

## **CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA CARACTERIZAÇÃO DE COMPRESSORES**

Alexsandro dos Santos Silveira – alex@polo.ufsc.br  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Trindade  
CEP 88040-900 – Florianópolis – Santa Catarina.

João Artur de Souza – jartur@gmail.com  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Trindade  
CEP 88040-900 – Florianópolis – Santa Catarina.

**Resumo:** Este artigo apresenta a construção de uma bancada didática na área de engenharia mecânica objetivando a prática presencial laboratorial. O objetivo foi desenvolver um aparato experimental que permite que acadêmicos de cursos como engenharia mecânica obtenham através da bancada, dados experimentais que abasteçam modelos teóricos semi-empíricos e físicos, utilizados em sala de aula e por profissionais da indústria de refrigeração. Os modelos são voltados à avaliação da curva de desempenho de compressores. Para tanto, uma revisão na literatura foi realizada e foram analisados trabalhos correlatos que contribuem para o desenvolvimento dessa linha de pesquisa. Em seguida, buscou-se descrever os principais componentes envolvidos na construção da bancada. Por fim, a bancada didática foi validada a partir dos dados coletados experimentalmente e confrontados com os modelos matemáticos. Como resultado, além de estimular o envolvimento entre teoria e prática, esse tipo de bancada oportuniza o "aprender fazendo" através de novos conhecimentos compartilhados entre professores e alunos.

**Palavras-chave:** Bancada didática. Ensino de engenharia. Compressor. Refrigeração.

## 1 INTRODUÇÃO

A contratação por parte das indústrias de engenheiros com deficiência na formação prática tem levantado polemicas no cenário nacional. Segundo Figueiredo *et al.* (2014) a busca do mercado profissional por engenheiros cada vez mais completos tem criado uma situação de desconforto em instituições de ensino, principalmente no que tange à qualidade de seu ensino e a necessidade de profissionais na área educacional com experiência prática e um ótimo conhecimento teórico. Intimamente ligado ao “aprender fazendo” quando as experiências através da socialização, externalização e combinação são internalizadas na forma de modelos mentais ou *know-how* técnico, torna-se um patrimônio valioso (NONAKA e TAKEUCHI, 2008). Nesse sentido, em busca de aperfeiçoar o aprendizado prático dos acadêmicos e intensificar o compartilhamento do conhecimento, estudos na área de desenvolvimento e construção de novas bancadas didáticas vem sendo discutidos e apresentados na literatura com o teor de proporcionar esse estreitamento entre teoria e prática.

Na área de engenharia mecânica existe um forte movimento nesta direção. Luft, (2014) realizou um estudo em uma bancada didática para refrigeração com intuito de analisar o ciclo de refrigeração através de ensaios práticos. O autor coleta dados a partir de ensaios com ambientes distintos (isolados e não isolados) propiciando a análise de transferência de calor de um sistema para o outro. Recentemente, Geronimo, (2017) publicou em seu estudo um aprimoramento em uma bancada didática para refrigeração. O autor defende que as aulas práticas e de simulação são de extrema importância durante qualquer curso de Engenharia, “pois é nelas que o aluno tem a oportunidade de visualizar o funcionamento das teorias vistas em sala e se deparar com problemas que serão recorrentes em sua vida profissional”. Ainda segundo o autor a bancada didática portátil de refrigeração desenvolvida durante o estudo, tem como principal facilitador a apresentação de um ciclo real de refrigeração, no qual os alunos podem realizar experimentos, observar e aprender com seus resultados.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma bancada didática para avaliação da curva de desempenho de compressores da área de refrigeração onde os dados são coletados e analisados de forma ágil. Para validação foi proposto um envelope de ensaio variando as pressões de baixa e alta do circuito de refrigeração, levando a bancada a trabalhar em uma ampla gama de condições operacionais. Os dados coletados nos experimentos permitem que alunos do curso de engenharia mecânica confrontem modelos teóricos semi-empíricos e físicos, utilizados na avaliação de desempenho de compressores de refrigeração. Outrossim, esses conhecimentos vivenciados em laboratório aperfeiçoaram a aprendizagem prática dos acadêmicos. Além disso, análise de desempenho de compressores para refrigeração são amplamente utilizadas nas indústrias.

