tube. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 64, p. 152-163.

ATIVIDADE 6.6.5 (SISTEMAS MULTIFÁSICOS E MULTICOMPONENTES) ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS TRANSIENTES

Foi desenvolvido um trabalho para investigar o comportamento transiente de escoamentos gás-líquido de alta fração de gás em tubos verticais. Equações de balanço hiperbólicas para massa, momento e entropia são escritas para o gás e líquido, que é dividido entre um filme contínuo e gotículas arrastadas no núcleo do gás (Alves et al., 2017). As relações de fechamento para calcular o atrito da parede e interfacial e as taxas de arrastamento e deposição de gotículas foram obtidas da literatura. Um algoritmo de solução de diferenças finitas baseado em um método de divisão de matriz de coeficientes foi implementado para lidar com variações acentuadas nos domínios espacial e temporal, tais como ondas de pressão e de retenção de fase. Os resultados do modelo foram comparados com dados experimentais de estado estacionário de oito fontes diferentes, totalizando mais de 1.500 pontos de dados para gradiente de pressão, vazão de filme líquido e fração de vazio (Figura 102). O modelo foi validado com dados obtidos em uma bancada de grandes dimensões, como parte de uma colaboração acadêmica com a Texas A&M University (Figura 103). Modelos bifásicos também foram utilizados em atividades de simulação de escoamentos com transferência de calor em poços de petróleo (Figura 104) (Ferreira et al., 2017).



(a)



(b)

Figura 102
Validação do modelo com extensa base de dados para escoamentos bifásicos em regime permanente:
(a) Queda de pressão,
(b) fração volumétrica (Alves et al., 2017).

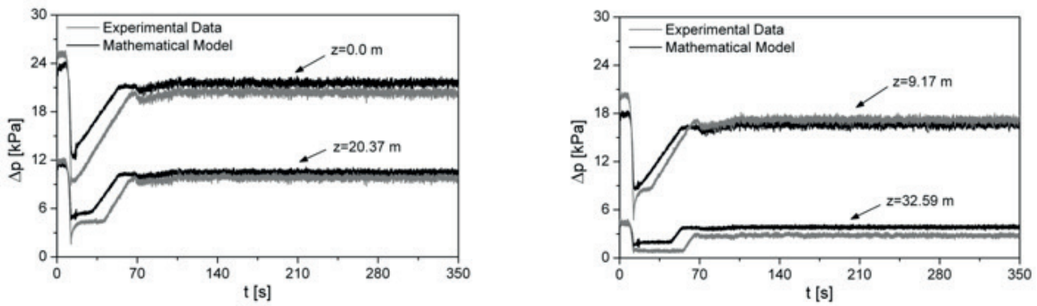


Figura 103

Comparação entre resultados numéricos e experimentais de queda de pressão em diversas posições ao longo da seção de testes da bancada de grandes dimensões (Alves et al., 2017).

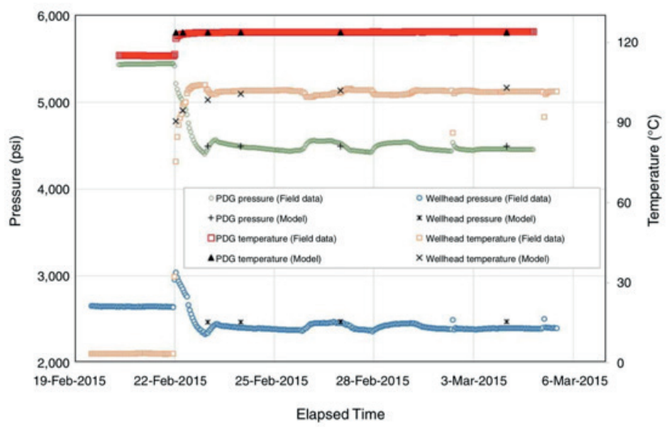


Figura 104

Resultados de pressão e temperaturas transientes em um poço de petróleo: comparação com dados de campo (Ferreira et al., 2017).

PUBLICAÇÕES RESULTANTES:

1. WALTRICH, P. J., POSADA, C., MARTINEZ, J., FALCONE, G., BARBOSA Jr., J. R., 2015. Experimental investigation on the prediction of liquid loading initiation in gas wells using a long vertical tube. Journal of Natural Gas Science and Engineering, v. 26, p. 1515-1529.

2. WALTRICH, P. J., FALCONE, G., BARBOSA Jr., J. R., 2015. Liquid transport during gas flow transients applied to liquid loading in long vertical pipes. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 68, p. 652-662.

3. ALVES, M. V. C., WALTRICH, P. J., GESSNER, T. R., FALCONE, G., BARBOSA Jr., J. R., 2017. Modeling transient churn-annular flows in a long vertical tube. International Journal of Multiphase Flow, v. 89, p. 399-412.

4. FERREIRA, M. V. D., HAFEMANN, T. E., BARBOSA Jr., J. R., DA SILVA, A. K., HASAN, R., 2017. A Numerical Study on the Thermal Behavior of Wellbores. SPE Production & Operations, v. 32, p. SPE-180297-PA.

APOIO

INSTITUIÇÕES PARCEIRAS DO INCT-RT

Sede do INCT-RT

POLO
Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900
Florianópolis/Santa Catarina/Brasil
Fone: +55 (48) 3721-7900
www.polo.ufsc.br
inct@polo.ufsc.br