O artigo está estruturado em cinco seções, sendo a primeira esta introdução. A segunda seção aborda a construção da bancada, a terceira sobre os ensaios experimentais e a quarta trata da comparação dos modelos. Na última seção apresenta-se as considerações finais.

## 2 BANCADA DIDÁTICA

A bancada didática para avaliação da curva de desempenho de compressor foi projetada e construída de forma modular, a fim de incluir não apenas o circuito de refrigeração, mas também o sistema DAQ, o painel elétrico e a seção de teste. Além disso, o projeto foi desenvolvido de forma a garantir a ergonomia, e admite mais de um aluno operando a bancada como ilustra a Figura 1.

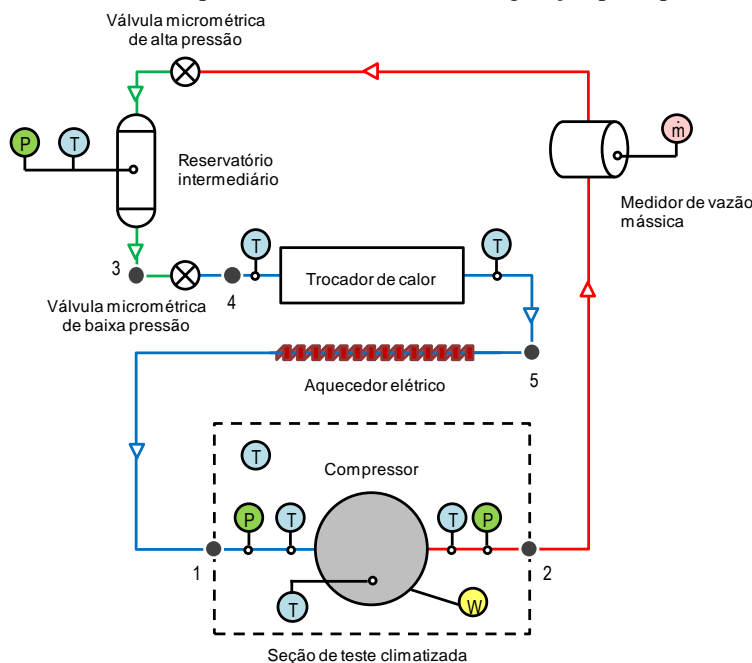
Fonte 1 - Bancada didática.



Fonte: Do Autor.

Os componentes utilizados para confecção do circuito de refrigeração encontram-se na Figura 2. Para o ajuste da pressão de alta e baixa foram utilizadas duas válvulas automáticas. Para a visualização e aquisição das pressões foram utilizados três transdutores de pressão. Um reservatório intermediário de aço inoxidável, com um volume interno de 2,25 litros, foi instalado entre as linhas de sucção e descarga para acomodar o excesso de refrigerante e permitir que a bancada opere em uma ampla faixa de condições com apenas uma carga de refrigerante. Todas as medições de temperatura foram realizadas com termopares tipo-T.

Figura 2 - Desenho esquemático do circuito de refrigeração principal.



Fonte: Do autor

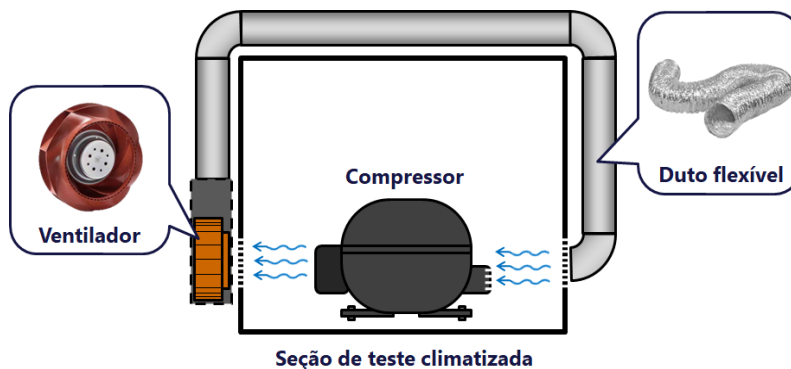
O circuito de refrigeração também conta com um medidor de vazão mássica, instalado na linha de alta pressão e um wattímetro para medir a potência do compressor. Por fim, a bancada didática conta com uma seção para instalação do compressor que possibilita o controle da temperatura e velocidade do ar. Com a intensão de diminuir o tempo dos ensaios o circuito de refrigeração principal foi projeto para operar na região de vapor superaquecido, com base no trabalho de Silveira, (2012).



## 2.1 Circuito de ventilação

O controle da velocidade do ar que incide sobre o compressor permite uma variação entre 0,1 e 10m/s. Para o controle de velocidade do ar desenvolveu-se um sistema de ventilação para a seção de teste composta por um ventilador radial e um duto flexível. A Figura 3 ilustra a representação esquemática.

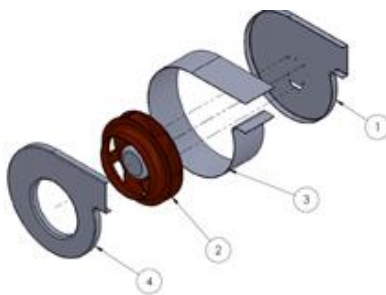
Figura 3 - Representação esquemática da ventilação da seção de teste.



Fonte: Do autor.

O ventilador selecionado foi o modelo EBM – RER 190-39/18/2TDMLO da fabricante EBM Papst. Tal ventilador é alimentado por uma tensão de 48 VDC, fornece uma vazão máxima de 650 m³/h e possui controle de rotação através de um sinal de 0 a 10VDC, controlando a rotação de 0 a 100%. Devido ao fato de o ventilador ser radial, fez-se necessária a fabricação de uma cobertura modular dividida em quatro partes para direcionar o ar de acordo com a Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática da ventilação da seção de teste.



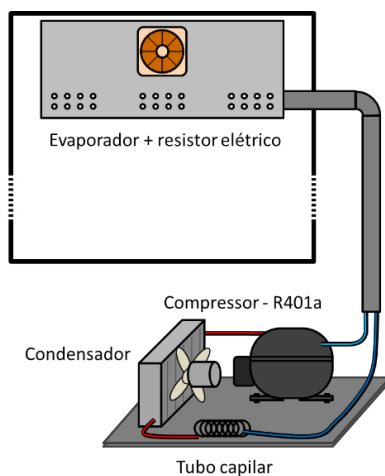
Fonte: Do autor.

O ventilador foi instalado em uma das laterais da seção de teste, admitindo o ar que era então conduzido à face oposta através de um duto metálico, fazendo com que houvesse um fluxo de ar através do compressor.

## 2.2 Circuito de refrigeração da seção de teste

Nas indústrias de refrigeração todos os ensaios de caracterização de compressores são realizados com a temperatura do ar ao redor do compressor controlada em um determinado valor, normalmente de acordo com a ANSI / ASHRAE 23 (2005). Afim de obter um cenário mais realista para os alunos realizarem seus ensaios, faz-se necessário a climatização do ar dentro da seção de teste. Baseado em sistemas atuais de condicionamento de ar do tipo *Split*, o circuito de refrigeração auxiliar foi desenvolvido. Este consiste de uma unidade condensadora, localizada na parte inferior da bancada didática, interligada a um evaporador do tipo tubo aleta, que tem a função de trocar calor com o ar da seção de teste, através da convecção forçada auxiliada por um ventilador. A Figura 5 representa de forma esquemática o circuito auxiliar de refrigeração.

Figura 5 - Representação esquemática do circuito de refrigeração auxiliar.



Fonte: Do autor.

O circuito de refrigeração auxiliar opera com o fluido refrigerante R401a e foi ajustado para operar a uma temperatura de evaporação de 3°C. Sendo o evaporador da unidade de refrigeração originalmente utilizado em refrigeradores domésticos, o mesmo já possui um resistor fixo às suas aletas, utilizado comumente para realizar o degelo. Portanto, com a unidade instalada, é possível aquecer e resfriar o ar da seção de teste, reproduzindo testes realizados na indústria de refrigeração.

### 2.3 Sistema de controle

O controle da temperatura da seção de teste foi realizado com um controlador modelo 2216e do fabricante Eurotherm como ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Controlador PID 2216e.



Fonte: Fabricante Eurotherm.

O controlador escolhido permite o controle de uma temperatura através de um controle PID. Para facilitar a sintonização dos parâmetros do controlador decidiu-se utilizar o modo de ajuste automático ou também conhecido na literatura como *auto-tuning*.

Para controlar as pressões de alta e baixa do circuito de refrigeração principal, foram utilizadas duas válvulas automáticas de acordo com a representação da Figura 7. Também foi utilizado o modo ajuste automático do controlador para facilitar a sintonização dos parâmetros PID.

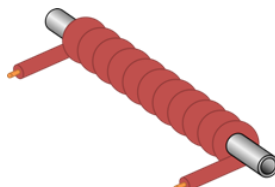
Figura 7 - Válvula automática.



Fonte: Fabricante.

Para efetuar-se o controle fino da temperatura de sucção utilizou-se um resistor elétrico para reaquecer de forma controlada o fluido após o trocador de calor. O resistor em questão é fabricado pela empresa Heatcon com 3m de comprimento e potência máxima de 200 W. A Figura 8 apresenta um desenho esquemático do resistor.

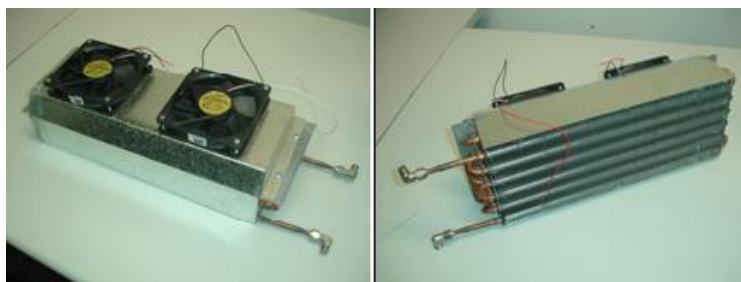
Figura 8 - Representação do resistor elétrico envolto ao tubo.



Fonte: Do autor.

O resistor é controlado via *software* por um controlador PID através de um relé de estado sólido com controle por ângulo de fase da marca Contemp, modelo AFC-1.

Figura 9 - Trocador de calor.



Fonte: Do autor.

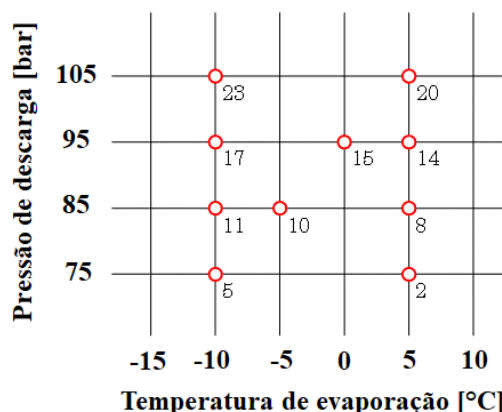
O trocador de calor apresentado na Figura 9 também funciona como um atuador para o ajuste preliminar da temperatura de sucção. Por fim, para aquisição e tratamento dos dados foi desenvolvido um programa em *Labview*.

### 3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios iniciam com os ajustes de temperatura e da velocidade do ar na seção de teste que foram controladas e mantidas nos valores padronizados de 32°C e 3m/s, respectivamente. Na sequência, o compressor utilizado em sistemas comerciais, expositores de bebidas, foi ligado. As pressões de sucção e descarga foram ajustadas para os valores desejados. Para explorar os limites da bancada seis temperaturas de evaporação foram avaliadas de -15 a 10°C, enquanto quatro pressões de descarga (de 75 a 105bar) foram consideradas. Em todos os ensaios, a temperatura de sucção do compressor foi mantida o mais próximo possível da temperatura ambiente, conforme recomendado pela norma ANSI / ASHRAE 23 (2005). Para validar a bancada didática, uma matriz de 24 ensaios experimentais foi utilizada como ponto de partida. Entretanto, apenas 10 ensaios dos 24 realizados foram utilizados para abastecer os modelos teóricos. O objetivo de minimizar a matriz foi avaliar o potencial dos modelos teóricos ver Equações (1, 2 e 3) quanto a interpolação e extrapolação dos dados coletados. Dessa forma, acadêmicos de engenharia mecânica podem conciliar a teoria aprendida em sala de aula com a prática, evidenciando a forma que equações matemáticas podem contribuir na resolução de problemas enfrentados no cotidiano das indústrias. A matriz de teste é apresentada na Figura 10.



Figura 10 - Matriz de ensaios.



Fonte: Do autor.

Os dados experimentais coletados na bancada didática foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, utilizando dois modelos distintos: o modelo empírico padrão AHRI 571 (2012) e o modelo físico proposto por Li, (2012). Vale a pena destacar que apenas 10 pontos foram usados para obter os coeficientes das curvas.

### 3.1 Modelo AHRI 571

Este modelo é puramente empírico e consiste em encaixar os polinômios bicúbicos AHRI 571 (2012) como uma função das pressões de descarga e sucção de acordo com a Equação (1):

$$\begin{aligned}
 X = & c_1 + c_2 P_{suc} + c_3 P_{disc} + c_4 P_{suc}^2 + \\
 & + c_5 P_{suc} P_{disc} + c_6 P_{disc}^2 + c_7 P_{suc}^3 + \\
 & + c_8 P_{suc}^2 P_{disc} + c_9 P_{suc} P_{disc}^2 + c_{10} P_{disc}^3
 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde  $P_{disc}$  é a pressão de descarga,  $P_{suc}$  é a pressão de sucção, e  $X$  pode ser a capacidade de refrigeração ou a potência consumida pelo compressor.

### 3.2 Modelo Li, (2012)

O modelo de Li, (2012) é considerado físico porque se baseia nas equações fundamentais da teoria do compressor. Basicamente consiste em uma Equação (2) para a eficiência volumétrica e outra Equação (3) para o consumo de energia. Li, (2012) adaptou o modelo proposto por Klein *et al.* (1999) para calcular a eficiência volumétrica usando dois coeficientes relacionados ao volume de folga do compressor ( $b_1$  e  $b_2$ ) e um coeficiente ( $dp$ ) para levar em consideração o efeito da queda de pressão de sucção.

$$\eta_v = b_1 + b_2 \left[ \frac{P_{disc}}{P_{suc}(1-dp)} \right]^{1/k} \quad (2)$$

Onde  $k$  é o coeficiente de compressão isentrópico. O consumo de energia, por sua vez, é calculado da seguinte forma:

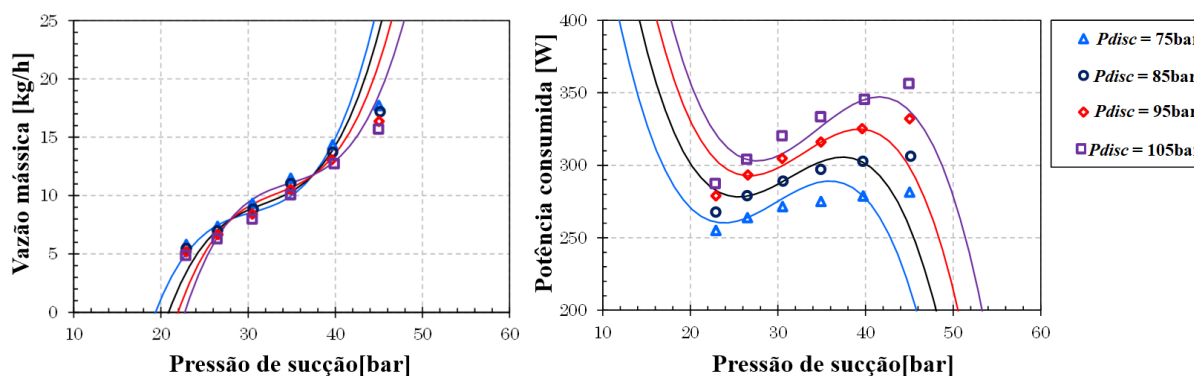
$$W = P_{suc} \dot{m} v_1 \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_{disc}}{P_{suc}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \left( a_1 + \frac{a_2}{P_{suc}} + \frac{a_3}{P_{disc}} \right) + a_4 \quad (3)$$

Onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica e  $v_1$  é o volume específico de refrigerante na sucção do compressor.

#### 4 VALIDAÇÃO DA BANCADA DIDÁTICA

A Figura 11 mostra os resultados de ajuste da curva de vazão mássica, considerando o modelo empírico proposto pela norma AHRI 571 (2012). Observou-se que este modelo foi incapaz de capturar as tendências experimentais, especialmente para a vazão mássica, onde grandes erros foram verificados. Além disso, pode-se observar que os valores de potência são fisicamente consistentes apenas na região de interpolação.

Figura 11 - AHRI 571 (2012) modelo empírico.



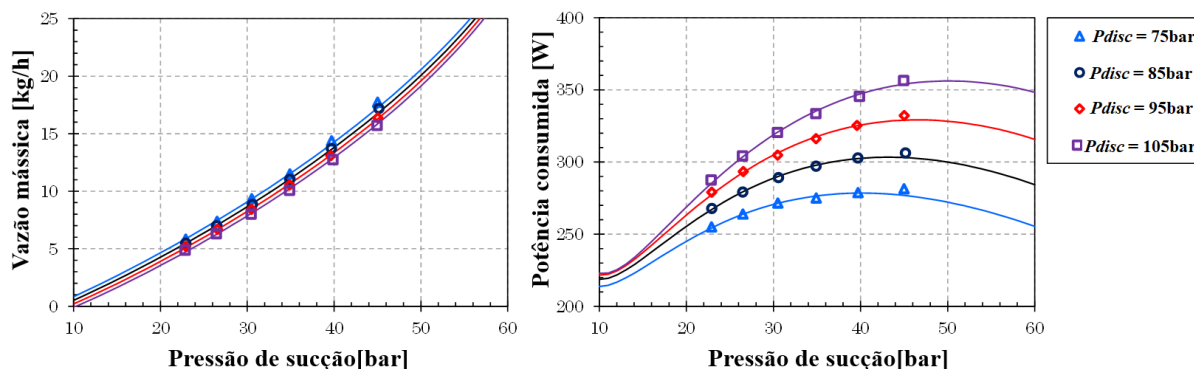
Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos com o modelo físico de Li, (2012) são mostrados na Figura, 12. Pode-se ver uma concordância razoável entre valores experimentais e calculados. Os valores previstos seguiram de perto as tendências experimentais e observaram-se comportamentos coerentes para as regiões de interpolação e extrapolação. Os acadêmicos podem ainda utilizar a Equação (4) para obter a capacidade de refrigeração ( $Q_e$ ) a partir da vazão mássica e entalpia.

$$Q_e = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (4)$$

Dessa forma, os valores de entalpia são obtidos em função das variáveis temperatura e pressão.

Figura 12 – Modelo Li, (2012).



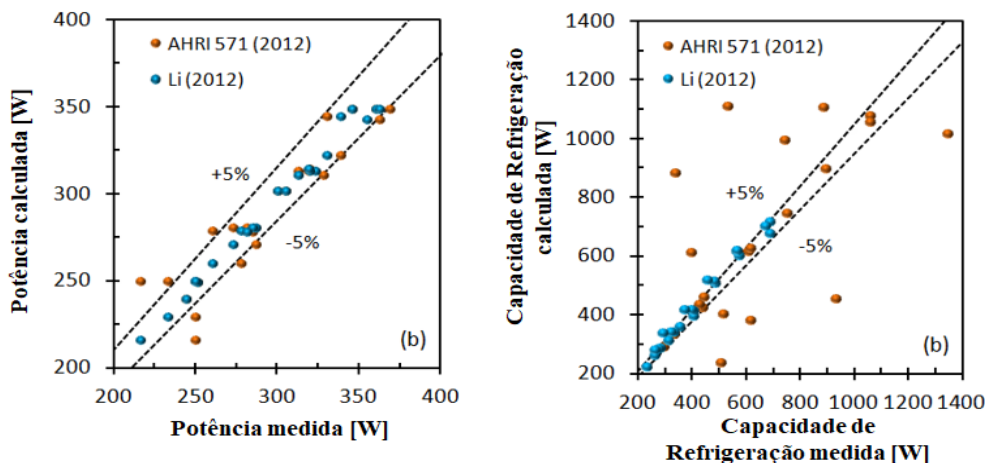
Fonte: Do autor.

A Figura, 13 mostra o erro relativo entre os valores medidos experimentalmente e calculados para a potência consumida do compressor e a capacidade de refrigeração que foi



obtida através da vazão mássica medida. Como mencionado anteriormente, os erros observados com os polinômios AHRI 571 (2012) foram baixos apenas para a potência do compressor, mas não para a capacidade de refrigeração. O modelo de Li, (2012), por outro lado, forneceu resultados muito melhores, com erros relativos entre  $\pm 5\%$  tanto para a potência consumida quanto para a capacidade de refrigeração.

Figura 13 - Erro relativo.



Na próxima seção são expostas as considerações finais referente a construção da bancada didática para avaliação de desempenho de compressores de refrigeração, bem como as recomendações futuras.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma bancada didática inovadora para uso de acadêmicos da engenharia mecânica e cursos afins foi apresentada nesse artigo. A bancada construída de forma modular comportou em sua estrutura todos componentes de refrigeração, e os componentes elétricos e eletrônicos responsáveis pelo acionamento e controle. O projeto visou a ergonomia, e permite que vários alunos possam operar a bancada ao mesmo tempo. Além disso, os dados coletados experimentalmente na bancada permitiram uma análise comparando modelos teóricos que visam a avaliação das curvas de desempenho de compressores utilizados no setor de refrigeração. O fato do circuito de refrigeração operar na região de vapor superaquecido possibilitou a realização de vários ensaios em curto espaço de tempo. O uso da bancada didática aproxima professores e alunos e estimula dessa forma a aquisição e o compartilhamento do conhecimento. As experiências através do “aprender fazendo” e a combinação de novos conhecimentos são internalizadas na forma de modelos mentais ou *know-how* técnico, e permite que organizações de ensino desenvolvam alunos com um maior potencial prático.

Como trabalhos futuros, sugere-se uma frente de pesquisa com ênfase na engenharia do conhecimento que trata justamente de aspectos relacionados a aquisição e compartilhamento do conhecimento.

### Agradecimentos

Esse estudo contou com o apoio do programa EMBRAPPII (POLO/UFSC Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica). Os autores também gostariam de expressar sua gratidão ao inestimável apoio do (Núcleo de Estudos em Inteligência, Gestão e Tecnologias para Inovação IGTI/EGC/UFSC) por acreditar e orientar esse trabalho.

## REFERÊNCIAS

AHRI 571, 2012. **Performance rating of positive displacement carbon dioxide refrigerant compressors and compressor units**. Arlington, VA, USA, 2012.

ANSI/ASHRAE 23, 2005. **Methods of testing for rating positive displacement refrigerant compressors and condensing units**. Atlanta, GA, USA, 2005.

GERONIMO, Alinne. **Aprimoramento da bancada didática portátil de refrigeração**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

KLEIN, S. A.; REINDL, D. T. Develop data base for determining optimum compressor rating points for residential refrigerator and freezer compressors. **RP-870 Report, ASHRAE, Atlanta**, 1999.

LI, Wenhua. Simplified steady-state modeling for hermetic compressors with focus on extrapolation. **International journal of refrigeration**, v. 35, n. 6, p. 1722-1733, 2012.

LUFT, Diego Jankiel. **Estudo de uma bancada didática de refrigeração**, Trabalho de conclusão de curso. Faculdade Horizontina, 2014.

MARCELO R. Figueiredo, *et al.* **Construção e validação de uma bancada didática de impulso hidrostático**, Congresso de Engenharia: Múltiplos saberes e atuações – COBENGE, 2014.

NONAKA, Ikujiro; TAKEUCHI, Hirotaka. Teoria da criação do conhecimento organizacional. **Gestão do conhecimento. Porto Alegre: Bookman**, p. 54-90, 2008.

SILVEIRA, Alexsandro dos Santos. **Desenvolvimento de um Calorímetro Automatizado para Microcompressores de Refrigeração**. M.Sc. tese, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2012.

## CONSTRUCTION AND VALIDATION OF A DIDACTIC BENCH FOR CHARACTERIZATION OF COMPRESSORS

**Abstract:** *This work presents the construction of a didactic bench in the field of mechanical engineering aiming at the practical laboratory practice. The objective was to develop an experimental apparatus that will allow undergraduates of courses such as mechanical engineering to obtain through the bench experimental data that supply theoretical semi-empirical and physical models used in the classroom and by professionals in the refrigeration industry. The models are focused on evaluating the performance curve of compressors. For this purpose, a review in the literature was carried out and related work was analyzed that contribute to the development of this line of research. Next, we tried to describe the main components involved in the construction of the didactic bench. Finally, the didactic bench was validated from the data collected experimentally and compared with the mathematical models. As a result, in addition to stimulating the involvement between theory and practice, this kind of timely bench "learning by doing" through new knowledge shared between teachers and students.*